

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Power transformers –
Part 10: Determination of sound levels**

**Transformateurs de puissance –
Partie 10: Détermination des niveaux de bruit**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-10:2016



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2016 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Power transformers –
Part 10: Determination of sound levels**

**Transformateurs de puissance –
Partie 10: Détermination des niveaux de bruit**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.180

ISBN 978-2-8322-3252-1

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references.....	8
3 Terms and definitions	9
4 Sound power for different loading conditions	11
4.1 General.....	11
4.2 Sound power at no-load excitation	12
4.3 Sound power of the cooling device(s)	12
4.4 Sound power due to load current	12
5 Sound level measurement specification.....	14
6 Instrumentation, calibration and accuracy.....	15
7 Principal radiating surface.....	16
7.1 General.....	16
7.2 Transformers with or without cooling device.....	16
7.3 Transformers in enclosures with cooling devices inside the enclosure	16
7.4 Transformers in enclosures with cooling devices outside the enclosure	17
7.5 Cooling devices mounted on a separate structure where the distance between the two principal radiating surfaces is ≥ 3 m	17
7.6 Dry-type transformers.....	17
7.7 Dry-type air-core reactors.....	17
8 Prescribed contour	18
9 Microphone positions	19
10 Calculation of the measurement surface area	19
10.1 Measurement surface area for measuring distances up to 30 m.....	19
10.2 Measurement surface area for measuring distances larger than 30 m.....	19
11 Sound measurement.....	20
11.1 Test conditions.....	20
11.1.1 Placement of test object	20
11.1.2 Test energisation options	20
11.1.3 Test application details	21
11.1.4 Prevailing ambient conditions	21
11.2 Sound pressure method	21
11.2.1 General	21
11.2.2 Test procedure.....	21
11.2.3 Calculation of the spatially averaged sound pressure level.....	22
11.2.4 Validation of test measurements with respect to background noise.....	23
11.2.5 Calculation of environmental correction K	23
11.2.6 Final correction for steady-state background noise and test environment.....	25
11.3 Sound intensity method	26
11.3.1 General	26
11.3.2 Test procedure.....	26
11.3.3 Calculation of average normal sound intensity and sound pressure level	27
11.3.4 Measurement validation	28
11.3.5 Final correction based on P-I index and direction flag	28

12	Determination of sound power level by calculation	29
13	Logarithmic addition and subtraction of individual sound levels	29
14	Far-field calculations for distances larger than 30 m	30
15	Presentation of results	31
Annex A (informative) Narrow-band and time-synchronous measurements		40
A.1	General considerations	40
A.2	Narrow-band measurement	40
A.2.1	General	40
A.2.2	Post processing of narrow-band measurements to exclude background noise	41
A.3	Time-synchronous averaging technique	41
Annex B (informative) Typical report of sound level determination		42
B.1	Sound pressure method	42
B.2	Sound pressure method – Appendix for the point-by-point procedure	50
B.3	Sound intensity method	51
B.4	Sound intensity method – Appendix for the point-by-point procedure	59
Bibliography		60
Figure 1 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers excluding cooling devices		33
Figure 2 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers having cooling devices mounted either directly on the tank or on a separate structure spaced < 3 m away from the principal radiating surface of the main tank		34
Figure 3 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers having separate cooling devices spaced < 3 m away from the principal radiating surface of the main tank		35
Figure 4 – Typical microphone path / positions for sound measurement on cooling devices mounted on a separate structure spaced ≥ 3 m away from the principal radiating surface of the transformer		36
Figure 5 – Typical microphone positions for sound measurement on dry-type transformers without enclosures		37
Figure 6 – Principle radiating surface and prescribed contour of dry-type air-core reactors		38
Figure 7 – Environmental correction, K		39
Table 1 – Test acceptance criteria		23
Table 2 – Approximate values of the average acoustic absorption coefficient		25

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –**Part 10: Determination of sound levels****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 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2001 and constitutes a technical revision.

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

- additional useful definitions introduced;
- definition of distribution type transformers introduced for the purpose this standard;
- new clause for sound level measurement specification introduced;
- requirement for 1/3 octave band measurements introduced for transformers other than distribution type transformers;

- standard measurement distance changed from 0,3 m to 1 m for transformers other than distribution type transformers;
- height of measurement surface is now clearly defined to count from the reflecting plane;
- measurement surface formula unified;
- correction criteria for intensity method introduced;
- rules for sound measurements on dry-type reactors introduced;
- figures revised;
- new informative test report templates introduced (Annex B);
- IEC 60076-10-1 (application guide) revised in parallel providing worthwhile information for the use of this standard.

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

FDIS	Report on voting
14/846/FDIS	14/849/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 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.

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.

INTRODUCTION

One of many parameters considered when specifying, designing and placing transformers, reactors and their associated cooling devices is the sound level that the equipment is likely to emit under defined in-service conditions. This part of IEC 60076 provides the basis for the specification and test of sound levels.

This standard describes in a logical sequence the loading conditions, how to specify and to test as well as how to evaluate and report sound levels for the equipment under test. A new section for the specification of sound levels has been introduced as Clause 5.

For the purpose of this standard, the definition “distribution type transformers” was introduced. This reflects industry’s need to maintain simpler and faster sound measurements for this category of transformers.

The new requirement for reporting 1/3-octave band spectra for all sound levels (including the background noise) on units for installation in substations reflects the more onerous conditions imposed by planning authorities on the purchaser and also the improved functionality of modern instrumentation.

When the sound intensity method was introduced in this standard limited experience was available. During subsequent years of operating this standard levels of experience have significantly increased and necessary changes have become evident. The equivalence of the pressure and the intensity methods has been demonstrated within certain test limitations.

The introduction of new validation criteria for the intensity method recognises these limitations. The permissible pressure – intensity index ΔL remains 8 dB however the difference between measured sound pressure level and reported sound intensity level is limited to 4 dB.

For the pressure method the correction procedure for reflections has been enhanced by recommending the application of frequency dependent K values derived by measurement of the reverberation time of the test facility. Where K is derived from absorption coefficients the table for the average absorption coefficients has been rationalised to represent surfaces likely to be found in the working environment.

Walk-around procedure and point-by-point procedure are equally applicable. The walk-around procedure reflects the evolution of working practice allowing more time efficient measurements mainly on large units. For distribution type transformers and in special situations (health and safety) the point-by-point procedure is more appropriate.

In order to mitigate near-field effects the preferred measurement distance is set to 1 m with exceptions for distribution type transformers, small test facilities, situations with low signal-to-noise ratio and for health and safety where the distance is maintained at 0,3 m.

One single formula for the calculation of the measurement surface area S has been introduced because the former complexity could only result in differences always smaller than 1 dB.

All figures describing the measurement surface area have been revised to be in accordance with the enveloping method for sound power determination. The height h is always measured from the test facility floor regardless of the height of the supports beneath the test object unless the test object is mounted on a support with a sufficiently large surface acting as reflecting plane.

Additional figures explain the procedure for the determination of the measurement surface area and the prescribed contour for a number of configurations of dry-type reactors.

When using this standard, it is recommended to frequently refer to the corresponding application guide IEC 60076-10-1:2016 as it promotes understanding with important background information and helpful details. IEC 60076-10 and IEC 60076-10-1 were revised in parallel by the same maintenance team resulting in fully aligned documents.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-10:2016

POWER TRANSFORMERS –

Part 10: Determination of sound levels

1 Scope

This Part of IEC 60076 defines sound pressure and sound intensity measurement methods from which sound power levels of transformers, reactors and their associated cooling devices are determined.

NOTE For the purposes of this standard, the term "transformer" frequently means "transformer or reactor".

The methods are applicable to transformers, reactors and their cooling devices – either fitted to or separate from the transformer – as covered by the IEC 60076 and IEC 61378 series.

This standard is primarily intended to apply to measurements made at the factory. Conditions on-site can be very different because of the proximity of objects, including other transformers. Nevertheless, this standard is applied to the extent possible for on-site measurements.

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 60076-1:2011, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-8:1997, *Power transformers – Part 8: Application guide*

IEC 61043:1993, *Electroacoustics – Instruments for the measurement of sound intensity – Measurements with pairs of pressure sensing microphones*

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

IEC 61672-2, *Electroacoustics – Sound level meters – Part 2: Pattern evaluation tests*

ISO 3382-2:2008, *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*

ISO 3746:2010, *Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*

ISO 9614-1:1993, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points*

ISO 9614-2:1996, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 2: Measurement by scanning*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60076-1, as well as the following, apply.

3.1

sound pressure

p

fluctuating pressure superimposed on the static (barometric) pressure by the presence of sound

Note 1 to entry: It is expressed in pascal, Pa.

3.2

sound pressure level

L_p

ten times the logarithm to the base 10 of the ratio of the square of the r.m.s. sound pressure to the square of the reference sound pressure ($p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa)

Note 1 to entry: It is expressed in decibels, dB.

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

3.3

sound intensity

I

vector quantity describing the magnitude and direction of the sound power flow per unit area at a given position

Note 1 to entry: The unit is watts per square metre, W/m².

3.4

normal sound intensity

I_n

component of the sound intensity in the direction normal to a measurement surface

Note 1 to entry: By convention, normal sound intensity is counted positive if the energy flow is directed away from the test object and negative if the energy flow is directed towards the test object.

3.5

normal sound intensity level

L_I

ten times the logarithm to the base 10 of the ratio of the r.m.s. normal sound intensity to the reference sound intensity ($I_0 = 1 \times 10^{-12}$ Wm⁻²)

Note 1 to entry: It is expressed in decibels, dB.

$$L_I = 10 \times \lg \frac{|I_n|}{I_0} \quad (2)$$

Note 2 to entry: Since I_n can be either positive or negative, a separate direction flag F_{Dir} for L_I to indicate the direction of flow of energy is to be maintained for further analysis such as calculating average and integral quantities.

3.6**direction flag** F_{Dir}

indication for the direction of sound energy flow, required for sound intensity because of its vector nature

Note 1 to entry: +1 for sound energy flow away from the test object, –1 for sound energy flow towards the test object.

3.7**sound power** W

rate at which airborne sound energy is radiated by a source

Note 1 to entry: It is expressed in watts, W.

3.8**sound power level** L_W

ten times the logarithm to the base 10 of the ratio of a given r.m.s. sound power to the reference sound power ($W_0 = 1 \times 10^{-12}$ W)

Note 1 to entry: It is expressed in decibels, dB.

$$L_W = 10 \times \lg \frac{W}{W_0} \quad (3)$$

3.9**total sound level**

sound level comprising the whole frequency range under consideration

Note 1 to entry: This level is returned either directly by the measurement device or derived by logarithmic summation of the sound levels of all individual frequency bands.

3.10**principal radiating surface**

hypothetical surface surrounding the test object, assumed to be the surface from which sound is radiated

3.11**measurement surface** S

surface enveloping the test object at the measurement distance from the principal radiating surface on which the measurement path(s) or points are located

3.12**surface measure** L_S

ten times the logarithm to the base 10 of the ratio of the measurement surface S to the reference surface S_0 (1 m²)

Note 1 to entry: It is expressed in decibels, dB.

$$L_S = 10 \times \lg \frac{S}{S_0} \quad (4)$$

3.13 measurement distance

x

horizontal distance between the principal radiating surface and the measurement surface

3.14 prescribed contour

horizontal path(s) on the measuring surface on which measurements shall be made

3.15 walk-around procedure

sound level measurement obtained by continuously moving the microphone(s) along the prescribed contour(s) at constant walking speed as the device is measuring a time averaged and spatially averaged sound level

Note 1 to entry: Test equipment may record a digital audio file during the measuring procedure for post-processing to determine the necessary quantities.

3.16 point-by-point procedure

sound level measurements obtained from a number of discrete microphone positions on the prescribed contour(s), equally spaced and not more than 1 m apart

Note 1 to entry: The spatial average sound level is the average of all the point measurements.

3.17 background noise level

A-weighted sound pressure level measured along the prescribed contour with the test object inoperative

3.18 environmental correction

K

correction that accounts for the influence of undesired sound reflections from room boundaries and/or reflecting objects in the test room when sound pressure measurements are used

3.19 P-I index

ΔL

difference between uncorrected spatially averaged sound pressure level and spatially averaged sound intensity level

Note 1 to entry: A-weighted values shall be used.

3.20 distribution type transformers

transformers for installation other than in substations with rated power typically lower than 5 000 kVA

Note 1 to entry: This definition is made for the purpose of this standard.

Note 2 to entry: This definition applies to both liquid-immersed and dry-type transformers.

4 Sound power for different loading conditions

4.1 General

There are three components of sound potentially contributing to the overall transformer sound power level in service:

- sound power at no-load excitation;
- sound power of the cooling device;
- sound power due to load current.

The representation of the sound power level of a transformer at a certain service condition is given by the logarithmic sum of the three sound power components at this service condition. For details see Clause 13.

4.2 Sound power at no-load excitation

Sound power due to no-load excitation has to be regarded for all types of transformer. The excitation voltage shall be of sinusoidal or practically of sinusoidal waveform and rated frequency. The voltage shall be in accordance with 11.5 of IEC 60076-1:2011. In the case of reactors a no-load condition does not exist since rated current will flow as soon as rated voltage is applied. For more information on reactor sound testing see IEC 60076-6.

The usual condition for sound power level determination of transformers at no-load excitation refers to rated voltage at an untapped winding. Other excitation conditions may occur in service leading to lower or higher sound power levels and might also be the condition for a guarantee and if so shall be specified by the purchaser. For transformers designed to operate with variable flux, the sound power at no-load excitation is strongly impacted by the tapping position. The tapping position for the sound measurement has therefore to be agreed between manufacturer and purchaser during tender stage.

If a transformer is fitted with reactor-type on-load tap-changer equipment where the reactor may on certain tap-changer positions be permanently energized, the measurements shall be made with the transformer on a tapping which involves this condition and which is also as near to the principal tapping as possible.

The selected test conditions shall be clearly indicated in the test report.

NOTE DC bias magnetization of the core can cause a significant increase in the measured sound levels. Its presence is indicated by the existence of odd harmonics of the excitation frequency in the sound spectrum and this can be identified by a narrow band analysis. The DC bias impact on no-load sound level measurements during factory testing can be practically eliminated by an over excitation run for some minutes. When over excitation is not a practical option, as in on-site measurements, DC bias elimination after a transformer inrush event can take several hours or even days.

4.3 Sound power of the cooling device(s)

The usual condition for sound power level determination is to have all cooling devices necessary to operate the transformer at its rated power running.

In case of a water cooling device, the water flow need not be maintained during sound level testing.

In case of variable speed cooling devices (usually fans) the speed during sound level testing has a significant effect on the sound power level. The speed of the cooling device selected for the sound level measurement shall be the speed necessary to operate the transformer at its rated power under the most onerous external cooling medium conditions.

The selected test conditions shall be clearly indicated in the test report.

4.4 Sound power due to load current

The main component of the sound power level due to load current, for most transformers, is of double the power frequency.

The magnitude of the load current sound power level can be roughly estimated by Equations (5) and (6):

$$L_{WA, Ir} \approx 39 + 18 \times \lg \frac{S_r}{S_p} \text{ for 50 Hz power frequency} \quad (5)$$

$$L_{WA, Ir} \approx 44 + 18 \times \lg \frac{S_r}{S_p} \text{ for 60 Hz power frequency} \quad (6)$$

where

$L_{WA, Ir}$ is the estimated A-weighted sound power level of the transformer at rated current and rated frequency at short-circuit condition;

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 two-winding rated power is used instead of S_r , in accordance with 3.2 of IEC 60076-8:1997.

NOTE 1 The predictions with Equations (5) and (6) are usually within ± 6 dB of the measured sound power level due to rated load current.

A guideline to estimate the significance of the sound power due to load current is given by Equations (5) and (6). When the calculated values are 10 dB or more below the sound power level estimated at no-load excitation, its contribution will be negligible and therefore need not be tested, unless the purchaser has specified the test.

NOTE 2 Distribution type transformers usually do not require consideration of sound power due to load current.

When this measurement is required, one winding shall be short-circuited and the rated current at rated frequency shall be injected into the other winding.

Unless otherwise specified, the tests shall be carried out with the tap-changer (if any) on the principal tapping. However, this tap position may not give the maximum sound level in service due to variations of the magnetic stray field distributions in the windings, the core and the tank shielding elements.

The selected test conditions shall be clearly indicated in the test report.

The sound power level at a current different from the rated current can be calculated by Equation (7):

$$L_{WA, IT} = L_{WA, Ir} + 40 \times \lg \frac{I_T}{I_r} \quad (7)$$

where

$L_{WA, Ir}$ is the calculated or measured A-weighted sound power level at rated current;

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

I_r is the rated current;

I_T is the actual current.

The equation is valid for currents in the range of 60 % to 130 % of rated current. It shall also be applied to calculate the sound power level due to rated load current if, in case of test bay limitations, testing is agreed to be done at a current lower than rated current.

In service, the direction of load flow and the power factor can impact the sound power level due to a superposition of the flux at no-load condition and the stray flux partly entering the core. This effect cannot be replicated by factory testing.

Special transformers such as industrial, SVC and HVDC converter transformers as well as specific types of reactor experience load currents with high harmonic content and subsequently produce sound harmonics of higher frequency. The injection of such currents requires special test equipment and test configurations which usually are not available for transformer testing. For reactors such tests are more common, see IEC 60076-6. Where testing is not possible, it is necessary to agree on predictions of the sound power level due to load current including its harmonics based upon calculations. For detailed information see 4.2.5 and 7.6 as well as Annex A of IEC 60076-10-1:2016.

5 Sound level measurement specification

When sound level measurements are specified, the acoustic performance of a transformer shall be indicated by its A-weighted sound power level.

In exceptional cases, an average sound pressure level at a certain distance is allowed to be specified by the purchaser. The determination of that pressure level can either be obtained from a measurement of the spatially averaged sound pressure level at that distance or derived from the sound power determined at a different distance.

As a minimum, the sound power level at no-load excitation at rated voltage and frequency on an untapped winding shall be specified. For variable flux applications see 4.2.

If the transformer is equipped with a cooling device having pumps and/or fans then the cooling device's sound power level corresponding to the transformer's rated power shall also be specified. Duties other than that required for rated power can be specified by the purchaser.

Alternatively, the combined sum of the transformer no-load excitation and cooling device sound power level can be specified.

If the calculated sound power level due to load current according Equations (5) and (6) is considered significant by the purchaser, it is recommended to specify a measurement of the sound power level due to rated load current in order to report the transformer sound power level as in service.

NOTE 1 Distribution type transformers usually do not require consideration of sound power due to load current.

The purchaser may also specify a value for the sum of the sound power levels

- at no-load excitation,
- of the cooling device and
- due to load current,

all at the before mentioned rating.

Conditions other than those mentioned above, which might better reflect the likely service condition, can be agreed for sound measurements.

NOTE 2 It is in the purchaser interest to notify the manufacturer on any special service conditions, such as the presence of harmonics and/or d.c. bias in the network for the impact to the in service sound power level to be assessed.

In case of phase segregated transformers forming a three-phase bank the sound level specification shall be per phase segregated unit.

Methods used for the determination of sound power levels can be either sound pressure or sound intensity and are normally chosen by the purchaser. If not specified by the purchaser, the manufacturer shall choose the method and it shall be stated in the tender.

Sound measurements for distribution type transformers shall provide the total sound level as per definition 3.9 only, unless otherwise specified by the purchaser.

NOTE 3 This applies also to reactors with rated power lower than 1 MVA.

Sound measurements for all other transformers shall be executed with 1/3-octave band filtering, unless an alternative band width (octave-band or narrow-band) or a total sound level only is specified by the purchaser. For more details on narrow-band measurements see 5.4 and Annex A of IEC 60076-10-1:2016.

Sound measurements on all transformers and reactors shall be executed with an active part temperature close to ambient test bay conditions, unless the purchaser has specified sound measurements at close to service temperature conditions (usually performed at the end of a temperature rise test).

Unless otherwise specified by the purchaser, the choice between the use of the walk-around or the point-by-point procedure shall be at the discretion of the manufacturer.

NOTE 4 The difference in measured sound level due to the chosen method is negligible based on manifold comparisons but the walk-around procedure is less time consuming, especially in the case of large units.

The point-by-point procedure shall be applied when safety considerations dictate.

The point-by-point procedure is the logical choice in situations where there are a small number of measuring points. This normally applies to distribution type transformers.

6 Instrumentation, calibration and accuracy

The available frequency response of the measuring instrument shall range from below the rated power frequency to above the upper limit of the human ear capability of 20 kHz.

In case of transformers with a power frequency lower than 25 Hz and when the measuring device is limited in its lower frequency end then it is acceptable to have double the power frequency as the lower frequency end.

The upper limit for the actual measurement shall be chosen in accordance with the highest emitted significant frequency, usually below 10 kHz. The selected frequency range for background noise measurements and the test measurement shall be the same.

Sound pressure measurements shall be made using a type 1 sound level meter complying with IEC 61672-1 and IEC 61672-2 and calibrated in accordance with 5.2 of ISO 3746:2010.

The sound pressure method of measurements described in this standard is based on ISO 3746. Measurements made in conformity with this standard tend to result in standard deviations of reproducibility between determinations made in different laboratories which are less than or equal to 3 dB.

Sound intensity measurements shall be made using a class 1 sound intensity instrument complying with IEC 61043 and calibrated in accordance with 6.2 of ISO 9614-1:1993. The frequency range of the measuring equipment shall be adapted to the frequency spectrum of the test object, that is, an appropriate microphone spacer system shall be chosen in order to minimize systematic errors.

The sound intensity method of measurements described in this standard is based on ISO 9614-1 and ISO 9614-2. Measurements made in conformity with this standard tend to result in standard deviations of reproducibility between determinations made in different laboratories which are less than or equal to 3 dB.

The measuring equipment shall be calibrated in accordance with manufacturer's instructions immediately before and after the measurement sequence. If the calibration changes by more than 0,3 dB, the measurements shall be declared invalid and the test repeated.

All measurements shall be made using the energetic average over the measurement duration of the sound quantity (pressure or intensity). Statistically derived sound quantities such as percentiles shall not be applied.

The fast response indication of the meter shall be used to identify and avoid measurement errors due to transient background noise.

The sound level measurement is usually of manual operation but the errors introduced by varying distances will tend to average out. Their impact on the final measurement is of less significance than other acoustical factors. Nevertheless, all effort shall be made to keep the measurement distance as constant as possible.

NOTE Marking the contour on the floor or using a spacer between microphone and transformer can help to achieve the required measurement quality.

7 Principal radiating surface

7.1 General

The definition of the principal radiating surface depends on the type of cooling devices employed and their position relative to the transformer or its enclosure.

The height of the principal radiating surface is counted from the top of the test object to the floor of the test bay and includes the height of any supporting structure such as wheels, pallets, transportation cars. In case the supporting structure provides the acoustic properties of a reflecting plane and extends the string contour (as specified in following subclauses) of the test object by at least twice the measuring distance, then the supporting structure shall be considered as the floor.

7.2 Transformers with or without cooling device

The principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the equipment. The projection runs from the top of the transformer tank cover (excluding protrusions such as bushings, turrets and other accessories situated above the tank cover) or the top of the cooling device, whatever is higher to the floor of the test bay. The principal radiating surface shall include cooling devices located < 3 m away from the transformer tank, tank stiffeners and such auxiliary equipment as cable boxes, tap-changer compartments, etc. It shall exclude any cooling devices located ≥ 3 m away from the transformer tank. Projections from protrusions such as bushings, oil pipework and conservators, valves, control cubicles and other secondary elements shall also be excluded as long as they do not interfere with the prescribed contour, see Figures 1, 2 and 3. Where protrusions interfere with the prescribed contour, then these parts are included within the principal radiating surface. In cases where the heights of the transformer and the cooling device deviate by more than a factor of two then the transformer and cooling plant sound levels shall be measured separately, even if the distance between both parts is less than 3 m.

7.3 Transformers in enclosures with cooling devices inside the enclosure

The principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the equipment. The projection runs from the top of the enclosure (excluding

protrusions such as bushings, turrets and other accessories situated above the enclosure) to the floor of the test bay.

7.4 Transformers in enclosures with cooling devices outside the enclosure

The principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the equipment. The projection runs from the top of the transformer enclosure (excluding protrusions such as bushings, turrets and other accessories situated above the enclosure) or the top of the cooling device, whatever is higher to the floor of the test bay. The principal radiating surface shall include cooling devices located < 3 m away from the transformer enclosure, auxiliary equipment as cable boxes, tap-changer compartments, etc. It shall exclude cooling devices located ≥ 3 m away from the transformer enclosure. Projections from protrusions such as bushings, oil pipework and conservators, valves, control cubicles and other secondary elements shall also be excluded, see Figures 1, 2 and 3. In case of a transformer with sound panels, the sound panels are considered as the enclosure. In cases where the height of the transformer and the cooling device deviate by more than a factor of two then the transformer and cooling plant sound levels shall be measured separately, even if the distance between both parts is less than 3 m.

7.5 Cooling devices mounted on a separate structure where the distance between the two principal radiating surfaces is ≥ 3 m

The principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the equipment but excluding protrusions such as oil conservators, framework, pipework, valves and other secondary elements. The vertical projection shall be from the top of the cooler structure to the floor of the test bay, see Figure 4. For cooling devices mounted several meters above floor level the prescribed contours shall be chosen in analogy to dry-type reactors, refer to Clause 8 and Figure 6 g).

NOTE In this case the prescribed contours will be at half of the height of the support structure and at the mid plane of the cooling device.

7.6 Dry-type transformers

In case of dry-type transformers without enclosure the principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the dry-type transformer excluding protrusions such as framework, external wiring and connections and attached apparatus not affecting the sound radiation. The vertical projection shall be from the top of the transformer structure to the floor of the test bay, see Figure 5. The principal radiating surface shall include cooling devices attached to the transformer, if any.

In case of dry-type transformers with enclosure the principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the equipment. The projection runs from the top of the transformer enclosure, excluding protrusions such as bushings, turrets and other accessories to the floor of the test bay. The principal radiating surface shall include cooling devices, auxiliary equipment as cable boxes, tap-changer compartments, etc., when attached to the transformer enclosure.

7.7 Dry-type air-core reactors

The principal radiating surface is the surface obtained by the vertical projection of a string contour encircling the equipment excluding protrusions such as external wiring and connections and attached apparatus such as arresters or surge capacitors not affecting the sound radiation. The projection runs from the top of the reactor to the floor of the test bay. The height of the principal radiating surface is therefore the sum of the height of the support structure to the floor of the test bay (h_S) and the height of the reactor coil (h_R). In case of a stacked reactor the height of the reactor (h_R) is the total height of the reactor stack, see Figure 6.

For single phase reactors or reactor stacks not equipped with sound shields, the string contour is the outer circumference of the reactor coil, see Figure 6 a).

For reactors equipped with sound shields, the string contour is the circumference of the sound shield.

For three-phase reactors mounted in a triangular arrangement the string contour envelops all three reactor phase-coils and is shown in Figure 6 b).

For three-phase reactors mounted side-by-side the string contour envelops all three of the reactor phase-coils and is shown in Figure 6 c).

8 Prescribed contour

For distribution type transformers, where factories have small test facilities or when anechoic chambers are used for sound measurements, the prescribed contour shall be spaced 0,3 m away from the principal radiating surface.

For dry-type transformers without enclosures, the prescribed contour shall be spaced 1 m away from the principal radiating surface for safety reasons.

For all other transformers, the prescribed contour shall be spaced 1 m away from the principal radiating surface unless the following conditions apply, where the distance may necessarily be reduced to 0,3 m:

- limited space in the test bay;
- low signal-to-noise ratio in case of low-noise transformers and/or high background noise.

NOTE 1 A low signal-to-noise ratio is indicated if the validation criteria for the selected test method cannot be met, see 11.2.4 and 11.3.4.

For measurements made with forced air cooling devices in service, the prescribed contour shall be spaced 2 m away from the principal radiating surface to minimise the effects of air turbulences. For dry-type units with and without enclosure and with forced air cooling devices in service, the prescribed contour shall be spaced 1 m away from the principal radiating surface as turbulences in such applications are normally limited.

NOTE 2 The length of the prescribed contour can either be measured in the test bay or calculated from a drawing or CAD model.

For a particular test set-up the one selected measurement distance applies around the entire test object. Different measurement distances can apply for different test set-ups as for example a change from 1 m to 2 m, when fans are running.

NOTE 3 Background information for the selection of the measurement distances is given in 5.5 of IEC 60076-10:2016.

For transformers and/or cooling devices with a height of $< 2,5$ m, the prescribed contour shall be on a horizontal plane at half the height. For transformers and/or cooling devices with a height $\geq 2,5$ m, two prescribed contours shall be used which are on horizontal planes at one-third and two-thirds of the height. For safety reasons, alternative heights can be selected.

For dry-type air-core reactors the prescribed contour shall be spaced 2 m away from the principal radiating surface, however for field measurements it may be necessary for safety reasons to increase the spacing.

Depending on the height of the support structure and the height of the reactor coil/stack one or two prescribed contours on horizontal planes shall be used:

- $h_S \leq 2$ m and $h_R \leq 4$ m: 1 prescribed contour (see Figure 6 d));
- $h_S \leq 2$ m and $h_R > 4$ m: 2 prescribed contours (see Figure 6 e) and Figure 6 f));

- $h_S > 2 \text{ m}$ and any h_R : 2 prescribed contours (see Figure 6 g));

where

h_S is the height of the support structure;

h_R is the height of the coil / stack.

9 Microphone positions

For the walk-around procedure, the microphone shall be moved with a constant speed of maximum 1 m/s on the prescribed contour(s) around the test object. At the given walking speed, the sampling rate of modern integrating sound level meters is always sufficient for accurate spatial averaging up to a resolution of 1/3-octave. The spatially averaged sound level over the measurement duration shall be recorded together with the active measurement duration in the test report.

NOTE The “START – STOP” and “PAUSE” functions of such sound level meters can be used to simplify the measuring procedure, i.e. to negotiate obstacles and/or to change between prescribed contours.

For the point-by-point procedure, the microphone positions shall be on the prescribed contour(s), equally spaced and not more than 1 m apart (see dimension D in Figures 1 to 5). There shall be a minimum of eight microphone positions along each contour. The measuring duration shall be a minimum of three seconds and be practically the same duration at each position.

It can be necessary to modify some measuring positions for certain test objects for safety reasons, for example, in the case of transformers with horizontal high voltage bushings where part of the prescribed contour(s) may be confined to the safe zone.

10 Calculation of the measurement surface area

10.1 Measurement surface area for measuring distances up to 30 m

The area S of the measurement surface, expressed in square metres, is given by Equation (8):

$$S = (h + x) l_m \quad (8)$$

where

h is the height of the principal radiating surface in meters as per Clause 7;

l_m is the length in metres of the prescribed contour;

x is the measurement distance in meters from the principal radiating surface to the prescribed contour.

