

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Sound system equipment –
Part 22: Electrical and mechanical measurements on transducers**

**Équipements pour systèmes électroacoustiques –
Partie 22: Mesurages électriques et mécaniques sur transducteurs**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 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.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Sound system equipment –

Part 22: Electrical and mechanical measurements on transducers

Équipements pour systèmes électroacoustiques –

Partie 22: Mesurages électriques et mécaniques sur transducteurs

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 33.160.01

ISBN 978-2-8322-8815-3

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

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and abbreviated terms	9
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Abbreviated terms.....	9
4 Type description	9
5 Marking of terminals and controls	9
6 Physical characteristics	9
6.1 Dimensions	9
6.2 Mass.....	10
6.3 Connectors and cable assemblies.....	10
7 Conditions	10
7.1 Rated conditions	10
7.2 Climatic conditions.....	10
7.3 Standard measuring conditions	10
8 Test signals	11
8.1 General.....	11
8.2 Small-signal condition	11
9 Acoustical environment.....	11
9.1 General.....	11
9.2 Free-field conditions	11
9.3 Half-space, free-field conditions.....	12
9.4 Free-air condition.....	12
9.5 Target application conditions	12
9.6 Vacuum condition	12
9.7 Plane-wave tube condition	12
9.8 Non-acoustical measurement condition	12
10 Positioning of the radiator.....	13
10.1 Rated geometrical conditions	13
10.2 Target application condition	14
11 Measurement equipment and test results.....	14
12 Accuracy of the mechanical and electrical measurement	14
13 Mounting of the DUT.....	14
13.1 Mounting and acoustic loading of drive units.....	14
13.2 Mounting and acoustic loading of an electro-acoustic system.....	15
13.3 Requirements for laser vibrometry	15
14 Preconditioning.....	15
15 Rated ambient conditions	15
15.1 Temperature ranges.....	15
15.2 Humidity ranges.....	15
16 Electrical signals at transducer terminals.....	16
16.1 Rated maximum input value	16
17 Electrical input power	17

17.1	Real input power	17
17.2	Power dissipated in DC resistance	17
17.3	Power dissipated in rated impedance	18
17.4	Rated maximum input power	18
18	Electrical input impedance	18
18.1	Complex electrical impedance	18
18.2	Rated Impedance: characteristic to be specified	19
19	Vibration of the radiator surface	19
19.1	General	19
19.2	Displacement of a surface point r_r	19
19.3	Reference displacement	20
19.4	Peak and bottom displacement	21
19.5	DC displacement	21
19.6	Displacement transfer function	22
19.7	Accumulated acceleration level	22
20	Small-signal lumped parameters	23
20.1	General	23
20.2	Electrical parameters	24
20.3	Relative lumped parameters	25
20.4	Lumped mechanical parameters	28
20.5	Pure lumped mechanical parameters	31
20.6	Compliance versus frequency	31
20.7	Distributed mechanical parameters	32
20.8	Lumped acoustical parameters	36
21	Electro-acoustical efficiency	40
21.1	Reference efficiency	40
21.2	Passband efficiency	41
22	Sensitivity	41
22.1	Reference sensitivity	41
22.2	Passband sensitivity	42
23	Large-signal characteristics	42
23.1	Electrical and mechanical nonlinearities	42
23.2	Other loudspeaker nonlinearities	43
23.3	Asymmetry of the nonlinearity	43
23.4	Offset from reference rest position, x_{off}	45
23.5	Maximum reference displacement	46
24	Thermal characteristics	48
24.1	General	48
24.2	Increase in voice coil temperature	48
24.3	Effective thermal resistance	49
24.4	Thermal parameters	49
24.5	Thermal time constant of the voice coil	50
24.6	Thermal bypass factor	50
25	Time variance of the loudspeaker characteristics	50
25.1	Fatigue and load induced aging	50
26	Measurement uncertainty	52
Annex A (informative)	Practical application guide	54

Bibliography	55
Figure 1 – Rated conditions used to describe the geometry and position of the radiator in the coordinate system	13
Figure 2 – Equivalent electrical network representing the electrical input impedance using the LR2 model for the lossy inductance of an electro-dynamical transducer	23
Figure 3 – Analogous lumped parameter network representing the electrical, mechanical and acoustical elements at low frequencies	27
Figure 4 – Asymmetrical mass distribution function $D_M(y, z_0)$ in the mechanical system of a microspeaker that shifts the centre of gravity away from the pivot point	34
Figure 5 – Equivalent electrical network of a transducer operated in a baffle represented by pure mechanical elements and additional acoustical elements	38
Figure 6 – Equivalent electrical network representing the electrical input impedance of a vented loudspeaker system	39
Figure 7 – Nonlinear force factor characteristic of an electro-dynamical transducer	45
Table A.1 – Important characteristics and their application	54

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SOUND SYSTEM EQUIPMENT –

Part 22: Electrical and mechanical measurements on transducers

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 60628-22 has been prepared by technical area 20: Analogue and digital audio, of IEC technical committee 100: Audio, video and multimedia systems and equipment.

The text of this International Standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
100/3311/CDV	100/3424/RVC

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

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

A list of all parts in the IEC 60268 series, published under the general title *Sound system equipment*, can be found on the IEC website.

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

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

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

INTRODUCTION

Measurements of the electrical and mechanical state variables have become increasingly important for the following reasons:

- Maximum sound pressure output is limited by voice coil heating and transducer nonlinearities. The large signal behaviour of loudspeakers can be described by nonlinear and thermal models using lumped parameters. These physical characteristics are important for transducer design and system integration.
- Mechanical vibration of the diaphragm determines the radiated sound. The modal vibration of the radiator's surface can be predicted by numerical simulations (FEA) and directly measured by laser vibrometry. This data represents important transducer characteristics that can be used to design the desired directivity into the system's acoustical output.
- DSP plays an important role in active systems. Digital pre-processing of the audio stream requires reliable transducer property information to protect the transducer against thermal and mechanical overload and to actively compensate for linear and nonlinear distortion generated in the output signal.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

SOUND SYSTEM EQUIPMENT –

Part 22: Electrical and mechanical measurements on transducers

1 Scope

This part of IEC 60268 applies to transducers converting an electrical input signal into a mechanical or acoustical output signal. However, if the electrical input terminals and the surface of the radiator are accessible, this document can also apply to passive and active sound systems such as loudspeakers, headphones, TV-sets, multi-media devices, personal portable audio devices, automotive sound systems and professional equipment. This document describes only electrical and mechanical measurements that help assess the transfer behaviour of the device under test (DUT). This includes operating the DUT in both the small- and large-signal domains. The influence of the target application's acoustical boundary conditions (e.g. car interior) can also be considered in the physical evaluation of the sound system. Perception and cognitive evaluations of the reproduced sound and the impact of perceived sound quality are outside the scope of this document.

NOTE This document does not apply to microphones and other sensors. Implementation of this document does not require access to the sound pressures generated in the near or far fields of the radiator. Directivity and other characteristics describing the electro-acoustical transfer properties are described in IEC 60268-21, which covers acoustical measurements. The practical application of the measurements for research and development (R&D), end-of-line testing (QC) and evaluation in the final target application (TA) is discussed in Annex A.

2 Normative references

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

IEC 60263:1982, *Scales and sizes for plotting frequency characteristics and polar diagrams*

IEC 60268-1:1985, *Sound system equipment – Part 1: General*

IEC 60268-2:1987, *Sound system equipment – Part 2: Explanation of general terms and calculation methods*

IEC 60268-11:1987, *Sound system equipment – Part 11: Application of connectors for the interconnection of sound system components*

IEC 60268-12:1987, *Sound system equipment – Part 12: Application of connectors for broadcast and similar use*
IEC 60268-12:1987/AMD1:1991

IEC 60268-21:2018, *Sound system equipment – Part 21: Acoustical (output-based) measurements*

IEC 62458:2010, *Sound system equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of large signal parameters*

IEC 62459:2010, *Sound system equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of suspension parts*

ISO 3:1973, *Preferred numbers – Series of preferred numbers*

ISO/IEC GUM:1995, *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*

3 Terms, definitions and abbreviated terms

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

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

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

3.1 Terms and definitions

3.1.1

linear behaviour

behaviour of the DUT at small amplitudes where the relationship between input and output signal can be modelled by a linear system and described by a linear transfer function

3.1.2

reference unit

DUT having measured properties representative of units in the sample lot passing the end-of-line test

3.2 Abbreviated terms

DUT device under test

SPL sound pressure level

FEA finite element analysis

FT Fourier transform

4 Type description

The type description shall be provided by the manufacturer, including the following information:

- transduction principle (e.g. electro-dynamical, capacitive, electro-magnetic transducer);
- system description including operation principle (e.g. the number of the transducers used in the loudspeaker system);
- acoustical loading (e.g. horn loading and enclosure types, such as bass reflex, column, line array, ...);
- power amplification (e.g. maximum output power, class type, minimum load impedance, ...);
- DSP processing (e.g. equalizer, active protection), if any.

5 Marking of terminals and controls

The terminals and controls shall be marked in accordance with IEC 60268-1 and IEC 60268-2.

6 Physical characteristics

6.1 Dimensions

The outer dimensions of the DUT shall be specified.

6.2 Mass

The total mass of the DUT when ready for use shall be specified.

6.3 Connectors and cable assemblies

Cable assemblies and connectors shall be in accordance with IEC 60268-11 and IEC 60268-12.

NOTE In some circumstances, the connectors that are currently standardized are unsuitable and the use of other types is unavoidable.

7 Conditions

7.1 Rated conditions

Standard measuring conditions are defined in 7.3. To obtain the actual conditions for the measurement, some values (known as "rated conditions") shall be taken from the manufacturer's specification.

These rated conditions are not subject to measurement, but they constitute the basis for performing the measurements to determine the other characteristics.

The following rated conditions are of this type and shall be stated by the manufacturer:

- rated maximum input voltage (or the rated maximum sound pressure level);
- rated maximum input power;
- evaluation point of the reference displacement;
- rated frequency range;
- rated impedance;
- rated climate conditions.

7.2 Climatic conditions

7.2.1 Conditions for normal testing

IEC 60268-1 states that tests should be carried out in the following environment in order to prevent the influence of temperature and humidity that can affect the properties of the drive unit suspensions:

- ambient temperature T_{norm} : 15 °C to 35 °C;
- relative humidity: 25 % to 75 %;
- air pressure: 86 kPa to 106 kPa.

7.2.2 Conditions for climatic testing

The manufacturer shall specify the ambient temperature T_A and other climatic conditions under which the DUT is operated during thermal testing in accordance with 25.1.4.

7.3 Standard measuring conditions

The DUT shall be understood to be under standard measuring conditions if all of the following conditions are specified and implemented:

- a) the DUT to be measured is mounted in accordance with Clause 13;
- b) the acoustical environment is specified and selected from those given in Clause 9;

NOTE The environment (e.g. car interior) might influence the acoustical load and the mechanical state of the transducer. If the amplitude of the stimulus used in the measurements is adjusted based on the rated maximum (output) sound pressure level L_{MAX} in accordance with IEC 60268-21, the acoustical environment is considered.

- c) unwanted electrical, mechanical or acoustical signals (e.g. noise) generated by other sources shall be kept at the lowest levels possible because their presence can obscure low-level signals. Data related to signals that are less than 20 dB above the noise level in the frequency band being considered shall be discarded or marked as corrupted by noise;
- d) the DUT is acclimatized to the normal climatic conditions (normal ambient temperature $T_A = T_{\text{norm}}$) in accordance with 7.2.1;
- e) additional cooling periods are required between successive tests if the amplitude compression $C(f) > 0,5$ dB is in accordance with IEC 60268-21;
- f) the DUT is supplied with a test signal with specified properties (spectrum, duration, etc.) in accordance with Clause 8 at a specified RMS input value $\tilde{u}$ for the rated frequency range in accordance with Clause 16;
- g) attenuators, equalizers, dynamics and any other active control elements shall be set to their "normal" position as stated by the manufacturer. If other positions are chosen, for example, those providing a maximally flat frequency response or minimum attenuation, they shall be specified;
- h) measuring equipment suitable for determining the wanted characteristics is connected in accordance with Clause 11.

8 Test signals

8.1 General

Some measurements can be performed by using any audio signal $s(t)$ as an input signal (stimulus) applied to the electro-acoustical device under test (DUT) while other measurement techniques use test signals as specified in IEC 60268-21.

8.2 Small-signal condition

The device under test shall be excited by a stimulus $s(t)$ generating the voltage $u(t) = \alpha \tilde{u}_{\text{max}} s(t)$ at the terminals scaled by the maximum input value $\tilde{u}_{\text{max}}$ and scaling factor α . The rated maximum input value $\tilde{u}_{\text{max}}$ shall be specified by the manufacturer of the DUT in accordance with 16.1. The scaling factor α shall be less than 0,1 to ensure negligible heating of the voice coil in electro-dynamic transducers ($\Delta T_v < 5$ K) and linear behaviour of the device under test. The nonlinear distortion components measured through the excitation of a single tone, two tone or multitone stimulus shall be 40 dB below the fundamental signal components.

9 Acoustical environment

9.1 General

Electrical and mechanical measurements shall be made under one of the conditions in 9.2 to 9.8. The acoustical environment used for testing shall be stated.

9.2 Free-field conditions

An environment, which fulfills free-field conditions in full space in accordance with IEC 60268-21, can be used for electrical and mechanical measurements. If the environment (e.g. anechoic room at low frequencies) does not fulfil these free-field conditions over the entire frequency range of the measurement, the manufacturer shall state the valid frequency range.

9.3 Half-space, free-field conditions

An environment, which fulfills free field condition in a half space in accordance with IEC 60268-21 can be used for electrical and mechanical measurements. These conditions shall be satisfactorily met with a reflecting plane of sufficient size.

If the environment (e.g. half space anechoic room at low frequencies) does not fulfil these half-space free field conditions over the entire frequency range of the measurement, the manufacturer shall state the valid frequency range.

9.4 Free-air condition

Acoustical conditions that approach free-field condition over the frequency range of interest shall be used. Other environments shall be considered satisfactory when the reflected sound components are sufficiently suppressed to ensure an accuracy of $\pm 5\%$ in the measured amplitude and phase values of the electrical input impedance curve at the specified frequency. If the environment (e.g. a small measurement room at low frequencies) does not fulfil these conditions over the entire frequency range of the measurement, the manufacturer shall state the valid frequency range.

NOTE The free-air condition is usually applied to transducers operated without enclosure but firmly clamped by a fixture to measure the electrical and mechanical state of the transducer.

9.5 Target application conditions

Acoustical conditions that correspond with the final target application of the device under test (e.g. sound system mounted in a car, horn compression driver mounted on a horn).

9.6 Vacuum condition

9.6.1 General

Acoustical conditions which approach those of no air.

9.6.2 Method of measurement

Transducer electrical impedance are measured and stored. The transducer is then placed in a vacuum chamber and the evacuation is started. Note if any outgassing from glues or plastic materials occurs – the vacuum will be drawn down slower than expected. Transducer electrical impedance is then measured and stored. The vacuum is then released to restore normal atmospheric pressure. The transducer electrical impedance is measured and stored, and the data is then compared to the initial stored measurement to see if any changes have occurred due to material(s) changes from outgassing.

9.7 Plane-wave tube condition

A plane-wave tube is intended to provide an approximately constant acoustical impedance with a value $\rho_0 c$ identical to the specific impedance of air.

NOTE Plane-wave tubes are used to provide a standard load for the testing of compression drivers, see AES-11d-2012 [1]¹.

9.8 Non-acoustical measurement condition

Electrical and mechanical measurements can be performed in a room of sufficient size (typically $> 8 \text{ m}^3$). The size of the room depends on the space required around the DUT to avoid any additional acoustical loading of the DUT and to ensure stable climate conditions during the test.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

10 Positioning of the radiator

10.1 Rated geometrical conditions

10.1.1 General

The position and orientation of the diaphragm, cone or other kind of radiator used in the DUT shall be stated using the radiator's reference point $\mathbf{r}_{r,ref}$, the normal vector $\mathbf{n}_r$ and the orientation vector $\mathbf{o}_r$ as illustrated in Figure 1.

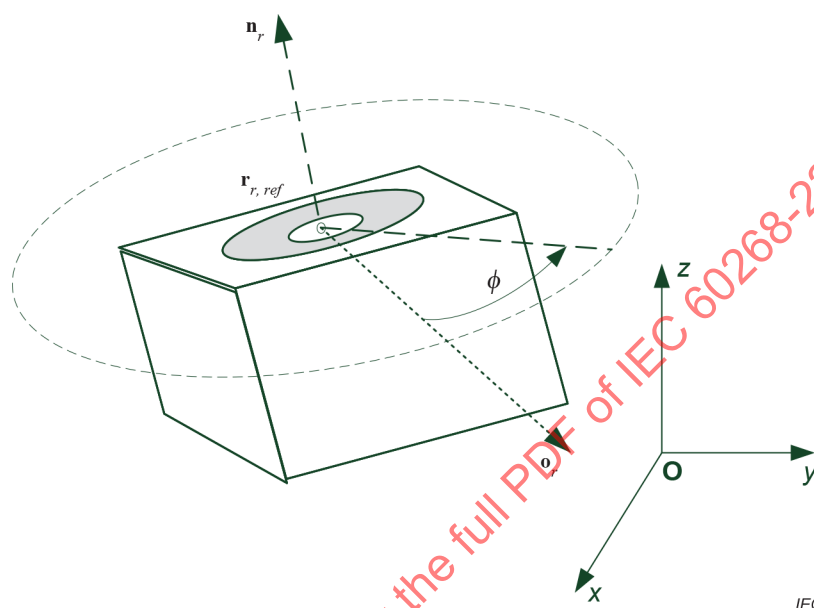


Figure 1 – Rated conditions used to describe the geometry and position of the radiator in the coordinate system

10.1.2 Reference plane and normal vector

The reference plane with the normal vector $\mathbf{n}_r$ shall be used to define the reference axis and the reference point $\mathbf{r}_{r,ref}$.

NOTE For symmetrical structures, the reference plane is usually parallel to the radiating surface at the rest position of the radiator. For asymmetrical structures, the reference plane is better indicated by means of a diagram.

10.1.3 Reference point

The reference point $\mathbf{r}_{r,ref}$ shall be a point on the radiator's surface intersecting the reference plane. The position of the reference point $\mathbf{r}_{r,ref}$ shall be specified by the manufacturer.

NOTE For symmetrical structures, reference point $\mathbf{r}_{r,ref}$ is usually the point of axial symmetry of the radiator within the reference plane. For asymmetrical structures, the reference point is better indicated by means of a diagram.

10.1.4 Orientation vector

The orientation vector $\mathbf{o}_r$ defines the orientation of the radiator within the reference plane and the direction of the azimuthal angle ϕ in spherical coordinates.

NOTE The preferred orientation vector places the reference point $\mathbf{r}_r$ at the origin O of the coordinate system, pointing the normal vector $\mathbf{n}_r$ of the reference plane into the z -direction while the polar angle $\theta = \theta$ turns the audio system in such a way that the orientation vector $\mathbf{o}_r$ (e.g. top of the enclosure) points into the x -direction.

10.2 Target application condition

The position and orientation of the radiator with respect to the target environment (car interior, pinna adaptor with ear canal simulator, etc.) shall be described by means of a diagram appended to the measurement results.

11 Measurement equipment and test results

Graphical results shall conform to the preferred aspect ratios in IEC 60263.

Frequency data, if provided in addition to the graphs, shall be at the ISO R40 preferred frequencies, unless otherwise stated.

The measurement of the voltage at the terminals of the device under test shall be made using sensing wires in addition to the two driving wires (four wire technique) so that negligible current is generated in the sensing wire.

NOTE The resistance of the cables and current sensors (e.g. measurement resistor) can affect the accuracy of the impedance measurement and the input voltage at the device under test.

12 Accuracy of the mechanical and electrical measurement

Probable error sources in both the instrumentation and measuring environment shall be identified, quantified and their contribution shall be specified. Uncertainties in the position and calibration of the sensors shall be stated. This information shall be included with the test report.

13 Mounting of the DUT

13.1 Mounting and acoustic loading of drive units

The performance of the drive unit (transducer) is determined by the properties of the unit itself and its acoustic loading. The acoustic loading depends upon the mounting arrangement, which shall be clearly described in the presentation of the results.

One of the following types of mounting shall be used:

- a) half-space free-field condition generated by mounting the transducer flush with a plane reflecting surface according conditions defined in 9.3. Half-space loading for transducers is preferred;
- b) a standard baffle with a plane front surface that is acoustically reflecting, as specified in IEC 60268-21;
- c) a standard measuring enclosure (type A or type B) as specified in IEC 60268-21, generating a defined rear air volume and radiation condition at the front of the transducer;
- d) a loudspeaker driver comparison chamber as specified in AES X223 [2];
- e) a test cabinet generating a defined air load and radiation condition at the front of the transducer for end-of-line testing and relative measurements;

NOTE An additional chamber located at the rear side of the transducer can be used to provide additional noise isolation or it could be used to consider the influence of the air volume of a sealed box in the target application.

- f) a defined horn, coupler or other kind of wave guide that couples the radiating surface of the transducer in the target application to the surrounding sound field;
- g) a plane wave tube as specified in 9.7;
- h) the transducer is operated in free air and is firmly clamped by a fixture to reduce the vibration of the frame and magnet;

- i) the transducer is operated in vacuum and is firmly clamped by a fixture to measure the properties of the transducer without air load. The lumped parameters of the transducer measured under this condition use letter "s" instead of the "d" as a suffix.

13.2 Mounting and acoustic loading of an electro-acoustic system

Electro-acoustic systems are usually measured without an additional baffle. If the manufacturer specifies a special type of mounting for the loudspeaker system, this shall be used for the measurement. The mounting method used shall be specified with the results.

13.3 Requirements for laser vibrometry

The measurement of the mechanical vibration on the target surface (radiator, enclosure, etc.) requires a fixed clamping of the device under test relative to the sensor. The vibration at the clamping point shall be at least 20 dB below the vibration on the target surface. It is recommended to operate the radiator in the vertical position where the normal vector $\mathbf{n}_r$ is perpendicular to the gravity. This will avoid any bias in the resting position of the radiator.

14 Preconditioning

Temporary or permanent changes may take place when a signal generating high displacement is applied to the new DUT for the first time. Sufficient preconditioning shall be performed according to the intended use of DUT in the field (e.g. application bandwidth and enclosure type).

NOTE For example, the suspension of a driver is subject to significant changes in its mechanical properties. The DUT also suffers from the effects of voice coil heating and cooling in electro-dynamic transducers.

The DUT shall be preconditioned before measurements are performed by applying a broadband signal at half the maximum input value $\tilde{u}_{\max}$ in accordance with IEC 60268-21 for at least one hour (3h recommended for woofers).

Before proceeding with the measurement, the period of preconditioning shall be followed by a recovery period of at least one hour to ensure that the temperatures of the internal parts are re-acclimatized to the ambient conditions defined in 7.3.

15 Rated ambient conditions

15.1 Temperature ranges

15.1.1 Performance limited temperature range

The temperature range over which the variation of the characteristics of the DUT shall not exceed the specified tolerances.

15.1.2 Damage limited temperature range

The temperature range that, if exceeded during previous product life, may result in permanent changes in the operating characteristics of the DUT. These temperature thresholds shall be specified separately for operation and storage.

15.2 Humidity ranges

15.2.1 Relative humidity range

The relative humidity range over which the variation of the characteristics of the DUT shall not exceed the specified tolerances.

15.2.2 Damage limited humidity range

The relative humidity range that, if exceeded during operation or storage, may result in permanent changes in the operating characteristics of the DUT.

16 Electrical signals at transducer terminals

16.1 Rated maximum input value

16.1.1 Conditions to be specified

The manufacturer specifies the rated maximum input value $\tilde{u}_{\max}$ defined as the RMS value

$$\tilde{u}_{\max} = \left(\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u^2(t) dt \right)^{1/2}$$

of the measured voltage signal $u(t)$ at the transducer terminals under standard measuring conditions, in accordance with 7.3, using a specified broadband stimulus limited by the frequencies f_l and f_u of the rated frequency band within the excitation time $T_s = 1$ s.

The properties of the broadband stimulus $s(t)$, such as the spectral properties, the crest factor and the lower and upper limits of the rated frequency band, shall be stated by the manufacturer.

NOTE The rated maximum input value $\tilde{u}_{\max}$ can be determined either by a direct measurement or indirectly derived from the rated maximum sound pressure value $\tilde{p}_{\max}(r_e)$, as specified in IEC 60268-21.

16.1.2 Direct measurement

16.1.2.1 Test equipment

The following equipment or equivalent shall be included in the chain of measurement:

- a pink noise generator and/or multi-tone generator in accordance with IEC 60268-21;

NOTE 1 A DUT intended for full-band audio signals can be tested using a broadband stimulus such as a multi-tone complex with sufficient resolution (at least ten lines per octave), a pink noise signal or any noise like signal such as the simulated programme signal in accordance with IEC 60268-21. For a DUT with a small usable bandwidth in the target application (e.g. subwoofer), a sufficiently good approximation of the "broadband" signal can be a sinusoidal signal, a Hann burst signal or a narrow band noise in accordance with Clause 8.

- a weighting network to obtain the noise signal in accordance with IEC 60268-21;
- a clipping network to implement a specified crest factor;
- an optional power amplifier for passive electro-acoustical DUT.

The amplitude of the frequency response between the input of the optional power amplifier and the voltage at the input terminals of a passive DUT shall be constant to within $\pm 0,5$ dB in the frequency range from 20 Hz to 20 kHz. The clipped noise at the terminals of the loudspeaker under test shall have a frequency distribution as specified in IEC 60268-21 and a peak-to-RMS ratio of between 1,8 and 2,2. The optional power amplifier shall have an output impedance not greater than 1/3 of the rated impedance of the passive DUT. The amplifier shall be capable of supplying the passive DUT without limiting the peak sinusoidal voltage. The peak voltage shall be at least twice the voltage of the test noise.

16.1.2.2 Test procedure

- a) The manufacturer shall define a test value $\tilde{u}_{\text{test}}$ of the broadband stimulus in the rated frequency band that is used for further testing. This value considers the intended application and behaviour of the DUT (e.g. permissible heating and maximum mechanical excursion) so that damage to the DUT during the following test can be avoided.

NOTE 2 The permissible heating can be checked by measuring the increase of voice coil temperature in accordance with 24.2. The maximum mechanical excursion can be measured in accordance with 23.5.

- b) The DUT shall be placed in a room as specified in 9.8 with climate conditions as specified in 7.2.
- c) The DUT shall be tested under a specified climatic condition for a continuous period of 100 h at the test value $\tilde{u}_{\text{test}}$ of the input stimulus.

NOTE 3 Since the test value $\tilde{u}_{\text{test}}$ is constant during the 100 h test, the heating of the DUT will cause thermal compression of the acoustical output and the sound pressure level will fall below the rated maximum sound pressure $\tilde{p}_{\text{max}}(r_e)$.

- d) Immediately after the test, the DUT shall be stored under climate conditions that would normally exist in ordinary rooms or laboratories. Unless otherwise specified, the recovery period shall be 24 h.
- e) At the end of the recovery period, the electrical, mechanical and acoustical characteristics of the DUT are measured. If the measured values are within the tolerances of the values stated in the data sheet, the DUT may be considered to have fulfilled the requirement of this test and the test value $\tilde{u}_{\text{test}}$ is assigned to the rated maximum input voltage $\tilde{u}_{\text{max}}$. The permissible shift of the resonant frequency shall be defined in the data sheet.

If the DUT has been damaged during this test or the measured characteristics are outside the defined tolerances, the test shall be repeated using a new DUT at a reduced test value $\tilde{u}_{\text{test}}$ until the rated maximum input value $\tilde{u}_{\text{max}}$ is determined.

17 Electrical input power

17.1 Real input power

The real input power is the product of instantaneous voltage $u(t)$ and current $i(t)$

$$P_{\text{REAL}}(t) = \frac{1}{T} \int u(t+\tau) i(t+\tau) d\tau$$

averaged over a time T . The integrator shall be implemented by a low-pass filter having a cut-off frequency of 1 Hz.

NOTE The power $P_{\text{REAL}}(t)$ according IEC 60050-151 considers all losses in the transducer represented by the real part of the electrical input impedance including nonlinear and time varying properties. This characteristic is required to model the thermal dynamics of the transducer and the heat transfer to the environment.

17.2 Power dissipated in DC resistance

The input power dissipated in $P_{\text{Re}}(t) = \tilde{i}^2(t) R_{\text{E}}(t)$ is product of squared RMS value of the input current $i(t)$ and the instantaneous DC resistance $R_{\text{E}}(t)$.

NOTE This power $P_{\text{Re}}(t)$ is a useful characteristic for modelling the heating of the voice coil. The power dissipated in $R_{\text{E}}(t)$ does not consider the heating of the pole plates by eddy current and any mechanical or acoustical losses.

17.3 Power dissipated in rated impedance

The power dissipated in the rated impedance $P_{E,N}(t) = \tilde{u}^2(t) / Z_N$ is calculated by dividing the squared RMS voltage at the input terminals by the rated impedance Z_N in accordance with 18.2.

NOTE This characteristic $P_{E,N}$ is a rough approximation of real input power that neglects the frequency dependency of the input impedance and any nonlinear and time varying properties. This characteristic is required to describe the available electric input power provided by an amplifier with low output impedance (voltage source).

