



# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

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

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

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 29.180

ISBN 978-2-8322-3253-8

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

## CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Basic physics of sound .....	7
3.1 Phenomenon.....	7
3.2 Sound pressure, $p$ .....	7
3.3 Particle velocity, $u$ .....	8
3.4 Sound intensity, $\bar{I}$ .....	8
3.5 Sound power, $W$ .....	8
3.6 Sound fields.....	9
3.6.1 General .....	9
3.6.2 The free field .....	9
3.6.3 The diffuse field .....	9
3.6.4 The near-field .....	9
3.6.5 The far-field .....	10
3.6.6 Standing waves.....	10
4 Sources and characteristics of transformer and reactor sound .....	11
4.1 General.....	11
4.2 Sound sources .....	11
4.2.1 Core .....	11
4.2.2 Windings.....	14
4.2.3 Stray flux control elements .....	14
4.2.4 Sound sources in reactors.....	15
4.2.5 Effect of current harmonics in transformer and reactor windings.....	15
4.2.6 Fan noise.....	18
4.2.7 Pump noise.....	18
4.2.8 Relative importance of sound sources .....	18
4.3 Vibration transmission .....	18
4.4 Sound radiation.....	19
4.5 Sound field characteristics.....	19
5 Measurement principles .....	20
5.1 General.....	20
5.2 A-weighting.....	20
5.3 Sound measurement methods .....	22
5.3.1 General .....	22
5.3.2 Sound pressure method .....	23
5.3.3 Sound intensity method.....	24
5.3.4 Selection of appropriate sound measurement method .....	27
5.4 Information on frequency bands.....	27
5.5 Information on measurement surface .....	29
5.6 Information on measurement distance .....	29
5.7 Information on measuring procedures (walk-around and point-by-point).....	30
6 Practical aspects of making sound measurements .....	31
6.1 General.....	31
6.2 Orientation of the test object to avoid the effect of standing waves .....	31
6.3 Device handling for good acoustical practice.....	32

6.4	Choice of microphone spacer for the sound intensity method .....	33
6.5	Measurements with tank mounted sound panels providing incomplete coverage.....	33
6.6	Testing of reactors .....	34
7	Difference between factory tests and field sound level measurements.....	34
7.1	General.....	34
7.2	Operating voltage.....	34
7.3	Load current .....	34
7.4	Load power factor and power flow direction .....	35
7.5	Operating temperature .....	35
7.6	Harmonics in the load current and in voltage.....	35
7.7	DC magnetization.....	36
7.8	Effect of remanent flux .....	36
7.9	Sound level build-up due to reflections .....	36
7.10	Converter transformers with saturable reactors (transducers).....	37
Annex A (informative)	Sound level built up due to harmonic currents.....	38
A.1	Theoretical derivation of winding forces due to harmonic currents .....	38
A.2	Force components for a typical current spectrum caused by a B6 bridge .....	39
A.3	Estimation of sound level increase due to harmonic currents by calculation .....	42
Bibliography	.....	44

Figure 1	– Simulation of the spatially averaged sound intensity level (solid lines) and sound pressure level (dashed lines) versus measurement distance $d$ in the near-field .....	10
Figure 2	– Example curves showing relative change in lamination length for one type of electrical core steel during complete cycles of applied 50 Hz a.c. induction up to peak flux densities $B_{max}$ in the range of 1,2 T to 1,9 T .....	11
Figure 3	– Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted line) as a function of time due to applied 50 Hz a.c. induction at 1,8 T – no d.c. bias.....	12
Figure 4	– Example curve showing relative change in lamination length during one complete cycle of applied 50 Hz a.c. induction at 1,8 T with a small d.c. bias of 0,1 T.....	12
Figure 5	– Induction (smooth line) and relative change in lamination length (dotted line) as a function of time due to applied 50 Hz a.c. induction at 1,8 T with a small d.c. bias of 0,1 T.....	13
Figure 6	– Sound level increase due to d.c. current in windings .....	13
Figure 7	– Typical sound spectrum due to load current .....	14
Figure 8	– Simulation of a sound pressure field (coloured) of a 31,5 MVA transformer at 100 Hz with corresponding sound intensity vectors along the measurement path.....	20
Figure 9	– A-weighting graph derived from function $A(f)$ .....	21
Figure 10	– Distribution of disturbances to sound pressure in the test environment .....	24
Figure 11	– Microphone arrangement.....	25
Figure 12	– Illustration of background sound passing through test area and sound radiated from the test object.....	26
Figure 13	– 1/1- and 1/3-octave bands with transformer tones for 50 Hz and 60 Hz systems.....	28
Figure 14	– Logging measurement demonstrating spatial variation along the measurement path .....	31
Figure 15	– Test environment.....	32
Figure A.1	– Current wave shape for a star and a delta connected winding for the current spectrum given in Table A.2 .....	40

