

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-10-1

Première édition
First edition
2005-10

Transformateurs de puissance –

**Partie 10-1:
Détermination des niveaux de bruit –
Guide d'application**

Power transformers –

**Part 10-1:
Determination of sound levels –
Application guide**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60076-10-1:2005

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-10-1

Première édition
First edition
2005-10

Transformateurs de puissance –

**Partie 10-1:
Détermination des niveaux de bruit –
Guide d'application**

Power transformers –

**Part 10-1:
Determination of sound levels –
Application guide**

© IEC 2005 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives	10
3 Physiques de base du bruit sonore	10
3.1 Pression acoustique, p	10
3.2 Vitesse de particules, u	12
3.3 Intensité acoustique, I	12
3.4 Puissance acoustique, W	12
3.5 Champs acoustiques	14
4 Sources et caractéristiques du son acoustique du transformateur et de la bobine d'inductance	16
4.1 Généralités	16
4.2 Sources	16
4.3 Transmission de vibration	26
4.4 Rayonnement acoustique	28
5 Principes de mesure	28
5.1 Généralités	28
5.2 Mesure du niveau pression acoustique	30
5.3 Mesures d'intensité acoustique	30
5.4 Guide sur les mesures à bande étroite	32
6 Comparaison des méthodes de mesure	38
6.1 Généralités	38
6.2 Sensibilité de la méthode de pression acoustique à l'environnement d'essai	40
6.3 Sensibilité de la méthode d'intensité acoustique à l'environnement d'essai	42
6.4 Guide sur le choix de méthode	46
7 Aspects pratiques des mesures du son acoustique	46
7.1 Généralités	46
7.2 Orientation de l'objet d'essai	46
7.3 Nombre de points de mesure sur une surface de mesure	46
7.4 Choix de l'espacement du microphone pour les mesures d'intensité acoustique	48
7.5 Impact du bruit de fond sur les mesures d'intensité acoustique	50
7.6 Mesures en présence d'écrans d'insonorisation	52
8 Différence entre les essais d'usine et les mesures du niveau acoustique de champ	52
8.1 Généralités	52
8.2 Facteur de puissance de charge	52
8.3 Courant de charge	54
8.4 Tension de fonctionnement	54
8.5 Température de fonctionnement	54
8.6 Les harmoniques dans le courant et la tension de charge	56
8.7 Aimantation par courant continu	56
8.8 Effet de flux rémanent	56
8.9 Formation de niveau sonore due aux réflexions	56
8.10 Influence de la distance lorsqu'on fait des mesures sur le site	58
8.11 Transformateurs de convertisseur avec bobines d'inductance et/ou transformateurs d'interphase à noyau saturable	58

CONTENTS

FOREWORD.....	7
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Basic physics of sound	11
3.1 Sound pressure, p	11
3.2 Particle velocity, u	13
3.3 Sound intensity, I	13
3.4 Sound power, W	13
3.5 Sound fields	15
4 Sources and characteristics of transformer and reactor sound	17
4.1 General	17
4.2 Sources	17
4.3 Vibration transmission	27
4.4 Sound radiation	29
5 Measuring principles	29
5.1 General	29
5.2 Sound pressure level measurement	31
5.3 Sound intensity measurements	31
5.4 Guidance on narrow-band measurements	33
6 Comparison of measuring methods	39
6.1 General	39
6.2 Sensitivity of the sound pressure method to the test environment	41
6.3 Sensitivity of the sound intensity method to test environment	43
6.4 Guidance on method selection	47
7 Practical aspects of making sound measurements	47
7.1 General	47
7.2 Orientation of the test object	47
7.3 Number of measurement points on a measuring surface	47
7.4 Choice of microphone spacer for sound intensity measurements	49
7.5 Impact of background noise on sound intensity measurements	51
7.6 Measurements in the presence of sound-proofing screens	53
8 Difference between factory tests and field sound level measurements	53
8.1 General	53
8.2 Load power factor	53
8.3 Load current	55
8.4 Operating voltage	55
8.5 Operating temperature	55
8.6 Harmonics in the load current and voltage	57
8.7 DC magnetization	57
8.8 Effect of remanent flux	57
8.9 Sound level build-up due to reflections	57
8.10 Influence of distance when making on-site measurements	59
8.11 Converter transformers with saturable reactors and/or interphase transformers	59

9	Spécification des niveaux acoustiques de transformateur et de bobine d'inductance	60
9.1	Généralités	60
9.2	Niveaux acoustiques de garantie	60
9.3	Choix de la méthode d'essai	62
9.4	Conditions de charge	64
9.5	Appareil de refroidissement auxiliaire	66
9.6	Régulation de tension	66
9.7	Conditions de fonctionnement sur site	66
9.8	Exemple de spécification de bruit pour transformateur de puissance et auxiliaires de refroidissement (voir Annexe A)	66
9.9	Exemple de spécification de bruit pour un transformateur de distribution (voir Annexe B)	68
Annexe A (informative) Exemple traité: Transformateur de puissance avec auxiliaires de refroidissement montés sur une structure séparée > 3 m de la surface de rayonnement principale du transformateur – Niveau de puissance acoustique déterminé par l'intermédiaire de la méthode de pression acoustique		70
Annexe B (informative) Exemple traité: Transformateur de distribution, puissance acoustique déterminée par la méthode d'intensité acoustique synchrone		90
Figure 1 – Exemple de courbes montrant le changement relatif de la longueur pour un type de tôles du noyau pendant les cycles complets de l'application d'une induction de courant alternatif de 50 Hz pour différentes densités maximales de flux $B_{\max} = 1,2 \text{ T} - 1,9 \text{ T}$		18
Figure 2 – Induction (ligne continue) et changement relatif de la longueur d'une tôle magnétique (ligne pointillée) en fonction du temps pour une induction maximale c.a. 1,8 Tesla, 50 Hz – pas de polarisation en courant continu		20
Figure 3 – Exemple de courbe montrant le changement relatif de la longueur de tôle pendant un cycle complet d'induction appliqué en courant alternatif avec une petite polarisation en courant continu: 1,8 T, 50 Hz et 0,1 T, 0 Hz		20
Figure 4 – Induction (ligne continue) et changement relatif de la longueur de tôle (pointillée) en fonction du temps dus à l'application de l'induction à courant alternatif avec une petite polarisation en courant continu: 1,8 T, 50 Hz et 0,1 T, 0 Hz		22
Figure 5 – Augmentation du niveau acoustique avec le courant en polarisation continue dans les enroulements		22
Figure 6 – Spectre acoustique du courant de charge typique mesuré dans des conditions de court-circuit		24
Figure 7 – Disposition de microphone		32
Figure 8 – Environnement d'essai		40
Figure 9 – Distribution des perturbations à la pression acoustique dans l'environnement d'essai		42
Figure 10 – Croquis du transformateur de type sec montrant les points de mesure		48
Figure 11 – Illustration du bruit d'ambiance traversant la zone d'essai et le son acoustique rayonné de l'objet d'essai. Positions de paire de microphones indiquées par les cercles ouverts (microphone A) et fermés (microphone B)		50
Tableau 1 – Valeurs de pondération A en fonction de la fréquence		36

9	Specifying transformer and reactor sound levels.....	61
9.1	General.....	61
9.2	Guarantee sound levels.....	61
9.3	Choice of test method	63
9.4	Load conditions	65
9.5	Auxiliary cooling equipment.....	67
9.6	Voltage regulation	67
9.7	On-site operating conditions	67
9.8	Example noise specification for power transformer and cooling auxiliaries (see Annex A)	67
9.9	Example noise specification for a distribution transformer (see Annex B)	69
Annex A (informative) Worked example: Power transformer with cooling auxiliaries mounted on a separate structure >3 m from the principal radiating surface of the transformer – Sound power level determined via sound pressure method		71
Annex B (informative) Worked example: Distribution transformer, sound power determined via time-synchronous sound intensity method.....		91
Figure 1 – Example curves showing relative change in length for one type of core lamination during complete cycles of applied 50 Hz a.c. induction up to different peak flux densities $B_{\max} = 1,2 \text{ T} - 1,9 \text{ T}$		19
Figure 2 – Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted) as a function of time due to applied a.c. induction: 1,8 T, 50 Hz – no d.c. bias.....		21
Figure 3 – Example curve showing relative change in lamination length during one complete cycle of applied a.c. induction with a small d.c. bias: 1,8 T, 50 Hz and 0,1 T, 0 Hz.....		21
Figure 4 – Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted) as a function of time due to applied a.c. induction with a small d.c. bias: 1,8 T, 50 Hz and 0,1 T, 0 Hz.....		23
Figure 5 – Sound level increase with d.c. current in the windings.....		23
Figure 6 – Typical load current sound spectrum measured under short-circuit conditions		25
Figure 7 – Microphone arrangement		33
Figure 8 – Test environment		41
Figure 9 – Distribution of disturbances to sound pressure in the test environment.....		43
Figure 10 – Sketch of dry-type transformer showing measurement points		49
Figure 11 – Illustration of background sound passing through test area and sound radiated from the test object. Microphone pair positions indicated by open (microphone A) and full (microphone B) circles		51
Table 1 – Values of A-weighting as a function of frequency.....		37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 10-1: Détermination des niveaux de bruit – Guide d'application

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 60076-10-1 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

La présente norme doit être lue conjointement avec la CEI 60076-10.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/505/FDIS	14/513/RVD

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

**Part 10-1: Determination of sound levels –
Application guide**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60076-10-1 has been prepared by technical committee 14: Power transformers.