17.4 Rated maximum input power

The rated maximum noise power $P_{\max} = \tilde{u}_{\max}^2(t) / Z_N$ is calculated by dividing the squared value of the rated maximum input voltage $\tilde{u}_{\max}$ by the rated impedance Z_N in accordance with 18.2.

NOTE This characteristic $P_{\max}$ is a rough approximation of real input power that neglects the frequency dependency of the input impedance and any nonlinear and time variant properties.

18 Electrical input impedance

18.1 Complex electrical impedance

18.1.1 General

The electrical input impedance is the linear transfer function $Z_E(f) = U(f) / I(f)$ between the input current $i(t)$ and terminal voltage $u(t)$. The electrical impedance in accordance with IEC 60050-151 shall be measured under small signal conditions in accordance with 8.2.

NOTE The impedance measured with a high-amplitude stimulus can be affected by the nonlinear, visco-elastic and thermal properties of the DUT as discussed in Klippel [3].

The electrical input impedance shall be measured in the small signal domain by using an attenuated stimulus (scaling factor $\alpha \leq 0,1$) or by performing measurements at reduced levels until the observed response is unchanged, verifying linear conditions.

18.1.2 Method of measurements

The transducer is excited by a broadband stimulus $s(t)$ generating the voltage $u(t) = \alpha \tilde{u}_{\max} s(t)$ at the terminals scaled by the maximum input value $\tilde{u}_{\max}$ and a scaling factor α to ensure small signal conditions in accordance with 8.2. To measure at sufficient spectral resolution and SNR in the small-signal domain, it is recommended to use a sparse multi-tone complex stimulus in accordance with IEC 60268-21. This signal shall have at least 8 tones per octave for frequencies $f < f_s/2$ and $f > 2f_s$, and at least 24 tones per octave in the frequency band $f_s/2 < f < 2f_s$. The properties of the stimulus $s(t)$, the measurement time T_s and either the RMS-value $\tilde{u} = \alpha \tilde{u}_{\max}$ or the scaling factor α shall be stated by the manufacturer.

- The complex amplitudes of the spectral components $U(f) = F\{u(t)\}$ are determined by using a time-frequency transformation such as the Fourier transform $F\{\}$.
- The input current $i(t)$ is measured and the complex amplitudes of the spectral component $I(f) = F\{i(t)\}$ are calculated. If the total nonlinear distortion found in the measured current signal at the resonance frequency f_s is larger than 3 %, the measurement shall be repeated with reduced scaling factor α .

NOTE Time windowing is unnecessary if the length of the multi-tone stimulus corresponds with the length of the FT. The resulting fundamental components appear at the excitation frequencies while spectral components located on the other frequencies reveal nonlinear distortion and noise.

c) The complex impedance is calculated by

$$\underline{Z}_E(f_{\text{fund}}) = \frac{\underline{U}(f_{\text{fund}})}{\underline{I}(f_{\text{fund}})}$$

providing the magnitude response $|\underline{Z}_E(f_{\text{fund}})|$ and the phase response $\varphi_E(f_{\text{fund}}) = \arg(\underline{Z}_E(f_{\text{fund}}))$ at the fundamental frequencies f_{fund} excited by the stimulus.

To avoid a flattening of the resonance peak which affects the accuracy of the small signal parameters (mechanical quality factors), smoothing shall not be applied to the measured impedance curve.

18.2 Rated Impedance: characteristic to be specified

The rated impedance Z_n is the value of a pure resistance to be substituted for the loudspeaker's complex input impedance $\underline{Z}_E(f)$. The lowest value of the modulus of the impedance $|\underline{Z}_E(f)|$ in accordance with 18.1 in the rated frequency range shall not be less than 80 % of the rated impedance Z_n . The rated impedance Z_n shall be stated by the manufacturer when defining the available electric power of the source.

19 Vibration of the radiator surface

19.1 General

Measurement of the vibration of the radiator's surface provides a deeper insight into the mechanical system and the radiated sound. A non-contacting sensor (e.g. laser vibrometer) shall be used to measure the motional state variable (displacement, velocity or acceleration) in the direction of the normal vector $\mathbf{n}_r$. This ensures that there is no undesirable mass loading affecting the DUT.

A proximity sensor that yields the instantaneous position of the measurement point is recommended to reveal the geometry of the surface and the displacement from the rest position.

This is important for reliably detecting the positive and negative peak displacement and the DC displacement dynamically generated by the transducer's nonlinearities. Velocity and acceleration can be calculated by differentiation of the time signals. Sensors measuring velocity or acceleration directly generally provide better SNR at higher frequencies. Care shall be taken to ensure that the displacement signal calculated by integration does not contain significant errors due to noise or optical problems in the detected velocity or acceleration signal.

19.2 Displacement of a surface point $\mathbf{r}_r$

19.2.1 General

The displacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ at surface point $\mathbf{r}_r$ on the radiator's surface is measured in the direction of the normal vector $\mathbf{n}_r$ while applying a specified stimulus $s(t)$ to the input of the DUT. The position of the surface point is described by coordinates having their origin at the reference surface point $\mathbf{r}_{r,\text{ref}}$. The orientation vector $\mathbf{o}_r$ points into the direction of the x axes for Cartesian coordinates and corresponds to a 0° angle using polar coordinates.

19.2.2 Method of measurements

- a) The DUT is placed under standard measuring conditions in 7.3 while considering the requirements of the laser vibrometry, in accordance with 13.3.
- b) The vibrometer's sensor is focused on the measurement point r_r located on the radiator's surface. Proper clamping of the DUT and positioning of the vibrometer ensures that the sensor is always working at the optimal operating point and there are no unwanted relative movements between the DUT (frame, enclosure,...) and the sensor. It can be necessary to treat the surface area of the radiator to be measured with a diffuse reflecting material. For a single point measurement, white correction ink is recommended. In the case of a complete scan of the radiator's surface, a spray penetrant of suspended inert white powder in a quick-drying solvent is recommended (e.g. Ardox 9D1B). To avoid affecting the mechanical vibrations of the radiator, the application of the reflecting material should be minimal.

If the entire surface of the radiator has been treated, compare the fundamental resonance frequency f_s of the DUT derived from the electrical impedance $Z_E(f)$ measured before and after the treatment. If the change of the resonance frequency exceeds 1 %, the additional mass of the treatment shall be subtracted from the measured mass.

- c) Prior to the measurement, the displacement signal is nulled by subtracting the measured value at the rest position of the radiator's surface when no signal is applied to the DUT's input from the sensor output.
- d) The sensor output signal shall be investigated for errors (e.g. spikes) caused by optical scanning problems at the surface of the radiator. Corrupt data shall not be used for further analysis or for the calculation of characteristics.

NOTE Optical scanning errors can be detected reliably by using a triangulation laser. Two measurements are performed at the same point r_r . The first measurement is performed normally while the second measurement is performed after the distance of the laser is slightly changed along the normal vector n_r . The small change in the measurement distance between the triangulation laser and the measurement point r_r changes the observation angle of the sensor without affecting the position of the laser point on the surface. The optical scanning errors become evident in the correlation between the two measurements.

19.3 Reference displacement

19.3.1 General

The reference displacement $x(t)$ is a state variable of the lumped parameter model. The derivative of the reference displacement (velocity) multiplied with an electro-mechanical transduction factor T_{Bl} corresponds to a back EMF that can also be determined by an electrical measurement.

NOTE In electrodynamic transducers the reference displacement $x(t)$ corresponds to the mean voice coil displacement and the transduction factor (also called force factor) can be expressed by the Bl -product mean induction B seen by the wire length l (see Beranek [4]).

In woofers and midrange transducers, the displacement of the central area of the radiator is close to the reference displacement. In general, multiple measurements on the radiator's surface are carried out to calculate the reference displacement.

19.3.2 Methods of measurement

Depending on the properties of the radiator and the suspension system of the transducer, the reference displacement can be determined by different techniques:

- a) The reference displacement $x(t) = x(t, r_{r,ref})$ shall be measured at the reference point $r_{r,ref}$ if all of the following conditions are fulfilled:
 - the radiator has an axially symmetric geometry and the reference point $r_{r,ref}$ is in the centre of the radiator's surface;
 - the central area of the radiator (enclosed by the voice coil in electro-dynamic transducers) stays sufficiently rigid at the frequencies investigated;

- the relative level L_{rock} of rocking modes, as defined in 20.7.3, is less than -15dB ;

NOTE 1 For woofers, midrange drivers and other axial symmetrical transducers using a rigid cone, surround and spider in their mechanical suspension, the displacement of the voice coil is similar to the displacement of the radiator's central point at low frequencies. However, micro-speakers, tweeters, compression drivers, headphone drivers and other transducers generate modes on the radiator's surface (e.g. rocking modes defined in 20.7.3) that prevent the central point from representing the mean vibration of the voice coil. The deviations in the measured displacement at the central point for these devices can affect the accuracy of the calculated mechanical parameters.

- If one or more of the conditions in a) above are not met, the reference displacement $x(t)$ shall be determined by averaging the displacements measured at a minimum of 4 points $\mathbf{r}_r$ equally spaced from the pivot point (crossing point of the nodal lines of the two rocking modes), where $x(t) = \overline{x(t, \mathbf{r}_r)}$.
- If the position of the pivot point is not known and transducer (e.g. micro-speaker) generates a relative rocking level $L_{\text{rock}} > -3\text{dB}$, the reference displacement shall be calculated as the transversal mode ($n = 0$) in a modal analysis as defined in 20.7.2 based on a minimum of 4 measurement points $\mathbf{r}_r$.
- As an alternative, if the electro-mechanical free model lumped parameters are known for the particular DUT, the reference displacement shall be calculated based on the electrical input signal $u(t)$. In order to describe the reference displacement in the large-signal domain, the model shall consider the dominant nonlinearities in accordance with Clause 23 and the thermal properties in accordance with Clause 24.

NOTE 2 A linear model based on the small-signal lumped parameters cannot describe nonlinear distortions at higher amplitudes, such as the compression of the fundamental component or generation of a DC component.

19.4 Peak and bottom displacement

19.4.1 General

The peak and bottom values of the reference displacement $x(t)$ or the measured displacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ of any point $\mathbf{r}_r$ on the target surface are the maximum and minimum values of the time signal $x(t)$ for a defined stimulus. The properties of the stimulus, such as the frequency f of the sinusoidal signal, and the length T of the measurement interval shall be specified.

19.4.2 Method of measurements

- The displacement is measured in accordance with 19.2.
The minimum and maximum value of the signal is determined within a measurement interval of defined length T and the measured value is assigned to time t at the end of the interval.
- The stimulus properties determine how the peak and bottom values are plotted: plotted versus time t for ordinary audio signals (e.g. music); plotted versus frequency f or voltage u for deterministic test signals (for example sinusoidal).

19.5 DC displacement

19.5.1 General

The DC displacement is a low-frequency component (far below the audio band) in the reference displacement $x(t)$ or measured displacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ of any point $\mathbf{r}_r$ on the target surface that is generated dynamically by the transducer's nonlinearities.

NOTE The DC displacement is generated by rectification of the AC displacement signal and can be interpreted as a difference-tone intermodulation distortion component (see Klippel [3]). Contrary to harmonic and summed tone intermodulation distortions, which are generated at high frequencies, where the displacement is negligible, the DC component can be the same order of magnitude as the AC displacement.

19.5.2 Method of measurements

- The displacement $x(t)$ is measured in accordance with 19.2.
- The DC displacement $x_{DC}(t) = \overline{x(t)}$ is calculated as the mean value of the displacement within a measurement interval with defined length T and the mean value is assigned to the time t at the end of the interval. Under steady-state input conditions (e.g. single tone), the length T of the measurement interval shall be identical to the length of the stimulus. For measurements with transient stimuli (for example an ordinary audio signal), the length T shall be specified.
- The DC displacement $X_{DC}(f)$ shall be plotted versus instantaneous excitation frequency f if the stimulus is a steady-state tone or a chirp signal with defined frequency-time mapping.

19.6 Displacement transfer function

19.6.1 General

The transfer function $\underline{H}_{X,U}(f_{\text{fund}}, \mathbf{r}_r)$ between terminal voltage $u(t)$ and displacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ at a point $\mathbf{r}_r$ on the radiator's surface is measured at logarithmically spaced frequencies f_{fund} with a specified resolution at small amplitudes. ISO R40 frequencies defined in ISO 3 are generally preferred.

NOTE This method can also be applied to the transfer function between the terminal voltage $u(t)$ and the reference displacement $x(t)$.

19.6.2 Method of measurements

- The transducer is excited by a broadband stimulus $s(t)$ generating the voltage $u(t)$ at the terminals. The properties of the stimulus $s(t)$, the measurement time T_s and either the RMS-value $\tilde{u} = \alpha \tilde{u}_{\text{max}}$ or the scaling factor α and maximum input value $\tilde{u}_{\text{max}}$ shall be stated. The complex amplitudes of the spectral components $\underline{U}(f)$ at frequencies f at a specified resolution are determined by using a discrete Fourier transform (DFT), or similar, where $\underline{U}(f) = F\{u(t)\}$.
- The displacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ is measured at surface point $\mathbf{r}_r$ in accordance with 19.2 and the complex amplitudes of the spectral component $\underline{X}(f) = F\{x(t, \mathbf{r}_r)\}$ are calculated.
- The complex transfer function shall be calculated as $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) = \underline{X}(f, \mathbf{r}_r) / \underline{U}(f)$ and shall be presented as the magnitude response $|\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r)|$ and the phase response $\varphi_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) = \arg(\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r))$ at the frequencies f excited by the stimulus.

19.7 Accumulated acceleration level

19.7.1 General

The accumulated acceleration level $L_{AA}(f, \mathbf{r}_a)$ describes the total mechanical vibration on the surface of the radiator (in dB) as a function of frequency f

$$L_{AA}(f, \mathbf{r}_a) = 20 \lg_{10} \left(\int_{S_r} \frac{(s \pi f)^2 |\underline{X}(f, \mathbf{r}_r)|}{a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)} dS_r \right)$$

using a reference value $a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)$ depending on the location of a specified observation point $\mathbf{r}_a$ in the sound field defined as

$$a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a) = \frac{\pi \sqrt{2} p_0 |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_r|}{\rho_0}$$

with the reference sound pressure p_0 and the density of air ρ_0 (see Klippel, Schlechter [5],[6]).

NOTE The reference value $a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)$ ensures that the accumulated acceleration level $L_{\text{AA}}(f, \mathbf{r}_a)$ can be interpreted as the total potential sound pressure available at the observation point $\mathbf{r}_a$ located in the generated sound field, if the destructive effects of acoustical cancellation are neglected. At low frequencies below the first break-up frequency, where all points on the radiator's surface vibrate in phase and the size of the radiator is small compared to the wavelength λ , the accumulated acceleration level $L_{\text{AA}}(f, \mathbf{r}_a)$ is equal to the sound pressure level $L_p(f, \mathbf{r}_a)$ predicted by the Rayleigh integral.

19.7.2 Method of measurements

- The transfer function $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r[m])$ with $0 \leq m \leq M$ shall be measured on the radiator's surface with sufficient spatial resolution ($M > 100$ scanning points) in accordance with 19.6.
- The displacement $\underline{X}(f, \mathbf{r}_r[m]) = \underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r[m])\underline{U}(f)$ shall be calculated for a defined amplitude of the terminal voltage U .
- The accumulated acceleration level at the specified observation point $\mathbf{r}_a$ shall be calculated by

$$L_{\text{AA}}(f, \mathbf{r}_a) = 20 \lg_{10} \left(\sum_{m=1}^M \frac{(2\pi f)^2 |\underline{X}(f, \mathbf{r}_r[m])|}{a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)} \Delta S_r(\mathbf{r}_r[m]) \right)$$

with the area $\Delta S_r(\mathbf{r}_r[m])$ on the radiator's surface represented by the scanning point $\mathbf{r}_r[m]$.

20 Small-signal lumped parameters

20.1 General

Linear modelling can be applied to the DUT at small amplitudes where the nonlinear properties of the DUT are negligible as defined in 8.2. The measurement of nonlinear distortion in the electrical signals (for example current) at the terminals shall be used to validate the assumptions made in linear modelling.

NOTE Besides the generation of nonlinear distortion, time-varying visco-elastic properties of the suspension can also affect the measurement results of the small parameters.

It is recommended to specify or report the peak displacement generated by the stimulus during the test.

At low frequencies, where the radiator behaves in fundamental (piston) mode, the transfer and vibration behaviour of the transducer and the influence of the mechanical and acoustical load (for example, an enclosure) can be described by a lumped parameter model (see Small [7]). A model with distributed parameters is required to describe the mechanical and acoustical system at higher frequencies.

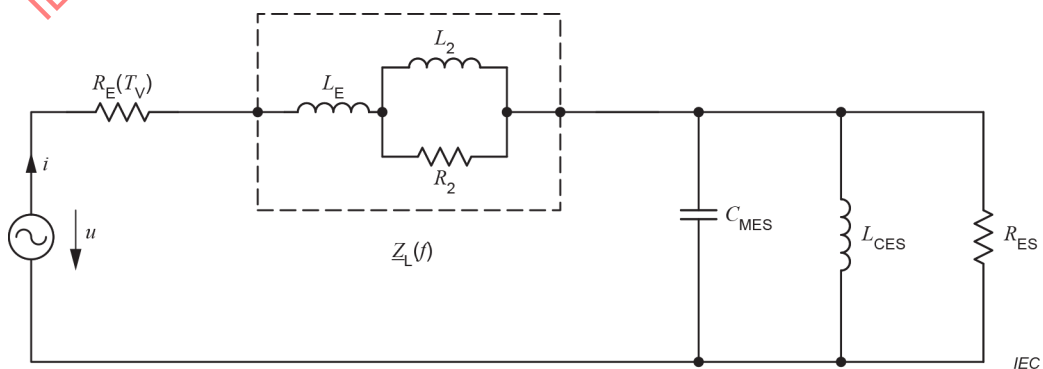


Figure 2 – Equivalent electrical network representing the electrical input impedance using the LR2 model for the lossy inductance of an electro-dynamical transducer

20.2 Electrical parameters

20.2.1 General

The electrical input impedance measured at low amplitudes can be modelled by an equivalent electrical network as shown in Figure 2, which is time-invariant and linear. For the device under test (DUT), the model's lumped parameters are estimated by minimizing the mean squared error between the measured and modelled electrical impedance (complex curve fitting).

20.2.2 DC resistance

20.2.2.1 General

The DC resistance $R_E(T_v)$ of the transducer usually describes the electrical input impedance at frequencies far below the fundamental resonance frequency where the influence of other electrical and mechanical elements is negligible.

20.2.2.2 Method of measurements

The electrical impedance $Z_E(f)$ is measured at a low frequency $f < f_s/8$ which is at least three octaves below the resonance frequency f_s of the transducer.

NOTE The DC resistance $R_E(T_v)$ depends on the voice coil temperature T_v , which varies with the ambient temperature T_A and the electrical stimulus supplied to the transducer.

If the evaluation of voice coil heating in electro-dynamical transducers or the influence of the ambient temperature is not the target of the measurement, the DC resistance R_E of the transducer should be measured under small-signal conditions in accordance with 8.2 and the transducer should be acclimatized to the normal ambient conditions in accordance with 7.3.

20.2.3 Lossy inductance

20.2.3.1 General

The electrical impedance $Z_L(f)$ of the lossy voice coil inductance in electro-dynamical transducers contributes to the electrical impedance $Z_E(f)$ at higher frequencies. The electrical impedance $Z_L(f)$ is represented by an additional electrical network in the model (as shown in Figure 2) or by an analytical description.

20.2.3.2 Method of measurements

- The DC resistance R_E is measured in accordance with 20.2.2 and the electrical impedance $Z_E(f)$ is measured while the movement of the voice coil is blocked.
- The electrical impedance $Z_L(f)$ of the lossy voice coil inductance is the remnant of the electrical impedance $Z_E(f)$ after removing the DC resistance R_E . The modulus and phase response of the electrical impedance $Z_L(f)$ shall be reported versus frequency.

Alternatively, the electrical impedance $Z_L(f)$ shall be reported as a frequency-dependent inductance $L_{EL}(f) = \frac{1}{2\pi f} \Re\{Z_E(f)\}$ representing the imaginary part of the lossy inductance

and by a frequency-dependent resistance $R_{EL}(f) = \frac{1}{2\pi f} \Re\{Z_E(f)\}$ representing the real part of the lossy inductance.

- c) An electrical network, such as the LR2 model as shown in Figure 2, is used for modelling the complex impedance $\underline{Z}_L(f)$ of the lossy inductance. The network is comprised of a multitude of inductances ($L_1, L_2, \dots$) connected in series where at least one inductance (L_2) is shunted by a resistance (R_2). The structure of the network and the lumped parameters calculated by minimizing the modelling error (curve-fitting technique) shall be specified.
- d) Alternatively, a mathematical model, such as Leach [8] or Thorborg [9], can be used to represent the complex impedance $\underline{Z}_L(f)$ of the lossy inductance. The network structure and the lumped parameters calculated by minimizing the modelling error (curve fitting) shall be specified.

NOTE Blocking of the voice coil movement can be avoided if the electrical network or the mathematical model representing the lossy inductance is accurate at higher frequencies ($f > 4f_s$) where the influence of the electrical impedance $\underline{Z}_{EM}(f)$ representing the mechanical resonator is negligible. The Leach model gives a sufficient fitting of the measured curve by using a minimum number of free parameters. The higher complexity of the Thorborg model gives in some cases a superior fitting but a unique solution of the parameter estimation cannot be ensured.

20.2.4 Electrical representation of the fundamental resonator

20.2.4.1 General

An electrical network comprised of the parallel connection of a capacitor C_{MES} (corresponding to moving mass M_{MS}), inductance L_{CES} (corresponding to mechanical compliance C_{MS}) and resistance R_{ES} (corresponding to mechanical resistance R_{MS}) as shown in Figure 2 is used to describe the fundamental vibration mode of the transducer including the air load.

NOTE These parameters do not represent the influence of additional acoustical or mechanical resonances such as port resonances in a vented enclosure or time-varying visco-elastic properties (creep) at low frequencies.

20.2.4.2 Method of measurements

- a) The electrical input impedance $\underline{Z}_E(f)$ is measured in accordance with Clause 18.
- b) Based on the electrical input impedance $\underline{Z}_E(f)$, the electrical DC resistance R_E and the electrical model representing the lossy inductance are determined in accordance with 20.2.2 and 20.2.3, respectively.
- c) Based on the model of the lossy inductance, the impedance $\underline{Z}_L(f)$ is measured at the frequencies $f_s/4 < f < 4f_s$.
- d) The impedance $\underline{Z}_{EM}(f)$ representing the effect of the mechanical elements in the electrical domain is the remnant of the electrical input impedance $\underline{Z}_E(f)$ after removing the electrical DC resistance R_E and the impedance $\underline{Z}_L(f)$ of the lossy inductance.
- e) The capacitor C_{MES} , inductance L_{CES} and resistance R_{ES} of the 2nd order electrical network representing the impedance $\underline{Z}_{EM}(f)$ are calculated in the frequency range $f_s/4 < f < 4f_s$ by minimizing the mean squared error in the estimated amplitude and phase response.

NOTE Some transducers, such as micro-speakers, show significant visco-elasticity at lower frequencies, which increases the compliance and mechanical losses. The impedance $\underline{Z}_{EM}(f)$ of these transducers cannot be described by a 2nd order system and the estimated values for capacitance C_{MES} , inductance L_{CES} and resistance R_{ES} will not be accurate. To avoid this bias, a frequency-dependent compliance, as described in 20.6, can be used in the identification of the mechanical resonator's electrical impedance $\underline{Z}_{EM}(f)$.

20.3 Relative lumped parameters

20.3.1 General

The fundamental vibration mode can be described by relative parameters, such as resonance frequency and quality factors, which can be calculated directly from the equivalent electrical parameters defined in 20.2.4.

NOTE The same relative parameters can also be calculated from the corresponding elements of the mechanical and acoustical equivalent circuit (see Small [7]). However, the identification of the electrical circuit can be accomplished by a single measurement of the electrical signals (voltage, current) at the terminals while the identification of the mechanical and acoustical elements requires a perturbation technique or an additional sensor.

20.3.2 Resonance frequency

Resonance frequency f_s of the fundamental vibration mode found in the transducer operated in free air shall be calculated by

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{MES} L_{CES}}} \quad (1)$$

based on the lumped parameter elements identified from the impedance $Z_{EM}(f)$ in accordance with 20.2.4 and the mechanical parameters in 20.4.

NOTE If the visco-elastic behaviour of the mechanical suspension is negligible (creep factor < 10 %) and the impedance $Z_L(f)$ of the lossy voice coil inductance at resonance is small compared to the total electrical impedance $Z_E(f_s)$, the resonance frequency f_s can be determined as the frequency at which the modulus of the electrical impedance has its first principal maximum.

20.3.3 Electrical quality factor

The electrical quality factor Q_{ES} of the fundamental vibration mode found in the transducer operated in free air shall be calculated as

$$Q_{ES} = 2\pi f_s C_{MES} R_E = \frac{R_E}{C_{MS} T_{BI}^2 2\pi f_s} \quad (2)$$

using the equivalent electrical parameters in 20.2.4 and the mechanical parameters in 20.4.

NOTE If the visco-elastic behaviour of the mechanical suspension is negligible (creep factor < 10 %) and the impedance $Z_L(f)$ of the lossy voice coil inductance at resonance is small compared to the total electrical impedance $Z_E(f_s)$, the electrical quality factor Q_{ES} can be calculated according Small [7] as

$$Q_{ES} = \frac{r_0}{r_0 - 1} Q_{TS}$$

where:

r_0 is the ratio of the maximum magnitude of the impedance $Z_E(f_s)$ at the resonance frequency f_s to the DC resistance R_E of the transducer; and

Q_{TS} is the total quality factor as defined in 20.3.5.

20.3.4 Mechanical quality factor

The mechanical quality factor Q_{MS} of the fundamental vibration mode found in the transducer operated in free air shall be calculated as

$$Q_{MS} = 2\pi f_s C_{MES} R_{ES} = \frac{1}{C_{MS} R_{MS} 2\pi f_s} \quad (3)$$

using the equivalent electrical parameters in 20.2.4 and the mechanical parameters in 20.4.

NOTE If the visco-elastic behaviour of the mechanical suspension is negligible (creep factor < 10 %) and the impedance $Z_L(f)$ of the lossy voice coil inductance at resonance is small compared to the total electrical impedance $Z_E(f_s)$, the mechanical quality factor Q_{MS} can be calculated according to Small [7] by

$$Q_{MS} = r_0 Q_{TS}$$

where:

r_0 is the ratio of the maximum magnitude of the impedance $Z_E(f_s)$ at the resonance frequency f_s to the DC resistance R_E of the transducer and

Q_{TS} is the total quality factor as defined in 20.3.5.

20.3.5 Total quality factor

The total quality factor Q_{TS} of the fundamental vibration mode found in the transducer operated in free air shall be calculated as

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}}$$

using the electrical quality factor in 20.3.3 and the mechanical quality factor in 20.3.4.

NOTE If the visco-elastic behaviour of the mechanical suspension is negligible (creep factor < 10 %) and the impedance $Z_L(f_s)$ of the lossy voice coil inductance at resonance is small compared to the total electrical impedance $Z_E(f_s)$, the total quality factor Q_{TS} can be calculated according to Small [7] by

$$Q_{TS} = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{\sqrt{r_0} (f_2 - f_1)}$$

where:

r_0 is the ratio of the maximum magnitude of the impedance $Z_E(f_s)$ at the resonance frequency f_s to the DC resistance R_E of the transducer.

The frequencies f_1 and f_2 are located with approximate symmetry about $f_s \approx \sqrt{f_1 f_2}$ where $f_1 < f_s < f_2$ and the magnitude of impedance $Z_1 = |Z_E(f_1)|$ and $Z_2 = |Z_E(f_2)|$ are equal having a value $Z_1 = Z_2 = \sqrt{r_0} R_E$.

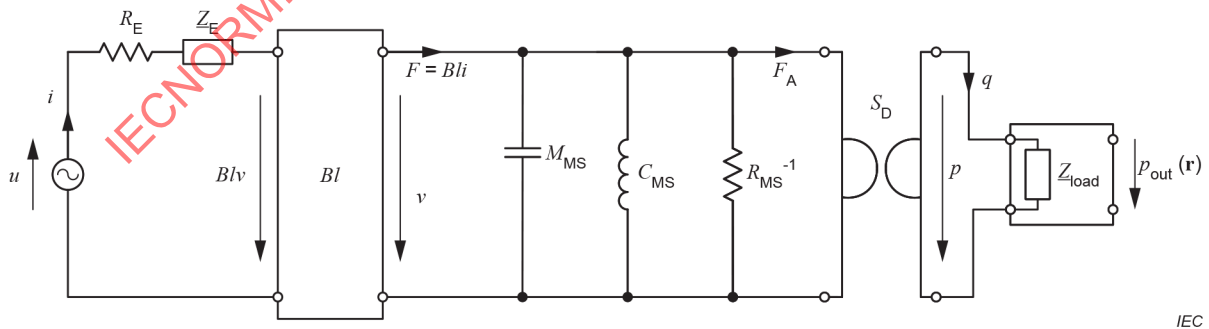


Figure 3 – Analogous lumped parameter network representing the electrical, mechanical and acoustical elements at low frequencies

20.4 Lumped mechanical parameters

20.4.1 General

The fundamental vibration mode of the transducer operated in free air or in half-space shall be described by a lumped parameter model as presented by a network as shown in Figure 3. This network uses a mechanical analogy of the mobility type coupled with a transformer with the electrical domain. The mechanical force F corresponds with current i in Figure 2 scaled by the force factor T_{BI} . A gyrator with the effective radiation area S_D couples the mechanical analogy with the acoustical analogy of the impedance type.

