

**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 $B_{\max}$.

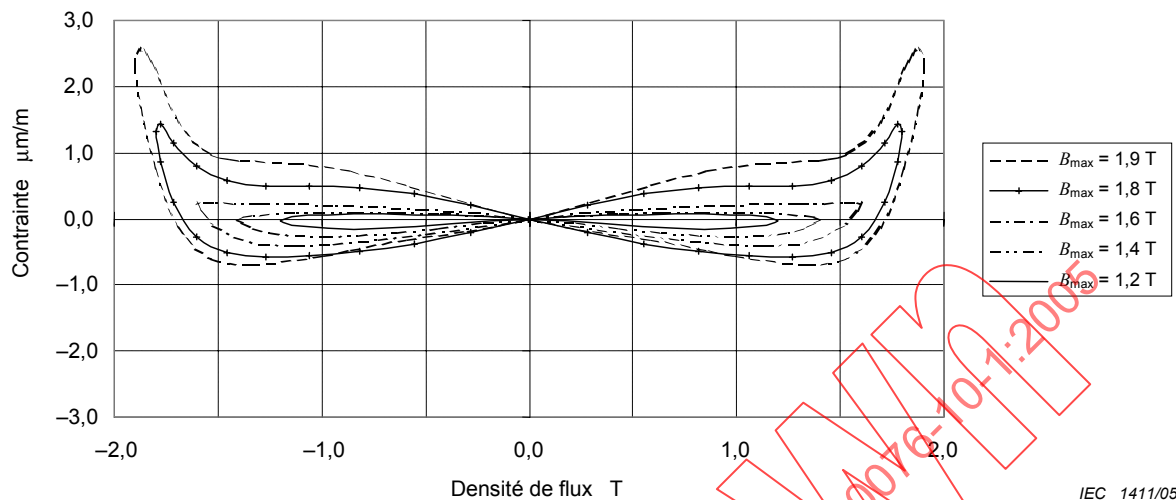


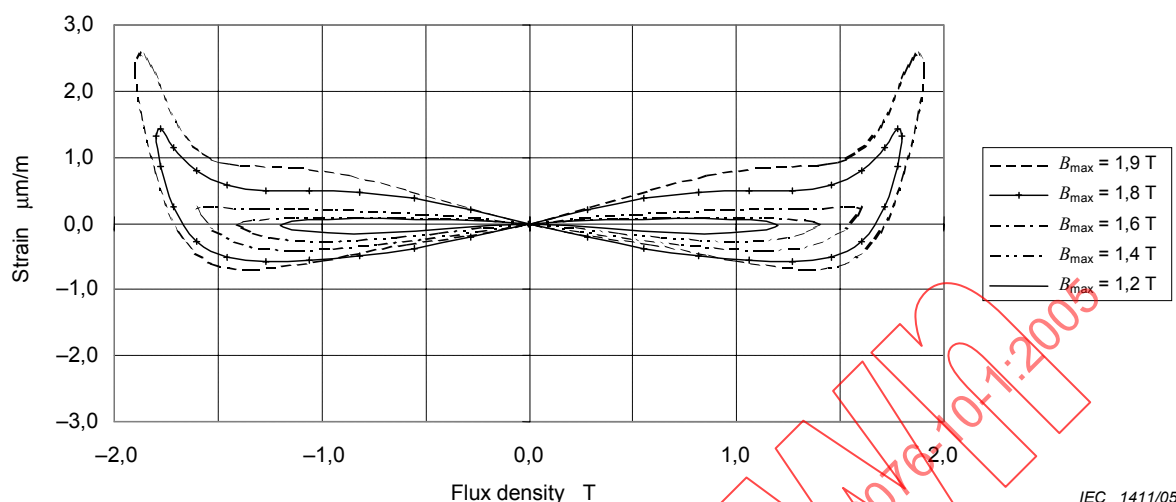
Figure 1 – Exemple de courbes montrant le changement relatif de la longueur pour un type de tôles du noyau pendant les cycles complets de l'application d'une induction de courant alternatif de 50 Hz pour différentes densités maximales de flux

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

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.

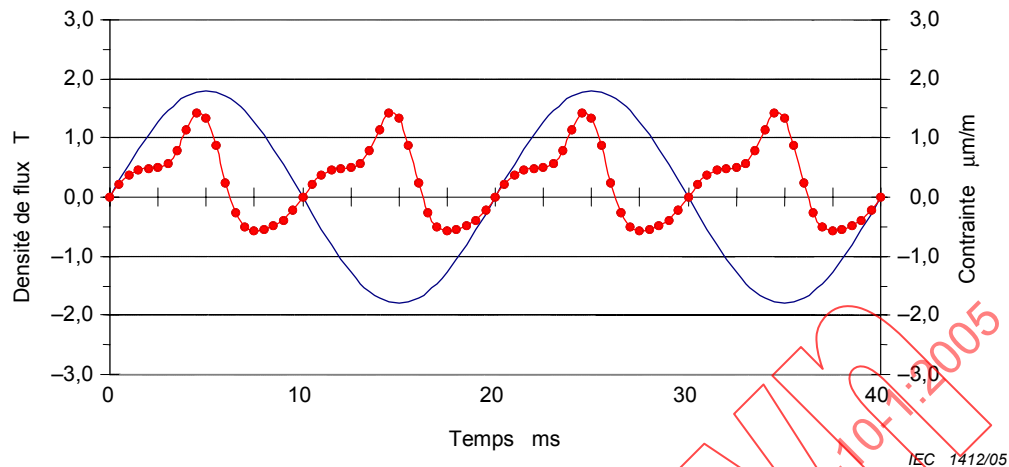


Figure 2 – Induction (ligne continue) et changement relatif de la longueur d'une tôle magnétique (ligne pointillée) en fonction du temps pour une induction maximale c.a. 1,8 Tesla, 50 Hz – pas de polarisation en courant continu

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.

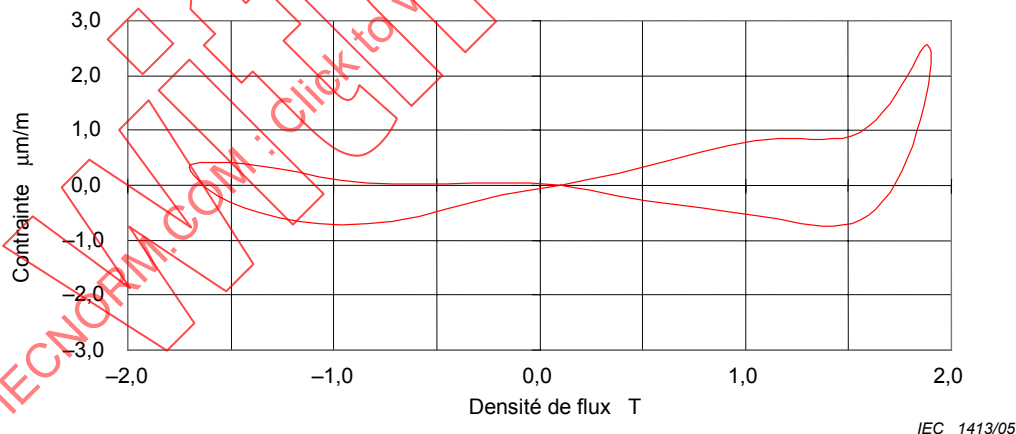


Figure 3 – Exemple de courbe montrant le changement relatif de la longueur de tôle pendant un cycle complet d'induction appliqué en courant alternatif avec une petite polarisation en courant continu: 1,8 T, 50 Hz et 0,1 T, 0 Hz

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.

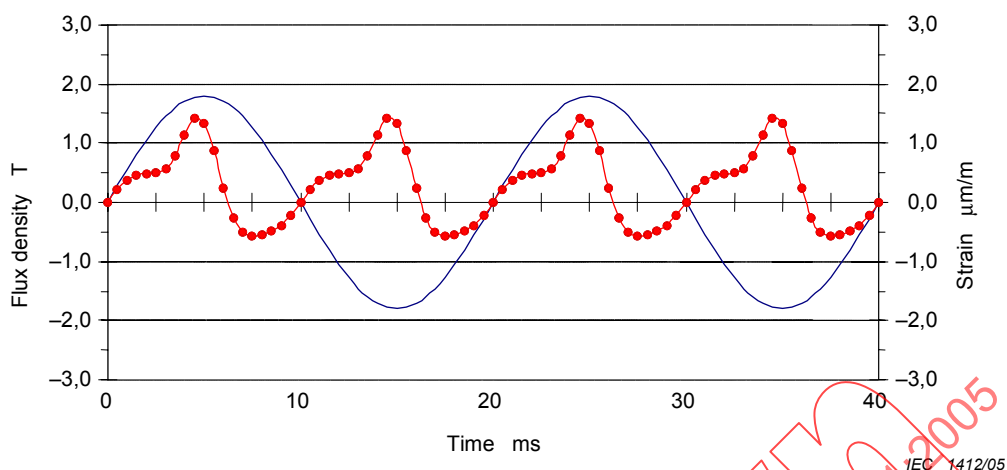


Figure 2 – Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted) as a function of time due to applied a.c. induction: 1,8 T, 50 Hz – no d.c. bias

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.

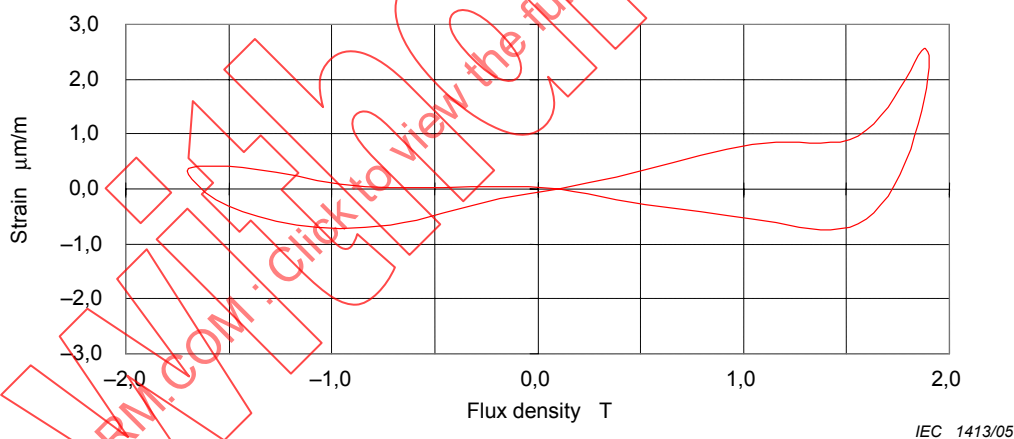


Figure 3 – Example curve showing relative change in lamination length during one complete cycle of applied a.c. induction with a small d.c. bias: 1,8 T, 50 Hz and 0,1 T, 0 Hz

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.

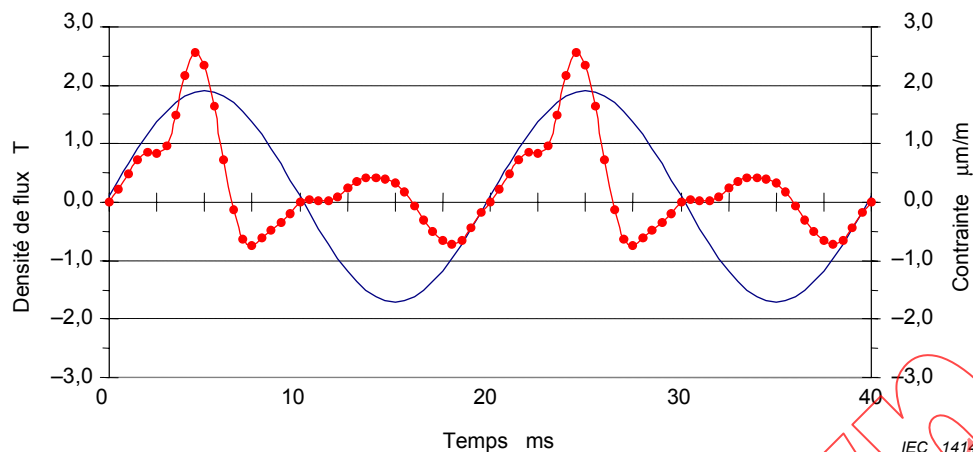
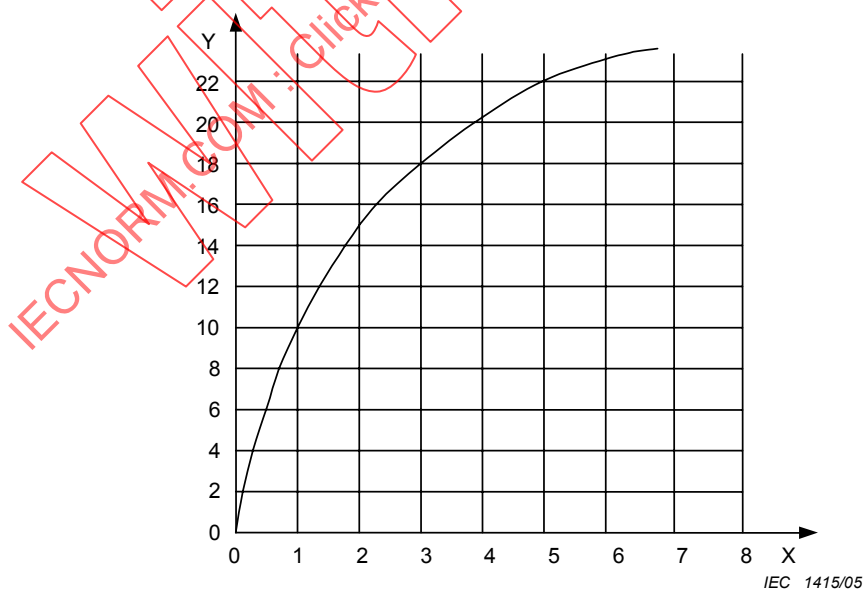


Figure 4 – Induction (ligne continue) et changement relatif de la longueur de tôle (pointillée) en fonction du temps dus à l'application de l'induction à courant alternatif avec une petite polarisation en courant continu: 1,8 T, 50 Hz et 0,1 T, 0 Hz

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

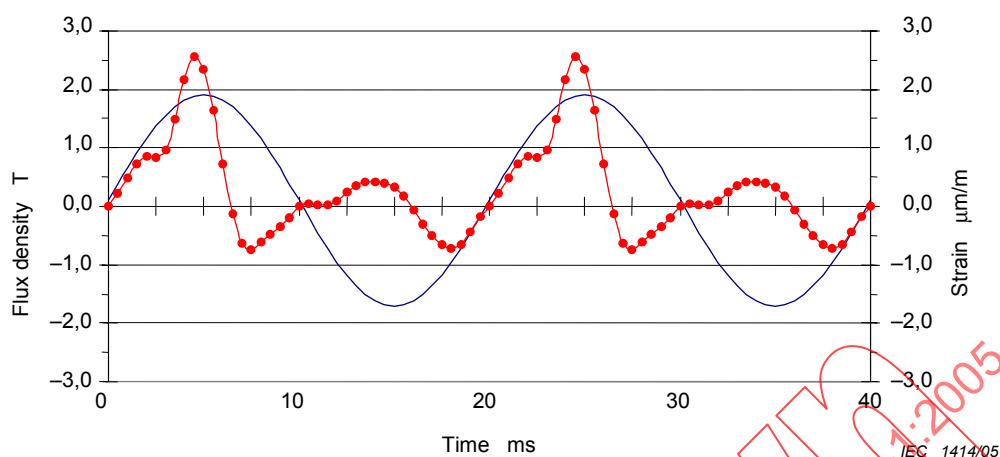
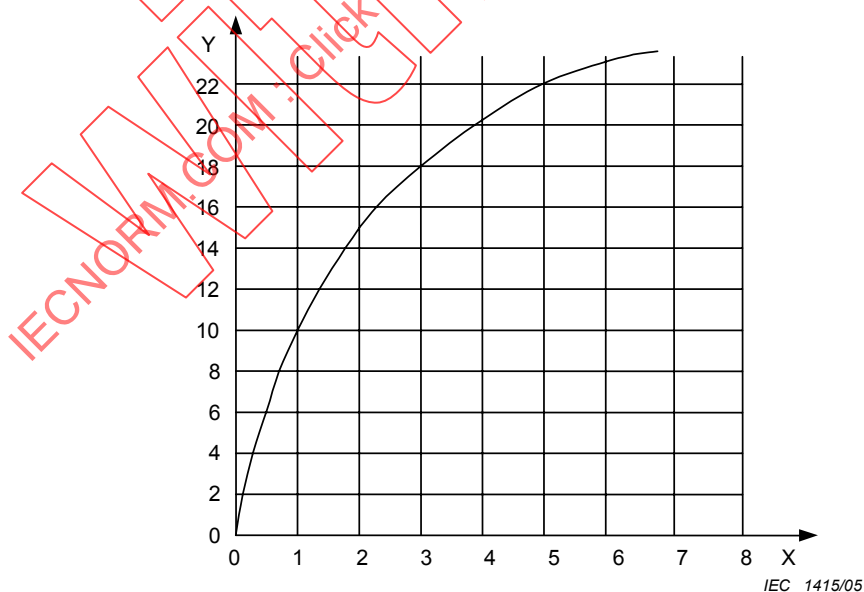


Figure 4 – Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted) as a function of time due to applied a.c. induction with a small d.c. bias: 1,8 T, 50 Hz and 0,1 T, 0 Hz

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.