This standard is to be read in conjunction with IEC 60076-10.

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

FDIS	Report on voting
14/505/FDIS	14/513/RVD

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

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

La CEI 60076 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance*:

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Echauffement
- Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air
- Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manoeuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance
- Partie 5: Tenue au court-circuit
- Partie 6: Réacteurs (à l'étude)
- Partie 7: Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile
- Partie 8: Guide d'application
- Partie 10: Détermination des niveaux de bruit
- Partie 10-1: Détermination des niveaux de bruit – Guide d'application
- Partie 11: Transformateurs de type sec
- Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance du type sec (à l'étude)
- Partie 13: Transformateurs auto-protégés à remplissage liquide
- Partie 14: Conception et application des transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température
- Partie 15: Gas-filled-type power transformers (titre français non disponible, à l'étude)

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

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

IEC 60076 consists of the following parts, under the general title *Power transformers*:

- Part 1: General
- Part 2: Temperature rise
- Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors
- Part 5: Ability to withstand short circuit
- Part 6: Reactors (under consideration)
- Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers
- Part 8: Application guide
- Part 10: Determination of sound levels
- Part 10-1: Determination of sound levels – Application guide
- Part 11: Dry-type transformers
- Part 12: Loading guide for dry-type power transformers (under consideration)
- Part 13: Self-protected liquid filled transformers
- Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials
- Part 15: Gas-filled-type power transformers (under consideration).

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

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

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 10-1: Détermination des niveaux de bruit – Guide d'application

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 fournit un support d'information pour aider aussi bien les constructeurs que les acheteurs à appliquer les techniques de mesure décrites dans la CEI 60076-10. Les sources et les caractéristiques du bruit du transformateur et de la bobine d'inductance sont décrites. Un guide pratique pour réaliser les mesures est donné, et les facteurs qui peuvent influencer la précision des méthodes sont examinés. Ce guide d'application clarifie également les facteurs dont il convient qu'ils fassent l'objet d'un accord entre fabricant et acheteur lorsque l'on spécifie un transformateur ou une bobine d'inductance, et il indique également pourquoi les valeurs mesurées chez le constructeur peuvent différer de celles mesurées sur site.

Les informations fournies dans ce guide d'application sont applicables aux transformateurs et aux bobines d'inductance ainsi qu'à leurs auxiliaires de refroidissement associés.

2 Références normatives

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

CEI 60076-10:2005, *Transformateurs de puissance – Partie 10: Détermination des niveaux de bruit*

3 Physiques de base du bruit sonore

3.1 Pression acoustique, p

Le son peut être défini comme toute variation de pression (dans l'air, dans l'eau ou dans d'autres milieux élastiques) que l'oreille humaine peut détecter. Les variations de pression traversent le milieu (pour les besoins du présent document, l'air) de la source du bruit sonore jusqu'aux oreilles de l'utilisateur. Le nombre de variations de pression cycliques par seconde s'appelle la «fréquence» du son, et est mesuré en hertz (Hz). La fréquence d'un son acoustique produit sa propre tonalité distinctive ou pas. Le ronflement d'un transformateur est à faible fréquence, fondamentalement 100 Hz ou 120 Hz, tandis qu'un sifflement est à haute fréquence, typiquement au-dessus de 3 kHz. La gamme normale d'audition pour un jeune en bonne santé s'étend approximativement de 20 Hz à 20 kHz.

Une autre caractéristique utilisée pour décrire un son acoustique est l'amplitude des fluctuations de pression qui est mesurée en pascals (Pa). Le son acoustique le plus faible qu'une oreille humaine saine peut détecter dépend fortement de la fréquence; à 1 kHz, il possède une amplitude de 20 μ Pa. Le seuil de la douleur correspond à une pression acoustique de plus d'un million de fois plus élevée. Par conséquent, pour éviter l'utilisation de grands nombres, l'échelle décibel (dB) est utilisée.

POWER TRANSFORMERS –

Part 10-1: Determination of sound levels – Application guide

1 Scope

This part of IEC 60076 provides supporting information to help both manufacturers and purchasers apply the measurement techniques described in IEC 60076-10. The sources and characteristics of transformer and reactor sound are described. Practical guidance on making measurements is given, and factors that may influence the accuracy of the methods are discussed. This application guide also clarifies those factors which should be agreed between manufacturer and purchaser when specifying a transformer or reactor, and indicates why values measured in the factory may differ from those measured on site.

This application guide is applicable to transformers and reactors together with their associated cooling auxiliaries.

2 Normative references

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

IEC 60076-10:2005, *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*

3 Basic physics of sound

3.1 Sound pressure, p

Sound may be defined as any pressure variation (in air, water or other elastic media) that the human ear can detect. The pressure variations travel through the medium (for the purposes of this document, air) from the source of the sound to the listener's ears. The number of cyclic pressure variations per second is called the 'frequency' of the sound, and is measured in hertz (Hz). The frequency of a sound produces its own distinctive tone or pitch. A transformer 'hum' is low frequency, fundamentally 100 Hz or 120 Hz, while a whistle is high frequency, typically above 3 kHz. The normal range of hearing for a healthy young person extends from approximately 20 Hz to 20 kHz.

A further characteristic used to describe a sound is the amplitude of the pressure fluctuations which is measured in pascals (Pa). The weakest sound that a healthy human ear can detect is strongly dependent on frequency; at 1 kHz it has an amplitude of 20 μ Pa. The threshold of pain corresponds to a sound pressure of more than a million times higher. Therefore, to avoid the use of large numbers, the decibel scale (dB) is used.

L'échelle dB est «logarithmique» et utilise un niveau de référence, p_0 , de 20 μPa , qui correspond alors à 0 dB. Le niveau de pression acoustique L_p est défini dans l'équation 1 suivante:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \quad (1)$$

où p est la pression acoustique mesurée par un microphone. La pression acoustique est une grandeur scalaire, ce qui signifie qu'elle possède l'amplitude seulement.

Un aspect utile de l'échelle décibel est qu'elle donne une meilleure approximation de la perception humaine du volume relatif en comparaison de l'échelle linéaire en pascal. Cela s'explique par le fait que l'oreille répond au son acoustique de manière logarithmique. Cependant, l'oreille humaine ne répond pas par la même quantité pour chaque fréquence, par conséquent un filtre approprié est exigé pour s'assurer que les mesures de microphone reflètent vraiment le son acoustique perçu par l'oreille. Un filtre normalisé internationalement, nommé «pondération A», compose cette exigence.

3.2 Vitesse de particules, u

Cette quantité décrit la vitesse d'oscillation des particules du milieu dans lequel les ondes acoustiques se propagent. Elle est mesurée en mètres par seconde, ms^{-1} .

3.3 Intensité acoustique, I

L'intensité acoustique est une grandeur vectorielle décrivant l'amplitude et le sens du flux total d'énergie acoustique dans une position donnée. C'est le produit moyen temporel de la pression acoustique et de la vitesse de particules à un point donné.

$$I = \overline{p \times u} \quad (2)$$

Elle est mesurée en watts par mètre carré, Wm^{-2} . Le sens du flux d'énergie est donné par l'angle de phase entre la pression acoustique et la vitesse de particules à l'endroit spécifique. (La pression acoustique peut être considérée comme analogue à la tension tandis que la vitesse de particules est analogue au courant quand on considère le flux de l'énergie électrique). L'intensité acoustique normale est le taux du flux d'énergie acoustique à travers une unité de surface, mesurée dans le sens perpendiculaire (c'est-à-dire à 90°) par rapport à l'unité de surface spécifiée.

3.4 Puissance acoustique, W

Une source de bruit rayonne la puissance dans l'air environnant ayant pour résultat un champ de pression acoustique. La puissance acoustique est la cause. La pression acoustique est l'effet. La pression acoustique qui est entendue (ou mesurée avec un microphone) dépend de la distance de la source et de l'environnement acoustique. Par conséquent, la bruyance d'une source ne peut pas être quantifiée en mesurant simplement la pression acoustique seule. Par contre, il est nécessaire de déterminer sa puissance acoustique; celle-ci est indépendante de l'environnement et est un descripteur unique de bruyance d'une source sonore.