NOTE 1 Other types of mechanical and acoustical analogies can be used in the lumped parameter network as discussed in [4].

The mechanical impedance defined as

$$\underline{Z}_{MS}(f) = \frac{\underline{F}(f, \mathbf{r}_{coil})}{j2\pi f \underline{X}(f, \mathbf{r}_{coil})} = \frac{T_{BI}^2}{\underline{Z}_{EM}(f)} = \frac{1}{j2\pi f C_{MS}(f)} + R_{MS} + j2\pi f M_{MS} \quad (4)$$

is inversely related to the electrical impedance $\underline{Z}_{EM}(f)$ representing the mechanical resonance in the electrical domain scaled by the squared force factor T_{BI}^2 . All the mechanical parameters in Formula (4) consider the influence of the air. The moving mass M_{MS} represents the mass of the moving parts and the air load on both sides of the radiator. Besides the mechanical losses associated with the suspension and the radiation impedance, the resistance R_{MS} considers the losses generated by the turbulent air flows in the gap and in the vent hole of the pole piece. The compliance $C_{MS}(f)$, which is the inverse of the stiffness $K_{MS}(f)$, represents the restoring capability (spring stiffness) of the suspension and the stiffness of air in cavities behind the radiating diaphragm. At low frequencies, the compliance $C_{MS}(f)$ also depends on the frequency f due to the visco-elasticity of the material.

NOTE 2 At low frequencies, visco-elasticity is a pure mechanical phenomenon that increases the compliance $C_{MS}(f)$ and the mechanical resistance $R_{MS}(f)$. As a result, in the relationship between restoring force and displacement, the suspension tends to relax and creep. It loses the ability to store potential energy and converts the supplied energy into heat. This phenomenon is not negligible in transducers such as micro-speakers. It affects the fitting error of the electrical impedance and the accuracy of the measured electrical and mechanical parameters. The increase in compliance $C_{MS}(f)$ increases the AC amplitude of the reference displacement and the DC displacement generated by transducer nonlinearities. The mechanical resistance is approximated in Formula (4) by a constant value $R_{MS} = R_{MS}(f_s)$. The approximation is possible because the frequency dependency of the mechanical resistance $R_{MS}(f)$ has little impact on the transfer behaviour of the transducer below and above the resonance frequency f_s .

If the effects of visco-elasticity are small (creep parameter $\kappa < 10\%$), the compliance can be a constant value $C_{MS}(f) = C_{MS} = C_{MS}(f_s)$ and the mechanical impedance in Formula (4) can be calculated at frequencies $f > f_s/2$.

20.4.2 Method of measurements

20.4.2.1 General

Calculation of the mechanical parameters requires the measurement of at least one mechanical parameter. The calculation in this document uses the relative mechanical parameters defined in 20.3. One of the measurement methods in 20.4.2.2, 20.4.2.3 and 20.4.2.4 shall be used to identify the first mechanical parameter.

20.4.2.2 Added-mass method

This technique performs two measurements of the electrical input impedance on the same transducer where one of the measurements uses a known moving mass perturbation, such as adding a known mass M_{ADD} to the radiator. The variation in the relative parameters between measurements is used to calculate the moving mass M_{MS} of the transducer without added mass.

- a) The electrical impedance of the transducer without perturbation is measured in free air under small-signal conditions in accordance with Clause 18.
- b) The equivalent electrical parameters f_s and Q_{ES} of the transducer without perturbation shall be calculated in accordance with 20.2.4.
- c) After applying an additional mass M_{ADD} onto the radiator's surface, the electrical impedance measurement is repeated in free air under the same small-signal conditions in a) in accordance with Clause 18.
- d) The equivalent electrical parameters $f_{\text{ADD}} = f_s$ and $Q_{\text{ADD}} = Q_{\text{ES}}$ of the transducer with mass perturbation are calculated in accordance with 20.2.4.
- e) The moving mass M_{MS} of the transducer without perturbation shall be calculated using Formula (5):

$$M_{\text{MS}} = \frac{M_{\text{ADD}}}{\frac{Q_{\text{ADD}}f_s}{Q_{\text{ES}}f_{\text{ADD}}} - 1} \quad (5)$$

NOTE Formula (5) assumes that force factor T_{Bl} is constant in both measurements (R. Small [7]). A simplified version of this formula, where the quality factors Q_{ADD} and Q_{ES} vanish, is based on the assumption that there is no frequency dependency of the compliance $C_{\text{MS}}(f)$ due to visco-elasticity in accordance with 20.6. If this condition is not fulfilled, the mass perturbation method generates significant errors in the calculated mass M_{MS} .

- f) Based on the calculated mass M_{MS} and the resonance frequency f_s of the transducer without perturbation, the compliance C_{MS} shall be calculated using Formula (1).
- g) Using Formula (2), the force factor T_{Bl} shall be calculated based on the measured DC resistance $R_{\text{E}}(T_{\text{V}})$ and the quality factor Q_{ES} .
- h) The resistance R_{MS} shall be calculated based on the measured quality factor Q_{MS} using the relationship in Formula (3).

20.4.2.3 Box perturbation method

This technique performs two measurements of the electrical input impedance of the same transducer where one of the measurements requires adding stiffness to the mechanical suspension using an enclosed volume of air. The variation in the resonance frequency due to the known acoustical perturbation is the basis for calculating the free air compliance C_{MS} and the equivalent air volume V_{AS} of the transducer.

- a) The electrical impedance of the transducer is measured in free air (without the enclosure) under small-signal conditions in accordance with Clause 18.
- b) The equivalent electrical parameters f_s and Q_{ES} of the transducer without acoustical perturbation shall be calculated according to 20.2.4.
- c) After mounting the transducer in a sealed enclosure of volume V_{T} , the electrical impedance measurement is repeated under the same small signal conditions in a) in accordance with Clause 18.

The enclosure should be carefully sealed without absorption material placed inside. Electro-dynamical transducers with an air leakage path around the voice coil due to a phase plug or missing dust cap should not be tested using this method. The displaced volume of the drive unit shall be subtracted from the volume of the empty enclosure to determine the value of V_T .

- d) The equivalent electrical parameters $f_{CT} = f_s$ and $Q_{ECT} = Q_{ES}$ of the transducer with acoustical perturbation shall be calculated in accordance with 20.2.4.
- e) The equivalent air volume V_{AS} representing the mechanical compliance C_{MS} of the transducer without perturbation shall be calculated using the Formula (6):

$$V_{AS} = V_T \left[\frac{f_{CT} Q_{ECT}}{Q_{ES} f_s} - 1 \right] \quad (6)$$

- f) The mechanical compliance C_{MS} shall be calculated using Formula (7):

$$C_{MS} = \frac{V_{AS}}{\rho_0 c^2 S_D^2} \quad (7)$$

using air density ρ_0 , sound velocity in air c and effective radiation area S_D in accordance with 20.8.2.

- g) Based on the calculated mechanical compliance C_{MS} and the resonance frequency f_s of the transducer without acoustical perturbation, the moving mass M_{MS} shall be calculated using Formula (1).
- h) Using Formula (2), the force factor T_{BI} shall be calculated based on the measured DC resistance $R_E(T_V)$ and the quality factor Q_{ES} .
- i) The resistance R_{MS} shall be calculated based on the measured quality factor Q_{MS} using the relationship in Formula (3).

20.4.2.4 Laser method

This technique determines the force factor T_{BI} based on the measured electrical input impedance $Z_E(f)$ and the mechanical transfer function $H_{X,U}(f)$ between the terminal voltage at the transducer and the reference displacement.

- a) The electrical impedance $Z_E(f_{fund})$ of the transducer is measured in free air (without enclosure) under small signal conditions in accordance with Clause 18.
- b) The transfer function $H_{X,U}(f)$ between the terminal voltage and the reference displacement $x(t)$ shall be measured in accordance with 19.3 and 19.6.
- c) The relative lumped parameters representing the mechanical resonator shall be calculated in accordance with 20.3.
- d) The modelled displacement transfer function $H'_{X,U}(f)$ shall be calculated using the electrical and relative parameters.

NOTE In transducers, such as micro-speakers showing significant visco-elasticity, the modelling of the displacement transfer function requires a creep model in accordance with 20.6.

- e) The force factor T_{BI} shall be calculated by minimizing the mean square error between measured function $H_{X,U}(f)$ and modelled function $H'_{X,U}(f)$.
- f) Based on the calculated force factor T_{BI} , the identified quality factor Q_{ES} , the resonance frequency f_s and the DC resistance R_E , the compliance C_{MS} shall be calculated using Formula (1).
- g) The resistance R_{MS} shall be calculated based on the measured quality factor Q_{MS} using the relationship in Formula (2).

- h) Based on the compliance C_{MS} , the moving mass M_{MS} shall be calculated using the relationship in Formula (3).

20.5 Pure lumped mechanical parameters

20.5.1 General

The fundamental vibration mode of the transducer operated in vacuum shall be described by a lumped parameter model generating the mechanical impedance given in Formula (8):

$$\underline{Z}_{MD}(f) = \frac{\underline{E}(f, \mathbf{r}_{coil})}{j2\pi f \underline{X}(f, \mathbf{r}_{coil})} = \frac{T_{BI}^2}{\underline{Z}_{EMD}(f)} = \frac{1}{j2\pi f C_{MD}(f)} + R_{MD}(f) + j2\pi f M_{MD} \quad (8)$$

which is inversely related to the electrical impedance $\underline{Z}_{EMD}(f)$ representing the mechanical resonance in the electrical domain scaled by the squared force factor T_{BI}^2 . The lumped parameter M_{MD} represents the moving mass without air load. At low frequencies, the compliance $C_{MD}(f)$ of the mechanical suspension (which is the inverse of the stiffness $K_{MD}(f)$), and the mechanical resistance $R_{MD}(f)$ also become dependent on the visco-elasticity of the material.

NOTE In order to distinguish between the pure mechanical parameters and the lumped parameters of the transducer with air load, the character 'D' replaces the character 'S' in the subscript.

20.5.2 Method of measurements

- The electrical impedance $\underline{Z}_E(f)$ of the DUT operated in vacuum shall be measured in accordance with Clause 18.
- The measurement of the pure mechanical parameters of the transducer operated in vacuum shall be performed by using either the laser or the added mass method in accordance with 20.4.2.4 and 20.4.2.2, respectively.

The relative lumped parameters shall be calculated in accordance with 20.3 using the character "D" in the subscript of the parameter to indicate the measurement in vacuum.

NOTE A useful approximation of the moving mass found in vacuum can be calculated using $M_{MD} = M_{MS} - 1,7 \rho_0 \pi a^3$ given the total moving mass M_{MS} of a transducer having a round radiator of radius a operated in an infinite baffle with air load, see Beranek [4].

20.6 Compliance versus frequency

20.6.1 General

The mechanical compliance $C_{MS}(f)$ and $C_{MD}(f)$ of the suspension shall be presented versus frequency in the range where the reactive part of the mechanical impedance is not dominated by the moving mass (for example $f < 2f_s$).

20.6.2 Method of measurements

- While operated in a vacuum, the mechanical transfer function $\underline{H}_X(f)$ of the device under test shall be measured in accordance with 19.6.

The visco-elasticity by definition is a mechanical property and should be separated from other properties that can influence or increase the compliance $C_{MS}(f)$ at lower frequencies $f < f_s$ such as an air cavity inside the transducer.

- The mechanical transfer function $\underline{H}_X(f)$ shall be modelled using a visco-elastic model presented by Knudsen [10] or Ritter [11].

The 3-parameter creep model as proposed by Ritter [11] is recommended as shown:

$$C_{MD}(f) = C_{min} \left(1 - \kappa \lg_{10} \left(\frac{(f/f_{min})}{\sqrt{1+(f/f_{min})^2}} \right) \right)$$

where the minimum compliance C_{min} and the factor κ describe the slope of the compliance curve below a minimum frequency f_{min} .

- c) The free parameters of the selected visco-elastic model shall be estimated by minimizing the error between measured and modelled mechanical transfer function $\underline{H}_X(f)$.
- d) The mechanical compliance $C_{MD}(f)$ of the transducer operated in vacuum shall be calculated based on the selected creep model with the estimated parameters. The manufacturer shall present either $C_{MD}(f)$ versus frequency or the free parameters along with a comprehensive definition of the model used.

NOTE For frequencies f far below the resonance frequency f_s , the slope of the compliance $C_{MS}(f)$ corresponds with the slope of the mechanical transfer function $\underline{H}_X(f)$.

- e) The compliance $C_{MS}(f)$ of the transducer operated in free air shall be calculated using Formula (9)

$$C_{MS}(f) = 1 / \left[1/C_{MD}(f) + 1/C_{MS}(f_s) \right] \quad (9)$$

where the compliance $C_{MS}(f_s) = C_{MS}$ is a lumped parameter identified in accordance with 20.4.

20.7 Distributed mechanical parameters

20.7.1 Receptance

20.7.1.1 General

The receptance is the mechanical transfer function $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r) = \underline{X}(f, \mathbf{r}_r) / \underline{F}(f)$ between the transducer's excitation force $F(f)$ and the displacement $\underline{X}(f, \mathbf{r}_r)$ at the point $\mathbf{r}_r$ on the radiator's surface. The receptance shall be measured under small-signal conditions at a sufficient spatial resolution to represent the mode shape in the frequency range of interest.

NOTE The receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ is the basis for modal analysis of the mechanical vibrations on the surface of the radiator. The results from numerical simulations (FEA) and laser vibrometry can be used for comparison.

20.7.1.2 Methods of measurement

- a) Measure the electrical input impedance $\underline{Z}_E(f)$ of the device under test operated in free air under small-signal conditions in accordance with Clause 18.
- b) The transfer function $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r)$ between terminal voltage and displacement on the radiator's surface at the scanning points $\mathbf{r}_r[n]$ for $0 \leq m \leq M$ shall be measured in accordance with 19.6 with sufficient spatial resolution ($M > 100$ scanning points).
- c) The force factor T_{BI} is determined in accordance with 20.4.
- d) The receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ shall be calculated at all scanning points $\mathbf{r}_r[m]$ for $0 \leq m \leq M$ using Formula (10):

$$\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r) = \underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) \frac{\underline{Z}_E(f)}{T_{BI}} \quad (10)$$

20.7.2 Modal analysis

20.7.2.1 General

Modal analysis (see Bright [12]) shall be applied to the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ measured at a sufficient number of scanning points $\mathbf{r}_r[i]$ with $0 \leq m \leq M$ to reveal the following expansion:

$$\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=0}^N \underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=0}^N \frac{\alpha_n \Phi_n(\mathbf{r}_r)}{1 + \eta_n \left(\frac{2\pi f}{\omega_n} \right) j - \left(\frac{2\pi f}{\omega_n} \right)^2} \quad (11)$$

with modal parameters: mode shape represented as orthonormal Eigenvectors $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, natural frequency ω_n , modal loss factor η_n and modal gain α_n of the n^{th} order mode.

NOTE Each dominant mode found in the modal expansion of $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ is a distinct resonance at the natural frequency ω_n in the accumulated acceleration level in accordance with 19.7. The relative 3 dB bandwidth of the resonance corresponds to the modal loss factor η_n . These modal parameters are the basis for fitting the FEA model using estimated frequency dependent material parameters in the mechanical components, such as the Young's modulus $\underline{E}(f)$, to the laser vibrometer measurement results of the DUT.

20.7.2.2 Method of measurements

- a) Measure the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ at a sufficient number of scanning points $\mathbf{r}_r[m]$ for $0 \leq m \leq M$ on the surface of the radiator in accordance with 20.7.1.

NOTE The number of scanning points depends on the targets of the modal analysis. The evaluation of rocking modes and the identification of the root causes requires typically less than 20 points while the evaluation of modes at higher frequencies may require more than 500 points.

- b) Perform a singular value decomposition on the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ to separate the orthogonal modes, find the mode shapes $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$ and determine the modal frequency response $\underline{H}_n(f)$.
- c) Estimate the natural frequency ω_n , the modal loss factor η_n and the modal gain α_n of n^{th} order mode in Formula (11).

20.7.3 Relative rocking level

20.7.3.1 General

The relative rocking level $R_{\text{REL},n}$ is defined as the difference between the accumulated acceleration level $L_{\text{AA},n}$ of the n^{th} order rocking mode with $n = 1, 2$ and the $L_{\text{AA},0}$ of the piston mode ($n = 0$), or it can be approximated (see Cardenas [14]) as follows:

$$\begin{aligned} R_{\text{REL},n}(f_n) &= L_{\text{AA},n}(f_n) - L_{\text{AA},0}(f_n) \\ &\approx 20 \lg_{10} \left(\frac{\int_{S_r} |\underline{H}_n(f_n, \mathbf{r}_r)| dS}{\int_{S_r} |\underline{H}_0(f_n, \mathbf{r}_r)| dS} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

20.7.3.2 Method of measurements

- a) Measure the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ at sufficient scanning points $\mathbf{r}_r[m]$ for $0 \leq m \leq M$ on the surface of the radiator in accordance with 20.7.1.
- b) Perform a modal analysis in accordance with 20.7.2 and select the receptance $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ with $n = 0, 1, 2$. Determine the natural frequency $\omega_n = 2\pi f_n$ of the first and second order rocking modes ($n = 1, 2$).

- c) Calculate the relative rocking level $R_{REL,n}(f_n)$ at the natural frequencies f_n with $n = 1, 2$ according to Formula (12).

NOTE A relative rocking level $R_{REL,n}(f_n)$ larger than –5 dB indicates significant rocking in the radiator that can cause impulsive distortion, such as voice-coil rubbing. The impulsive distortion can be measured using the method defined in IEC 60268-21.

20.7.4 Centre of gravity

20.7.4.1 General

The centre of gravity with respect to the pivot point shall be measured in Cartesian coordinates (y_{CG}, z_{CG}) or in polar coordinates (d_M, γ_M) .

NOTE An imbalance in the moving parts of the transducer can be caused by asymmetrical mass distribution with respect to the pivot point (see Klippel [13]). The pivot point is the cross point of the nodal lines between the first and second order rocking modes and corresponds with the origin of the coordinate system as shown in Figure 4. The asymmetrical distribution could be caused by component thickness variations, non-homogenous glue distribution etc. If the centre of gravity is not located at the pivot point ($y_{CG} \neq 0, z_{CG} \neq 0$), the translational displacement and the tilting angles will generate moments exciting the first and second order rocking modes. The distance d_M between the centre of gravity point and the pivot point shows the magnitude of the imbalance and the angle γ_M reveals the direction of the imbalance.

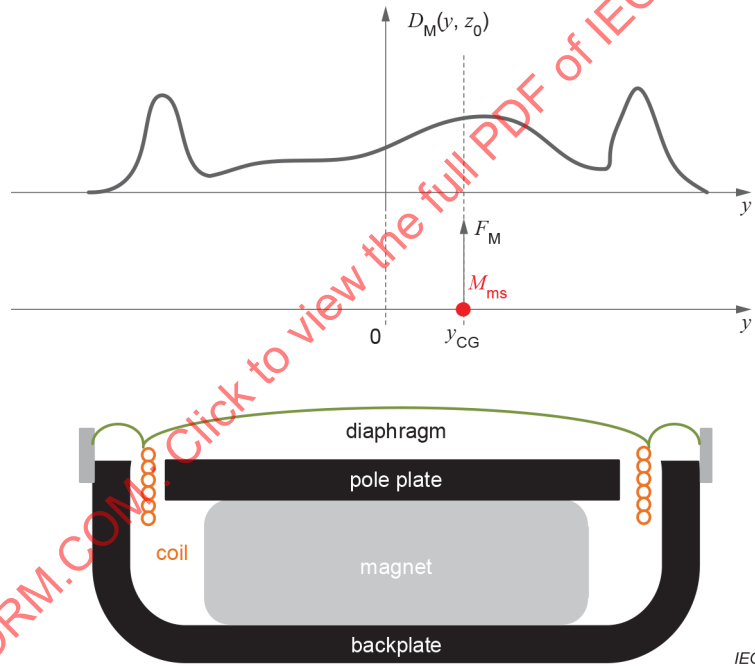


Figure 4 – Asymmetrical mass distribution function $D_M(y, z_0)$ in the mechanical system of a microspeaker that shifts the centre of gravity away from the pivot point

20.7.4.2 Method of measurements

- Measure the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ at sufficient scanning points $\mathbf{r}_r[i]$ for $0 \leq m \leq M$ on the surface of the radiator in accordance with 20.7.1.
- Perform a modal analysis in accordance with 20.7.2 and select the modal transfer functions $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ with $n = 0, 1, 2$. Determine the mode shape $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, the natural frequency ω_n , the modal loss factor η_n , the modal gain α_n of the piston mode ($n = 0$) and the modal gains α_n of the two rocking modes ($n = 1, 2$).
- Fit the lumped parameter model developed for rocking modes as described in [13] to the modal analysis result data.
- Calculate the coordinates of the centre of gravity based on the identified parameters of the rocking mode model according to Cardenas [14].

20.7.5 Centre of stiffness

20.7.5.1 General

The centre of stiffness with respect to the pivot point shall be measured in Cartesian coordinates (y_{CK} , z_{CK}) or in polar coordinates (d_K , γ_K).

NOTE If the centre of stiffness is not at the pivot point ($y_{CK} \neq 0$, $z_{CK} \neq 0$), the imbalance of the restoring forces will cause moments exciting the first and second order rocking modes. These imbalances correspond to an asymmetrical distribution of the stiffness over the circumference of the suspension. The distance d_K between the centre of stiffness point and the pivot point shows the magnitude of the imbalance and the angle γ_K reveals the direction of the imbalance.

20.7.5.2 Method of measurements

- Measure the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ at a sufficient number of scanning points $\mathbf{r}_r[i]$ with $0 \leq m \leq M$ on the surface of the radiator in accordance 20.7.1.
- Perform a modal analysis in accordance with 20.7.2 and select the modal transfer functions $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ with $n = 0, 1, 2$. Determine the mode shape $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, the natural frequency ω_n , the modal loss factor η_n , the modal gain α_n of the piston mode ($n = 0$) and the modal gains α_n of the two rocking modes ($n = 1, 2$).
- Fit the lumped parameter model developed for rocking modes as described in Cardenas [14] to the modal analysis result data.
- Calculate the coordinates of the centre of stiffness based on the identified parameters of the rocking mode model in accordance with Cardenas [14].

20.7.6 Centre of force factor

20.7.6.1 General

The centre of force factor distribution with respect to the pivot point shall be measured in Cartesian coordinates (y_{CB} , z_{CB}) or in polar coordinates (d_B , γ_B).

NOTE If the centre of force factor distribution is not at the pivot point ($y_{CB} \neq 0$, $z_{CB} \neq 0$) in electro-dynamical transducers, the imbalance of the Lorentz force distributed over the voice coil will cause moments exciting the first and second order rocking modes. The asymmetrical distribution could be caused by inhomogeneous magnetic flux density B in the gap, which is related to shifted positions in the iron parts and imperfections that occur during the magnetization process. The distance d_B between the centre of force factor distribution and the pivot point shows the magnitude of the imbalance and the angle γ_B reveals the direction of the imbalance.

20.7.6.2 Method of measurements

- Measure the receptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ at a sufficient number of scanning points $\mathbf{r}_r[m]$ with $0 \leq m \leq M$ on the surface of the radiator in accordance with 20.7.1.
- Perform a modal analysis according to 20.7.2 and select the modal transfer functions $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ with $n = 0, 1, 2$. Determine the mode shape $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, the natural frequency ω_n , the modal loss factor η_n , the modal gain α_n of the piston mode ($n = 0$) and the modal gains α_n of the two rocking modes ($n = 1, 2$).
- Fit the lumped parameter model developed for rocking modes as described in Klippel [13] to the modal analysis result data.
- Calculate the coordinates of the centre of force factor based on the identified parameters of distribution the rocking mode model according to Cardenas [14].

20.8 Lumped acoustical parameters

20.8.1 Mechano-acoustical coupling function

20.8.1.1 General

The mechano-acoustical coupling function $\underline{S}_D(f)$ is a complex transfer function that describes the coupling between mechanical and acoustical domains generating the complex volume velocity $\underline{Q}(f) = j2\pi f \underline{S}_D(f) \underline{X}(f)$ based on the reference displacement $\underline{X}(f)$.

The total calculated volume velocity $\underline{Q}(f)$ is based on the reference displacement $\underline{X}(f)$ and the mechano-acoustical coupling function $\underline{S}_D(f)$. This can be used to predict the sound pressure p generated in an acoustical system that can be described by lumped parameter modeling (for example headphone and ear channel). Higher-order modes, however, shall be considered in the modelling of the mechanical system (e.g., diaphragm vibration) at higher frequencies Klippel [15].

20.8.1.2 Method of measurements

- The transfer function $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ at multiple points $\mathbf{r}_r[m]$ with $0 \leq m \leq M$ is measured on the radiator's surface with sufficient spatial resolution ($M > 100$ scanning points) in accordance with 19.6.
- The reference displacement $x(t_1)$ shall be measured in accordance with 19.3 and the transfer function $\underline{H}_{X,U}(f)$ between the terminal voltage and the reference displacement shall be calculated in accordance with 19.6.
- The mechano-acoustical coupling function $\underline{S}_D(f)$ shall be calculated by integrating the displacement transfer function $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r)$ over the radiator's surface S_R

$$\underline{S}_D(f) = \frac{1}{\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_{\text{coil}})} \int_{S_R} \underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) dS_R$$

or by the weighted sum of the transfer functions

$$\underline{S}_D(f) = \frac{1}{\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_{\text{coil}})} \sum_{m=1}^M \underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r[m]) \Delta S_R(\mathbf{r}_r[m])$$

with the surface element $\Delta S_R(\mathbf{r}_r[m])$ corresponding to the scanning point m .

20.8.2 Effective radiation area

20.8.2.1 General

At the resonance frequency f_s , the combined surface areas of the cone, diaphragm, surround and other radiating parts can be replaced with a rigid piston having an equivalent effective radiation area S_D provided the reference displacement $\underline{X}(f)$ and the generated volume velocity remain the same $\underline{Q}(f_s) = j2\pi f_s \underline{S}_D(\underline{X}(f_s))$.

NOTE The effective radiation area S_D is a scalar value corresponding to the absolute value of the mechano-acoustical coupling function $|\underline{S}_D(f_s)|$ at the resonance frequency f_s (see Klippel [15]).

20.8.2.2 Acoustical measurement method

- The transducer shall be operated in free air (no enclosure) under half-space measurement conditions in accordance with 9.3. The transducer shall be excited at the resonance frequency f_s by a sinusoidal tone under small-signal conditions in accordance with 8.2.

- b) The reference displacement $x(t)$ shall be measured in accordance with 19.3 and the reference displacement $\underline{X}(f_s)$ is determined at the resonance frequency f_s .
- c) The sound pressure $p(t, \mathbf{r}_{\text{far}})$ shall be measured on axis at point $\mathbf{r}_{\text{far}}$ at a specified distance from the reference point $\mathbf{r}_{\text{r,ref}}$ in the far field of the transducer according to IEC 60268-21. The amplitude of the sound pressure $\underline{P}(f_s, \mathbf{r}_{\text{far}})$ is determined at the resonance frequency f_s .
- d) The effective radiation area S_D shall be determined by Formula (13)

$$S_D = \frac{2\pi |\mathbf{r}_{\text{far}} - \mathbf{r}_{\text{r,ref}}| |\underline{P}(f_s, \mathbf{r}_{\text{far}})|}{(2\pi f_s)^2 \rho_0 |\underline{X}_{\text{coil}}(f_s)|} \quad (13)$$

using the density of air ρ_0 at normal conditions in accordance with 7.2.1.

20.8.2.3 Mechanical measurement method

- a) The mechano-acoustical coupling function $\underline{S}_D(f)$ is determined in accordance with 20.8.1.
- b) The fundamental resonance frequency f_s is determined in accordance with 20.3.2.
- c) The effective radiation area $S_D = |\underline{S}_D(f_s)|$ equals the absolute value of the mechano-acoustical coupling function $\underline{S}_D(f)$ at the resonance frequency f_s .

20.8.2.4 Geometrical measurement method

The effective radiation area shall be calculated using $S_D = S_c + 0,5 S_s$ provided the following conditions exist:

- a) The inner central part of the radiator vibrates as a rigid piston having approximately the same displacement transfer function $\underline{H}_x(f, \mathbf{r}_r[m])$ throughout.
- b) The surround surface S_s is small compared to the rigid central surface S_c (the ratio $S_s/S_c < 20\%$).
- c) The displacement decreases linearly over the surrounding area.

For circular radiators (for example, woofers) having a surround with inner diameter d_i and outer diameter d_o , the effective radiation area can be calculated using Formula (14):

$$S_D \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_i + d_o}{2} \right)^2 \quad (14)$$

NOTE The geometrical method applied to micro-speakers, headphones and transducers using a non-axial symmetrical radiator can be prone to significant errors in the calculated S_D .

20.8.3 Acoustical load impedance

20.8.3.1 General

The total acoustical load impedance $\underline{Z}_{\text{AL}}(f)$ considers all effects of the air on the moving parts of the transducer and coupled acoustic elements (port, enclosure, horn) versus frequency (see Vanderkooy [16]).