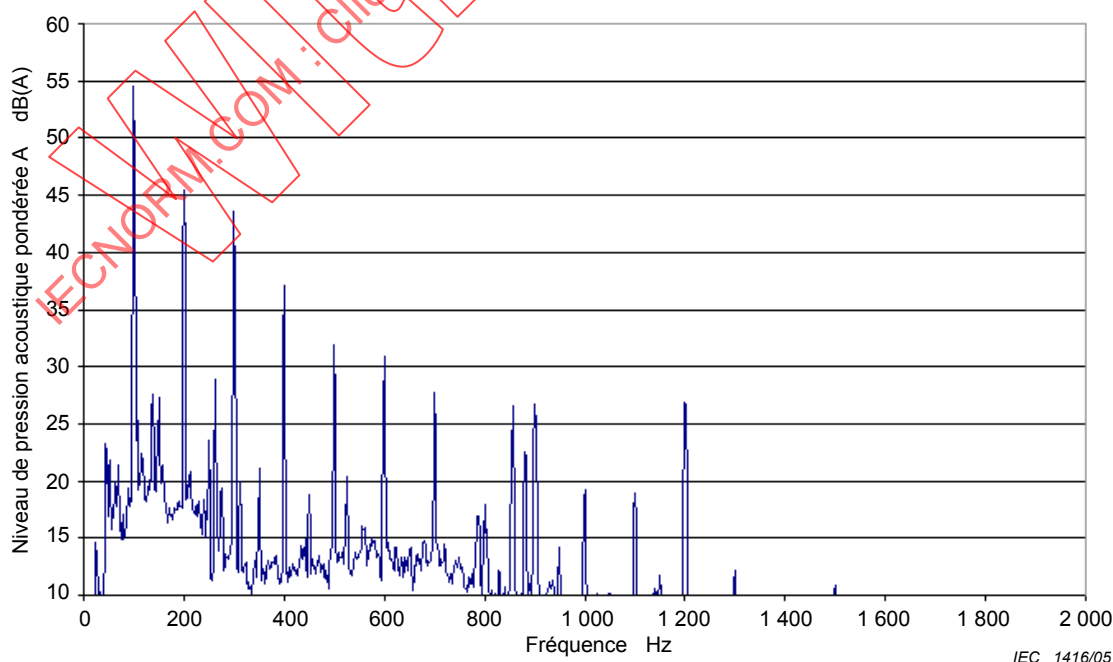


Figure 6 – Spectre acoustique du courant de charge typique mesuré dans des conditions de court-circuit

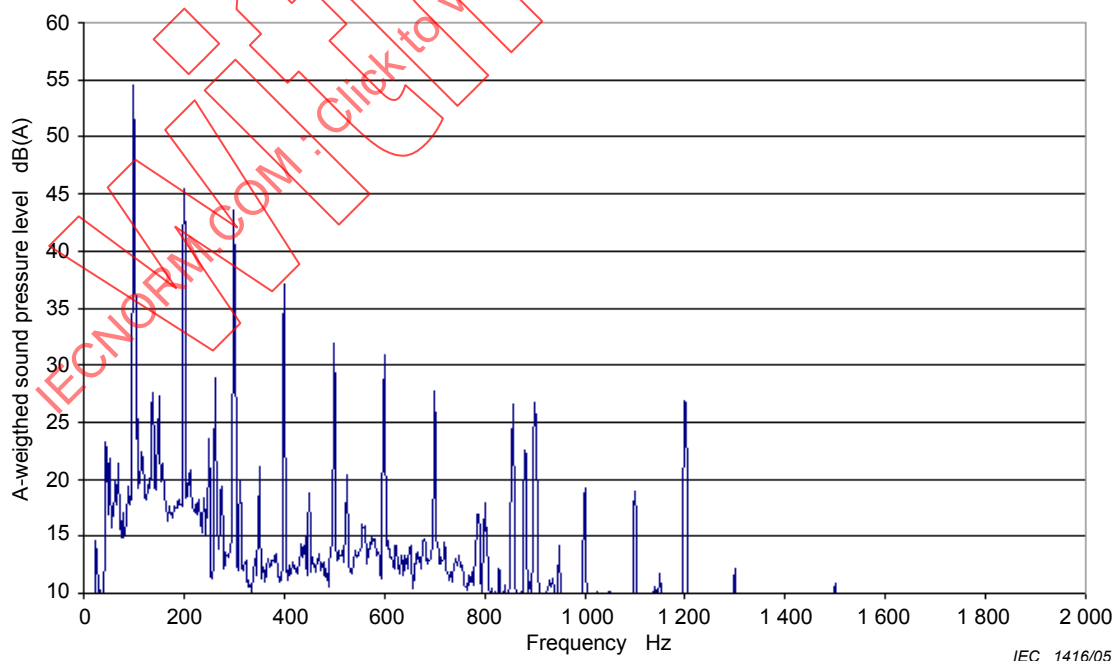
NOTE Figure 5 shows the results for a certain design of large power transformer. For other constructions, for example with different core form or different core steel type, the curve will look different in detail but will basically contain the same upward trend.

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.

In liquid-filled transformers, vibrations from both the core and windings are transmitted to the tank through the structural supports of the core and coil assemblies and through the liquid. Vibration isolators under the core supports inside the tank, or outside the tank, reduce the transmission of vibrations through the ground and hence decrease their propagation to remote locations. Vibration isolators have less influence on the sound power radiated from the transformer tank surface itself. If the insulating fluid is a gas, as in the case of dry-type transformers, the excitation of vibrations in the enclosure or tank surfaces is dominated by the structural supports of the active part.

It should be noted that IEC 60076-10 determines the sound power radiated through the surrounding air; vibration transmission is not addressed. In some applications, the power transmitted via structural vibration may be significant and these vibrations may cause noise problems if the transformer is installed in a building. Similarly, transformers mounted on bedrock can cause problems in buildings mounted on the same bedrock even when they are as much as a kilometre apart.

4.4 Sound radiation

The sound power radiated into the far field depends on the square of the vibration velocity, the radiating surface area and the radiation efficiency of that surface as defined in equation 4:

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

where

W is the radiated sound power in W;

ρ_0 is the air density in kg/m³;

c is the speed of sound in fluid (oil or air) in m/s;

S is the sound radiating surface in m²;

σ is the radiation efficiency (no unit); this depends on the frequency and geometrical and structural properties of the component;

ωx is the vibration velocity in m/s;

$\omega = 2\pi f$ is the acoustical angular frequency in s⁻¹;

x is the vibrational amplitude in m.

Vibrating objects with smaller dimensions than the wavelength of the radiating frequency have a low radiation efficiency. Pulsating vibration shapes have higher radiation efficiencies than oscillating vibration shapes. Large, flexible plates with complex vibration patterns radiate less sound than stiff plates with simpler vibration patterns when the vibration amplitudes are equal.

5 Measuring principles

5.1 General

The sound power level of a source may be determined by directly measuring sound pressure or sound intensity at a known distance. Both methods are valid and either can be used. Both methods use the same prescribed contour and microphone positions, as described in Clauses 8 and 9 of IEC 60076-10. Both methods use the assumption that the average sound measured at the walls of the transformer can be extrapolated to the tank cover, where measurements are not possible due to safety considerations. Historically, sound pressure measurements

Historiquement, des mesures de pression acoustique ont été utilisées pour quantifier les niveaux acoustiques des transformateurs. A la suite des travaux récents, les mesures d'intensité acoustiques ont été incorporées comme une alternative dans la CEI 60076-10. La différence systématique dans les mesures de champ proches entre les deux méthodes est traitée à l'Article 6.

5.2 Mesure du niveau pression acoustique

Un sonomètre est un instrument conçu pour donner des mesures objectives et reproductibles de niveau de pression acoustique. Il existe de nombreux systèmes de mesure différents disponibles. Bien que différent dans le détail, chaque système se compose d'un microphone, d'une section de traitement et d'une unité de lecture.

Le microphone convertit le signal acoustique en signal électrique équivalent. Le type de microphone le plus approprié pour les compteurs de niveau acoustique est le microphone électrostatique, qui combine la précision avec la stabilité et la fiabilité. Le signal électrique produit par le microphone est relativement faible. Il est donc amplifié par un préamplificateur avant d'être traité.

Une mesure simple du son acoustique non pondérée sur la gamme de fréquences audibles (habituellement prise pour être de 20 Hz à 20 kHz) est rarement utilisée en raison de sa faible corrélation avec la réponse subjective. En conséquence, les sonomètres incorporent habituellement un réseau de filtrage électrique connu sous le nom de pondération A qui modifie la réponse en fréquence pour simuler de l'oreille humaine. D'autres pondérations de fréquence qui sont normalisées internationalement mais non en utilisation générale pour la mesure du bruit de transformateur sont les pondérations B, C et D.

Le niveau acoustique «pondération A» a montré une bonne corrélation avec la réponse subjective des personnes aux bruits, et s'est révélé uniformément bon en comparaison avec d'autres échelles de bruit. Cet état de fait, ainsi que la facilité avec laquelle un circuit électronique dont la sensibilité varie en fonction de la fréquence peut être placé dans des sonomètres, a conduit à devenir l'échelle préférentielle pour les normes nationales et internationales.

5.3 Mesures d'intensité acoustique

L'intensité acoustique est le produit en moyenne de temps de la pression et de la vitesse de particules. Un unique microphone peut mesurer la pression. Cependant, la vitesse de mesure de particules n'est pas aussi simple. Avec l'équation d'Euler linéarisée, la vitesse de particules peut être liée au *gradient de pression* (c'est-à-dire le taux auquel la pression instantanée change avec la distance).

L'équation d'Euler est essentiellement la deuxième loi de Newton appliquée à un fluide. La deuxième loi de Newton correspond à un rapport entre l'accélération donnée à une masse avec la force agissant dessus. Si la force et la masse sont connues, l'accélération peut être trouvée et puis intégrée par rapport au temps pour trouver la vitesse.

Avec l'équation d'Euler, le gradient de pression accélère un fluide de densité ρ .

En connaissant le gradient de pression et la densité du fluide, l'accélération de particules (ou la décélération) peut être calculée en utilisant l'équation 5.

$$a = \frac{-1}{\rho} \times \frac{\delta p}{\delta r} \quad (5)$$

où

a est la décélération de particules due au changement de pression δp dans un fluide de densité ρ à travers une distance δr .

have been used for quantifying sound levels from transformers. As a result of recent work, sound intensity measurements have now been incorporated as an alternative in IEC 60076-10. The systematic difference in the near-field measurements between the two methods is discussed in Clause 6.

5.2 Sound pressure level measurement

A sound level meter is an instrument designed to give objective, reproducible measurements of sound pressure level. There are many different measuring systems available. Although different in detail, each system consists of a microphone, a processing section and a read-out unit.

The microphone converts the sound signal to an equivalent electrical signal. The most suitable type of microphone for sound level meters is the condenser microphone, which combines precision with stability and reliability. The electrical signal produced by the microphone is quite small. It is therefore amplified by a preamplifier before being processed.

A simple measurement of the unweighted sound over the audible frequency range (usually taken to be 20 Hz to 20 kHz) is rarely used because of its poor correlation with subjective response. Consequently, sound level meters usually incorporate an electrical filtering network known as 'A-weighting' which modifies the frequency response to simulate that of the human ear. Other frequency weightings that are internationally-standardized but not in general use for measuring transformer noise are the B-, C- and D-weightings.

The A-weighted sound level has been shown to correlate well with the subjective response of people to noises, and has shown up consistently well in comparisons with other noise scales. This fact, together with the ease with which an electronic circuit whose sensitivity varies with frequency can be built into sound level meters, has led to it becoming the preferred scale for national and international standards.

5.3 Sound intensity measurements

Sound intensity is the time-averaged product of the pressure and particle velocity. A single microphone can measure pressure. However, measuring particle velocity is not as simple. With Euler's linearized equation, the particle velocity can be related to the *pressure gradient* (that is, the rate at which the instantaneous pressure changes with distance).

Euler's equation is essentially Newton's second law applied to a fluid. Newton's second law relates the acceleration given to a mass to the force acting on it. If the force and the mass are known, the acceleration can be found and then integrated with respect to time to find the velocity.

With Euler's equation, the pressure gradient accelerates a fluid of density ρ .

With the knowledge of pressure gradient and density of the fluid, the particle acceleration (or deceleration) can be calculated using equation 5.

$$a = \frac{-1}{\rho} \times \frac{\delta p}{\delta r} \quad (5)$$

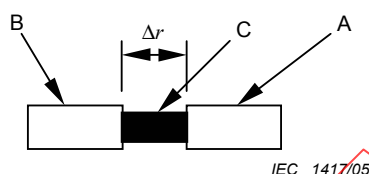
where a is the particle deceleration due to a pressure change δp in a fluid of density ρ across a distance δr .

En intégrant ce qui précède, l'équation 6 donne la vitesse de particules u comme suit:

$$u = -\int \left(\frac{1}{\rho} \times \frac{\delta p}{\delta r} \right) dt \quad (6)$$

Il est possible de mesurer le gradient de pression avec deux microphones étroitement espacés se faisant face et liés à la vitesse de particules en utilisant l'équation ci-dessus.

Avec deux microphones très proches, A et B, éloignés l'un de l'autre d'une distance Δr il est possible d'obtenir une droite d'approximation du gradient de pression en prenant la différence des pressions mesurées p_A et p_B , et en la divisant par la distance Δr entre eux. Ceci est appelé une approximation finie de différence.



Légende

A et B microphones

C barre d'espacement de longueur Δr

Figure 7 – Disposition de microphone

Le signal de gradient de pression doit maintenant être intégré pour donner la vitesse de particules u comme montré à l'équation 7:

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad (7)$$

Dans la mesure de l'intensité acoustique, I , est le produit en moyenne de temps de la pression, p , et de la vitesse de particules, u ,

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad (8)$$

C'est le principe de base du traitement des signaux dans les appareils de mesure d'intensité acoustique.

5.4 Guide sur les mesures à bande étroite

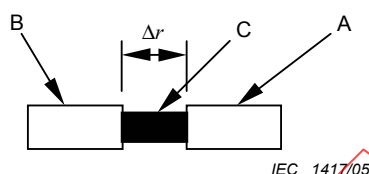
Le son du transformateur est caractérisé par des tonalités au double de la fréquence du réseau et aux harmoniques paires de cette fréquence du réseau (hypothèse d'excitation sinusoïdale et aucune polarisation en courant continu). Par conséquent, le bruit pour d'autres fréquences peut être supprimé en appliquant des mesures à bande étroite. Le terme de «bande étroite» est utilisé ici pour décrire une mesure où une analyse de fréquence du son acoustique est faite, et ensuite seulement les bandes de fréquences contenant les tonalités caractéristiques du transformateur sont utilisées dans l'évaluation. Une description plus exacte serait «analyse en bande sélective». Cette méthode est applicable pour les mesures de la pression acoustique et d'intensité acoustique et peut être utilisée pour le calcul des niveaux de puissance acoustique. La méthode ne peut pas éliminer les effets de réflexions décrites par la correction environnementale K .

Integrating the above, equation 6 gives the particle velocity u as follows:

$$u = -\int \left(\frac{1}{\rho} \times \frac{\delta p}{\delta r} \right) dt \quad (6)$$

It is possible to measure the pressure gradient with two closely spaced microphones facing each other and relate it to the particle velocity using the above equation.

With two closely-spaced microphones, A and B, separated by a spacer of length Δr , it is possible to obtain a straight line approximation to the pressure gradient by taking the difference in their measured pressures p_A and p_B , and dividing it by the distance Δr between them. This is called a finite difference approximation.



Key

A and B microphones

C spacer of length Δr

Figure 7 – Microphone arrangement

The pressure gradient signal must now be integrated to give the particle velocity u as shown in equation 7:

$$u = -\frac{1}{\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad (7)$$

Since sound intensity, I , is the time-averaged product of pressure, p , and particle velocity, u ,

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad (8)$$

This is the basic principle of signal processing in sound intensity measuring equipment.

5.4 Guidance on narrow-band measurements

Transformer sound is characterised by tones at double the power frequency and at even harmonics of the power frequency (assuming sinusoidal excitation and no d.c. bias). Therefore, noise at other frequencies can be suppressed by applying narrow-band measurements. The term “narrow-band” is used here to describe a measurement where a frequency analysis of the sound is made, and thereafter only the frequency bands containing the characteristic transformer tones are used in the evaluation. A more exact description would be “band-selective analysis”. This method is applicable for sound pressure and sound intensity measurements, and can be used to calculate sound power levels. The method cannot eliminate the effects of reflections described by the environmental correction K .

L'application de la méthode de mesure à bande étroite/bande sélective est sujette à l'accord entre le fabricant et l'acheteur. Les appareils de refroidissement et les pompes de circulation d'huile ne produisent pas de son acoustique caractérisé par des tonalités aux fréquences fixées; au lieu de cela, ils produisent du son acoustique à de nombreuses fréquences différentes; en d'autres termes ils sont une source de bruit «large bande». Par conséquent, les mesures à bande étroite/bande sélective ne sont pas autorisées lorsque les appareils de refroidissement et les pompes de circulation d'huile sont en fonctionnement.

L'analyse de fréquence demandée peut être réalisée en utilisant soit la méthode d'analyse en temps réel en parallèle, qui donne la résolution logarithmique de fréquence (1/1 octave, 1/3 octave, 1/12 octave, etc.), ou la méthode TFR (transformation de Fourier rapide), qui donne une résolution de largeur de bande constante (Δf Hz). (La transformation de Fourier rapide transforme les amplitudes de pression acoustique mesurées numérisées en fonction du temps enregistré en amplitudes en fonction de la fréquence enregistrée (spectres) par un algorithme mathématique. La largeur de bande des spectres ainsi obtenus dépend du taux de prélèvement du convertisseur analogique-numérique.) L'analyse en bande sélective peut également être appliquée en principe pour les bandes larges, telles que 1/3 octave, mais l'atténuation d'arrière plan devient plus efficace si une largeur de bande plus étroite est choisie. Si la fréquence d'alimentation produit une fréquence harmonique plus élevée qui tombe en dehors de la largeur de bande choisie (Δf), ou si les fréquences à mesurer ne correspondent pas aux fréquences prédéfinies de centre-bande de l'analyseur, il convient de choisir une bande (voisine) différente pour cette harmonique ou une largeur de bande plus large.