La puissance acoustique est le taux auquel l'énergie est rayonnée (énergie par unité de temps) et est mesurée en watts.

The dB scale is 'logarithmic' and uses 20 µPa as the reference level, p_0 , which then corresponds to 0 dB. Sound pressure level L_p is defined in equation 1:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \quad (1)$$

where p is the sound pressure measured by a microphone. Sound pressure is a scalar quantity, which means that it has magnitude only.

A useful aspect of the decibel scale is that it gives a better approximation to the human perception of relative loudness than the linear pascal scale. This is because the ear responds to sound logarithmically. However, the human ear does not respond by the same amount for each frequency, hence a suitable filter is required to ensure that the microphone measurements truly reflect the sound perceived by the ear. An internationally-standardized filter, termed 'A weighting', addresses this requirement.

3.2 Particle velocity, u

This quantity describes the oscillation velocity of the particles of the medium in which the sound waves are propagating. It is measured in metres per second, ms^{-1} .

3.3 Sound intensity, I

Sound intensity is a vector quantity describing the magnitude and direction of the nett flow of sound energy at a given position. It is the time-averaged product of the sound pressure and particle velocity at a given point.

$$I = \overline{p \times u} \quad (2)$$

It is measured in watts per square metre, Wm^{-2} . The direction of the energy flow is given by the phase angle between the sound pressure and particle velocity at the specific location. (sound pressure can be thought of as analogous to voltage while the particle velocity is analogous to current when considering the flow of electrical energy.) The normal sound intensity is the rate of sound energy flow through a unit area, measured in a direction normal (that is at 90°) to the specified unit area.

3.4 Sound power, W

A sound source radiates power into the surrounding air resulting in a sound pressure field. Sound power is the cause. Sound pressure is the effect. The sound pressure which is heard (or measured with a microphone) is dependent on the distance from the source and the acoustic environment. Therefore, the noisiness of a source cannot be quantified by simply measuring sound pressure alone. Instead, it is necessary to determine its sound power; this is independent of the environment and a unique descriptor of the noisiness of a sound source.

Sound power is the rate at which energy is radiated (energy per unit time) and is measured in watts.

3.5 Champs acoustiques

3.5.1 Généralités

Un champ acoustique est une région dans laquelle il y a du son. Le champ acoustique est classifié selon la manière dont les ondes acoustiques se propagent. La relation précise entre la pression acoustique et l'intensité acoustique est connue uniquement dans les deux premiers cas spéciaux décrits en 3.5.2 et 3.5.3.

3.5.2 Le champ libre

Ce terme décrit la propagation acoustique dans un espace libre idéalisé où il n'y aura pas de réflexions. La propagation acoustique d'une source ponctuelle dans un champ libre est caractérisée par une baisse de 6 dB du niveau de pression acoustique et du niveau d'intensité chaque fois que la distance de la source est doublée dans le sens de la propagation acoustique. Cela est également vrai lorsque la distance d'une source étendue est assez grande pour la traiter comme source ponctuelle. Ces conditions se retrouvent en plein air à une distance suffisante du sol et de tous les murs, ou dans une chambre entièrement anéchoïde où l'intégralité du bruit qui heurte les murs, le plafond ou le plancher est absorbée.

NOTE La CEI 60076-10 exige que toutes les mesures du son acoustique soient réalisées sur une surface réfléchissante. Par conséquent, les mesures dans les chambres entièrement anéchoïdes ne sont pas autorisées.

3.5.3 Le champ diffus

Dans un champ diffus, le son acoustique est reflété autant de fois qu'il voyage dans toutes les directions d'amplitude et de probabilité égales, d'où le même niveau de pression acoustique à tous les endroits. Ce champ est approché dans une salle à écho. Selon la loi de la conservation d'énergie, un état d'équilibre se produira quand la puissance acoustique absorbée ou transmise à travers l'enveloppe égale la puissance acoustique émise par la source. Ce phénomène peut avoir comme conséquence des niveaux très élevés de pression acoustique dans les environnements ayant de faibles caractéristiques d'absorption ou de transmission acoustique.

3.5.4 Champs acoustiques actifs et réactifs

La propagation acoustique correspond au flux d'énergie, mais il peut y avoir une pression acoustique mesurable quand il n'y a aucune propagation nette.

Si la pression acoustique et la vitesse acoustique d'une particule sont en phase, le résultat est un champ totalement actif. Dans ce cas, toute énergie émise par la source est transmise à l'extérieur.

Dans un champ réactif pur, il n'y a aucun flux d'énergie net; la pression acoustique est à 90° en discordance de phase avec la vitesse acoustique de particules. À tout moment, l'énergie peut voyager à l'extérieur, mais elle sera retournée à un instant postérieur; l'énergie est stockée comme dans un ressort. Sur un nombre entier de cycles, la moyenne du transfert d'énergie nette est nulle et par conséquent l'intensité acoustique mesurée est nulle.

En général, un champ acoustique aura les deux composantes active et réactive.

3.5.5 Ondes stationnaires

Les ondes stationnaires apparaissent dans les champs acoustiques en raison des réflexions entre une source de bruit et les limites du champ acoustique. Par exemple, dans une salle, l'existence d'une onde stationnaire de fréquence, f , dépend de la distance, d , entre les murs réfléchissants comme suit:

3.5 Sound fields

3.5.1 General

A sound field is a region in which there is sound. It is classified according to the manner in which the sound waves propagate. The precise relationship between sound pressure and sound intensity is known in only the first two special cases described in 3.5.2 and 3.5.3.

3.5.2 The free field

This term describes sound propagation in an idealised free space where there are no reflections. Sound propagation from a point source in a free field is characterised by a 6 dB drop in sound pressure level and intensity level each time the distance from the source is doubled in the direction of sound propagation. This is also approximately correct when the distance from an extended source is large enough to treat it as a point source. These conditions hold in the open air when sufficiently far away from the ground and any walls, or in a fully anechoic chamber where all the sound that strikes the walls, ceiling or floor is absorbed.

NOTE IEC 60076-10 requires all sound measurements to be made over a reflecting surface. Therefore, measurements in fully anechoic chambers are not allowed.

3.5.3 The diffuse field

In a diffuse field, sound is reflected so many times that it travels in all directions with equal magnitude and probability, hence the same sound pressure level exists at all locations. This field is approximated in a reverberant room. According to the law of conservation of energy, an equilibrium condition will occur when the sound power absorbed by or transmitted through the enclosure equals the sound power emitted by the source. This phenomenon may result in very high sound pressure levels in environments having low sound absorption or transmission characteristics.

3.5.4 Active and reactive sound fields

Sound propagation involves energy flow, but there can be a measurable sound pressure when there is no nett propagation.

If sound pressure and particle velocity are in phase, the result is a totally active field. In this case, all energy emitted by the source is transmitted outwards.

In a pure reactive field, there is no nett energy flow; sound pressure is 90° out of phase with particle velocity. At any instant, energy may be travelling outward, but it will be returned at a later instant; the energy is stored as if in a spring. Averaged over a whole number of cycles, the nett energy transfer is zero and hence the measured sound intensity is zero.

In general, a sound field will have both active and reactive components.

3.5.5 Standing waves

Standing waves arise in sound fields as a result of reflections between a sound source and the boundaries of the sound field. For example, in a room, the existence of a standing wave of frequency, f , depends upon the distance, d , between the reflecting walls as follows:

$$f = \frac{c}{2d} \quad (3)$$

où c est la vitesse du son dans l'air en m/s. A 20 °C, $c = 343$ m/s.

Une onde stationnaire ne transmet pas d'énergie au champ lointain; c'est un exemple d'un champ réactif. A l'intérieur de la région d'une onde stationnaire, de grandes variations de la pression acoustique mesurée se produiront sur de petites distances.

3.5.6 Le champ proche

Le champ proche est une région près d'une source de bruit, habituellement définie comme à l'intérieur d'une distance du $\frac{1}{4}$ de la longueur d'onde de la tonalité à mesurer. Dans cette région, l'air agit en tant que système de masse-ressort qui stocke l'énergie qui circule sans propagation. C'est pourquoi le champ proche peut avoir une composante réactive significative.

A 20 °C dans l'air, la longueur d'onde d'une tonalité de 100 Hz est de 3,4 m, alors que celle d'une tonalité de 1 kHz est de 0,34 m.

4 Sources et caractéristiques du son acoustique du transformateur et de la bobine d'inductance

4.1 Généralités

Le bruit du transformateur et de la bobine d'inductance a plusieurs origines. L'importance relative de chaque mode de génération de son acoustique dépend de la conception des appareils et de leurs conditions de fonctionnement. La conception du transformateur ou de la bobine d'inductance modifiera également les vibrations produisant le son acoustique puisqu'elles partent de leur point origine jusqu'à la cuve du transformateur ou à l'enveloppe extérieure.