NOTE 1 Equation (8) applies for the measuring distances of 0,3 m, 1 m, 2 m but also any other measuring distance up to 30 m.

NOTE 2 Equation (8) is also applicable for the calculation of the sound pressure level from the sound power level.

10.2 Measurement surface area for measuring distances larger than 30 m

The area S of the measurement surface (a hemisphere), expressed in square metres, is given by Equation (9):

$$S = 2 \times \pi \times R^2 \quad (9)$$

where

R is the distance in meters from the geometrical centre of the transformer / cooling device to the considered location in the far-field.

NOTE Equation (9) is also applicable for the calculation of the sound pressure level from the sound power level. For further information on far-field calculations, see Clause 14.

11 Sound measurement

11.1 Test conditions

11.1.1 Placement of test object

The following conditions shall be met in order to satisfy the assumptions for the enveloping method according to ISO 3746 for sound pressure measurements and ISO 9614-2:1996 for sound intensity measurements.

An environment having an approximately free field over a reflecting plane shall be used. The reflecting plane shall preferably have an acoustic absorption coefficient of less than 0,1 over the frequency range of interest, see Clause 6. This requirement is usually fulfilled when indoor measurements are made over concrete, resin, steel or hard tile flooring or when outdoor measurements are made over concrete, sealed asphalt, sand or stone surfaces. The reflecting plane shall be larger than the area within the prescribed contour.

Care shall be taken to ensure that the reflecting plane (supporting surface) does not radiate an appreciable sound power due to vibration.

It is acceptable to close gaps between test room floor and transformer tank bottom with sound absorbing material which appear as a result of the test set up only and which do not appear in service. However, any other sound absorbent materials placed on the floor within the area of the prescribed contour shall be removed during test.

The measurement surface shall lie within a sound field essentially undisturbed by reflections from nearby objects and the environment boundaries. Reflecting objects shall therefore be removed as far as possible from the test object. Placing the test object not in parallel to reflecting walls and as far away as possible from those will help to minimise reflections. For more information see also 6.3 of IEC 60076-10-1:2016. The use of sound absorbing panels outside the area of the prescribed contour will also improve the test environment.

The enveloping method is not applicable for measurements inside reverberant transformer cells or enclosures.

11.1.2 Test energisation options

The following options for transformer energisation are available and shall be applied as specified and agreed upon with the equipment under test at ambient temperature, see Clause 4.

- a) transformer at no-load excitation without cooling device(s);
- b) transformer at no-load excitation with cooling device(s);
- c) transformer at load current in short-circuit condition without cooling device(s);
- d) transformer at load current in short-circuit condition with cooling device(s);
- e) cooling device(s) only.

If the measurement of a specific combination is not specified to be actually measured then it is acceptable to derive the sound power level of this specific combination by logarithmic addition or subtraction of the individual measurements.

NOTE 1 It is established practice, to measure the individual sound level components during type test however the subsequent routine tests on identical units are generally performed without coolers mounted. Option a) and c) are then measured (if specified) and the cooler sound level from the type test is added.

NOTE 2 Configuration c) can be applied only if no significant local temperature rise is expected in any section of the winding arrangement.

If a sound level test is specified to be performed at a temperature close to service temperature then the top-liquid temperature is to be measured and noted in the test report.

NOTE 3 A minimum of time spent for a sound level measurement avoids changes in the sound level caused by changes in transformer temperature.

NOTE 4 The DC bias impact on no-load sound level measurements during factory testing can be practically eliminated by an over-excitation run for some minutes, see also 4.2.

11.1.3 Test application details

The test method (pressure method, intensity method), test procedure (walk-around procedure, point-by-point procedure), filtering bandwidth and transformer temperature (ambient or close to service) shall be as specified, see Clause 5. If nothing is specified by the purchaser then the measurement methods and procedures will be selected by the manufacturer from the available options within this standard in order to measure the required sound levels.

11.1.4 Prevailing ambient conditions

For the integrity of both methods described below a steady-state background noise level throughout the sound level measurement shall be maintained.

NOTE If the background noise is frequently disturbed then it can be preferable to use the point-by-point procedure.

Outdoor measurements shall not be made under extreme meteorological conditions, for example, in the presence of temperature gradients, strong wind speeds, any type of precipitation, snow accumulations and at high humidity for measurements at distances larger than 10 m.

11.2 Sound pressure method

11.2.1 General

Sound pressure measurements around the test object are affected by the test environment and the following corrections shall be made, as applicable:

- correction for steady-state background noise;
- correction for sound reflections by factor K .

NOTE Sound field effects close to the test object (near field effects) can impact sound pressure measurements at a measuring distance of 0,3 m. They tend to increase the measured sound pressure level in the range of 0,5 dB to 1,5 dB.

11.2.2 Test procedure

The intention of this test is to report the total spatially averaged A-weighted sound pressure level for each energisation option accompanied with a single spatially averaged frequency spectrum (where applicable).

The same test procedure (either walk-around procedure or point-by-point procedure) applies for both background noise measurements and test measurements.

The microphone(s) positions as described in Clause 9 apply for both background noise measurements and test measurements.

For the point-by-point procedure, when the number of measuring positions exceeds 10, it is permissible to measure the background noise level at only 10 positions equally distributed around the test object.

A total spatially averaged background noise level (see definition 3.17) and the corresponding frequency spectrum shall be recorded immediately before and after each test measurement sequence. Where the point-by-point procedure is applied, it is possible to determine the frequency spectrum from the average of the spectra measured at all individual microphone positions or by an additional walk-around measurement. If the latter is applied this shall be clearly mentioned in the test report.

If the background noise level is at least 10 dB below that of the test object then the background noise can be measured at only one location on the prescribed contour and a background noise correction is not necessary.

A total spatially averaged A-weighted sound pressure level together with the corresponding frequency spectrum shall be recorded for either the walk-around procedure or the point-by-point procedure as appropriate. For the point-by-point procedure the purchaser can additionally request individual total A-weighted sound pressure levels to be recorded for each microphone position. Where the point-by-point procedure is specified, it is possible to determine the frequency spectrum by taking the average of the spectra taken at all individual microphone positions or by an additional walk-around measurement. If the latter is applied this shall be clearly mentioned in the test report.

11.2.3 Calculation of the spatially averaged sound pressure level

For the walk-around procedure the instrument will automatically provide the spatially averaged measurement data. In case of the point-by-point procedure the spatially averaged measurement data may also be derived automatically by the instrument via post-processing or it has to be calculated as described below. When required to report point-by-point measurements for each microphone position it may be necessary to derive the total spatially averaged sound pressure level by calculation. The total spatially averaged A-weighted sound pressure level for the test measurement, $\overline{L_{pA0}}$, shall then be calculated from the total A-weighted sound pressure levels, L_{pAi} , measured at the individual microphone positions using Equation (10):

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

where

N is the number of microphone positions;

L_{pAi} is the measured total A-weighted sound pressure level of the test measurement at the i^{th} microphone position.

The total spatially averaged A-weighted background noise level, $\overline{L_{bgA}}$, shall be calculated before and after the test sequence using Equation (11):

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right) \quad (11)$$

where

M is the number of microphone positions;

L_{bgAi} is the measured total A-weighted background noise level at the i^{th} microphone position.

The same calculation procedure applies for each individual band v of the frequency spectrum resulting in spatially averaged A-weighted sound pressure levels $\overline{L_{pA0}^v}$ and spatially averaged background noise levels $\overline{L_{bgA}^v}$.

11.2.4 Validation of test measurements with respect to background noise

For practical purposes the validation process described below is based on the total spatially averaged A-weighted sound pressure level $\overline{L_{pA0}}$ and the total background noise level $\overline{L_{bgA}}$. Examination of individual bands of the frequency spectrum is not required.

When initial and final background noise levels $\overline{L_{bgA}}$ differ by more than 3 dB and when the higher value is less than 8 dB below the A-weighted sound pressure level of the test measurement $\overline{L_{pA0}}$, the test measurement shall be declared invalid and the test repeated. However, in cases where the test measurement meets the guarantee, correction for background noise is not required. In this case the test is declared a pass.

If the greater of the two background noise levels $\overline{L_{bgA}}$ is less than 3 dB below the A-weighted sound pressure level of the test measurement $\overline{L_{pA0}}$, the test measurement shall be declared invalid and the test repeated. However, in cases where the test measurement meets the guarantee, correction for background noise is not required. In this case the test is declared a pass.

Whilst this standard permits small differences between background noise and test measurement sound levels, every effort should be made to obtain a difference of about 6 dB. When the difference becomes less than 3 dB, the use of alternative measurement methods may be considered (see 11.3 and Annex A).

The above requirements are summarized in Table 1.

Table 1 – Test acceptance criteria

$\overline{L_{pA0}}$ – the higher $\overline{L_{bgA}}$	Initial $\overline{L_{bgA}}$ – final $\overline{L_{bgA}}$	Decision
≥ 8 dB	–	Accept test
< 8 dB	< 3 dB	Accept test
< 8 dB	> 3 dB	Repeat test ^a
< 3 dB	–	Repeat test ^a
^a Unless $\overline{L_{pA0}}$ meets the guarantee. Correction for background noise is not required in this case and the test is declared a pass.		

11.2.5 Calculation of environmental correction K

11.2.5.1 General

The environmental correction K , expressed in dB, accounts for the influence of undesired sound reflections from room boundaries and/or reflecting objects within the test area. The magnitude of K depends principally on the ratio of the sound absorption area of the test room, A , to the area of the measurement surface, S . The magnitude of K is not strongly influenced

by the location of the test object in the test room and K does not correct for measurements influenced by standing waves.

K shall be derived from Equation (12) or Figure 7 by entering the appropriate value of A/S .

$$K = 10 \times \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad (12)$$

The environmental correction factor K shall preferably be determined by measurement techniques. However, for the purpose of this standard estimation for K is allowed by use of absorption coefficients.

For a test room to be satisfactory, the ratio A/S shall be ≥ 1 with a corresponding value for the environmental correction factor $K \leq 7$ dB. However, if the ratio A/S is $\leq 2,5$ with a corresponding value for the environmental correction factor $K \geq 4,1$ dB, then the determination of K shall be based on acoustical measurements.

Where conditions are close to free-field, i.e. essentially undisturbed by reflections from nearby objects and the environment boundaries, as sometimes achieved for outdoor measurements, then the value for K would tend to zero and no environmental correction is necessary.

11.2.5.2 Determination of K based on measurement of the reverberation time

The reverberation time of the test room is determined by exciting the test room with broadband sound or impulsive sound and measuring the decaying response as A-weighted broadband or more precisely for individual bands of the frequency spectrum, as per ISO 3382-2:2008.

The value of A is given in square metres by Sabine's Equation (13):

$$A = 0,16 (V/T) \quad (13)$$

where

V is the volume of the test room in cubic metres;

T is the reverberation time of the test room in seconds.

Equation (13) applies for the broadband A weighted response and also for individual bands of the frequency spectrum when K is determined individually for the frequency bands.

Whilst the application of K for the individual frequency bands will provide a more accurate correction, for practical purposes it is possible to apply only one K factor for the whole spectrum.

Ideally, the determination of K is performed before each measurement with test lab equipment and test objects in place. Because this is often not practical the determination of K can also be done once as reference with the test lab empty of all unnecessary equipment.

NOTE 1 K determined with the test lab empty of all unnecessary equipment results in the lowest possible value.

NOTE 2 The determination of the sound absorption area A with all unnecessary equipment removed from the test lab can preferably be provided by an independent agency and the certificate be used to demonstrate the determination of K to the purchaser on request.

11.2.5.3 Determination of K based on absorption coefficients

The value of the sound absorption area A in square metres is given by Equation (14):

$$A = \sum_i \alpha_i \times S_{Vi} \quad (14)$$

where

α_i is the acoustic absorption coefficient for a partial surface (see Table 2);

S_{Vi} is the area of the partial surface of the test room (walls, ceiling and floor) characterised by α_i in square metres.

Table 2 – Approximate values of the average acoustic absorption coefficient

Description of surface	Average acoustic absorption coefficient, α
Hard floor	0,1
Walls and ceilings within a irregularly shaped machinery room or production facility, test bay walls and ceiling without acoustic damping material	0,2
Walls and ceilings with acoustic damping material of up to 20 cm thickness	0,3
Walls and ceilings with acoustic damping material of more than 20 cm thickness	0,5
Open gates with large room behind	0,5

The entire surface of the volume of the test room shall match the sum of the partial surfaces S_{Vi} in Equation (14), including walls, ceiling, floor and open gates.

The above mentioned calculation for the sound absorption area A according Equation (14) shall be included in the test report.

The determination of K with this method applies as correction for both the total A-weighted sound pressure level and for individual bands of the frequency spectrum.

11.2.5.4 Alternative method for the estimation of K

Alternatively, K can be determined by measuring, in the test facility, the apparent sound power level of a reference sound source. The reference sound source will have been previously calibrated in a free field over a reflecting plane. It then can be written

$$K = L_{Wm} - L_{Wr} \quad (15)$$

where

L_{Wm} is the sound power level of the reference sound source, determined according to Clauses 7 and 8 of ISO 3746:2010 not accounting for reflected sound;

L_{Wr} is the measured apparent sound power level of the reference sound source measured in the test facility accounting for reflected sound ($L_{Wr} > L_{Wm}$).

The determination of K with this method applies as correction for both the total A-weighted sound pressure level and for individual bands of the frequency spectrum, as long as the sound power of the reference source was estimated using frequency selective techniques.

NOTE This method is often utilised at small test facilities.

11.2.6 Final correction for steady-state background noise and test environment

The corrected total spatially averaged A-weighted sound pressure level, $\overline{L_{pA}}$, used for the sound power calculation (see Clause 12), shall be derived from Equation (16):

$$\overline{L_{pA}} = 10 \times \lg \left(10^{0,1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0,1\overline{L_{bgA}}} \right) - K \quad (16)$$

where $\overline{L_{bgA}}$ is the lower of the two total spatially average A-weighted background noise levels.

The same calculation procedure applies for individual bands ν of the frequency spectrum resulting in corrected spatially averaged A-weighted sound pressure levels $\overline{L_{pA}^{\nu}}$, used for the sound power calculation of the individual frequency bands. Background noise levels in individual bands $\overline{L_{bgA}^{\nu}}$ all refer to the lower of the two total spatially averaged A-weighted background noise levels $\overline{L_{bgA}}$.

If Equation (16) is applied for individual frequency bands ν then the total sound pressure level is the logarithmic sum of the corrected sound pressure level of the individual frequency bands.

In circumstances when a background noise level in a specific band $\overline{L_{bgA}^{\nu}}$ is greater than the test measurement sound pressure level $\overline{L_{pA0}^{\nu}}$ in the same band, then the corresponding $\overline{L_{pA}^{\nu}}$ shall be taken as zero.

11.3 Sound intensity method

11.3.1 General

The sound intensity method is, within certain limits, insensitive to steady-state background noise and reflections. Therefore corrections need not be applied. For more information see also IEC 60076-10-1:2016.

It is inherent to the sound intensity method that the measurement surface and therefore the measurement path shall completely encircle the test object. This is because sound intensity is a vector quantity.

Where tank walls are partially covered by panels, the intensity method is not applicable because the intensity level measured at the microphone positions will not be representative to the complete transformer surface. For more information see 6.5 of IEC 60076-10-1:2016.

11.3.2 Test procedure

Both the normal sound intensity level and the sound pressure level shall be recorded for each measurement.

The microphone spacer within the intensity probe shall be selected to cover the necessary sound spectrum to be measured, otherwise the lower or upper frequencies will not correctly be taken into account and errors will be introduced. Different microphone spacers may need to be used for the various energisation options, see 11.1.2.

The sound intensity probe (microphone pair) positions as described in Clause 9 apply for the measurements. As the probe has directivity and polarity, it is essential to maintain the axis of the probe normal and with its correct direction to the measurement surface.

The intention of this test is to report the total spatially averaged A-weighted normal sound intensity and sound pressure level for each energisation option accompanied with a single spatially averaged frequency spectrum (where applicable).

The specified test procedure shall be applied for the measurement (walk-around procedure or point-by-point procedure).

A total spatially averaged A-weighted normal sound intensity and sound pressure level together with the corresponding frequency spectrum shall be recorded for either the walk-around procedure or the point-by-point procedure as appropriate. For the point-by-point procedure the purchaser can additionally request individual total A-weighted normal sound intensity and sound pressure levels to be recorded for each microphone position. Where the point-by-point procedure is specified, it is possible to determine the frequency spectrum by taking the average of the spectra taken at all individual microphone positions or by an additional walk-around measurement. If the latter is applied this shall be clearly mentioned in the test report.

11.3.3 Calculation of average normal sound intensity and sound pressure level

For the walk-around procedure the instrument will automatically provide the spatially averaged measurement data (normal intensity level $\overline{L_{IA0}}$ and its direction flag $\overline{F_{Dir}}$ and the sound pressure level $\overline{L_{pA0}}$). In case of the point-by-point procedure the spatially averaged measurement data may also be derived automatically by the instrument, via post-processing or it has to be calculated as described below. When required to report point-by-point measurements for each microphone position it may be necessary to derive the total spatially averaged normal sound intensity and sound pressure level by calculation. The total spatially averaged A-weighted normal sound intensity level $\overline{L_{IA0}}$ shall be calculated from the total A-weighted normal sound intensity levels L_{IAi} measured at the individual microphone positions according to Equations (17) and (18):

$$\overline{L_{IA0}} = 10 \times \lg \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Diri} \times 10^{0,1L_{IAi}} \right| \quad (17)$$

$$\overline{F_{Dir}} = \text{Sign} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Diri} \times 10^{0,1L_{IAi}} \right) \quad (18)$$

where

F_{Diri} is the direction flag according definition 3.6 at the i^{th} microphone position;

$\overline{F_{Dir}}$ is the direction flag indicating the net energy flow;

N the number of microphone positions.

The total spatially averaged A-weighted sound pressure level $\overline{L_{pA0}}$ shall be calculated from the sound pressure levels L_{pAi} , measured at the individual microphone positions using Equation (10).

The same calculation procedure applies for individual bands ν of the frequency spectrum resulting in spatially averaged A-weighted normal sound intensity levels $\overline{L_{IA0}^{\nu}}$ and sound pressure levels $\overline{L_{pA0}^{\nu}}$.

11.3.4 Measurement validation

Where there is a noticeable change in background noise during a measurement the measurement shall be rejected.

For practical purposes the validation process described below is based on the measured total spatially averaged A-weighted normal sound intensity and sound pressure levels, $\overline{L_{IA0}}$ and $\overline{L_{pA0}}$ respectively. Examination of individual bands of the frequency spectrum is not required.

The criterion for judging the acceptability of the test environment and the acceptability of the steady-state background noise is the P-I index as per definition 3.19 and is given by Equation (19):

$$\Delta L = \overline{L_{pA0}} - \overline{L_{IA0}} \quad (19)$$

If $\Delta L > 8$ dB, the measurement shall be declared invalid.

If $4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8 \text{ dB}$, the measurement shall be accepted with a correction applied, see 11.3.5.

If $\Delta L \leq 4$ dB, the measurement is valid without correction.

NOTE If $\Delta L > 8$ dB, the re-arrangement of the test setup, an alternative measuring distance or an alternative measurement method (sound pressure method, narrow-band measurement, time-synchronous measurement) can be considered. See also Annex A.

If the direction flag for the total spatially averaged normal sound intensity level $\overline{F_{Dir}}$ becomes -1, this indicates either the overall energy flow being towards the test object or an erroneous measurement and the test is declared invalid.

Where the direction flag for the spatially averaged normal sound intensity level of an individual band of the frequency spectrum becomes -1, this indicates the net energy flow in that frequency band being towards the test object. This occurs when the radiated sound from the test object is negligible and this is acceptable.

11.3.5 Final correction based on P-I index and direction flag

The corrected total spatially averaged A-weighted normal sound intensity level $\overline{L_{IA}}$ used for the sound power calculation (see Clause 12), shall be derived from $\overline{L_{IA0}}$ and $\overline{L_{pA0}}$ as follows:

$$\text{If } \Delta L \leq 4 \text{ dB:} \quad \overline{L_{IA}} = \overline{L_{IA0}} \quad (\text{i.e. no correction required}); \quad (20)$$

$$\text{If } 4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8 \text{ dB:} \quad \overline{L_{IA}} = \overline{L_{pA0}} - 4 \text{ dB}. \quad (21)$$

The same correction as for the total spatially averaged A-weighted normal sound intensity level $\overline{L_{IA}}$ of a measurement shall be applied to all individual bands ν .

NOTE The PI-index of individual bands frequently will exceed the permissible value of 8 dB for the overall PI-index. This is consistent with the measuring principle and usually indicates a small sound power involved.

Where the direction flag for an individual band ν becomes -1, the corrected sound intensity level $\overline{L}_{IA}^{\nu}$ shall be taken as zero for this band.

12 Determination of sound power level by calculation

The total A-weighted sound power level of the test object, L_{WA} , shall be calculated from either the corrected total spatially averaged A-weighted sound pressure level, $\overline{L}_{pA}$, or the corrected total spatially averaged A-weighted normal sound intensity level, $\overline{L}_{IA}$, according to Equation (22) or (23), respectively:

$$L_{WA} = \overline{L}_{pA} + 10 \times \lg \frac{S}{S_0} \quad (22)$$

$$L_{WA} = \overline{L}_{IA} + 10 \times \lg \frac{S}{S_0} \quad (23)$$

where S is derived from Equation (8) and S_0 is equal to the reference area (1 m²).

The same calculation procedure applies for individual bands ν of the frequency spectrum resulting in A-weighted sound power levels L_{WA}^{ν} of the individual frequency bands. Sound power levels of frequency bands with $\overline{L}_{pA}^{\nu}$ or $\overline{L}_{IA}^{\nu}$ taken as zero are irrelevant and consequently set to zero.

13 Logarithmic addition and subtraction of individual sound levels

There are situations where it is necessary to add or subtract sound levels. Such situations are

- combination of sound levels for different loading conditions;
- combination of sound levels for individual bands of the frequency spectrum for different loading conditions;
- summation of individual band sound levels to a total sound level;
- summation of intensity levels when it was necessary to use different spacers to cover the entire frequency range of a specific measurement.

The equations given in this clause apply equally to the sound level quantities of pressure, intensity and power. For sound pressure and for sound intensity it is necessary that individual components refer to the same measuring point or prescribed contour. For sound intensity it is also necessary that the orientation of the measuring probe is identical for the individual measurements.

Equation (24) applies for the addition of sound levels of different sources or bands without a direction flag:

$$L_{\text{sum}} = 10 \times \lg \left(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n} \right) \quad (24)$$

where

L_1 is the 1st sound level;

L_2 is the 2nd sound level;

L_n is the n^{th} sound level.

Equation (24) also applies for subtraction operations of sound levels at different loading conditions.

Equation (24) is used for all sound levels determined by the pressure method including frequency bands and for total sound levels determined by the intensity method.

Equations (25) and (26) apply for the addition of sound levels of different sources or bands with a direction flag as for individual bands of sound levels determined by the intensity method:

$$L_{\text{sum}} = 10 \times \lg \left| F_{\text{Dir}1} \times 10^{0,1L_1} + F_{\text{Dir}2} \times 10^{0,1L_2} + \dots + F_{\text{Dir}n} \times 10^{0,1L_n} \right| \quad (25)$$

$$F_{\text{Dir sum}} = \text{Sign} \left(F_{\text{Dir}1} \times 10^{0,1L_1} + F_{\text{Dir}2} \times 10^{0,1L_2} + \dots + F_{\text{Dir}n} \times 10^{0,1L_n} \right) \quad (26)$$

where

L_1, L_2, L_n are the 1st, 2nd and n^{th} sound levels,

L_{sum} is the sound level of the summation;

$F_{\text{Dir}1}, F_{\text{Dir}2}, F_{\text{Dir}n}$ are the 1st, 2nd and n^{th} direction flags of the sound levels L_1, L_2, L_n ;

$F_{\text{Dir sum}}$ is the direction flag of L_{sum} .

Equations (25) and (26) also apply for subtraction operations of sound levels at different loading conditions.

14 Far-field calculations for distances larger than 30 m

When the purchaser specification requires the sound pressure of the equipment at a certain distance to be quoted the following applies.

As an approximate calculation, assuming a point source and free-field conditions over a reflecting plane, the sound pressure level, L_{pR} , at a distance R in metres from the geometrical centre of the source is given by Equation (27):

$$L_{pR} = L_W - 10 \times \lg \frac{S_h}{S_0} \quad (27)$$

where

$S_h = 2 \times \pi \times R^2$ is the area of the surface of a hemisphere of radius R , and R is greater than 30 m;

S_0 is the reference area (1 m²);

L_W is the sound power level.

For a more accurate value, factors such as directional characteristics, reflections, screening and atmospheric absorption need to be considered. Sound propagation simulations using

numerical techniques may be required. These are normally not available to the transformer manufacturer.

15 Presentation of results

The report shall include all the following information:

- a) name of manufacturer and place of manufacture and test;
- b) date of tests;
- c) description of the test object giving its serial number, rated power, rated voltage, frequency, tap-position for sound measurements due to load;
- d) guaranteed sound level and the loading and measurement conditions against which this guaranteed level is demonstrated;
- e) top-liquid temperature in case where sound level measurements are performed at temperature close to service temperature;
- f) reference to this measurement standard IEC 60076-10;
- g) sound power level determination method and procedure used;
- h) identification of sound measuring equipment and calibration verification including serial numbers of the instruments, microphone(s) and calibration source;
- i) dimensioned sketch of the test object and the measuring positions;
- j) test conditions for each test configuration including voltage, current, tap position, cooling devices used and noise mitigation features employed during test;
- k) length of the measurement distance, the prescribed contour(s), the height of the test object and the calculated measurement surface area;
- l) name of the test engineer and witnesses where necessary;
- m) signature of the person responsible for testing.

When the sound pressure method is used, the following information shall be included:

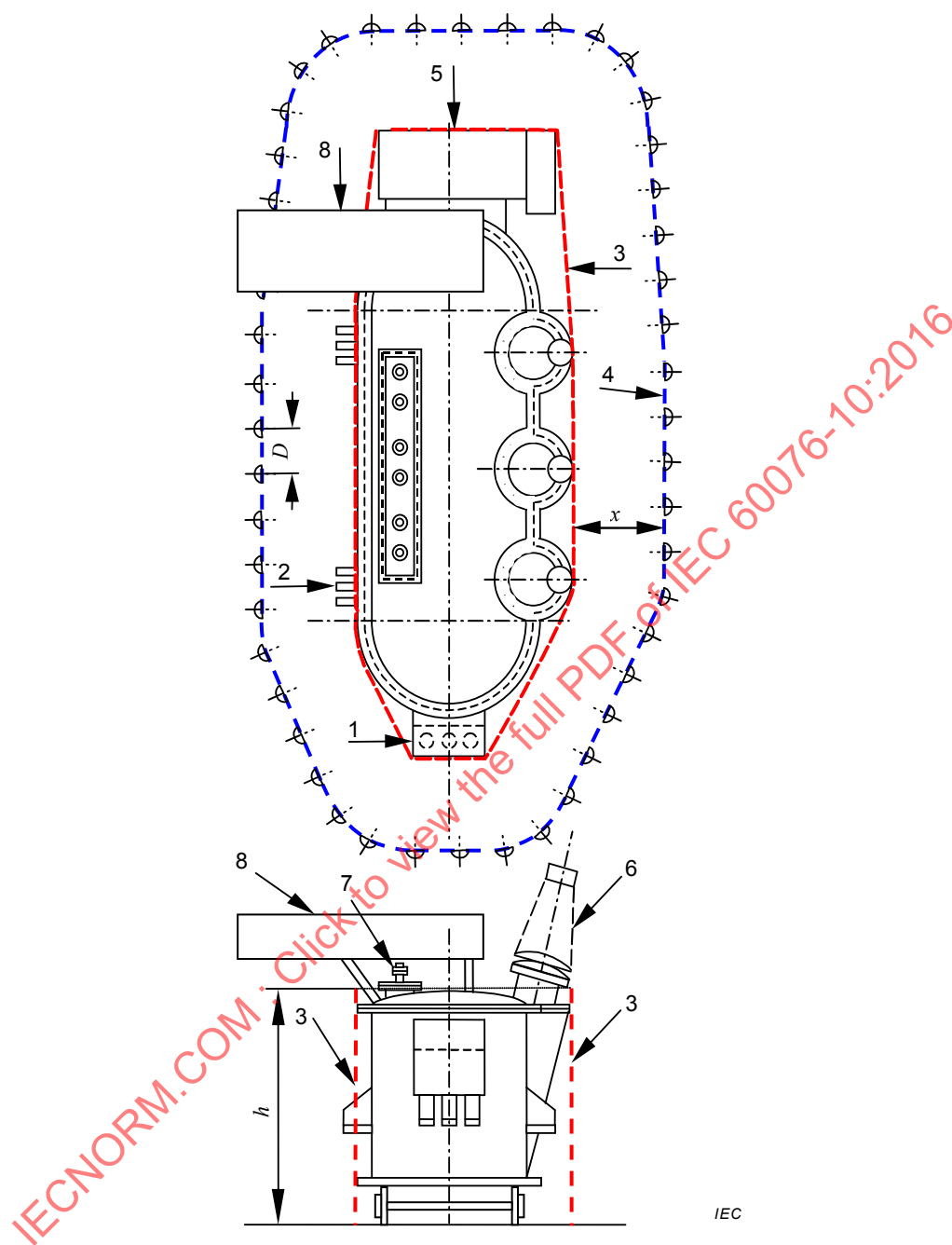
- n) point-by-point procedure: the total A-weighted sound pressure level of the background noise at each background noise measuring position and, where applicable, a spatially averaged frequency spectrum immediately before and immediately after the measurement sequence;
- o) walk-around procedure: the total spatially averaged A-weighted sound pressure level of the background noise and, where applicable, a spatially averaged frequency spectrum immediately before and immediately after the measurement sequence;
- p) point-by-point procedure: the total A-weighted sound pressure level for each measuring position, the total spatially averaged A-weighted sound pressure level $\overline{L_{pA0}}$ and, where applicable, a spatially averaged frequency spectrum for each of the performed loading conditions;
- q) walk-around procedure: the total spatially averaged A-weighted sound pressure level $\overline{L_{pA0}}$ and, where applicable, a spatially averaged frequency spectrum for each of the performed loading conditions;
- r) the value of the environmental correction K , either broadband or frequency band specific;
- s) when the environmental correction K is derived by calculation from absorption coefficients, the calculation of the sound absorption area A ; when the environmental correction K is based on measurements of the sound absorption area A , the reference to the certificate of the independent agency which made the measurements; when the environmental correction K is derived by utilisation of a reference sound source, the reference to the certificate of the sound source calibration;

- t) corrected total spatially averaged A-weighted sound pressure level, $\overline{L_{pA}}$ and, where applicable, a corrected spatially averaged frequency spectrum for each of the performed loading conditions;
- u) total A-weighted sound power level, L_{WA} and, where applicable, a frequency spectrum L_{WA}^v , for each of the performed loading conditions;
- v) summation of the derived sound power levels for the loading combinations to be guaranteed, only at this final stage to be rounded to the nearest integer.