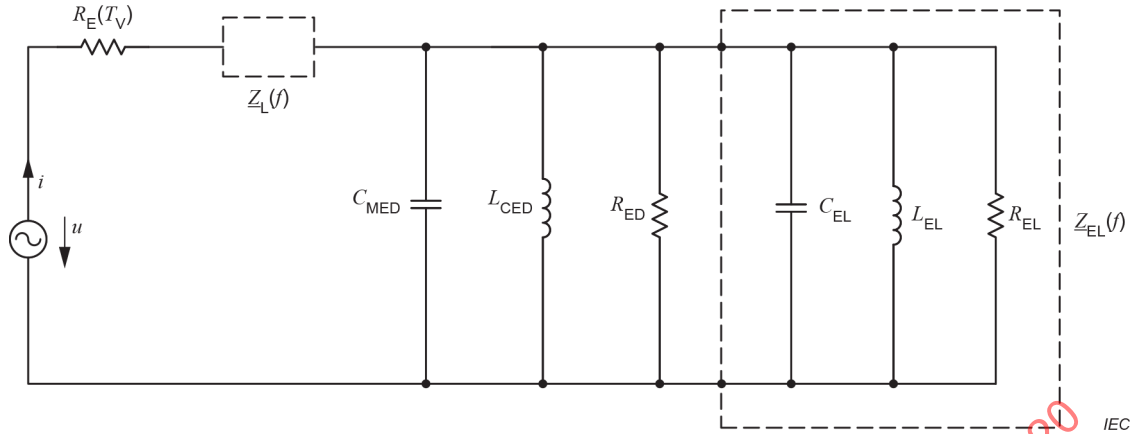


Figure 5 – Equivalent electrical network of a transducer operated in a baffle represented by pure mechanical elements and additional acoustical elements

20.8.3.2 Vacuum measurement method

The total acoustical load impedance $Z_{AL}(f)$ shall be determined based on the change in electrical input impedance $Z_E(f)$ while operating the DUT in air and in vacuum.

- The device under test is operated in air under normal working conditions and the electrical input impedance shall be measured in accordance with Clause 18. The electrical impedance $Z_{EM,air}(f)$ representing the mechanical and acoustical elements in the electrical domain as shown in Figure 5 shall be determined in accordance with 20.2.4.
- The device under test is operated in vacuum under normal working conditions and the electrical input impedance shall be measured in accordance with Clause 18. The electrical impedance $Z_{EM,vac}(f)$ representing the mechanical elements C_{MED} , L_{CED} and R_{ED} in the electrical domain as shown in Figure 5 shall be determined in accordance with 20.2.4.

NOTE 1 The measurement in vacuum can be performed on the transducer after removing the horn, enclosure and other components of the acoustical system.

- The force factor T_{BI} is determined in accordance with 20.4.
- The effective radiation area S_D shall be determined in accordance with 20.8.2.
- The acoustical impedance $Z_{AL}(f)$ shall be calculated using Formula (15):

$$Z_{AL}(f) = \frac{T_{BI}^2}{S_D^2} \frac{1}{Z_{EL}(f)} = \frac{T_{BI}^2}{S_D^2} \left(\frac{1}{Z_{EM,air}(f)} - \frac{1}{Z_{EM,vac}(f)} \right) \quad (15)$$

NOTE 2 The acoustical impedance $Z_{AL}(f)$ can be approximated by a rational transfer function to simplify the export to other simulation tools.

20.8.4 Lumped parameters of a coupled resonator

20.8.4.1 General

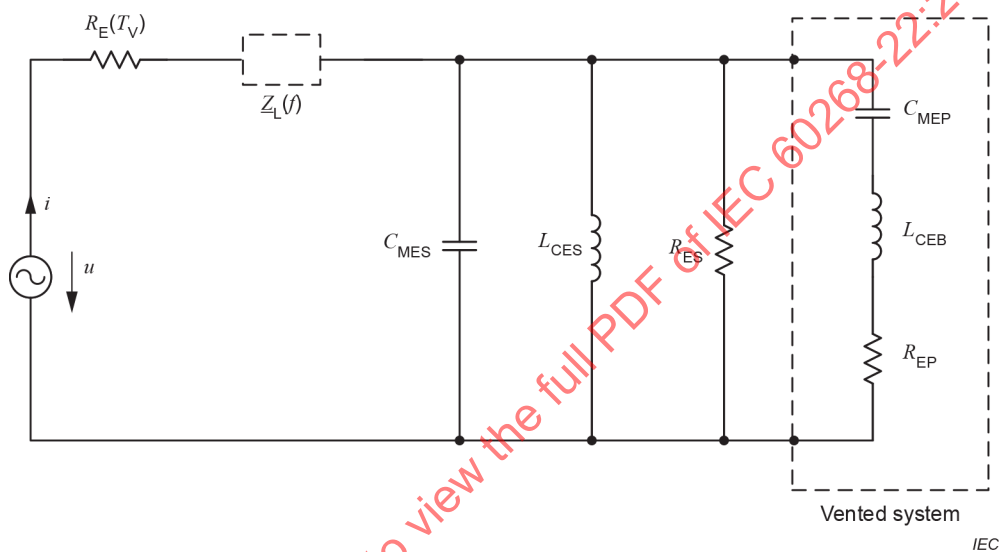
The lumped parameters of a specified acoustical equivalent circuit representing the acoustical load of a coupled acoustical resonator (e.g. vented enclosure) or mechanical resonator (e.g. woofer without electrodynamic motor) shall be determined based on the measurement of the electrical input impedance $Z_E(f)$.

20.8.4.2 Difference method

- The acoustical load impedance $Z_{AL}(f)$ shall be determined by performing two measurements; the first measurement of the device under test (e.g. a vented box system) and the second measurement of the transducer operated in vacuum in accordance with 20.8.3.
- The lumped parameters of a specified acoustical equivalent circuit representing the acoustical load may be determined by minimizing the deviation between the measured and the modelled acoustical load impedance $Z_{AL}(f)$.

20.8.4.3 Combined identification of acoustical and mechanical parameters

- The device under test is operated in air under normal working conditions and the electrical input impedance shall be measured in accordance with Clause 18. The electrical impedance $Z_{EM}(f)$ representing the mechanical and acoustical elements in the electrical domain shall be determined in accordance with 20.2.4.



The capacitor C_{MES} , inductance L_{CES} and resistance R_{ES} represent the mechanical and acoustical behaviour of the transducer in free air in accordance with 20.2.4. The parameter values C_{MES} , L_{CES} and R_{ES} are not identical to the pure mechanical element parameter values C_{MED} , L_{CED} and R_{ED} as found in vacuum, but instead reflect the effect of air load on the radiator's surface and air flow in the gap, pole piece, spider, etc. The inductance L_{CEB} , resistance R_{EP} and capacitance C_{MEP} represent the load $Z_{EL}(f)$ of the vented enclosure.

Figure 6 – Equivalent electrical network representing the electrical input impedance of a vented loudspeaker system

- The electrical impedance $Z_{EM}(f)$ representing the mechanical and acoustical elements shall be modelled by a specified electrical equivalent circuit comprised of lumped elements representing the piston mode and the acoustical load. The parameter values of the lumped elements shall be determined by minimizing the deviation between the measured and modelled electrical impedance.
- The electrical load parameters shall be transformed into acoustical parameters using the force factor T_{BI} and the effective radiation area S_D .

NOTE In a vented system, inductance L_{CEB} , resistance R_{EP} and capacitance C_{MEP} are converted to compliance C_{AB} , port losses R_{AP} , and port air mass M_p . The resonance frequency f_B and loss factor of the acoustical resonator Q_B are calculated based on the electrical load parameters. Alternatively, the acoustical load parameters are calculated based on additional information such as port geometry. See Small [7] for a detailed small-signal analysis of systems using a ported enclosure or a passive radiator.

21 Electro-acoustical efficiency

21.1 Reference efficiency

21.1.1 General

The reference efficiency η_r is the ratio between the acoustic output power P_A and the real electrical input power P_{REAL} supplied with a band limited stimulus such as a pink noise or a multi-tone complex with similar spectral properties. The DUT shall be operated under small-signal conditions in accordance with 8.2. The stimulus is band-limited to the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$ as defined in IEC 60268-21. The reference efficiency of a transducer shall be measured under half-space conditions (e.g. direct radiating transducer mounted in a baffle) or coupled to other acoustical elements (e.g. horn compression driver coupled to plane wave tube) defined by the manufacturer. The reference efficiency of a loudspeaker system (with enclosure, horn, etc.) shall be evaluated under full-space anechoic conditions in accordance with 9.2.

21.1.2 Methods of measurement

21.1.2.1 General

One of the following selected measurement methods shall be stated by the manufacturer.

21.1.2.2 Sound power measurement

- The device under test shall be operated under small signal conditions in accordance with 8.2. The band limited stimulus is supplied to the electrical input of the device under test and the real electrical input power P_{REAL} shall be measured in accordance with 17.1.
- The acoustic output power P_A shall be measured in accordance with IEC 60268-21, using the same band limited stimulus.
- The reference efficiency shall be calculated as the ratio

$$\eta_r = 100 (P_A / P_{\text{REAL}})$$

in percent.

21.1.2.3 Sound-pressure measurement

If the device under test closely approaches omnidirectional radiation behaviour and generates a directivity index $D_i(f) \leq 0,5$ dB in the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$, the following measurements shall be performed:

- The device under test shall be operated under small signal conditions in accordance with 8.2. The band limited stimulus is supplied to the electrical input of the device under test and the electrical input power P_{REAL} shall be measured in accordance with 17.1.
- The RMS value $\bar{p}$ of the sound pressure signal shall be measured at a single point on the reference axis at a defined distance r from the device under test.
- The acoustic output power P_A shall be calculated using $P_A = 0,031(r\bar{p})^2$ for full-space conditions and $P_A = 0,0155(r\bar{p})^2$ for half-space conditions, where the distance r is expressed in metres.
- The reference efficiency shall be calculated as the ratio

$$\eta_r = 100 (P_A / P_{\text{REAL}})$$

in percent.

21.2 Passband efficiency

21.2.1 General

The passband efficiency η_0 based on measured small-signal parameters shall only be applied towards transducers operating under half-space conditions. The passband efficiency η_0 corresponds to the reference efficiency η_r measured in the rated frequency range provided the following conditions are true:

- the lowest frequency f_l in the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$ starts above the resonance frequency ($f_l > f_s$);
- the highest frequency f_u in the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$ ends below the break-up frequency of the radiator;
- the electrical impedance of the lossy voice-coil inductance is much smaller than the voice-coil DC resistance $|Z_L(f)| \ll R_E$.

21.2.2 Method of measurement

- The transducer shall be mounted in a baffle in accordance with 13.1 b) and operated under small signal conditions in accordance with 8.2. The DC resistance R_E shall be determined in accordance with 20.2.2. The force factor T_{BI} and the moving mass M_{MS} shall be determined in accordance with 20.4. The effective radiation area S_D shall be measured in accordance with 20.8.2.
- The reference efficiency under half-space conditions shall be determined in percent in accordance with Beranek [4] using

$$\eta_0 = 100 \frac{T_{BI}^2}{R_E M_{MS}^2} \frac{\rho_0 S_D^2}{2\pi c} \quad (16)$$

NOTE In Formula (16), the speed of sound is c and the density of air is ρ_0 .

22 Sensitivity

22.1 Reference sensitivity

The reference sensitivity of a transducer or passive system is the sound pressure level $L_{r,u_{ref},r_{ref}}$ generated at an evaluation point r_e under normal measuring condition in accordance with IEC 60268-21. Pink noise or a multi-tone complex with similar spectral properties shall be band-limited to the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$ as defined in IEC 60268-21 and supplied at a defined RMS value of the reference voltage u_{ref} to the electrical input of the device under test. The reference sensitivity of a direct radiating transducer shall be measured under half-space conditions (transducer mounted in a baffle) on the reference axis at a specified distance r_{ref} (typically 1 m). The reference sensitivity of a transducer coupled to other acoustical elements (e.g. horn compression driver coupled to plane wave tube) can also be measured in accordance with 9.7 and 13. The reference sensitivity of a loudspeaker system (with enclosure, horn, etc.) shall be evaluated under full-space anechoic conditions in accordance with 9.2. The reference voltage u_{ref} , the position of the evaluation point and the properties of the stimulus shall be stated with the SPL value.

A reference voltage $u_{ref} = \sqrt{P_{E,N} Z_N}$ is recommended for transducers and passive systems that corresponds to the nominal input power $P_{E,N} = 1$ W at the rated nominal electrical impedance Z_N giving, for example, $u_{ref} = 2.8$ V RMS for 8 Ohm loudspeakers. A smaller value of the reference voltage can be required for microspeakers, headphones and other audio devices to ensure small-signal conditions in accordance with 8.2. A constant reference voltage $u_{ref} = 1$ V RMS is recommended for assessing active systems and for comparing devices with different nominal impedances.

- a) The device under test shall be operated under small signal conditions in accordance with 8.2. The band limited stimulus is supplied to the electrical input of the device under test and the terminal voltage $\tilde{u}_{\text{test}}$ shall be measured in accordance with 17.3. The value of the RMS value of the terminal voltage $\tilde{u}_{\text{test}}$ shall ensure small-signal conditions in accordance with 8.2.

The sound pressure level $L(r_e)$ shall be measured on the reference axis at the evaluation distance r_e under far field conditions as specified in IEC 60268-21. The reference voltage u_{ref} and the reference distance r_{ref} are considered to be virtual conditions, which shall not be used in practical measurements of micro-speakers, headphone transducers or line arrays.

NOTE The reference sensitivity is a small signal characteristic where nonlinearities and heating of the device under test are negligible. It is assumed that the evaluation point r_e is in the far field of the loudspeaker where the extrapolation of the sound pressure to the reference distance r_{ref} can be determined using the $1/r$ law.

- b) The reference sensitivity level at the reference distance r_{ref} and reference voltage u_{ref} shall be calculated in decibel using Formula (17):

$$L_{r,u_{\text{ref}},r_{\text{ref}}} = L_{r_e} + 20\lg_{10}\left(\frac{r_e}{r_{\text{ref}}}\right) - 20\lg_{10}\left(\frac{\tilde{u}_{\text{test}}}{u_{\text{ref}}}\right) \quad (17)$$

22.2 Passband sensitivity

The passband sensitivity level $L_{0,u_{\text{ref}},r_{\text{ref}}}$ is a characteristic based on lumped parameter modelling and corresponds to the reference sensitivity level $L_{r,u_{\text{ref}},r_{\text{ref}}}$ measured in the rated frequency range, provided the following conditions are true:

- the lowest frequency f_l in the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$ starts above the resonance frequency (typically $f_l > 2f_s$);
- the highest frequency f_u in the rated frequency range $f_l \leq f \leq f_u$ ends below the break-up frequency of the radiator;
- the electrical impedance of the lossy voice coil inductance is much smaller than the DC resistance $|\underline{Z}_L(f)| \ll R_E$.

Based on the passband efficiency η_0 in percent defined in 21.2, the passband sensitivity level in dB shall be calculated using Formula (18):

$$L_{0,u_{\text{ref}},r_{\text{ref}}} = 10\lg_{10}\left(\frac{\eta_0 (u_{\text{ref}})^2}{100 \cdot R_E 1W}\right) + 112 - 20\lg_{10}\left(\frac{r_{\text{ref}}}{1m}\right) \quad (18)$$

23 Large-signal characteristics

23.1 Electrical and mechanical nonlinearities

23.1.1 Nonlinear stiffness $K_{\text{MS}}(x)$

23.1.1.1 General

The nonlinear stiffness factor $K_{\text{MS}}(x)$ is the factor coupling the instantaneous displacement x with the restoring force $F = K_{\text{MS}}(x)x$. It is measured using an AC stimulus generating sufficient excitation at the resonance frequency f_s of the transducer. The nonlinear stiffness $K_{\text{MS}}(x)$, (which is the reciprocal of the compliance $C_{\text{MS}}(x)$), shall be reported as a function of displacement x within the measured range $-x_{\text{peak}} < x < x_{\text{peak}}$.

23.1.1.2 Method of measurement

The characteristics of the nonlinear stiffness $K_{MS}(x)$ shall be measured using the full dynamic method as defined in Clause 10 of IEC 62458:2010 or by the method as defined in IEC 62459. The limit x_{peak} of the measurement range shall be less than the mechanical limited peak displacement X_{mech} defined in 23.5.2.

23.1.2 Nonlinear force factor

23.1.2.1 General

The nonlinear force factor $T_{BI}(x)$, as found in electro-dynamic transducers using a moving voice coil, is the nonlinear factor coupling the current i with the Lorentz force $F = T_{BI}(x)i$. The nonlinear force factor $T_{BI}(x)$ shall be reported as a function of displacement x within the measured range $-x_{\text{peak}} < x < x_{\text{peak}}$.

23.1.2.2 Method of measurement

The characteristics of the nonlinear force factor $T_{BI}(x)$ shall be measured using the full dynamic method as defined in Clause 10 of IEC 62458:2010. The limit x_{peak} of the measurement range shall be smaller than the mechanical limited peak displacement X_{mech} as defined in 23.5.2.

23.2 Other loudspeaker nonlinearities

Other transducer nonlinearities can also generate significant distortion, thereby limiting the output signal. The measurement of the nonlinear voice-coil inductance is described in IEC 62458. The manufacturer shall give a detailed description of the model when providing further nonlinear parameters.

23.3 Asymmetry of the nonlinearity

23.3.1 Stiffness asymmetry A_K

23.3.1.1 General

The asymmetry of the nonlinear stiffness characteristic $K_{MS}(x)$ is assessed by a single value in percent

$$A_K(x_{\text{peak}}) = \frac{2(K_{MS}(-x_{\text{peak}}) - K_{MS}(x_{\text{peak}}))}{K_{MS}(-x_{\text{peak}}) + K_{MS}(x_{\text{peak}})} \times 100 \quad (19)$$

as defined by 12.3 in IEC 62458:2010. The manufacturer shall state the value A_K together with the limit x_{peak} of the measurement range.

NOTE The sign of A_K indicates the direction of the displacement where the suspension is softer and corresponds to the sign of the DC displacement generated dynamically by the $K_{MS}(x)$ nonlinearity that rectifies the AC displacement signal.

23.3.1.2 Method of measurement

- The nonlinear stiffness characteristic $K_{MS}(x)$ shall be measured within the measured range $-x_{\text{peak}} < x < x_{\text{peak}}$ in accordance with 23.1.2.
- The asymmetry A_K shall be calculated in accordance with Formula (19).

23.3.2 Force factor asymmetry A_{BI}

23.3.2.1 General

The asymmetry of the nonlinear force factor $T_{BI}(x)$ characteristic is defined in percent by

$$A_{BI}(x_{peak}) = \frac{2(T_{BI}(-x_{peak}) - T_{BI}(x_{peak}))}{T_{BI}(-x_{peak}) + T_{BI}(x_{peak})} \times 100 \quad (20)$$

which assesses the difference between the force factor at positive and negative peak displacements with respect to the mean value of the force factor at those points. The manufacturer shall state the value A_{BI} together with the maximum displacement limit x_{peak} or $-x_{peak}$ in the measurement range.

NOTE The sign of A_{BI} indicates the direction of displacement with respect to the maximum value of T_{BI} where the force factor is lower and corresponds to the sign of the DC displacement generated dynamically by rectification of a sinusoidal displacement signal above the resonance frequency.

23.3.2.2 Method of measurement

- The nonlinear force factor curve $T_{BI}(x)$ shall be measured within the range $-x_{peak} < x < x_{peak}$ in accordance with 23.1.2.
- The asymmetry A_{BI} shall be calculated in accordance with Formula (20).

23.3.3 Force factor symmetry point x_{sym}

23.3.3.1 General

The force factor symmetry point x_{sym} is implicitly defined, in accordance with 11.3 in IEC 62458:2010, as the central point between two points on the $T_{BI}(x)$ curve separated by distance $2x_{ac}$ having the same T_{BI} -value as the minimum of the force factor at maximum displacement limit.

$$T_{BI}(x_{sym} - x_{ac}) = T_{BI}(x_{sym} + x_{ac}) = \min \left\{ \begin{array}{l} T_{BI}(-x_{peak}) \\ T_{BI}(x_{peak}) \end{array} \right\} \quad (21)$$

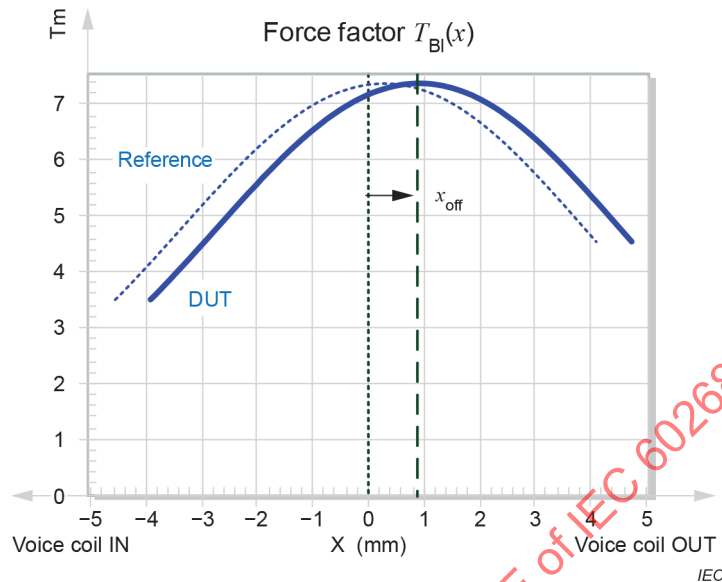
The position of the point with the larger displacement $|x_{sym}| + x_{ac}$ or $|x_{sym}| - x_{ac}$ should be equal to the maximum displacement limit within the measurement range $-x_{peak} < x < x_{peak}$. The manufacturer shall state the value x_{sym} together with the maximum displacement limit x_{peak} or $-x_{peak}$ in the measurement range.

NOTE In the design and manufacturing of electro-dynamical transducers, it is a desired target to keep the force factor symmetry point x_{sym} , under large values of excursion x_{ac} , as close as possible to the rest position of the coil ($x_{sym} \approx 0$). However, over the full operating range of displacement, the symmetry point is not always identical with a voice-coil offset from the optimal rest position. In fact, the symmetry point can only be used as a direct recommendation for shifting the voice coil's rest position when the T_{BI} -curve is symmetrical and the symmetry point $x_{sym}(x_{ac})$ is constant for any excursion $x_{ac} < x_{peak}$. The measurement of the symmetry point $x_{sym}(x_{ac})$ as a function of excursion x_{ac} , as defined in 11.3 in IEC 62458:2010, reveals the asymmetry in the B field generated by the magnetic system.

23.3.3.2 Method of measurement

- The nonlinear force factor curve $T_{BI}(x)$ shall be measured within the measured range $-x_{peak} < x < x_{peak}$ in accordance with 23.1.2.

- b) The minimum value of the force factor from the lower and higher limits of the measurement range $T_{BI}(-x_{peak})$ and $T_{BI}(x_{peak})$ shall be determined.
- c) The force factor symmetry point x_{sym} shall be calculated by solving the implicit relationship in Formula (21).



The force factor $T_{BI}(x)$ of a DUT shown as solid line compared to the reference curve shown as dotted line reveals a voice coil offset x_{off} from the reference position.

Figure 7 – Nonlinear force factor characteristic of an electro-dynamical transducer

23.4 Offset from reference rest position, x_{off}

23.4.1 General

The offset is a displacement shift in the measured $T_{BI}(x)$ curve of the device under test (DUT) used to minimize the deviation from a defined reference $T_{BI}(x)$ curve in the measurement range $-x_{peak} < x < x_{peak}$ as shown in Figure 7. The reference $T_{BI}(x)$ curve shall belong to a real or virtual reference transducer having the similar properties as the device under test (e.g. same voice coil height and gap depth). The manufacturer shall state the value x_{off} together with the limit x_{peak} of the measurement range.

NOTE This offset is important for assessing the voice coil rest position in electro-dynamical transducers, where the desired $T_{BI}(x)$ reference curve shows significant asymmetries caused by the motor structure and the voice coil's configuration (overhung or underhung), and/or the absence of a voice-coil former. The offset defined as a displacement shift with respect to a reference curve is more general than the definition in 11.4 of IEC 62458:2010, which is based on the symmetry point x_{sym} . However, if the symmetry point $x_{sym}(x_{ac})$ is independent of the excursion x_{ac} and the T_{BI} -curve becomes completely symmetrical after removing any offset x_{off} , the general definition given here is then identical to the definition presented in IEC 62458.

23.4.2 Method of measurement

- a) For transducer development, the reference curve of the force factor $T_{BI}(x)$ shall be defined as the target value. If unavailable, the reference curve can be measured, in accordance with 23.1.2.2, within the measured range $-x_{peak} < x < x_{peak}$ on a reference unit representative of the units in the sample lot passing the end-of-line test.
- b) The force factor curve $T_{BI}(x)$ of the device under test shall be measured within the measured range $-x_{peak} < x < x_{peak}$ in accordance with 23.1.2.
- c) The offset x_{off} shall be determined as the displacement shift required in the measured $T_{BI}(x)$ curve of the device under test to minimize the deviation from the reference curve.

NOTE The amount of offset x_{off} from the reference position is a useful characteristic to assess the production variances of the voice coil rest position and the influence of gravity, aging, fatigue, climate and acoustic load changes in electro-dynamical transducer. The standard and maximum deviations of the offset x_{off} are required to determine the boundary clearances and the mechanically limited peak displacement x_{mech} , as defined in 23.5.

23.5 Maximum reference displacement

23.5.1 Clearance to the boundaries

23.5.1.1 General

The positive and negative clearances are the theoretical limits of the reference displacement $x(t)$ and they are the time varying distances

$$X_{\text{clear}+}(t) = L_+ - X_0(t)$$

$$X_{\text{clear}-}(t) = L_- - X_0(t)$$

between the instantaneous rest position $X_0(t)$ and the upper and lower boundaries $L_{\pm}$ which limit the reference displacement by the geometry of the mechanical elements (i.e. bottoming of the voice coil in the gap).

NOTE For example, the instantaneous absolute position of the voice coil $x_{\text{abs}}(t) = X_0(t, n) + x(t)$ in an electro-dynamical transducer depends on the rest position $X_0(t, n)$ and the reference displacement $x(t)$ generated by the audio input signal (Klippel [17]). The voice coil's rest position $X_0(t, n)$ varies between DUTs with number n owing to production tolerances. In addition, the voice coil's rest position $X_0(t, n)$ slowly changes over time t because of aging, viscoelasticity, gravity, load and climate.

The manufacturer shall state the mean initial positive and negative clearances

$$\overline{X}_{\text{clear}\pm} = \frac{1}{N_D} \sum_n^{N_D} X_{\text{clear}\pm}(t=0, n)$$

where the variations in clearance at the beginning of the life cycle ($t = 0$) are averaged over a representative number N_D of devices under test (DUTs).

23.5.1.2 Method of measurement

- a) Determine the initial rest position $X_0(t=0, n)$ from a representative number N_D of DUTs passing the end-of-line test ($t = 0$) and calculate the mean value:

$$\overline{X}_0 = \frac{1}{N_D} \sum_n^{N_D} X_0(t=0, n)$$

The rest position $X_0(t=0, n)$ of the radiator' surface shall be measured using an optical distance sensor or it shall be calculated from the identified shape of the force factor nonlinearity $T_{\text{BI}}(x)$ using a nonlinear parameter measurement technique defined in IEC 62458.

- b) From the representative number N_D of DUTs, select a reference unit that has a minimum offset when compared to the initial rest position $\overline{X}_0$.
- c) Using the reference unit and a laser displacement sensor, measure the maximum positive displacement x_{peak} and negative displacement x_{bottom} without generating impulsive distortion in the sound pressure output signal according to IEC 60268-21. The test is repeated iteratively with increasing amplitudes until both the crest factor of the high-pass filtered distortion exceeds 12 dB and the peak distortion value exceeds 1%.

NOTE The instantaneous crest factor [3] plotted versus reference displacement indicates the voice coil position where the impulsive distortion, commonly known as "*rub and buzz*", is generated. This information is the basis for finding a meaningful specification of the clearances and for finding the root cause of the impulsive distortion, e.g. voice coil bottoming, voice coil rubbing, and suspension limitations. Different values for the positive and negative clearances can be determined by adding a DC voltage to the AC stimulus to shift the coil to the positive and negative boundaries.

- d) The mean initial clearances $\bar{X}_{\text{clear}+} = x_{\text{peak}}$ and $\bar{X}_{\text{clear}-} = x_{\text{bottom}}$ are the maximum positive and negative displacements. The variance of the clearances is the variance of the rest position.

23.5.2 Mechanical limited peak displacement, X_{mech}

23.5.2.1 General

The mechanical limited peak displacement X_{mech} (specified as the excursion limit in IEC 62458) describes the maximum positive and negative peak mechanical displacement without considering the impact of low-order harmonic and intermodulation distortion on sound quality.

23.5.2.2 Method of measurement

- a) Determine mean initial clearances $\bar{X}_{\text{clear}\pm}$ in accordance with 23.5.1.
b) Calculate the excursion limit as the minimum of the positive and negative clearance values:

$$X_{\text{mech}} = \text{MIN}(\bar{X}_{\text{clear}+}, \bar{X}_{\text{clear}-})$$

23.5.3 Distortion limited peak displacement, X_{MAXd}

23.5.3.1 General

The distortion limited peak displacement X_{MAXd} is defined, according to 15.2.3 in IEC 62458:2010, as the peak displacement where the maximum value of either the total harmonic distortion (d_{THD}) or the second-order modulation distortion (d_{MD2}) or the third-order modulation distortion (d_{MD3}) in the radiated sound pressure is equal to a defined distortion threshold d . The value of d shall be stated in the subscript x_{MAXd} . For example, $X_{\text{MAX10}} = 3 \text{ mm}$ at $d = 10 \%$.