4.2 Sources

4.2.1 Magnétostriction

La magnétostriction est le changement des dimensions, qui est observé dans certains matériaux quand ils sont soumis à un changement de flux magnétique. Pour la tôle magnétique, le changement dimensionnel est dans la gamme de 10^{-7} à 10^{-5} mètres par longueur de mètre aux niveaux typiques d'induction. La Figure 1 montre la magnétostriction par rapport à l'induction pour un type de tôles du noyau mesuré pour cinq densités de flux différentes. Chaque boucle décrit un cycle de 50 Hz avec une densité de flux de $B_{\max}$.

$$f = \frac{c}{2d} \quad (3)$$

where c is the speed of sound in air in m/s. At 20 °C, $c = 343$ m/s.

A standing wave does not transmit energy to the far field; it is an example of a reactive field. Within the region of a standing wave, large variations in measured sound pressure will occur over small distances.

3.5.6 The near-field

The near-field is a region close to a sound source, usually defined as within a distance of $\frac{1}{4}$ of the wavelength of the tone to be measured. In this region, the air acts as a mass-spring system that stores energy that circulates without propagating. The near-field therefore can have a significant reactive component.

At 20 °C in air, the wavelength of a 100 Hz tone is 3,4 m, while that of a 1 kHz tone is 0,34 m.

4 Sources and characteristics of transformer and reactor sound

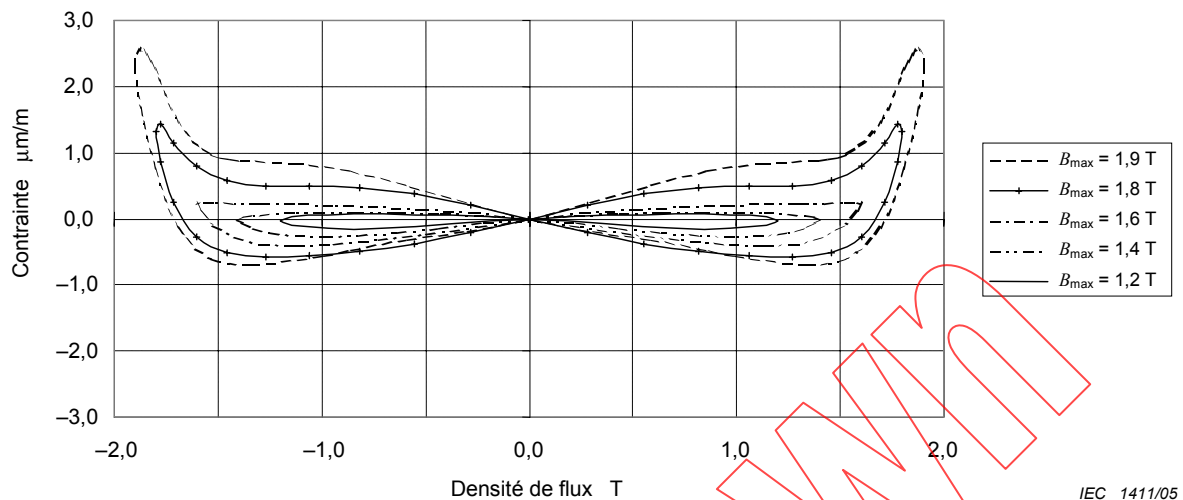
4.1 General

Transformer and reactor sound have several origins. The relative importance of each mode of sound generation depends on the design of the equipment and its operating conditions. The design of the transformer or reactor will also modify the sound-producing vibrations as they travel from their origin to the transformer tank or enclosure surface.

4.2 Sources

4.2.1 Magnetostriction

Magnetostriction is the change in dimensions, which is observed in certain materials when they are subjected to a change in magnetic flux. In magnetic core steel, the dimensional change is in the range of 10^{-7} to 10^{-5} metres per metre length at typical induction levels. Figure 1 shows magnetostriction vs. flux density for one type of core lamination measured at five different flux densities. Each loop describes one 50 Hz cycle with flux density $B_{\max}$.



IEC 1411/05

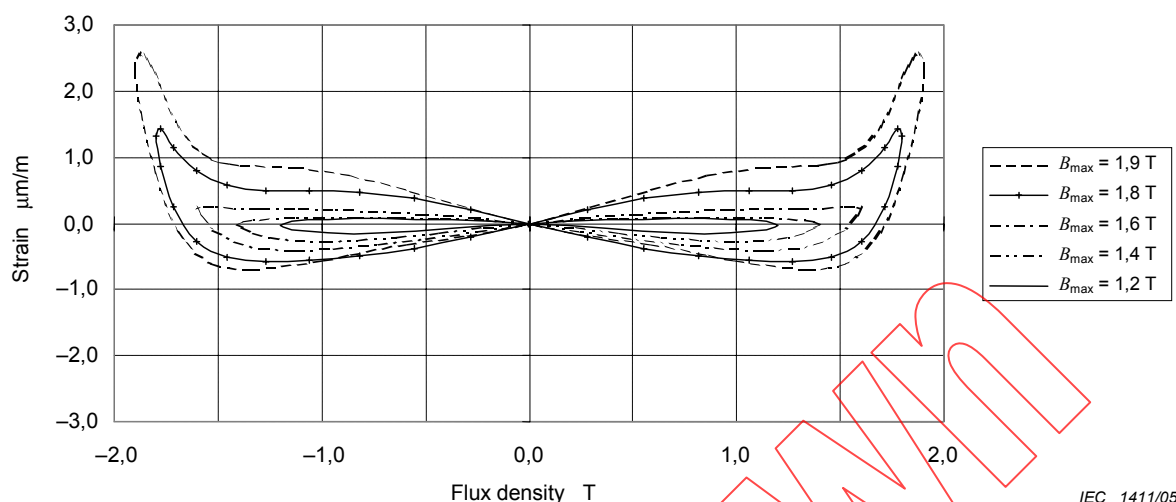
Figure 1 – Exemple de courbes montrant le changement relatif de la longueur pour un type de tôles du noyau pendant les cycles complets de l'application d'une induction de courant alternatif de 50 Hz pour différentes densités maximales de flux

$$B_{\max} = 1,2 \text{ T} - 1,9 \text{ T}$$

NOTE Pour une qualité de tôle donnée, la contrainte mécanique dans les tôles du noyau aura une influence importante sur la magnétostriction.

Les contraintes ne dépendent pas du signe de l'induction, mais uniquement de son amplitude et de l'orientation relative de certains axes cristallographiques du matériel. Par conséquent, en étant excitée par un flux sinusoïdal, la fréquence fondamentale de la variation des dimensions sera deux fois la fréquence d'excitation. L'effet est fortement non linéaire, particulièrement en haut, près de la saturation, qui correspond aux niveaux d'induction. La non-linéarité aura comme conséquence un résidu harmonique significatif dans le spectre de vibration du noyau. La Figure 2 montre la magnétostriction sous l'induction oscillante à $B = 1,8 \text{ T}$, 50 Hz. Elle a une périodicité de deux fois la fréquence d'excitation (avec ses harmoniques) et les crêtes à 5 ms et à 15 ms sont indiscernables.

Le son acoustique émis par les noyaux du transformateur dépend de la vitesse de vibrations, c'est-à-dire la dérivée temporelle de la magnétostriction (ligne pointillée) visible sur la Figure 2. L'effet de la dérivation est de souligner les harmoniques (déformation) du signal par rapport au fondamental $2 \times$ la fréquence d'excitation. Plusieurs multiples pairs de la fréquence d'excitation seront observés dans le spectre et le fondamental $2 \times$ la fréquence d'excitation est rarement la composante de fréquence la plus importante du son acoustique.



IEC 1411/05

Figure 1 – Example curves showing relative change in length for one type of core lamination during complete cycles of applied 50 Hz a.c. induction up to different peak flux densities $B_{\max} = 1,2 \text{ T} - 1,9 \text{ T}$

NOTE For a given quality of steel, the mechanical stress in the core laminations will have a strong influence on the magnetostriction.

The strain does not depend on the sign of the flux density, only on its magnitude and orientation relative to certain crystallographic axes of the material. Therefore, when excited by a sinusoidal flux, the fundamental frequency of the dimensional change will be twice the exciting frequency. The effect is highly non-linear, especially at high, near saturation, induction levels. The non-linearity will result in a significant harmonic content in the vibration spectrum of the core. Figure 2 shows magnetostriction under oscillating induction to $B = 1,8 \text{ T}$, 50 Hz. It has a periodicity of twice the exciting frequency (and its harmonics) and the peaks at 5 ms and 15 ms are indistinguishable.