When the sound intensity method is used, the following information shall be included:

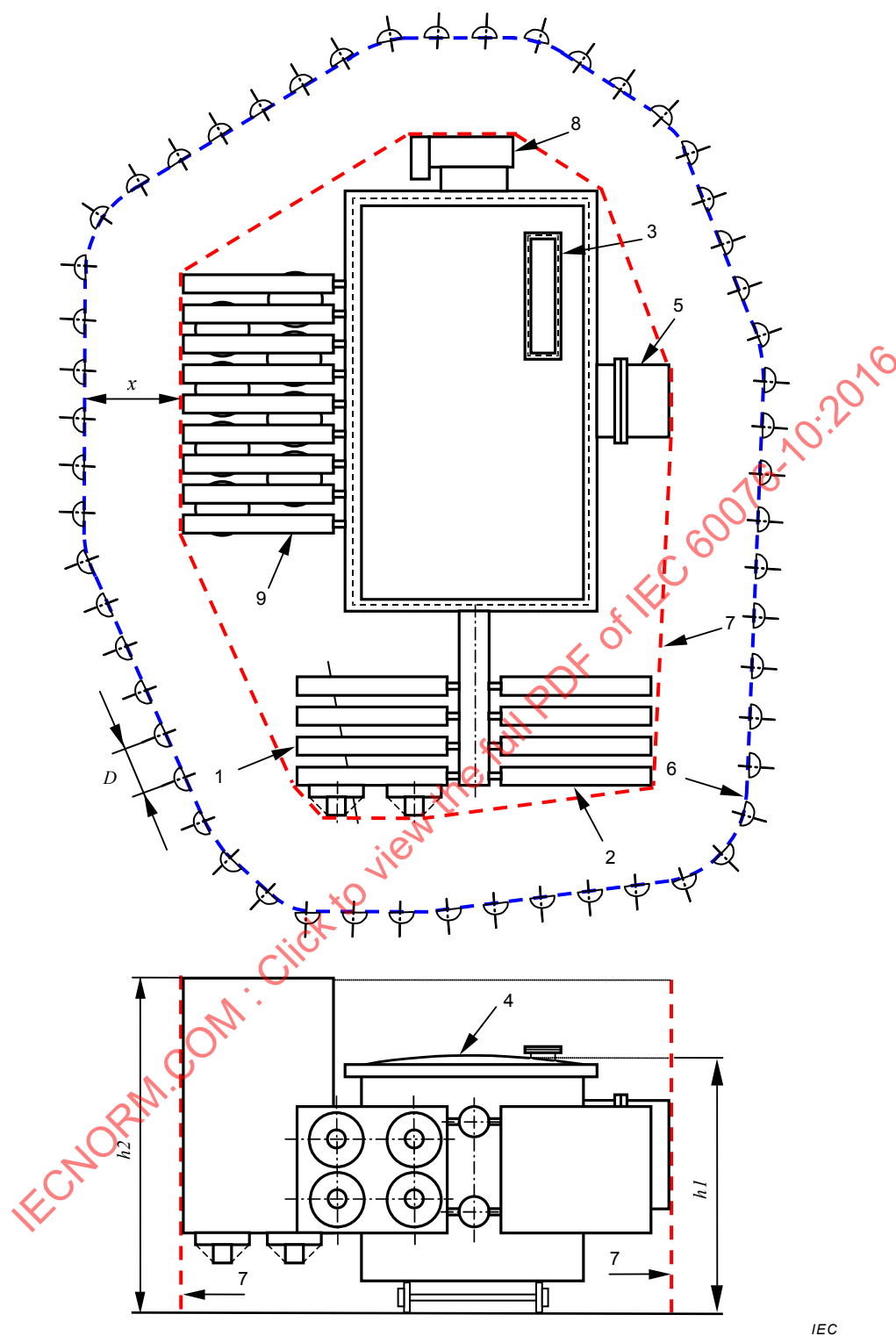
- w) point-by-point procedure: the total A-weighted sound pressure and intensity level with its direction flag F_{Dir} for each measuring position, the total spatially averaged A-weighted sound pressure and intensity level $\overline{L_{pA0}}$ and $\overline{L_{IA0}}$ with its direction flag $\overline{F_{Dir}}$ and, where applicable, a spatially averaged frequency spectra of the sound pressure and intensity level with its flags for each of the performed loading conditions;
- x) walk-around procedure: the total spatially averaged A-weighted sound pressure and intensity level $\overline{L_{pA0}}$ and $\overline{L_{IA0}}$ with its direction flag $\overline{F_{Dir}}$ and, where applicable, the spatially averaged frequency spectra of the sound pressure and intensity level with its flags for each of the performed loading conditions;
- y) value of ΔL for each of the performed loading conditions;
- z) corrected total spatially averaged A-weighted normal sound intensity level $\overline{L_{IA}}$ for each of the performed loading conditions;
- a1) total A-weighted sound power level, L_{WA} and, where applicable, a frequency spectrum L_{WA}^v , with its direction flags for each of the performed loading conditions;
- b1) summation of the derived sound power levels for the loading combinations to be guaranteed, only at this final stage to be rounded to the nearest integer.

NOTE A typical form for the presentation of results is given in Annex B.

**Key**

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1 Tertiary bushings | 7 LV bushings |
| 2 Stiffeners and jacking lug | 8 Conservator |
| 3 Principal radiating surface | D Microphone spacing (if applicable) |
| 4 Prescribed contour | h Height of the principal radiating surface |
| 5 On-load tap-changer | x Measurement distance |
| 6 HV bushings | |

Figure 1 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers excluding cooling devices

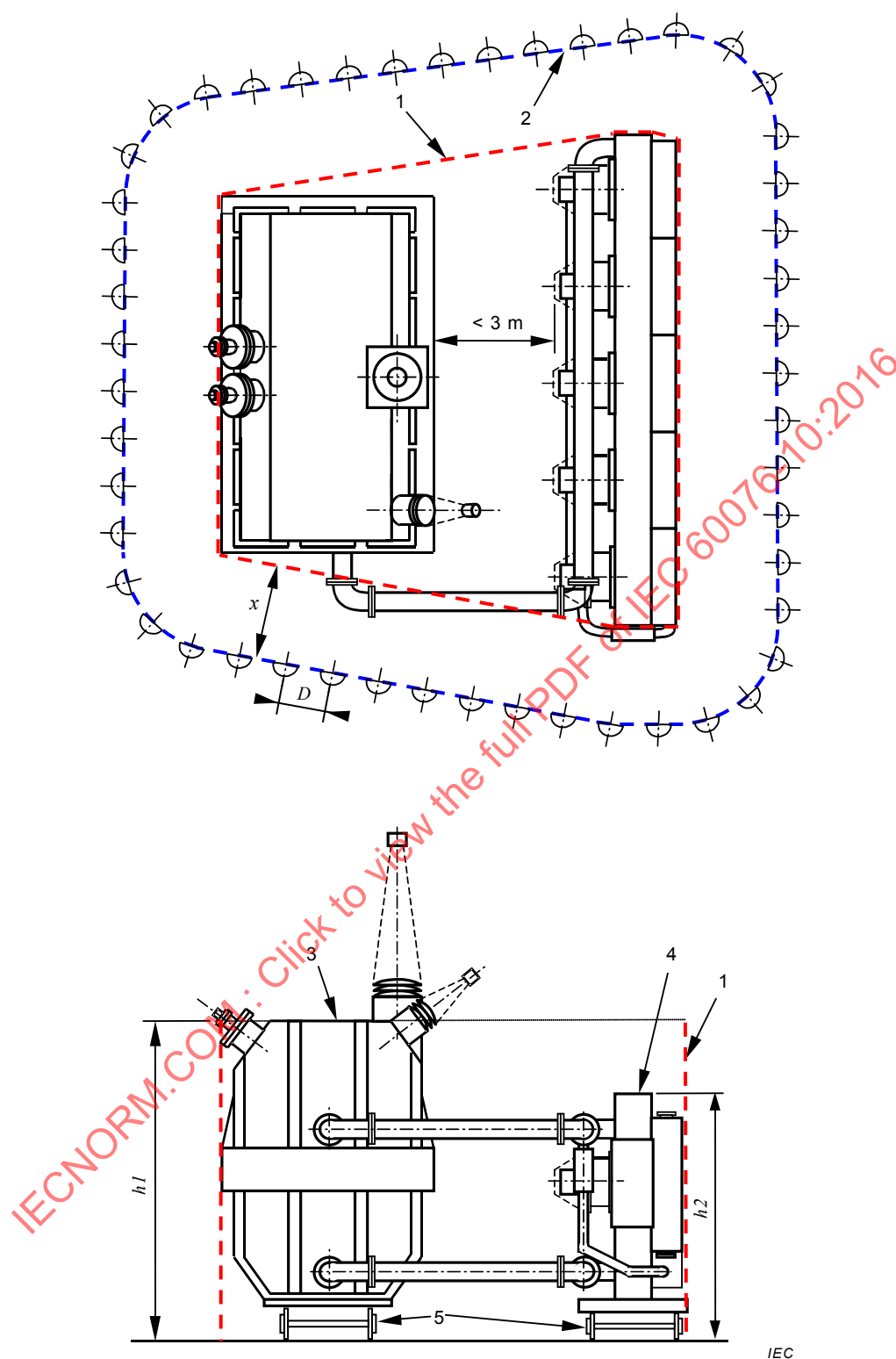


IEC

Key

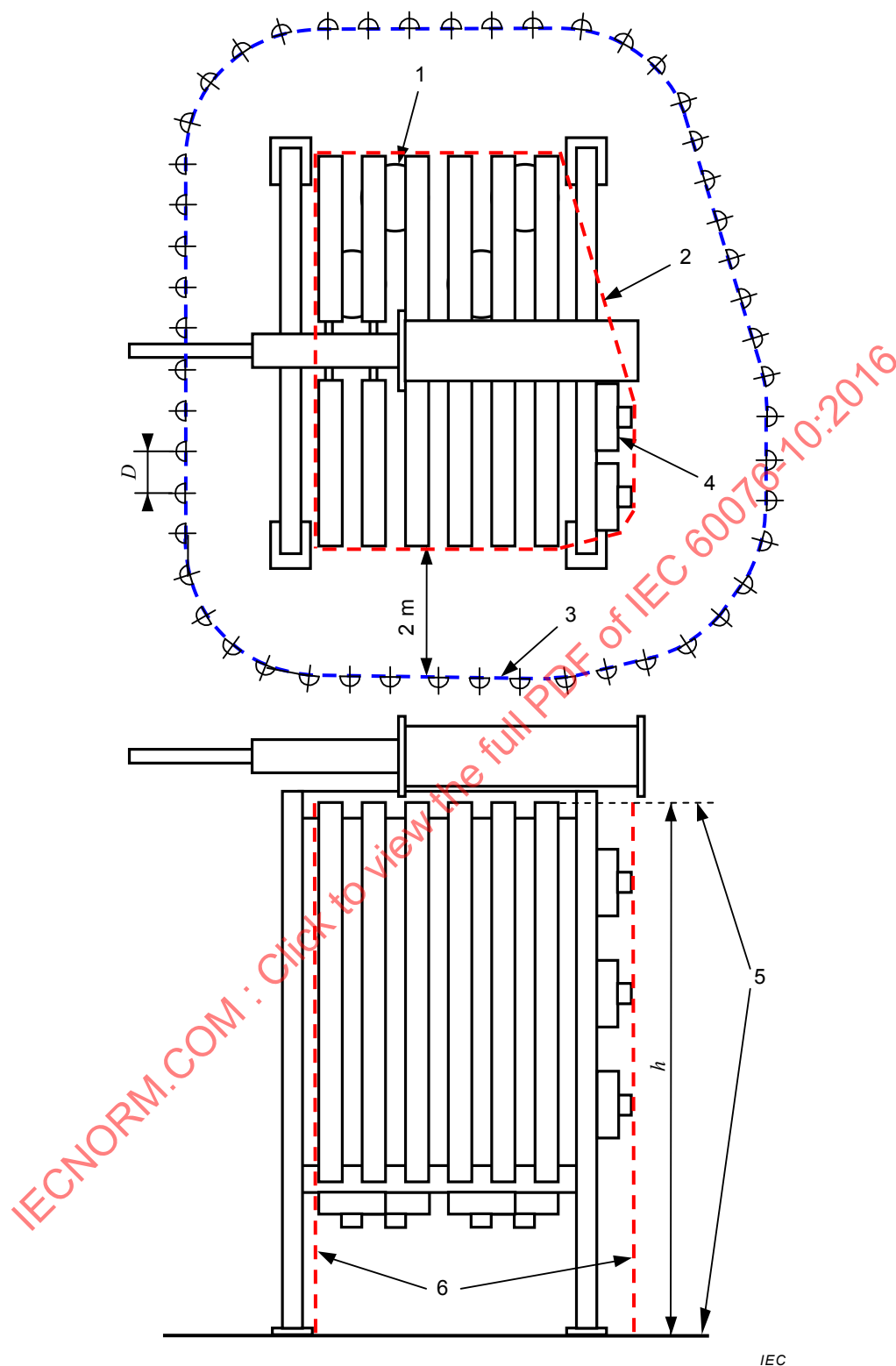
- | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|--|
| 1 Horizontal forced air cooling | 5 Cable box | 9 Vertical forced air cooling |
| 2 Natural air cooling | 6 Prescribed contour | D Microphone spacing (if applicable) |
| 3 Turret | 7 Principal radiating surface | h Height of the principal radiating surface; the larger of $h1$ and $h2$ |
| 4 Transformer tank | 8 On-load tap-changer | x Measurement distance |

Figure 2 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers having cooling devices mounted either directly on the tank or on a separate structure spaced < 3 m away from the principal radiating surface of the main tank

**Key**

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 Principal radiating surface | 5 Support structure such as wheels, pallets, transportation car |
| 2 Prescribed contour | D Microphone spacing (if applicable) |
| 3 Transformer tank | h Height of the principal radiating surface; the larger of h_1 and h_2 |
| 4 Forced air cooling | x Measurement distance |

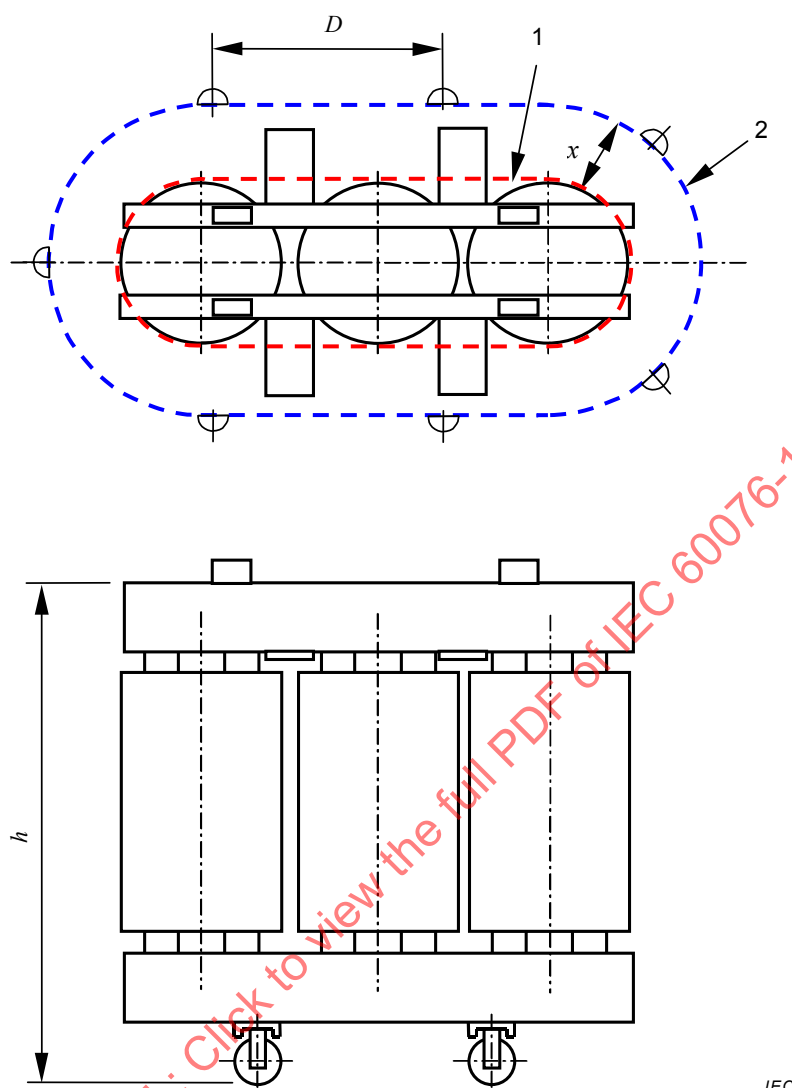
Figure 3 – Typical microphone path / positions for sound measurement on transformers having separate cooling devices spaced < 3 m away from the principal radiating surface of the main tank



Key

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1 Vertical forced air cooling | 5 Horizontal boundaries of principal radiating surface |
| 2 Principal radiating surface | 6 Vertical boundaries of principal radiating surface |
| 3 Prescribed contour | D Microphone spacing (if applicable) |
| 4 Horizontal forced air cooling | h Height of the principal radiating surface |

Figure 4 – Typical microphone path / positions for sound measurement on cooling devices mounted on a separate structure spaced ≥ 3 m away from the principal radiating surface of the transformer

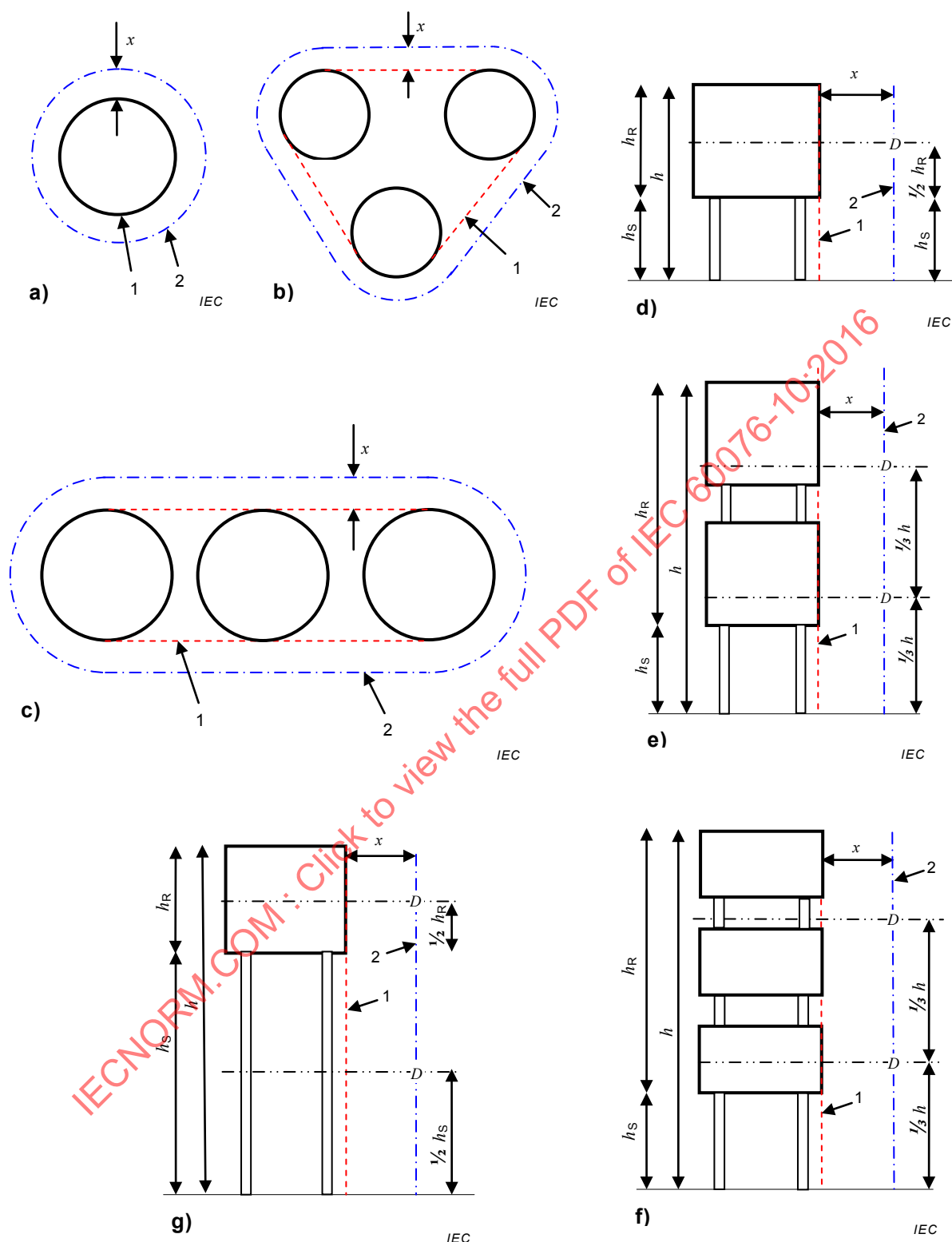


IEC

Key

- 1 Principal radiating surface
- 2 Prescribed contour
- h Height of core with framework
- D Microphone spacing (if applicable)
- x Measurement distance

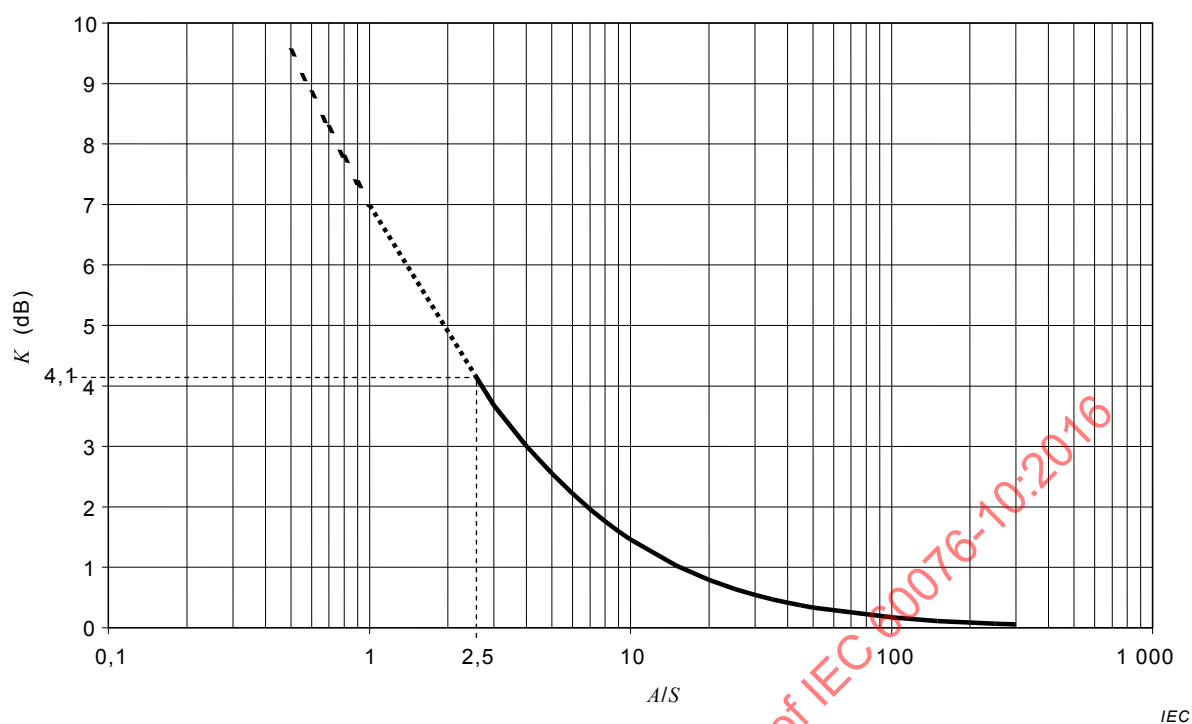
Figure 5 – Typical microphone positions for sound measurement on dry-type transformers without enclosures



Key

1	Principal radiating surface	h_S	Height of support structure
2	Prescribed contour	h_R	Height of coil or coil stack
D	Vertical microphone positions	h	Height of reactor – sum of h_R and h_S
x	Measurement distance		

Figure 6 – Principle radiating surface and prescribed contour of dry-type air-core reactors



$$K = 10 \times \lg \left(1 + \frac{4}{AIS} \right)$$

Figure 7 – Environmental correction, K

Annex A (informative)

Narrow-band and time-synchronous measurements

A.1 General considerations

Transformer sound is characterized by tones at double the power frequency and at even harmonics of the power frequency whereas cooling device sound is predominantly broadband in its nature.

To demonstrate and measure the tonal components either narrow-band or time-synchronous measurement techniques may be used.

NOTE Sound level measurements as per this standard do not evaluate tonality. This is strictly a matter when overall levels of noise are assessed at the receiver.

For time-synchronous measurements, frequency components in between the tones will be suppressed whereas this does not apply for narrow-band measurements.

In circumstances where background noise levels lead to invalid results according to criteria laid down in 11.2 and 11.3, narrow-band or time-synchronous measurements may offer a way to filter out unwanted signals. For narrow-band measurements tonal components shall be separated from the whole signal and summed up by post-processing whereas this is not necessary for time-synchronous measurements.

The effects of reflections described by the environmental correction K cannot be eliminated by either of the above techniques.

The choice of an alternative measurement method is subject to agreement between manufacturer and purchaser.

These methods are applicable for sound pressure and sound intensity measurements and can be used to calculate sound power levels.

A.2 Narrow-band measurement

A.2.1 General

Two narrow-band techniques are currently available, Fast Fourier Transform (FFT) based processing algorithms providing a constant bandwidth and digital filter based processing algorithms providing constant relative bandwidth ($1/n$ -octave) and both are acceptable.

The permitted variation of the excitation frequency will lead to shifts of the harmonic frequencies which may result in frequencies of interest falling out of preselected narrow bands (between narrow bands). If the above applies one can either increase the bandwidth or use post-processing techniques to account for this. For more information see IEC 60076-10-1:2016.

Narrow-band measurements can be used for all loading conditions described in this standard, provided all narrow bands present within the frequency range of the measurement are included in the summation to determine the final sound level.

Narrow-band measurements apply equally to both the walk-around procedure and the point-by-point procedure.

It is important to consider the frequency range of the measuring device since limited frequency range may eliminate required signals.

A.2.2 Post processing of narrow-band measurements to exclude background noise

High or non-steady-state background noise can be mitigated by the use of narrow-band techniques. For this purpose relevant tones only will be evaluated in the summation and in this case cooling devices should be out of service to take full advantage of the technique.

Where odd harmonics of excitation frequencies are present as mentioned in 4.2 and 11.1.2 the narrow band measurement shall not be used to mitigate their presence.

The total A-weighted sound pressure level can be calculated using Equation (24), where $L_1, L_2 \dots L_n$ are the measured A-weighted sound pressure levels of the bands, centred on frequencies $2 \times f \times v$. v is the sequence number of multiples of the even harmonics of the excitation frequency f running from 1 to n .

Corrections due to factor K apply as described in 11.2.5.

The total A-weighted sound intensity level can be calculated using Equations (25) and (26), where $L_1, L_2 \dots L_n$ are the measured A-weighted sound intensity levels of the bands, centred on frequencies $2 \times f \times v$. v is the sequence number of multiples of the even harmonics of the excitation frequency f running from 1 to n .

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 can contribute significantly to the total sound level. In this case, higher order frequency bands are to be included.

A.3 Time-synchronous averaging technique

Time-synchronous averaging is an averaging of digitized time records of the sound signal, the start of which is defined by a repetitive trigger signal.

This technique is intended to measure signals which are phase correlated to the trigger (usually the excitation voltage). Non-correlated signals will therefore be suppressed. Therefore, such techniques are suitable for measurement of transformer sound only. Sound emitted from cooling devices cannot be measured with such techniques.

NOTE 1 Background noise due to industrial sound sources can also be synchronous. A common example would be a test transformer which cannot be turned off. In these cases, the use of this method may not be entirely appropriate.

Time-synchronous measurements are only valid for the point-by-point procedure. This technique is strictly inappropriate for the walk-around procedure.

NOTE 2 The attenuation of the background noise depends on the number of averages, n , that are included in the measurement. The signal-to-noise ratio improvement in dB is given by $S/N = 10 \times \lg(n^{0.5})$.