23.5.3.2 Method of measurement

- a) A two-tone signal $u(t) = \alpha \tilde{u}_{\text{max}} x(t)$ with the first tone at the resonance frequency $f_1 = f_s$ and the second tone at $f_2 = 8,5 f_s$ with an amplitude ratio of 4:1, respectively, shall be applied to the DUT.
b) The RMS input amplitude $\tilde{u} = \alpha \tilde{u}_{\text{max}}$ of the two-tone signal shall be increased iteratively in 1 dB steps using an appropriate scaling factor $\alpha_{\text{min}} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{max}}$.
c) At each 1 dB iteration of the input amplitude, the intermodulation distortion d_{MD2} and d_{MD3} , according to IEC 60268-21, shall be measured in the sound pressure output $p(t, \mathbf{r})$ at the measurement point $\mathbf{r}$ and the total harmonic distortion $d_{\text{THD}}(f_1)$ of the first tone f_1 shall be measured in accordance with IEC 60268-21.
d) The maximum peak displacement shall be determined in accordance with 19.3 where either the intermodulation distortion d_{MD2} or d_{MD3} or the total harmonic distortion $d_{\text{THD}}(f_1)$ is equal to a predefined threshold d .

NOTE The values of the minimum and maximum scaling factors α_{min} and α_{max} depend on the range of measured distortion values (d_{MD2} , d_{MD3} , or d_{THD}) required to permit the determination of the maximum peak displacement for the threshold distortion d (typical values are $\alpha_{\text{min}} = 0,1$ and $\alpha_{\text{max}} = 1$).

23.5.4 Compliance-limited displacement x_c

23.5.4.1 General

The compliance-limited peak displacement x_c is the peak value of the reference displacement $x(t)$ where the minimum compliance ratio, as defined in 12.2.1 in IEC 62458:2010, equals a defined threshold $C_{\min}$.

23.5.4.2 Method of measurement

- The nonlinear compliance curve $C_{MS}(x)$ (which is the reciprocal of the nonlinear stiffness curve $K_{MS}(x)$), shall be measured in accordance with 23.1.1.
- The compliance-limited displacement x_c is determined by searching for the displacement region $-x_c \leq x \leq x_c$ where the minimum compliance ratio $C_{MS}(x)/C_{MS}(0)$ equals a threshold $C_{\min} = 0,75$.
- The threshold limit $C_{\min}$ shall be reported with the displacement x_c . For example, $x_c = 2$ mm at $C_{\min} = 75$ %.

23.5.5 Force-factor-limited displacement x_{BI}

23.5.5.1 General

The force factor limited peak displacement x_{BI} is the peak value of the reference displacement $x(t)$ where the minimum force factor ratio, as defined in 11.2.1 in IEC 62458:2010, equals a defined threshold $T_{\min}$.

23.5.5.2 Method of measurement

- The nonlinear force factor curve $T_{BI}(x)$ shall be measured in accordance with 23.1.2.
- The force factor limited displacement x_{BI} is determined by searching for the displacement region $-x_{BI} \leq x \leq x_{BI}$ where the minimum force factor ratio $T_{BI}(x) / T_{BI}(0)$ equals a threshold $T_{\min} = 0,82$.
- The threshold limit $T_{\min}$ shall be reported with the displacement x_{BI} . For example, $x_{BI} = 3$ mm at $T_{\min} = 82$ %.

24 Thermal characteristics

24.1 General

The generation of heat and the transfer of heat to ambient environments can be modelled by a network comprised of lumped thermal parameters and state variables which describe the power flow and the temperature potential at virtual points such as the voice coil, air gap, pole plate, magnet and ambient air (Button [18]). The lumped thermal parameters depend on the selected equivalent circuit and the transducer type. A simple approach uses only a linear low pass system with one or more time constants (Chapman [19]). More advanced modelling considers nonlinear convection cooling and heating by eddy currents in the pole plate (Klippel [20]).

24.2 Increase in voice coil temperature

24.2.1 General

An increase in voice coil temperature $\Delta T_v = T_v - T_A$ is an increase in the mean value of the local temperature averaged over the voice coil wire, which corresponds to an increase in the DC voice coil resistance compared to the voice coil DC resistance under normal ambient temperatures T_A in accordance with 20.2.2.

24.2.2 Methods of measurement

- a) The device under test is acclimatized to the normal ambient conditions in accordance with 7.3.
- b) The reference DC resistance of the voice coil at normal ambient temperature $R_E(T_A)$ is measured, in accordance with 20.2.2, using a stimulus ensuring small-signal conditions in accordance with 8.2.
- c) The corresponding increase in DC resistance with rising voice-coil temperature $R_E(T_V)$ is measured by applying an appropriate stimulus to the electrical input of the device under test.

It is recommended to add a low-frequency tone with small amplitude to the audio signal, to ensure the measurement of the electrical input impedance $Z_E(f)$ when the audio signal provides no excitation of the device. The frequency of the tone should be at least one decade below the resonance frequency f_s , to ensure that the electrical input impedance $Z_E(f) \approx R_E(T_V)$.

- d) The increase of the voice coil's temperature is calculated by the relationship

$$\Delta T_V = (R_E(T_V) - R_E(T_A)) / \alpha + T_A \quad (22)$$

where α is the specific thermal coefficient of conductivity for the material used in the voice coil wire. If the material of the voice coil's wire is not known, then the specific thermal coefficient of conductivity for copper shall be used and the manufacturer shall state the uncertainty in the measurement.

24.3 Effective thermal resistance

24.3.1 General

The effective thermal resistance $R_{TH}(t)$ is the instantaneous ratio between the increase in voice-coil temperature $\Delta T_V(t)$ and the real input power $P_{REAL}(t)$.

NOTE The effective thermal resistance $R_{TH}(t)$ is not a constant but varies depending on the spectral and transient properties of the stimulus and it neglects convection cooling, heating by eddy currents and heat transfer via voice coil, pole plates, magnet and frames having different thermal capacities to the environment.

24.3.2 Method of measurement

- a) The instantaneous increase of the voice coil temperature $\Delta T_V(t)$ shall be measured in accordance with 24.2.2.
- b) The instantaneous real input power $P_{REAL}(t)$ shall be measured in accordance with 17.1.
- c) The effective thermal resistance shall be calculated using $R_{TH}(t) = \Delta T_V(t) / P_{REAL}(t)$.

24.4 Thermal parameters

24.4.1 General

The complete identification of the free parameters of the thermal model requires a fitting technique which minimizes the deviation between simulated and measured increase in the voice coil's temperature ΔT_V , as defined in 24.2. The manufacturer shall state the free parameters based on a comprehensive description of the thermal model used.

24.4.2 Method of measurement

- a) The instantaneous increase in voice coil temperature $\Delta T_V(t)$ shall be measured according to 24.2.2.

- b) The stimulus applied to the device under test shall have an RMS value that is equal to or less than the maximum input value $\tilde{u}_{\max}$ where the spectral properties in the rated frequency range are varied over time to generate significant variations in the voice coil temperature T_v . The real input power $P_{\text{REAL}}(t)$ and the power $P_{\text{Re}}(t)$ dissipated in the DC resistance $R_E(t)$ are measured over time. If the thermal model considers convection cooling, the reference displacement $x(t)$ shall be measured in accordance with 19.3.
- c) The free parameters of the thermal model shall be estimated by minimizing the deviation between measured and simulated increase in voice coil temperature $\Delta T_v(t)$, according to Klippel [20].

24.5 Thermal time constant of the voice coil

24.5.1 General

The thermal time constant of the voice coil $\tau_v = R_{\text{TV}}C_{\text{TV}}$ is the product of thermal resistance R_{TV} and thermal capacity C_{TV} of the voice coil.

NOTE The thermal time constant τ_v of the voice coil increases with thermal capacity, which is related to the mass of the coil. The thermal time constant τ_v increases with thermal resistance R_{TV} between the coil and the pole plates, which is related to the surface area and distance between the parts. The thermal time constant τ_v can vary between 1 s for micro-speakers up to 1 min for large woofers. This parameter determines the capability of the transducer to cope with high values of short-term input power.

24.5.2 Method of measurement

- a) The increase in the voice coil temperature $\Delta T_v(t)$ shall be measured in accordance with 24.2 by supplying a broadband stimulus to the device under test at maximum input value $\tilde{u}_{\max}$.
- b) After a heating interval of 10 s, the stimulus shall be switched off and the decay of the voice coil temperature shall be monitored for 3 min. During this test, the real input power $P_{\text{REAL}}(t)$ defined in 17.1 and the power $P_{\text{Re}}(t)$ dissipated in the DC resistance $R_E(t)$ in 17.2 are measured over time. If the thermal model considers convection cooling, the voice coil's displacement $x(t)$ shall be measured in accordance with 19.3.
- c) All thermal parameters of the model shall be identified in accordance with 24.4.2.
- d) The thermal time constant of the voice coil shall be calculated using $\tau_v = R_{\text{TV}}C_{\text{TV}}$.

24.6 Thermal bypass factor

The thermal bypass factor γ is defined, according to [20], as the ratio of the power $P_{\text{Con}} + P_{\text{eg}}$ bypassing the coil to the power $P_{\text{Re}} + P_{\text{R2}}$ dissipated in the DC resistance of the coil and in the real part of the electrical impedance $\underline{Z}_L(f)$ representing the lossy voice coil inductance in accordance with 20.2.3.

NOTE The bypass factor is an important characteristic to assess the natural cooling mechanisms inherent in the transducer. The convected power P_{Con} is directly transferred via the moving air particles in the gap to the environment. The power P_{eg} is directly transferred to the pole tips and the magnet structure. The larger the bypass factor γ , the more heat is transferred directly to the iron and to the ambient environment, thereby reducing the contribution heating the voice coil, according to Klippel [20].

25 Time variance of the loudspeaker characteristics

25.1 Fatigue and load induced aging

25.1.1 General

The stiffness $K_{\text{MS}}(x)$ of the mechanical suspension varies significantly over time according to Suresh [21]. Large peak excursions can decrease the resonance frequency f_s and the stiffness is temporarily reduced relative to the stiffness $K_{\text{MS}}(x = 0)$ at the rest position as shown by

Agerkvist [22]. Other changes are not reversible and the suspension stiffness is permanently reduced with the mechanical apparent power accumulated over time as modelled by Klippel [23]. Most transducers show a rapid decay of the stiffness at the beginning of the life cycle which is called "break-in effect". After the initial break-in, the decay follows a softer slope which corresponds to the fatigue of the suspension.

25.1.2 Stiffness versus apparent work

25.1.2.1 General

The variation of the stiffness $K_{MS}(x, W)$ of the mechanical suspension shall be measured versus apparent work performed by the device under test. The apparent work is defined

$$W(t_m) = \int_0^{t_m} |v(t)F(t)| dt \quad (22)$$

as the integral of the absolute value of voice coil velocity $v(t)$ multiplied with the restoring force $F(t) = K_{MS}(x, W)x(t)$ over the lifetime t_m of the device under test.

25.1.2.2 Method of measurement

- The device under test shall be operated under normal working conditions and excited with a broadband stimulus in the rated frequency band at the maximum input value $\tilde{u}_{max}$. The voltage and current at the electrical terminals shall be monitored for the device under test. Other state variables may be monitored as well.
- The free parameters of the large signal model, including the time-varying nonlinear stiffness $K_{MS}(x, W(t))$, shall be identified versus apparent work $W(t)$ for any instantaneous time t using the $K_{MS}(x)$ dynamic identification technique, in accordance with 23.1.1.
- The velocity $v(t)$ and the restoring force $F(t)$ shall be calculated based on the large-signal model and the apparent work $W(t_m)$ shall be accumulated over time by using Formula (22).

25.1.3 Parameters of the load induced aging model

25.1.3.1 General

The dependency of the mechanical stiffness at the rest position $K_{MS}(x = 0, W)$ versus apparent work W shall be modelled by the exponential function

$$K_{MS}(x = 0, W) = K_{MS}(x = 0, W = 0) - \sum_{i=1}^N C_i \left(1 - e^{-W/w_i}\right) \quad (23)$$

as modelled by Klippel [23]. The manufacturer shall state the maximum order (usually $N = 2$), the initial stiffness $K_{MS}(x = 0, W = 0)$, the coefficients C_i and the work constants w_i .

NOTE The model $K_{MS}(x = 0, W)$ fit to the measured stiffness $K_{MS}(x = 0, W = 0)$ enables separation of the initial break-in effect from the on-going fatigue process. Based on performing an infinite amount of work, this model can be used to extrapolate the final value of the stiffness K_{∞} . In addition, this model can be used to calculate the required work $W_{90\%}$ to complete 90 % of the aging process.

25.1.3.2 Method of measurement

- The stiffness $K_{MS}(x = 0, W)$ at the rest position $x = 0$ shall be measured as a function of apparent work W in accordance with 25.1.2.

- b) The free parameters $K_{MS}(x=0, w=0)$, C_i and w_i of the load-induced aging model in Formula (23) shall be determined by minimizing the deviation between measured and simulated stiffness versus apparent power W .

25.1.4 Stiffness versus ambient temperature

25.1.4.1 General

The variation of the stiffness $K_{MS}(x, T_A)$ of the mechanical suspension shall be measured as a function of the ambient temperature in the stated temperature range $T_{low} < T_A < T_{up}$ (e.g. $-20\text{ °C} < T_A < 60\text{ °C}$) in accordance with IEC 60068-2. The heat generated by the electrical input power supplied to the DUT shall be negligible. The humidity of the air shall be controlled and reported together with the results.

25.1.4.2 Method of measurement

- The device under test shall be placed in a climate controlled test chamber and the ambient temperature T_A generated inside the chamber shall be set to the lower limit T_{low} of the stated temperature range.
- The device under test shall be acclimatized to the ambient temperature of the test chamber T_A for at least 30 min.
- The nonlinear stiffness $K_{MS}(x, T_A)$ of the mechanical suspension shall be measured by using the $K_{MS}(x)$ dynamic measurement technique in accordance with 23.1.1.2.

Rather than using a mechanical or acoustical sensor inside the hostile environment of the climate controlled test chamber, it is recommended to identify the nonlinear stiffness based on voltage and current monitored at the speaker terminals.

- The ambient temperature T_A shall be increased in increments of ΔT corresponding to the requested resolution (e.g. $\Delta T = 20\text{ K}$). The steps b) to d) shall be repeated if the ambient temperature T_A is less than the upper limit T_{up} of the temperature range.
- The stiffness $K_{MS}(x=0, T_A)$ at the rest position $x=0$ shall be reported as a function of the ambient temperature T_A .

NOTE 1 The visco-elastic properties of the suspension material change with the ambient temperature and these properties dominate the total stiffness at small displacements from the rest position $x=0$. At higher excursions, the ambient temperature has less influence on the stiffness because geometrical nonlinearities, such as the unfolding of the corrugation rolls, become more dominant.

- The compliance-limiting peak displacement $x_c(T_A)$ shall be calculated in accordance with 23.5.4 and reported as a function of the ambient temperature T_A .

NOTE 2 The reduction of stiffness $K_{MS}(x=0, T_A)$ with rising ambient temperature also reduces the compliance-limiting peak displacement $x_c(T_A)$.

- The stiffness asymmetry $A_K(T_A)$ shall be calculated in accordance with 23.3.1 and reported as a function of the ambient temperature T_A .

NOTE 3 In cases where the suspension stiffness is dominated by the surround instead of spider, some transducers using rubber and other temperature sensitive materials in the surround will generate a distinct asymmetry in the total stiffness at low temperatures $T_A < 0\text{ °C}$.

26 Measurement uncertainty

The measurement uncertainty is composed of several factors (as discussed by Chapman [24]):

- uncertainty of the test equipment used such as signal generator, current and laser sensor, etc.;

NOTE 1 Most laser vibrometers use a digital sensor and signal processing that can generate nonlinear signal distortion at small amplitudes even though the SNR of the laser sensor is still acceptable.

- tolerances of the mechanical coupling or mounting;
- the sound field or test environment;
- positioning the DUT in the test space.

Given knowledge of the aforementioned factors, generally the measurement uncertainty can be determined in accordance with ISO/IEC GUM.

NOTE 2 It is good practice to validate the measurement uncertainty by comparing measurement results with an accredited test laboratory.

The interpretation of the measurement uncertainty is different for the manufacturer (who has to guarantee the nominal performance as specified in the data sheet) and for the purchaser as follows:

- manufacturer production test limits: tolerance *minus* measurement uncertainty;
- purchaser measurement acceptance limits: nominal data *plus* measurement uncertainty.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

Annex A (informative)

Practical application guide

Table A.1 shows the relevance of measurement methods and characteristics described in this IEC standard for research and development (R&D), end-of-line testing (QC) and evaluation in the final target application (TA).

The measurements requiring free-field conditions as described in 9.2 and 9.3 and the scanning of the cone vibration (Clause 19) can be accomplished in R&D. The long-term measurement required to assess the thermal properties, aging and the climate influence are applicable in R&D and in the final target application (TA), where ordinary audio signals and voltage and current monitoring can be used.

Table A.1 – Important characteristics and their application

Clause	Characteristics	Research and Development (R&D)	End-of-line Testing (QC)	Target application (TA)
16.1	Rated maximum input value	x	x	
17.4	Rated maximum input power	x	x	
18.1	Complex electrical impedance	x	x	
19.4	Maximum peak and bottom reference displacement	x	x	x
19.5	DC reference displacement	x	x	x
19.7	Accumulated acceleration level	x		
20.2	Linear electrical parameters	x	x	x
20.4	Linear mechanical parameters	x	x	
20.8	Linear acoustical parameters	x		
21	Reference efficiency	x		
22	Reference Sensitivity	x		
23.1	Electrical and mechanical nonlinearities	x	x	x
23.3	Asymmetry of the nonlinearity	x	x	x
23.4	Offset of voice coil rest position	x	x	x
23.5	Maximum reference displacement	x	x	x
24.2	Increase of voice-coil temperature	x		x
24.3	Effective thermal resistance	x		x
24.4	Thermal parameter Identification	x		
25.1	Fatigue of mechanical suspension	x		x
25.1.4	Climate impact on suspension	x		x

Bibliography

- [1] AES Information Document for Acoustics – Plane Wave Tubes – Design and Practice, Audio Engineering Society, Inc., AES-1id-2012.
- [2] AES Information Document for Acoustics – Loudspeaker Driver Comparison Chamber, Audio Engineering Society, Inc., AES X223, Draft 2019
- [3] W. Klippel, Tutorial: "*Loudspeaker Nonlinearities - Causes, Parameters, Symptoms*" J. Audio Eng. Society 54, No. 10 pp. 907-939 (Oct. 2006).
- [4] L. L. Beranek, T. J. Mellow, *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, Academic Press, 2012.
- [5] W. Klippel and J. Schlechter, "Distributed Mechanical Parameters of Loudspeakers Part 1: Measurements, J. Audio Eng. Soc., Vol. 57, No. 7/8, 2009 July/August, pp. 500 – 511.
- [6] W. Klippel and J. Schlechter, "Distributed Mechanical Parameters of Loudspeakers Part 2: Diagnostics, J. Audio Eng. Soc., Vol. 57, No. 9, 2009 September, pp. 696 – 708.
- [7] R. H. Small, "Direct-radiator Loudspeaker System Analysis," J. Audio Eng. Society 20, No. 5, pp. 383-395 (June. 1972)
- [8] W. M. Leach, "Loudspeaker Voice-Coil Inductance Losses: Circuit Models, Parameter Estimation, and Effect on Frequency Response", J. Audio Eng. Soc., Vol. 50, No. 6, June 2002
- [9] K. Thorborg and A. D. Unruh, "Electrical Equivalent Circuit Model for Dynamic Moving-Coil Transducers Incorporating a Semi-Inductor", J. Audio Eng. Soc., Vol. 56, No. 9, September 2008.
- [10] M. H. Knudsen and J. G. Jensen, "Low-Frequency Loudspeaker Models that Include Suspension Creep", J. Audio Eng. Soc., Vol 41, No.1/2, 1993
- [11] T. Ritter, F. Agerkist, "Modelling Viscoelasticity of Loudspeaker Suspensions using Retardation Spectra," presented at the 129th Convention of the Audio Eng. Soc., 2010 November 4-7, San Francisco, CA, USA, preprint 8217
- [12] A. Bright, "Vibration Behaviour of Single-Suspension Electrodynamical Loudspeakers", presented at the 109th Convention of the Audio Eng. Soc., Los Angeles, CA, USA, 2000 September 22-25.
- [13] W. Klippel and W. Cardenas, "Modeling of Rocking Modes in Electro-Acoustical Transducers," J. Audio Eng. Soc., Vol. 64, Issue 12, pp. 962-968, December 2016.
- [14] W. Cardenas and W. Klippel, "Root Cause Analysis of Rocking Modes," J. Audio Eng. Soc., Vol. 64, Issue 12, pp. 969-977, December 2016.
- [15] W. Klippel and J. Schlechter, "Dynamical Measurement of the Effective Radiation Area SD," J. Audio Eng. Soc., Vol. 58, No. 1, 2010 January 2010.
- [16] J. Vanderkooy, The Inertial Air Load of a Loudspeaker Diaphragm, presented at the 124th convention of the Audio Eng. Soc. In Amsterdam, The Netherlands, May 17-20, 2008, preprint 7317.

- [17] W. Klippel, "Mechanical Overload Protection of Loudspeaker Systems," J. Audio Eng. Soc., Vol. 64, 10 pp. 771-783; October 2016
- [18] D. J. Button, "Heat Dissipation and Power Compression in Loudspeakers," J. Audio Eng. Soc., vol. 40, pp. 32–41 (1992 Jan./Feb.).
- [19] P. J. Chapman, "Thermal Simulation of Loudspeakers," presented at the 104th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol. 46, pp. 576–577 (1998 June), preprint 4667.
- [20] W. Klippel, "Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers," J. Audio Eng. Soc., Vol. 52, No. 1/2, 2004 January/February, pp. 3-25.
- [21] S. Suresh, „Fatigue of Materials ", Cambridge University Press 1998.
- [22] F. Agerkvist and B. R. Pedersen, "Time varying behaviour of the loudspeaker suspension: Displacement level dependency," presented at the 127th Convention of the Audio Engineering Society, New York, (7902), October 2009.
- [23] W. Klippel, "Mechanical Fatigue and Load-Induced Aging of Loudspeaker Suspension," presented at the 131st Convention 2011 October 20–23 New York, NY, USA
- [24] P. J. Chapman, "*Quantifying Acoustic Measurement Tolerances and their Importance in the Loudspeaker Supply Chain*," presented at the 136th convention of the Audio Eng. Soc., Berlin, Germany, April 26-29, 2014.
- [25] IEC 60050-151:2001, *Electrotechnical terminology – Electrical and magnetic devices*
- [26] IEC 60068-2 (all parts), *Environmental testing – Part 2: Tests*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	61
INTRODUCTION.....	63
1 Domaine d'application	64
2 Références normatives	64
3 Termes, définitions et termes abrégés	65
3.1 Termes et définitions	65
3.2 Termes abrégés	65
4 Description du type.....	65
5 Marquage des bornes et des commandes	65
6 Caractéristiques physiques.....	66
6.1 Dimensions	66
6.2 Masse.....	66
6.3 Connecteurs et faisceaux de câbles	66
7 Conditions	66
7.1 Conditions assignées	66
7.2 Conditions climatiques	66
7.3 Conditions normalisées de mesurage.....	67
8 Signaux d'essai	67
8.1 Généralités	67
8.2 Conditions de signaux faibles	67
9 Environnement acoustique.....	68
9.1 Généralités	68
9.2 Conditions de champ libre.....	68
9.3 Conditions de champ libre en demi-espace	68
9.4 Conditions d'air libre	68
9.5 Conditions d'application visée	68
9.6 Conditions de vide	68
9.7 Conditions de tube à ondes planes	69
9.8 Conditions de mesurage non acoustique.....	69
10 Positionnement du radiateur.....	69
10.1 Conditions géométriques assignées.....	69
10.2 Conditions d'application visée	70
11 Équipement de mesurage et résultats des essais	70
12 Exactitude des mesurages électriques et mécaniques	70
13 Montage du DUT	70
13.1 Montage et charge acoustique des unités motrices	70
13.2 Montage et charge acoustique d'un système électroacoustique.....	71
13.3 Exigences de vibrométrie laser	71
14 Préconditionnement.....	71
15 Conditions ambiantes assignées.....	72
15.1 Plages de températures	72
15.2 Plages d'humidité.....	72
16 Signaux électriques aux bornes du transducteur.....	72
16.1 Valeur d'entrée maximale assignée.....	72
17 Puissance électrique d'entrée	74

17.1	Puissance d'entrée réelle	74
17.2	Puissance dissipée dans la résistance en courant continu	74
17.3	Puissance dissipée dans l'impédance assignée	74
17.4	Puissance d'entrée maximale assignée	74
18	Impédance électrique d'entrée	75
18.1	Impédance électrique complexe	75
18.2	Impédance assignée: caractéristique à spécifier	75
19	Vibration de la surface du radiateur	76
19.1	Généralités	76
19.2	Déplacement d'un point de surface r_f	76
19.3	Déplacement de référence	77
19.4	Déplacement de crête et de fond	78
19.5	Déplacement en courant continu	78
19.6	Fonction de transfert de déplacement	79
19.7	Niveau d'accélération cumulé	79
20	Paramètres localisés des signaux faibles	80
20.1	Généralités	80
20.2	Paramètres électriques	81
20.3	Paramètres localisés relatifs	83
20.4	Paramètres mécaniques localisés	85
20.5	Paramètres purement mécaniques localisés	88
20.6	Elasticité en fonction de la fréquence	88
20.7	Paramètres mécaniques distribués	89
20.8	Paramètres acoustiques localisés	93
21	Efficacité électroacoustique	97
21.1	Efficacité de référence	97
21.2	Efficacité de la bande passante	98
22	Sensibilité	98
22.1	Sensibilité de référence	98
22.2	Sensibilité de la bande passante	99
23	Caractéristiques des signaux forts	100
23.1	Non-linéarités électriques et mécaniques	100
23.2	Autres non-linéarités des haut-parleurs	100
23.3	Asymétrie de la non-linéarité	100
23.4	Décalage par rapport à la position de repos de référence, x_{off}	102
23.5	Déplacement maximal de référence	103
24	Caractéristiques thermiques	106
24.1	Généralités	106
24.2	Augmentation de la température de la bobine acoustique	106
24.3	Résistance thermique efficace	107
24.4	Paramètres thermiques	107
24.5	Constante de temps thermique de la bobine acoustique	108
24.6	Facteur de contournement thermique	108
25	Variance temporelle des caractéristiques du haut-parleur	108
25.1	Vieillessement provoqué par la fatigue et la charge	108
26	Incertitude de mesure	110
	Annexe A (informative) Guide d'application pratique	112

Bibliographie.....	113
Figure 1 – Conditions assignées utilisées pour décrire la géométrie et la position du radiateur dans le système de coordonnées	69
Figure 2 – Réseau électrique équivalent représentant l'impédance électrique d'entrée à l'aide du modèle LR2 pour l'inductance avec perte d'un transducteur électrodynamique	80
Figure 3 – Réseau de paramètres localisés analogiques représentant les éléments électriques, mécaniques et acoustiques aux basses fréquences	85
Figure 4 – Fonction de distribution de masse asymétrique $D_M(y, z_0)$ dans le système mécanique d'un micro-haut-parleur qui éloigne le centre de gravité du point de pivot	91
Figure 5 – Réseau électrique équivalent d'un transducteur fonctionnant dans un écran acoustique représenté par des éléments purement mécaniques et des éléments acoustiques supplémentaires	95
Figure 6 – Réseau électrique équivalent représentant l'impédance d'entrée électrique d'un système de haut-parleur ventilé.....	96
Figure 7 – Caractéristique du facteur de force non linéaire d'un transducteur électrodynamique	102
Tableau A.1 – Caractéristiques importantes et leur application.....	112

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉQUIPEMENTS POUR SYSTÈMES ÉLECTROACOUSTIQUES –

Partie 22: Mesurages électriques et mécaniques sur transducteurs

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 60628-22 a été établie par le domaine technique 20: Audio analogique et numérique, du comité d'études 100 de l'IEC: Systèmes et équipements audio, vidéo et services de données.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
100/3311/CDV	100/3424/RVC

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60268, publiées sous le titre général *Equipements pour systèmes électroacoustiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

INTRODUCTION

Les mesurages des variables d'état électriques et mécaniques deviennent de plus en plus importants pour les raisons suivantes:

- la pression acoustique de sortie maximale est limitée par l'échauffement des bobines acoustiques et les non-linéarités des transducteurs. Le comportement des signaux forts des haut-parleurs peut être décrit par des modèles non linéaires et thermiques en utilisant des paramètres localisés. Ces caractéristiques physiques sont importantes pour la conception des transducteurs et l'intégration des systèmes;
- la vibration mécanique du diaphragme détermine le rayonnement du son. La vibration modale de la surface du radiateur peut être prédite par simulations numériques (analyse des éléments finis) et directement mesurée par vibrométrie laser. Ces données représentent des caractéristiques importantes du transducteur qui peuvent être utilisées pour concevoir la directivité souhaitée dans la sortie acoustique du système;
- le DSP (processeur de signal numérique) joue un rôle important dans les systèmes actifs. Le prétraitement numérique du flux audio exige des informations fiables sur les propriétés du transducteur afin de le protéger des surcharges thermiques et mécaniques et de compenser activement les distorsions linéaires et non linéaires générées dans le signal de sortie.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60268-22:2020

ÉQUIPEMENTS POUR SYSTÈMES ÉLECTROACOUSTIQUES –

Partie 22: Mesurages électriques et mécaniques sur transducteurs

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60268 s'applique aux transducteurs qui convertissent un signal d'entrée électrique en signal de sortie mécanique ou acoustique. Toutefois, si les bornes d'entrée électriques et la surface du radiateur sont accessibles, le présent document peut également s'appliquer aux systèmes électroacoustiques passifs et actifs tels que les haut-parleurs, les casques d'écoute, les téléviseurs, les appareils multimédias, les appareils audio personnels portables, les systèmes électroacoustiques pour automobile et les équipements professionnels. Le présent document ne décrit que les mesurages électriques et mécaniques qui aident à évaluer le comportement de transfert de l'appareil soumis à l'essai (DUT). Cela comprend le fonctionnement du DUT dans les domaines des signaux faibles et des signaux forts. L'influence des conditions de limite acoustique de l'application visée (par exemple, habitacle d'un véhicule) peut également être prise en considération dans l'évaluation physique du système électroacoustique. La perception et les évaluations cognitives du son reproduit et l'impact de la qualité acoustique perçue n'entrent pas dans le domaine d'application du présent document.