Les mesures sont faites comme d'habitude sauf que, au lieu de mesurer des valeurs pondérées A simples, les niveaux sont mesurés sur des bandes de fréquences contenant des fréquences égales à deux fois la fréquence assignée et à ses multiples. Le niveau de pression acoustique pondérée A ou le niveau d'intensité acoustique à chaque position de mesure peut alors être calculé en utilisant l'équation 9:

$$L_{Ai} = 10 \lg \left(\sum_{\nu=1}^{\nu_{\max}} 10^{0,1L_{A\nu}} \right) \quad (9)$$

où

L_{Ai} est le niveau de pression acoustique «pondération A» (ou niveau d'intensité acoustique) à fréquence assignée et à tension assignée;

$L_{A\nu}$ est le niveau de pression acoustique «pondération A» (ou niveau d'intensité acoustique) mesuré sur la largeur de bande choisie, Δf , centré sur une fréquence égale à $2f_{\nu}$, à fréquence assignée et à tension assignée. La pondération A peut être réalisée des deux manières suivantes:

- en utilisant un filtre analogue sur l'extrémité avant du système de mesure tel que toutes les valeurs mesurées soient pondérées A dès le début;
- si la mesure est linéaire: appliquer une pondération A de manière numérique sur le niveau mesuré dans chaque bande de fréquences. Les valeurs de pondération A pour chaque fréquence harmonique peuvent être pris du Tableau 1 ci-dessous;

f est la fréquence assignée;

ν est le rang (1, 2, 3, etc.) des harmoniques paires de la fréquence assignée;

$\nu_{\max} = 10$.

NOTE La somme des niveaux sonores pour les 10 premières bandes est approprié pour la plupart des transformateurs fonctionnant à tension et à courant presque sinusoïdaux. Cependant, en présence d'harmoniques dans la tension et/ou dans le courant, des fréquences plus élevées peuvent contribuer de manière significative au niveau sonore global. Dans ce cas, il convient de prendre en considération plus de bandes de fréquences.

The application of the band-selective narrow-band measurement method is subject to agreement between manufacturer and purchaser. Cooling equipment and oil-circulating pumps do not produce sound characterised by tones at fixed frequencies; instead they produce sound at many different frequencies, in other words they are a 'broad-band' noise source. Therefore, band-selective narrow-band measurements are not permitted when cooling equipment and oil-circulating pumps are in operation.

The required frequency analysis may be achieved by using either the parallel real-time analysis method, which results in logarithmic frequency resolution (1/1 octave, 1/3 octave, 1/12 octave, etc), or the FFT (fast Fourier transformation) method, which results in a constant bandwidth resolution (Δf Hz). (FFT transforms the digitised measured sound pressure amplitudes versus time records into amplitudes versus frequency records (spectra) by a mathematical algorithm. The bandwidth of the spectra thus obtained depends on the sampling rate of the analog-to-digital converter.) Band-selective analysis can also be applied in principle to wide bands, such as 1/3 octave, but the background attenuation becomes more effective if a narrower bandwidth is chosen. If the power supply frequency generates a higher harmonic frequency which falls outside the chosen bandwidth (Δf), or if the frequencies to be measured do not match the pre-defined centre-band frequencies of the analyser, a different (neighbouring) band for that harmonic or a wider bandwidth should be selected.

Measurements are made as usual except that, instead of measuring single A-weighted values, the levels are measured over frequency bands containing frequencies equal to twice the rated frequency and multiples thereof. The A-weighted sound pressure level or sound intensity level at each measurement position can then be calculated by equation 9:

$$L_{Ai} = 10 \lg \left(\sum_{v=1}^{v_{\max}} 10^{0,1 L_{Av}} \right) \quad (9)$$

where

L_{Ai} is the A-weighted sound pressure level (or sound intensity level) at rated voltage and rated frequency;

L_{Av} is the A-weighted sound pressure level (or sound intensity level) measured over the chosen bandwidth, Δf , centred on a frequency equal to $2fv$, at rated voltage and rated frequency. The A-weighting may be accomplished in two ways:

- by using an analogous filter on the front end of the measurement system so that all measured values are A-weighted from the start;
- if the measurement is linear: apply A-weighting digitally on the measured level in each frequency band. Values of the A-weighting for each harmonic frequency may be taken from Table 1 below;

f is the rated frequency;

v is the sequence number (1, 2, 3, etc.) of multiples of the even harmonics of the rated frequency;

$v_{\max} = 10$.

NOTE The summation of sound levels for the first 10 bands is adequate for most transformers operating at almost sinusoidal voltage and current. However, in the presence of harmonics in voltage and/or current, higher frequencies may contribute significantly to the total sound level. In this case, more frequency bands should be taken into consideration.

Tableau 1 – Valeurs de pondération A en fonction de la fréquence

Limite de fréquence inférieure Hz (supérieure à)	Limite supérieure de fréquence Hz (inférieur ou égal à)	Valeur de pondération A dB
28	36	–39,4
36	45	–34,6
45	56	–30,2
56	71	–26,2
71	90	–22,5
90	112	–19,1
112	141	–16,1
141	179	–13,4
179	224	–10,9
224	281	–8,6
281	355	–6,6
355	447	–4,8
447	561	–3,2
561	710	–1,9
710	895	–0,8
895	1 120	0,0
1 120	1 410	+0,6
1 410	1 790	+1,0
1 790	2 240	+1,2
2 240	2 810	+1,3

5.4.1 Analyse de fréquence par la méthode en temps réel

Il est recommandé que la largeur de bande de l'analyseur, Δf , soit choisie à 1/10 d'octave ou plus étroite. Pour ce type d'évaluation, il faut que les bandes de fréquences qui contiennent le son acoustique du transformateur soient choisies manuellement de telle sorte que les dix premières composantes harmoniques du son acoustique soient incluses. Les bandes de fréquences ne seront pas centrées sur les composantes harmoniques mais chaque harmonique sera mesurée avec une précision suffisante si elle est contenue dans une bande.

5.4.2 Analyse de fréquence par la méthode TFR

Il est recommandé que la largeur de bande de l'analyseur, Δf , soit choisie pour 10 Hz, 5 Hz ou 2,5 Hz. Il est recommandé que le «sommet plat» («flat top») de l'instrument soit utilisée. Cette fenêtre donne la précision maximale pour les amplitudes mesurées de chaque harmonique, même si une fréquence harmonique tombe sur la limite d'une bande de fréquences. Cependant, une conséquence de la fenêtre «sommet plat» est que la tonalité pure à 100 Hz (qui sera correctement mesurée dans la bande de fréquences de 100 Hz) donnera également un niveau élevé dans les bandes 95 Hz et 105 Hz. Cette prétendue «fuite» ne pose aucun problème dans une analyse en bande sélective, mais il faut la considérer si toutes les bandes de fréquences sont ajoutées, comme dans le cas des mesures avec les appareils de refroidissement en fonctionnement.

Table 1 – Values of A-weighting as a function of frequency

Lower frequency limit Hz (greater than)	Upper frequency limit Hz (less than or equal to)	A-weighting value dB
28	36	–39,4
36	45	–34,6
45	56	–30,2
56	71	–26,2
71	90	–22,5
90	112	–19,1
112	141	–16,1
141	179	–13,4
179	224	–10,9
224	281	–8,6
281	355	–6,6
355	447	–4,8
447	561	–3,2
561	710	–1,9
710	895	–0,8
895	1 120	0,0
1 120	1 410	+0,6
1 410	1 790	+1,0
1 790	2 240	+1,2
2 240	2 810	+1,3

5.4.1 Frequency analysis by the real-time method

It is recommended that the analyzer bandwidth, Δf , is chosen to 1/10 octave or narrower. For this type of evaluation, the frequency bands that contain transformer sound must be selected manually so that the first ten harmonic components of the sound are included. The frequency bands will not be centred on the harmonic components but each harmonic will be measured with sufficient accuracy if it is contained within a band.

5.4.2 Frequency analysis by the FFT method

It is recommended that the analyzer bandwidth, Δf , is chosen to 10 Hz, 5 Hz or 2,5 Hz. It is recommended that the “flat-top” time window of the instrument is used. This window gives maximum accuracy for the measured amplitudes of each harmonic, even if a harmonic frequency falls on the limit of a frequency band. However, a consequence of the “flat-top” window is that the pure tone at 100 Hz (which will be correctly measured in the 100 Hz frequency band) will also give a high level in the 95 Hz and the 105 Hz bands. This so-called “leakage” causes no problem in a band-selective analysis, but must be considered if all frequency bands are added, such as in the case of measurements with cooling equipment in service.

Une fenêtre «sommet plat» donne une largeur de bande effective d'approximativement 3,8 fois Δf , tandis que la fenêtre de «Hanning» généralement utilisée possède une largeur de bande effective d'approximativement 1,5 fois Δf mais donne une erreur possible jusqu'à 1,4 dB sur les amplitudes mesurées pour une harmonique qui n'est pas centrée. Il convient de consulter les spécifications et le guide d'utilisateur pour l'instrument de TFR pour des données exactes au sujet de la précision effective de la largeur de bande et de l'amplitude.

6 Comparaison des méthodes de mesure

6.1 Généralités

Le son acoustique émis par un transformateur ou une bobine d'inductance est uniquement quantifié par sa puissance acoustique. La puissance acoustique est donc utilisée pour évaluer et comparer les sources sonores. Cependant, la puissance acoustique peut seulement être déterminée par des mesures indirectes des fluctuations de pression dans l'air. Deux méthodes sont autorisées dans la CEI 60076-10; elles sont basées sur deux quantités physiques différentes, à savoir la pression acoustique et l'intensité acoustique.

Jusqu'à une période récente, seule la méthode de pression acoustique était généralement utilisée. La puissance acoustique peut être liée à la pression acoustique seulement dans des conditions soigneusement contrôlées où des hypothèses particulières sont faites au sujet du champ acoustique. Cependant, l'intensité acoustique peut être mesurée dans des champs acoustiques moins idéaux. Cette propriété permet de faire des mesures dans des situations où il existe de nombreuses sources acoustiques. Le bruit de fond permanent n'apporte aucune contribution à la puissance acoustique de la source déterminée à partir des mesures d'intensité acoustique.

En condition d'essai en champ libre, la pression acoustique et la vitesse de particules sont en phase et, par conséquent, une relation unique existe entre la pression acoustique, p , et l'intensité acoustique, I , voir l'équation 10.

$$|I| = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (10)$$

où ρc est l'impédance acoustique du milieu par lequel le son acoustique est propagé. Dans des conditions normales de pression et de température dans l'air, $\rho c = 412 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

En utilisant l'équation 10 dans l'équation de niveau d'intensité acoustique normale, la relation entre le niveau d'intensité acoustique, L_I , et le niveau de pression acoustique, L_p , est montrée dans l'équation 11.

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{p^2}{\rho c I_0} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} + 10 \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0} = L_p + 10 \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0} \quad (11)$$

Pour des valeurs d' I_0 et de p_0 données, (respectivement 10^{-12} Wm^{-2} et $20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$), le terme $10 \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0}$ est petit en comparaison avec L_p pour la plupart des mesures dans l'air aux conditions ambiantes (0,13 dB à 22 °C et $1,013 \times 10^{-5} \text{ Pa}$). Les mesures du niveau d'intensité acoustique et les mesures du niveau de pression acoustique effectuées en dehors du champ proche auront donc la même valeur numérique dans un environnement de champ libre idéal.

A “flat-top” window gives an effective bandwidth of approximately 3,8 times Δf , whereas the commonly used “Hanning” window has an effective bandwidth of approximately 1,5 times Δf but gives a possible error of up to 1,4 dB on the measured amplitudes for a harmonic that is not centred. The specification and user guide for the FFT instrument should be consulted for exact data about the effective bandwidth and amplitude accuracy.

6 Comparison of measuring methods

6.1 General

The sound emitted by a transformer or reactor is uniquely quantified by its sound power. Sound power is therefore used for rating and comparing sound sources. However, sound power can only be determined by indirect measurements of pressure fluctuations in the air. Two methods are allowed in IEC 60076-10; these are based on two different physical quantities, namely sound pressure and sound intensity.

Until recently, only the sound pressure method was commonly used. Sound power can be related to sound pressure only under carefully controlled conditions where special assumptions are made about the sound field. Sound intensity, however, can be measured in less ideal sound fields. This property allows measurements to be made in situations where many sound sources are present. Steady background noise makes no contribution to the sound power of the source determined from sound intensity measurements.

In a free-field test condition, sound pressure and particle velocity are in phase and hence a unique relationship exists between the sound pressure, p , and the sound intensity, I , see equation 10.

$$|I| = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho c} \quad (10)$$

where ρc is the acoustic impedance of the medium through which the sound is propagated. Under standard conditions of pressure and temperature in air, $\rho c = 412 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

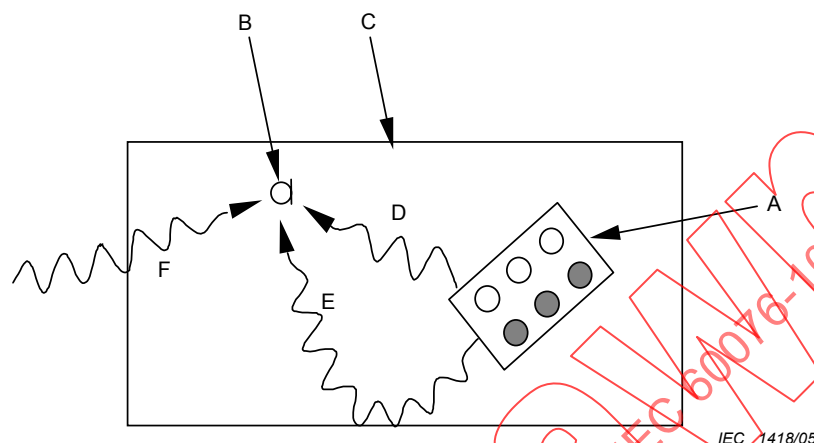
Using equation 10 in the normal sound intensity level equation, the relationship between normal sound intensity level, L_I , and sound pressure level, L_p , is shown in equation 11.

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{p^2}{\rho c I_0} = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} + 10 \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0} = L_p + 10 \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0} \quad (11)$$

For the given values of I_0 and p_0 (10^{-12} Wm^{-2} and $20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ respectively), the term $10 \lg \frac{p_0^2}{\rho c I_0}$ is small when compared with L_p for most measurements in air at ambient conditions (0,13 dB at 22 °C and $1,013 \times 10^{-5} \text{ Pa}$). Sound intensity level measurements and sound pressure level measurements performed outside the near-field will therefore have the same numerical value in an ideal free-field environment.

6.2 Sensibilité de la méthode de pression acoustique à l'environnement d'essai

Un environnement d'essai réel est habituellement significativement différent de l'environnement de champ libre idéal. En général, l'effet d'un environnement d'essai réel est d'augmenter le niveau acoustique mesuré. L'exemple suivant sera utilisé comme information de base tout au long de cet article.



Légende

- | | |
|--|-----------------------------|
| A objet d'essai | D onde acoustique directe |
| B position du microphone | E onde acoustique réfléchie |
| C surface réfléchissante de la salle d'essai | F bruit de fond |

Figure 8 – Environnement d'essai

Des essais d'usine sont habituellement effectués dans un espace confiné avec l'objet d'essai placé sur le sol. Les ondes de pression quittant les surfaces de rayonnement de l'objet d'essai frapperont le plancher, les murs d'usine et tous les autres objets dans la salle d'essai et seront reflétées. Les ondes acoustiques reflétées peuvent de manière constructive interférer avec les ondes acoustiques émises par l'objet d'essai, résultant ainsi en des ondes stationnaires. Les mesures de pression acoustique faites dans la région des ondes stationnaires et des ondes reflétées donneront des surestimations de puissance acoustique.

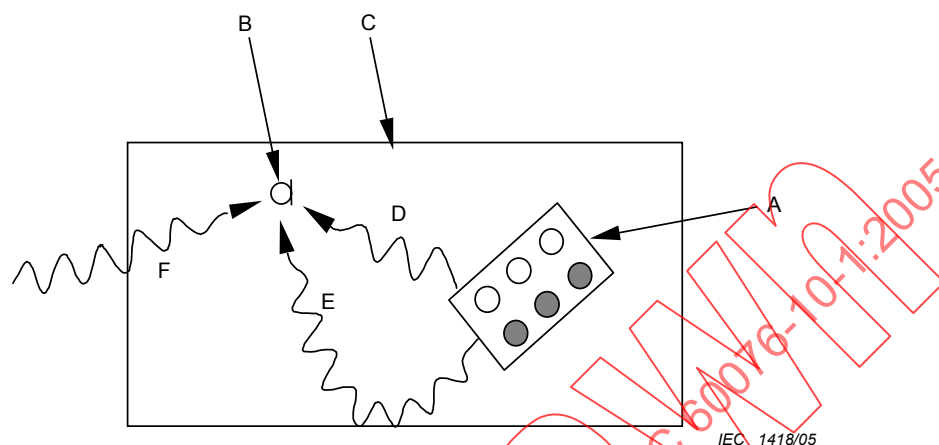
Dans les environnements d'essai réels, le bruit provenant du processus de fabrication, des unités de production d'électricité et d'autres unités activées peuvent produire des ondes de pression acoustique qui augmenteront le niveau de pression acoustique mesuré. Dans de tels environnements d'essai, la pression acoustique mesurée à chaque endroit du microphone sera la somme de

- la pression acoustique du transformateur, qui diminue avec le carré de la distance;
- la composante réactive de la pression acoustique dans le champ proche, qui diminue exponentiellement avec la distance;
- la pression acoustique due au son acoustique reflété qui est la plus grande proche des murs de la salle d'essai;
- la pression acoustique due aux sources de bruit extérieures.