Annex B (informative)

Typical report of sound level determination

B.1 Sound pressure method

Sound pressure method

Report No.: ABC-123

Sound level measurement

Transformer

Type:	
Purchaser:	Standard: IEC 60076-10:2016
Order No.:	Serial No.:
Rated power: 450 MVA	Rated frequency: 60 Hz
Engineer:	Date of test: 2015-04-15

Measuring instruments	Manufacturer	Type	Serial No.
Sound level meter	xyz	2815	25051971
Sound level calibrator	xyz	5432	990707
Software version		1.0	

- ☒ The equipment used has been laboratory calibrated in accordance with manufacturers recommendations and field calibrated before and after each measurement session

Application details:

- **sound pressure method**
- **walk-around procedure**
- **1/3 octave band**
- **environmental correction K based on the measured sound absorption area as per test certificate TAC 121-04, dated 28.10.2009**

Measurement reason: **Final Acceptance Test (FAT)**

Measurement location: **Test lab A**

☒ Sound power level L_{WA}							
☐ Sound pressure level $\overline{L_{pA}}$ at measuring distance							
☐ Sound pressure level $\overline{L_{pA}}$ at a specified distance (derived from sound power)							
Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	Distance [m] (not applicable for sound power level)	In operation		Sound level [dB(A)]	
				No. of fans	No. of pumps	Guaranteed	Calculated from measurements*
100	60	7				90	85
100	100	7		32	2	100	100

* See calculation on page 2

Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Calculations from measurements**

- ☒ Sound power level L_{WA}
- ☐ Sound pressure level L_{pA} at the measuring distance
- ☐ Sound pressure level L_{pA} at a specified distance (derived from sound power)

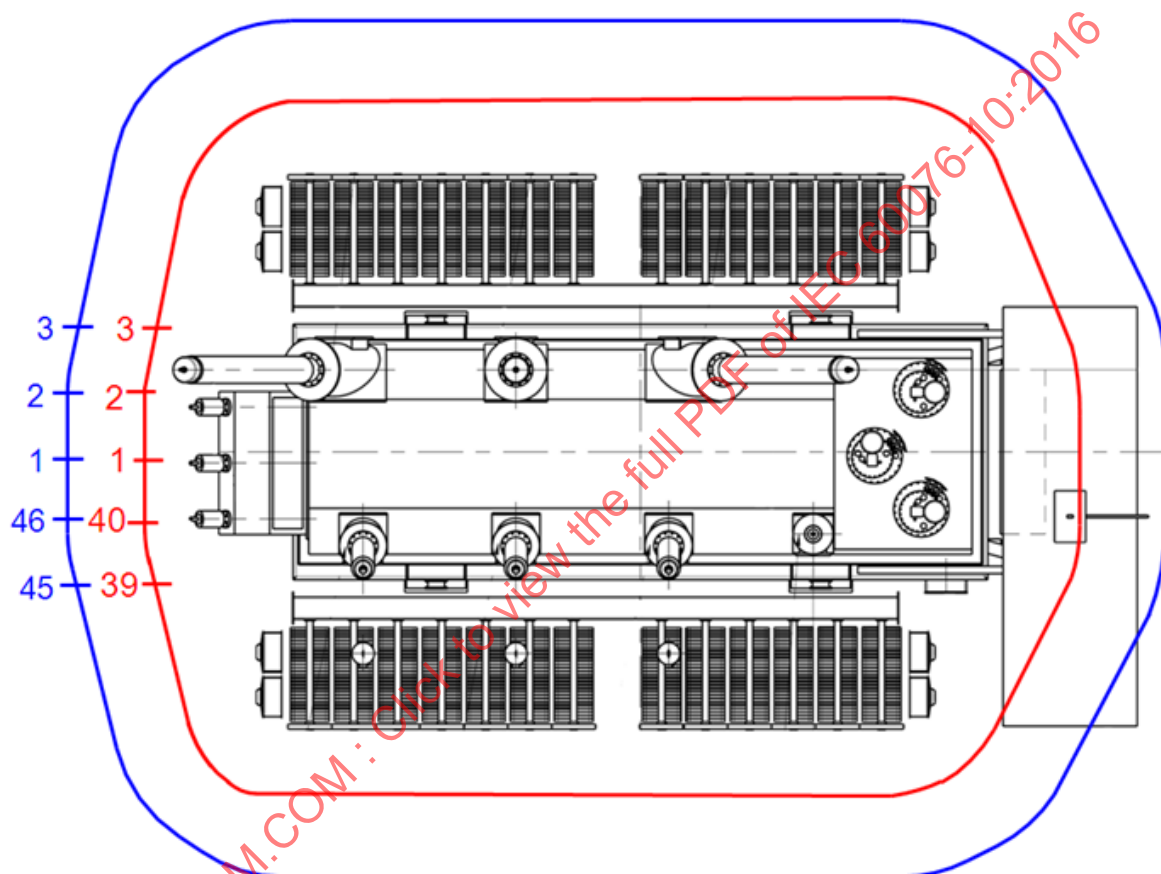
	No-load	Load	Cooling device	Final sound level (Sum of sound components)		No-load	Load	Cooling device	Final sound level (Sum of sound components)
Page ref.	5	6			Page ref.	5	7		
Rated voltage [%]	100			100	Rated voltage [%]	100			100
Rated current [%]		60		60	Rated current [%]		100		100
Tap position		7		7	Tap position		7		7
Fans in operation					Fans in operation		32		32
Pumps in operation					Pumps in operation		2		2
Distance [m]	n.a.	n.a.		n.a.	Distance [m]	n.a.	n.a.		n.a.
Frequency [Hz]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	Frequency [Hz]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level	78,9	84,1		85,2	Total sound level	78,9	100,1		100,1
Octave band	63				Octave band	63			
	125					125			
	250					250			
	500					500			
	1 000					1 000			
	2 000					2 000			
	4 000					4 000			
	8 000					8 000			
1 / 3 Octave band	50	52,8	47,3	53,9	1 / 3 Octave band	50	52,8	49,1	54,3
	63	56,7	51,9	58,0		63	56,7	55,4	59,1
	80	58,5	54,2	59,9		80	58,5	64,3	65,3
	100	57,6	68,3	68,6		100	57,6	79,4	79,4
	125	67,3	81,0	81,2		125	67,3	90,5	90,5
	160	60,8	60,8	63,9		160	60,8	79,7	79,8
	200	57,3	58,6	61,0		200	57,3	81,2	81,2
	250	66,6	71,4	72,6		250	66,6	85,0	85,1
	315	69,7	67,6	71,7		315	69,7	87,8	87,9
	400	73,5	69,2	74,9		400	73,5	89,7	89,8
	500	66,2	67,8	70,1		500	66,2	88,3	88,3
	630	67,1	66,6	69,9		630	67,1	88,4	88,4
	800	66,7	65,9	69,4		800	66,7	90,0	90,0
	1 000	68,5	0,0	68,5		1 000	68,5	89,9	89,9
	1 250	64,3	67,5	69,2		1 250	64,3	90,3	90,3
	1 600	66,2	71,2	72,4		1 600	66,2	89,2	89,2
	2 000	63,9	71,3	72,0		2 000	63,9	88,2	88,2
	2 500	64,5	68,4	69,9		2 500	64,5	85,8	85,8
	3 150	0,0	69,1	69,1		3 150	0,0	83,6	83,6
	4 000	0,0	0,0	3,0		4 000	0,0	80,4	80,4
	5 000	0,0	67,4	67,4		5 000	0,0	79,1	79,1
	6 300	0,0	69,7	69,7		6 300	0,0	78,5	78,5
	8 000	0,0	71,4	71,4		8 000	0,0	77,6	77,6
	10 000	0,0	68,2	68,2		10 000	0,0	73,9	73,9

Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Symbols and equations**

initial $\overline{L_{bgA}}$...	<i>average A-weighted background noise level before test measurement</i> $\overline{L_{bgA}} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right)$, applies to each frequency band $\overline{L_{bgA}^v}$	dB(A)
final $\overline{L_{bgA}}$...	<i>average A-weighted background noise level after test measurement</i> $\overline{L_{bgA}} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right)$, applies to each frequency band $\overline{L_{bgA}^v}$	dB(A)
$\overline{L_{pA0}}$...	<i>uncorrected average A-weighted sound pressure level</i> $\overline{L_{pA0}} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right)$, applies to each frequency band $\overline{L_{pA0}^v}$	dB(A)
$\overline{L_{pA}}$...	<i>corrected average A-weighted sound pressure level</i> $\overline{L_{pA}} = 10 \times \lg \left(10^{0,1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0,1\overline{L_{bgA}}} \right) - K$, applies to each frequency band $\overline{L_{pA}^v}$ $\overline{L_{bgA}}$ is the lower of the two average A-weighted background sound pressure levels	dB(A)
K ...	<i>environmental correction</i> $K = 10 \times \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right)$	dB
A ...	<i>sound absorbing area</i> $A = 0,16 \frac{V}{T}$	m ²
T ...	<i>reverberation time</i>	s
V ...	<i>volume of test room</i>	m ³
S ...	<i>area of measurement surface (surface area)</i> $S = (h + x)l_m$ h – height of principal radiating surface; x – measurement distance; l_m – length of prescribed contour	m ² m
L_S ...	<i>surface measure in dB</i> $L_S = 10 \times \lg \frac{S}{S_0}$	dB
L_{WA} ...	<i>A-weighted sound power level (calculation from corrected spatially averaged A-weighted sound pressure level $\overline{L_{pA}}$):</i> $L_{WA} = \overline{L_{pA}} + 10 \times \lg \frac{S}{S_0}$, applies to each frequency band $\overline{L_{WA}^v}$	dB(A)
L_{sum} ...	<i>logarithmic addition for sound levels</i> $L_{sum} = 10 \times \lg \left(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n} \right)$	dB(A)

Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Prescribed contours**

x Distance [m]	l_m Prescribed contour [m]	h Height [m]	S Surface area [m ²]	L_s Surface measure [dB]
1	40	5,9	276	24,4
2	46	5,9	363	25,6



Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Measurement 1**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
100					60	1	40	5,9	276	24,4

Measurement duration [s]: 155

Frequency		initial $\overline{L}_{bgA}$	final $\overline{L}_{bgA}$	initial $\overline{L}_{bgA}$ - final $\overline{L}_{bgA}$	$\overline{L}_{pA0}$	$\overline{L}_{pA0}$ - higher $\overline{L}_{bgA}$	A^*	K	$\overline{L}_{pA}$	L_{WA}
[Hz]		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[m ²]	[dB]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		50,9	53,0	-2,1	56,8	3,8			54,5	78,9
Octave band	63									
	125									
	250									
	500									
	1 000									
	2 000									
	4 000									
	8 000									
1 / 3 Octave band	50	26,2	24,4	1,8	31,3		2 000	1,9	28,4	52,8
	63	28,7	24,5	4,2	34,6		2 105	1,8	32,3	56,7
	80	30	26,2	3,8	36,3		2 216	1,8	34,1	58,5
	100	28,2	25,6	2,6	35,4		2 333	1,7	33,2	57,6
	125	28,6	29	-0,4	44,6		2 455	1,6	42,9	67,3
	160	29,8	32,2	-2,4	38,6		2 585	1,5	36,4	60,8
	200	31,8	32,7	-0,9	36,3		2 721	1,5	32,9	57,3
	250	32,4	34	-1,6	43,9		2 864	1,4	42,2	66,6
	315	32,9	36,7	-3,8	46,8		3 015	1,4	45,3	69,7
	400	33,3	38,1	-4,8	50,5		3 173	1,3	49,1	73,5
	500	36,6	39,4	-2,8	43,9		3 340	1,2	41,8	66,2
	630	39,3	42,5	-3,2	45,2		3 516	1,2	42,7	67,1
	800	40,7	44	-3,3	45,3		3 701	1,1	42,3	66,7
	1 000	41,5	45,1	-3,6	46,7		3 896	1,1	44,1	68,5
	1 250	41,2	43,3	-2,1	44,1		4 101	1,0	39,9	64,3
	1 600	39,7	43,1	-3,4	44,5		4 317	1,0	41,8	66,2
	2 000	39,2	39,4	-0,2	42,9		4 544	0,9	39,5	63,9
	2 500	41,4	36,8	4,6	42,4		4 783	0,9	40,1	64,5
	3 150	39,5	41,5	-2	38,8	-2,7	5 035	0,9	0,0	0,0
	4 000	36,9	42,9	-6	33,8	-9,1	5 300	0,8	0,0	0,0
	5 000	37,2	33,3	3,9	32,6	-4,6	5 431	0,8	0,0	0,0
	6 300	37	34,9	2,1	31,9	-5,1	5 579	0,8	0,0	0,0
	8 000	35,1	29,6	5,5	30,1	-5,0	5 873	0,7	0,0	0,0
	10 000	27,8	21,5	6,3	27,1	-0,7	6 182	0,7	0,0	0,0

* if there is only one value for the sound absorbing area available, this value applies to all frequencies

$\overline{L}_{pA0} - \text{higher } \overline{L}_{bgA}$	initial $\overline{L}_{bgA} - \text{final } \overline{L}_{bgA}$	Decision	^a Unless $\overline{L}_{pA0}$ meets the guarantee. Correction for background noise is not required in this case and the test is declared a pass
≥ 8 dB	-	Accept test	
< 8 dB	< 3 dB	Accept test	
< 8 dB	> 3 dB	Repeat test ^a	
< 3 dB	-	Repeat test ^a	

Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Measurement 2**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	60	7			60	1	40	5,9	276	24,4

Measurement duration [s]: 142

Frequency		initial $\overline{L}_{bgA}$	final $\overline{L}_{bgA}$	initial $\overline{L}_{bgA}$ - final $\overline{L}_{bgA}$	$\overline{L}_{pA0}$	$\overline{L}_{pA0}$ - higher $\overline{L}_{bgA}$	A^*	K	$\overline{L}_{pA}$	L_{WA}
[Hz]		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[m ²]	[dB]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		50,8	53,1	-2,3	61,5	8,4			59,7	84,1
Octave band	63									
	125									
	250									
	500									
	1 000									
	2 000									
	4 000									
	8 000									
1 / 3 Octave band	50	26,2	24,4	1,8	27,6		2 000	1,9	22,9	47,3
	63	28,7	24,5	4,2	30,6		2 105	1,8	27,5	51,9
	80	30	26,2	3,8	32,7		2 216	1,8	29,8	54,2
	100	28,2	25,6	2,6	45,6		2 333	1,7	43,9	68,3
	125	28,6	29	-0,4	58,2		2 455	1,6	56,6	81,0
	160	29,8	32,2	-2,4	38,6		2 585	1,5	36,4	60,8
	200	31,8	32,7	-0,9	37,2		2 721	1,5	34,2	58,6
	250	32,4	34	-1,6	48,5		2 864	1,4	47,0	71,4
	315	32,9	36,7	-3,8	44,8		3 015	1,4	43,2	67,6
	400	33,3	38,1	-4,8	46,3		3 173	1,3	44,8	69,2
	500	36,6	39,4	-2,8	45,3		3 340	1,2	43,4	67,8
	630	39,3	42,5	-3,2	44,8		3 516	1,2	42,2	66,6
	800	40,7	44	-3,3	44,8		3 701	1,1	41,5	65,9
	1 000	41,5	45,1	-3,6	43,6	-1,5	3 896	1,1	0,0	0,0
	1 250	41,2	43,3	-2,1	45,9		4 101	1,0	43,1	67,5
	1 600	39,7	43,1	-3,4	48,4		4 317	1,0	46,8	71,2
	2 000	39,2	39,4	-0,2	48,4		4 544	0,9	46,9	71,3
	2 500	41,4	36,8	4,6	45,5		4 783	0,9	44,0	68,4
	3 150	39,5	41,5	-2	46,5		5 035	0,9	44,7	69,1
	4 000	36,9	42,9	-6	42,1	-0,8	5300	0,8	0,0	0,0
	5 000	35	39,9	-4,9	44,3		5 431	0,8	43,0	67,4
	6 300	37	34,9	2,1	46,4		5 579	0,8	45,3	69,7
	8 000	35,1	29,6	5,5	47,8		5 873	0,7	47,0	71,4
	10 000	27,8	21,5	6,3	44,5		6 182	0,7	43,8	68,2

* If there is only one value for the sound absorbing area available, this value applies to all frequencies

$\overline{L}_{pA0} - \text{supérieure } \overline{L}_{bgA}$	initiale $\overline{L}_{bgA}$ - finale $\overline{L}_{bgA}$	Decision	^a Unless $\overline{L}_{pA0}$ meets the guarantee. Correction for background noise is not required in this case and the test is declared a pass
≥ 8 dB	-	Accept test	
< 8 dB	< 3 dB	Accept test	
< 8 dB	> 3 dB	Repeat test ^a	
< 3 dB	-	Repeat test ^a	

Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Measurement 3**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	100	7	32	2	60	2,0	46	5,9	363	25,6

Measurement duration [s]: 181

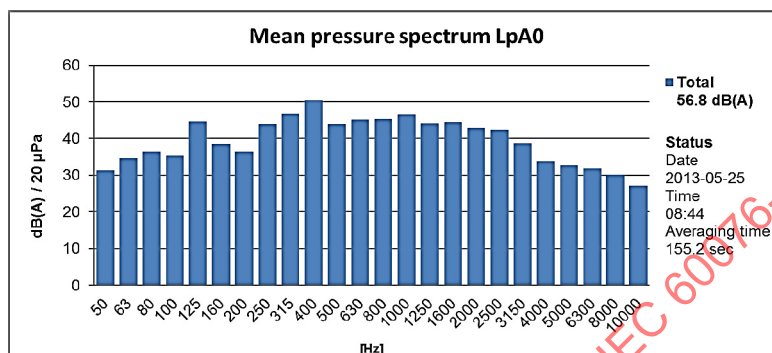
Frequency		initial $\overline{L}_{bgA}$	final $\overline{L}_{bgA}$	initial $\overline{L}_{bgA}$ - final $\overline{L}_{bgA}$	$\overline{L}_{pA0}$	$\overline{L}_{pA0}$ - higher $\overline{L}_{bgA}$	A^*	K	$\overline{L}_{pA}$	L_{WA}
[Hz]		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[m ²]	[dB]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		51,0	53,2	-2,2	76,0	22,8			74,5	100,1
Octave band	63									
	125									
	250									
	500									
	1000									
	2000									
	4000									
	8000									
1 / 3 Octave band	50	26,2	24,4	1,8	28,2		2 000	2,4	23,5	49,1
	63	28,7	24,5	4,2	32,8		2 105	2,3	29,8	55,4
	80	30	26,2	3,8	41		2 216	2,2	38,7	64,3
	100	28,2	25,6	2,6	55,9		2 333	2,1	53,8	79,4
	125	28,6	29	-0,4	66,9		2 455	2,0	64,9	90,5
	160	29,8	32,2	-2,4	56		2 585	1,9	54,1	79,7
	200	31,8	32,7	-0,9	57,5		2 721	1,9	55,6	81,2
	250	32,4	34	-1,6	61,2		2 864	1,8	59,4	85,0
	315	32,9	36,7	-3,8	63,9		3 015	1,7	62,2	87,8
	400	33,3	38,1	-4,8	65,7		3 173	1,6	64,1	89,7
	500	36,6	39,4	-2,8	64,3		3 340	1,6	62,7	88,3
	630	39,3	42,5	-3,2	64,3		3 516	1,5	62,8	88,4
	800	40,7	44	-3,3	65,9		3 701	1,4	64,4	90,0
	1 000	41,5	45,1	-3,6	65,7		3 896	1,4	64,3	89,9
	1 250	41,2	43,3	-2,1	66		4 101	1,3	64,7	90,3
	1 600	39,7	43,1	-3,4	64,9		4 317	1,3	63,6	89,2
	2 000	39,2	39,4	-0,2	63,8		4 544	1,2	62,6	88,2
	2 500	41,4	36,8	4,6	61,4		4 783	1,2	60,2	85,8
	3 150	39,5	41,5	-2	59,1		5 035	1,1	58,0	83,6
	4 000	36,9	42,9	-6	55,9		5 300	1,1	54,8	80,4
	5 000	38,2	41,5	-3,3	54,6		5 431	1,0	53,5	79,1
	6 300	37	34,9	2,1	54		5 579	1,0	52,9	78,5
	8 000	35,1	29,6	5,5	53		5 873	1,0	52,0	77,6
	10 000	27,8	21,5	6,3	49,2		6 182	0,9	48,3	73,9

* If there is only one value for the sound absorbing area available, this value applies to all frequencies

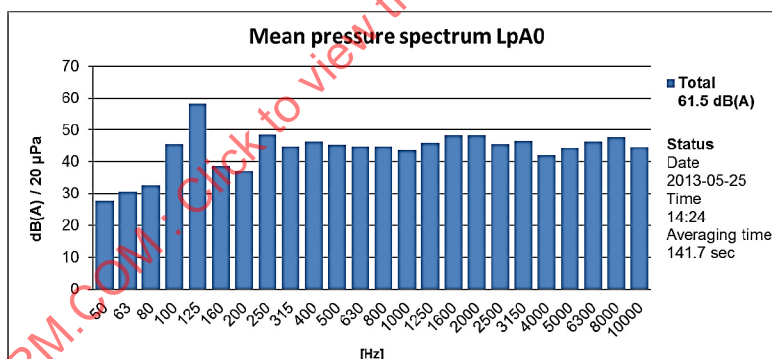
$\overline{L}_{pA0} - \text{supérieure } \overline{L}_{bgA}$	initiale $\overline{L}_{bgA}$ - finale $\overline{L}_{bgA}$	Decision	^a Unless $\overline{L}_{pA0}$ meets the guarantee. Correction for background noise is not required in this case and the test is declared a pass
≥ 8 dB	-	Accept test	
< 8 dB	< 3 dB	Accept test	
< 8 dB	> 3 dB	Repeat test ^a	
< 3 dB	-	Repeat test ^a	

Sound pressure method**Report No.: ABC-123****Measurement graphs****Measurement 1**

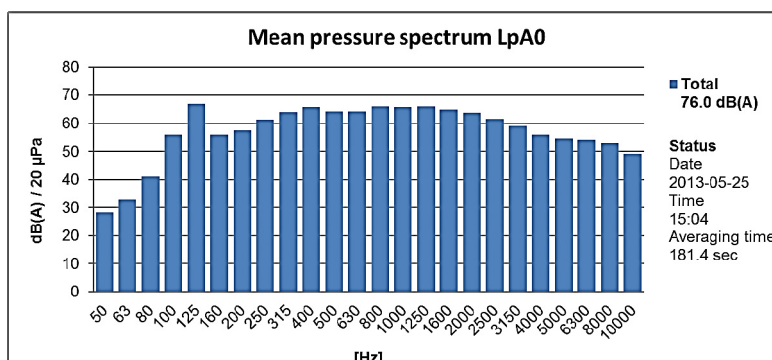
Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
100					60	1	40	5,9	276	24,4

**Measurement 2**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	60	7			60	1	40	5,9	276	24,4

**Measurement 3**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	100	7	32	2	60	2	46	5,9	363	25,6



B.2 Sound pressure method – Appendix for the point-by-point procedure

Sound pressure method

Report No.: ABC-123

Measurement 3

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	100	7	32	2	60	2,0	46	5,9	363	25,6

Average measurement duration per point [s]: 3

Path at 1/3 of test object height, Points 1-6 of 46

		Path 1/3 Point 01 / 46	Path 1/3 Point 02 / 46	Path 1/3 Point 03 / 46	Path 1/3 Point 04 / 46	Path 1/3 Point 05 / 46	Path 1/3 Point 06 / 46
Frequency		L_{pAi}	L_{pAi}	L_{pAi}	L_{pAi}	L_{pAi}	L_{pAi}
[Hz]		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level							
Octave band	63						
	125						
	250						
	500						
	1 000						
	2 000						
	4 000						
	8 000						
1 / 3 Octave band	50						
	63						
	80						
	100						
	125						
	160						
	200						
	250						
	315						
	400						
	500						
	630						
	800						
	1 000						
	1 250						
	1 600						
	2 000						
	2 500						
	3 150						
	4 000						
	5 000						
	6 300						
	8 000						
	10 000						

B.3 Sound intensity method**Sound intensity method****Report No.: DEF-456****Sound level measurement****Transformer****Type:****Purchaser:****Standard: IEC 60076-10:2016****Order No.:****Serial No.:****Rated Power: 670 MVA****Rated frequency: 50 Hz****Engineer:****Date of test: 2015-04-15**

Measuring Instruments	Manufacturer	Type	Serial No.
Sound level meter	xyz	9876	19031963
Sound level calibrator	xyz	5432	990707
Software version		1.3	
Spacer distance between microphones		50 mm	

☒ The equipment used has been laboratory calibrated in accordance with manufacturers recommendations and field calibrated before and after each measurement session

Application details:

- **sound intensity method**
- **walk-around procedure**
- **1/3 octave band**

Measurement reason: Final Acceptance Test (FAT)**Measurement location: Test lab B**☒ **Sound power level** L_{WA} ☐ **Sound intensity level** $\overline{L}_{IA}$ **at the measuring distance**☐ **Sound pressure level** $\overline{L}_{pA}$ **at a specified distance (derived from sound power)**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	Distance [m] (not applicable for sound power level)	In operation		Sound level [dB(A)]	
				No. of fans	No. of pumps	Guaranteed	Calculated from measurements*
100				0		87	87
100	100	1		24		92	91

* See calculation on Page 2

Sound intensity method

Report No.: DEF-456

Calculations from measurements

☒ Sound power level L_{WA}

☐ Sound intensity level $\overline{L}_{IA}$

☐ Sound pressure level $\overline{L}_{pA}$

derived from sound intensity level $\overline{L}_{IA}$

		No-load	Load	Cooling device	Final sound level (Sum of components)			No-load	Load	Cooling device	Final sound level (Sum of components)
Page ref.		5				Page ref.		5	6	7	
Rated voltage [%]		100			100	Rated voltage [%]		100			100
Rated current [%]						Rated current [%]			100		100
Tap position						Tap position			1		1
Fans in operation		0			0	Fans in operation		0	0	24	24
Pumps in operation						Pumps in operation					
Distance [m]		n.a.			n.a.	Distance [m]		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Frequency [Hz]		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	Frequency [Hz]		[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		87,2			87,2	Total sound level		87,2	87,0	85,0	91,3
Octave band	63					Octave band	63				
	125						125				
	250						250				
	500						500				
	1 000						1 000				
	2 000						2 000				
	4 000						4 000				
	8 000						8 000				
1 / 3 Octave band	50	0			0	1 / 3 Octave band	50	0	41,5	41,7	44,6
	63	0			0		63	0	73,7	51,8	73,7
	80	60.0			60.0		80	60.0	0	61,6	63,9
	100	74,6			74,6		100	74,6	85,3	63,0	86,0
	125	57,7			57,7		125	57,7	62,3	64,8	67,0
	160	63,1			63,1		160	63,1	66,0	66,1	70,2
	200	75,3			75,3		200	75,3	80,2	71,9	82,7
	250	68,4			68,4		250	68,4	66,9	73,3	75,2
	315	85,1			85,1		315	85,1	71,8	75,7	84,7
	400	77,9			77,9		400	77,9	66,3	75,3	80,3
	500	73,8			73,8		500	73,8	64,4	74,8	77,4
	630	69,6			69,6		630	69,6	57,6	74,7	75,4
	800	63,4			63,4		800	63,4	53,4	74,2	74,5
	1 000	62,7			62,7		1 000	62,7	53,5	73,3	73,5
	1 250	64,4			64,4		1 250	64,4	50,5	73,7	73,9
	1 600	0			0		1 600	0	0	72,6	72,6
	2 000	0			0		2 000	0	0	72,5	72,5
	2 500	67.0			67.0		2 500	67.0	44,8	70,8	70,9
	3 150	0			0		3 150	0	46,4	69,5	69,5
	4 000	64,9			64,9		4 000	64,9	40,0	66,1	66,3
	5 000	61,5			61,5		5 000	61,5	42,2	61,9	62,1
	6 300	56,8			56,8		6 300	56,8	39,1	57,4	58,0
	8 000	61,1			61,1		8 000	61,1	36,6	51,5	52,6
	10 000	51,8			51,8		10 000	51,8	35,6	54,4	54,6

Sound intensity method**Report No.: DEF-456****Symbols and equations**

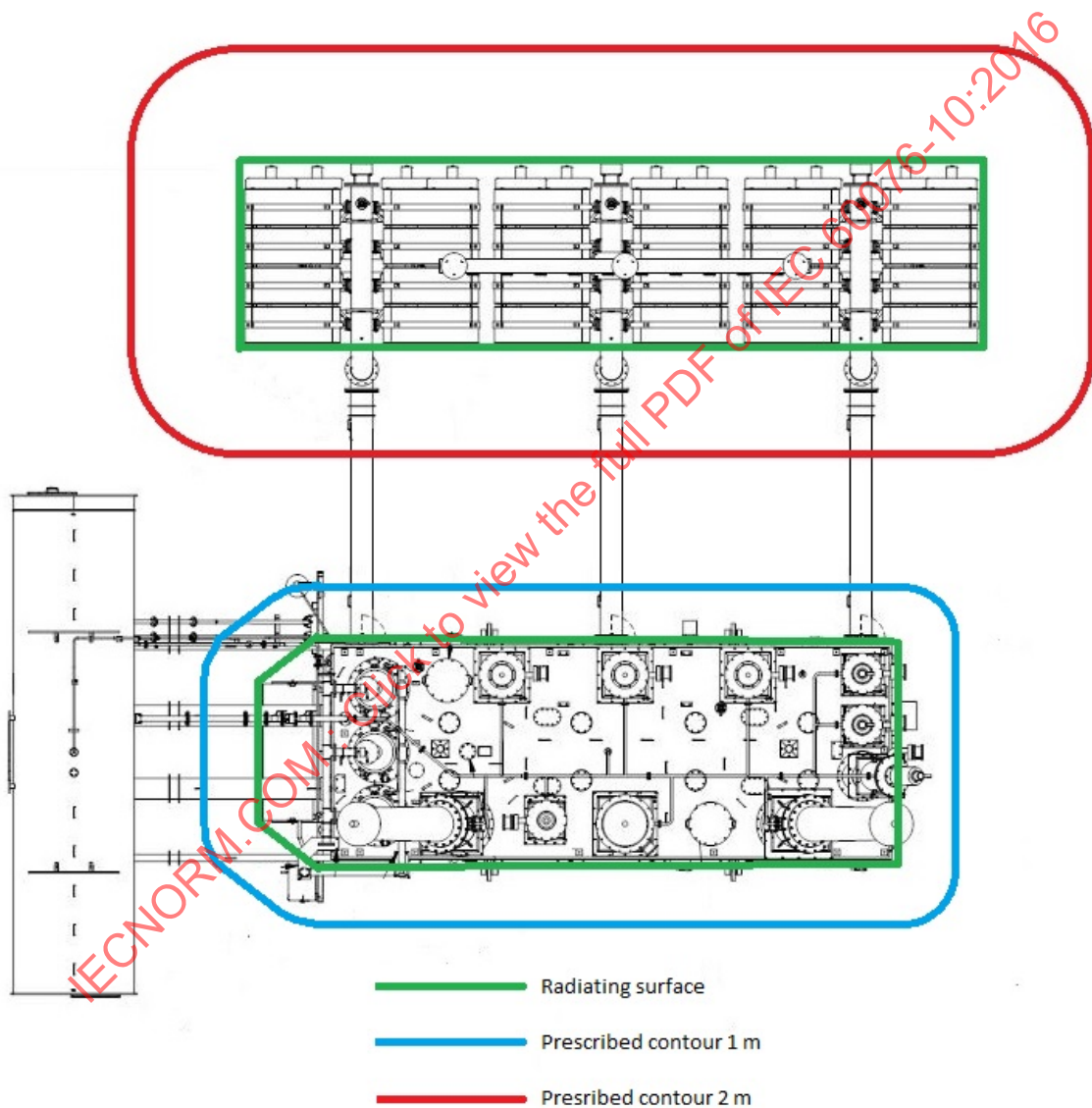
$\overline{L_{pA0}}$	...	$\overline{L_{pA0}} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right)$, applies to each frequency band	$\overline{L_{pA0}^v}$	dB(A)
$\overline{L_{IA0}}$	...	$\overline{L_{IA0}} = 10 \times \lg \left \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Diri} \times 10^{0,1L_{IAi}} \right $, applies to each frequency band	$\overline{L_{IA0}^v}$	dB(A)
F_{Diri}	...	direction flag of the individual sound level i		
$\overline{F_{Dir}}$	...	direction flag indicating the net energy flow		
	...	$\overline{F_{Dir}} = \text{Sign} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Diri} \times 10^{0,1L_{IAi}} \right)$, applies to each frequency band	$\overline{F_{Dir}^v}$	
ΔL	...	pressure-intensity index $\Delta L = \overline{L_{pA0}} - \overline{L_{IA0}}$, applies to the total sound level only		dB(A)
$\overline{L_{IA}}$		corrected average A-weighted normal sound intensity level $\overline{L_{IA}} = \overline{L_{IA0}}$ if $\Delta L \leq 4$ dB $\overline{L_{IA}} = \overline{L_{pA0}} - 4$ dB if 4 dB $< \Delta L \leq 8$ dB If $\Delta L > 8$ dB, the measurement is declared invalid.		dB(A)
S	...	area of measurement surface (surface area) $S = (h + x) l_m$ h – height of principal radiating surface; x – measurement distance; l_m – length of prescribed contour		m ² m
L_S	...	surface measure in dB $L_S = 10 \times \lg \frac{S}{S_0}$		dB
L_{WA}	...	A-weighted sound power level (calculated from corrected spatially averaged A-weighted normal sound intensity level $\overline{L_{IA}}$) $L_{WA} = \overline{L_{IA}} + 10 \times \lg \frac{S}{S_0}$, applies to each frequency band	$\overline{L_{WA}^v}$	dB(A)
L_{sum}	...	logarithmic addition for sound levels $L_{sum} = 10 \times \lg (10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n})$ logarithmic addition for sound levels with a direction flag $L_{sum} = 10 \times \lg F_{Dir1} \times 10^{0,1L_1} + F_{Dir2} \times 10^{0,1L_2} + \dots + F_{Dirn} \times 10^{0,1L_n} $		dB(A)
F_{Dirsum}	...	direction flag of L_{sum} $F_{Dirsum} = \text{Sign} (F_{Dir1} \times 10^{0,1L_1} + F_{Dir2} \times 10^{0,1L_2} + \dots + F_{Dirn} \times 10^{0,1L_n})$		

Sound intensity method

Report No.: DEF-456

Prescribed contours

x Distance [m]	l_m Prescribed contour [m]	h Height [m]	S Surface area [m ²]	L_s Surface measure [dB]
1	30	4,6	168	22,2
2	43	6,1	348	25,4



Sound intensity method**Report No.: DEF-456****Measurement 1**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
100			0		50	1	30	4,6	168	22,2

Measurement duration [s]:115

Frequency		$\overline{L}_{IA0}$		$\overline{L}_{pA0}$	$\Delta L = \overline{L}_{pA0} - \overline{L}_{IA0}$	Pressure intensity correction as per case A or case B	$\overline{L}_{IA}$	L_{WA}
[Hz]		[dB(A)]	$\overline{F}_{Dir}$	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		64,5	1	69,0	4,5	B	65,0	87,2
Octave band	63							
	125							
	250							
	500							
	1 000							
	2 000							
	4 000							
	8 000							
1 / 3 Octave band	50	11,9	-1	27,1	15,2	B	0	0
	63	13,0	-1	25,7	12,7	B	0	0
	80	36,1	1	41,8	5,7	B	37,8	60,0
	100	55,1	1	56,4	1,3	B	52,4	74,6
	125	32,7	1	39,5	6,8	B	35,5	57,7
	160	41,8	1	44,9	3,1	B	40,9	63,1
	200	56,1	1	57,1	1,0	B	53,1	75,3
	250	46,1	1	50,2	4,1	B	46,2	68,4
	315	61,7	1	66,9	5,2	B	62,9	85,1
	400	56,2	1	59,7	3,5	B	55,7	77,9
	500	51,2	1	55,6	4,4	B	51,6	73,8
	630	44,2	1	51,4	7,2	B	47,4	69,6
	800	39,1	1	45,2	6,1	B	41,2	63,4
	1 000	36,5	1	44,5	8,0	B	40,5	62,7
	1 250	37,5	1	46,2	8,7	B	42,2	64,4
	1 600	41,8	-1	48,0	6,2	B	0	0
	2 000	34,4	-1	51,1	16,7	B	0	0
	2 500	29,9	1	48,8	18,9	B	44,8	67,0
	3 150	33,3	-1	47,7	14,4	B	0	0
	4 000	30,7	1	46,7	16,0	B	42,7	64,9
	5 000	25,9	1	43,3	17,4	B	39,3	61,5
	6 300	26,4	1	38,6	12,2	B	34,6	56,8
	8 000	23,5	1	42,9	19,4	B	38,9	61,1
	10 000	17,5	1	33,6	16,1	B	29,6	51,8

$\overline{L}_{IA}$ and L_{WA} are not reported for frequency bands with $\overline{F}_{Dir} = -1$.