The sound emitted by transformer cores depends on the velocity of the vibrations, i.e. the time derivative of the magnetostriction (dotted line) seen in Figure 2. The effect of derivation is to emphasise the harmonics (distortion) of the signal in relation to the fundamental $2 \times$ exciting frequency. Several even multiples of the exciting frequency will be seen in the spectrum and the fundamental $2 \times$ exciting frequency is seldom the most important frequency component of the sound.

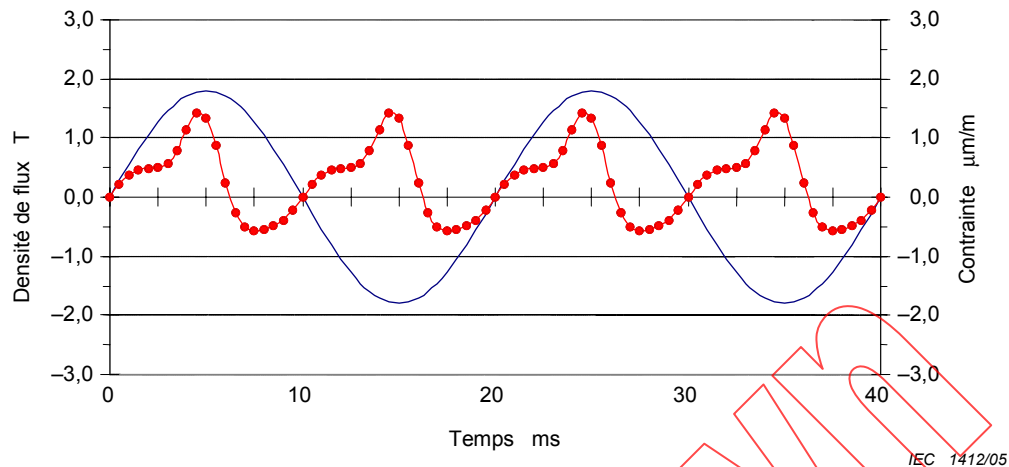


Figure 2 – Induction (ligne continue) et changement relatif de la longueur d'une tôle magnétique (ligne pointillée) en fonction du temps pour une induction maximale c.a. 1,8 Tesla, 50 Hz – pas de polarisation en courant continu

Si le flux a une polarisation en courant continu c.c., par exemple en raison d'une rémanence dans le noyau des mesures précédentes de la résistance des enroulements, ou en raison d'une composante continue dans le courant, l'importante non-linéarité de la magnétostriction cause une augmentation significative des amplitudes de vibration. Avec une polarisation en courant continu c.c. sur l'induction, il y a une différence importante entre les crêtes dans la magnétostriction et les crêtes positives et négatives dans la densité de flux; cela est évident à partir de la boucle à magnétostriction de la Figure 3.

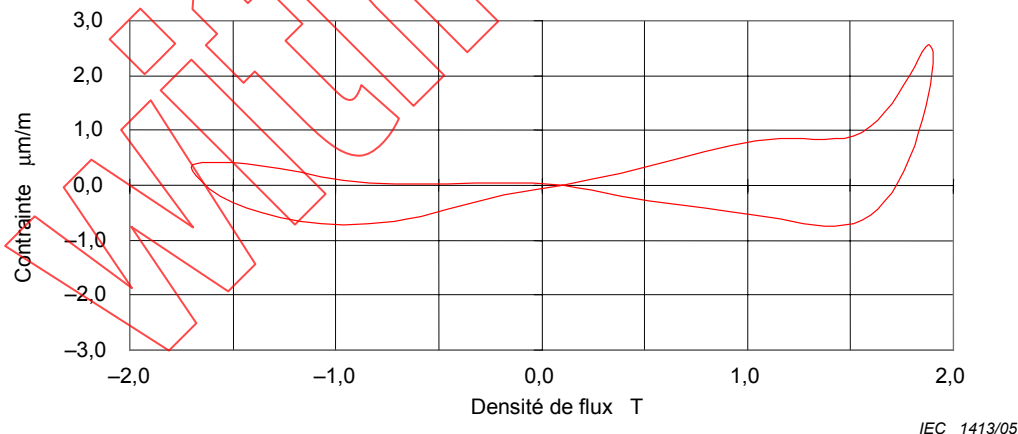


Figure 3 – Exemple de courbe montrant le changement relatif de la longueur de tôle pendant un cycle complet d'induction appliqué en courant alternatif avec une petite polarisation en courant continu: 1,8 T, 50 Hz et 0,1 T, 0 Hz

Le modèle de vibration est répété tous les 360°, ce qui correspond à toutes les 20 ms dans un système de 50 Hz, indiquant une magnétostriction à $1 \times$ la fréquence d'excitation. Voir la Figure 4. La présence des crêtes dans le spectre aux multiples impairs de la fréquence d'excitation est une indication claire de polarisation continue dans l'induction.

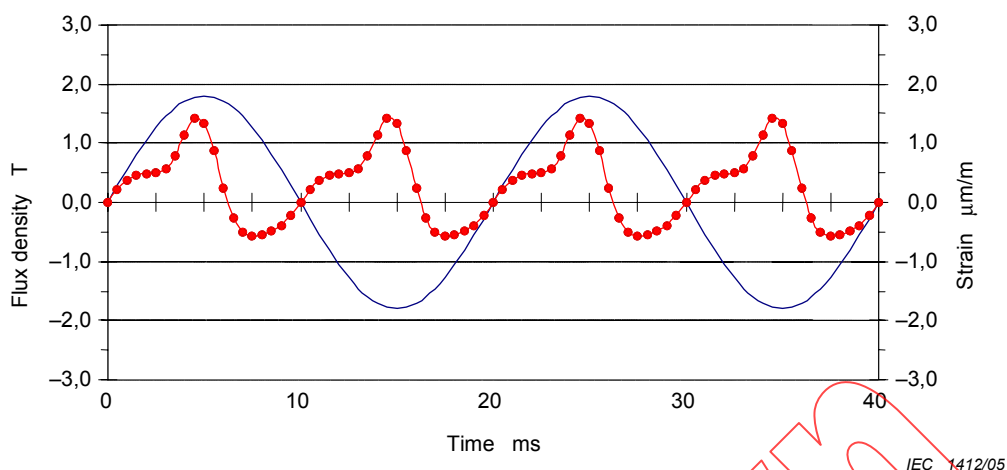


Figure 2 – Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted) as a function of time due to applied a.c. induction: 1,8 T, 50 Hz – no d.c. bias

If the flux has a d.c. bias, for example due to remanence in the core from preceding measurements of the windings' resistance, or due to a d.c. component in the current, the strong non-linearity of magnetostriction causes a significant increase in vibration amplitudes. With a d.c. bias on the induction, the peaks in magnetostriction at the positive and negative peaks in flux density differ significantly; this is obvious from the magnetostriction loop of Figure 3.

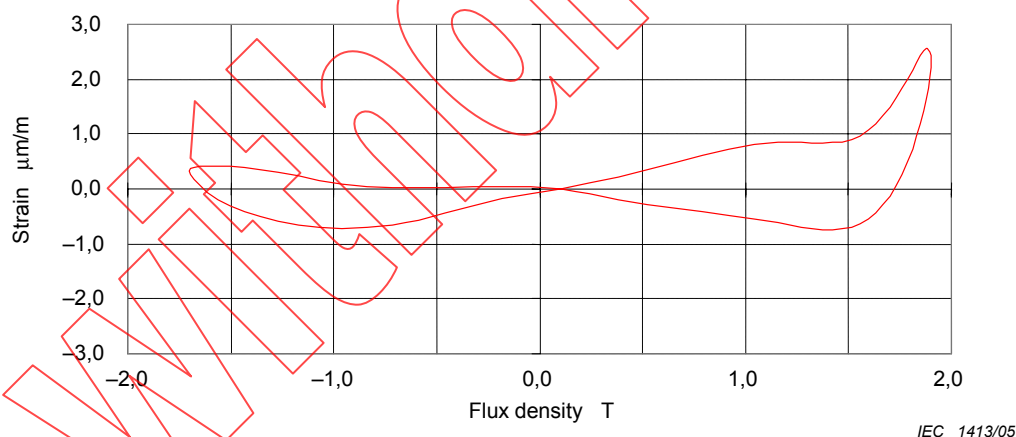


Figure 3 – Example curve showing relative change in lamination length during one complete cycle of applied a.c. induction with a small d.c. bias: 1,8 T, 50 Hz and 0,1 T, 0 Hz

The vibration pattern is repeated every 360° , that is every 20 ms in a 50 Hz system, indicating a magnetostriction at $1 \times$ the exciting frequency. See Figure 4. The presence of peaks in the spectrum at odd multiples of the exciting frequency, is a clear indication of d.c. bias in the induction.