Il convient donc d'optimiser les positions de microphone afin de réduire au minimum l'effet des perturbations ci-dessus tout en respectant les contraintes de l'espace limité et de la sécurité. Comme le montre la Figure 9 de manière évidente, les effets de ces perturbations sur la pression acoustique peuvent être réduits au minimum mais ils ne peuvent pas être éliminés. Les distances de mesure indiquées à l'Article 8 de la CEI 60076-10 sont un compromis pratique basé sur une expérience historique de mesure des niveaux acoustiques à vide.

6.2 Sensitivity of the sound pressure method to the test environment

A real test environment is usually significantly different from the ideal free-field environment. In general, the effect of a real test environment is to increase the measured sound level. The following example will be used as background information throughout this clause.



Key

- | | |
|---------------------------------------|------------------------|
| A test object | D direct sound wave |
| B microphone position | E reflected sound wave |
| C reflecting surface of the test room | F background noise |

Figure 8 – Test environment

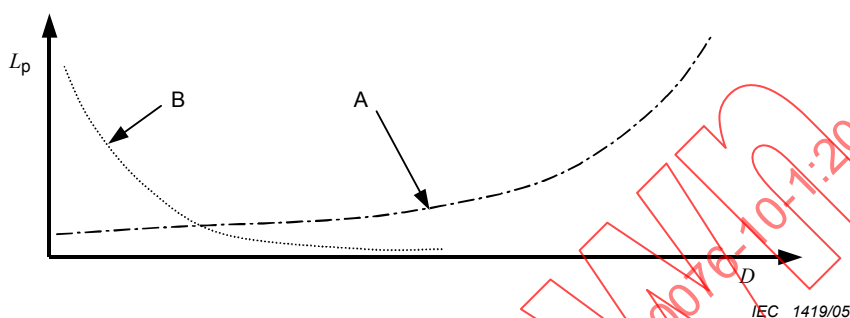
Factory tests are usually conducted in a confined space with the test object standing on the floor. The pressure waves leaving the radiating surfaces of the test object will hit the floor, factory walls and any other objects in the test room and be reflected. The reflected sound waves can constructively interfere with the sound waves emitted by the test object, thereby resulting in standing waves. Sound pressure measurements made in the region of standing waves and reflected waves will give over-estimates of sound power.

In real test environments, noise from the manufacturing process, power generation units and other energized units can generate sound pressure waves that will increase the measured sound pressure level. In such test environments, the measured sound pressure at each microphone location will be the sum of

- the transformer sound pressure, which decreases with the square of distance;
- the reactive component of the sound pressure in the near-field, which decreases exponentially with distance;
- sound pressure due to the reflected sound which is largest close to the walls of the test room;
- sound pressure due to external noise sources.

The microphone positions should therefore be optimised to minimise the effect of the above disturbances while respecting the constraints of limited space and safety. As is evident from Figure 9, the effects of these disturbances on the sound pressure can be minimized but they cannot be eliminated. The measurement distances specified in Clause 8 of IEC 60076-10, are a practical compromise based on historical experience of measuring the no-load sound levels.

En mesurant les niveaux acoustiques du courant de charge qui sont dominés par de basses fréquences, la distance de mesure de 0,3 m mènera à une surestimation du niveau de puissance acoustique. Les mesures faites à une distance accrue, par exemple 2,0 m, peuvent être plus précises à condition que le niveau acoustique de l'objet d'essai excède toujours le bruit de fond par les marges décrites en 11.3 de la CEI 60076-10. Le caractère pratique des mesures à une distance de mesure accrue dépendra donc à la fois de l'objet d'essai et de l'environnement d'essai. L'utilisation d'une distance de mesure différente doit faire l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur.



Légende

A réflexion ou perturbation de pression de source de bruit externe

B perturbation de pression de source de bruit du champ proche

L_p niveau de pression acoustique

D distance entre l'objet d'essai et le récepteur

Figure 9 – Distribution des perturbations à la pression acoustique dans l'environnement d'essai

Afin d'utiliser des niveaux de pression acoustique pour déterminer les niveaux de puissance acoustique précis, deux facteurs de correction doivent donc être appliqués (voir 11.3 de la CEI 60076-10).

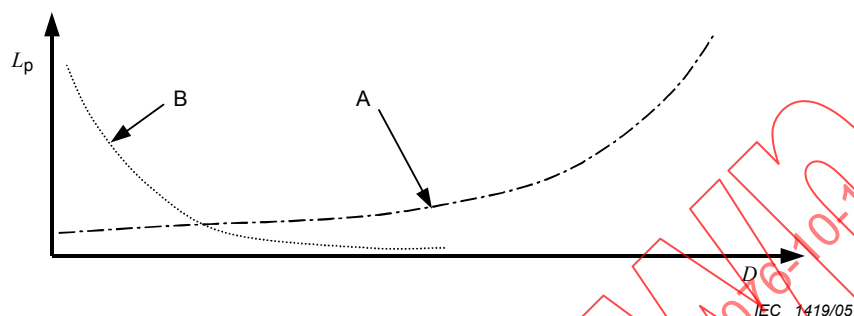
Premièrement, il convient de mesurer le niveau de pression du bruit de fond moyen avant et après l'essai et la plus petite des deux valeurs soustraites du niveau de pression acoustique moyen non corrigé de l'objet d'essai en utilisant l'équation 16 de la CEI 60076-10. Cette correction pour le bruit de fond est autorisée uniquement si le niveau de pression acoustique globale dû à l'objet d'essai et au bruit de fond est au moins de 3 dB supérieur au niveau de bruit de fond seul. Cette correction a pour but d'enlever l'effet des sources acoustiques perturbatrices présentes dans l'environnement d'essai.

Deuxièmement, afin de tenir compte des réflexions dans l'environnement d'essai, il convient de déterminer la correction environnementale K . L'amplitude de K dépend du rapport entre la zone d'absorption acoustique équivalente de la salle d'essai avec la zone de la surface de mesure, voir 11.1.2.2 de la CEI 60076-10.

6.3 Sensibilité de la méthode d'intensité acoustique à l'environnement d'essai

Aucun facteur de correction n'est nécessaire pour déterminer un niveau d'intensité acoustique moyen, aussi longtemps que les critères pour l'acceptation indiqués en 12.3 de la CEI 60076-10 sont réunis. Cela vient du fait que la méthode d'intensité acoustique tient compte de l'influence des effets du champ proche, des niveaux de bruit de fond constants et des réflexions en mesurant la pression acoustique, la vitesse de particules et l'angle de phase entre eux, et en utilisant ces grandeurs pour calculer la partie active de l'intensité acoustique normale de l'objet d'essai.

When measuring load current sound levels which are dominated by low frequencies, the 0,3 m measurement distance will lead to an over-estimate of the sound power level. Measurements made at an increased distance, for example 2,0 m, may be more accurate provided that the sound level from the test object still exceeds the background noise by the margins described in 11.3 of IEC 60076-10. The practicality of measurements at an increased measurement distance will therefore depend on both the test object and the test environment. The use of a different measurement distance would have to be agreed by the manufacturer and purchaser.



Key

- A* reflection or external sound source pressure disturbance
- B* near-field sound source pressure disturbance
- L_p sound pressure level
- D* distance between the test object and receiver

Figure 9 – Distribution of disturbances to sound pressure in the test environment

In order to use sound pressure levels to determine accurate sound power levels, two correction factors have therefore to be applied (see 11.3 of IEC 60076-10).

Firstly, the average background noise pressure level should be measured before and after the test and the lower of the two values subtracted from the uncorrected average sound pressure level of the test object using equation 16 of IEC 60076-10. This correction for background noise is only allowed if the total sound pressure level due to the test object and the background noise is at least 3 dB higher than the background noise level alone. This correction attempts to remove the effect of disturbing sound sources present in the test environment.

Secondly, in order to take into account reflections in the test environment the environmental correction K should be determined. The magnitude of K depends on the ratio of the equivalent sound absorption area of the test room to the area of the measurement surface, see 11.1.2.2 of IEC 60076-10.

6.3 Sensitivity of the sound intensity method to test environment

No correction factors are needed to determine an average sound intensity level, as long as the criteria for acceptance specified in 12.3 of IEC 60076-10 are met. This is because the sound intensity method takes into account the influence of near-field effects, constant background noise levels and reflections by measuring the sound pressure, particle velocity and phase angle between them, and using these quantities to calculate the active part of the test object's normal sound intensity.

Comme expliqué avant, les mesures d'intensité acoustique concernent des différences de pression acoustique mesurées entre deux microphones étroitement espacés, comme montré précédemment dans l'équation 8:

$$I = - \frac{p_A + p_B}{2\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad (8)$$

Les mesures réalisées dans des conditions où la différence de pression est petite par rapport à leur grandeur absolue tendent à devenir imprécises. Un exemple d'une telle condition est lorsqu'il y a des ondes stationnaires ou une proportion élevée d'énergie reflétée. Un indicateur de cet effet est la différence entre le niveau de pression acoustique moyen non corrigé, $\overline{L_{pA0}}$, qui contient le bruit de fond et les réflexions et le niveau moyen d'intensité acoustique, $\overline{L_{IA}}$, qui mesure la propagation du niveau de puissance acoustique de l'objet d'essai. Des expériences ont montré que la précision de mesure de l'intensité acoustique est fortement influencée par la différence ΔL :

$$\Delta L = \overline{L_{pA0}} - \overline{L_{IA}} \quad (12)$$

où, selon la CEI 60076-10, il est exigé que ΔL soit < 8 dB pour qu'un essai soit accepté.

En moyenne, les mesures réalisées à 0,3 m de l'objet d'essai résultent en une moyenne ΔL de 4 dB en raison de la puissance réactive dans le champ proche. Cela se produit parce que la pression acoustique et la vitesse de particules ont lieu en discordance de phase dans le champ réactif, et cela est détecté par la méthode d'intensité mais non par la méthode de pression. Si la distance de mesure est portée à 1 m, ΔL sera < 1 dB.

NOTE Les différences présentées ci-dessus sont les conclusions du CIGRÉ SC12-WG12, d'avril 1990. Plus de 30 transformateurs dans la gamme de puissances 0,1 MVA à 350 MVA ont été testés sous différentes conditions d'essai en usine.

Afin de limiter l'erreur de mesure de l'intensité acoustique due aux réflexions de 0,5 dB, il convient de placer l'objet d'essai à au moins:

- 1,2 m des murs dans le cas de deux murs réfléchissants adjacents;
- 1,8 m des murs pour trois murs réfléchissants adjacents.

Les mesures dans des éléments de transformateur se composant de 4 murs réfléchissants ne sont pas autorisées.

De même, les niveaux de bruit de fond élevés peuvent affecter l'intensité acoustique mesurée. L'équation 12 implique que, en mesurant dans le champ proche d'un transformateur de puissance, les mesures d'intensité acoustique peuvent être utilisées aussi longtemps que le niveau de pression acoustique du bruit de fond ne dépasse pas le niveau de pression acoustique à 0,3 m de l'objet d'essai de plus de 4 dB (c'est-à-dire la limite de 8 dB pour ΔL moins les 4 dB dus à la puissance réactive dans le champ proche). Lorsque les méthodes de mesure d'intensité à bande étroite ou à temps-synchrone sont utilisées, un ΔL pouvant aller jusqu'à 16 dB est autorisé.

En conséquence, la méthode d'intensité a l'avantage que les valeurs mesurées n'ont pas besoin de correction pour le bruit de fond constant et les effets de réflexion stationnaires.

As explained earlier, sound intensity measurements involve measuring sound pressure differences between two closely spaced microphones, as shown previously in equation 8:

$$I = -\frac{p_A + p_B}{2\rho} \int \left(\frac{p_A - p_B}{\Delta r} \right) dt \quad (8)$$

Measurements performed under conditions where the difference in pressure is small compared to their absolute magnitude tend to become inaccurate. An example of such a condition is when there are standing waves or a high proportion of reflected energy. An indicator of this effect is the difference between the uncorrected average sound pressure level, $\overline{L_{pA0}}$, which contains background noise and reflections and the average sound intensity level, $\overline{L_{IA}}$, which measures the sound power level propagating from the test object. Experiments have shown that sound intensity measurement accuracy is strongly influenced by the difference ΔL :

$$\Delta L = \overline{L_{pA0}} - \overline{L_{IA}} \quad (12)$$

where ΔL is required by IEC 60076-10 to be <8 dB for a test to be accepted.

On average, measurements performed at 0,3 m from the test object result in a mean ΔL of 4 dB due to the reactive power in the near-field. This occurs because the sound pressure and particle velocity are out of phase in the reactive field, and this is detected by the intensity method but not by the pressure method. If the measurement distance is increased to 1 m, ΔL will be <1 dB.

NOTE The differences presented above are the conclusions of CIGRÉ SC12-WG12, April 1990. More than 30 transformers in the power range 0,1 MVA to 350 MVA were tested under different factory test conditions.

In order to limit the sound intensity measurement error due to reflections to 0,5 dB, the test object should be positioned at least:

- 1,2 m from the walls in the case of two adjacent reflecting walls;
- 1,8 m from the walls for three adjacent reflecting walls.

Measurements in transformer cells consisting of 4 reflecting walls are not permitted.

Similarly, high background noise levels can affect the measured sound intensity. Equation 12 implies that, when measuring in the near-field of a power transformer, sound intensity measurements can be used as long as the sound pressure level of the background noise does not exceed the sound pressure level at 0,3 m from the test object by >4 dB (that is the 8 dB limit for ΔL minus the 4 dB due to reactive power in the near-field). When narrow-band or time-synchronous intensity measurement methods are used, a ΔL of up to 16 dB is permitted.

Consequently, the intensity method has the advantage that the measured values do not need correcting for constant background noise and stationary reflection effects.

6.4 Guide sur le choix de méthode

Dans le cas idéal, des conditions de champ libre, la méthode de pression acoustique et la méthode d'intensité acoustique fourniront la même valeur numérique pour la puissance acoustique de l'objet d'essai. Dans un environnement d'essai réel, où les effets des champs proche, le bruit de fond et les réflexions existent, la méthode de pression acoustique fournira une valeur plus élevée pour la puissance acoustique si aucune correction environnementale n'est faite.

Les mesures d'intensité acoustique donnent donc une mesure directe de la puissance acoustique de l'objet d'essai, si les critères pour l'acceptation indiquée en 12.3 de la CEI 60076-10 sont réunis. Les mesures de pression acoustique sont également acceptables, si les facteurs appropriés de correction sont appliqués et les critères indiqués en 11.3 de la CEI 60076-10 sont réunis.

Les mesures d'intensité acoustique peuvent être utilisées pour quantifier la puissance acoustique d'un objet d'essai lorsque les conditions d'essai sont en dehors des limites établies pour la méthode de pression acoustique. Quand l'environnement d'essai est en dehors des critères d'acceptation pour la méthode d'intensité acoustique, il convient de considérer les méthodes de mesure d'intensité à bande étroite ou à temps synchrones si les niveaux de bruit de fond ne peuvent pas être réduits (par exemple en travaillant la nuit), ou un plus grand environnement d'essai trouvé (par exemple dehors).

7 Aspects pratiques des mesures du son acoustique

7.1 Généralités

Les exigences exposées dans la CEI 60076-10 sont le minimum exigé pour avoir une détermination acceptable du niveau de puissance acoustique d'un objet d'essai. Cependant, de nombreuses années d'expérience pratique ont démontré que ces exigences de base peuvent s'étendre et s'améliorer si un résultat plus précis est demandé. Cet article fournit des conseils pratiques supplémentaires sur la manière de faire les mesures de pression acoustique et d'intensité acoustique.

7.2 Orientation de l'objet d'essai

Dans une salle d'essai, les ondes de pression acoustiques émises produisent les ondes acoustiques directes et réfléchies. Les ondes réfléchies peuvent de manière constructive interférer avec les ondes émises pour produire des ondes stationnaires. Dans de telles conditions, les mesures de pression acoustique faites dans la région des ondes stationnaires donneront des surestimations de la puissance acoustique. Il est donc recommandé d'orienter l'objet d'essai comme illustré à la Figure 8.

7.3 Nombre de points de mesure sur une surface de mesure

La CEI 60076-10 indique que les positions de microphone doivent être sur le ou les contours prescrits, espacés de façon approximativement égales et séparés d'une distance inférieure ou égale à 1 m. Elle exige également six positions de microphone au minimum pour tout objet d'essai. Cependant, en raison de l'emplacement de la partie active dans la cuve, l'emplacement des éléments de refroidissement et la conception globale de la cuve, le champ acoustique peut être non homogène; en d'autres termes, un côté de la cuve peut émettre plus de son acoustique que les autres. L'expérience pratique a donc indiqué que les exigences de base pour le nombre de points de mesure peuvent être améliorées. Par exemple, si ΔL est donnée pour dépasser 8 dB en utilisant la technique d'intensité acoustique, la précision de l'essai peut être améliorée en mesurant à un tiers et à deux-tiers de la hauteur de l'objet d'essai quand, selon la CEI 60076-10, uniquement les mesures à mi-hauteur sont exigées. D'autres améliorations sont décrites ci-dessous.