Case **A**: Applies, if the total P-I index is $\Delta L \leq 4$ dB. Then it follows $\overline{L}_{IA} = \overline{L}_{IA0}$ for both the total sound level and sound levels of the individual frequency bands.

Case **B**: Applies, if the total P-I index is $4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8$ dB. Then it follows $\overline{L}_{IA} = \overline{L}_{pA0} - 4 \text{ dB}$ for both the total sound level and sound levels of the individual frequency bands.

Sound intensity method**Report No.: DEF-456****Measurement 2**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	100	1	0		50	1	30	4,6	168	22,2

Measurement duration [s]: 104

Frequency		$\overline{L}_{IA0}$		$\overline{L}_{pA0}$	$\Delta L = \overline{L}_{pA0} - \overline{L}_{IA0}$	Pressure intensity correction as per case A or case B	$\overline{L}_{IA}$	L_{WA}
[Hz]		[dB(A)]	$\overline{F}_{Dir}$	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		64,8	1	67,2	2,4	A	64,8	87,0
Octave band	63							
	125							
	250							
	500							
	1 000							
	2 000							
	4 000							
	8 000							
1 / 3 Octave band	50	19,3	1	28,7	9,4	A	19,3	41,5
	63	51,5	1	54,2	2,7	A	51,5	73,7
	80	10,6	-1	25,5	14,9	A	0	0
	100	63,1	1	65,4	2,3	A	63,1	85,3
	125	40,1	1	41,8	1,7	A	40,1	62,3
	160	43,8	1	46,4	2,6	A	43,8	66,0
	200	58,0	1	60,1	2,1	A	58,0	80,2
	250	44,7	1	48,1	3,4	A	44,7	66,9
	315	49,6	1	52,2	2,6	A	49,6	71,8
	400	44,1	1	48,9	4,8	A	44,1	66,3
	500	42,2	1	46,5	4,3	A	42,2	64,4
	630	35,4	1	43,1	7,7	A	35,4	57,6
	800	31,2	1	40,8	9,6	A	31,2	53,4
	1 000	31,3	1	42,1	10,8	A	31,3	53,5
	1 250	28,3	1	40,5	12,2	A	28,3	50,5
	1 600	25,6	-1	39,7	14,1	A	0	0
	2 000	27,7	-1	38,5	10,8	A	0	0
	2 500	22,6	1	39,8	17,2	A	22,6	44,8
	3 150	24,2	1	41,4	17,2	A	24,2	46,4
	4 000	17,8	1	37,6	19,8	A	17,8	40,0
	5 000	20,0	1	38,1	18,1	A	20,0	42,2
	6 300	16,9	1	40,1	23,2	A	16,9	39,1
	8 000	14,4	1	36,2	21,8	A	14,4	36,6
	10 000	13,4	1	35,6	22,2	A	13,4	35,6

$\overline{L}_{IA}$ and L_{WA} are not reported for frequency bands with $\overline{F}_{Dir} = -1$.

Case **A**: Applies, if the total P-I index is $\Delta L \leq 4$ dB. Then it follows $\overline{L}_{IA} = \overline{L}_{IA0}$ for both the total sound level and sound levels of the individual frequency bands.

Case **B**: Applies, if the total P-I index is $4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8$ dB. Then it follows $\overline{L}_{IA} = \overline{L}_{pA0} - 4 \text{ dB}$ for both the total sound level and sound levels of the individual frequency bands.

Sound intensity method**Report No.: DEF-456****Measurement 3**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
			24		50	2	43	6,1	348	25,4

Measurement duration [s]: 149

Frequency		$\overline{L}_{IA0}$		$\overline{L}_{pA0}$	$\Delta L = \overline{L}_{pA0} - \overline{L}_{IA0}$	Pressure intensity correction as per case A or case B	$\overline{L}_{IA}$	L_{WA}
[Hz]		[dB(A)]	$\overline{F}_{Dir}$	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]	[dB(A)]
Total sound level		59,6	1	63,0	3,4	A	59,6	85,0
Octave band	63							
	125							
	250							
	500							
	1 000							
	2 000							
	4 000							
	8 000							
1 / 3 Octave band	50	16,3	1	28,8	12,5	A	16,3	41,7
	63	26,4	1	34,1	7,7	A	26,4	51,8
	80	36,2	1	40,5	4,3	A	36,2	61,6
	100	37,6	1	43,3	5,7	A	37,6	63,0
	125	39,4	1	42,8	3,4	A	39,4	64,8
	160	40,7	1	43,4	2,7	A	40,7	66,1
	200	46,5	1	49,2	2,7	A	46,5	71,9
	250	47,9	1	50,7	2,8	A	47,9	73,3
	315	50,3	1	53,5	3,2	A	50,3	75,7
	400	49,9	1	52,7	2,8	A	49,9	75,3
	500	49,4	1	52,6	3,2	A	49,4	74,8
	630	49,3	1	52,8	3,5	A	49,3	74,7
	800	48,8	1	52,3	3,5	A	48,8	74,2
	1 000	47,9	1	51,5	3,6	A	47,9	73,3
	1 250	48,3	1	51,9	3,6	A	48,3	73,7
	1 600	47,2	1	51,0	3,8	A	47,2	72,6
	2 000	47,1	1	50,7	3,6	A	47,1	72,5
	2 500	45,4	1	48,8	3,4	A	45,4	70,8
	3 150	44,1	1	47,9	3,8	A	44,1	69,5
	4 000	40,7	1	44,2	3,5	A	40,7	66,1
	5 000	36,5	1	41,8	5,3	A	36,5	61,9
	6 300	32,0	1	41,2	9,2	A	32,0	57,4
	8 000	26,1	1	36,6	10,5	A	26,1	51,5
	10 000	29,0	1	38,4	9,4	A	29,0	54,4

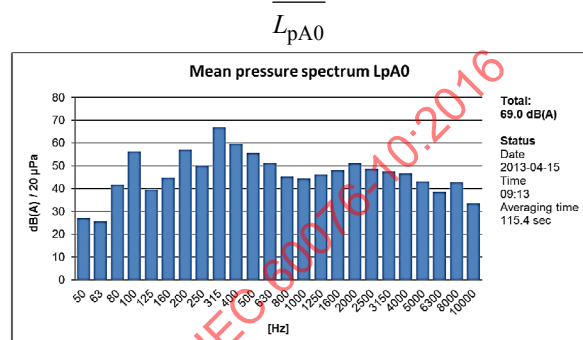
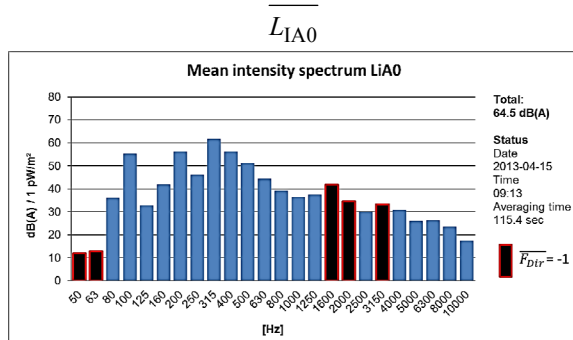
$\overline{L}_{IA}$ and L_{WA} are not reported for frequency bands with $\overline{F}_{Dir} = -1$.

Case **A**: Applies, if the total P-I index is $\Delta L \leq 4$ dB. Then it follows $\overline{L}_{IA} = \overline{L}_{IA0}$ for both the total sound level and sound levels of the individual frequency bands.

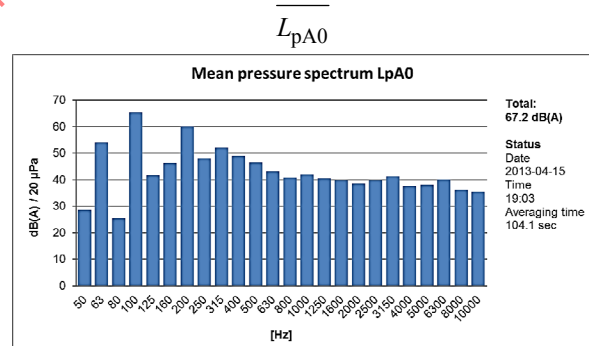
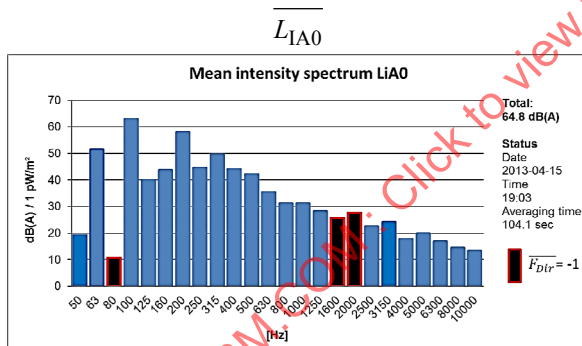
Case **B**: Applies, if the total P-I index is $4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8$ dB. Then it follows $\overline{L}_{IA} = \overline{L}_{pA0} - 4 \text{ dB}$ for both the total sound level and sound levels of the individual frequency bands.

Sound intensity method**Report No.: DEF-456****Measurement graphs****Measurement 1**

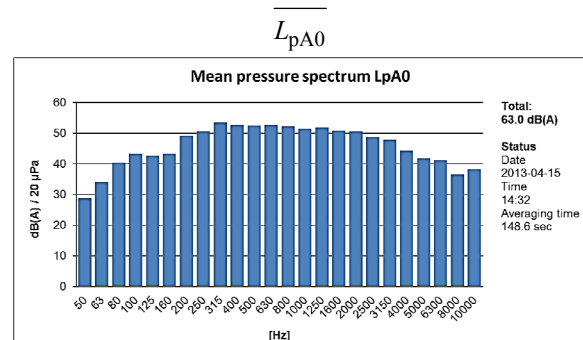
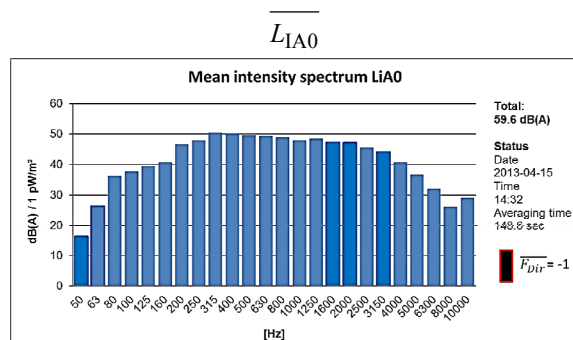
Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
100			0		50	1	30	4,6	168	22,2

**Measurement 2**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
	100	1	0		50	1	30	4,6	168	22,2

**Measurement 3**

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
			24		50	2	43	6,1	348	25,4



B.4 Sound intensity method – Appendix for the point-by-point procedure

Sound intensity method

Report No.: DEF-456

Measurement 1

Rated voltage [%]	Rated current [%]	Tap position	In operation		Excitation frequency [Hz]	Distance [m]	Prescribed contour [m]	Height [m]	Surface area [m ²]	Surface measure [dB]
			Fans	Pumps						
100			0		50	1	30	4,6	168	22,2

Average measurement duration per point [sec.]: 3

Path at 1/3 of test object height, Points 01-05 of 30

[illegible]

Bibliography

IEC 60076-6, *Power transformers – Part 6: Reactors*

IEC 60076-11, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

IEC 60076-10-1:2016, *Power transformers – Part 10-1: Determination of sound levels – Application guide*

IEC 61378 (all parts), *Convertor transformers*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-10:2016

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-10:2016

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	64
INTRODUCTION.....	66
1 Domaine d'application.....	68
2 Références normatives	68
3 Termes et définitions	69
4 Puissance acoustique pour différentes conditions de charge.....	72
4.1 Généralités	72
4.2 Puissance acoustique sous tension à vide	72
4.3 Puissance acoustique du ou des dispositifs de refroidissement	72
4.4 Puissance acoustique due au courant de charge.....	73
5 Spécification des mesures du niveau de bruit.....	74
6 Instrumentation, étalonnage et précision	76
7 Surface de rayonnement principale	77
7.1 Généralités	77
7.2 Transformateurs avec ou sans dispositif de refroidissement.....	77
7.3 Transformateurs situés dans des enveloppes avec dispositifs de refroidissement à l'intérieur de l'enveloppe	77
7.4 Transformateurs situés dans des enveloppes avec dispositifs de refroidissement à l'extérieur de l'enveloppe.....	77
7.5 Dispositifs de refroidissement montés sur une structure séparée, la distance entre les deux surfaces de rayonnement principales étant ≥ 3 m	78
7.6 Transformateurs de type sec	78
7.7 Bobines d'inductance sans fer de type sec.....	78
8 Contour prescrit.....	79
9 Positions de microphone.....	80
10 Calcul de la superficie de mesure	80
10.1 Superficie de mesure pour des distances de mesure allant jusqu'à 30 m	80
10.2 Superficie de mesure pour des distances de mesure supérieures à 30 m.....	81
11 Mesure acoustique	81
11.1 Conditions d'essai	81
11.1.1 Positionnement de l'objet en essai.....	81
11.1.2 Options d'alimentation pour les essais.....	82
11.1.3 Informations sur l'application des essais.....	82
11.1.4 Conditions ambiantes dominantes	82
11.2 Méthode de pression acoustique	82
11.2.1 Généralités	82
11.2.2 Procédure d'essai	83
11.2.3 Calcul du niveau de pression acoustique moyenné spatialement.....	83
11.2.4 Validation des mesures d'essai par rapport au bruit de fond.....	84
11.2.5 Calcul de la correction environnementale K	85
11.2.6 Correction finale pour le bruit de fond d'état permanent et l'environnement d'essai	87
11.3 Méthode d'intensité acoustique.....	88
11.3.1 Généralités	88
11.3.2 Procédure d'essai	88

11.3.3	Calcul de l'intensité acoustique normale moyenne et du niveau de pression acoustique moyen	89
11.3.4	Validation des mesures	89
11.3.5	Correction finale basée sur l'indice P-I et sur l'indicateur de direction	90
12	Détermination du niveau de puissance acoustique par calcul	90
13	Addition et soustraction logarithmiques des niveaux de bruit individuels	91
14	Calculs de champ lointain pour les distances supérieures à 30 m	92
15	Présentation des résultats	92
Annexe A (informative) Mesures de bande étroite et mesures synchrones		102
A.1	Considérations générales	102
A.2	Mesure de bande étroite	102
A.2.1	Généralités	102
A.2.2	Post-traitement des mesures de bande étroite pour exclure le bruit de fond	103
A.3	Technique de moyenne synchrone	103
Annexe B (informative) Rapport type de la détermination du niveau de bruit		104
B.1	Méthode de pression acoustique	104
B.2	Méthode de pression acoustique – Annexe concernant la procédure point par point	113
B.3	Méthode d'intensité acoustique	114
B.4	Méthode d'intensité acoustique – Annexe concernant la procédure point par point	123
Bibliographie		124
Figure 1 – Trajet / positions de microphone types pour la mesure acoustique sur les transformateurs, à l'exclusion des dispositifs de refroidissement		95
Figure 2 – Trajet / positions de microphone types pour la mesure acoustique sur les transformateurs ayant des dispositifs de refroidissement montés soit directement sur la cuve, soit sur une structure séparée espacée d'une distance < 3 m de la surface de rayonnement principale de la cuve		96
Figure 3 – Trajet / positions de microphone types pour la mesure acoustique sur les transformateurs ayant des dispositifs de refroidissement séparés, espacés d'une distance < 3 m de la surface de rayonnement principale de la cuve principale		97
Figure 4 – Trajet / positions de microphone type pour la mesure acoustique sur des dispositifs de refroidissement montés sur une structure séparée espacée d'une distance de ≥ 3 m de la surface de rayonnement principale du transformateur		98
Figure 5 – Positions de microphone types pour la mesure acoustique sur des transformateurs de type sec sans enveloppes		99
Figure 6 – Surface de rayonnement principale et contour prescrit des bobines d'inductance dans l'air de type sec		100
Figure 7 – Correction environnementale, K		101
Tableau 1 – Critères d'acceptation d'essai		85
Tableau 2 – Valeurs approximatives du facteur d'absorption acoustique moyen		86

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 10: Détermination des niveaux de bruit

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 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 2001. Cette édition constitue une révision technique.

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

- introduction de définitions utiles supplémentaires;
- introduction d'une définition des transformateurs de distribution pour les besoins de la présente norme;
- introduction d'un nouvel article relatif à la spécification des mesures du niveau de bruit;

- introduction d'une exigence relative aux mesures de la bande de 1/3 d'octave concernant les transformateurs autres que les transformateurs de distribution;
- modification de la distance de mesure normalisée qui passe de 0,3 m à 1 m pour les transformateurs autres que les transformateurs de distribution;
- la hauteur de la surface de mesure est désormais clairement définie à partir du plan réfléchissant;
- unification de la formule relative à la surface de mesure;
- introduction de critères de correction concernant la méthode d'intensité;
- introduction de règles relatives aux mesures du son sur des bobines d'inductance de type sec;
- révision des figures;
- introduction de nouveaux modèles de rapport d'essai informatifs (Annexe B);
- révision de l'IEC 60076-10-1 (guide d'application) en parallèle et ajout d'informations utiles relatives à l'utilisation de la présente norme.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/846/FDIS	14/849/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.

INTRODUCTION

L'un des nombreux paramètres pris en considération lors de la spécification, de la conception et de l'implantation des transformateurs, des bobines d'inductance et de leurs dispositifs de refroidissement associés est le niveau de bruit que le matériel est susceptible d'émettre dans des conditions de service définies. La présente partie de l'IEC 60076 donne les bases permettant de spécifier et mesurer les niveaux de bruit.

La présente norme décrit selon une séquence logique les conditions de charge, et la façon de procéder pour spécifier et effectuer les essais, ainsi que pour évaluer et rapporter les niveaux de bruit concernant l'équipement soumis à essai. Une nouvelle section concernant la spécification du niveau de bruit a été introduite à l'Article 5.

La définition des "transformateurs de distribution" a été introduite pour répondre aux besoins de la présente norme. Ceci reflète le besoin de l'industrie de conserver des mesures acoustiques plus simples et plus rapides pour cette catégorie de transformateurs.

La nouvelle exigence de mesure de la bande spectrale par 1/3 d'octave pour tous les niveaux de bruit (y compris le bruit de fond) sur des unités à installer dans des sous-stations reflète les conditions plus rigoureuses imposées à l'acheteur par les autorités de régulation, ainsi que les fonctionnalités améliorées de l'instrumentation moderne.

Lorsque la méthode d'intensité sonore a été introduite dans la présente norme, seule une expérience limitée était disponible. Au cours des années suivantes, l'utilisation de la présente norme a permis d'augmenter considérablement les niveaux d'expérience et a rendu évidentes les modifications nécessaires. L'équivalence des méthodes de mesure en pression et en intensité a été démontrée avec un certain nombre de limitations dues aux conditions d'essais.

L'introduction de nouveaux critères de validation pour la méthode de mesure en intensité est une reconnaissance de ces limitations. L'écart admissible pression – intensité ΔL reste de 8 dB, cependant la différence entre le niveau de pression acoustique mesuré et le niveau d'intensité acoustique indiqué est limitée à 4 dB.

Pour la méthode de mesure en pression, la procédure de correction pour les réflexions a été améliorée en recommandant l'application de valeurs K dépendantes de la fréquence, obtenues par la mesure de la durée de réverbération de l'installation d'essai. Pour les cas où K est déduit des facteurs d'absorption, la table des facteurs d'absorption moyens a été rationalisée pour représenter les surfaces susceptibles d'être présentes dans l'environnement de travail.

La procédure d'inspection en continu et la procédure point par point sont tout autant applicables. La procédure de mesure en continu traduit l'évolution des pratiques de travail, ce qui permet d'effectuer des mesures plus rapidement essentiellement sur des unités de grande taille. Pour les transformateurs de distribution et dans des situations particulières (santé et sécurité), la procédure point par point est plus adaptée.

Pour atténuer les effets des champs proches, la distance de mesure préférentielle est fixée à 1 m, à l'exception des transformateurs de distribution, des petites installations d'essai, ou des situations où le rapport signal sur bruit est faible, et dans les cas engageant la santé ou la sécurité où la distance est maintenue à 0,3 m.

Une formule unique a été introduite pour le calcul de la superficie de mesure S , car la complexité antérieure ne pouvait aboutir qu'à des différences toujours inférieures à 1 dB.

Toutes les figures décrivant la superficie de mesure ont été révisées afin de les rendre conformes à la méthode d'enveloppement utilisée pour la détermination de la puissance acoustique. La hauteur h est toujours mesurée à partir du sol de l'installation d'essai, quelle que soit la hauteur des supports situés au-dessous de l'objet soumis à essai, sauf si l'objet

soumis à essai est monté sur un support présentant une surface suffisamment large faisant office de plan réfléchissant.

Des figures supplémentaires expliquent la procédure de détermination de la superficie de mesure et le contour prescrit pour un certain nombre de configurations de bobines d'inductance de type sec.

Il est recommandé à l'utilisateur de la présente norme de se référer régulièrement au guide d'application IEC 60076-10-1:2016 correspondant, qui facilite la compréhension grâce à des informations de fond importantes et des détails utiles. L'IEC 60076-10 et l'IEC 60076-10-1 ont été révisées en parallèle par la même équipe de maintenance, et constituent de ce fait des documents entièrement cohérents.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-10:2016

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 10: Détermination des niveaux de bruit

1 Domaine d'application

La présente Partie de l'IEC 60076 définit les méthodes de mesure de la pression acoustique et de l'intensité acoustique par lesquelles sont déterminés les niveaux de puissance acoustique des transformateurs, des bobines d'inductance et de leurs dispositifs de refroidissement associés.

NOTE Pour les besoins de la présente norme, le terme "transformateur" est souvent utilisé dans le sens "transformateur ou bobine d'inductance".

Les méthodes sont applicables aux transformateurs, aux bobines d'inductance et à leurs dispositifs de refroidissement – qu'ils soient installés sur le transformateur ou en soient séparés – comme décrit dans les séries IEC 60076 et IEC 61378.

La présente norme est principalement destinée aux mesures effectuées en usine. Les conditions sur le site peuvent être très différentes, à cause de la proximité d'autres objets, en particulier d'autres transformateurs. Néanmoins, la présente norme est appliquée dans la mesure du possible aux mesures sur le site.

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 60076-1:2011, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

IEC 60076-8:1997, *Transformateurs de puissance – Partie 8: Guide d'application*

IEC 61043:1993, *Électroacoustique – Instruments pour la mesure de l'intensité acoustique – Mesure au moyen d'une paire de microphones de pression*

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

IEC 61672-2, *Électroacoustique – Sonomètres – Partie 2: Essais d'évaluation d'un modèle*

ISO 3382-2:2008, *Acoustique – Mesurage des paramètres acoustiques des salles – Partie 2: Durée de réverbération des salles ordinaires*

ISO 3746:2010, *Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique et des niveaux d'énergie acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique – Méthode de contrôle employant une surface de mesure enveloppante au-dessus d'un plan réfléchissant*

ISO 9614-1:1993, *Acoustique – Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Partie 1: Mesurages par points*

ISO 9614-2:1996, *Acoustique – Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Partie 2: Mesurage par balayage*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60076-1 ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

pression acoustique

p

pression fluctuante superposée à la pression statique (barométrique) par la présence du son

Note 1 à l'article: Elle est exprimée en pascals, Pa.

3.2

niveau de pression acoustique

L_p

dix fois le logarithme décimal du rapport du carré de la pression acoustique efficace au carré de la pression acoustique de référence ($p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa)

Note 1 à l'article: Il est exprimé en décibels, dB.

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

3.3

intensité acoustique

I

grandeur vectorielle décrivant la quantité et le sens du flux de puissance acoustique par unité de surface à une position donnée

Note 1 à l'article: L'unité est le watt par mètre carré, W/m².

3.4

intensité acoustique normale

I_n

composante de l'intensité acoustique dans la direction perpendiculaire à une surface de mesure

Note 1 à l'article: Par convention, l'intensité acoustique normale est considérée positive si le flux énergétique est dirigé de façon à s'éloigner de l'objet en essai, et négative si le flux énergétique est dirigé de façon à se rapprocher de l'objet en essai.

3.5

niveau d'intensité acoustique normale

L_I

dix fois le logarithme décimal du rapport de l'intensité acoustique normale efficace à l'intensité acoustique de référence ($I_0 = 1 \times 10^{-12}$ Wm⁻²)

Note 1 à l'article: Il est exprimé en décibels, dB.

$$L_I = 10 \times \lg \frac{|I_n|}{I_0} \quad (2)$$

Note 2 à l'article: Étant donné que I_n peut être positif ou négatif, un indicateur de direction séparé F_{Dir} servant à indiquer la direction du flux énergétique doit être utilisé pour L_1 pour permettre d'effectuer des analyses telles que des calculs de quantités moyennes ou intégrales.

3.6 indicateur de direction

F_{Dir}

indication de la direction du flux énergétique acoustique, exigée pour l'intensité acoustique du fait de sa nature vectorielle

Note 1 à l'article: +1 pour un flux énergétique acoustique s'éloignant de l'objet en essai, -1 pour un flux énergétique acoustique dirigé vers l'objet en essai.

3.7 puissance acoustique

W

débit auquel l'énergie acoustique aérienne est rayonnée par une source

Note 1 à l'article: Elle est exprimée en watts, W.

3.8 niveau de puissance acoustique

L_W

dix fois le logarithme décimal du rapport d'une puissance acoustique efficace donnée à la puissance acoustique de référence ($W_0 = 1 \times 10^{-12}$ W)

Note 1 à l'article: Il est exprimé en décibels, dB.

$$L_W = 10 \times \lg \frac{W}{W_0} \quad (3)$$

3.9 niveau de bruit total

niveau de bruit comprenant la totalité de la plage de fréquences à l'étude

Note 1 à l'article: Ce niveau est soit directement affiché par le dispositif de mesure, soit déduit par addition logarithmique des niveaux de bruit de toutes les bandes de fréquence individuelles.