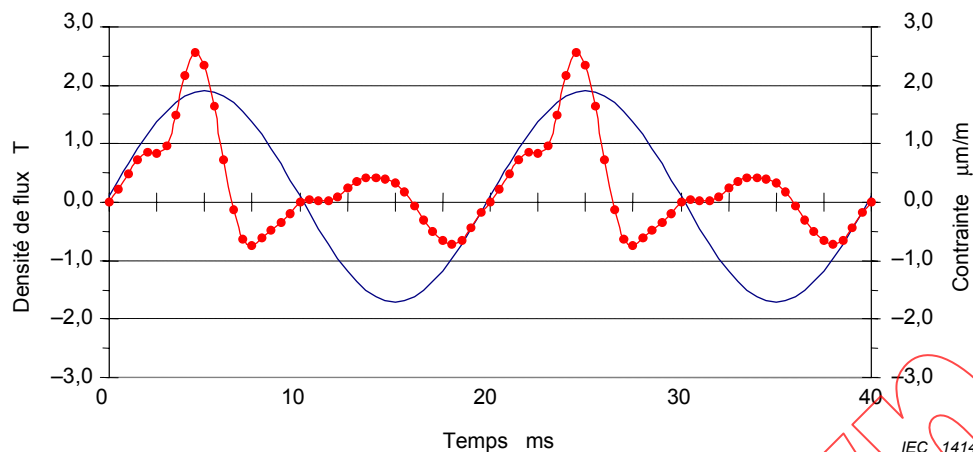
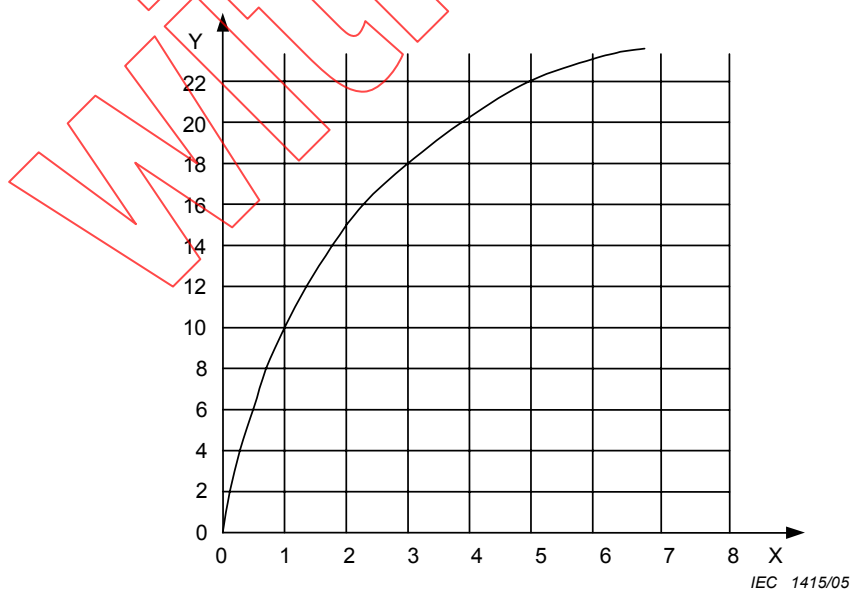


Figure 4 – Induction (ligne continue) et changement relatif de la longueur de tôle (pointillée) en fonction du temps dus à l'application de l'induction à courant alternatif avec une petite polarisation en courant continu: 1,8 T, 50 Hz et 0,1 T, 0 Hz

En raison de la possibilité de magnétisation en polarisation continue affectant les vraies mesures, il est recommandé qu'un transformateur subissant les essais acoustiques soit maintenu entièrement activé jusqu'à ce que les effets des courants d'appel et de rémanence aient disparu et les niveaux acoustiques soient stabilisés avant de faire des mesures. Si une magnétisation continue résiduelle est présente, le niveau acoustique peut être affecté pendant quelques minutes ou, dans les cas extrêmes, pendant plusieurs heures.

Le rapport entre le courant en polarisation continue et le courant à vide est un paramètre important pour la détermination de l'augmentation prévisible de la puissance acoustique provoquée par le courant en polarisation continue. La relation entre le courant en polarisation continue et l'augmentation du niveau acoustique a été mesurée sur un certain nombre de gros transformateurs de puissance; la Figure 5 montre un ensemble de ces données.



Légende

Axe X courant en polarisation continue par unité de courant à vide alternatif

Axe Y augmentation dans le niveau acoustique total dB(A)

Figure 5 – Augmentation du niveau acoustique avec le courant en polarisation continue dans les enroulements

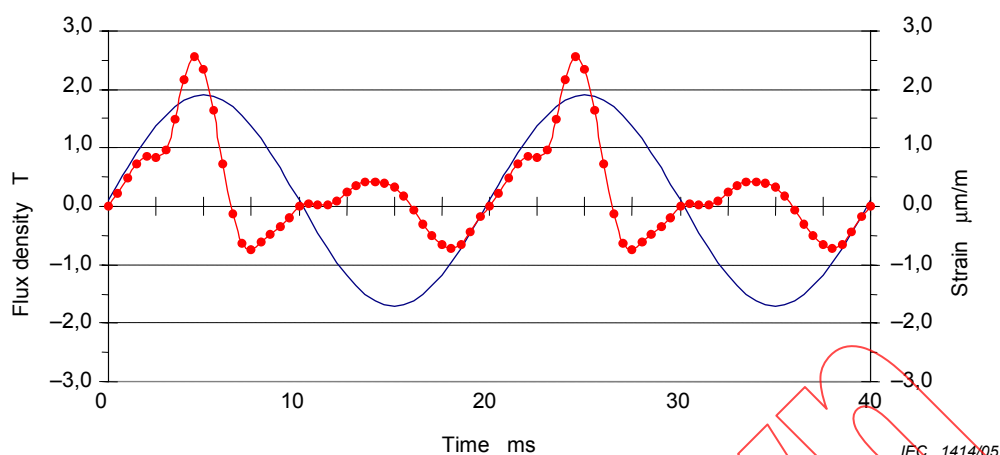
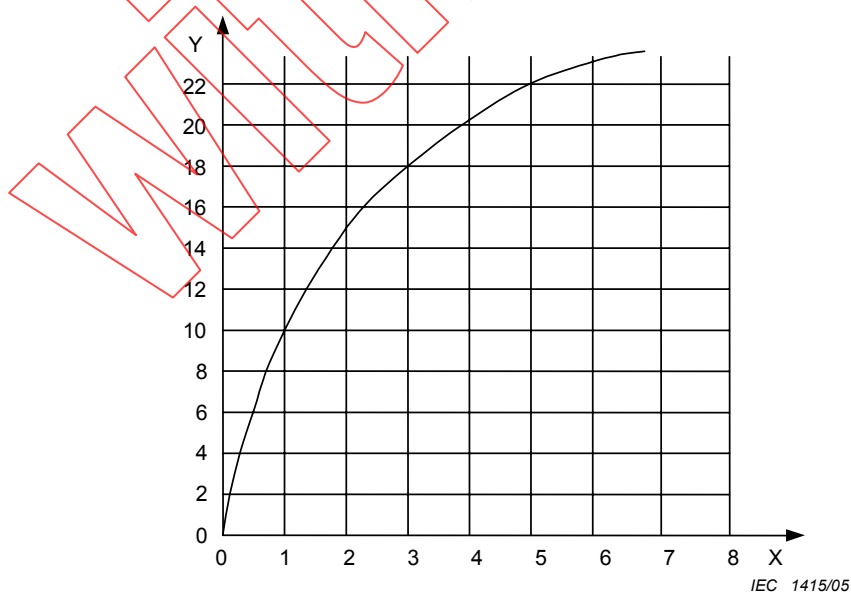


Figure 4 – Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted) as a function of time due to applied a.c. induction with a small d.c. bias: 1,8 T, 50 Hz and 0,1 T, 0 Hz

Because of the possibility of d.c. bias magnetization affecting the true measurements, a transformer undergoing sound tests should be kept fully energised until the effects of inrush currents and remanence have died away and the sound levels have stabilised before making measurements. If residual d.c. magnetization is present, the sound level may be affected for a few minutes or, in extreme cases, for several hours.

The ratio between the d.c. bias current and the no-load current is an important parameter in determining the expected increase in sound power caused by the d.c. bias current. The relationship between d.c. bias current and sound level increase has been measured on a number of large power transformers; Figure 5 shows one set of this data.



Key

X axis d.c. bias current as per unit of a.c. no-load current

Y axis increase in total sound level in dB(A)

Figure 5 – Sound level increase with d.c. current in the windings

NOTE La Figure 5 montre les résultats pour une certaine conception de gros transformateur de puissance. Pour d'autres constructions, par exemple de forme de noyau différente ou de qualité en acier de noyau différente, la courbe semblera différente dans le détail mais contient en principe la même tendance à la hausse.