Table 1 – A-weighting values for the first fifteen transformer tones.....	22
Table A.1 – Force components of windings due to harmonic currents.....	39
Table A.2 – Current spectrum of a B6 converter bridge.....	39
Table A.3 – Calculation of force components and test currents .....	41
Table A.4 – Summary of harmonic forces and test currents.....	42

## 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 itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2005. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) extended information on sound fields provided;
- b) effect of current harmonics in windings enfolded;
- c) updated information on measuring methods sound pressure and sound intensity given;
- d) supporting information on measuring procedures walk-around and point-by-point given;
- e) clarification of A-weighting provided;
- f) new information on frequency bands given;

- g) background information on measurement distance provided;
- h) new annex on sound-built up due to harmonic currents in windings introduced.

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
14/847/FDIS	14/850/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 60076 series, published under the general title *Power transformers*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website 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.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## **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 to apply the measurement techniques described in IEC 60076-10. Besides the introduction of some basic acoustics, the sources and characteristics of transformer and reactor sound are described. Practical guidance on making measurements is given, and factors influencing the accuracy of the methods are discussed. This application guide also indicates why values measured in the factory may differ from those measured in service.

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

#### **2 Normative references**

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

IEC 60076-10:2016, *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	49
1 Domaine d'application.....	51
2 Références normatives .....	51
3 Physique fondamentale du son .....	51
3.1 Phénomène.....	51
3.2 Pression acoustique, $p$ .....	51
3.3 Vitesse acoustique d'une particule, $u$ .....	52
3.4 Intensité acoustique, $\bar{I}$ .....	52
3.5 Puissance acoustique, $W$ .....	52
3.6 Champs acoustiques .....	53
3.6.1 Généralités .....	53
3.6.2 Le champ libre .....	53
3.6.3 Le champ diffus .....	54
3.6.4 Le champ proche .....	54
3.6.5 Le champ lointain.....	55
3.6.6 Ondes stationnaires .....	55
4 Sources et caractéristiques du son des transformateurs et des bobines d'inductance .....	56
4.1 Généralités .....	56
4.2 Sources sonores .....	56
4.2.1 Noyau.....	56
4.2.2 Enroulements.....	59
4.2.3 Éléments de contrôle du flux de fuite .....	60
4.2.4 Sources sonores dans des bobines d'inductance .....	60
4.2.5 Effet des harmoniques réels sur les enroulements des transformateurs et des bobines d'inductance .....	60
4.2.6 Bruit de ventilateur.....	63
4.2.7 Bruit de pompe .....	63
4.2.8 Importance relative des sources sonores .....	63
4.3 Transmission des vibrations .....	64
4.4 Rayonnement sonore .....	64
4.5 Caractéristiques du champ acoustique.....	65
5 Principes de mesure .....	66
5.1 Généralités .....	66
5.2 Pondération A.....	66
5.3 Méthodes de mesure acoustique .....	68
5.3.1 Généralités .....	68
5.3.2 Méthode de pression acoustique .....	69
5.3.3 Méthode d'intensité acoustique .....	70
5.3.4 Sélection de la méthode de mesurage acoustique adaptée .....	73
5.4 Informations relatives aux bandes de fréquence.....	73
5.5 Informations relatives à la surface de mesure .....	75
5.6 Informations relatives à la distance de mesure.....	76
5.7 Informations relatives aux procédures de mesure (inspection en continu et point par point).....	77
6 Aspects pratiques de la réalisation de mesures acoustiques .....	78



6.1	Généralités .....	78
6.2	Orientation de l'objet en essai afin d'éviter l'effet des ondes stationnaires .....	78
6.3	Manipulation des dispositifs pour une bonne pratique acoustique .....	79
6.4	Choix du système d'espacement des microphones pour la méthode d'intensité acoustique .....	80
6.5	Mesures effectuées avec des panneaux acoustiques montés sur la cuve fournissant une couverture incomplète .....	80
6.6	Essais des bobines d'inductance .....	81
7	Différence entre les essais en usine et les mesures du niveau de bruit sur le terrain .....	81
7.1	Généralités .....	81
7.2	Tension de fonctionnement .....	81
7.3	Courant de charge .....	82
7.4	Facteur de puissance de charge et direction du flux de puissance .....	82
7.5	Température de fonctionnement .....	82
7.6	Harmoniques en courant de charge et en tension .....	83
7.7	Magnétisation en courant continu .....	83
7.8	Effet du flux rémanent .....	84
7.9	Augmentation du niveau de bruit en raison de réflexions .....	84
7.10	Transformateurs convertisseurs équipés de bobines d'inductance saturables (transducteurs) .....	84
Annexe A (informative)	Augmentation du niveau de bruit en raison de courants harmoniques dans les enroulements .....	86
A.1	Dérivation théorique des forces d'enroulement en raison de courants harmoniques .....	86
A.2	Composantes de force d'un spectre de courant type causé par un pont B6 .....	87
A.3	Estimation par calcul de l'augmentation du niveau de bruit due à des courants harmoniques .....	90
Bibliographie	.....	93

Figure 1 – Simulation du niveau d'intensité acoustique moyenné spatialement (lignes pleines) et du niveau de pression acoustique (lignes en pointillés) par rapport à la distance de mesure  $d$  dans le champ proche .....