6.4 Guidance on method selection

In idealized, free-field conditions, the sound pressure and the sound intensity method will yield the same numerical value for the sound power of the test object. In a real test environment, where near-field effects, background noise and reflections exist, the sound pressure method will yield a higher value for the sound power if no environmental corrections are made.

Sound intensity measurements therefore give a direct measure of the sound power of the test object, provided the criteria for acceptance specified in 12.3 of IEC 60076-10 are met. Sound pressure measurements are equally acceptable, provided the appropriate correction factors are applied and the criteria specified in 11.3 of IEC 60076-10 are met.

Sound intensity measurements can be used to quantify the sound power of a test object when the test conditions are outside the limits set for the sound pressure method. When the test environment is outside the acceptance criteria for the sound intensity method, narrow-band or time-synchronous intensity measurement methods should be considered if the background noise levels cannot be reduced, (for example by working at night) or a larger test environment found (for example, outdoors).

7 Practical aspects of making sound measurements

7.1 General

The requirements set out in IEC 60076-10 are the minimum required to gain an acceptable determination of the sound power level of a test object. However, many years of practical experience have demonstrated that these basic requirements can be expanded upon, and improved if a more accurate result is required. This clause provides further practical advice on making sound pressure and sound intensity measurements.

7.2 Orientation of the test object

In a test room, the emitted acoustic pressure waves produce both direct and reflected sound waves. The reflected waves can constructively interfere with the emitted waves to produce standing waves. Under such conditions, sound pressure measurements made in the region of standing waves will give over-estimates of sound power. It is therefore advisable to orientate the test object as illustrated in Figure 8.

7.3 Number of measurement points on a measuring surface

IEC 60076-10 states that the microphone positions shall be on the prescribed contour(s), approximately equally spaced and not more than 1 m apart. It also requires a minimum of six microphone positions for any test object. However, due to the location of the active part in the tank, the location of cooling elements and the overall design of the tank, the sound field can be inhomogeneous; in other words, one side of the tank may emit more sound than the others. Practical experience has therefore indicated that the basic requirement for the number of measurement points can be improved upon. For example, if ΔL is found to exceed 8 dB when using the sound intensity technique, the accuracy of the test may be improved by measuring at one-third and two-thirds of the test object height when, according to IEC 60076-10, only measurements at half the height are required. Further refinements are described below.

7.3.1 Transformateurs de puissance

La contrainte de base d'avoir des positions de microphone avec un espacement de 1 m au maximum résulte en une détermination acoustique acceptable en raison de la grandeur des transformateurs de puissance et, par conséquent, sensiblement plus de six positions sont exigées. Le fait de faire la moyenne des niveaux sonores mesurés à chaque point permet de réduire l'influence des niveaux sonores locaux élevés et bas dans le champ acoustique.

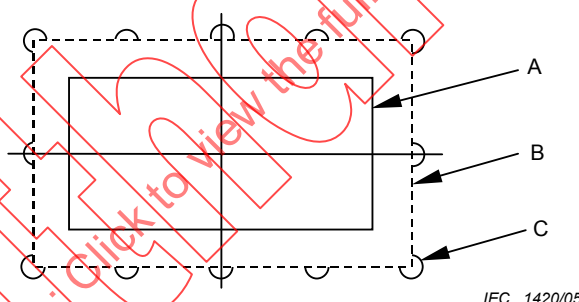
7.3.2 Transformateurs de distribution

Bien que les exigences minimales relatives aux six positions de mesure par contour prescrit (à chaque hauteur de mesure) puissent être acceptables du point de vue de l'obtention des positions de microphone espacées de 1 m au maximum, huit positions de mesure par contour prescrit (à chaque hauteur de mesure) peuvent être préférables. Il convient de répartir ces positions au milieu de chaque côté du réservoir et une à chaque coin.

Pour une mesure plus précise, vingt points équidistants sur le contour prescrit peuvent être utilisés. Cependant, les exigences ont montré qu'il y a une différence inférieure à 1 dB(A) entre une détermination acoustique basée sur huit points de mesure et une basée sur vingt points de mesure.

7.3.3 Transformateurs de type sec

Dans la plupart des cas, en raison des fortes différences dans le rayonnement du champ acoustique des trois bobines, l'expérience a montré que douze points sont exigés. Il convient de répartir ces points avec un au milieu de chaque bobine, et un à chaque coin de l'enveloppe, voir la Figure 10.



Légende

- A transformateur
- B contour prescrit
- C positions du microphone

Figure 10 – Croquis du transformateur de type sec montrant les points de mesure

Pour une mesure plus précise, vingt points équidistants sur le contour prescrit peuvent être utilisés. L'expérience a montré qu'il y a une différence inférieure à 1 dB(A) entre une détermination acoustique basée sur douze points de mesure et une basée sur vingt points de mesure.

7.4 Choix de l'espacement du microphone pour les mesures d'intensité acoustique

En utilisant la technique de deux microphones, il est nécessaire de choisir un espacement qui soit approprié pour les fréquences en mesure (voir Figure 7). Les hypothèses faites dans la théorie des mesures d'intensité acoustique imposent une limite de fréquence supérieure pour des mesures précises – plus l'espacement est *petit*, plus la fréquence qui peut être mesurée est élevée. L'erreur de phase dans le système d'analyse cause une limite de basse fréquence – plus l'espacement est *grand*, plus la fréquence qui peut être mesurée avec précision est petite.

7.3.1 Power transformers

The basic constraint of having microphone positions with a spacing of not more than 1 m apart results in an acceptable sound determination because power transformers are large, and consequently significantly more than six positions are required. Averaging of the sound levels measured at each point reduces the influence of local highs or lows in the sound field.

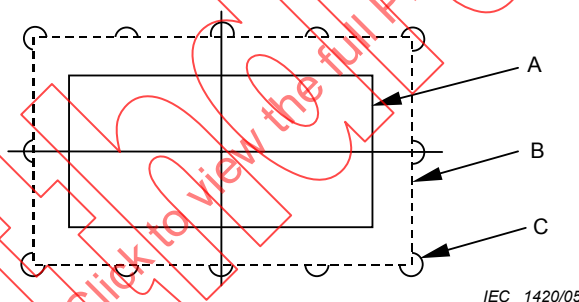
7.3.2 Distribution transformers

Although the minimum requirement of six measuring positions per prescribed contour (at each measurement height) may be acceptable from the point of view of having the microphone positions not more than 1 m apart, eight measuring positions per prescribed contour (at each measurement height) may be preferable. These should be distributed at the middle of each side of the tank and one at each corner.

For a more accurate measurement, twenty points equally spaced on the prescribed contour may be used. However, experiments have shown that the difference between a sound determination based on eight measurement points and one based on twenty measurement points is less than 1 dB(A).

7.3.3 Dry-type transformers

In most cases, due to the strong differences in the sound field radiating from the three coils, experience has shown that twelve points are required. These should be distributed with one at the middle of each coil, and one at each corner of the enclosure, see Figure 10.



IEC 1420/05

Key

- A transformer
- B prescribed contour
- C microphone positions

Figure 10 – Sketch of dry-type transformer showing measurement points

For a more accurate measurement, twenty points equally spaced on the prescribed contour can be used. Experiments have shown that the difference between a determination based on twelve measurement points and a determination made with twenty measurement points is less than 1 dB(A).

7.4 Choice of microphone spacer for sound intensity measurements

When using the two-microphone technique, it is necessary to choose a spacer (see Figure 7) that is appropriate for the frequencies being measured. The assumptions made in the theory of sound intensity measurements impose an upper frequency limit for accurate measurements – the *smaller* the spacer, the higher the frequency that can be measured. Phase mismatch in the analysing system causes a low frequency limit – the *larger* the spacer, the lower the frequency that can be measured accurately.

Pour les personnes qui font les mesures d'intensité acoustique, il convient de se reporter au manuel du constructeur de l'appareil de mesure afin de déterminer la longueur appropriée de l'espacement pour chaque objet d'essai. En tant que guide, un espacement de longueur 50 mm est typiquement utilisé pour le son acoustique de basse fréquence des transformateurs et des bobines d'inductance (environ 63 Hz à 1 250 Hz), alors qu'un espacement de 12 mm est exigé pour le son acoustique de haute fréquence des appareils de refroidissement (environ 250 Hz à 5 000 Hz).

7.5 Impact du bruit de fond sur les mesures d'intensité acoustique

Comme décrit avant, la méthode d'intensité acoustique mesure la partie de propagation du champ acoustique seule et donc ses résultats n'exigent pas une correction pour le bruit de fond. Cependant, il y a toujours des limites concernant le niveau du bruit de fond qui est acceptable pour une mesure valable, et ces limites dépendent de l'appareil de mesure.

Comme indiqué par l'équation 8, l'intensité acoustique à chaque point est calculée à partir de la moyenne de la pression acoustique mesurée sur deux microphones étroitement espacés et la différence entre les deux pressions acoustiques sur la même paire de microphones.

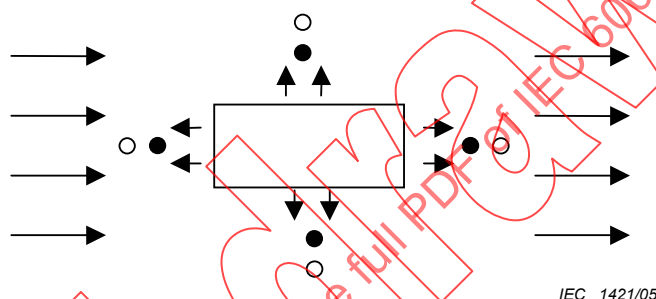


Figure 11 – Illustration du bruit d'ambiance traversant la zone d'essai et le son acoustique rayonné de l'objet d'essai. Positions de paire de microphones indiquées par les cercles ouverts (microphone A) et fermés (microphone B)

A chaque point, l'intensité acoustique rayonnée de l'objet d'essai est liée à une petite différence de pression entre les deux microphones.

Aux positions de mesure à proximité des grands côtés de l'objet d'essai sur la Figure 11, il convient que la contribution du champ de bruit de fond aux pressions mesurées p_A et p_B soit égale. Pour des niveaux de bruit de fond élevés, le système de mesure doit détecter une petite différence entre deux grands signaux de pression. Habituellement, l'erreur de mesure pour chaque microphone est un certain pourcentage de la pleine échelle. Si la pression du bruit de fond est aussi élevée que l'erreur pleine échelle est du même ordre de grandeur que la différence de pression provoquée par le son acoustique de l'objet d'essai, la mesure de l'intensité acoustique à chaque point devient incertaine. La différence locale $\Delta L (= L_p - L_1)$ indiquera ce type de problème. Par conséquent, il convient d'examiner ΔL pour chaque point de mesure, ainsi que les moyennes des valeurs de pression acoustique et d'intensité acoustique, afin d'indiquer l'acceptabilité de l'environnement d'essai. Le même effet se produit avec de grandes contributions du son acoustique reflété.

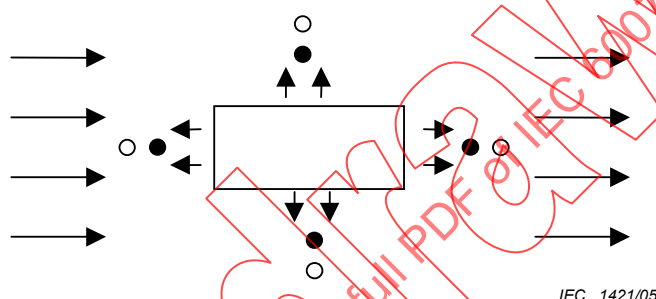
Aux positions de mesure à proximité des petits côtés de l'objet d'essai sur la Figure 11, il y aura une différence significative entre p_A et p_B , dont l'amplitude sera principalement déterminée par le bruit de fond. Pour chaque position de mesure de ces côtés, ΔL (le log de $(p_A + p_B)/2/(p_A - p_B)$) ne donnera aucun avertissement d'une mesure non valable. Toutefois, le système peut seulement détecter l'intensité acoustique à chaque position avec une précision limitée, qui est encore donnée par un certain pourcentage de la pleine échelle. La puissance acoustique rayonnant à partir des petits côtés de l'objet d'essai est déterminée à partir de la petite différence dans les intensités sur les côtés gauche et droit de l'objet d'essai.

Persons making sound intensity measurements should refer to the measurement equipment manufacturer's handbook in order to determine the appropriate spacer length for each test object. As a guide, a spacer of length 50 mm is typically used for low-frequency (approximately 63 Hz to 1 250 Hz) sound from transformers and reactors, while a 12 mm spacer is required for higher-frequency (approximately 250 Hz to 5 000 Hz) sound from cooling equipment.

7.5 Impact of background noise on sound intensity measurements

As described above, the sound intensity method measures the propagating part of the sound field only and therefore its results do not require a correction for background noise. However, there are still limits regarding the level of background noise which is acceptable for a valid measurement, and these limits depend on the measurement equipment.

As indicated by equation 8, the sound intensity at each point is computed from the average of the sound pressure measured at two closely spaced microphones and the difference between the two sound pressures at the same microphone pair.



IEC 1421/05

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

At each point, the sound intensity radiated from the test object is related to a small pressure difference between the two microphones.

At the measurement positions near the long sides of the test object in Figure 11, the contribution of the background noise field to the measured pressures p_A and p_B should be equal. In high background noise levels, the measurement system has to detect a small difference between two large pressure signals. Usually the measurement error for each microphone is a certain percentage of the full range. If the background noise pressure is so high that the full range error is of the same order of magnitude as the pressure difference caused by the sound from the test object, the measurement of sound intensity at each point becomes uncertain. The local difference $\Delta L (= L_p - L_l)$ will indicate this type of problem. Therefore, ΔL should be examined for each measurement point, as well as for the averages of the sound pressure and sound intensity values, in order to indicate the acceptability of the test environment. The same effect occurs with large contributions from reflected sound.

At the measurement positions near the short sides of the test object in Figure 11, there will be a significant difference between p_A and p_B , the magnitude of which will primarily be determined by the background noise. For each measurement position on these sides, ΔL (the log of $(p_A + p_B)/2/(p_A - p_B)$) will give no warning of an invalid measurement. However, the system can only detect the sound intensity at each position with limited precision, which again is given by a certain percentage of the full range. The sound power radiating from the short sides of the test object is determined from the small difference in intensities on the left and

Si cette différence est dans la gamme de l'erreur de mesure pour les lectures individuelles, la mesure devient incertaine malgré une valeur de ΔL acceptable localement. Dans ce cas, seul le ΔL déterminé à partir de la moyenne sur la surface de mesure entière des niveaux de pression et d'intensité acoustique mesurés indique qu'il existe une incertitude.

Le point ci-dessus démontre que la validité des mesures d'intensité acoustique peut être jugée uniquement sur la base du ΔL déterminé à partir des niveaux de pression et d'intensité acoustique moyens mesurés sur la surface de mesure entière – fermée.

La limite de $\Delta L = 8$ dB indiqué dans la CEI 60076-10 est une conséquence de la précision des appareils de mesure disponibles au moment des travaux d'expérimentation.

7.6 Mesures en présence d'écrans d'insonorisation

Dans les cas où les transformateurs sont équipés d'un écran d'insonorisation qui laisse le dessus du transformateur découvert, par exemple une tôle d'acier décalée à 0,5 m du réservoir, le niveau sonore en dehors de cette enveloppe ne peut être déterminé de manière précise en utilisant un contour prescrit à 0,3 m comme décrit dans la CEI 60076-10. Cela vient du fait que l'énergie acoustique ne peut plus être rayonnée de manière égale dans toutes les directions et, par conséquent, l'approximation $S = 1,25 \pi r_m^2$ ne sera pas valable. Cette méthode serait susceptible de sous-estimer la puissance acoustique rayonnée dans le champ éloigné.

Il convient d'étudier la possibilité de faire des mesures à une plus grande distance (au moins 2 m). Alternativement, les mesures faites à 0,3 m à partir de l'écran d'insonorisation pourraient être augmentées en calculant la puissance acoustique du transformateur sans enveloppe partielle selon les procédures empiriques du constructeur. Une fraction de cette puissance acoustique proportionnelle à la fraction de la surface découverte du transformateur pourrait alors être ajoutée de manière énergétique à la puissance acoustique mesurée à 0,3 m en dehors de l'écran afin d'arriver à une estimation. L'une ou l'autre approche nécessiterait un accord entre le fabricant et l'acheteur à l'étape de négociation de contrat.

8 Différence entre les essais d'usine et les mesures du niveau acoustique de champ

8.1 Généralités

Afin d'assurer la répétabilité, les mesures d'usine sont effectuées dans des conditions contrôlées spécifiées par les normes relatives aux mesures du son acoustique. Les mesures du niveau acoustique effectuées sur site sont susceptibles de différer de celles effectuées en usine étant donné que les conditions de fonctionnement de l'objet d'essai peuvent varier de celles utilisées dans l'usine. Par conséquent, il convient de prendre en considération les effets des facteurs décrits de 8.2 à 8.9 quand l'acheteur définit les exigences relatives au niveau sonore pour l'objet d'essai et lors de l'interprétation d'une mesure de niveau sonore effectuée sur le site.

8.2 Facteur de puissance de charge

Dans l'usine, les niveaux acoustiques du noyau magnétique et des enroulements sont mesurés séparément à tension assignée et sans courant de charge pour le noyau magnétique et à courant assigné et à tension de court-circuit pour les enroulements. Les deux niveaux de puissance acoustique sont ajoutés pour prévoir le niveau sonore total de l'objet d'essai en fonctionnement. Cependant, cela suppose que les vibrations soient non corrélées.

right sides of the test object. If this difference is in the range of the measurement error for the individual readings, the measurement becomes uncertain in spite of an acceptable value of ΔL locally. In this case, only ΔL determined from the measured sound pressure and sound intensity levels averaged over the entire measurement surface indicates that there is uncertainty.