3.10 surface de rayonnement principale

surface hypothétique entourant l'objet en essai, qui est supposée être la surface depuis laquelle le son est rayonné

3.11 surface de mesure

S

surface enveloppant l'objet en essai à la distance de mesure par rapport à la surface de rayonnement principale et sur laquelle le ou les trajets de mesure ou les points de mesure sont situés

3.12 coefficient de surface

L_S

dix fois le logarithme décimal du rapport de la surface de mesure S à la surface de référence S_0 (1 m²)

Note 1 à l'article: Il est exprimé en décibels, dB.

$$L_S = 10 \times \lg \frac{S}{S_0} \quad (4)$$

3.13**distance de mesure** x

distance horizontale entre la surface de rayonnement principale et la surface de mesure

3.14**contour prescrit**

le ou les trajets horizontaux situés sur la surface de mesure, sur laquelle les mesures doivent être effectuées

3.15**procédure d'inspection en continu**

mesure du niveau de bruit obtenue par un déplacement continu du ou des microphones le long d'un ou plusieurs contours prescrits à vitesse de déplacement constante, au cours duquel le dispositif mesure un niveau de bruit moyenné dans le temps et dans l'espace

Note 1 à l'article: L'équipement d'essai peut enregistrer un fichier audio numérique au cours de la procédure de mesure en vue d'un post-traitement destiné à déterminer les grandeurs nécessaires.

3.16**procédure point par point**

mesures du niveau de bruit obtenues depuis un certain nombre de positions de microphone discrètes situées sur le ou les contours prescrits, espacées de manière égale et d'une distance ne dépassant pas 1 m

Note 1 à l'article: Le niveau de bruit moyen spatial est la moyenne des mesures réalisées sur l'ensemble des points.

3.17**niveau de bruit de fond**

niveau de pression acoustique pondérée A mesuré le long du contour prescrit, l'objet en essai étant inopérant

3.18**correction environnementale** K

correction qui prend en compte l'influence des réflexions sonores indésirables provenant des limites de la salle et/ou des objets réfléchissant le son dans la salle d'essai dans laquelle les mesures de pression acoustique sont effectuées

3.19**indice P-I** ΔL

différence entre le niveau de pression acoustique moyenné spatialement non corrigé et le niveau d'intensité acoustique moyenné spatialement

Note 1 à l'article: Les valeurs pondérées A doivent être utilisées.

3.20**transformateurs de distribution**

transformateurs prévus pour une installation autre que dans des sous-stations et affichant une puissance assignée généralement inférieure à 5 000 kVA

Note 1 à l'article: Cette définition est proposée pour les besoins de la présente norme.

Note 2 à l'article: Cette définition s'applique à la fois aux transformateurs immergés dans un liquide et aux transformateurs de type sec.

4 Puissance acoustique pour différentes conditions de charge

4.1 Généralités

Il existe trois composantes acoustiques susceptibles de contribuer au niveau de puissance acoustique global du transformateur en service:

- puissance acoustique sous tension à vide;
- puissance acoustique du dispositif de refroidissement;
- puissance acoustique due au courant de charge.

La représentation du niveau de puissance acoustique d'un transformateur dans une condition de service particulière est donnée par la somme logarithmique des trois composantes de puissance acoustique présente dans cette condition de service. Pour les détails, voir l'Article 13.

4.2 Puissance acoustique sous tension à vide

La puissance acoustique due à une tension à vide doit être prise en considération pour tous les types de transformateurs. La tension d'excitation doit être une onde de forme sinusoïdale ou pratiquement sinusoïdale et à la fréquence assignée. La tension doit être conforme au 11.5 de l'IEC 60076-1:2011. Dans le cas des bobines à inductance, aucune condition à vide n'existe puisque le courant assigné circule dès qu'une tension assignée est appliquée. Pour obtenir davantage d'informations sur les essais acoustiques des bobines d'inductance, voir l'IEC 60076-6.

L'état usuel pour la détermination du niveau de puissance acoustique des transformateurs sous tension à vide se rapporte à la tension assignée sur un enroulement sans prise. D'autres conditions d'excitation peuvent exister en service, conduisant à des niveaux de puissance acoustique inférieurs ou supérieurs, ces conditions pouvant être l'objet d'une garantie, auquel cas cela doit être spécifié par l'acheteur. Pour les transformateurs conçus pour fonctionner avec un flux variable, la puissance acoustique sous tension à vide est fortement influencée par la position de réglage. La position de réglage des mesures acoustiques doit par conséquent faire l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur lors de l'étape de proposition commerciale.

Si un transformateur est équipé d'un changeur de prise en charge du type à inductance où la bobine d'inductance peut être en permanence sous tension sur certaines positions du changeur de prise, les mesures doivent être effectuées avec le transformateur sur une prise de réglage qui reflète cette condition et qui soit également aussi proche que possible de la prise principale.

Les conditions d'essai sélectionnées doivent être clairement indiquées dans le rapport d'essai.

NOTE La polarisation magnétique en courant continu du noyau peut provoquer une augmentation importante des niveaux de bruit mesurés. Sa présence est révélée par l'existence d'harmoniques impairs de la fréquence d'excitation dans le spectre acoustique, ce qui peut être identifié par une analyse fréquentielle en bande étroite. L'influence de la polarisation en courant continu sur les mesures du niveau de bruit à vide durant les essais en usine peut être pratiquement éliminée par un fonctionnement en surexcitation de quelques minutes. Si la surexcitation n'est pas une option réalisable, comme dans le cas des mesures sur site, l'élimination de la polarisation en courant continu après un enclenchement du transformateur peut prendre plusieurs heures, voire plusieurs jours.

4.3 Puissance acoustique du ou des dispositifs de refroidissement

L'état usuel pour la détermination du niveau de puissance acoustique consiste à avoir tous les dispositifs de refroidissement nécessaires pour que le transformateur fonctionne à sa puissance assignée en service.

Dans le cas d'un dispositif de refroidissement par hydroréfrigérant, la circulation de l'eau peut ne pas être maintenue durant les essais du niveau de bruit.

Dans le cas de dispositifs de refroidissement à vitesse variable (habituellement des ventilateurs), la vitesse utilisée au cours des essais de mesure du niveau de bruit a un effet important sur le niveau de puissance acoustique. La vitesse du dispositif de refroidissement sélectionné pour la mesure du niveau de bruit doit être la vitesse nécessaire pour faire fonctionner le transformateur à sa puissance assignée dans les conditions du milieu de refroidissement externe les plus pénalisantes.

Les conditions d'essai sélectionnées doivent être clairement indiquées dans le rapport d'essai.

4.4 Puissance acoustique due au courant de charge

La principale composante du niveau de puissance acoustique dû au courant de charge, pour la plupart des transformateurs, est le double de la fréquence industrielle.

L'ordre de grandeur du niveau de puissance acoustique dû au courant de charge peut être estimé approximativement grâce aux Équations (5) et (6):

$$L_{WA, Ir} \approx 39 + 18 \times \lg \frac{S_r}{S_p} \text{ pour une fréquence industrielle de 50 Hz} \quad (5)$$

$$L_{WA, Ir} \approx 44 + 18 \times \lg \frac{S_r}{S_p} \text{ pour une fréquence industrielle de 60 Hz} \quad (6)$$

où

$L_{WA, Ir}$ est le niveau de puissance acoustique pondérée A estimé du transformateur à courant assigné et fréquence assignée en conditions de court-circuit;

S_r est la puissance assignée en MVA;

S_p est la puissance de référence (1 MVA).

Pour les autotransformateurs et les transformateurs à trois enroulements, la puissance assignée à deux enroulements équivalente est utilisée à la place de S_r , conformément au 3.2 de l'IEC 60076-8:1997.

NOTE 1 Les prévisions obtenues des Équations (5) et (6) sont habituellement à ± 6 dB du niveau de puissance acoustique mesuré dû au courant de charge assigné.

Une indication générale pour estimer l'importance de la puissance acoustique due au courant de charge est donnée par les Équations (5) et (6). Si les valeurs calculées sont 10 dB ou plus inférieures au niveau de puissance acoustique estimé sous tension à vide, sa contribution est négligeable, et elle peut par conséquent ne pas être mesurée, sauf si l'acheteur a spécifié l'essai.

NOTE 2 Les transformateurs de distribution n'exigent habituellement pas que la puissance acoustique due au courant de charge soit prise en considération.

Si cette mesure est exigée, un enroulement doit être court-circuité, et le courant assigné doit être injecté à sa fréquence assignée dans l'autre enroulement.

Sauf spécification contraire, les essais doivent être effectués avec le changeur de prise (le cas échéant) sur la prise principale. Cependant, cette position de prise peut ne pas donner le niveau de bruit maximal en service à cause des variations des distributions des champs

magnétiques de fuite dans les enroulements, le noyau et les éléments de blindage magnétiques de la cuve.

Les conditions d'essai sélectionnées doivent être clairement indiquées dans le rapport d'essai.

Le niveau de puissance acoustique pour un courant différent du courant assigné peut être calculé par l'Équation (7):

$$L_{WA,IT} = L_{WA,Ir} + 40 \times \lg \frac{I_T}{I_r} \quad (7)$$

où

$L_{WA,Ir}$ est le niveau de puissance acoustique pondérée A calculé ou mesuré au courant assigné;

$L_{WA,IT}$ est le niveau de puissance acoustique pondérée A calculé au courant réel;

I_r est le courant assigné;

I_T est le courant réel.

L'équation est valable pour des courants situés dans la plage comprise entre 60 % et 130 % du courant assigné. Elle doit également être appliquée pour calculer le niveau de puissance acoustique dû au courant de charge assigné si, dans le cas de limitations imposées par la plateforme d'essai, il a été convenu que les essais soient effectués à un courant inférieur au courant assigné.

En service, le sens du courant de charge et le facteur de puissance peuvent avoir une influence sur le niveau de puissance acoustique à cause d'une superposition du flux à vide et du flux de fuite qui entre partiellement dans le noyau. Cet effet ne peut pas être reproduit par des essais d'usine.

Les transformateurs spéciaux tels que les transformateurs de convertisseurs industriels, SVC et HVDC, ainsi que certains types particuliers de bobines d'inductance, sont le siège de courants de charge à contenu en harmoniques élevé, et produisent par conséquent des harmoniques sonores de fréquence plus élevée. L'injection de ces courants exige un matériel d'essai spécial et des configurations d'essai qui ne sont généralement pas disponibles pour les essais des transformateurs. Pour les bobines d'inductance, ces essais sont employés plus couramment, voir IEC 60076-6. S'il est impossible de procéder à des essais, des prévisions concernant le niveau de puissance acoustique dû au courant de charge, ainsi qu'à ses harmoniques, basées sur des calculs doivent être convenues. Pour des informations détaillées, voir en 4.2.5 et en 7.6, ainsi qu'à l'Annexe A de l'IEC 60076-10-1:2016.

5 Spécification des mesures du niveau de bruit

Si des mesures du niveau de bruit sont spécifiées, les performances acoustiques d'un transformateur doivent être indiquées par son niveau de puissance acoustique pondérée A.

Dans certains cas exceptionnels, un niveau de pression acoustique moyen à une certaine distance peut être spécifié par l'acheteur. La détermination de ce niveau de pression peut soit être le résultat d'une mesure du niveau de pression acoustique moyenné spatialement effectuée à cette distance, soit être déduite de la puissance acoustique déterminée à une distance différente.

Au minimum, le niveau de puissance acoustique sous tension à vide à la tension assignée et à la fréquence assignée sur un enroulement sans prise doit être spécifié. Pour les applications à flux variable, voir en 4.2.

Si le transformateur est équipé d'un dispositif de refroidissement comprenant des pompes et/ou des ventilateurs, le niveau de puissance acoustique du dispositif de refroidissement correspondant à la puissance assignée du transformateur doit également être spécifié. Des fonctionnements autres que ceux exigés pour la puissance assignée peuvent être spécifiés par l'acheteur.

En variante, la somme combinée du niveau de puissance acoustique sous tension à vide du transformateur et du dispositif de refroidissement peut être spécifiée.

Si l'acheteur considère que le niveau de puissance acoustique dû au courant de charge, calculé selon les Équations (5) et (6), est important, il est recommandé de spécifier une mesure du niveau de puissance acoustique dû au courant de charge assigné afin de pouvoir consigner le niveau de puissance acoustique du transformateur comme étant celui qui existe en service.

NOTE 1 Les transformateurs de distribution n'exigent habituellement pas que la puissance acoustique due au courant de charge soit prise en considération.

L'acheteur peut également spécifier une valeur pour la somme des niveaux de puissance acoustique

- sous tension à vide,
- du dispositif de refroidissement et
- dus au courant de charge,

chacun d'eux correspondant à la valeur assignée mentionnée ci-dessus.

Des conditions autres que celles indiquées ci-dessus, qui peuvent refléter de façon plus exacte la condition de service susceptible d'exister, peuvent être convenues pour les mesures acoustiques.

NOTE 2 Il est dans l'intérêt de l'acheteur d'informer le fabricant de toute condition de service particulière, comme la présence d'harmoniques et/ou d'une polarisation en courant continu dans le réseau, pour en évaluer l'impact sur le niveau de puissance acoustique en service.

Dans le cas de transformateurs à phases séparées formant une banque triphasée, la spécification du niveau de bruit doit porter sur chaque phase séparée individuellement.

La méthode utilisée pour la détermination des niveaux de puissance acoustique peut être celle de la pression acoustique ou celle de l'intensité acoustique, et c'est normalement l'acheteur qui choisit celle qu'il souhaite utiliser. Si l'acheteur n'a pas spécifié de méthode, le fabricant doit en choisir une et doit l'indiquer dans la proposition commerciale.

Les mesures acoustiques des transformateurs de distribution doivent fournir le niveau de bruit total conformément à la définition 3.9 uniquement, sauf spécification contraire de l'acheteur.

NOTE 3 Ceci s'applique également aux bobines d'inductance dont la puissance assignée est inférieure à 1 MVA.

Les mesures acoustiques de tous les autres transformateurs doivent être réalisées avec un filtrage de bande par 1/3 d'octave, sauf si une largeur de bande différente (bande d'octave ou bande étroite) ou un niveau de bruit total uniquement est spécifié par l'acheteur. Pour de plus amples détails sur les mesures sur bande étroite, voir en 5.4 et à l'Annexe A de l'IEC 60076-10-1:2016.

Les mesures acoustiques de tous les transformateurs et de toutes les bobines d'inductance doivent être réalisées avec une température de partie active proche des conditions ambiantes de la plateforme d'essai, sauf si l'acheteur a spécifié des mesures acoustiques à des conditions proches de la température de service (habituellement effectuées à la fin de l'essai d'échauffement).

Sauf spécification contraire de l'acheteur, le choix de la procédure d'inspection en continu ou de la procédure point par point doit rester à la discrétion du fabricant.

NOTE 4 Les différences entre les mesures du niveau de bruit, dues à la méthode choisie, sont négligeables d'après de multiples comparaisons, mais la procédure d'inspection en continu prend beaucoup moins de temps, en particulier dans le cas de grosses unités.

La procédure point par point doit être appliquée si des considérations de sécurité l'imposent.

La procédure point par point constitue le choix logique lorsque le nombre de points de mesure est réduit. Elle s'applique normalement aux transformateurs de distribution.

6 Instrumentation, étalonnage et précision

La réponse en fréquence disponible de l'instrument de mesure doit partir d'une valeur inférieure à la fréquence industrielle assignée et aller jusqu'à une valeur supérieure à la limite d'audition de l'oreille humaine, soit 20 kHz.

Dans le cas de transformateurs de fréquence industrielle inférieure à 25 Hz et si le dispositif de mesure est limité au niveau des basses fréquences, il est acceptable d'avoir comme limite de fréquence inférieure le double de la fréquence industrielle.

La limite supérieure de la mesure réelle doit être choisie conformément à la fréquence significative émise la plus élevée, habituellement inférieure à 10 kHz. La plage de fréquences sélectionnée doit être la même pour les mesures de bruit de fond et pour la mesure d'essai.

Les mesures de pression acoustique doivent être effectuées au moyen d'un dispositif de mesure du niveau de bruit de type 1 satisfaisant à l'IEC 61672-1 et à l'IEC 61672-2, étalonné conformément au 5.2 de l'ISO 3746:2010.

La méthode de mesure de pression acoustique décrite dans la présente norme est basée sur l'ISO 3746. Les mesures effectuées en conformité à la présente norme conduisent à un écart-type normalisé pour la reproductibilité entre les déterminations faites dans différents laboratoires, qui sont inférieures ou égales à 3 dB.

Les mesures d'intensité acoustique doivent être effectuées au moyen d'un instrument de mesure d'intensité acoustique de classe 1 satisfaisant à l'IEC 61043, étalonné conformément au 6.2 de l'ISO 9614-1:1993. La plage de fréquences du matériel de mesure doit être adaptée au spectre de fréquences de l'objet en essai, ce qui signifie qu'un système d'espacement de microphone approprié doit être choisi afin de réduire le plus possible les erreurs systématiques.

La méthode de mesure de l'intensité acoustique décrite dans la présente norme est basée sur l'ISO 9614-1 et sur l'ISO 9614-2. Les mesures effectuées en conformité à la présente norme conduisent à un écart-type normalisé pour la reproductibilité entre les déterminations faites dans différents laboratoires, qui sont inférieures ou égales à 3 dB.

Le matériel de mesure doit être étalonné conformément aux instructions du fabricant immédiatement avant et après la séquence de mesures. Si l'étalonnage change de plus de 0,3 dB, les mesures doivent être déclarées non valables et l'essai doit être renouvelé.

Toutes les mesures doivent être effectuées en utilisant la moyenne énergétique calculée sur la durée de mesure de la grandeur acoustique (pression ou intensité). Des grandeurs acoustiques déduites statistiquement, telles que des valeurs à certains pourcentages, ne doivent pas être utilisées.

L'indication en réponse rapide du matériel de mesure doit être utilisée pour identifier et éviter les erreurs de mesure dues aux bruits de fond transitoires.

La mesure du niveau de bruit est habituellement le résultat d'une opération manuelle, mais les erreurs introduites par les distances variables ont tendance à s'effacer dans le calcul de moyenne. Leur influence sur la mesure finale est moins importante que d'autres facteurs acoustiques. Néanmoins, tous les efforts doivent être entrepris pour maintenir la distance de mesure la plus constante possible.

NOTE Le marquage du contour au sol ou à l'aide d'un système d'espacement entre le microphone et le transformateur peut contribuer à atteindre la qualité de mesure exigée.

7 Surface de rayonnement principale

7.1 Généralités

La définition de la surface de rayonnement principale dépend du type de dispositif de refroidissement employé et de sa position par rapport au transformateur ou à son enveloppe.

La hauteur de la surface de rayonnement principale est définie à partir du sommet de l'objet en essai par rapport au sol de la plateforme d'essai et comprend la hauteur de toute structure de support telle que des galets, palettes, engin de transport. Si la structure de support assure les propriétés acoustiques d'un plan réfléchissant et étend le contour (tel que spécifié dans les paragraphes suivants) de l'objet en essai d'au moins deux fois la distance de mesure, la structure de support doit alors être considérée comme le sol.

7.2 Transformateurs avec ou sans dispositif de refroidissement

La surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant le matériel. La projection part du haut du couvercle de la cuve du transformateur (à l'exclusion des parties saillantes telles que les traversées, les piétements et autres accessoires situés au-dessus de l'enveloppe) ou du haut du dispositif de refroidissement, si celui-ci est plus haut que le couvercle par rapport au sol de la plateforme d'essai. La surface de rayonnement principale doit inclure les dispositifs de refroidissement situés à < 3 m de distance de la cuve de transformateur, des raidisseurs et de tout autre équipement auxiliaire tel que des boîtes à câbles, des compartiments de changement de prise, etc. Elle doit exclure tout dispositif de refroidissement situé à ≥ 3 m de distance de la cuve de transformateur. Des projections partant de parties saillantes telles que des traversées, des tuyauteries et conservateurs d'huile, des vannes, des armoires de commande et autres éléments secondaires doivent également être exclues tant qu'elles n'interfèrent pas avec le contour prescrit, voir les Figures 1, 2 et 3. Si des parties saillantes interfèrent avec le contour prescrit, ces parties sont alors incluses dans la surface de rayonnement principale. Au cas où les hauteurs du transformateur et celle du dispositif de refroidissement diffèrent d'un facteur supérieur à deux, les niveaux de bruit du transformateur et de l'installation de refroidissement doivent être mesurés séparément, même si la distance entre les deux éléments est inférieure à 3 m.

7.3 Transformateurs situés dans des enveloppes avec dispositifs de refroidissement à l'intérieur de l'enveloppe

La surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant le matériel. La projection va du haut de l'enveloppe (à l'exclusion des parties saillantes telles que les traversées, les tourelles et autres accessoires situés au-dessus de l'enveloppe) jusqu'au sol de la plateforme d'essai.

7.4 Transformateurs situés dans des enveloppes avec dispositifs de refroidissement à l'extérieur de l'enveloppe

La surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant le matériel. La projection part du haut de l'enveloppe du transformateur (à l'exclusion des parties saillantes telles que les traversées, les piétements et autres accessoires situés au-dessus de l'enveloppe) ou bien du haut du dispositif de refroidissement, et quel que soit celui qui est situé le plus en hauteur par rapport à la base de

la plateforme d'essai. La surface de rayonnement principale doit inclure les dispositifs de refroidissement situés à < 3 m de distance de l'enveloppe de transformateur, de l'équipement auxiliaire tel que des boîtes à câbles, des compartiments de changement de prise, etc. Elle doit exclure tout dispositif de refroidissement situé à ≥ 3 m de distance de l'enveloppe de transformateur. Des projections partant de parties saillantes telles que des traversées, des tuyauteries et conservateurs d'huile, des vannes, des armoires de commande et autres éléments secondaires doivent également être exclues, voir les Figures 1, 2 et 3. Dans le cas d'un transformateur intégrant de panneaux acoustiques, ces derniers sont considérés comme l'enveloppe. Au cas où la hauteur du transformateur et celle du dispositif de refroidissement diffèrent d'un facteur supérieur à deux, les niveaux de bruit du transformateur et de l'installation de refroidissement doivent être mesurés séparément, même si la distance entre les deux éléments est inférieure à 3 m.

7.5 Dispositifs de refroidissement montés sur une structure séparée, la distance entre les deux surfaces de rayonnement principales étant ≥ 3 m

La surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant l'équipement, mais à l'exclusion des parties saillantes telles que les conservateurs d'huile, les structures, les tuyauteries, les vannes et autres éléments secondaires. La projection verticale doit partir du haut de la structure de la réfrigération et aller jusqu'au sol de la plateforme d'essai; voir Figure 4. Pour les dispositifs de refroidissement montés plusieurs mètres au-dessus du niveau du sol, les contours prescrits doivent être choisis par analogie avec les bobines d'inductance de type sec, consulter l'Article 8 et la Figure 6 g).

NOTE Dans ce cas, les contours prescrits sont situés à mi-hauteur de la structure de support et dans le plan médian du dispositif de refroidissement.

7.6 Transformateurs de type sec

Dans le cas des transformateurs de type sec sans enveloppe, la surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant le transformateur de type sec, à l'exclusion des parties saillantes telles que la structure, le câblage externe et les connexions externes, et les appareils fixés n'affectant pas le rayonnement acoustique. La projection verticale doit partir du haut de la structure du transformateur et aller jusqu'au sol de la plateforme d'essai; voir Figure 5. La surface de rayonnement principale doit inclure les dispositifs de refroidissement fixés au transformateur, le cas échéant.

Dans le cas des transformateurs de type sec qui possèdent une enveloppe, la surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant le matériel. La projection va du haut de l'enveloppe du transformateur, à l'exclusion des parties saillantes telles que les traversées, les tourelles et autres accessoires, jusqu'au sol de la plateforme d'essai. La surface de rayonnement principale doit inclure les dispositifs de refroidissement, l'équipement auxiliaire tel que des boîtes de câbles, des compartiments de changement de prise, etc., s'ils sont fixés à l'enveloppe du transformateur.

7.7 Bobines d'inductance sans fer de type sec

La surface de rayonnement principale est la surface obtenue par la projection verticale d'un contour en chaîne encerclant l'équipement, à l'exclusion des parties saillantes telles que le câblage externe et les connexions externes et les appareils fixés tels que les parafoudres ou les condensateurs de surtension n'affectant pas le rayonnement acoustique. La projection part du sommet de la bobine d'inductance et va jusqu'au sol de la plateforme d'essai. La hauteur de la surface de rayonnement principale est donc la somme de la hauteur de la structure de support par rapport au sol de la plateforme d'essai (h_S) et de la hauteur de la bobine d'inductance (h_R). Dans le cas d'une bobine d'inductance empilée, la hauteur de la bobine (h_R) est la hauteur totale de la pile de bobines, voir la Figure 6.

Pour les bobines d'inductance ou les piles de bobines d'inductance monophasées non équipées de blindages acoustiques, le contour est la circonférence extérieure de la bobine d'inductance; voir Figure 6 a).

Pour les bobines d'inductance équipées de blindages acoustiques, le contour est la circonférence du blindage acoustique.

Pour les bobines d'inductance triphasées montées selon une disposition triangulaire, le contour enveloppe chacune des trois bobines de phase et est représenté sur la Figure 6 b).

Pour les bobines d'inductance triphasées montées côte à côte, le contour enveloppe chacune des trois bobines de phase et est représenté sur la Figure 6 c).

8 Contour prescrit

Pour les transformateurs de distribution, pour lesquels les usines disposent de petites installations d'essai ou dans le cas où des chambres anéchoïques sont utilisées pour les mesures acoustiques, le contour prescrit doit être espacé de 0,3 m par rapport à la surface de rayonnement principale.

Pour les transformateurs de type sec sans enveloppe, le contour prescrit doit être espacé de 1 m de la surface de rayonnement principale pour des raisons de sécurité.

Pour tous les autres transformateurs, le contour prescrit doit être espacé de 1 m par rapport à la surface de rayonnement principale, sauf si les conditions suivantes sont présentes, auquel cas la distance peut, par nécessité, être réduite à 0,3 m:

- espace limité dans la plateforme d'essai;
- faible rapport signal sur bruit dans le cas de transformateurs de faible bruit et/ou de bruit de fond élevé.

NOTE 1 Un faible rapport signal sur bruit est indiqué si les critères de validation de la méthode d'essai choisie ne peuvent être satisfaits, voir 11.2.4 et 11.3.4.

Pour les mesures effectuées avec des dispositifs de refroidissement à ventilation forcée en service, le contour prescrit doit être espacé de 2 m de la surface de rayonnement principale afin de réduire le plus possible les effets de la turbulence de l'air. Pour les unités de type sec avec et sans enveloppe et équipées de dispositifs de refroidissement à ventilation forcée en service, le contour prescrit doit être espacé de 1 m de la surface de rayonnement principale puisque les turbulences dans de telles applications sont normalement limitées.

NOTE 2 La longueur du contour prescrit peut être mesurée dans la plateforme d'essai ou calculée à partir d'un schéma ou d'un modèle CAO.

Pour un montage d'essai particulier, la distance de mesure sélectionnée particulière s'applique autour de l'objet en essai entier. Différentes distances de mesure peuvent s'appliquer pour différents montages d'essai, comme dans le cas où la distance passe de 1 m à 2 m lorsque des ventilateurs fonctionnent.

NOTE 3 Des informations de fond pour la sélection des distances de mesure sont données en 5.5 de l'IEC 60076-10-1:2016.

Pour les transformateurs et/ou les dispositifs de refroidissement dont la hauteur est $< 2,5$ m, le contour prescrit doit se situer sur un plan horizontal à mi-hauteur. Pour les transformateurs et/ou les dispositifs de refroidissement de hauteur $\geq 2,5$ m, deux contours prescrits doivent être utilisés, qui se situent sur des plans horizontaux à un tiers et deux tiers de la hauteur. Pour des raisons de sécurité, d'autres hauteurs peuvent être choisies.

Pour les bobines d'inductance sans fer de type sec, le contour prescrit doit être espacé de 2 m de la surface de rayonnement principale; cependant, pour les mesures sur site, pour des raisons de sécurité, il peut être nécessaire d'augmenter l'espacement.

En fonction de la hauteur de la structure de support et de la hauteur de la bobine d'inductance ou de la pile de bobines, un ou deux contours prescrits situés sur des plans horizontaux doivent être utilisés:

- $h_S \leq 2$ m et $h_R \leq 4$ m: 1 contour prescrit (voir Figure 6 d));
- $h_S \leq 2$ m et $h_R > 4$ m: 2 contours prescrits (voir Figure 6 e) et Figure 6 f));
- $h_S > 2$ m et toute h_R : 2 contours prescrits (voir Figure 6 g));

où

h_S est la hauteur de la structure de support;

h_R est la hauteur de la bobine / pile.

9 Positions de microphone

Pour la procédure d'inspection en continu, le microphone doit se déplacer à une vitesse constante d'au maximum 1 m/s sur le ou les contours prescrits autour de l'objet en essai. A la vitesse de déplacement donnée, la fréquence d'échantillonnage des appareils de mesure du niveau de bruit modernes à intégration est toujours suffisante pour un calcul de moyenne spatiale précis jusqu'à une résolution de 1/3 d'octave. Le niveau de bruit moyenné spatialement sur la durée de mesure doit être consigné dans le rapport d'essai, en même temps que la durée de mesure active.

NOTE Les fonctions "MARCHE – ARRÊT" et "PAUSE" de ces appareils de mesure de niveau de bruit peuvent être utilisées pour simplifier la procédure de mesure, c'est-à-dire pour négocier les obstacles et/ou pour changer de contour prescrit.

Pour la procédure point par point, les positions de microphone doivent se situer sur le ou les contours prescrits, espacées de façon approximativement égales et séparées de moins de 1 m (voir dimension D aux Figures 1 à 5). Il doit exister au minimum huit positions de microphone le long de chaque contour. La durée de mesure doit être d'au minimum trois secondes, et être pratiquement la même quelle que soit la position.

Il peut être nécessaire de modifier certaines positions de mesure pour certains objets en essai pour des raisons de sécurité, par exemple, dans le cas de transformateurs avec des traversées horizontales à haute tension, pour lesquels une partie du ou des contours prescrits peut être limitée à la zone de sécurité.

10 Calcul de la superficie de mesure

10.1 Superficie de mesure pour des distances de mesure allant jusqu'à 30 m

La superficie S de la surface de mesure, exprimée en mètres carrés, est donnée par l'Équation (8):

$$S = (h + x) l_m \quad (8)$$

où

h est la hauteur de la surface de rayonnement principale en mètres selon l'Article 7;

l_m est la longueur en mètres du contour prescrit;

x est la distance de mesure en mètres entre la surface de rayonnement principale et le contour prescrit.

NOTE 1 L'Équation (8) s'applique aux distances de mesure de 0,3 m, 1 m, 2 m, mais aussi à toute autre distance de mesure allant jusqu'à 30 m.

NOTE 2 L'Équation (8) est également applicable au calcul du niveau de pression acoustique à partir du niveau de puissance acoustique.

10.2 Superficie de mesure pour des distances de mesure supérieures à 30 m

La superficie S de la surface de mesure (un hémisphère), exprimée en mètres carrés, est donnée par l'Équation (9):

$$S = 2 \times \pi \times R^2 \quad (9)$$

où

R est la distance en mètres depuis le centre géométrique du transformateur / dispositif de refroidissement à l'emplacement considéré dans le champ lointain.