NOTE Le présent document ne s'applique pas aux microphones et autres capteurs. La mise en œuvre du présent document n'exige pas l'accès aux pressions acoustiques générées dans les champs proches ou lointains du radiateur. La directivité et d'autres caractéristiques qui décrivent les propriétés de transfert électroacoustique sont décrites dans la IEC 60268-21, qui couvre les mesurages acoustiques. L'application pratique des mesurages pour la recherche et le développement (R&D), les essais en fin de ligne (QC) et l'évaluation dans l'application finale visée (TA) est traitée à l'Annexe A.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60263:1982, *Echelles et dimensions des graphiques pour le tracé des courbes de réponse en fréquence et des diagrammes polaires*

IEC 60268-1:1985, *Équipements pour systèmes électroacoustiques – Partie 1: Généralités*

IEC 60268-2:1987, *Équipements pour systèmes électroacoustiques – Partie 2: Explication des termes généraux et méthodes de calcul*

IEC 60268-11:1987, *Équipements pour systèmes électroacoustiques – Partie 11: Application des connecteurs pour l'interconnexion des éléments de systèmes électroacoustiques*

IEC 60268-12:1987, *Équipements pour systèmes électroacoustiques – Partie 12: Application des connecteurs pour radiodiffusion et usage analogue*
IEC 60268-12:1987/AMD1:1991

IEC 60268-21:2018, *Équipements pour systèmes électroacoustiques – Partie 21: Mesures acoustiques (basées sur la sortie)*

IEC 62458:2010, *Sound system equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of large signal parameters* (disponible en anglais seulement)

IEC 62459:2010, *Sound system equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of suspension parts* (disponible en anglais seulement)

ISO 3:1973, *Nombres normaux – Séries de nombres normaux*

ISO/IEC GUM:1995, *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*

3 Termes, définitions et termes abrégés

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

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

3.1 Termes et définitions

3.1.1

comportement linéaire

comportement du DUT à de faibles amplitudes où la relation entre les signaux d'entrée et de sortie peut être modélisée par un système linéaire et décrite par une fonction de transfert linéaire

3.1.2

unité de référence

DUT avec des propriétés mesurées représentatives des unités du lot d'échantillons qui a satisfait à l'essai en fin de ligne

3.2 Termes abrégés

DUT (Device Under Test)	appareil soumis à l'essai
SPL (Sound Pressure Level)	niveau de pression acoustique
FEA (Finite Element Analysis)	analyse par éléments finis
FT (Fourier Transform)	transformation de Fourier

4 Description du type

La description du type doit être fournie par le fabricant et inclure les informations suivantes:

- principe de transducteur (par exemple, transducteur électrodynamique, capacitif, électromagnétique);
- description du système, y compris les principes de fonctionnement (par exemple, le nombre de transducteurs utilisés dans le système de haut-parleur);
- charge acoustique (par exemple, la charge de pavillon et les types d'enceintes, tels que bass reflex, colonne, line array, etc.);
- amplification de puissance (par exemple, la puissance de sortie maximale, le type de classe, l'impédance de charge minimale, etc.);
- traitement DSP (par exemple, égaliseur, protection active), le cas échéant.

5 Marquage des bornes et des commandes

Les bornes et les commandes doivent être marquées conformément à l'IEC 60268-1 et à l'IEC 60268-2.

6 Caractéristiques physiques

6.1 Dimensions

Les dimensions externes du DUT doivent être spécifiées.

6.2 Masse

La masse totale du DUT prêt pour l'utilisation doit être spécifiée.

6.3 Connecteurs et faisceaux de câbles

Les faisceaux de câbles et les connecteurs doivent être conformes à l'IEC 60268-11 et à l'IEC 60268-12.

NOTE Dans certaines circonstances, les connecteurs qui sont actuellement normalisés sont inadaptés et l'utilisation d'autres types est inévitable.

7 Conditions

7.1 Conditions assignées

Les conditions normalisées de mesurage sont définies en 7.3. Certaines valeurs (appelées "conditions assignées") doivent être relevées dans les spécifications du fabricant afin d'obtenir les conditions réelles pour le mesurage.

Ces conditions assignées ne sont pas soumises au mesurage, mais elles constituent la base pour la réalisation des mesurages en vue de déterminer les autres caractéristiques.

Les conditions assignées suivantes sont de ce type et doivent être déclarées par le fabricant:

- tension d'entrée maximale assignée (ou niveau de pression acoustique maximal assigné);
- puissance d'entrée maximale assignée;
- point d'évaluation du déplacement de référence;
- plage assignée de fréquences;
- impédance assignée;
- conditions climatiques assignées.

7.2 Conditions climatiques

7.2.1 Conditions des essais normaux

Selon l'IEC 60268-1, il convient de réaliser les essais dans l'environnement suivant afin d'éviter une influence de la température et de l'humidité qui pourrait affecter les propriétés des suspensions de l'unité motrice:

- température ambiante T_{norm} : 15 °C à 35 °C;
- humidité relative: 25 % à 75 %;
- pression atmosphérique: 86 kPa à 106 kPa.

7.2.2 Conditions des essais climatiques

Le fabricant doit spécifier la température ambiante T_A et les autres conditions climatiques dans lesquelles le DUT est mis en fonctionnement pendant les essais thermiques conformément au 25.1.4.

7.3 Conditions normalisées de mesure

Le DUT doit être considéré comme se trouvant dans les conditions normalisées de mesure lorsque toutes les conditions suivantes sont spécifiées et mises en œuvre:

- a) le DUT à mesurer est monté à conformément à l'Article 13;
- b) l'environnement acoustique est spécifié et choisi parmi ceux indiqués à l'Article 9;

NOTE L'environnement (par exemple, habitacle d'un véhicule) peut influencer la charge acoustique et l'état mécanique du transducteur. Si l'amplitude du stimulus utilisé dans les mesurages est ajustée en fonction du niveau de pression acoustique maximal assigné (sortie) L_{MAX} , selon l'IEC 60268-21, l'environnement acoustique est pris en compte.

- c) les signaux électriques, mécaniques ou acoustiques non souhaités (par exemple, le bruit) générés par d'autres sources doivent être maintenus aux niveaux les plus faibles possible, car leur présence peut masquer les signaux de faible niveau. Les données relatives aux signaux qui se trouvent à moins de 20 dB au-dessus du niveau de bruit dans la bande de fréquences examinée doivent être éliminées ou marquées comme étant dégradées par le bruit;
- d) le DUT est acclimaté aux conditions climatiques normales (température ambiante normale $T_A = T_{norm}$) conformément au 7.2.1;
- e) des périodes de refroidissement supplémentaires sont exigées entre les essais successifs si la compression d'amplitude $C(f) > 0,5$ dB est conforme à l'IEC 60268-21;
- f) un signal d'essai qui a des propriétés spécifiées (spectre, durée, etc.) conformément à l'Article 8 est appliqué au DUT, avec une valeur d'entrée efficace $\tilde{u}$ spécifiée pour la plage assignée de fréquences conformément à l'Article 16;
- g) les atténuateurs, les égaliseurs, les éléments dynamiques et tout autre élément de commande actif doivent être réglés à leur position "normale" stipulée par le fabricant. Si d'autres positions sont choisies, par exemple celles qui produisent une réponse en fréquence la plus uniforme possible ou une atténuation minimale, elles doivent être spécifiées;
- h) l'équipement de mesure approprié pour la détermination des caractéristiques utiles est branché conformément à l'Article 11.

8 Signaux d'essai

8.1 Généralités

Certains mesurages peuvent être réalisés en utilisant un signal audio $s(t)$ quelconque comme signal d'entrée (stimulus) appliqué à l'appareil électroacoustique soumis à l'essai (DUT), alors que d'autres techniques de mesure emploient les signaux d'essai spécifiés dans l'IEC 60268-21.

8.2 Conditions de signaux faibles

Le DUT doit être excité par un stimulus $s(t)$ qui génère la tension $u(t) = \alpha \tilde{u}_{max} s(t)$ aux bornes, mis à l'échelle par la valeur d'entrée maximale $\tilde{u}_{max}$ et le facteur de mise à l'échelle α . La valeur d'entrée maximale assignée $\tilde{u}_{max}$ doit être spécifiée par le fabricant du DUT conformément au 16.1. Le facteur de mise à l'échelle α doit être inférieur à 0,1 pour garantir un échauffement négligeable de la bobine acoustique dans les transducteurs électrodynamiques ($\Delta T_v < 5$ K) et un comportement linéaire du DUT. Les composantes de distorsion non linéaires mesurées par l'excitation d'un stimulus à fréquence unique, à deux fréquences ou à fréquences multiples doivent être inférieures de 40 dB aux composantes fondamentales des signaux.

9 Environnement acoustique

9.1 Généralités

Les mesurages électriques et mécaniques doivent être réalisés dans l'une des conditions des Paragraphes 9.2 à 9.8. L'environnement acoustique utilisé pour les essais doit être indiqué.

9.2 Conditions de champ libre

Un environnement qui satisfait aux conditions de champ libre en plein espace conformément à l'IEC 60268-21 peut être utilisé pour les mesurages électriques et mécaniques. Si l'environnement (par exemple, une chambre anéchoïque aux basses fréquences) ne remplit pas ces conditions de champ libre sur l'intégralité de la plage de fréquences de mesurage, le fabricant doit indiquer la plage de fréquences valide.

9.3 Conditions de champ libre en demi-espace

Un environnement qui satisfait aux conditions de champ libre en demi-espace conformément à l'IEC 60268-21 peut être utilisé pour les mesurages électriques et mécaniques. Ces conditions doivent être remplies de manière satisfaisante avec un plan réfléchissant d'une taille suffisante.

Si l'environnement (par exemple, une chambre anéchoïque en demi-espace aux basses fréquences) ne remplit pas ces conditions de champ libre en demi-espace sur l'intégralité de la plage de fréquences de mesurage, le fabricant doit indiquer la plage de fréquences valide.

9.4 Conditions d'air libre

Des conditions acoustiques qui s'approchent des conditions de champ libre sur la plage de fréquences prise en considération doivent être utilisées. D'autres environnements doivent être considérés comme satisfaisants lorsque les composantes sonores réfléchies sont suffisamment supprimées pour garantir une exactitude de $\pm 5\%$ de l'amplitude mesurée et des valeurs de phase de la courbe d'impédance électrique d'entrée, à la fréquence spécifiée. Si l'environnement (par exemple, une petite chambre de mesure aux basses fréquences) ne remplit pas ces conditions sur l'intégralité de la plage de fréquences de mesurage, le fabricant doit indiquer la plage de fréquences valide.

NOTE La condition d'air libre s'applique habituellement aux transducteurs qui fonctionnent sans enceinte, mais fermement fixés par un dispositif de montage pour mesurer l'état électrique et mécanique du transducteur.

9.5 Conditions d'application visée

Des conditions acoustiques qui correspondent à l'application visée finale du DUT (par exemple, système électroacoustique monté dans une automobile, moteur de compression monté sur pavillon).

9.6 Conditions de vide

9.6.1 Généralités

Des conditions acoustiques qui s'approchent de celles de l'absence d'air.

9.6.2 Méthode de mesurage

L'impédance électrique du transducteur est mesurée et stockée. Le transducteur est ensuite placé dans une chambre à vide, puis l'évacuation commence. Noter que si un dégazage de colles ou de matériaux plastiques se produit, le vide est aspiré plus lentement que prévu. L'impédance électrique du transducteur est alors mesurée et stockée. Le vide est ensuite libéré pour rétablir la pression atmosphérique normale. L'impédance électrique du transducteur est mesurée et stockée, et les données sont ensuite comparées à la mesure initiale stockée pour voir si des modifications ont été apportées en raison de changements de matériaux dus au dégazage.

9.7 Conditions de tube à ondes planes

Un tube à ondes planes est destiné à fournir une impédance acoustique approximativement constante avec une valeur $\rho_0 c$ identique à l'impédance spécifique de l'air.

NOTE Les tubes à ondes planes sont utilisés pour fournir une charge normalisée pour les essais des moteurs de compression (voir l'AES-1id-2012 [1]¹).

9.8 Conditions de mesurage non acoustique

Les mesurages électriques et mécaniques peuvent être réalisés dans une pièce de taille suffisante (généralement $> 8 \text{ m}^3$). La taille de la pièce dépend de l'espace exigé autour du DUT pour éviter toute charge acoustique supplémentaire du DUT et pour garantir des conditions climatiques stables durant l'essai.

10 Positionnement du radiateur

10.1 Conditions géométriques assignées

10.1.1 Généralités

La position et l'orientation du diaphragme, du cône ou d'un autre type de radiateur utilisé dans le DUT doivent être indiquées en utilisant le point de référence $\mathbf{r}_{r,ref}$ du radiateur, le vecteur normal $\mathbf{n}_r$ et le vecteur d'orientation $\mathbf{o}_r$, comme représenté à la Figure 1.

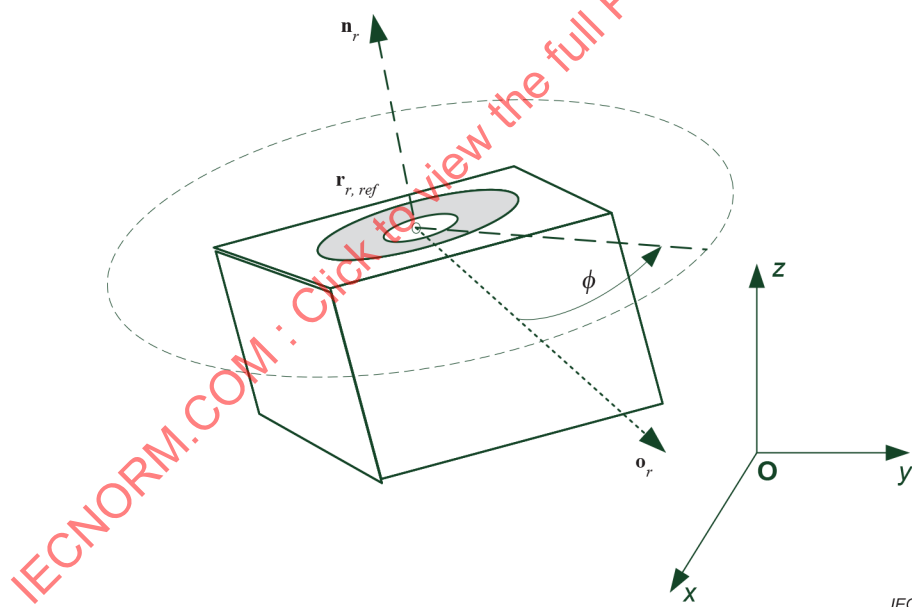


Figure 1 – Conditions assignées utilisées pour décrire la géométrie et la position du radiateur dans le système de coordonnées

10.1.2 Plan de référence et vecteur normal

Le plan de référence avec le vecteur normal $\mathbf{n}_r$ doit être utilisé pour définir l'axe de référence et le point de référence $\mathbf{r}_{r,ref}$.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

NOTE Pour les structures symétriques, le plan de référence est généralement parallèle à la surface rayonnante du radiateur en position de repos. Pour les structures asymétriques, le plan de référence est plus indiqué au moyen d'un diagramme.

10.1.3 Point de référence

Le point de référence $r_{r,ref}$ doit être un point d'intersection avec le plan de référence sur la surface du radiateur. La position du point de référence $r_{r,ref}$ doit être spécifiée par le fabricant.

NOTE Pour les structures symétriques, le point de référence $r_{r,ref}$ est généralement le point de symétrie axiale du radiateur à l'intérieur du plan de référence. Pour les structures asymétriques, le point de référence est plus indiqué au moyen d'un diagramme.

10.1.4 Vecteur d'orientation

Le vecteur d'orientation o_r définit l'orientation du radiateur à l'intérieur du plan de référence et la direction de l'angle azimutal ϕ en coordonnées sphériques.

NOTE Le vecteur d'orientation préférentiel place le point de référence r_r à l'origine O du système de coordonnées, en pointant le vecteur normal n_r du plan de référence dans la direction z où l'angle polaire $\theta = 0$ tourne le système audio de telle sorte que le vecteur d'orientation o_r (par exemple, le dessus de l'enceinte) pointe dans la direction x .

10.2 Conditions d'application visée

La position et l'orientation du radiateur par rapport à l'environnement visé (par exemple, habitacle d'un véhicule, adaptateur de pavillon d'oreille avec simulateur de conduit auditif, etc.) doivent être décrites au moyen d'un diagramme joint aux résultats de mesurage.

11 Equipement de mesurage et résultats des essais

Les résultats graphiques doivent être conformes aux rapports d'aspect préférentiels de l'IEC 60263.

Si des données relatives aux fréquences sont fournies en plus des graphiques, sauf spécification contraire, celles-ci doivent correspondre aux fréquences préférentielles de l'ISO R40.

Le mesurage de la tension aux bornes du DUT doit être effectué à l'aide de fils de détection en plus des deux fils de conduite (technique des quatre fils) de façon à ce qu'un courant négligeable soit généré dans le fil de détection.

NOTE La résistance des câbles et des capteurs de courant (par exemple, résistance de mesure) peut avoir un impact sur l'exactitude du mesurage de l'impédance et sur la tension d'entrée du DUT.

12 Exactitude des mesurages électriques et mécaniques

Les sources d'erreurs probables à la fois dans l'instrumentation et dans l'environnement de mesurage doivent être identifiées, quantifiées et leur contribution doit être spécifiée. Les incertitudes dans la position et l'étalonnage des capteurs doivent être indiquées. Ces informations doivent être incluses dans le rapport d'essai.

13 Montage du DUT

13.1 Montage et charge acoustique des unités motrices

L'aptitude à la fonction de l'unité motrice (transducteur) est déterminée par les propriétés de l'unité elle-même et de sa charge acoustique. La charge acoustique dépend du montage, lequel doit être clairement décrit dans la présentation des résultats.

L'un des types de montages suivants doit être utilisé:

- a) condition de champ libre en demi-espace générée en montant le transducteur à fleur d'une surface réfléchissante plane selon les conditions définies en 9.3. Pour les transducteurs, la charge en demi-espace est privilégiée;
- b) un écran acoustique normalisé avec une surface frontale plane qui est acoustiquement réfléchissante, comme spécifié dans l'IEC 60268-21;
- c) une enceinte de mesure normalisée (type A ou type B), comme spécifié dans l'IEC 60268-21, qui génère un volume d'air arrière défini et une condition de rayonnement à l'avant du transducteur;
- d) une chambre de comparaison de moteurs de haut-parleur, comme spécifié dans l'AES X223 [2];
- e) une armoire d'essai qui génère une charge d'air définie et une condition de rayonnement à l'avant du transducteur pour les essais en fin de ligne et les mesurages relatifs;

NOTE Une chambre supplémentaire au niveau du côté arrière du transducteur peut être utilisée pour fournir une isolation au bruit supplémentaire ou pour prendre en considération l'influence du volume d'air d'un boîtier hermétique dans l'application visée.

- f) un pavillon défini, un coupleur ou un autre type de guide d'ondes qui couple la surface rayonnante du transducteur au champ acoustique environnant dans l'application visée;
- g) un tube à ondes planes, comme spécifié en 9.7;
- h) le transducteur fonctionne à l'air libre et est fermement fixé par un dispositif de montage pour réduire la vibration du cadre et de l'aimant;
- i) le transducteur fonctionne sous vide et est fermement fixé par un dispositif de montage pour mesurer les propriétés du transducteur sans charge d'air. Les paramètres localisés du transducteur mesuré dans cette condition utilisent la lettre "s" au lieu de la lettre "d" comme suffixe.

13.2 Montage et charge acoustique d'un système électroacoustique

Les systèmes électroacoustiques sont généralement mesurés sans écran acoustique supplémentaire. Si le fabricant spécifie un type de montage spécial pour le système de haut-parleur, celui-ci doit être utilisé pour le mesurage. La méthode de montage utilisée doit être spécifiée avec les résultats.

13.3 Exigences de vibrométrie laser

Le mesurage des vibrations mécaniques sur la surface visée (radiateur, enceinte, etc.) exige un serrage fixe du DUT par rapport au capteur. La vibration au point de serrage doit être inférieure d'au moins 20 dB à la vibration de la surface visée. Il est recommandé de faire fonctionner le radiateur dans la position verticale où le vecteur normal $\mathbf{n}_r$ est perpendiculaire à la gravité. Cela permet d'éviter tout biais dans la position de repos du radiateur.

14 Préconditionnement

Des modifications temporaires ou permanentes peuvent avoir lieu lorsqu'un signal qui produit un déplacement important est appliqué pour la première fois au DUT neuf. Un preconditionnement suffisant doit être effectué conformément à l'utilisation prévue du DUT sur le terrain (par exemple, largeur de bande de l'application et type d'enceinte).

NOTE Les propriétés mécaniques de la suspension d'un moteur, par exemple, subissent des modifications importantes. Le DUT subit également les effets de l'échauffement et du refroidissement de la bobine acoustique dans les transducteurs électrodynamiques.

Le DUT doit être preconditionné avant de réaliser les mesurages, en appliquant un signal à large bande à la moitié de la valeur d'entrée maximale $\tilde{u}_{\max}$ conformément à l'IEC 60268-21 pendant au moins une heure (3 h recommandées pour les haut-parleurs de graves).

Avant de procéder au mesurage, la période de préconditionnement doit être suivie d'une période de récupération d'au moins une heure pour veiller à ce que les températures des parties internes soient réadaptées aux conditions ambiantes définies en 7.3.

15 Conditions ambiantes assignées

15.1 Plages de températures

15.1.1 Plage de températures limitée de l'aptitude à la fonction

La plage de températures sur laquelle la variation des caractéristiques du DUT ne doit pas dépasser les tolérances spécifiées.

15.1.2 Plage de températures limitée de dommage

Un dépassement de cette plage de températures pendant la vie antérieure du produit peut donner lieu à des modifications permanentes des caractéristiques de fonctionnement du DUT. Ces seuils de température doivent être spécifiés séparément pour le fonctionnement et le stockage.

15.2 Plages d'humidité

15.2.1 Plage d'humidité relative

La plage d'humidité relative sur laquelle la variation des caractéristiques du DUT ne doit pas dépasser les tolérances spécifiées.

15.2.2 Plage d'humidité limitée de dommage

Un dépassement de cette plage d'humidité relative pendant le fonctionnement ou le stockage peut donner lieu à des modifications permanentes des caractéristiques de fonctionnement du DUT.

16 Signaux électriques aux bornes du transducteur

16.1 Valeur d'entrée maximale assignée

16.1.1 Conditions à spécifier

Le fabricant spécifie la valeur d'entrée maximale assignée $\tilde{u}_{\max}$ définie comme la valeur efficace

$$\tilde{u}_{\max} = \left(\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u^2(t) dt \right)^{1/2}$$

du signal de tension mesuré $u(t)$ aux bornes du transducteur dans les conditions de mesurage normales, conformément au 7.3, en utilisant un stimulus à large bande spécifié, limité par les fréquences f_l et f_u de la bande de fréquences assignée au sein de la période d'excitation $T_s = 1$ s.

Les propriétés du stimulus à large bande $s(t)$, comme les propriétés spectrales, le facteur de crête et les limites inférieure et supérieure de la bande de fréquences assignée, doivent être indiquées par le fabricant.

NOTE La valeur d'entrée maximale assignée $\tilde{u}_{\max}$ peut être déterminée par une mesure directe ou bien obtenue indirectement à partir de la valeur de la pression acoustique maximale assignée $\tilde{p}_{\max}(r_e)$, comme spécifié dans l'IEC 60268-21.

16.1.2 Mesurage direct

16.1.2.1 Equipement d'essai

L'équipement suivant ou équivalent doit être inclus dans la chaîne de mesure:

- un générateur de bruit rose et/ou un générateur à fréquences multiples conformément à l'IEC 60268-21;

NOTE 1 Un DUT conçu pour des signaux audio pleine bande peut être soumis à l'essai en utilisant un stimulus à large bande tel qu'un complexe à fréquences multiples avec une résolution suffisante (au moins dix lignes par octave), un signal de bruit rose ou tout signal similaire à du bruit tel que le signal du programme simulé conformément à l'IEC 60268-21. Pour un DUT avec une faible largeur de bande utilisable dans l'application visée (par exemple, un caisson de graves), une approximation suffisamment correcte du signal "à large bande" peut être un signal sinusoïdal, un signal en rafale de Hanning ou un bruit à bande étroite conformément à l'Article 8.

- un réseau de pondération pour obtenir le signal de bruit conformément à l'IEC 60268-21;
- un réseau d'écrêtage pour mettre en œuvre un facteur de crête spécifié;
- un amplificateur de puissance facultatif pour un DUT électroacoustique passif.

L'amplitude de la réponse en fréquence entre l'entrée de l'amplificateur de puissance facultatif et la tension aux bornes d'entrée d'un DUT passif doit être constante, avec une tolérance de $\pm 0,5$ dB, dans la plage de fréquences de 20 Hz à 20 kHz. Le bruit écrêté aux bornes du haut-parleur soumis à l'essai doit avoir une distribution de fréquence telle que celle spécifiée dans l'IEC 60268-21 et un rapport crête/efficace compris entre 1,8 et 2,2. L'amplificateur de puissance facultatif doit avoir une impédance de sortie inférieure ou égale à 1/3 de l'impédance assignée du DUT passif. L'amplificateur doit être capable d'alimenter le DUT passif sans limiter la tension sinusoïdale de crête. La tension de crête doit être au moins égale au double de la tension du bruit d'essai.

16.1.2.2 Procédure d'essai

- a) Le fabricant doit définir une valeur d'essai $\tilde{u}_{\text{test}}$ du stimulus à large bande dans la bande de fréquences assignée utilisée pour les essais complémentaires. Cette valeur prend en considération l'application prévue et le comportement du DUT (par exemple, échauffement admissible et excursion mécanique maximale), de manière à pouvoir éviter des dommages au DUT pendant l'essai qui suit.

NOTE 2 L'échauffement admissible peut être vérifié en mesurant l'augmentation de la température de la bobine acoustique conformément au 24.2. L'excursion mécanique maximale peut être mesurée conformément au 23.5.

- b) Le DUT doit être placé dans une pièce telle que celle spécifiée en 9.8, avec les conditions climatiques spécifiées en 7.2.
- c) Le DUT doit être soumis à l'essai dans des conditions climatiques spécifiées pendant une période continue de 100 h à la valeur d'essai $\tilde{u}_{\text{test}}$ du stimulus d'entrée.

NOTE 3 Comme la valeur d'essai $\tilde{u}_{\text{test}}$ est constante pendant l'essai de 100 h, l'échauffement du DUT provoque une compression thermique de la sortie acoustique et le niveau de pression acoustique chute au-dessous de la pression acoustique maximale assignée $\tilde{p}_{\max}(r_e)$.

- d) Immédiatement après l'essai, le DUT doit être stocké dans des conditions climatiques normalement rencontrées dans des pièces ou des laboratoires ordinaires. Sauf spécification contraire, la période de récupération doit être de 24 h.
- e) Les caractéristiques électriques, mécaniques et acoustiques du DUT sont mesurées à la fin de la période de récupération. Si les valeurs mesurées se trouvent dans les tolérances des valeurs stipulées sur la fiche technique, le DUT peut être considéré comme satisfaisant aux exigences de cet essai et la valeur d'essai $\tilde{u}_{\text{test}}$ est attribuée à la tension d'entrée maximale assignée $\tilde{u}_{\max}$. Le déplacement admissible de la fréquence de résonance doit être défini dans la fiche technique.

Si le DUT a été endommagé pendant cet essai ou si les caractéristiques mesurées sont hors des tolérances définies, l'essai doit être répété en utilisant un DUT neuf avec une valeur d'essai $\tilde{u}_{\text{test}}$ réduite jusqu'à ce que la valeur d'entrée maximale assignée $\tilde{u}_{\text{max}}$ soit déterminée.

17 Puissance électrique d'entrée

17.1 Puissance d'entrée réelle

La puissance d'entrée réelle est le produit de la tension instantanée $u(t)$ et du courant $i(t)$

$$P_{\text{REAL}}(t) = \frac{1}{T} \int u(t+\tau) i(t+\tau) d\tau$$

moyenné sur une période T . L'intégrateur doit être mis en œuvre par un filtre passe-bas qui a une fréquence de coupure de 1 Hz.