The above discussion demonstrates that the validity of sound intensity measurements can only be judged on the basis of ΔL determined from the measured sound pressure and sound intensity levels averaged over the entire – closed – measurement surface.

The limit of $\Delta L = 8$ dB stated in IEC 60076-10 is a consequence of the precision of the measurement equipment available at the time of the experimental work.

7.6 Measurements in the presence of sound-proofing screens

In cases where transformers are provided with a sound-proofing screen that leaves the top of the transformer uncovered, for example a lagged steel sheet at 0,5 m from the tank, the sound level outside this enclosure cannot be accurately determined using a prescribed contour at 0,3 m as described in IEC 60076-10. This is because the sound energy can no longer be assumed to radiate equally in all directions, and consequently the approximation $S = 1,25 h l_m$ will not be valid. This method would be likely to under-estimate the sound power radiated into the far field.

The possibility of making measurements at a greater distance (at least 2 m) should be investigated. Alternatively, measurements made at 0,3 m from the sound-proofing screen, could be augmented by calculating the sound power of the transformer without the partial enclosure according to the manufacturer's empirical procedures. A fraction of that sound power proportional to the fraction of uncovered transformer surface could then be added energetically to the sound power measured at 0,3 m outside the screen in order to arrive at an estimate. Either approach would require agreement between manufacturer and purchaser at the contract negotiation stage.

8 Difference between factory tests and field sound level measurements

8.1 General

In order to assure repeatability, factory measurements are made under controlled conditions specified by sound measurement standards. Sound level measurements made on-site are likely to differ from those made in the factory because the test object's operating conditions may deviate from those used in the factory. The effects of the factors described in 8.2 to 8.9 should therefore be considered when the purchaser specifies the sound level requirements for the test object and when interpreting a sound level measurement made on site.

8.2 Load power factor

In the factory, core and winding sound levels are measured separately at rated voltage and no load current and rated current and short-circuit voltage respectively. The two sound power levels are added to predict the total sound level of the test object in operation. However, this assumes that the vibrations are uncorrelated.

Dans les conditions de fonctionnement réelles, en fonction du facteur de puissance de la charge et de la direction de transmission de la charge, le flux magnétique dans les parties du noyau magnétique peut être modifié par la superposition du flux parasite provenant des enroulements. Un angle de phase entre la tension et le courant de charge peut par conséquent modifier, d'une petite quantité, la puissance sonore mesurée sur le site par rapport à la puissance sonore prévue par l'usine, généralement de l'ordre de 1 dB. Une charge réactive peut avoir un effet plus significatif, soit diminuer le niveau du bruit, soit l'augmenter.

8.3 Courant de charge

Sur le site, le courant de charge peut varier entre une condition à vide et une situation de surcharge. Entre ces extrémités, le niveau de puissance acoustique du courant de charge changera selon l'équation 13:

$$L_{WA,I} = L_{WA,IN} + 40 \lg \frac{I}{I_N} \quad (13)$$

où

- $L_{WA,I}$ est le niveau de puissance sonore « pondération A » au courant de fonctionnement;
- $L_{WA,IN}$ est le niveau de puissance acoustique « pondération A » au courant assigné;
- I est le courant de fonctionnement;
- I_N est le courant assigné.

Cette formule ne prend pas en considération les effets de magnétostriction provoqués par le flux de fuite dans le blindage magnétique dus au courant de charge.

Pour les transformateurs de forte puissance (MVA) à faible bruit, le courant de charge peut donc avoir un impact significatif sur le niveau sonore total. Les courants de charge modifient également la chute de tension interne dans les enroulements de transformateur, voir 8.2. C'est pourquoi la tension sur les enroulements varie, ce qui cause à son tour une variation dans le niveau sonore du transformateur.

Certains transformateurs sont fournis avec une bobine d'inductance interne, connectée dans le circuit d'enroulement tertiaire pour réduire le niveau de défaut. Par conséquent, la puissance du bruit rayonnée dépend fortement du courant de charge. Dans ces circonstances, le calcul de la puissance sonore à courant de charge peut ne pas être approprié. La mesure de la puissance sonore séparée de l'enroulement tertiaire court-circuité peut être exigée.

8.4 Tension de fonctionnement

La tension du réseau peut varier d'environ $\pm 10\%$ dans les conditions de fonctionnement réalistes et, par conséquent, l'induction du circuit magnétique et le niveau sonore de l'objet d'essai changeront. Pour les conceptions d'induction élevées dont le circuit magnétique approche de la saturation, une augmentation allant jusqu'à 10 dB peut être prévue.

8.5 Température de fonctionnement

Pour la majorité des transformateurs, le niveau sonore sera effectivement constant avec la température de fonctionnement variable; cependant, pour certaines unités, le niveau sonore peut augmenter avec l'augmentation de la température de fonctionnement. Dans ces cas, une augmentation typique correspondant au passage d'un démarrage à froid à l'équilibre aux conditions de fonctionnement normales peut être de 3 dB.

Under actual operating conditions, depending upon the power factor of the load and the transmission direction of load, the magnetic flux in portions of the core may be modified by superposition of stray flux from the windings. A phase angle between the voltage and the load current may therefore cause the sound power measured on site to differ from the factory-predicted sound power by a small amount, generally in the order of 1 dB. Shunt connected reactive loading may have a more significant effect, either to decrease the noise level or to increase it further.

8.3 Load current

On site, the load current can vary between a no-load condition and an overload situation. Between these extremes, the load-current sound power level will vary in accordance with equation 13:

$$L_{WA,I} = L_{WA,IN} + 40 \lg \frac{I}{I_N} \quad (13)$$

where

$L_{WA,I}$ is the A-weighted sound power level at the operating current;

$L_{WA,IN}$ is the A-weighted sound power level at rated current;

I is the operating current;

I_N is the rated current.

This formula does not consider magnetostriction effects caused by leakage flux in magnetic shielding due to the load current.

For large MVA, low noise transformers, the load current can therefore have a significant impact on the total sound level. The load currents also change the internal voltage drop in the transformer windings, see 8.2. The voltage on the windings therefore varies, which in turn causes a variation in the transformer sound level.

Some transformers are supplied with an internal reactor, connected in the tertiary winding circuit to reduce the fault level. Consequently, the radiated sound power is strongly dependent on the load currents. In these circumstances, calculation of the load current sound power may not be adequate. Separate sound power measurement with the tertiary winding short-circuited may be required.

8.4 Operating voltage

The network voltage can vary by as much as $\pm 10\%$ under realistic operating conditions, and consequently the core induction and the test object sound level will vary. For high induction designs where the core approaches saturation, an increase of up to 10 dB can be expected.

8.5 Operating temperature

For the majority of transformers, the sound level will be effectively constant with varying operating temperature; however, for certain units, the sound level may increase with increasing operating temperature. In these cases, a typical increase from a cold start to equilibrium at normal operating conditions could be 3 dB.

8.6 Les harmoniques dans le courant et la tension de charge

Durant les essais d'usine, un courant de charge sinusoïdal est utilisé pour mesurer le bruit d'enroulement. En service, l'alimentation de l'objet d'essai peut contenir des harmoniques. Le résidu harmonique dans le courant de charge peut avoir un impact plus important que prévu sur le niveau acoustique total du fait que des harmoniques plus élevées peuvent de manière constructive interférer avec la fréquence du courant de charge. Les fréquences doubles des fréquences harmoniques et la somme et la différence de toutes les fréquences correspondantes peuvent être produites. L'effet sur le niveau sonore global peut être significatif compte tenu que ces fréquences plus élevées sont moins atténuées par la pondération A que la fréquence fondamentale à 100 Hz ou à 120 Hz.

Les charges non linéaires dans les réseaux à basse tension peuvent causer des harmoniques dans la tension d'excitation, qui peut avoir comme conséquence une augmentation des niveaux sonores du circuit magnétique. Les courants harmoniques sont une cause importante de l'augmentation des niveaux sonores dans les transformateurs de courant de continu à haute tension (CCHT) et dans les transformateurs redresseurs.

8.7 Aimantation par courant continu

Même l'aimantation par courant continu modérée d'un noyau du transformateur, comme décrit en 4.2.1, aura comme conséquence une augmentation significative du niveau sonore du transformateur. Les noyaux modernes ont habituellement des courants à vide très bas. Une fois soumis aux courants de polarisation en mode continu, de tels noyaux peuvent développer des niveaux acoustiques d'au moins 20 dB supérieurs à la valeur d'essai d'usine.

Traditionnellement, les circuits tels que les câbles d'alimentation à courant continu pour les systèmes de transport ont été une source de champs continus dans les transformateurs. Cependant, avec l'augmentation de l'utilisation des appareils électroniques de puissance dans les systèmes de transport d'énergie et dans l'industrie, le nombre de sources possibles pour l'aimantation à courant continu augmente.

8.8 Effet de flux rémanent

Le flux rémanent a un effet semblable sur le niveau sonore à vide que sur celui produit par les courants polarisés en courant continu. Pendant l'examen d'usine, un grand soin est pris pour s'assurer que le flux rémanent provenant des essais de tension de choc de foudre ou des mesures de résistance est dissipé avant de réaliser les essais de niveau acoustique. On permet au niveau sonore du transformateur de se stabiliser avant de réaliser les mesures du niveau sonore.

Sur le site, l'activation et la désactivation du transformateur ou les actions de commutation dans le réseau peuvent introduire du flux rémanent et par conséquent augmenter le niveau sonore du transformateur. Dans les transformateurs reliés à des lignes de transmission de grande longueur, les tempêtes géomagnétiques peuvent également causer de sévères aimantations à courant continu. Ces effets de flux rémanent déclineront naturellement avec le temps; cela peut prendre quelques minutes ou, dans les cas extrêmes, plusieurs heures.

8.9 Formation de niveau sonore due aux réflexions

Dans le cas des installations intérieures, par exemple une salle avec des murs de coefficient d'absorption acoustique bas, le son acoustique du transformateur se reflétera dans les deux sens entre les murs donnant lieu à une formation du niveau de pression acoustique dans la salle. En prenant l'hypothèse d'un champ réverbéré, le nombre de décibels duquel le niveau de pression acoustique mesuré autour du transformateur augmentera peut être approché selon l'équation 14 ci-dessous:

8.6 Harmonics in the load current and voltage

During factory tests, a sinusoidal load current is used for measuring winding noise. In service, the supply to the test object may contain harmonics. Harmonic content in the load current can have a larger impact on the total sound level than expected because higher harmonics can constructively interfere with the power frequency current. Frequencies of twice the harmonic frequencies and the sum and the difference of all the constituent frequencies may be produced. The effect on the overall sound level can be significant because these higher frequencies are attenuated less by A-weighting than the 100 Hz or 120 Hz fundamental.

Non-linear loads in weak networks can cause harmonics in the excitation voltage, which may result in an increase in core sound levels. Current harmonics are a major cause of increased sound levels in HVDC and rectifier transformers.

8.7 DC magnetization

Even moderate d.c. magnetization of a transformer core, as described in 4.2.1 will result in a significant increase in the transformer sound level. Modern cores usually have very low no-load currents. When subjected to d.c. bias currents, such cores may develop sound levels as much as 20 dB higher than the factory test value.

Traditionally, circuits such as d.c. feeders to transportation systems have been a source of d.c. fields in transformers. However, with the increased use of power electronic equipment in power transmission systems and industry, the number of possible sources for d.c. magnetization is increasing.

8.8 Effect of remanent flux

Remanent flux has a similar effect on the no-load sound level to that produced by d.c. bias currents. During factory testing, great care is taken to ensure that the remanent flux originating from lightning impulse tests or resistance measurements is dissipated prior to performing the sound level tests. The sound level of the transformer is allowed to stabilise before the sound level measurements are performed.

On site, energising and de-energising the transformer or switching actions in the network can introduce remanent flux and hence increase the transformer sound level. In transformers connected to long transmission lines, geomagnetic storms may also cause severe d.c. magnetization. These remanent flux effects will decay naturally with time; this can take a few minutes or, in extreme cases, several hours.

8.9 Sound level build-up due to reflections

In the case of indoor installations, for example, a room with walls of low sound absorption coefficient, the sound from the transformer will reflect back and forth between the walls resulting in a build-up of the sound pressure level in the room. Assuming a reverberant field, the number of decibels by which the sound pressure level measured around the transformer will increase may be approximated according to equation 14:

$$\text{Accroissement de bruit en dB} = 10 \lg \left[1 + \frac{4(1-\alpha)A_T}{\alpha A_U} \right] \quad (14)$$

où

A_T est la superficie du transformateur;

A_U est la superficie de la surface réfléchissante;

α est le coefficient d'absorption moyen des surfaces.

Dans une salle avec des murs en béton (avec un coefficient d'absorption de 0,05) et avec une zone de surface réfléchissante acoustique de quatre fois celle du transformateur ($A_U/A_T = 4$), l'augmentation du niveau de pression acoustique au transformateur sera de 13 dB. Cependant, couvrir les surfaces réfléchissantes de cette salle avec un matériau absorbant de coefficient d'absorption 0,3 ramènera cette formation à 5,2 dB.

Des augmentations similaires du niveau de pression acoustique peuvent avoir lieu dans des installations avec des murs qui entourent partiellement le transformateur; dans ces cas, des techniques de calcul spéciales seront nécessaires pour quantifier l'augmentation du niveau de pression acoustique.

8.10 Influence de la distance lorsqu'on fait des mesures sur le site

La propagation du son est affectée par beaucoup de facteurs, tels que l'absorption atmosphérique, les barrières d'intercession et les surfaces réfléchissantes. Une explication de ces facteurs n'entre pas dans le domaine d'application du présent texte, toutefois ils sont mentionnés pour mettre au courant l'utilisateur de leur influence potentielle. Si les conditions du site qui permettent d'influencer la propagation du son existent et qu'il est prévu de faire des mesures sur place à une distance significative de l'objet d'essai, il convient à l'utilisateur de ce guide de consulter les manuels de propagation acoustiques ou de consulter un expert dans la conduction des calculs précis de propagation du son.

En prenant l'hypothèse d'une propagation hémisphérique et en négligeant l'absorption par le sol et les influences atmosphériques, le niveau de pression acoustique mesuré à une distance R (où R est > 30 m) peut être estimé selon l'équation 15 suivante:

$$L_{pAR} = L_{WA} - 10 \lg \frac{2\pi R^2}{S_0} \quad (15)$$

où

L_{pAR} est le niveau de pression acoustique «pondération A» à distance R ;

L_{WA} est le niveau de puissance acoustique «pondération A»;

S_0 est la surface de référence, égale à 1 m^2 .

8.11 Transformateurs de convertisseur avec bobines d'inductance et/ou transformateurs d'interphase à noyau saturable

A la différence des transformateurs conventionnels, le niveau acoustique des transformateurs de convertisseur est affecté par la présence de bobines d'inductance et/ou de transformateurs d'interphase à noyau saturable. L'ampleur de cet effet dépend du degré de saturation des bobines d'inductance saturables et du courant de charge dans des transformateurs d'interphase. Le son acoustique des transformateurs de convertisseur est étudié dans la brochure technique du CIGRÉ numéro 202¹⁾.

¹⁾ Brochure technique du CIGRÉ n° 202 :2002, "HVDC stations audible noise"

$$\text{dB build-up} = 10 \lg \left[1 + \frac{4(1-\alpha)A_T}{\alpha A_U} \right] \quad (14)$$

where

A_T is the surface area of the transformer;

A_U is the area of the reflecting surface;

α is the average absorption coefficient of the surfaces.

In a room with concrete walls (with an absorption coefficient of 0,05) and with a sound reflecting surface area of four times that of the transformer ($A_U/A_T = 4$), the increase in sound pressure level at the transformer will be 13 dB. However, covering the reflecting surfaces of this room with sound absorbing material of absorption coefficient 0,3 will reduce this build-up to 5,2 dB.

Similar increases in sound level can take place in installations with walls that partially surround the transformer; in these cases, special calculation techniques will be needed to quantify the sound level increase.

8.10 Influence of distance when making on-site measurements

Sound propagation is affected by many factors, such as atmospheric absorption, interceding barriers and reflective surfaces. An explanation of these factors is beyond the scope of this text, however they are mentioned to make the user aware of their potential influence. If site conditions exist which will influence the sound propagation and it is intended to make on-site measurements at a significant distance from the test object, the user of this guide should reference acoustic propagation text-books or consult an expert in conducting accurate sound propagation calculations.

Assuming hemispherical propagation and neglecting ground absorption and atmospheric influences, the sound pressure level measured at a distance R (where R is > 30 m) may be estimated according to equation 15:

$$L_{pAR} = L_{WA} - 10 \lg \frac{2\pi R^2}{S_0} \quad (15)$$

where

L_{pAR} is the A-weighted sound pressure level at distance R ;

L_{WA} is the A-weighted sound power level;

S_0 is the reference surface, equal to 1 m^2 .

8.11 Converter transformers with saturable reactors and/or interphase transformers

Unlike conventional transformers, the sound level of converter transformers is affected by the presence of saturable reactors and/or interphase transformers. The extent of this effect depends upon the degree of saturation of saturable reactors and on the load current in interphase transformers. Sound from converter transformers is discussed in CIGRÉ Technical Brochure No. 202¹⁾.

¹⁾ CIGRÉ Technical Brochure No. 202:2002, "HVDC stations audible noise"

9 Spécification des niveaux acoustiques de transformateur et de bobine d'inductance

9.1 Généralités

Le fait qu'il y a un certain nombre d'options disponibles pour définir les niveaux acoustiques signifie qu'il est nécessaire pour l'acheteur de considérer la façon de régler un niveau de garantie en passant une commande pour de nouveaux appareils. Ainsi, toute ambiguïté sera évitée dans l'interprétation des résultats obtenus lorsque l'unité est soumise à ses essais d'acceptation finaux.