NOTE L'Équation (9) est également applicable au calcul du niveau de pression acoustique à partir du niveau de puissance acoustique. Pour davantage d'informations sur les calculs de champ lointain, voir l'Article 14.

11 Mesure acoustique

11.1 Conditions d'essai

11.1.1 Positionnement de l'objet en essai

Les conditions suivantes doivent être remplies pour satisfaire aux hypothèses de la méthode d'enveloppement selon l'ISO 3746 pour les mesures de pression acoustique et selon l'ISO 9614-2:1996 pour les mesures d'intensité acoustique.

Un environnement possédant un champ approximativement libre sur un plan réfléchissant doit être utilisé. Le plan réfléchissant doit avoir de préférence un coefficient d'absorption acoustique inférieur à 0,1 sur la plage de fréquences d'intérêt; voir Article 6. Cette exigence est habituellement satisfaite lorsque des mesures en intérieur sont effectuées au-dessus de sols en béton, résine, acier ou dalles dures, ou lorsque des mesures en extérieur sont effectuées sur des surfaces de béton, d'asphalte étanche, de sable ou de pierre. Le plan réfléchissant doit être plus grand que la zone située à l'intérieur du contour prescrit.

Il doit être assuré que le plan réfléchissant (surface de support) ne rayonne pas une puissance acoustique appréciable due à des vibrations.

Il est acceptable de fermer avec un matériau absorbant le son, les espaces entre le sol de la salle d'essai et le bas de la cuve du transformateur, dès lors que ces espaces sont dus uniquement au montage d'essai et qu'ils n'apparaissent pas en service. Cependant, les autres matériaux absorbants placés au sol, à l'intérieur du périmètre du contour prescrit, doivent être retirés pendant l'essai.

La surface de mesure doit se situer à l'intérieur d'un champ acoustique essentiellement non perturbé par des réflexions provenant des objets environnants et provenant des limites de l'environnement. Les objets réfléchissants doivent par conséquent être enlevés, dans la mesure du possible, pendant d'essai. Le fait de placer l'objet en essai de façon à ce qu'il ne soit pas parallèle aux murs réfléchissants et qu'il en soit aussi éloigné que possible contribue à réduire le plus possible les réflexions. Pour plus d'informations, se référer également au 6.3 de l'IEC 60076-10-1:2016. L'utilisation de panneaux absorbant le son à l'extérieur de la zone du contour prescrit améliore également l'environnement d'essai.

La méthode d'enveloppement n'est pas applicable aux mesures effectuées à l'intérieur de cellules ou d'enveloppes de transformateur réverbérantes.

11.1.2 Options d'alimentation pour les essais

Les options suivantes sont disponibles pour l'alimentation des transformateurs et doivent être appliquées de la façon spécifiée et convenue avec l'équipement en essai à température ambiante, voir Article 4.

- a) transformateur sous tension à vide sans dispositif de refroidissement;
- b) transformateur sous tension à vide avec un ou plusieurs dispositifs de refroidissement;
- c) transformateur en court-circuit au courant de charge sans dispositif de refroidissement;
- d) transformateur en court-circuit au courant de charge avec un ou plusieurs dispositifs de refroidissement;
- e) dispositif(s) de refroidissement uniquement.

S'il n'est pas spécifié qu'une combinaison spécifique soit effectivement mesurée, il est acceptable de déduire le niveau de puissance acoustique de cette combinaison spécifique par addition ou soustraction logarithmique des mesures individuelles.

NOTE 1 Il existe une pratique établie qui consiste à mesurer les composantes de niveau de bruit individuelles durant l'essai de type; cependant, les essais de série suivants effectués sur des unités identiques le sont généralement sans que les réfrigérants ne soient montés. Les options a) et c) (le cas échéant) sont ensuite mesurées, et le niveau de bruit du système de réfrigération, issu de l'essai de type, est additionné.

NOTE 2 La configuration c) peut uniquement être appliquée si aucune hausse significative de la température locale n'est prévue dans toute section de la disposition de l'enroulement.

S'il est spécifié qu'un essai de niveau de bruit soit effectué à une température proche de la température de service, la température du dessus du liquide doit être mesurée et consignée dans le rapport d'essai.

NOTE 3 Un minimum de temps passé pour les mesures du niveau de bruit évite les modifications du niveau de bruit provoquées par des variations de température du transformateur.

NOTE 4 L'influence de la polarisation en courant continu sur les mesures du niveau de bruit à vide durant les essais en usine peut être pratiquement éliminée par une surexcitation de quelques minutes, voir également en 4.2.

11.1.3 Informations sur l'application des essais

La méthode d'essai (méthode de pression, méthode d'intensité), la procédure d'essai (procédure d'inspection en continu, procédure point par point), la largeur de bande de filtrage et la température du transformateur (ambiante ou proche de celle du service) doivent être spécifiées; voir Article 5. Si rien n'est spécifié par l'acheteur, les méthodes et les procédures de mesure sont sélectionnées par le fabricant à partir des options disponibles dans la présente norme pour mesurer les niveaux de bruit exigés.

11.1.4 Conditions ambiantes dominantes

Pour l'intégrité des deux méthodes décrites ci-dessous, un niveau de bruit de fond permanent doit être maintenu pendant toute la mesure du niveau de bruit.

NOTE Si le bruit de fond est fréquemment perturbé, il peut être préférable d'utiliser la procédure point par point.

Les mesures en extérieur ne doivent pas être effectuées dans des conditions météorologiques extrêmes, par exemple en présence de gradients de température, de vents forts, de tout type de précipitation, d'accumulations de neige ou d'une humidité élevée pour des mesures à des distances supérieures à 10 m.

11.2 Méthode de pression acoustique

11.2.1 Généralités

Les mesures de pression acoustique effectuées autour de l'objet en essai sont affectées par l'environnement d'essai, et les corrections suivantes doivent être effectuées, le cas échéant:

- correction pour le bruit de fond permanent;
- correction pour les réflexions acoustiques par le facteur K .

NOTE Les effets de champ acoustique proches de l'objet en essai (effets de champ proche) peuvent avoir un impact sur les mesures de pression acoustique à une distance de mesure de 0,3 m. Ils tendent à augmenter le niveau de pression acoustique mesuré d'une valeur comprise entre 0,5 dB et 1,5 dB.

11.2.2 Procédure d'essai

L'objet de cet essai est de rapporter le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total pour chaque option d'alimentation, accompagné d'un spectre de fréquences moyenné spatialement unique (le cas échéant).

La même procédure d'essai (procédure d'inspection en continu ou procédure point par point) s'applique aussi bien aux mesures de bruit de fond qu'aux mesures d'essai.

La ou les positions de microphone décrites à l'Article 9 s'appliquent aussi bien aux mesures de bruit de fond qu'aux mesures d'essai.

Pour la procédure point par point, lorsque le nombre total de positions de mesure dépasse 10, le niveau de bruit de fond peut être mesuré en seulement 10 positions également réparties autour de l'objet en essai.

Un niveau de bruit de fond moyenné spatialement total (voir définition 3.17) et le spectre de fréquences correspondant doivent être consignés juste avant et juste après chaque séquence de mesure d'essai. Si la procédure point par point est appliquée, le spectre de fréquences peut être déterminé à partir de la moyenne des spectres mesurés à chacune des positions de microphone individuelles ou par une mesure par inspection en continu complémentaire. Si cette dernière méthode est appliquée, cela doit être clairement mentionné dans le rapport d'essai.

Si le niveau de bruit de fond est inférieur d'au moins 10 dB à celui de l'objet en essai, le bruit de fond peut n'être mesuré qu'en un seul emplacement du contour prescrit, aucune correction de bruit de fond n'étant alors nécessaire.

Un niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total, accompagné du spectre de fréquences correspondant, doit être consigné pour la procédure d'inspection en continu ou pour la procédure point par point, selon ce qui est approprié. Pour la procédure point par point, l'acheteur peut également demander que les niveaux de pression acoustique pondérée A totaux individuels soient consignés pour chaque position de microphone. Si la procédure point par point est spécifiée, le spectre de fréquences peut être déterminé en prenant la moyenne des spectres relevés à chacune des positions de microphone individuelles ou en effectuant une mesure par inspection en continu complémentaire. Si cette dernière méthode est appliquée, cela doit être clairement mentionné dans le rapport d'essai.

11.2.3 Calcul du niveau de pression acoustique moyenné spatialement

Pour la procédure d'inspection en continu, l'instrument fournit automatiquement les données de mesure moyennées spatialement. Dans le cas de la procédure point par point, les données de mesure moyennées spatialement peuvent également être déduites automatiquement par l'instrument au moyen d'un post-traitement, ou doivent être calculées comme décrit ci-dessous. S'il existe une exigence de rapporter des mesures point par point pour chaque position de microphone, il peut être nécessaire de déduire le niveau de pression acoustique moyenné spatialement total par un calcul. Le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total correspondant à la mesure d'essai, $\overline{L_{pA0}}$, doit ensuite être calculé à partir des niveaux de pression acoustique pondérée A, L_{pAi} , mesurés aux positions de microphone individuelles au moyen de l'Équation (10):

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

où

N est le nombre de positions de microphone;

L_{pAi} est le niveau de pression acoustique pondérée A total obtenu par la mesure d'essai à la i ème position de microphone.

Le niveau de bruit de fond moyenné spatialement pondéré A total, $\overline{L_{bgA}}$, doit être calculé avant et après la séquence d'essai au moyen de l'Équation (11):

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right) \quad (11)$$

où

M est le nombre de positions de microphone;

L_{bgAi} est le niveau de bruit de fond pondéré A mesuré à la i -ième position de microphone.

La même procédure de calcul s'applique pour chaque bande individuelle v du spectre de fréquences, avec pour résultat des niveaux de pression acoustique pondérée A moyennés spatialement $\overline{L_{pA0}^v}$ et des niveaux de bruit de fond moyennés spatialement $\overline{L_{bgA}^v}$.

11.2.4 Validation des mesures d'essai par rapport au bruit de fond

Pour des raisons pratiques, le processus de validation décrit ci-dessous repose sur le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{pA0}}$ et le niveau de bruit de fond total $\overline{L_{bgA}}$. Aucun examen des bandes individuelles du spectre de fréquences n'est exigé.

Si les niveaux de bruit de fond initial et final $\overline{L_{bgA}}$ diffèrent de plus de 3 dB, et si la valeur la plus élevée des deux se situe à moins de 8 dB au-dessous du niveau de pression acoustique pondérée A de la mesure $\overline{L_{pA0}}$, la mesure d'essai doit être déclarée non valide et l'essai recommencé. Cependant, dans le cas où la mesure d'essai satisfait à la garantie, aucune correction du bruit de fond n'est exigée. Dans ce cas, l'essai est déclaré réussi.

Si le plus grand des deux niveaux de bruit de fond $\overline{L_{bgA}}$ se situe à moins de 3 dB au-dessous du niveau de pression acoustique pondérée A de la mesure $\overline{L_{pA0}}$, la mesure d'essai doit être déclarée non valide et l'essai recommencé. Cependant, dans le cas où la mesure d'essai satisfait à la garantie, aucune correction du bruit de fond n'est exigée. Dans ce cas, l'essai est déclaré réussi.

Si la présente norme admet de petites différences entre le bruit de fond et les niveaux de bruit des mesures d'essai, il convient tout de même de s'efforcer d'obtenir une différence d'environ 6 dB. Si la différence est inférieure à 3 dB, l'utilisation d'autres méthodes de mesure peut être envisagée (voir 11.3 et Annexe A).

Les exigences ci-dessus sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Critères d'acceptation d'essai

$\overline{L_{pA0}} - \text{supérieure } \overline{L_{bgA}}$	Initiale $\overline{L_{bgA}}$ – finale $\overline{L_{bgA}}$	Décision
≥ 8 dB	–	Essai accepté
< 8 dB	< 3 dB	Essai accepté
< 8 dB	> 3 dB	Répéter l'essai ^a
< 3 dB	–	Répéter l'essai ^a
^a Sauf si $\overline{L_{pA0}}$ satisfait à la garantie. La correction du bruit de fond n'est pas exigée dans ce cas, et l'essai est déclaré réussi.		

11.2.5 Calcul de la correction environnementale K

11.2.5.1 Généralités

La correction environnementale K , exprimée en dB, prend en compte l'influence de réflexions acoustiques indésirables provenant des limites de la salle et/ou des objets réfléchissants situés dans la zone d'essai. L'amplitude de K dépend principalement du rapport de la superficie d'absorption acoustique de la salle d'essai, A , à la superficie de la surface de mesure, S . L'amplitude de K n'est pas fortement influencée par l'emplacement de l'objet en essai dans la salle d'essai et K ne corrige pas les mesures influencées par des ondes stationnaires.

K doit être obtenu à partir de l'Équation (12) ou de la Figure 7 en entrant la valeur appropriée de A/S .

$$K = 10 \times \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad (12)$$

Le facteur de correction environnemental K doit de préférence être déterminé par des mesures. Cependant, pour les besoins de la présente norme, l'estimation de K est permise par l'utilisation de facteurs d'absorption.

Pour qu'une salle d'essai soit satisfaisante, le rapport A/S doit être de ≥ 1 avec une valeur correspondante pour le facteur de correction environnemental $K \leq 7$ dB. Cependant, si le rapport A/S est $\leq 2,5$ avec une valeur correspondante pour le facteur de correction environnemental $K \geq 4,1$ dB, la détermination de K doit reposer sur des mesures acoustiques.

Si les conditions sont proches de celles d'un champ libre, c'est-à-dire essentiellement non perturbées par des réflexions provenant d'objets environnants et des limites de l'environnement, comme c'est parfois le cas des mesures effectuées à l'extérieur, la valeur de K tend à être égale à zéro, aucune correction environnementale n'étant alors nécessaire.

11.2.5.2 Détermination de K d'après la mesure de la durée de réverbération

La durée de réverbération de la salle d'essai est déterminée en excitant la salle d'essai au moyen de sons à large bande ou d'impulsions de son, puis en mesurant la réponse décroissante sous forme de bande large pondérée A , ou d'une manière plus précise pour les bandes individuelles du spectre de fréquences, conformément à l'ISO 3382-2:2008.

La valeur de A est donnée en mètres carrés par l'équation de Sabine (13):

$$A = 0,16 (V/T) \quad (13)$$

où

V est le volume de la salle d'essai en mètres cubes;

T est la durée de réverbération de la salle d'essai en secondes.

L'Équation (13) s'applique à la réponse pondérée A en bande large, ainsi qu'aux bandes individuelles du spectre de fréquences lorsque K est déterminé individuellement pour les bandes de fréquences.

Même si l'application de K à des bandes de fréquences individuelles offre une correction plus précise, pour des raisons pratiques, un seul facteur K peut être appliqué pour le spectre entier.

Idéalement, la détermination de K s'effectue avant chaque mesure, avec l'équipement du laboratoire d'essai et les objets en essai en place. Du fait que, bien souvent, ceci n'est pas réalisable, la détermination de K peut également être effectuée une fois en tant que référence, lorsque le laboratoire d'essai est vide de tout équipement superflu.

NOTE 1 En déterminant K lorsque le laboratoire d'essai est vide de tout équipement superflu, la valeur la plus basse possible est obtenue.

NOTE 2 La détermination de la surface d'absorption acoustique A dans un laboratoire d'essai débarrassé de tout équipement superflu peut de préférence être effectuée par un organisme indépendant et le certificat être utilisé pour démontrer la détermination de K à l'acheteur sur demande.

11.2.5.3 Détermination de K à partir des facteurs d'absorption

La valeur de la surface d'absorption acoustique A en mètres carrés est donnée par l'Équation (14):

$$A = \sum_i \alpha_i \times S_{Vi} \quad (14)$$

où

α_i est le facteur d'absorption acoustique pour une surface partielle (voir Tableau 2);

S_{Vi} est la superficie de la surface partielle de la salle d'essai (murs, plafond et sol), caractérisée par α_i en mètres carrés.

Tableau 2 – Valeurs approximatives du facteur d'absorption acoustique moyen

Description de la surface	Facteur d'absorption acoustique moyen, α
Sol dur	0,1
Murs et plafonds d'une salle de machines ou d'une installation de production de forme irrégulière, murs et plafonds de plateforme d'essai sans matériau d'absorption acoustique	0,2
Murs et plafonds dont le matériau d'absorption acoustique d'épaisseur ne dépasse pas 20 cm	0,3
Murs et plafonds dont le matériau d'absorption acoustique a une épaisseur supérieure à 20 cm	0,5
Portes ouvertes donnant sur une grande salle	0,5

La surface totale du volume de la salle d'essai doit correspondre à la somme des surfaces partielles S_{Vi} de l'Équation (14), ceci comprenant les murs, le plafond, le sol et les portes ouvertes.

Le calcul mentionné ci-dessus pour la surface d'absorption acoustique A selon l'Équation (14) doit être inclus dans le rapport d'essai.

La détermination de K avec cette méthode s'applique en tant que correction, aussi bien pour le niveau de pression acoustique pondérée A total que pour les bandes individuelles du spectre de fréquence.

11.2.5.4 Méthode alternative d'estimation de K

En variante, K peut être déterminé en mesurant, dans l'installation d'essai, le niveau de puissance acoustique apparent d'une source sonore de référence. La source sonore de référence est étalonnée au préalable dans un champ libre, au-dessus d'un plan réfléchissant. La formule suivante peut ensuite être écrite

$$K = L_{Wm} - L_{Wr} \quad (15)$$

où

L_{Wm} est le niveau de puissance acoustique de la source sonore de référence, déterminé selon les Articles 7 et 8 de l'ISO 3746:2010, sans tenir compte du son réfléchi;

L_{Wr} est le niveau de puissance acoustique apparent mesuré de la source sonore de référence, mesuré dans l'installation d'essai en tenant compte du son réfléchi ($L_{Wr} > L_{Wm}$).

La détermination de K avec cette méthode s'applique en tant que correction, aussi bien pour le niveau de pression acoustique pondérée A total que pour les bandes individuelles du spectre de fréquence, à partir du moment où la puissance acoustique de la source sonore de référence a été estimée au moyen de techniques sélectives de fréquence.

NOTE Cette méthode est souvent utilisée dans les petites installations d'essai.

11.2.6 Correction finale pour le bruit de fond d'état permanent et l'environnement d'essai

Le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total, $\overline{L_{pA}}$, utilisé pour le calcul de puissance acoustique (voir Article 12), doit être déduit de l'Équation (16):

$$\overline{L_{pA}} = 10 \times \lg \left(10^{0,1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0,1\overline{L_{bgA}}} \right) - K \quad (16)$$

où $\overline{L_{bgA}}$ est le plus faible des deux niveaux de bruit de fond pondérés A moyennés spatialement totaux.

La même procédure de calcul s'applique aux bandes individuelles v du spectre de fréquences, avec pour résultat des niveaux de pression acoustique pondérée A moyennés spatialement corrigés $\overline{L_{pA}^v}$, utilisés pour le calcul de puissance acoustique des bandes de

fréquence individuelles. Les niveaux de bruit de fond des bandes individuelles $\overline{L_{bgA}^v}$ se réfèrent chacun au plus faible des deux niveaux de pression acoustique de bruit de fond pondérée A moyennés spatialement totaux $\overline{L_{bgA}}$.

Si l'Équation (16) est appliquée aux bandes de fréquence individuelles v , le niveau de pression acoustique total est la somme logarithmique des niveaux de pression acoustique corrigés de chacune des bandes de fréquence individuelles.

S'il devait arriver qu'un niveau de bruit de fond d'une bande particulière $\overline{L_{bgA}^v}$ soit supérieur au niveau de pression acoustique $\overline{L_{pA0}^v}$ de la mesure d'essai effectuée dans la même bande, le $\overline{L_{pA}^v}$ correspondant doit être pris comme étant égal à zéro.

11.3 Méthode d'intensité acoustique

11.3.1 Généralités

La méthode d'intensité acoustique est insensible, dans certaines limites, au bruit de fond permanent et aux réflexions. Par conséquent, des corrections peuvent ne pas être appliquées. Pour plus d'informations, se référer à l'IEC 60076-10-1:2016.

Une caractéristique inhérente à la méthode d'intensité acoustique est que la surface de mesure, et par conséquent le trajet de mesure également, doivent envelopper entièrement l'objet en essai. La raison à cela est que l'intensité acoustique est une quantité vectorielle.

Si les parois de la cuve sont partiellement recouvertes par des panneaux, la méthode d'intensité n'est pas applicable, car le niveau d'intensité mesuré aux positions de microphone n'est pas représentatif de l'ensemble de la surface du transformateur. Pour plus d'informations, se référer au 6.5 de l'IEC 60076-10-1:2016.

11.3.2 Procédure d'essai

Le niveau d'intensité acoustique normal et le niveau de pression acoustique doivent être consignés pour chaque mesure.

L'espacement des microphones à l'intérieur de la sonde d'intensité doit être choisi de façon à couvrir le spectre acoustique à mesurer, faute de quoi les fréquences inférieures ou supérieures ne sont pas prises en compte et des erreurs introduites. Différents espacements de microphone peuvent devoir être utilisés pour les différentes options d'alimentation, voir 11.1.2.

Les positions de la sonde d'intensité acoustique (paire de microphones, décrite à l'Article 9) s'appliquent aux mesures. Du fait que la sonde a une directivité et une polarité, il est essentiel de faire en sorte que l'axe de la sonde reste perpendiculaire à la surface de mesure et soit orienté dans la bonne direction.

L'objet de cet essai est de rapporter les niveaux pondérés A moyennés spatialement totaux de l'intensité acoustique normale et de la pression acoustique pour chaque option d'alimentation, accompagnés d'un spectre de fréquences moyenné spatialement unique (le cas échéant).

La procédure d'essai spécifiée doit être appliquée pour la mesure (procédure d'inspection en continu ou procédure point par point).

Les niveaux pondérés A moyennés spatialement totaux de l'intensité acoustique normale et de la pression acoustique, accompagnés du spectre de fréquences correspondant, doivent être consignés pour la procédure d'inspection en continu ou pour la procédure point par point, selon ce qui est approprié. Pour la procédure point par point, l'acheteur peut également demander que les niveaux individuels pondérés A totaux de l'intensité acoustique normale et de la pression acoustique soient consignés pour chaque position de microphone. Si la procédure point par point est spécifiée, le spectre de fréquences peut être déterminé en prenant la moyenne des spectres relevés à chacune des positions de microphone individuelles ou en effectuant une mesure par inspection en continu complémentaire. Si cette dernière méthode est appliquée, cela doit être clairement mentionné dans le rapport d'essai.

11.3.3 Calcul de l'intensité acoustique normale moyenne et du niveau de pression acoustique moyen

Dans le cas de la procédure d'inspection en continu, l'instrument fournit automatiquement les données de mesure moyennées spatialement (niveau d'intensité normal $\overline{L_{IA0}}$ et son indicateur de direction $\overline{F_{Dir}}$ et le niveau de pression $\overline{L_{pA0}}$). Dans le cas de la procédure point par point, les données de mesure moyennées spatialement peuvent également être déduites automatiquement par l'instrument au moyen d'un post-traitement, ou doivent être calculées comme décrit ci-dessous. S'il est exigé de rapporter des mesures point par point pour chaque position de microphone, il peut être nécessaire de déduire l'intensité acoustique normale moyennée spatialement totale et le niveau de pression acoustique par un calcul. Le niveau d'intensité acoustique normal pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{IA0}}$ doit être calculé à partir des niveaux d'intensité acoustique normale pondérée A totaux L_{IAi} mesurés aux différentes positions de microphone selon les Équations (17) et (18):

$$\overline{L_{IA0}} = 10 \times \lg \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Diri} \times 10^{0,1L_{IAi}} \right| \quad (17)$$

$$\overline{F_{Dir}} = \text{Sign} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{Diri} \times 10^{0,1L_{IAi}} \right) \quad (18)$$

où

F_{Diri} est l'indicateur de direction selon la définition 3.6 à la $i^{\text{ème}}$ position de microphone;

$\overline{F_{Dir}}$ est l'indicateur de direction indiquant le débit d'énergie net;

N est le nombre de positions de microphone.

Le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{pA0}}$ doit être calculé à partir des niveaux de pression acoustique L_{pAi} , mesurés aux positions de microphone individuelles au moyen de l'Équation (10).

La même procédure de calcul s'applique pour chaque bande individuelle ν du spectre de fréquences, avec pour résultat des niveaux de pression acoustique pondérée A moyennés spatialement $\overline{L_{IA0}^{\nu}}$ et des niveaux de bruit de fond moyennés spatialement $\overline{L_{pA0}^{\nu}}$.

11.3.4 Validation des mesures

S'il existe une variation appréciable du bruit de fond durant une mesure, la mesure doit être rejetée.

Pour des raisons pratiques, le processus de validation décrit ci-dessous repose sur les niveaux pondérés A moyennés spatialement totaux mesurés de l'intensité acoustique normale $\overline{L_{IA0}}$ et de la pression acoustique $\overline{L_{pA0}}$, respectivement. Aucun examen des bandes individuelles du spectre de fréquences n'est exigé.

Le critère pour déterminer le caractère acceptable de l'environnement d'essai et le caractère acceptable du bruit de fond d'état permanent est l'indice P-I défini en 3.19 et donné par l'Équation (19):

$$\Delta L = \overline{L_{pA0}} - \overline{L_{IA0}} \quad (19)$$

Si $\Delta L > 8$ dB, la mesure doit être déclarée non valide.

Si $4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8 \text{ dB}$, la mesure doit être acceptée avec application d'une correction, voir 11.3.5.

Si $\Delta L \leq 4$ dB, la mesure est valide sans correction.

NOTE Si $\Delta L > 8$ dB, il peut être envisagé de réagencer le montage d'essai, de modifier la distance de mesure ou de changer de méthode de mesure (méthode de pression acoustique, mesure de bande étroite, mesure synchrone). Voir également l'Annexe A.

Si l'indicateur de direction correspondant au niveau d'intensité acoustique normal moyenné spatialement total $\overline{F_{Dir}}$ devient égal à -1, cela indique soit qu'un débit d'énergie global est dirigé vers l'objet en essai, soit qu'une mesure est erronée, auquel cas l'essai est déclaré non valide.

Si l'indicateur de direction correspondant au niveau d'intensité acoustique normal moyenné spatialement d'une bande individuelle du spectre de fréquences devient égal à -1, cela signifie que le débit d'énergie net dans cette bande de fréquences est dirigé vers l'objet en essai. Cela se produit lorsque le son rayonné depuis l'objet en essai est négligeable, ce qui est acceptable.

11.3.5 Correction finale basée sur l'indice P-I et sur l'indicateur de direction

Le niveau d'intensité acoustique normal pondérée A moyenné spatialement total corrigé, $\overline{L_{IA}}$, utilisé pour le calcul de puissance acoustique (voir Article 12), doit être déduit de $\overline{L_{IA0}}$ et $\overline{L_{pA0}}$ de la façon suivante:

$$\text{Si } \Delta L \leq 4 \text{ dB: } \overline{L_{IA}} = \overline{L_{IA0}} \quad (\text{c'est-à-dire, aucune correction exigée}); \quad (20)$$

$$\text{Si } 4 \text{ dB} < \Delta L \leq 8 \text{ dB: } \overline{L_{IA}} = \overline{L_{pA0}} - 4 \text{ dB}. \quad (21)$$

La même correction que pour le niveau d'intensité acoustique normal pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{IA}}$ d'une mesure doit être appliquée à toutes les bandes individuelles ν .

NOTE L'indice P-I des bandes individuelles dépasse souvent la valeur admissible de 8 dB pour l'indice P-I global. Ceci est cohérent avec le principe de mesure et indique généralement une faible puissance acoustique.

Si l'indicateur de direction d'une bande individuelle ν devient égal à -1, le niveau d'intensité acoustique corrigé $\overline{L_{IA}^{\nu}}$ doit être pris comme étant égal à zéro pour cette bande.

12 Détermination du niveau de puissance acoustique par calcul

Le niveau de puissance acoustique pondérée A total de l'objet en essai, L_{WA} , doit être calculé soit à partir du niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total corrigé, $\overline{L_{pA}}$, soit à partir du niveau d'intensité acoustique normal pondérée A moyenné spatialement total corrigé, $\overline{L_{IA}}$, selon l'Équation (22) ou (23), respectivement:

$$L_{WA} = \overline{L_{pA}} + 10 \times \lg \frac{S}{S_0} \quad (22)$$

$$L_{WA} = \overline{L_{IA}} + 10 \times \lg \frac{S}{S_0} \quad (23)$$

où S est déduit de l'Équation (8) et S_0 est égal à la surface de référence (1 m²).

La même procédure de calcul s'applique aux bandes individuelles v du spectre de fréquences, avec pour résultat les niveaux de puissance acoustique pondérés L_{WA}^v des bandes de fréquences individuelles. Les niveaux de puissance acoustique des bandes de fréquence avec $\overline{L_{pA}^v}$ ou $\overline{L_{IA}^v}$ pris comme étant égal à zéro ne sont pas pertinents et sont donc réglés sur zéro.

13 Addition et soustraction logarithmiques des niveaux de bruit individuels

Il existe des situations dans lesquelles des niveaux de bruit doivent être ajoutés ou soustraits. Ces situations sont les suivantes

- combinaison de niveaux de bruit pour différentes conditions de charge;
- combinaison de niveaux de bruit pour des bandes individuelles du spectre de fréquences pour différentes conditions de charge;
- addition de niveaux de bruit de bandes individuelles pour obtenir un niveau de bruit total;
- addition de niveaux d'intensité lorsqu'il a été nécessaire d'utiliser différents espacements pour couvrir la totalité de la plage de fréquences d'une mesure spécifique.

Les équations données dans le présent article s'appliquent de la même manière à la pression, à l'intensité et à la puissance qui caractérisent les grandeurs du niveau bruit. Pour la pression acoustique et l'intensité acoustique, les composantes individuelles doivent se rapporter au même point de mesure ou au même contour prescrit. Pour l'intensité acoustique, l'orientation de la sonde de mesure doit aussi être identique pour chacune des mesures individuelles.

L'Équation (24) s'applique pour l'addition des niveaux de bruit de différentes sources ou différentes bandes sans indicateur de direction:

$$L_{\text{sum}} = 10 \times \lg \left(10^{0,1L_1} + 10^{0,1L_2} + \dots + 10^{0,1L_n} \right) \quad (24)$$

où

L_1 est le 1^{er} niveau de bruit;

L_2 est le 2^e niveau de bruit;

L_n est le n^{e} niveau de bruit.

L'Équation (24) s'applique aux opérations de soustraction de niveaux de bruit sous différentes conditions de charge.

L'Équation (24) s'utilise pour tous les niveaux de bruit déterminés par la méthode de pression comprenant des bandes de fréquences et pour les niveaux de bruit totaux déterminés par la méthode d'intensité.