NOTE La puissance $P_{\text{REAL}}(t)$, conformément à l'IEC 60050-151, prend en compte toutes les pertes dans le transducteur représentées par la partie réelle de l'impédance électrique d'entrée, y compris les propriétés non linéaires et variables dans le temps. Cette caractéristique est nécessaire pour modéliser la dynamique thermique du transducteur et le transfert de chaleur vers l'environnement.

17.2 Puissance dissipée dans la résistance en courant continu

La puissance d'entrée dissipée dans $P_{\text{Re}}(t) = \tilde{i}^2(t) R_E(t)$ est le produit du carré de la valeur efficace du courant d'entrée $i(t)$ et de la résistance instantanée en courant continu $R_E(t)$.

NOTE Cette puissance $P_{\text{Re}}(t)$ est une caractéristique utile pour modéliser l'échauffement de la bobine acoustique. La puissance dissipée dans $R_E(t)$ ne tient pas compte de l'échauffement des plaques polaires par courant de Foucault ni des pertes mécaniques ou acoustiques.

17.3 Puissance dissipée dans l'impédance assignée

La puissance dissipée dans l'impédance assignée $P_{\text{E,N}}(t) = \tilde{u}^2(t) / Z_N$ est calculée en divisant le carré de la tension efficace aux bornes d'entrée par l'impédance assignée Z_N conformément au 18.2.

NOTE Cette caractéristique $P_{\text{E,N}}$ est une approximation grossière de la puissance d'entrée réelle qui ne prend pas en compte la dépendance en fréquence de l'impédance d'entrée ni aucune propriété non linéaire ou variable dans le temps. Cette caractéristique est nécessaire pour décrire la puissance électrique d'entrée disponible fournie par un amplificateur à faible impédance de sortie (source de tension).

17.4 Puissance d'entrée maximale assignée

La puissance acoustique maximale assignée $P_{\text{max}} = \tilde{u}_{\text{max}}^2(t) / Z_N$ est calculée en divisant le carré de la tension d'entrée maximale assignée $\tilde{u}_{\text{max}}$ par l'impédance assignée Z_N conformément au 18.2.

NOTE Cette caractéristique P_{max} est une approximation grossière de la puissance d'entrée réelle qui ne prend pas en compte la dépendance en fréquence de l'impédance d'entrée ni aucune propriété non linéaire ou variable dans le temps.

18 Impédance électrique d'entrée

18.1 Impédance électrique complexe

18.1.1 Généralités

L'impédance électrique d'entrée est la fonction de transfert linéaire $\underline{Z}_E(f) = \underline{U}(f) / \underline{I}(f)$ entre le courant d'entrée $i(t)$ et la tension aux bornes $u(t)$. L'impédance électrique, conformément à l'IEC 60050-151, doit être mesurée dans des conditions de signaux faibles conformément au 8.2.

NOTE L'impédance mesurée avec un stimulus à forte amplitude peut être affectée par les propriétés non linéaires, viscoélastiques et thermiques du DUT (voir Klippel [3]).

L'impédance électrique d'entrée doit être mesurée dans le domaine des signaux faibles en utilisant un stimulus atténué (facteur de mise à l'échelle $\alpha \leq 0,1$) ou en réalisant des mesures à des niveaux réduits jusqu'à ce que la réponse observée soit inchangée, ce qui vérifie les conditions linéaires.

18.1.2 Méthode de mesure

Le transducteur est excité par un stimulus à large bande $s(t)$ qui génère la tension $u(t) = \alpha \tilde{u}_{\max} s(t)$ aux bornes, mis à l'échelle par la valeur d'entrée maximale $\tilde{u}_{\max}$ et un facteur de mise à l'échelle α afin de garantir des conditions de signaux faibles conformément au 8.2. Pour réaliser les mesures à une résolution spectrale suffisante et à un SNR dans le domaine des signaux faibles, il est recommandé d'utiliser un stimulus complexe à fréquences multiples éparés conformément à l'IEC 60268-21. Ce signal doit présenter au moins 8 sons par octave pour les fréquences $f < f_s/2$ and $f > 2f_s$, et au moins 24 sons par octave dans la bande de fréquences $f_s/2 < f < 2f_s$. Les propriétés du stimulus $s(t)$, le temps de mesure T_s et la valeur efficace $\tilde{u} = \alpha \tilde{u}_{\max}$ ou le facteur de mise à l'échelle α doivent être indiqués par le fabricant.

- Les amplitudes complexes des composantes spectrales $\underline{U}(f) = F\{u(t)\}$ sont déterminées en utilisant une transformation temps-fréquence telle que la transformation de Fourier $F\{\}$.
- Le courant d'entrée $i(t)$ est mesuré et les amplitudes complexes de la composante spectrale $\underline{I}(f) = F\{i(t)\}$ sont calculées. Si la distorsion non linéaire totale du signal de courant mesuré à la fréquence de résonance f_s est supérieure à 3 %, le mesurage doit être répété avec un facteur de mise à l'échelle α réduit.

NOTE Le fenêtrage du temps n'est pas nécessaire si la longueur du stimulus à fréquences multiples correspond à la longueur de la transformation de Fourier. Les composantes fondamentales qui en résultent apparaissent aux fréquences d'excitation tandis que les composantes spectrales situées sur les autres fréquences révèlent une distorsion et un bruit non linéaires.

- L'impédance complexe est calculée par la formule suivante:

$$\underline{Z}_E(f_{\text{fund}}) = \frac{\underline{U}(f_{\text{fund}})}{\underline{I}(f_{\text{fund}})}$$

qui fournit la réponse en amplitude $|\underline{Z}_E(f_{\text{fund}})|$ et la réponse en phase $\varphi_E(f_{\text{fund}}) = \arg(\underline{Z}_E(f_{\text{fund}}))$ aux fréquences fondamentales f_{fund} excitées par le stimulus.

Afin d'éviter qu'un aplatissement de la crête de résonance affecte l'exactitude des paramètres des signaux faibles (facteurs de qualité mécanique), le lissage ne doit pas être appliqué à la courbe d'impédance mesurée.

18.2 Impédance assignée: caractéristique à spécifier

L'impédance assignée Z_n est la valeur d'une résistance pure à substituer à l'impédance d'entrée complexe $\underline{Z}_E(f)$ du haut-parleur. La valeur la plus faible du module de l'impédance $|\underline{Z}_E(f)|$,

conformément au 18.1, dans la plage assignée de fréquences ne doit pas être inférieure à 80 % de l'impédance assignée Z_n . L'impédance assignée Z_n doit être indiquée par le fabricant lors de la définition de la puissance électrique disponible de la source.

19 Vibration de la surface du radiateur

19.1 Généralités

Le mesurage des vibrations de la surface du radiateur permet de mieux comprendre le système mécanique et le rayonnement du son. Un capteur sans contact (par exemple, un vibromètre laser) doit être utilisé pour mesurer la variable d'état de mouvement (déplacement, vitesse ou accélération) dans la direction du vecteur normal $\mathbf{n}_r$. Cela permet de s'assurer qu'aucune charge d'une masse non souhaitée n'affecte le DUT.

Un capteur de proximité qui indique la position instantanée du point de mesure est recommandé en vue de révéler la géométrie de la surface et le déplacement de la position de repos.

Cela s'avère important pour détecter de manière fiable le déplacement de crête positif et négatif et le déplacement en courant continu généré de façon dynamique par les non-linéarités du transducteur. La vitesse et l'accélération peuvent être calculées par différenciation des signaux temporels. Les capteurs qui mesurent directement la vitesse ou l'accélération fournissent généralement un meilleur SNR à des fréquences plus élevées. Des précautions doivent être prises afin de s'assurer que le signal de déplacement calculé par intégration ne contienne pas d'erreurs significatives dues au bruit ou à des problèmes optiques dans la vitesse ou le signal d'accélération détecté.

19.2 Déplacement d'un point de surface $\mathbf{r}_r$

19.2.1 Généralités

Le déplacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ au point de surface $\mathbf{r}_r$ sur la surface du radiateur est mesuré dans la direction du vecteur normal $\mathbf{n}_r$ tout en appliquant un stimulus spécifié $s(t)$ à l'entrée du DUT. La position du point de surface est décrite par des coordonnées qui ont leur origine au point de surface de référence $\mathbf{r}_{r, \text{ref}}$. Le vecteur d'orientation $\mathbf{o}_r$ pointe dans la direction des axes x pour les coordonnées cartésiennes et correspond à un angle de 0° avec les coordonnées polaires.

19.2.2 Méthode de mesurage

- Le DUT est placé dans les conditions de mesurage normales indiquées en 7.3, en tenant compte des exigences de la vibrométrie laser, conformément au 13.3.
- Le capteur du vibromètre est centré sur le point de mesure $\mathbf{r}_r$ situé sur la surface du radiateur. Un serrage du DUT et un positionnement du vibromètre appropriés permettent de s'assurer que le capteur fonctionne toujours au point de fonctionnement optimal et de garantir l'absence de mouvements relatifs non souhaités entre le DUT (cadre, enceinte, etc.) et le capteur. Il peut être nécessaire de traiter la surface du radiateur à mesurer avec un matériau à réflexion diffuse. Pour un point de mesure unique, il est recommandé d'utiliser une encre correctrice de couleur blanche. Dans le cas d'un balayage complet de la surface du radiateur, il est recommandé d'appliquer par pulvérisation une poudre blanche inerte en suspension dans un solvant à séchage rapide (par exemple, Ardox 9D1B). Il convient que l'application du matériau réfléchissant soit minimale pour éviter d'affecter les vibrations mécaniques du radiateur.

Si l'intégralité de la surface du radiateur a été traitée, comparer la fréquence de résonance fondamentale f_s du DUT dérivée de l'impédance électrique $Z_E(f)$ mesurée avant et après le traitement. Si la variation de la fréquence de résonance dépasse 1 %, la masse supplémentaire du traitement doit être soustraite de la masse mesurée.

- c) Avant le mesurage, le signal de déplacement est annulé en soustrayant la valeur mesurée à la position de repos de la surface du radiateur lorsqu'aucun signal n'est appliqué à l'entrée du DUT par rapport à la sortie du capteur.
- d) Le signal de sortie du capteur doit être examiné en vue d'identifier des erreurs (par exemple, des pics) causées par des problèmes de balayage optique à la surface du radiateur. Les données corrompues ne doivent pas être utilisées pour une analyse plus approfondie ou pour le calcul des caractéristiques.

NOTE Les erreurs de balayage optique peuvent être détectées de manière fiable par triangulation laser. Deux mesurages sont effectués au même point r_r . Le premier mesurage est réalisé normalement tandis que le deuxième mesurage est réalisé après avoir légèrement modifié la distance du laser par rapport au vecteur normal $\mathbf{n}_r$. La faible variation de la distance de mesure entre le laser à triangulation et le point de mesure r_r modifie l'angle d'observation du capteur sans affecter la position du point du laser sur la surface. Les erreurs de balayage optique deviennent évidentes dans la corrélation entre les deux mesurages.

19.3 Déplacement de référence

19.3.1 Généralités

Le déplacement de référence $x(t)$ est une variable d'état du modèle de paramètres localisés. La dérivée du déplacement de référence (vitesse) multiplié par un facteur de transduction électromécanique T_{Bl} correspond à la force contre-électromotrice qui peut également être déterminée par une mesure électrique.

Note: Pour les transducteurs électrodynamiques, le déplacement de référence $x(t)$ correspond au déplacement moyen de la bobine acoustique et le facteur de transduction (également appelé facteur de force) peut être exprimé par l'induction moyenne B du produit Bl , obtenue à partir de la longueur de fil l (voir Beranek [4]).

Pour les haut-parleurs de graves et les transducteurs de registre moyen, le déplacement de la zone centrale du radiateur est proche du déplacement de référence. En général, plusieurs mesurages sont effectués sur la surface du radiateur pour calculer le déplacement moyen de la bobine acoustique.

19.3.2 Méthodes de mesurage

Selon les propriétés du radiateur et le système de suspension du transducteur, le déplacement de référence peut être déterminé par différentes techniques:

- a) le déplacement de référence $x(t) = x(t, \mathbf{r}_{r,ref})$ doit être mesuré au point de référence $\mathbf{r}_{r,ref}$ si toutes les conditions suivantes sont remplies:
 - le radiateur a une géométrie à symétrie axiale et le point de référence $\mathbf{r}_{r,ref}$ se trouve au centre de la surface du radiateur;
 - la zone centrale du radiateur (enveloppée par la bobine acoustique dans les transducteurs électrodynamiques) reste suffisamment rigide aux fréquences étudiées;
 - le niveau relatif L_{rock} des modes de résonance, défini en 20.7.3, est inférieur à -15dB ;

NOTE 1 Pour les haut-parleurs de graves, les haut-parleurs de registre moyen et les autres transducteurs à symétrie axiale qui utilisent un cône rigide et les suspensions mécaniques surround et spider, le déplacement de la bobine acoustique est semblable au déplacement du point central du radiateur aux basses fréquences. Cependant, les micro-haut-parleurs, les haut-parleurs d'aigus, les moteurs de compression, les pilotes de casques et d'autres transducteurs génèrent des modes sur la surface du radiateur (par exemple, les modes de résonance définis en 20.7.3) qui empêchent le point central de représenter la vibration moyenne de la bobine acoustique. Pour ces appareils, les écarts dans le déplacement mesuré au point central peuvent affecter l'exactitude des paramètres mécaniques calculés.

- b) si une ou plusieurs des conditions indiquées en a) ci-dessus ne sont pas remplies, le déplacement de référence $x(t)$ doit être déterminé en calculant la moyenne des déplacements mesurés à au moins 4 points $\mathbf{r}_r$ équidistants du point de pivot (point de croisement des lignes nodales des deux modes de résonance), où $x(t) = \overline{x(t, \mathbf{r}_r)}$.
- c) si la position du point de pivot n'est pas connue et si le transducteur (par exemple, micro-haut-parleur) génère un niveau de résonance relatif $L_{rock} > -3\text{dB}$, le déplacement de

référence doit être calculé comme le mode transversal ($n = 0$) d'une analyse modale, définie en 20.7.2, fondée sur au moins 4 points de mesure r_i ;

- d) en variante, si les paramètres localisés du modèle électromécanique libre sont connus pour le DUT en question, le déplacement de référence doit être calculé à partir du signal d'entrée électrique $u(t)$. Afin de décrire le déplacement de référence dans le domaine des signaux forts, le modèle doit tenir compte des non-linéarités dominantes selon l'Article 23 et des propriétés thermiques selon l'Article 24.

NOTE 2 Un modèle linéaire fondé sur les paramètres localisés des signaux faibles ne peut pas décrire les distorsions non linéaires à des amplitudes plus élevées, comme la compression de la composante fondamentale ou la génération d'une composante continue.

19.4 Déplacement de crête et de fond

19.4.1 Généralités

Les valeurs de crête et de fond du déplacement de référence $x(t)$ ou le déplacement mesuré $x(t, r_i)$ de tout point r_i sur la surface visée correspondent aux valeurs maximale et minimale du signal temporel $x(t)$ pour un stimulus défini. Les propriétés du stimulus, comme la fréquence f du signal sinusoïdal, et la longueur T de l'intervalle de mesure doivent être spécifiées.

19.4.2 Méthode de mesurage

- a) Le déplacement est mesuré conformément au 19.2.

Les valeurs minimale et maximale du signal sont déterminées dans un intervalle de mesure de longueur T définie et la valeur mesurée est attribuée au temps t à la fin de l'intervalle.

- b) Les propriétés du stimulus déterminent le tracé des valeurs de crête et de fond: tracé en fonction du temps t pour les signaux audio ordinaires (musique, par exemple); tracé en fonction de la fréquence f ou de la tension u pour les signaux d'essai déterministes (sinusoïdaux, par exemple).

19.5 Déplacement en courant continu

19.5.1 Généralités

Le déplacement en courant continu est une composante à basse fréquence (bien au-dessous de la bande audio) du déplacement de référence $x(t)$ ou du déplacement mesuré $x(t, r_i)$ de tout point r_i sur la surface visée, qui est générée de façon dynamique par les non-linéarités du transducteur.

NOTE Le déplacement en courant continu est généré par la rectification du signal de déplacement en courant alternatif et peut être interprété comme une composante de distorsion d'intermodulation de fréquence différente (voir Klippel [3]). Contrairement aux distorsions d'intermodulation d'harmoniques et de fréquences additionnées, qui sont générées aux hautes fréquences, où le déplacement est négligeable, la composante continue peut être du même ordre de grandeur que le déplacement en courant alternatif.

19.5.2 Méthode de mesurage

- a) Le déplacement $x(t)$ est mesuré conformément au 19.2.

- b) Le déplacement en courant continu $x_{DC}(t) = \overline{x(t)}$ est calculé comme la valeur moyenne du déplacement dans un intervalle de mesure de longueur T définie et la valeur moyenne est attribuée au temps t à la fin de l'intervalle. Dans des conditions d'entrée de régime établi (par exemple, fréquence unique), la longueur T de l'intervalle de mesure doit être identique à la longueur du stimulus. Pour les mesurages avec des stimuli transitoires (par exemple, un signal audio ordinaire), la longueur T doit être spécifiée.

- c) Le déplacement en courant continu $X_{DC}(f)$ doit être tracé en fonction de la fréquence d'excitation instantanée f si le stimulus est un son en régime établi ou un signal à modulation de fréquence pulsée avec un mapping fréquence-temps défini.

19.6 Fonction de transfert de déplacement

19.6.1 Généralités

La fonction de transfert $\underline{H}_{X,U}(f_{\text{fund}}, \mathbf{r}_r)$ entre la tension aux bornes $u(t)$ et le déplacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ en un point $\mathbf{r}_r$ sur la surface du radiateur est mesurée à des fréquences logarithmiquement espacées f_{fund} avec une résolution spécifiée à de faibles amplitudes. Les fréquences ISO R40, définies dans l'ISO 3, sont généralement privilégiées.

NOTE Cette méthode peut aussi être appliquée à la fonction de transfert entre la tension aux bornes $u(t)$ et le déplacement de référence $x(t)$.

19.6.2 Méthode de mesurage

- Le transducteur est excité par un stimulus à large bande $s(t)$ qui génère la tension $u(t)$ aux bornes. Les propriétés du stimulus $s(t)$, le temps de mesure T_s et la valeur efficace $\tilde{u} = \alpha \tilde{u}_{\text{max}}$ ou le facteur de mise à l'échelle α et la valeur d'entrée maximale $\tilde{u}_{\text{max}}$ doivent être indiqués. Les amplitudes complexes des composantes spectrales $\underline{U}(f)$ aux fréquences f avec une résolution spécifiée sont déterminées en utilisant une transformation de Fourier discrète (TFD) ou similaire, où $\underline{U}(f) = F\{u(t)\}$.
- Le déplacement $x(t, \mathbf{r}_r)$ est mesuré au point de surface $\mathbf{r}_r$ conformément au 19.2 et les amplitudes complexes de la composante spectrale $\underline{X}(f) = F\{x(t, \mathbf{r}_r)\}$ sont calculées.
- La fonction de transfert complexe doit être calculée comme $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) = \underline{X}(f, \mathbf{r}_r) / \underline{U}(f)$ et doit être présentée comme la réponse en amplitude $|\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r)|$ et la réponse en phase $\varphi_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) = \arg(\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r))$ aux fréquences f excitées par le stimulus.

19.7 Niveau d'accélération cumulé

19.7.1 Généralités

Le niveau d'accélération cumulé $L_{AA}(f, \mathbf{r}_a)$ décrit la vibration mécanique totale sur la surface du radiateur (en dB) en fonction de la fréquence f

$$L_{AA}(f, \mathbf{r}_a) = 20 \lg_{10} \left(\int_{S_r} \frac{(s\pi f)^2 |\underline{X}(f, \mathbf{r}_r)|}{a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)} dS_r \right)$$

en utilisant une valeur de référence $a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)$ en fonction de l'emplacement d'un point d'observation $\mathbf{r}_a$ spécifié dans le champ acoustique, définie comme suit:

$$a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a) = \frac{\pi \sqrt{2} p_0 |\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_r|}{\rho_0}$$

avec la pression acoustique de référence p_0 et la densité de l'air ρ_0 (voir Klippel, Schlechter [5],[6]).

NOTE La valeur de référence $a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)$ permet de s'assurer que le niveau d'accélération cumulé $L_{AA}(f, \mathbf{r}_a)$ peut être interprété comme la pression acoustique potentielle totale disponible au point d'observation $\mathbf{r}_a$ situé dans le champ acoustique généré, si les effets destructeurs de l'annulation acoustique ne sont pas pris en compte. Aux basses fréquences inférieures à la première fréquence de rupture, où tous les points sur la surface du radiateur vibrent en phase et où la taille du radiateur est faible par rapport à la longueur d'onde λ , le niveau d'accélération cumulé $L_{AA}(f, \mathbf{r}_a)$ est égal au niveau de pression acoustique $L_p(f, \mathbf{r}_a)$ prédit par l'intégrale de Rayleigh.

19.7.2 Méthode de mesure

- La fonction de transfert $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r[m])$ avec $0 \leq m \leq M$ doit être mesurée sur la surface du radiateur avec une résolution spatiale suffisante ($M > 100$ points de balayage) conformément au 19.6.
- Le déplacement $\underline{X}(f, \mathbf{r}_r[m]) = \underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r[m])\underline{U}(f)$ doit être calculé pour une amplitude définie de la tension aux bornes U .
- Le niveau d'accélération cumulé au point d'observation spécifié $\mathbf{r}_a$ doit être calculé comme suit:

$$L_{AA}(f, \mathbf{r}_a) = 20 \lg_{10} \left(\sum_{m=1}^M \frac{(2\pi f)^2 |\underline{X}(f, \mathbf{r}_r[m])|}{a_{\text{ref}}(\mathbf{r}_a)} \Delta S_r(\mathbf{r}_r[m]) \right)$$

avec la zone $\Delta S_r(\mathbf{r}_r[m])$ sur la surface du radiateur représentée par le point de balayage $\mathbf{r}_r[m]$.

20 Paramètres localisés des signaux faibles

20.1 Généralités

La modélisation linéaire peut être appliquée au DUT à de faibles amplitudes où les propriétés non linéaires du DUT sont négligeables, comme défini en 8.2. Le mesurage de la distorsion non linéaire dans les signaux électriques (par exemple, le courant) aux bornes doit être utilisé pour valider les hypothèses formulées dans la modélisation linéaire.

NOTE Outre la génération de distorsion non linéaire, les propriétés viscoélastiques variables dans le temps de la suspension peuvent aussi influencer sur les résultats de mesure des petits paramètres.

Il est recommandé de spécifier ou de signaler le déplacement de crête généré par le stimulus pendant l'essai.

Aux basses fréquences, lorsque le radiateur se comporte en mode fondamental (piston), le comportement de transfert et de vibration du transducteur et l'influence de la charge mécanique et acoustique (par exemple, une enceinte) peuvent être décrits par un modèle de paramètres localisés (voir Small [7]). Un modèle qui comporte des paramètres distribués est exigé pour décrire le système mécanique et acoustique à des fréquences plus élevées.

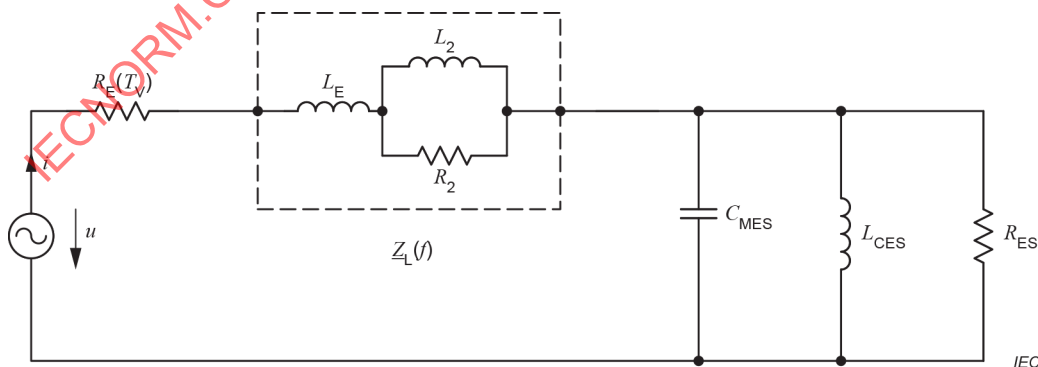


Figure 2 – Réseau électrique équivalent représentant l'impédance électrique d'entrée à l'aide du modèle LR2 pour l'inductance avec perte d'un transducteur électrodynamique

20.2 Paramètres électriques

20.2.1 Généralités

L'impédance électrique d'entrée mesurée à de faibles amplitudes peut être modélisée par un réseau électrique équivalent, comme le montre la Figure 2, qui est invariable dans le temps et linéaire. Pour le DUT, les paramètres localisés du modèle sont estimés en réduisant le plus possible l'erreur quadratique moyenne entre l'impédance électrique mesurée et l'impédance électrique modélisée (ajustement de courbe complexe).

20.2.2 Résistance en courant continu

20.2.2.1 Généralités

La résistance en courant continu $R_E(T_v)$ du transducteur décrit généralement l'impédance électrique d'entrée à des fréquences bien inférieures à la fréquence de résonance fondamentale où l'influence d'autres éléments électriques et mécaniques est négligeable.

20.2.2.2 Méthode de mesure

L'impédance électrique $Z_E(f)$ est mesurée à une basse fréquence $f < f_s/8$ qui se situe au moins trois octaves au-dessous de la fréquence de résonance f_s du transducteur.

NOTE La résistance en courant continu $R_E(T_v)$ dépend de la température de la bobine acoustique T_v , qui varie en fonction de la température ambiante T_A et du stimulus électrique appliqué au transducteur.

Si le but du mesurage n'est pas d'évaluer l'échauffement de la bobine acoustique dans les transducteurs électrodynamiques ou l'influence de la température ambiante, il convient de mesurer la résistance en courant continu R_E du transducteur dans des conditions de signaux faibles conformément au 8.2, et il convient que le transducteur soit acclimaté aux conditions ambiantes normales conformément au 7.3.

20.2.3 Inductance avec perte

20.2.3.1 Généralités

L'impédance électrique $Z_L(f)$ de l'inductance avec perte de la bobine acoustique dans les transducteurs électrodynamiques contribue à l'impédance électrique $Z_E(f)$ à des fréquences plus élevées. L'impédance électrique $Z_L(f)$ est représentée par un réseau électrique supplémentaire dans le modèle (comme le montre la Figure 2) ou par une description analytique.

20.2.3.2 Méthode de mesure

- La résistance en courant continu R_E est mesurée conformément au 20.2.2 et l'impédance électrique $Z_E(f)$ est mesurée alors que le mouvement de la bobine acoustique est bloqué.
- L'impédance électrique $Z_L(f)$ de l'inductance avec perte de la bobine acoustique est le reste de l'impédance électrique $Z_E(f)$ après suppression de la résistance en courant continu R_E . La réponse modulaire et la réponse en phase de l'impédance électrique $Z_L(f)$ doivent être indiquées par rapport à la fréquence.

Sinon, l'impédance électrique $Z_L(f)$ doit être indiquée comme une inductance dépendante de la fréquence $L_{EL}(f) = \frac{1}{2\pi f} \Re\{Z_E(f)\}$ qui représente la partie imaginaire de l'inductance avec perte et par une résistance dépendante de la fréquence $R_{EL}(f) = \frac{1}{2\pi f} \Im\{Z_E(f)\}$ qui représente la partie réelle de l'inductance avec perte.

- Un réseau électrique, tel que le modèle LR2 représenté à la Figure 2, est utilisé pour modéliser l'impédance complexe $Z_L(f)$ de l'inductance avec perte. Le réseau est constitué

d'une multitude d'inductances ($L_1, L_2, \dots$) connectées en série, où au moins une inductance (L_2) est shuntée par une résistance (R_2). La structure du réseau et les paramètres localisés calculés en réduisant le plus possible l'erreur de modélisation (technique d'ajustement de courbe) doivent être spécifiés.

- d) Sinon, un modèle mathématique, tel que celui de Leach [8] ou celui de Thorborg [9], peut être utilisé pour représenter l'impédance complexe $\underline{Z}_L(f)$ de l'inductance avec perte. La structure du réseau et les paramètres localisés calculés en réduisant le plus possible l'erreur de modélisation (ajustement de courbe) doivent être spécifiés.

NOTE Le blocage du mouvement de la bobine acoustique peut être évité si le réseau électrique ou le modèle mathématique qui représente l'inductance avec perte est précis à des fréquences plus élevées ($f > 4 f_s$) où l'influence de l'impédance électrique $\underline{Z}_{EM}(f)$ qui représente le résonateur mécanique est négligeable. Le modèle de Leach offre un ajustement suffisant de la courbe mesurée en utilisant un nombre minimal de paramètres libres. Le niveau de complexité plus élevé du modèle de Thorborg offre dans certains cas un ajustement supérieur, mais ne peut garantir une solution unique de l'estimation des paramètres.

20.2.4 Représentation électrique du résonateur fondamental

20.2.4.1 Généralités

Un réseau électrique constitué de la connexion en parallèle d'un condensateur C_{MES} (qui correspond à la masse en mouvement M_{MS}), d'une inductance L_{CES} (qui correspond à l'élasticité mécanique C_{MS}) et d'une résistance R_{ES} (qui correspond à la résistance mécanique R_{MS}), comme représenté à la Figure 2, est utilisé pour décrire le mode de vibration fondamental du transducteur, y compris la charge d'air.