4.2.2 Forces électromagnétiques dans les enroulements

Le courant de charge dans les enroulements des transformateurs et des bobines d'inductance produit un champ magnétique qui oscille à la fréquence de réseau. Les forces électromagnétiques résultantes agissent dans les deux directions axiales et radiales dans les enroulements. L'importance de ces forces dépend seulement de l'importance du courant de charge et du champ magnétique local, qui est également une fonction du courant de charge. Ainsi, les forces magnétiques dans les enroulements sont proportionnelles au carré du courant de charge tandis que leur fréquence est deux fois la fréquence de réseau. Les amplitudes de vibration résultantes dépendent des propriétés élastiques du conducteur et de l'isolation électrique. Dans un enroulement bien fixé et fermement bobiné, les propriétés élastiques du matériel isolant sont presque linéaires dans la gamme des déplacements se produisant sous les courants de fonctionnement normaux. Les métaux ont des modules élastiques très linéaires. Par conséquent, une petite vibration harmonique est normalement produite, et le fondamental et peut-être la première harmonique dominent le spectre de vibration, voir Figure 6.

Les déviations des enroulements et de leurs vitesses de vibration sont proportionnelles à la force d'excitation, c'est-à-dire proportionnelles au carré du courant de charge. La puissance acoustique rayonnée d'un corps vibrant est proportionnelle au carré de la vitesse de vibration (voir 4.4). En conséquence, la puissance acoustique change avec la quatrième puissance du courant de charge. Dans les applications exigeant des transformateurs de faible niveau acoustique, la puissance acoustique du courant de charge produite par l'enroulement peut apporter une contribution significative à la puissance acoustique globale du transformateur, voir 6.3 de la CEI 60076-10.

Les harmoniques dans le courant de charge sont audibles dans le spectre acoustique à deux fois leur fréquence électrique et à la somme et à la différence de toutes les fréquences constituantes. Ils peuvent apporter une contribution significative au niveau acoustique du transformateur ou de la bobine d'inductance, par exemple en fonctionnant dans des groupes convertisseurs de CCHT ou des transformateurs redresseurs.

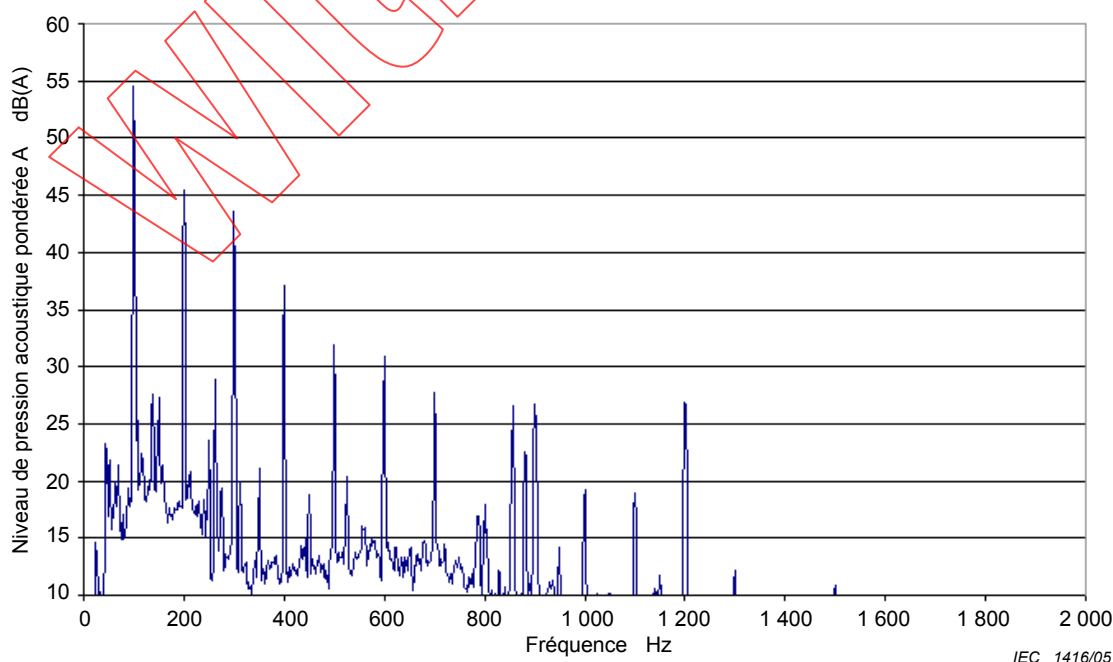


Figure 6 – Spectre acoustique du courant de charge typique mesuré dans des conditions de court-circuit

NOTE Figure 5 shows the results for a certain design of large power transformer. For other constructions, for example with different core form or different core steel type, the curve will look different in detail but will basically contain the same upward trend.

4.2.2 Electromagnetic forces in the windings

Load current in the windings of transformers and reactors generates a magnetic field that oscillates at the network frequency. The resultant electromagnetic forces act in both axial and radial directions in the windings. The magnitude of these forces depends only on the magnitude of the load current and on the local magnetic field, which is also a function of the load current. Thus, the magnetic forces in the windings are proportional to the square of the load current while their frequency is twice the network frequency. The resulting vibration amplitudes depend on the elastic properties of the conductor and of the electrical insulation. In a well-clamped and tightly-wound winding, the elastic properties of the insulating material are almost linear in the range of displacements occurring under normal operating currents. Metals have very linear elastic moduli. Therefore little harmonic vibration is normally generated, and the fundamental and perhaps the first harmonic dominate the vibration spectrum, see Figure 6.

The deflections of the windings and their vibration velocities are proportional to the exciting force, that is, proportional to the square of the load current. The sound power radiated from a vibrating body is proportional to the square of the vibration velocity (see 4.4). Consequently, the sound power varies with the fourth power of the load current. In applications demanding low sound level transformers, the load current sound power produced by the winding can make a significant contribution to the overall sound power of the transformer, see 6.3 of IEC 60076-10.

Harmonics in the load current are audible in the sound spectrum at twice their electrical frequency and at the sum and difference of all their frequencies. They can make a significant contribution to the transformer or reactor sound level, for example, when operating in HVDC converter stations or rectifier transformers.

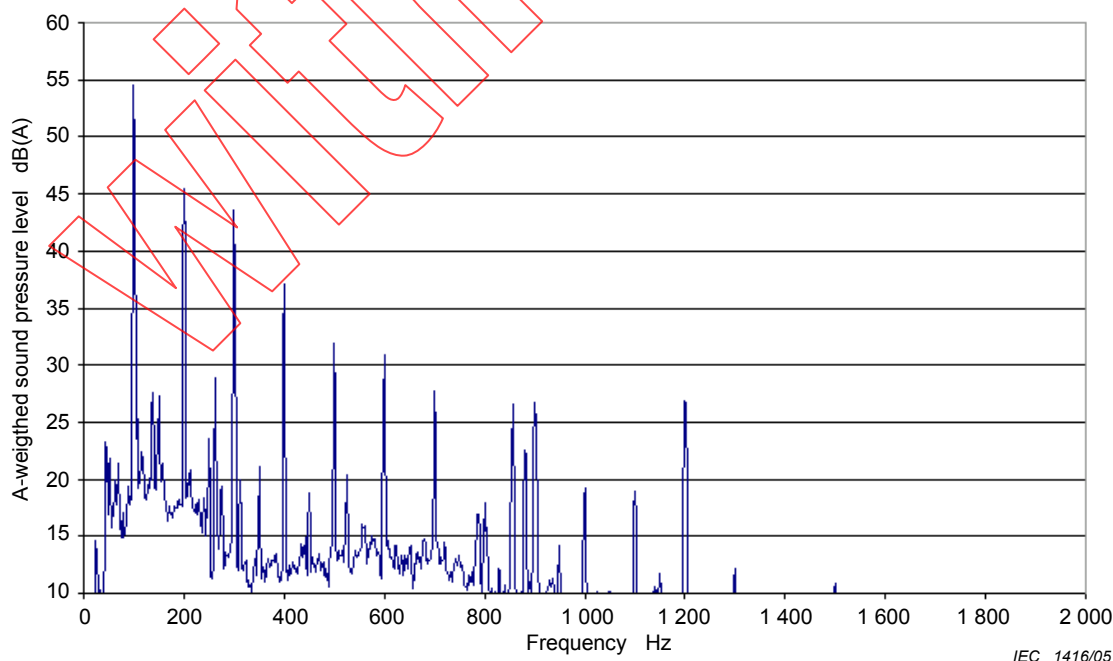


**Figure 6 – Typical load current sound spectrum
measured under short-circuit conditions**

4.2.3 Forces magnétiques dans les bobines d'inductance

Il existe différents types de bobines d'inductance monophasés et triphasés, utilisant (en général) deux technologies différentes dans leur conception:

- dans les inductances dans l'air, la puissance acoustique du courant de charge produite par l'enroulement est la principale source de bruit. L'interaction du courant circulant à travers l'enroulement et son champ magnétique mènent aux forces d'enroulement de vibrations. Lorsque que les forces d'oscillation peuvent être clairement déterminées, la réponse vibratoire de la structure d'enroulement est plutôt complexe. L'amplitude de vibration et la taille de la surface de rayonnement acoustique de l'appareil déterminent essentiellement le son acoustique audible émis. Par conséquent, le son acoustique émis est régi par l'amplitude de la vibration d'enroulement dans le sens radial (parce que l'enroulement représente la partie principale de la surface de rayonnement). La contribution des vibrations axiales d'enroulement, et celle d'autres composants, sur la totalité du son acoustique émis est relativement basse.
- dans les bobines d'inductance protégées magnétiquement (avec ou sans noyaux à entrefer), la force magnétique entre les culasses tend à combler l'espace à mesure que le flux augmente; le déplacement cyclique produit ainsi est la source de bruit dominante. Ces forces excitent mécaniquement l'ensemble du circuit magnétique de la bobine d'inductance, ayant pour résultat un spectre acoustique qui est dominé par deux fois la fréquence du réseau et ses harmoniques premiers. Les vibrations de magnétostriction et d'enroulement sont également des facteurs contributants.

4.2.4 Blindages des cuves magnétiques

Les blindages magnétiques sont fréquemment utilisés dans les grands transformateurs pour réduire les pertes de courant de Foucault dues à la fuite du flux qui résulte des courants de charge. Pour les courants de pleine charge, le flux de fuite dans les blindages magnétiques peut atteindre des valeurs qui peuvent dépasser les densités nominales de flux de noyau. Cela a comme conséquence la génération acoustique magnétostrictive dans les blindages magnétiques, et peut avoir comme conséquence une contribution significative sur le niveau acoustique global.

4.2.5 Bruit généré par les ventilateurs

L'origine du bruit de ventilateur est le flux turbulent d'air, ayant pour résultat des fluctuations de pression avec une large plage de fréquences. Ce bruit à large bande possède une crête large autour de la fréquence à laquelle les pales de ventilateur passent par les parties structurelles telles que les appuis de ventilateur ou les appuis de moteur de ventilateur, ou les nervures dans l'écran de protection.

4.2.6 Bruit généré par les pompes

La circulation de l'huile à travers les auxiliaires de refroidissement peut causer des vibrations; toutefois les pompes de circulation de l'huile ne contribuent pas normalement de façon significative au niveau de bruit, excepté à des débits très importants ou dans le cas d'application particulière telle que les transformateurs demandés avec un niveau de bruit très réduit.

4.3 Transmission des vibrations

Le circuit magnétique, les enroulements et la cuve ou l'enveloppe de transformateur sont des structures mécaniques avec leurs propres fréquences typiques de résonance. Si la fréquence d'une des forces d'excitation coïncide avec une résonance structurelle, une amplification significative de cette fréquence peut se produire. Il convient d'éliminer les résonances à l'étape de conception, ou de fournir un amortissement suffisant pour commander l'amplitude de vibration.

4.2.3 Magnetic forces in reactors

There are several different types of single-phase and three-phase reactors, utilising (in general) two different technologies in their design:

- in air-cored reactors, the load current sound power produced by the winding is the main sound source. The interaction of the current flowing through the winding and its magnetic field lead to vibrational winding forces. While the oscillating forces can be clearly determined, the vibrational response of the winding structure is rather complex. The vibrational amplitude and the size of the sound radiating surface of the apparatus essentially determine the emitted audible sound. Therefore, the sound emitted is governed by the magnitude of the winding vibration in the radial direction (because the winding represents the main part of the radiating surface). The contribution of axial winding vibrations, and that of other components, to the total sound emitted is relatively low.
- in magnetically-shielded reactors (with or without gapped cores), the magnetic force between the yokes tends to close the gap as the flux increases; the cyclic displacement thus produced is the dominant sound source. These forces mechanically excite the entire magnetic circuit of the reactor, resulting in a sound spectrum that is dominated by twice the power frequency and its first few harmonics. Magnetostriction and winding vibrations are also contributing factors.

4.2.4 Magnetic tank shields

Magnetic shields are frequently used in large transformers to reduce eddy current losses due to leakage of the flux which results from the load currents. At full load currents, the leakage flux in magnetic shields can reach values that may exceed the nominal core flux densities. This results in magnetostrictive sound generation in the magnetic shields, and may result in a significant contribution to the overall sound level.

4.2.5 Fan noise

The origin of fan noise is the turbulent flow of air, resulting in pressure fluctuations with a wide range of frequencies. This broad-band noise has a wide peak around the frequency at which the fan blades pass by structural parts such as the fan or fan motor supports, or the ribs in the protective screen.

4.2.6 Pump noise

Oil flow through cooling auxiliaries may cause vibrations, however oil pumps do not normally contribute a significant amount of sound power except at the highest flow rates or on special application, extremely low-noise transformers.

4.3 Vibration transmission

The magnetic circuit, the windings and the transformer tank or enclosure are mechanical structures with their own typical resonance frequencies. If the frequency of one of the exciting forces coincides with a structural resonance, a significant amplification of this frequency may occur. Resonances should be eliminated at the design stage, or sufficient damping provided to control the vibration amplitude.

Dans les transformateurs remplis de liquide, tant les vibrations du noyau que les vibrations d'enroulements sont transmises à la cuve au travers d'appuis structuraux des ensembles noyau et bobine et à travers le liquide. Les isolateurs de vibration sous les appuis de noyau à l'intérieur de la cuve, ou à l'extérieur de la cuve, réduisent la transmission des vibrations à travers la terre et par conséquent diminuent leur propagation aux sites éloignés. Les isolateurs de vibration ont moins d'influence sur la puissance acoustique rayonnée à partir de la surface de la cuve du transformateur elle-même. Si le fluide isolant est un gaz, comme dans le cas des transformateurs de type sec, l'excitation des vibrations dans l'enveloppe ou des surfaces de la cuve est dominée par les appuis structuraux de la partie active.

Il convient de noter que la CEI 60076-10 détermine la puissance acoustique rayonnée à travers l'air environnant; la transmission de vibration n'est pas traitée. Dans quelques applications, la puissance transmise par l'intermédiaire de la vibration structurelle peut être significative et ces vibrations peuvent poser des problèmes de bruit si le transformateur est installé dans un bâtiment. De même, les transformateurs montés sur un socle rocheux peuvent poser des problèmes dans les bâtiments montés sur le même socle rocheux même lorsqu'ils sont distants d'un kilomètre.

4.4 Rayonnement acoustique

La puissance acoustique rayonnée dans le champ distant dépend du carré de la vitesse de vibration, de la zone de surface de rayonnement et de l'efficacité de rayonnement de cette surface, comme défini dans l'équation 4:

$$W = \rho_0 c S \sigma \omega^2 x^2 \quad (4)$$

où

W est la puissance acoustique rayonnée en W;

ρ_0 est la densité d'air en kg/m³;

c est la vitesse du son acoustique dans le fluide (huile ou air) en m/s;

S est la surface de rayonnement acoustique en m²;

σ est l'efficacité de rayonnement (sans unité); cela dépend de la fréquence et des propriétés géométriques et structurelles du composant;

ωx est la vitesse de vibration en m/s;

$\omega = 2\pi f$ = pulsation acoustique en s⁻¹;

x est l'amplitude de vibration en m.

Les objets vibrants avec des dimensions plus petites que la longueur d'onde de la fréquence de rayonnement ont une faible efficacité de rayonnement. Les formes de vibrations pulsatoires ont des efficacités de rayonnement plus élevées que les formes de vibrations oscillatoires. Les grandes plaques flexibles avec des modèles de vibration complexes rayonnent moins de son acoustique que les plaques rigides avec des modèles de vibration plus simples quand les amplitudes de vibration sont égales.

5 Principes de mesure

5.1 Généralités

Le niveau de puissance acoustique d'une source peut être déterminé en mesurant directement la pression acoustique ou l'intensité acoustique à une distance connue. Les deux méthodes sont valables et l'une ou l'autre peut être utilisée. Les deux méthodes utilisent les mêmes positions de contour et de microphone prescrites, comme décrit dans les Articles 8 et 9 de la CEI 60076-10. Les deux méthodes utilisent l'hypothèse que le son acoustique moyen mesuré aux parois du transformateur peut être extrapolé au couvercle de la cuve, où les mesures ne sont pas possibles en raison des considérations relatives à la sécurité.