Avant qu'un contrat formel soit signé, il convient que les informations suivantes fassent l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur:

- la garantie du niveau de pression ou de puissance acoustique;
- le choix de la méthode d'essai (pression acoustique ou intensité acoustique);
- toute variation autorisée des exigences de la CEI 60076-10 (telle que l'utilisation d'une distance de mesure différente pour compenser la présence d'une enveloppe de bruit partielle ou d'un écran d'insonorisation);
- les conditions de charge (telles que la tension d'essai et le facteur de puissance);
- la présence de matériel auxiliaire, tel que des refroidisseurs;
- le type de régulation de tension, flux constant ou variable;
- les conditions de fonctionnement sur site (optionnelles).

Dans certains pays, il existe une législation qui exige des produits fonctionnant dans les limites de bruit indiquées. Dans de tels pays, il convient de veiller à s'assurer de la conformité avec ces exigences légales.

De même, des normes de performances de produit ont été produites dans quelques pays qui reflètent les «règles de l'art» concernant divers attributs, y compris les niveaux acoustiques du produit. La conformité à ces valeurs est fortement recommandée.

9.2 Niveaux acoustiques de garantie

L'acheteur détient normalement un niveau de garantie pour le niveau sonore demandé en considérant l'environnement du site conjointement avec les facteurs décrits à l'Article 8. Ce niveau de garantie sera utilisé par le fabricant en concevant le transformateur ou la bobine d'inductance. La meilleure façon d'exprimer un niveau de garantie est comme niveau de puissance acoustique. Alternativement, l'acheteur peut demander pour un niveau de pression acoustique de surface moyenne mesuré à une distance spécifique, voir 11.3 de la CEI 60076-10. Exceptionnellement, l'acheteur peut désirer un niveau de pression acoustique destiné à une plus grande distance de l'unité, voir l'Article 15 de la CEI 60076-10, généralement pour être conforme avec les règlements nationaux en ce qui concerne les valeurs du niveau acoustique à la ligne de clôture d'une installation. La prévision de ces valeurs nécessite la connaissance de la propagation du son dans l'environnement spécifique de l'installation; normalement, cela n'est pas mis à disposition du fabricant de transformateur. Il peut donc être plus approprié pour l'acheteur d'établir le niveau de garantie à une des distances normalisées ou le niveau de puissance acoustique.

9 Specifying transformer and reactor sound levels

9.1 General

The fact that there are a number of options available for defining sound levels means that it is necessary for the purchaser to consider how to set a guarantee level when placing an order for new equipment. Thus any ambiguity will be avoided in the interpretation of the results obtained when the unit is subjected to its final acceptance tests.

Before a formal contract is signed, the manufacturer and purchaser should agree the following information:

- the guarantee sound pressure or power level;
- the choice of test method (sound pressure or sound intensity);
- any permitted variation from the requirements of IEC 60076-10 (such as the use of a different measurement distance to compensate for the presence of a partial noise enclosure or sound-proofing screen);
- the load conditions (such as the test voltage and power factor);
- presence of auxiliary equipment, such as coolers;
- the type of voltage regulation, constant or variable flux;
- on-site operating conditions (optional).

In some countries, legislation exists which requires products to operate within specified noise limits. In such countries, care should be taken to ensure compliance with these legal requirements.

Similarly, product performance standards have been produced in some countries which reflect the 'state of the art' regarding various attributes, including sound levels of the product. Compliance with these values is highly recommended.

9.2 Guarantee sound levels

The purchaser normally derives a guarantee level for the required sound level by considering the on-site environment in conjunction with the factors described in Clause 8. This guarantee level will be used by the manufacturer when designing the transformer or reactor. The best way to express a guarantee level is as a sound power level. Alternatively, the purchaser can ask for an average surface sound pressure level measured at a specific distance, see 11.3 of IEC 60076-10. Exceptionally, the purchaser may desire a sound pressure level predicted at a larger distance from the unit, see Clause 15 of IEC 60076-10, usually to comply with national regulations regarding sound level values at the fence-line of an installation. The prediction of these values requires knowledge about sound propagation in the specific environment of the installation; this is normally not available to the transformer manufacturer. It may therefore be more appropriate for the purchaser to establish the guarantee level at one of the standard distances or the sound power level.

9.3 Choix de la méthode d'essai

9.3.1 Généralités

Historiquement, le niveau sonore d'un transformateur ou d'une bobine d'inductance a été généralement déterminé par la méthode de pression acoustique. Soit le niveau de pression acoustique moyen à une distance spécifiée de l'objet d'essai soit un niveau de puissance acoustique déterminé à partir de celui qui a été cité dans les rapports d'essai. Tout cela a mené à une grande base de données de résultats disponibles pour aider à estimer l'influence de la nouvelle unité sur son environnement prévu; ainsi la méthode préférentielle qui est souvent utilisée pour la mesure est la méthode de pression acoustique. Cependant, les mesures de pression acoustique nécessitent des corrections pour l'influence des niveaux et des réflexions du bruit de fond. Alternativement, les mesures d'intensité acoustique peuvent être utilisées pour déterminer un niveau de puissance acoustique; cela évite le besoin de facteurs de correction aussi longtemps que l'environnement d'essai répond aux critères appropriés.

Avant de signer un contrat formel, il est nécessaire de convenir de la méthode d'essai qui sera utilisée.

9.3.2 Mesures alternatives pour transformateurs à faible bruit

Lorsque le différentiel demandé entre le niveau acoustique de l'objet d'essai et le niveau du bruit de fond ne peut pas être réalisé dans l'usine, une méthode alternative de mesure peut être considérée. Le son acoustique du transformateur se compose de tonalités au double de la fréquence du réseau et aux harmoniques paires de cette fréquence (hypothèse d'excitation sinusoïdale et aucune polarisation en courant continu). Par conséquent, en appliquant des mesures de moyenne en temps synchrone ou à bande étroite, uniquement aux fréquences concernées, il est possible d'atténuer le bruit non corrélé.

Bien que ces méthodes réduisent l'effet du bruit de fond non corrélé, elles n'éliminent pas l'effet des réflexions. Par conséquent, il peut être nécessaire de replacer l'objet d'essai à un emplacement approprié à l'extérieur où les influences du bruit de fond et les réflexions sont réduites au minimum.

Le bruit de refroidissement est à large bande, donc ces méthodes ne peuvent pas être utilisées lorsque l'appareil de refroidissement auxiliaire est en fonctionnement.

9.3.2.1 Mesures à bande étroite

Il convient que l'acceptabilité de l'utilisation de cette technique de mesure fasse l'objet d'un accord avec l'acheteur. Cela ne se produit pas nécessairement à l'établissement de l'offre étant donné qu'il peut ne pas être connu que les mesures à bande étroite sont demandées (par exemple, si l'objet d'essai est trop silencieux comparé au bruit de fond) jusqu'à ce que des essais acoustiques soient commencés sur l'objet d'essai complet.

Si la méthode de mesure à bande étroite est sélectionnée, l'harmonique effective générée peut tomber en dehors de la largeur de bande de l'instrument de mesure lorsque la fréquence de l'alimentation se trouve encore à l'intérieur de ses limites de variation permises. Si la fréquence d'alimentation mesurée engendre une fréquence d'harmonique en dehors de la largeur de bande choisie (Δf), l'acceptation de cette mesure exige l'accord entre le fabricant et l'acheteur au moment de l'essai ou bien il convient de sélectionner une largeur de bande supérieure (ou une largeur de bande contenant cette harmonique).

9.3.2.2 Mesures en temps synchrone

La moyenne en temps synchrone est une moyenne d'enregistrements de temps numérisés du signal sonore, dont le début est défini par un signal de déclenchement répétitif. En utilisant un signal de déclenchement synchrone avec le son du transformateur, par exemple la tension de réseau, tous les bruits non synchrones seront éliminés.

9.3 Choice of test method

9.3.1 General

Historically, the sound level of a transformer or reactor has usually been determined by the sound pressure method. Either the average sound pressure level at a specified distance from the test object or a sound power level determined from this has been quoted in test reports. This has led to a large database of results being available to help estimate the influence of the new unit on its intended environment, and thus sound pressure is often the preferred method for measurement. However, sound pressure measurements need correcting for the influence of background noise levels and reflections. Alternatively, sound intensity measurements can be used to determine a sound power level; this avoids the need for correction factors as long as the test environment meets the relevant criteria.

Before signing a formal contract, it is necessary to agree which test method will be used.

9.3.2 Alternative measurements for low noise transformers

When the required differential between the sound level of the test object and the background noise cannot be achieved in the factory, an alternative method of measurement may be considered. Transformer sound consists of tones at double the power frequency and at even harmonics of that frequency (assuming sinusoidal excitation and no d.c. bias). Therefore, by applying time-synchronous averaging or narrow-band measurements to only these frequencies, it is possible to attenuate uncorrelated noise.

Although these methods reduce the effect of uncorrelated background noise, they do not eliminate the effect of reflections. Therefore, it may be necessary to relocate the test object to a suitable site outdoors where the influences of background noise and reflections are reduced to a minimum.

Cooling noise is broad-band, therefore these methods cannot be used when auxiliary cooling equipment is operational.

9.3.2.1 Narrow-band measurements

The acceptability of using this measurement technique should be agreed with the purchaser. This may not necessarily occur at the tender stage because it may not be known that narrow-band measurements are required (for example, if the test object is too quiet compared to the background noise) until sound tests are begun on the completed test object.

If the narrow-band measuring method is selected, the actual harmonic generated may fall outside the bandwidth of the measuring instrument when the frequency of the power supply is still within its permitted variation. If the measured supply frequency generates a harmonic frequency outside the chosen bandwidth (Δf), the acceptance of the measurement requires agreement between manufacturer and purchaser at the time of testing or a wider bandwidth (or different bandwidth containing that harmonic) should be selected.

9.3.2.2 Time-synchronous measurements

Time-synchronous averaging is an averaging of digitised time records of the sound signal, the start of which is defined by a repetitive trigger signal. By using a trigger signal synchronous with the transformer sound, for example, network voltage, all non-synchronous noise will be eliminated.

Il convient que l'acceptabilité de l'utilisation de cette technique de mesure fasse l'objet d'un accord avec l'acheteur. Cela ne se produit pas nécessairement à l'établissement de l'offre étant donné qu'il peut ne pas être connu que des mesures à bande étroite sont demandées (par exemple si l'objet d'essai est trop silencieux comparé au bruit de fond) jusqu'à ce que les essais acoustiques commencent sur l'objet d'essai complet.

Lorsque des mesures à temps synchrone sont effectuées, il est essentiel que le microphone soit maintenu dans une position fixe par rapport au transformateur. On ne permet pas dans ce cas-ci de déplacer le microphone sans interruption sur le contour prescrit comme décrit à l'Article 8 de la CEI 60076-10.

9.4 Conditions de charge

9.4.1 Son acoustique du courant de charge

Historiquement, des mesures du niveau acoustique sur des transformateurs ont été réalisées dans des conditions de circuit ouvert avec seulement le courant magnétisant passant dans les enroulements. Cela était acceptable étant donné que la déformation magnétostrictive du noyau est la source primaire de bruit. Cependant, les conceptions de transformateur avec un niveau acoustique à vide faible, par exemple avec des niveaux d'induction bas, ont réduit le son acoustique produit par le circuit magnétique de telle façon que le son acoustique du courant de charge provoqué par les enroulements peut être significatif. Avant de signer un contrat formel, il est nécessaire de convenir si une mesure dans des conditions de charge sera exigée.

Une indication pour connaître si une mesure dans des conditions de charge peut être applicable est donnée par la formule suivante de la CEI 60076-10:

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18 \lg \frac{S_r}{S_p} \quad (16)$$

où

$L_{WA,IN}$ est le niveau de puissance acoustique «pondération A» du transformateur à courant assigné, fréquence assignée et à tension d'impédance;

S_r est la puissance assignée en MVA ;

S_p est la puissance de référence (1 MVA).

Pour les autotransformateurs et transformateurs à trois enroulements, la puissance assignée à double enroulement équivalente, S_t , est utilisée à la place de S_r .

Si $L_{WA,IN}$ s'avère être supérieure ou égale de 8 dB au niveau de puissance acoustique garanti, les mesures de niveaux de puissance à courant de charge ne sont pas appropriées.

NOTE L'équation 16 a été déduite des données publiées par le groupe de travail 12-08 du CIGRÉ en 1988. En général, une alternative informative serait de repasser en revue les résultats d'essais pour des unités similaires

9.4.2 Courant de charge réduit

Si les mesures ne peuvent être réalisées qu'à courant réduit, en raison des limitations de capacités, le niveau de puissance acoustique au courant assigné doit être calculé en utilisant la formule 17:

$$L_{WA,IN} = L_{WA,IT} + 40 \lg \frac{I_N}{I_T} \quad (17)$$

The acceptability of using this measurement technique should be agreed with the purchaser. This may not necessarily occur at the tender stage because it may not be known that time-synchronous measurements are required (e.g. if the test object is too quiet compared to the background noise) until sound tests are begun on the completed test object.

When time-synchronous measurements are made, it is essential that the microphone is kept in a fixed position relative to the transformer. Moving the microphone continuously on the prescribed contour as described in Clause 8 of IEC 60076-10 is not allowed in this case.

9.4 Load conditions

9.4.1 Load current sound

Historically, sound level measurements on transformers have been made under open circuit conditions with only the magnetizing current flowing in the windings. This was acceptable because the magnetostrictive deformation of the core is the primary source of noise. However, transformer designs with a low no-load sound level, for example with low induction levels, have reduced the sound generated by the core so that the load current sound caused by the windings may be significant. Before signing a formal contract, it is necessary to agree whether a measurement under load conditions will be required.

A guide as to whether a measurement under load conditions may be relevant is given by the following formula from IEC 60076-10:

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18 \lg \frac{S_r}{S_p} \quad (16)$$

where

$L_{WA,IN}$ is the A-weighted sound power level of the transformer at rated current, rated frequency and impedance voltage;

S_r is the rated power in MVA;

S_p is the reference power (1 MVA).

For auto-transformers and three winding transformers, the equivalent double-wound rated power, S_t , is used instead of S_r .

If $L_{WA,IN}$ is found to be 8 dB or more below the guaranteed sound power level, load current sound measurements are not appropriate.

NOTE Equation 16 was derived from data published by CIGRÉ Working Group 12-08 in 1988. In general, an informative alternative would be to review test evidence for similar units.

9.4.2 Reduced load current

If the measurements can only be performed at a reduced current, due to capacity limitations, the sound power level at the rated current may be calculated using equation 17:

$$L_{WA,IN} = L_{WA,IT} + 40 \lg \frac{I_N}{I_T} \quad (17)$$

où

$L_{WA,IN}$ est le niveau de puissance acoustique «pondération A» à courant assigné;

$L_{WA,IT}$ est le niveau de puissance acoustique «pondération A» à courant réduit;

I_N est le courant assigné;

I_T est le courant réduit.

L'équation prend en considération uniquement le bruit d'enroulement, et est valable pour un courant réduit ≥ 70 % du courant assigné. Il convient que l'utilisation de cette approximation fasse l'objet d'un accord au moment de la signature du contrat formel.

9.4.3 Essais de bobines d'inductance de grande taille

Il peut y avoir une puissance insuffisante pour activer les bobines d'inductance de grande taille qui exigent des courants de charge très élevés pour reproduire le niveau acoustique attendu en service. Si les conditions de pleine charge ne peuvent pas être réalisés, il peut être nécessaire d'effectuer les mesures sur le site. Alternativement, dans le cas des éléments triphasés qui ont un chemin pour le flux de retour (c'est-à-dire une bobine d'inductance de cinq branches), le niveau du son peut être mesuré pour les trois monophasés séparés à pleine charge et les valeurs obtenues additionnées de manière logarithmique. Cela fournit une approximation du niveau sonore total étant donné qu'on suppose que les trois sources sonores sont non corrélées, ce qui ne sera pas le cas lorsque l'unité est en fonctionnement. Il convient que l'utilisation de cette approximation fasse l'objet d'un accord au moment de la signature du contrat formel. Pour tous les autres éléments triphasés, cette approximation ne sera généralement pas valable.

9.5 Appareil de refroidissement auxiliaire

Si les auxiliaires de refroidissement sont montés séparément mais à moins de 3 m de la paroi du réservoir, le contour prescrit comme défini dans la CEI 60076-10 inclut à la fois le transformateur et les auxiliaires de refroidissement. Les essais acoustiques donnent donc un niveau sonore combiné pour les deux éléments. Cela est acceptable lorsque aucun capot d'insonorisation ne doit être fixé au transformateur au site; cependant, quand un tel capot est spécifié, un essai plus approprié sera de réaliser deux essais séparés déterminant de ce fait les différents niveaux acoustiques des deux éléments.

Il est recommandé de choisir l'option appropriée donnée en 11.2 et 12.2 de la CEI 60076-10.

9.6 Régulation de tension

Pour des transformateurs avec régulation de flux variable, il convient de spécifier la tension et la position de prise auxquelles les mesures du niveau sonore doivent être réalisées.

9.7 Conditions de fonctionnement sur site

Il est recommandé à l'acheteur d'indiquer au fabricant toutes les conditions sur site qui peuvent avoir un effet sur la quantité du son acoustique produit par le transformateur, particulièrement par la présence des harmoniques et par la polarisation à courant continu dans le réseau.