Figure 2 – Exemple de courbes présentant la variation relative de la longueur de tôle d'un type de noyau électrique en acier pendant des cycles complets d'induction appliquée à 50 Hz en courant alternatif jusqu'à des inductions crête  $B_{max}$  dans la plage de 1,2 T à 1,9 T .....

Figure 3 – Induction (ligne continue) et variation relative de la longueur de tôle (ligne en pointillés) en fonction du temps obtenue par l'application d'une induction alternative de 1,8 T à 50 Hz – sans composante continue .....

Figure 4 – Exemple de courbe présentant la variation relative de la longueur de tôle pendant un cycle complet d'induction alternative de 1,8 T à 50 Hz avec un faible biais de 0,1 T en courant continu .....

Figure 5 – Induction (ligne continue) et variation relative de la longueur de tôle (ligne en pointillés) en fonction du temps due à l'induction de 1,8 T à 50 Hz avec un faible biais de 0,1 T .....

Figure 6 – Augmentation du niveau de bruit liée à la présence de courant continu dans les enroulements .....

Figure 7 – Spectre sonore type dû au courant de charge .....

Figure 8 – Simulation d'un champ de pression acoustique (en couleur) d'un transformateur de 31,5 MVA à 100 Hz avec les vecteurs d'intensité acoustique correspondants le long du trajet de mesure .....

Figure 9 – Graphique de pondération A dérivé de la fonction $A(f)$ .....	67
Figure 10 – Distribution des perturbations de la pression acoustique dans l'environnement d'essai .....	70
Figure 11 – Disposition des microphones .....	71
Figure 12 – Illustration de la circulation du bruit de fond à travers la surface d'essai et du son rayonné à partir de l'objet en essai .....	72
Figure 13 – Bandes de 1/1 et 1/3 d'octave avec des sons de transformateur pour des systèmes 50 Hz et 60 Hz .....	74
Figure 14 – Mesure d'enregistrement présentant une variation spatiale le long du trajet de mesure .....	78
Figure 15 – Environnement d'essai .....	79
Figure A.1 – Forme d'onde de courant d'un enroulement branché en étoile et en triangle pour le spectre de courant donné au Tableau A.2 .....	88
Tableau 1 – Valeurs de pondération A pour les quinze premiers sons d'un transformateur .....	68
Tableau A.1 – Composantes de force des enroulements en raison de courants harmoniques .....	87
Tableau A.2 – Spectre de courant d'un pont convertisseur B6 .....	87
Tableau A.3 – Calcul des composantes de force et des courants d'essai .....	89
Tableau A.4 – Résumé des forces harmoniques et des courants d'essai .....	90

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

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

##### AVANT-PROPOS

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

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

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2005. Cette édition constitue une révision technique.

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

- a) ajout d'informations étendues relatives aux champs acoustiques;
- b) intégration de l'effet des harmoniques réels sur les enroulements;
- c) ajout d'informations mises à jour sur les méthodes de mesure en pression acoustique et sur l'intensité acoustique;

- d) informations à l'appui relatives aux procédures de mesure d'inspection en continu et point par point;
- e) ajout d'une clarification de la pondération A;
- f) ajout de nouvelles informations sur les bandes de fréquence;
- g) ajout d'informations de contexte sur la distance de mesure;
- h) introduction d'une nouvelle annexe sur l'augmentation acoustique due aux courants harmoniques dans les enroulements.

La présente norme doit être lue conjointement avec l'IEC 60076-10.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/847/FDIS	14/850/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60076, publiées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

## TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

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

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60076 fournit des informations visant à aider les fabricants et les acheteurs à appliquer les techniques de mesure décrites dans l'IEC 60076-10. Outre l'introduction de certaines notions acoustiques de base, les sources et caractéristiques relatives aux transformateurs et aux bobines d'inductance sont décrites. Des lignes directrices pratiques relatives aux mesures sont fournies, et les facteurs exerçant une influence sur la précision des méthodes sont abordés. Le présent guide d'application indique également pourquoi les valeurs mesurées en usine peuvent différer de celles mesurées en service.

Le présent guide d'application s'applique aux transformateurs et aux bobines d'inductance ainsi qu'à leurs auxiliaires de refroidissement associés.

#### 2 Références normatives

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

IEC 60076-10:2016, *Transformateurs de puissance – Partie 10: Détermination des niveaux de bruit*