Les Équations (25) et (26) s'appliquent pour l'addition de niveaux de bruit de différentes sources ou différentes bandes avec un indicateur de direction comme pour les bandes individuelles des niveaux de bruit déterminés par la méthode d'intensité:

$$L_{\text{sum}} = 10 \times \lg \left| F_{\text{Dir}1} \times 10^{0,1L_1} + F_{\text{Dir}2} \times 10^{0,1L_2} + \dots + F_{\text{Dir}n} \times 10^{0,1L_n} \right| \quad (25)$$

$$F_{\text{Dir sum}} = \text{Sign} \left(F_{\text{Dir}1} \times 10^{0,1L_1} + F_{\text{Dir}2} \times 10^{0,1L_2} + \dots + F_{\text{Dir}n} \times 10^{0,1L_n} \right) \quad (26)$$

où

L_1, L_2, L_n	sont les 1 ^{er} , 2 ^e et n^e niveaux de bruit;
L_{sum}	est le niveau de bruit de la somme;
$F_{\text{Dir}1}, F_{\text{Dir}2}, F_{\text{Dir}n}$	sont les 1 ^{er} , 2 ^e et n^e indicateurs de direction des niveaux de bruit L_1, L_2, L_n ;
$F_{\text{Dir sum}}$	est l'indicateur de direction de L_{sum} .

Les Équations (25) et (26) s'appliquent également aux opérations de soustraction de niveaux de bruit sous différentes conditions de charge.

14 Calculs de champ lointain pour les distances supérieures à 30 m

Si la spécification de l'acheteur exige que la pression acoustique de l'équipement à une certaine distance soit spécifiée, ce qui suit s'applique.

En tant que calcul approximatif, en prenant comme hypothèse un point source et des conditions de champ libre sur un plan réfléchissant, le niveau de pression acoustique, L_{pR} , à une distance R en mètres à partir du centre géométrique de la source, est donné par l'Équation (27):

$$L_{\text{pR}} = L_W - 10 \times \lg \frac{S_h}{S_0} \quad (27)$$

où

$S_h = 2 \times \pi \times R^2$	est la zone de la surface d'un hémisphère de rayon R , et R est supérieur à 30 m;
S_0	est la surface de référence (1 m ²);
L_W	est le niveau de puissance acoustique.

Pour une valeur plus précise, des facteurs tels que les caractéristiques directionnelles, les rayons réfléchis, le facteur d'écran et l'absorption atmosphérique doivent être pris en compte. Des simulations de propagation acoustique au moyen de techniques numériques peuvent être exigées. En général, le fabricant du transformateur n'est pas équipé pour les réaliser.

15 Présentation des résultats

Le rapport doit comprendre l'ensemble des informations suivantes:

- nom du fabricant, lieu de fabrication et lieu de l'essai;
- date des essais;

- c) description de l'objet en essai donnant son numéro de série, sa puissance assignée, sa tension assignée, sa fréquence, sa position de prise pour les mesures acoustiques dues à la charge;
- d) niveau de bruit garanti et conditions de charge et de mesure avec lesquelles ce niveau garanti est démontré;
- e) température du dessus du liquide dans le cas où les mesures du niveau de bruit sont effectuées à une température proche de la température de service;
- f) référence à la présente norme de mesure IEC 60076-10;
- g) méthode de détermination de niveau de puissance acoustique et procédure utilisée;
- h) identification de l'équipement de mesure acoustique et vérification de l'étalonnage, y compris les numéros de série des instruments, du ou des microphones et de la source d'étalonnage;
- i) croquis coté faisant de l'objet en essai des positions de mesure;
- j) conditions d'essais pour chaque configuration d'essai, c'est-à-dire la tension, le courant, la position de prise, les dispositifs de refroidissement et les fonctions de réduction de bruit employées durant l'essai;
- k) longueur de la distance de mesure, le ou les contours prescrits, la hauteur de l'objet en essai et la zone de la surface de mesure calculée;
- l) nom de l'ingénieur d'essai et témoins s'il y a lieu;
- m) signature de la personne responsable des essais.

Lorsque la méthode de pression acoustique est utilisée, les informations suivantes doivent être incluses:

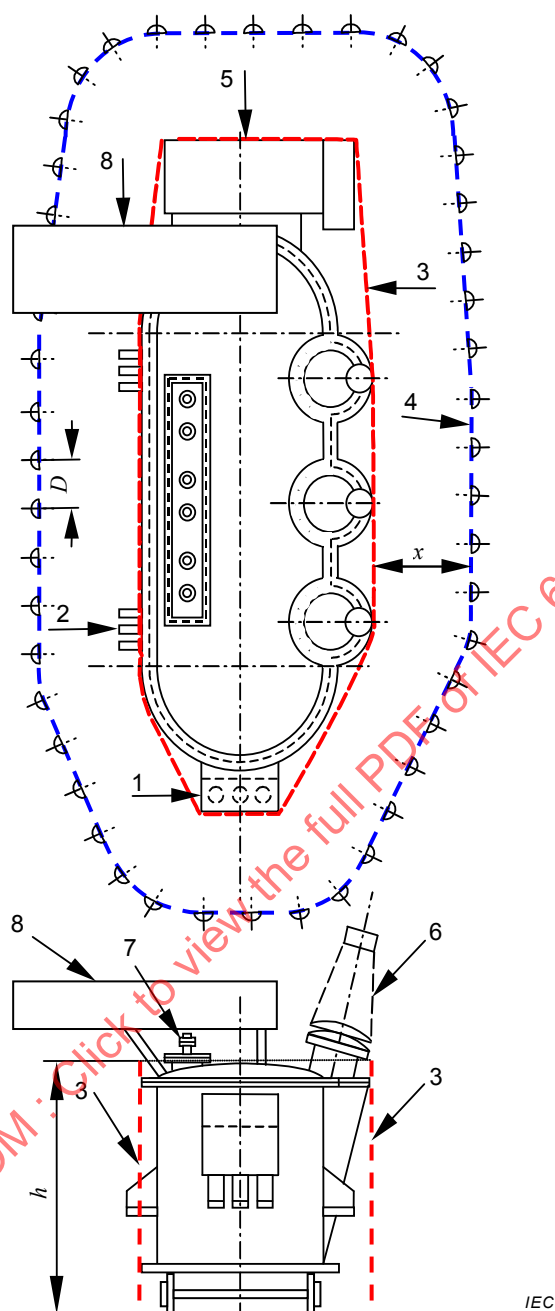
- n) procédure point par point: le niveau de pression acoustique pondérée A total du bruit de fond à chaque position de mesure de bruit de fond et, le cas échéant, un spectre de fréquences moyenné spatialement, juste avant et juste après la séquence de mesure;
- o) procédure d'inspection en continu: le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total du bruit de fond et le cas échéant, un spectre de fréquences moyenné spatialement, juste avant et juste après la séquence de mesure;
- p) procédure point par point: le niveau de pression acoustique pondérée A total pour chaque position de mesure, le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{pA0}}$ et le cas échéant, un spectre de fréquences moyenné spatialement pour chacune des conditions de charge mises en place;
- q) procédure d'inspection en continu: le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{pA0}}$ et le cas échéant, un spectre de fréquences moyenné spatialement pour chacune des conditions de charge mises en place;
- r) la valeur de la correction environnementale K , qu'elle s'applique à une bande large ou qu'elle soit spécifique à une bande de fréquences;
- s) si la correction environnementale K est obtenue par calcul à partir de coefficients d'absorption, le calcul de la surface d'absorption acoustique A ; si la correction environnementale K est basée sur des mesures de la surface d'absorption acoustique A , la référence au certificat de l'organisme indépendant qui a effectué les mesures; si la correction environnementale K est obtenue par l'utilisation d'une source acoustique de référence, la référence au certificat d'étalonnage de la source acoustique;
- t) le niveau de pression acoustique pondérée A moyenné spatialement total corrigé $\overline{L_{pA}}$ et le cas échéant, un spectre de fréquences moyenné spatialement corrigé pour chacune des conditions de charge mises en place;
- u) le niveau de puissance acoustique pondérée A total, L_{WA} , et le cas échéant, un spectre de fréquences L_{WA}^V , pour chacune des conditions de charge mises en place;

- v) addition des niveaux de puissance acoustique obtenus pour que les combinaisons de charges soient garanties, à arrondir à l'entier le plus proche mais uniquement au cours de cette étape finale.

Lorsque la méthode d'intensité acoustique est utilisée, les informations suivantes doivent être incluses:

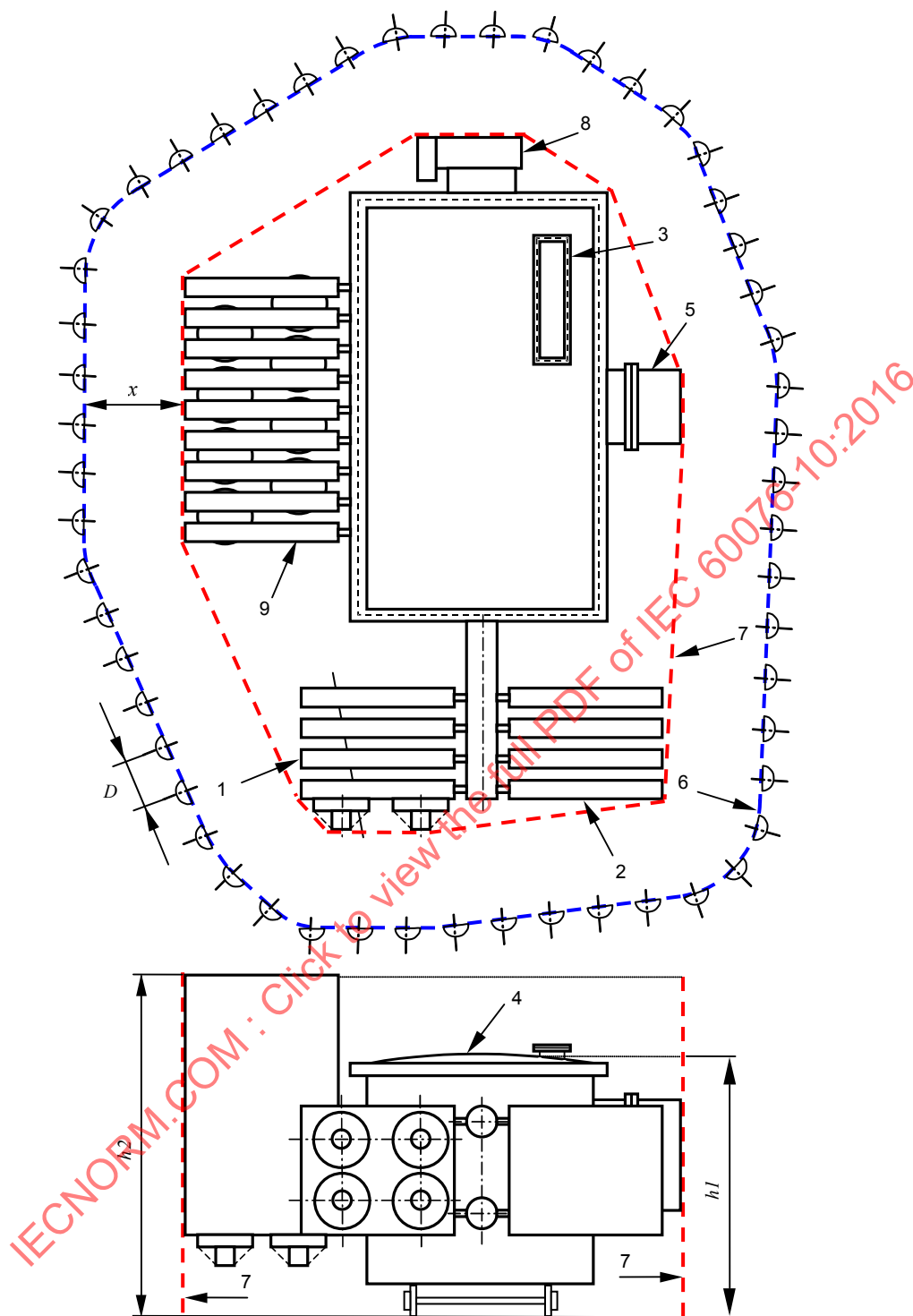
- w) procédure point par point: le niveau de pression et d'intensité acoustique pondérée A total avec son indicateur de direction F_{Dir} pour chaque position de mesure, le niveau de pression et d'intensité acoustique pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{pA0}}$ et $\overline{L_{IA0}}$ avec son indicateur de direction $\overline{F_{Dir}}$ et le cas échéant, les spectres de fréquences moyennés spatialement du niveau de pression et d'intensité acoustique avec ses indicateurs pour chacune des conditions de charge mises en place;
- x) procédure d'inspection en continu: le niveau de pression et d'intensité acoustique pondérée A moyenné spatialement total $\overline{L_{pA0}}$ et $\overline{L_{IA0}}$ avec son indicateur de direction $\overline{F_{Dir}}$ et le cas échéant, les spectres de fréquences moyennés spatialement du niveau de pression et d'intensité acoustique avec leurs indicateurs pour chacune des conditions de charge mises en place;
- y) valeur de ΔL pour chacune des conditions de charge mises en place;
- z) niveau d'intensité acoustique normal pondérée A moyenné spatialement total corrigé $\overline{L_{IA}}$ pour chacune des conditions de charge mises en place;
- a1) niveau de puissance acoustique pondérée A total, L_{WA} , et le cas échéant, un spectre de fréquences L_{WA}^v , avec ses indicateurs de direction pour chacune des conditions de charge mises en place;
- b1) addition des niveaux de puissance acoustique obtenus pour que les combinaisons de charges soient garanties, à arrondir à l'entier le plus proche mais uniquement au cours de cette étape finale.

NOTE Un formulaire type pour la présentation des résultats est fourni à l'Annexe B.

**Légende**

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1 Traversées tertiaires | 7 Traversées BT |
| 2 Raidisseurs et consoles d'appui | 8 Conservateur |
| 3 Surface de rayonnement principale | D Écartement entre microphones (le cas échéant) |
| 4 Contour prescrit | h Hauteur de la surface de rayonnement principale |
| 5 Changeur de prise en charge | x Distance de mesure |
| 6 Traversées HT | |

Figure 1 – Trajet / positions de microphone types pour la mesure acoustique sur les transformateurs, à l'exclusion des dispositifs de refroidissement

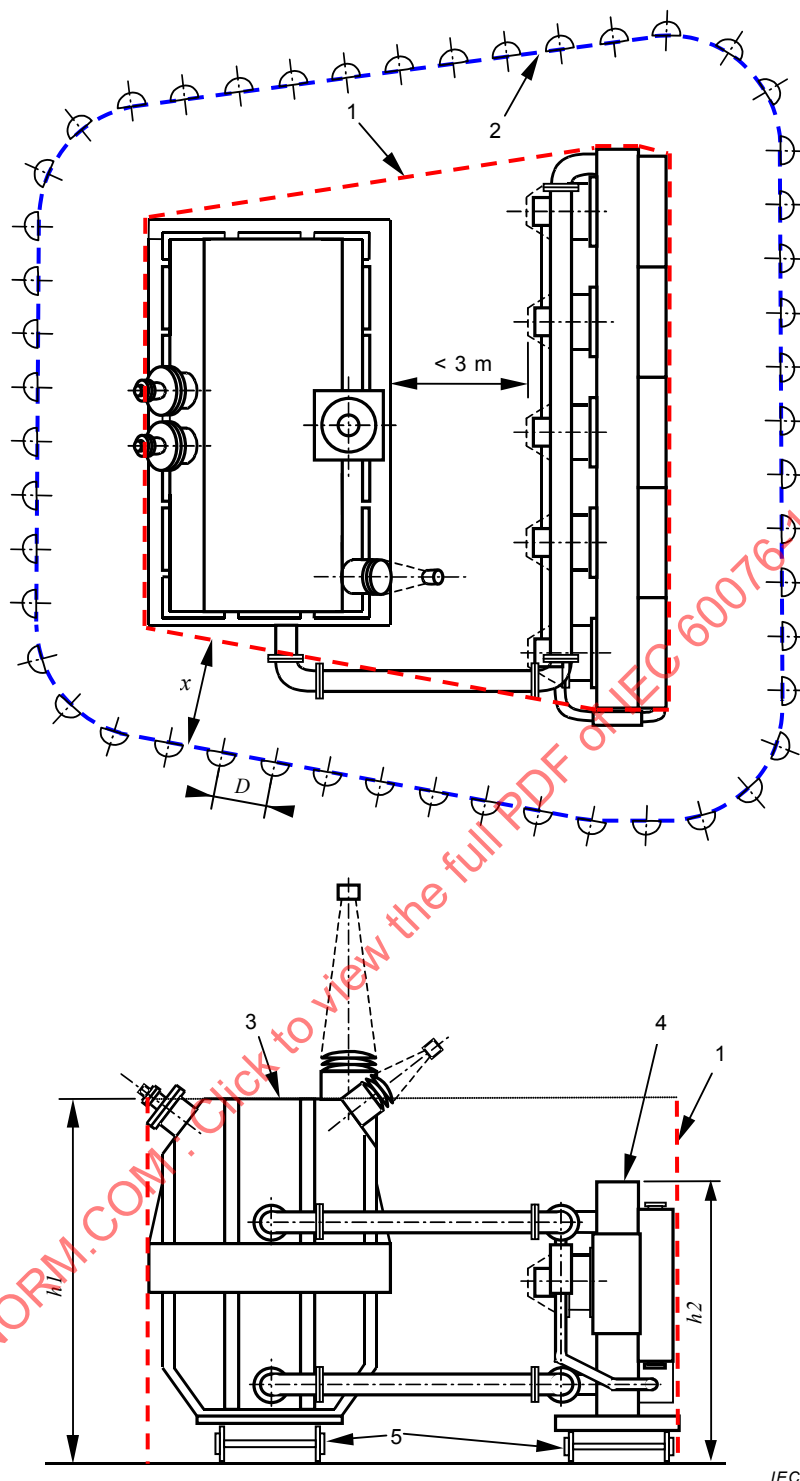


IEC

Légende

- | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 Ventilation forcée horizontale | 5 Boîte à câbles | 9 Ventilation forcée verticale |
| 2 Refroidissement à air naturel | 6 Contour prescrit | D Écartement entre microphones (le cas échéant) |
| 3 Piétement | 7 Surface de rayonnement principale | h Hauteur de la surface de rayonnement principale; la plus grande des valeurs $h1$ et $h2$ |
| 4 Cuve de transformateur | 8 Changeur de prises en charge | x Distance de mesure |

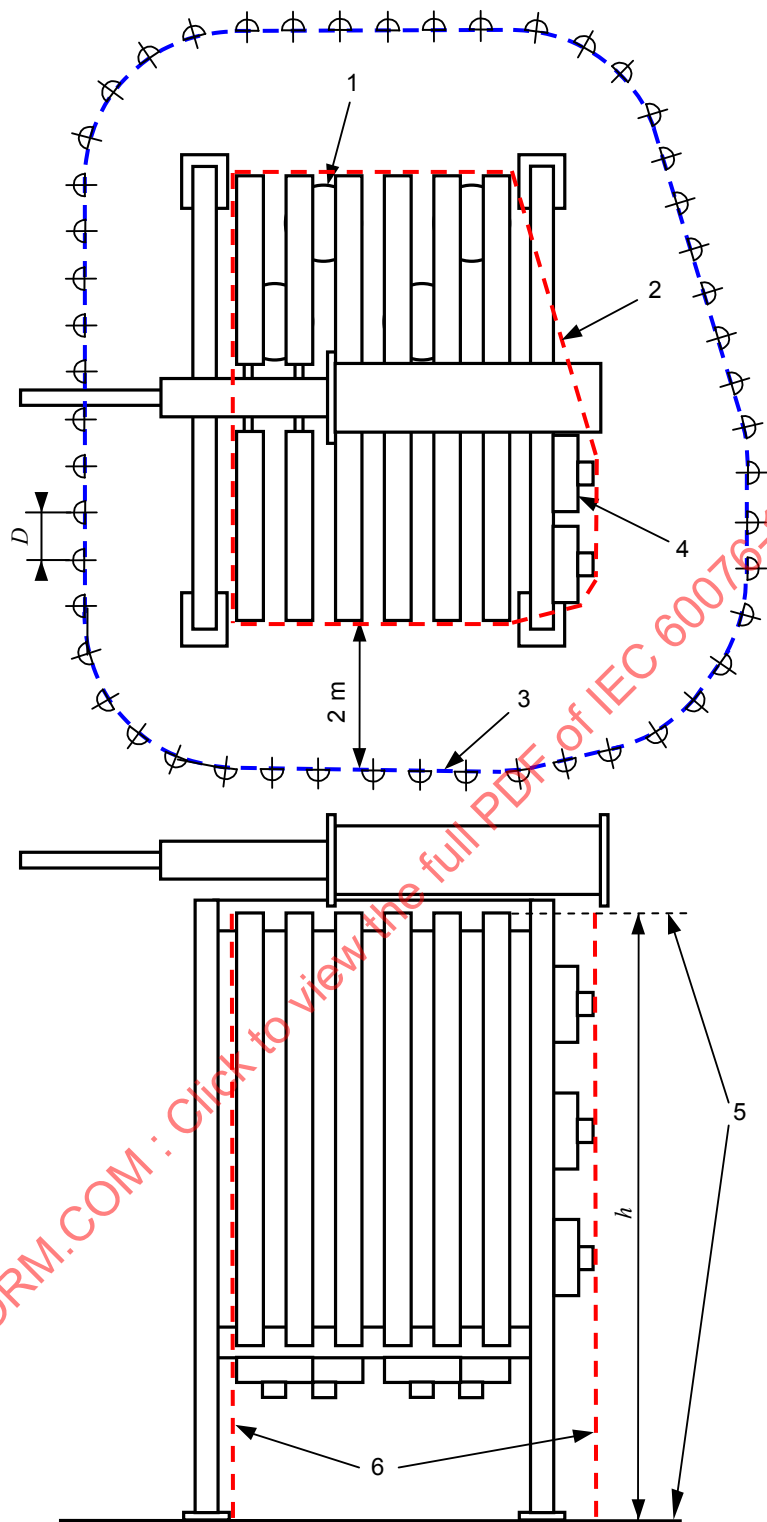
Figure 2 – Trajet / positions de microphone types pour la mesure acoustique sur les transformateurs ayant des dispositifs de refroidissement montés soit directement sur la cuve, soit sur une structure séparée espacée d'une distance < 3 m de la surface de rayonnement principale de la cuve



Légende

- | | |
|--|--|
| 1 Surface de rayonnement principale | 5 Structure de support telle que galets, palettes, engin de transport |
| 2 Contour prescrit | D Écartement entre microphones (le cas échéant) |
| 3 Cuve de transformateur | h Hauteur de la surface de rayonnement principale; la plus grande des valeurs $h1$ et $h2$ |
| 4 Refroidissement à ventilation forcée | x Distance de mesure |

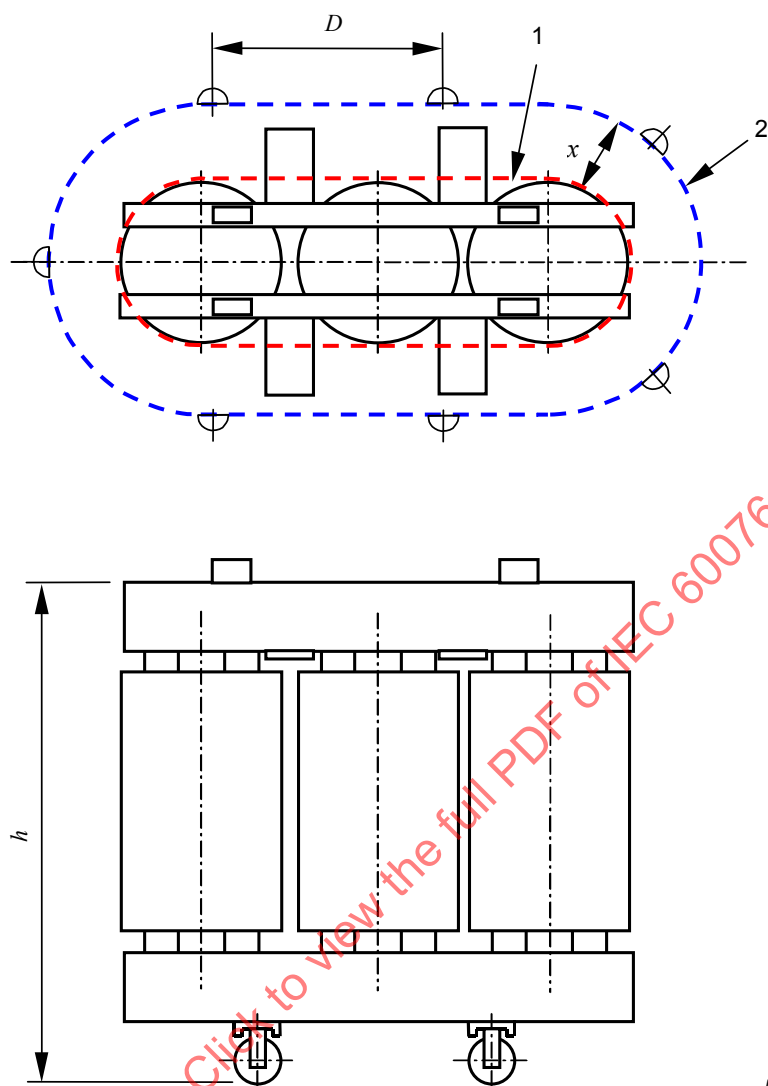
Figure 3 – Trajet / positions de microphone types pour la mesure acoustique sur les transformateurs ayant des dispositifs de refroidissement séparés, espacés d'une distance < 3 m de la surface de rayonnement principale de la cuve principale



Légende

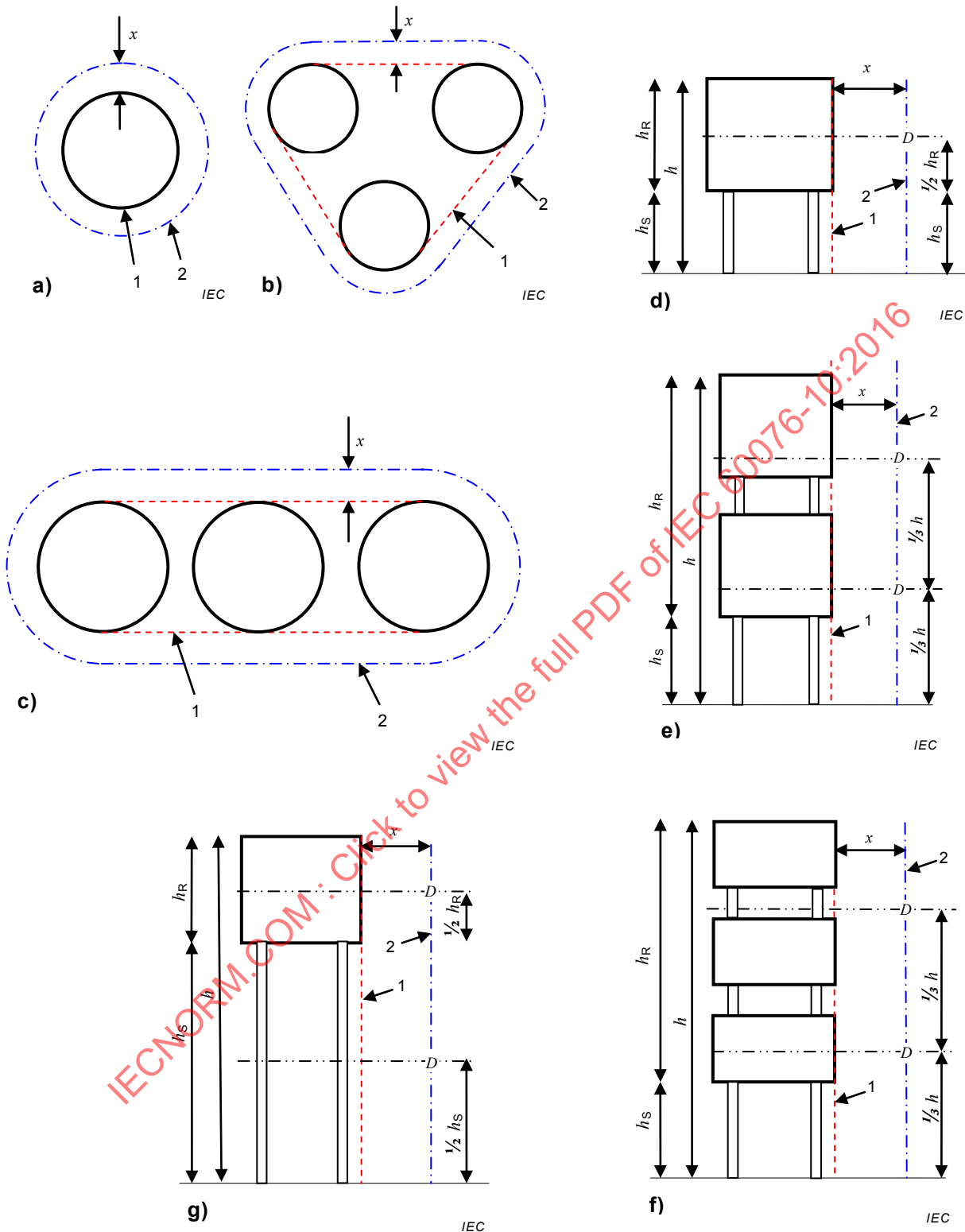
- | | |
|-------------------------------------|--|
| 1 Ventilation forcée verticale | 5 Limites horizontales de la surface de rayonnement principale |
| 2 Surface de rayonnement principale | 6 Limites verticales de la surface de rayonnement principale |
| 3 Contour prescrit | D Écartement entre microphones (le cas échéant) |
| 4 Ventilation forcée horizontale | h Hauteur de la surface de rayonnement principale |

Figure 4 – Trajet / positions de microphone type pour la mesure acoustique sur des dispositifs de refroidissement montés sur une structure séparée espacée d'une distance de ≥ 3 m de la surface de rayonnement principale du transformateur

**Légende**

- 1 Surface de rayonnement principale
- 2 Contour prescrit
- h Hauteur du noyau avec la structure
- D Écartement entre microphones (le cas échéant)
- x Distance de mesure

Figure 5 – Positions de microphone types pour la mesure acoustique sur des transformateurs de type sec sans enveloppes



Légende

- | | | | |
|-----|------------------------------------|-------|--|
| 1 | Surface de rayonnement principale | h_S | Hauteur de la structure de support |
| 2 | Contour prescrit | h_R | Hauteur de la bobine ou de la pile de bobines |
| D | Positions de microphone verticales | h | Hauteur de la bobine d'inductance – somme de h_R et de h_S |
| x | Distance de mesure | | |

Figure 6 – Surface de rayonnement principale et contour prescrit des bobines d'inductance dans l'air de type sec