9.8 Exemple de spécification de bruit pour transformateur de puissance et auxiliaires de refroidissement (voir Annexe A)

L'élément principal doit avoir un niveau de puissance acoustique déterminé selon la CEI 60076-10 par l'intermédiaire de la méthode de pression acoustique de 90 dB(A). L'élément principal doit être testé à la tension assignée et au courant à vide (voir 6.1 et 6.2 de la CEI 60076-10) avec le changeur de prise sur la prise principale.

where

$L_{WA,IN}$ is the A-weighted sound power level at rated current;

$L_{WA,IT}$ is the A-weighted sound power level at reduced current;

I_N is the rated current;

I_T is the reduced current.

The equation only considers winding noise, and is valid for a reduced current of $\geq 70\%$ of the rated current. The use of this approximation should be agreed at the time of signing a formal contract.

9.4.3 Testing of large reactors

There may be insufficient power available to energise large reactors that require very high load currents to reproduce the sound level expected in service. If the full load conditions cannot be achieved, it may be necessary to perform the measurements at site. Alternatively, in the case of three-phase units which have a path for the return flux (that is a five leg reactor), the sound level may be measured for the three separate single phases under full load and the resulting values summated logarithmically. This provides an approximation of the total sound level because it assumes that the three sound sources are uncorrelated, which will not be the case when the unit is in operation. The use of this approximation should be agreed at the time of signing a formal contract. For all other three-phase units, this approximation will not generally be valid.

9.5 Auxiliary cooling equipment

If the cooling auxiliaries are separately mounted but less than 3 m from the tank wall, the prescribed contour as defined in IEC 60076-10 includes both transformer and cooling auxiliaries. Sound tests therefore give a combined sound level for both items. This is acceptable when no sound enclosure is to be fitted to the transformer at site however, when such an enclosure is specified, a more relevant test will be to perform two separate tests thus determining the individual sound levels of the two items.

The appropriate option given in 11.2 and 12.2 of IEC 60076-10 should be selected.

9.6 Voltage regulation

For transformers with variable flux regulation, the voltage and tap position at which the sound level measurements are to be performed should be specified.

9.7 On-site operating conditions

It is recommended that the purchaser should advise the manufacturer of any on-site conditions that may effect the amount of sound produced by the transformer, especially the presence of harmonics and d.c. bias in the network.

9.8 Example noise specification for power transformer and cooling auxiliaries (see Annex A)

The main unit shall have a sound power level determined in accordance with IEC 60076-10 via the sound pressure method of 90 dB(A). The main unit shall be tested at rated voltage and no-load current (see 6.1 and 6.2 of IEC 60076-10) with the tap-changer on the principal tapping.

Les auxiliaires de refroidissement doivent avoir un niveau de puissance acoustique déterminé selon la CEI 60076-10 par l'intermédiaire de la méthode de pression acoustique de 85 dB(A). Les auxiliaires de refroidissement doivent être testés séparément à partir de l'élément principal.

9.9 Exemple de spécification de bruit pour un transformateur de distribution (voir Annexe B)

L'élément doit avoir un niveau de puissance acoustique total déterminé selon la CEI 60076-10 par l'intermédiaire de la méthode d'intensité acoustique synchrone de 60 dB(A). L'élément principal doit être testé séparément à courant à vide et à tension assignée (voir 6.1 et 6.2 de la CEI 60076-10) et à courant assigné et à tension de court circuit (voir 6.3 de la CEI 60076-10). Ces deux valeurs doivent être additionnées de manière logarithmique pour donner le niveau de puissance acoustique total (voir l'Article 14 de la CEI 60076-10). Les mesures faites aux courants de charge réduits ne doivent pas être acceptées.

The cooling auxiliaries shall have a sound power level determined in accordance with IEC 60076-10 via the sound pressure method of 85 dB(A). The cooling auxiliaries shall be tested separately from the main unit.

9.9 Example noise specification for a distribution transformer (see Annex B)

The unit shall have a total sound power level determined in accordance with IEC 60076-10 via the time-synchronous sound intensity method of 60 dB(A). The main unit shall be tested separately at no-load current and rated voltage (see 6.1 and 6.2 of IEC 60076-10) and at rated current and short-circuit voltage (see 6.3 of IEC 60076-10). These two values shall be summed logarithmically to give the total sound power level (see Clause 14 of IEC 60076-10). Measurements made at reduced load currents shall not be accepted.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-10-1:2005

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

A.1 Correction environnementale

A.1.1 Montage de l'essai

La salle d'essai est de 20 m de large, de 25 m de haut et de 40 m de long et possède un coefficient d'absorption acoustique moyen de 0,15. Les objets d'essai sont un transformateur et une batterie de refroidisseur séparée qui se trouve à plus de 3 m de la cuve du transformateur. La hauteur du transformateur, h , est de 3 m avec une longueur du contour prescrit, l_m , de 27 m, alors que la hauteur de la batterie de refroidisseur, h , est de 4,5 m avec une longueur du contour prescrit, l_m , de 34 m.

A.1.2 Calcul de la correction environnementale, K

La correction environnementale, K , prend en compte l'influence des réflexions acoustiques non désirées provenant des limites de la salle et/ou des objets réfléchissants à proximité de l'objet d'essai.

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad (\text{A.1})$$

S est calculé dans la formule A.3. La valeur de A en mètres carrés est donnée par la formule A.2:

$$A = \alpha S_v \quad (\text{A.2})$$

où

α est le coefficient d'absorption acoustique moyen, voir Tableau 1 de la CEI 60076-10;

S_v est la zone totale de la surface de la salle d'essai (murs, plafonds et sols) en mètres carrés.

La valeur de S_v peut être calculée comme suit:

Zone de surface des parois d'extrémité	$= 2 \times 20 \times 25 = 1\,000 \text{ m}^2$
Zone de surface des parois latérales	$= 2 \times 25 \times 40 = 2\,000 \text{ m}^2$
Zone de surface du sol et du plafond	$= 2 \times 20 \times 40 = 1\,600 \text{ m}^2$

ce qui donne une zone de surface totale S_v pour la salle d'essai de $4\,600 \text{ m}^2$.

Par conséquent, à partir de l'équation A.2, $A = 0,15 \times 4\,600 = 690 \text{ m}^2$

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

A.1 Environmental correction

A.1.1 Test set-up

The test room is 20 m wide, 25 m high and 40 m long and has an average acoustic absorption coefficient of 0,15. The test objects are a transformer and a separate cooler bank which is more than 3 m from the transformer tank. The height of the transformer, h_t , is 3 m with a prescribed contour length, l_m , of 27 m, while the cooler bank height, h_c , is 4,5 m with a prescribed contour length, l_m , of 34 m.

A.1.2 Calculation of environmental correction, K

The environmental correction, K , accounts for the influence of undesired sound reflections from room boundaries and/or reflecting objects near the test object.

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad (\text{A.1})$$

S is calculated in formula A.3. The value of A in square metres is given by formula A.2:

$$A = \alpha S_v \quad (\text{A.2})$$

where

α is the average acoustic absorption coefficient, see Table 1 of IEC 60076-10;

S_v is the total area of the surface of the test room (walls, ceilings and floors) in square metres.

The value of S_v can be calculated as follows:

$$\text{Surface area of the end walls} = 2 \times 20 \times 25 = 1\,000 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface area of the side walls} = 2 \times 25 \times 40 = 2\,000 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface area of the floor and ceiling} = 2 \times 20 \times 40 = 1\,600 \text{ m}^2$$

which gives a total surface area S_v for the test room of 4 600 m².

Therefore, from equation A.2, $A = 0,15 \times 4\,600 = 690 \text{ m}^2$

A.1.3 Calcul de la zone de la surface de mesure

A.1.3.1 Transformateur

Comme le transformateur et ses auxiliaires de refroidissement seront placés à plus de 3 m de distance sur le site, des mesures séparées sur le transformateur seront effectuées à 0,3 m de la surface de rayonnement principale. La zone S de la surface de mesure est donnée par la formule A.3:

$$S = 1,25 \, h l_m \quad (\text{A.3})$$

où

h est la hauteur du transformateur;

l_m est la longueur du contour prescrit.

$$S = 1,25 \times 3 \times 27 = 101,25 \, \text{m}^2$$

La correction environnementale, K , pour un essai réalisé sur le transformateur peut être calculée:

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{690/101,25} \right) = 2 \, \text{dB}$$

A.1.3.2 Batterie de refroidisseur

Les mesures sur les auxiliaires de refroidissement seront effectuées à 2 m de la surface de rayonnement principale. La zone S de la surface de mesure, exprimée en mètres carrés, est donnée par l'équation A.4:

$$S = (h + 2) l_m \quad (\text{A.4})$$

où h est la hauteur des auxiliaires de refroidissement incluant les ventilateurs.

$$S = (4,5 + 2) \times 34 = 221 \, \text{m}^2$$

La correction environnementale, K , pour un essai réalisé sur la batterie de refroidisseur peut maintenant être calculée:

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{690/221} \right) = 3,6 \, \text{dB}$$

Pour qu'une salle d'essai soit satisfaisante, il faut que K soit $\leq 7 \, \text{dB}$. Par conséquent, la salle d'essai est satisfaisante à la fois pour les essais de transformateur et de batterie de refroidisseur.

A.2 Calcul du niveau de pression acoustique moyen

Le niveau de pression acoustique «pondération A» moyen non corrigé, $\overline{L_{pA0}}$, doit être calculé à partir des niveaux de pression acoustique «pondération A», L_{pAi} , mesurés avec l'objet d'essai mis sous tension, en utilisant l'équation A.5:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L_{pAi}} \right) \quad (\text{A.5})$$

A.1.3 Calculation of the area of the measurement surface

A.1.1.1 Transformer

As the transformer and its cooling auxiliaries will be placed more than 3 m apart on site, separate measurements on the transformer will be made at 0,3 m from the principal radiating surface. The area S of the measurement surface is given by formula A.3:

$$S = 1,25 h l_m \quad (\text{A.3})$$

where

h is height of the transformer;

l_m is the prescribed contour length.

$$S = 1,25 \times 3 \times 27 = 101,25 \text{ m}^2$$

The environmental correction, K , for a test performed on the transformer may be calculated:

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{690/101,25} \right) = 2 \text{ dB}$$

A.1.1.2 Cooler bank

Measurements on the cooling auxiliaries will be made at 2 m from the principal radiating surface. The area S of the measurement surface, expressed in square metres, is given by equation A.4:

$$S = (h + 2) l_m \quad (\text{A.4})$$

where h is the height of the cooling auxiliaries including fans.

$$S = (4,5 + 2) \times 34 = 221 \text{ m}^2$$

The environmental correction, K , for a test performed on the cooler bank may now be calculated:

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{690/221} \right) = 3,6 \text{ dB}$$

For a test room to be satisfactory, K must be ≤ 7 dB. Therefore, the test room is satisfactory for both the transformer and cooler bank tests.

A.2 Calculation of average sound pressure level

The uncorrected average A-weighted sound pressure level, $\overline{L_{pA0}}$, shall be calculated from the A-weighted sound pressure levels, L_{pAi} , measured with the test object energised using equation A.5:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 L_{pAi}} \right) \quad (\text{A.5})$$

où

N est le nombre total de positions de mesure;

L_{pAi} est le niveau de pression acoustique « pondération A » mesuré à la position i .

A.2.1 Transformateur

Les résultats mesurés sur 27 positions et deux hauteurs, donnant 54 mesures (voir les résultats du rapport d'essai pour la liste complète des mesures). Il convient de faire la moyenne de ces résultats en substituant les valeurs dans la formule A.5:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{54} \right) \times (10^{6,70} + 10^{7,14} + 10^{6,95} + 10^{6,87} \dots + 10^{6,66}) \right] = 71,6 \text{ dB(A)}$$

A.2.2 Batterie de refroidisseur

Les résultats mesurés à 34 positions et à deux hauteurs, donnant 68 mesures (voir les résultats du rapport d'essai). Il convient de faire la moyenne de ces résultats en substituant les valeurs dans la formule A.5:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{68} \right) \times (10^{6,43} + 10^{6,35} + 10^{6,40} + 10^{6,43} \dots + 10^{6,46}) \right] = 63,8 \text{ dB(A)}$$

A.3 Calcul du niveau de pression du bruit de fond « pondération A » moyen

Le niveau de pression du bruit de fond « pondération A », $\overline{L_{bgA}}$, doit être calculé séparément avant et après la séquence d'essai en utilisant l'équation A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1 L_{bgAi}} \right) \quad (\text{A.6})$$

où

M est le nombre total des positions de mesure;

L_{bgAi} est le niveau de pression acoustique « pondération A » mesuré à la position i .

A.3.1 Transformateur

Le niveau de pression acoustique du bruit de fond a été mesuré à dix positions avant l'essai sur le transformateur (voir le rapport d'essai). Il convient de faire la moyenne de ces résultats en substituant les valeurs dans la formule A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{10} \right) \times (10^{6,40} + 10^{6,46} + 10^{6,37} \dots + 10^{6,38}) \right] = 63,6 \text{ dB(A)}$$

Ensuite le niveau de pression acoustique du bruit de fond a été de nouveau mesuré aux dix mêmes positions après l'essai sur le transformateur. Il convient de faire la moyenne de ces résultats en substituant les valeurs dans la formule A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{10} \right) \times (10^{6,43} + 10^{6,49} + 10^{6,34} \dots + 10^{6,21}) \right] = 62,9 \text{ dB(A)}$$

where

N is the total number of measuring positions;

L_{pAi} is the A-weighted sound pressure level measured at position i .

A.2.1 Transformer

Results measured at 27 positions and two heights, giving 54 measurements (see test report form for full list of measurements). These results should be averaged by substituting the values in equation A.5:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{54} \right) \times (10^{6,70} + 10^{7,14} + 10^{6,95} + 10^{6,87} \dots + 10^{6,66}) \right] = 71,6 \text{ dB(A)}$$

A.2.2 Cooler bank

Results measured at 34 positions and two heights, giving 68 measurements (see test report form). These results should be averaged by substituting the values in equation A.5:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{68} \right) \times (10^{6,43} + 10^{6,35} + 10^{6,40} + 10^{6,43} \dots + 10^{6,46}) \right] = 63,8 \text{ dB(A)}$$

A.3 Calculation of average A-weighted background noise pressure level

The average A-weighted background noise pressure level, $\overline{L_{bgA}}$, shall be calculated separately for before and after the test sequence using equation A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1 L_{bgAi}} \right) \quad (\text{A.6})$$

where

M is the total number of measuring positions;

L_{bgAi} is the A-weighted sound pressure level measured at position i .

A.3.1 Transformer

The sound pressure level of the background noise was measured at ten positions before the test on the transformer (see test report). These results should be averaged by substituting the values in equation A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{10} \right) \times (10^{6,40} + 10^{6,46} + 10^{6,37} \dots + 10^{6,38}) \right] = 63,6 \text{ dB(A)}$$

Then the sound pressure level of the background noise was measured again at the same ten positions *after* the test on the transformer. These results should also be averaged by substituting the values in equation A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{10} \right) \times (10^{6,43} + 10^{6,49} + 10^{6,34} \dots + 10^{6,21}) \right] = 62,9 \text{ dB(A)}$$

La différence entre les niveaux de bruit de fond moyen du début et de fin est de 0,7 dB, qui est inférieure à 3 dB. $\overline{L_{pA0}}$ est supérieur de 8 dB par rapport au plus fort niveau de bruit de fond moyen. Par conséquent l'essai est acceptable.

A.3.2 Batterie de refroidisseur

Le niveau de pression acoustique du bruit de fond a été mesuré sur dix positions avant l'essai sur la batterie de refroidisseur. Il convient de faire la moyenne de ces résultats en substituant les valeurs dans la formule A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{10} \right) \times (10^{5,42} + 10^{5,43} + 10^{5,35} \dots + 10^{5,32}) \right] = 53,6 \text{ dB(A)}$$

Ensuite le niveau de pression acoustique du bruit de fond a été de nouveau mesuré aux mêmes dix positions *après* l'essai sur la batterie de refroidisseur. Il convient de faire la moyenne de ces résultats en substituant les valeurs dans la formule A.6:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{10} \right) \times (10^{5,38} + 10^{5,36} + 10^{5,38} \dots + 10^{5,34}) \right] = 53,5 \text{ dB(A)}$$

La différence entre les niveaux de bruit de fond moyen du début et de fin est de 0,1 dB, qui est inférieure à 3 dB. $\overline{L_{pA0}}$ est supérieur de 10,2 dB par rapport au plus fort niveau de bruit de fond moyen. Par conséquent l'essai est acceptable.

A.4 Calcul du niveau de pression acoustique moyen corrigé

Le niveau de pression acoustique « pondération A » moyen corrigé, $\overline{L_{pA}}$, doit être calculé en utilisant l'équation A.7:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg \left(10^{0,1 \overline{L_{pA0}}} + 10^{0,1 \overline{L_{bgA}}} \right) - K \quad (A.7)$$

ou $\overline{L_{bgA}}$ est le plus faible des deux niveaux de pression de bruit de fond « pondération A » moyen.

NOTE Les transformateurs produisent des tonalités pures aux harmoniques de la fréquence de puissance; il est possible que les ondes stationnaires puissent influencer les niveaux de pression acoustique mesurés. Dans ce cas, l'application d'un facteur de correction unique ne suffit pas et il convient de réaliser les mesures, chaque fois que c'est possible, dans le milieu où la correction de l'influence environnementale n'est pas nécessaire.

A.4.1 Transformateur

Le niveau de pression acoustique corrigé du transformateur peut maintenant être calculé:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg (10^{7,16} - 10^{6,29}) - 2 = 69,0 \text{ dB(A)}$$

A.4.2 Batterie de refroidisseur

Le niveau de pression acoustique corrigé de la batterie de refroidisseur peut maintenant être calculé:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg (10^{6,38} - 10^{5,36}) - 3,6 = 59,8 \text{ dB(A)}$$