NOTE Ces paramètres ne représentent pas l'influence de résonances acoustiques ou mécaniques supplémentaires telles que les résonances de l'évent dans une enceinte ventilée ou les propriétés viscoélastiques variables dans le temps (reptation) aux basses fréquences.

20.2.4.2 Méthode de mesure

- L'impédance électrique d'entrée $\underline{Z}_E(f)$ est mesurée conformément à l'Article 18.
- Selon l'impédance électrique d'entrée $\underline{Z}_E(f)$, la résistance électrique en courant continu R_E et le modèle électrique qui représente l'inductance avec perte sont déterminés conformément au 20.2.2 et au 20.2.3, respectivement.
- Selon le modèle de l'inductance avec perte, l'impédance $\underline{Z}_L(f)$ est mesurée aux fréquences $f_s/4 < f < 4 f_s$.
- L'impédance $\underline{Z}_{EM}(f)$ qui représente l'effet des éléments mécaniques dans le domaine électrique est le reste de l'impédance électrique d'entrée $\underline{Z}_E(f)$ après suppression de la résistance électrique en courant continu R_E et de l'impédance $\underline{Z}_L(f)$ de l'inductance avec perte.
- Le condensateur C_{MES} , l'inductance L_{CES} et la résistance R_{ES} du réseau électrique de 2^e rang qui représente l'impédance $\underline{Z}_{EM}(f)$ sont calculés dans la plage de fréquences $f_s/4 < f < 4 f_s$ en réduisant le plus possible l'erreur quadratique moyenne dans la réponse estimée en amplitude et en phase.

NOTE Certains transducteurs, comme les micro-haut-parleurs, présentent une viscoélasticité importante à des fréquences plus basses, ce qui augmente l'élasticité et les pertes mécaniques. L'impédance $\underline{Z}_{EM}(f)$ de ces transducteurs ne peut pas être décrite par un système de 2^e rang et les valeurs estimées pour la capacité C_{MES} , l'inductance L_{CES} et la résistance R_{ES} ne sont pas précises. Afin d'éviter ce biais, une élasticité dépendante de la fréquence, décrite en 20.6, peut être utilisée pour identifier l'impédance électrique $\underline{Z}_{EM}(f)$ du résonateur mécanique.

20.3 Paramètres localisés relatifs

20.3.1 Généralités

Le mode de vibration fondamental peut être décrit par des paramètres relatifs, tels que la fréquence de résonance et les facteurs de qualité, qui peuvent être calculés directement à partir des paramètres électriques équivalents définis en 20.2.4.

NOTE Les mêmes paramètres relatifs peuvent également être calculés à partir des éléments correspondants du circuit équivalent mécanique et acoustique (voir Small [7]). Toutefois, l'identification du circuit électrique peut être réalisée par une mesure unique des signaux électriques (tension, courant) aux bornes, tandis que l'identification des éléments mécaniques et acoustiques exige une technique de perturbation ou un capteur supplémentaire.

20.3.2 Fréquence de résonance

La fréquence de résonance f_s du mode de vibration fondamental obtenu avec le transducteur fonctionnant à l'air libre doit être calculée comme suit:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{MES}L_{CES}}} \quad (1)$$

selon les éléments de paramètres localisés identifiés à partir de l'impédance $Z_{EM}(f)$ conformément au 20.2.4 et les paramètres mécaniques du 20.4.

NOTE Si le comportement viscoélastique de la suspension mécanique est négligeable (facteur de reptation < 10 %) et si l'impédance $Z_L(f)$ de l'inductance avec perte de la bobine acoustique à la résonance est faible par rapport à l'impédance électrique totale $Z_E(f_s)$, la fréquence de résonance f_s peut être déterminée comme la fréquence à laquelle le module de l'impédance électrique atteint son premier maximum principal.

20.3.3 Facteur de qualité électrique

Le facteur de qualité électrique Q_{ES} du mode de vibration fondamental obtenu avec le transducteur fonctionnant à l'air libre doit être calculé comme suit:

$$Q_{ES} = 2\pi f_s C_{MES} R_E = \frac{R_E}{C_{MS} T_{BI}^2 2\pi f_s} \quad (2)$$

en utilisant les paramètres électriques équivalents du 20.2.4 et les paramètres mécaniques du 20.4.

NOTE Si le comportement viscoélastique de la suspension mécanique est négligeable (facteur de reptation < 10 %) et si l'impédance $Z_L(f)$ de l'inductance avec perte de la bobine acoustique à la résonance est faible par rapport à l'impédance électrique totale $Z_E(f_s)$, le facteur de qualité électrique Q_{ES} peut être calculé selon Small [7], comme suit:

$$Q_{ES} = \frac{r_0}{r_0 - 1} Q_{TS}$$

où:

r_0 est le rapport entre l'amplitude maximale de l'impédance $Z_E(f_s)$ à la fréquence de résonance f_s et la résistance en courant continu R_E du transducteur; et

Q_{TS} est le facteur de qualité total défini en 20.3.5.

20.3.4 Facteur de qualité mécanique

Le facteur de qualité mécanique Q_{MS} du mode de vibration fondamental obtenu avec le transducteur fonctionnant à l'air libre doit être calculé comme suit:

$$Q_{MS} = 2\pi f_s C_{MES} R_{ES} = \frac{1}{C_{MS} R_{MS} 2\pi f_s} \quad (3)$$

en utilisant les paramètres électriques équivalents du 20.2.4 et les paramètres mécaniques du 20.4.

NOTE Si le comportement viscoélastique de la suspension mécanique est négligeable (facteur de reptation < 10 %) et si l'impédance $\underline{Z}_L(f)$ de l'inductance avec perte de la bobine acoustique à la résonance est faible par rapport à l'impédance électrique totale $\underline{Z}_E(f_s)$, le facteur de qualité mécanique Q_{MS} peut être calculé selon Small [7], comme suit:

$$Q_{MS} = r_0 Q_{TS}$$

où:

r_0 est le rapport entre l'amplitude maximale de l'impédance $\underline{Z}_E(f_s)$ à la fréquence de résonance f_s et la résistance en courant continu R_E du transducteur; et

Q_{TS} est le facteur de qualité total défini en 20.3.5.

20.3.5 Facteur de qualité total

Le facteur de qualité total Q_{TS} du mode de vibration fondamental obtenu avec le transducteur fonctionnant à l'air libre doit être calculé comme suit:

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}}$$

en utilisant le facteur de qualité électrique du 20.3.3 et le facteur de qualité mécanique du 20.3.4.

NOTE Si le comportement viscoélastique de la suspension mécanique est négligeable (facteur de reptation < 10 %) et si l'impédance $\underline{Z}_L(f_s)$ de l'inductance avec perte de la bobine acoustique à la résonance est faible par rapport à l'impédance électrique totale $\underline{Z}_E(f_s)$, le facteur de qualité total Q_{TS} peut être calculé selon Small [7], comme suit:

$$Q_{TS} = \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{\sqrt{r_0} (f_2 - f_1)}$$

où:

r_0 est le rapport entre l'amplitude maximale de l'impédance $\underline{Z}_E(f_s)$ à la fréquence de résonance f_s et la résistance en courant continu R_E du transducteur.

Les fréquences f_1 et f_2 sont approximativement symétriques, de sorte que $f_s \approx \sqrt{f_1 f_2}$, où $f_1 < f_s < f_2$ et les amplitudes des impédances $\underline{Z}_1 = |\underline{Z}_E(f_1)|$ and $\underline{Z}_2 = |\underline{Z}_E(f_2)|$ sont équivalentes et égales à $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \sqrt{r_0} R_E$.

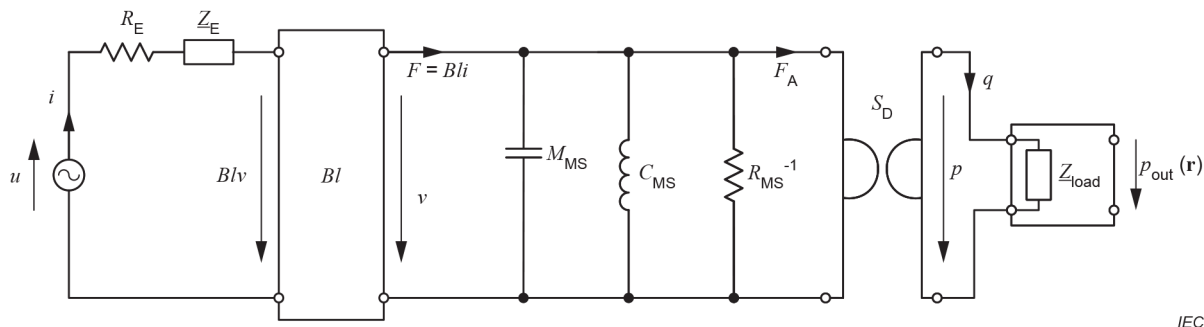


Figure 3 – Réseau de paramètres localisés analogiques représentant les éléments électriques, mécaniques et acoustiques aux basses fréquences

20.4 Paramètres mécaniques localisés

20.4.1 Généralités

Le mode de vibration fondamental du transducteur qui fonctionne à l'air libre ou en demi-espace doit être décrit par un modèle de paramètres localisés présenté par un réseau, comme le montre la Figure 3. Ce réseau utilise une analogie mécanique du type de mobilité couplée à un transformateur avec le domaine électrique. La force mécanique F correspond au courant i de la Figure 2, mis à l'échelle par le facteur de force T_{Bl} . Un gyrateur avec la zone de rayonnement efficace S_D couple l'analogie mécanique à l'analogie acoustique du type d'impédance.

NOTE 1 D'autres types d'analogies mécaniques et acoustiques peuvent être utilisés dans le réseau de paramètres localisés (voir [4]).

L'impédance mécanique, définie comme suit:

$$\underline{Z}_{MS}(f) = \frac{\underline{F}(f, \mathbf{r}_{coil})}{j2\pi f \underline{X}(f, \mathbf{r}_{coil})} = \frac{T_{Bl}^2}{\underline{Z}_{EM}(f)} = \frac{1}{j2\pi f C_{MS}(f)} + R_{MS} + j2\pi f M_{MS} \quad (4)$$

est inversement proportionnelle à l'impédance électrique $\underline{Z}_{EM}(f)$ qui représente la résonance mécanique dans le domaine électrique, mise à l'échelle par le carré du facteur de force T_{Bl}^2 . Tous les paramètres mécaniques de la formule (4) tiennent compte de l'influence de l'air. La masse en mouvement M_{MS} représente la masse des parties mobiles et la charge d'air des deux côtés du radiateur. Outre les pertes mécaniques associées à la suspension et à l'impédance du rayonnement, la résistance R_{MS} tient compte des pertes générées par les flux d'air turbulents dans l'entrefer et l'orifice de ventilation de la pièce polaire. L'élasticité $C_{MS}(f)$, qui est l'inverse de la rigidité $K_{MS}(f)$, représente la capacité de rappel (rigidité du ressort) de la suspension et la rigidité de l'air dans les cavités derrière le diaphragme rayonnant. Aux basses fréquences, l'élasticité $C_{MS}(f)$ dépend également de la fréquence f due à la viscoélasticité du matériau.

NOTE 2 Aux basses fréquences, la viscoélasticité est un phénomène purement mécanique qui augmente l'élasticité $C_{MS}(f)$ et la résistance mécanique $R_{MS}(f)$. Par conséquent, dans la relation entre l'effort de rappel et le déplacement, la suspension tend à se détendre et à fluer. Elle perd sa capacité à stocker l'énergie potentielle et convertit l'énergie fournie en chaleur. Ce phénomène n'est pas négligeable dans les transducteurs tels que les micro-haut-parleurs. Il affecte l'erreur d'ajustement de l'impédance électrique et l'exactitude des paramètres électriques et mécaniques mesurés. L'augmentation de l'élasticité $C_{MS}(f)$ augmente l'amplitude en courant alternatif du déplacement de référence et le déplacement en courant continu généré par les non-linéarités du transducteur. La résistance mécanique est approximée dans la Formule (4) par une valeur constante $R_{MS} = R_{MS}(f_s)$. L'approximation est possible car la dépendance en fréquence de la résistance mécanique $R_{MS}(f)$ a peu d'impact sur le comportement de transfert du transducteur au-dessous et au-dessus de la fréquence de résonance f_s .

Si les effets de la viscoélasticité sont faibles (paramètre de reptation $\kappa < 10\%$), l'élasticité peut être une valeur constante $C_{MS}(f) = C_{MS} = C_{MS}(f_s)$ et l'impédance mécanique de la Formule (4) peut être calculée aux fréquences $f > f_s/2$.

20.4.2 Méthode de mesurage

20.4.2.1 Généralités

Le calcul des paramètres mécaniques exige le mesurage d'au moins un paramètre mécanique. Dans le présent document, le calcul est effectué à l'aide des paramètres mécaniques relatifs définis en 20.3. L'une des méthodes de mesurage données en 20.4.2.2, 20.4.2.3 et 20.4.2.4 doit être utilisée pour identifier le premier paramètre mécanique.

20.4.2.2 Méthode par masse ajoutée

Cette technique comprend deux mesurages de l'impédance électrique d'entrée sur le même transducteur, l'un des mesurages utilisant une perturbation de masse en mouvement connue, comme l'ajout d'une masse connue M_{ADD} au radiateur. La variation des paramètres relatifs entre les mesurages est utilisée pour calculer la masse en mouvement M_{MS} du transducteur sans masse ajoutée.

- L'impédance électrique du transducteur sans perturbation est mesurée à l'air libre dans des conditions de signaux faibles conformément à l'Article 18.
- Les paramètres électriques équivalents f_s et Q_{ES} du transducteur sans perturbation doivent être calculés conformément au 20.2.4.
- Après l'application d'une masse supplémentaire M_{ADD} sur la surface du radiateur, le mesurage de l'impédance électrique est répété à l'air libre dans les mêmes conditions de signaux faibles qu'en a) conformément à l'Article 18.
- Les paramètres électriques équivalents $f_{ADD} = f_s$ et $Q_{ADD} = Q_{ES}$ du transducteur avec perturbation de masse sont calculés conformément au 20.2.4.
- La masse en mouvement M_{MS} du transducteur sans perturbation doit être calculée à l'aide de la Formule (5):

$$M_{MS} = \frac{M_{ADD}}{\frac{Q_{ADD}f_s}{Q_{ES}f_{ADD}} - 1} \quad (5)$$

NOTE La formule (5) prend pour hypothèse un facteur de force T_{BI} constant dans les deux mesurages (R. Small [7]). Une version simplifiée de cette formule, dans laquelle les facteurs de qualité Q_{ADD} et Q_{ES} disparaissent, repose sur l'hypothèse qu'il n'existe pas de dépendance en fréquence de l'élasticité $C_{MS}(f)$ due à la viscoélasticité conformément au 20.6. Si cette condition n'est pas remplie, la méthode de perturbation de masse génère des erreurs significatives dans la masse M_{MS} calculée.

- En fonction de la masse M_{MS} calculée et de la fréquence de résonance f_s du transducteur sans perturbation, l'élasticité C_{MS} doit être calculée à l'aide de la Formule (1).
- A l'aide de la Formule (2), le facteur de force T_{BI} doit être calculé en fonction de la résistance en courant continu $R_E(T_V)$ mesurée et du facteur de qualité Q_{ES} .
- La résistance R_{MS} doit être calculée en fonction du facteur de qualité Q_{MS} mesuré à l'aide de la relation donnée dans la Formule (3).

20.4.2.3 Méthode par perturbations en boîte

Cette technique comprend deux mesurages de l'impédance électrique d'entrée sur le même transducteur, l'un des mesurages exigeant d'ajouter de la rigidité à la suspension mécanique en utilisant un volume d'air fermé. La variation de la fréquence de résonance due à la

perturbation acoustique connue constitue la base du calcul de l'élasticité à l'air libre C_{MS} et du volume d'air équivalent V_{AS} du transducteur.

- a) L'impédance électrique du transducteur est mesurée à l'air libre (sans enceinte) dans des conditions de signaux faibles conformément à l'Article 18.
- b) Les paramètres électriques équivalents f_s et Q_{ES} du transducteur sans perturbation acoustique doivent être calculés conformément au 20.2.4.
- c) Après le montage du transducteur dans une enceinte hermétique de volume V_T , le mesurage de l'impédance électrique est répété dans les mêmes conditions de signaux faibles qu'en a) conformément à l'Article 18.

Il convient de sceller soigneusement l'enceinte, sans matériau absorbant à l'intérieur. Il convient de ne pas utiliser cette méthode pour soumettre à l'essai les transducteurs électrodynamiques qui présentent un chemin de fuite d'air autour de la bobine acoustique dû à une fiche de phase ou à un bouchon antipoussière manquant. Le volume déplacé de l'unité motrice doit être soustrait au volume de l'enceinte vide pour déterminer la valeur de V_T .

- d) Les paramètres électriques équivalents $f_{CT} = f_s$ et $Q_{ECT} = Q_{ES}$ du transducteur avec perturbation acoustique doivent être calculés conformément au 20.2.4.
- e) Le volume d'air équivalent V_{AS} qui représente l'élasticité mécanique C_{MS} du transducteur sans perturbation doit être calculé à l'aide de la Formule (6).

$$V_{AS} = V_T \left[\frac{f_{CT} Q_{ECT}}{Q_{ES} f_s} - 1 \right] \quad (6)$$

- f) L'élasticité mécanique C_{MS} doit être calculée à l'aide de la Formule (7):

$$C_{MS} = \frac{V_{AS}}{\rho_0 c^2 S_D^2} \quad (7)$$

en utilisant la densité de l'air ρ_0 , la vitesse du son dans l'air c et la zone de rayonnement efficace S_D conformément au 20.8.2.

- g) En fonction de l'élasticité mécanique C_{MS} calculée et de la fréquence de résonance f_s du transducteur sans perturbation, la masse en mouvement M_{MS} doit être calculée à l'aide de la Formule (1).
- h) A l'aide de la Formule (2), le facteur de force T_{BI} doit être calculé en fonction de la résistance en courant continu $R_E(T_V)$ mesurée et du facteur de qualité Q_{ES} .
- i) La résistance R_{MS} doit être calculée en fonction du facteur de qualité Q_{MS} mesuré à l'aide de la relation donnée dans la Formule (3).

20.4.2.4 Méthode laser

Cette technique détermine le facteur de force T_{BI} en fonction de l'impédance électrique d'entrée $Z_E(f)$ mesurée et de la fonction de transfert mécanique $\underline{H}_{X,U}(f)$ entre la tension aux bornes du transducteur et le déplacement de référence.

- a) L'impédance électrique $Z_E(f_{\text{fund}})$ du transducteur est mesurée à l'air libre (sans enceinte) dans des conditions de signaux faibles conformément à l'Article 18.
- b) La fonction de transfert $\underline{H}_{X,U}(f)$ entre la tension aux bornes et le déplacement de référence $x(t)$ doit être mesurée conformément au 19.3 et au 19.6.
- c) Les paramètres localisés relatifs qui représentent le résonateur mécanique doivent être calculés conformément au 20.3.

- d) La fonction de transfert de déplacement modélisée $\underline{H}'_{X,U}(f)$ doit être calculée à l'aide des paramètres électriques et relatifs.

NOTE Dans les transducteurs, comme les micro-haut-parleurs, qui présentent une viscoélasticité importante, la modélisation de la fonction de transfert de déplacement exige un modèle de reptation conforme au 20.6.

- e) Le facteur de force T_{BI} doit être calculé en réduisant le plus possible l'erreur quadratique moyenne entre la fonction mesurée $\underline{H}_{X,U}(f)$ et la fonction modélisée $\underline{H}'_{X,U}(f)$.
- f) En fonction du facteur de force T_{BI} calculé, du facteur de qualité Q_{ES} identifié, de la fréquence de résonance f_s et de la résistance en courant continu R_E , l'élasticité C_{MS} doit être calculée à l'aide de la Formule (1).
- g) La résistance R_{MS} doit être calculée en fonction du facteur de qualité Q_{MS} mesuré à l'aide de la relation donnée dans la Formule (2).
- h) En fonction de l'élasticité C_{MS} , la masse en mouvement M_{MS} doit être calculée à l'aide de la relation donnée dans la Formule (3).

20.5 Paramètres purement mécaniques localisés

20.5.1 Généralités

Le mode de vibration fondamental du transducteur qui fonctionne sous vide doit être décrit par un modèle de paramètres localisés qui génère l'impédance mécanique donnée dans la Formule (8):

$$\underline{Z}_{MD}(f) = \frac{F(f, r_{coil})}{j2\pi f \underline{X}(f, r_{coil})} = \frac{T_{BI}^2}{\underline{Z}_{EMD}(f)} = \frac{1}{j2\pi f C_{MD}(f)} + R_{MD}(f) + j2\pi f M_{MD} \quad (8)$$

qui est inversement proportionnelle à l'impédance électrique $\underline{Z}_{EMD}(f)$ qui représente la résonance mécanique dans le domaine électrique, mise à l'échelle par le carré du facteur de force T_{BI}^2 . Le paramètre localisé M_{MD} représente la masse en mouvement sans charge d'air. Aux basses fréquences, l'élasticité $C_{MD}(f)$ de la suspension mécanique (qui est l'inverse de la rigidité $K_{MD}(f)$) et la résistance mécanique $R_{MD}(f)$ deviennent également dépendantes de la viscoélasticité du matériau.

NOTE Afin de distinguer les paramètres purement mécaniques et les paramètres localisés du transducteur avec charge d'air, le caractère "D" remplace le caractère "S" dans l'indice.

20.5.2 Méthode de mesure

- a) L'impédance électrique $\underline{Z}_E(f)$ du DUT qui fonctionne sous vide doit être mesurée conformément à l'Article 18.
- b) Le mesurage des paramètres purement mécaniques du transducteur qui fonctionne sous vide doit être réalisé à l'aide de la méthode laser ou de la méthode par masse ajoutée, conformément au 20.4.2.4 et au 20.4.2.2, respectivement.

Les paramètres localisés relatifs doivent être calculés conformément au 20.3 en utilisant le caractère "D" dans l'indice du paramètre pour indiquer le mesurage sous vide.

NOTE Une approximation utile de la masse en mouvement obtenue sous vide peut être calculée à l'aide de la formule $M_{MD} = M_{MS} - 1,7 \rho_o \pi a^3$, d'après la masse en mouvement totale M_{MS} d'un transducteur équipé d'un radiateur rond de rayon a qui fonctionne dans un écran acoustique infini avec charge d'air (voir Beranek [4]).

20.6 Elasticité en fonction de la fréquence

20.6.1 Généralités

L'élasticité mécanique $C_{MS}(f)$ et $C_{MD}(f)$ de la suspension doit être présentée en fonction de la fréquence dans la plage où la partie réactive de l'impédance mécanique n'est pas dominée par la masse en mouvement (par exemple, $f < 2f_s$).

20.6.2 Méthode de mesure

- a) Lorsque le DUT fonctionne sous vide, sa fonction de transfert mécanique $\underline{H}_X(f)$ doit être mesurée conformément au 19.6.

Par définition, la viscoélasticité est une propriété mécanique et il convient de la séparer des autres propriétés qui peuvent influencer ou augmenter l'élasticité $C_{MS}(f)$ à des fréquences plus basses $f < f_s$, comme une cavité d'air à l'intérieur du transducteur.

- b) La fonction de transfert mécanique $\underline{H}_X(f)$ doit être modélisée à l'aide d'un modèle viscoélastique, présenté par Knudsen [10] ou Ritter [11].

Il est recommandé d'utiliser le modèle de reptation à trois paramètres proposé par Ritter [11].

$$C_{MD}(f) = C_{\min} \left(1 - \kappa \lg_{10} \left(\frac{(f/f_{\min})}{\sqrt{1 + (f/f_{\min})^2}} \right) \right)$$

où l'élasticité minimale $C_{\min}$ et le facteur κ décrivent la pente de la courbe d'élasticité au-dessous d'une fréquence minimale $f_{\min}$.

- c) Les paramètres libres du modèle viscoélastique choisi doivent être estimés en réduisant le plus possible l'erreur entre les fonctions de transfert mécanique $\underline{H}_X(f)$ mesurée et modélisée.
- d) L'élasticité mécanique $C_{MD}(f)$ du transducteur qui fonctionne sous vide doit être calculée en fonction du modèle de reptation choisi avec les paramètres estimés. Le fabricant doit présenter soit $C_{MD}(f)$ en fonction de la fréquence, soit les paramètres libres ainsi qu'une définition complète du modèle utilisé.

NOTE Pour les fréquences f bien inférieures à la fréquence de résonance f_s , la pente de l'élasticité $C_{MS}(f)$ correspond à la pente de la fonction de transfert mécanique $\underline{H}_X(f)$.

- e) L'élasticité $C_{MS}(f)$ du transducteur qui fonctionne à l'air libre doit être calculée à l'aide de la Formule (9)

$$C_{MS}(f) = 1 / \left[1/C_{MD}(f) + 1/C_{MS}(f_s) - 1/C_{MD}(f_s) \right] \quad (9)$$

où l'élasticité $C_{MS}(f_s) = C_{MS}$ est un paramètre localisé identifié conformément au 20.4.

20.7 Paramètres mécaniques distribués

20.7.1 Réceptance

20.7.1.1 Généralités

La réceptance est la fonction de transfert mécanique $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r) = \underline{X}(f, \mathbf{r}_r) / \underline{F}(f)$ entre la force d'excitation $\underline{F}(f)$ du transducteur et le déplacement $\underline{X}(f, \mathbf{r}_r)$ au point $\mathbf{r}_r$ sur la surface du radiateur. La réceptance doit être mesurée dans des conditions de signaux faibles, avec une résolution spatiale suffisante pour représenter la forme de mode dans la plage de fréquences prise en considération.

NOTE La réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ est la base de l'analyse modale des vibrations mécaniques sur la surface du radiateur. Les résultats des simulations numériques (analyse des éléments finis) et de la vibrométrie laser peuvent être utilisés pour comparaison.

20.7.1.2 Méthodes de mesure

- a) Mesurer l'impédance électrique d'entrée $\underline{Z}_E(f)$ du DUT qui fonctionne à l'air libre dans des conditions de signaux faibles conformément à l'Article 18.

- b) La fonction de transfert $\underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r)$ entre la tension aux bornes et le déplacement sur la surface du radiateur aux points de balayage $\mathbf{r}_r[n]$ pour $0 \leq m \leq M$ doit être mesurée conformément au 19.6 avec une résolution spatiale suffisante ($M > 100$ points de balayage).
- c) Le facteur de force T_{BI} est déterminé conformément au 20.4.
- d) La réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ doit être calculée en tous les points de balayage $\mathbf{r}_r[m]$ pour $0 \leq m \leq M$ à l'aide de la Formule (10):

$$\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r) = \underline{H}_{X,U}(f, \mathbf{r}_r) \frac{Z_E(f)}{T_{BI}} \quad (10)$$

20.7.2 Analyse modale

20.7.2.1 Généralités

L'analyse modale (voir Bright [12]) doit être appliquée à la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ mesurée en un nombre suffisant de points de balayage $\mathbf{r}_r[i]$ avec $0 \leq m \leq M$ pour révéler l'expansion suivante:

$$\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=0}^N \underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r) = \sum_{n=0}^N \frac{\alpha_n \Phi_n(\mathbf{r}_r)}{1 + \eta_n \left(\frac{2\pi f}{\omega_n} \right)^2 - \left(\frac{2\pi f}{\omega_n} \right)^2} \quad (11)$$

avec les paramètres modaux suivants: forme de mode représentée sous forme de vecteurs propres orthonormaux $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, fréquence naturelle ω_n , facteur de perte modal η_n et gain modal α_n du mode de n^{e} rang.

NOTE Chaque mode dominant trouvé dans l'expansion modale de $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r)$ est une résonance distincte à la fréquence naturelle ω_n dans le niveau d'accélération cumulé conformément au 19.7. La largeur de bande relative de 3 dB de la résonance correspond au facteur de perte modal η_n . Ces paramètres modaux servent de base à l'ajustement du modèle d'analyse des éléments finis qui utilise des paramètres de matériau dépendant de la fréquence estimés dans les composantes mécaniques, comme le module $E(f)$ de Young, aux résultats de mesure du vibromètre laser du DUT.

20.7.2.2 Méthode de mesurage

- a) Mesurer la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ en un nombre suffisant de points de balayage $\mathbf{r}_r[m]$ pour $0 \leq m \leq M$ sur la surface du radiateur conformément au 20.7.1.

NOTE Le nombre de points de balayage dépend des cibles de l'analyse modale. L'évaluation des modes de résonance et l'identification des causes premières exigent généralement moins de 20 points, tandis que l'évaluation des modes à des fréquences plus élevées peut exiger plus de 500 points.

- b) Procéder à une décomposition en valeurs singulières de la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ pour séparer les modes orthogonaux, trouver les formes de mode $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$ et déterminer la réponse en fréquence modale $\underline{H}_n(f)$.
- c) Estimer la fréquence naturelle ω_n , le facteur de perte modal η_n et le gain modal α_n du mode de n^{e} rang dans la Formule (11).

20.7.3 Niveau de résonance relatif

20.7.3.1 Généralités

Le niveau de résonance relatif $R_{REL,n}$ est défini comme la différence entre le niveau d'accélération cumulé $L_{AA,n}$ du mode de résonance de n^{e} rang avec $n = 1, 2$ et le $L_{AA,0}$ du mode piston ($n = 0$), ou il peut être approximé (voir Cardenas [14]) comme suit:

$$R_{REL,n}(f_n) = L_{AA,n}(f_n) - L_{AA,0}(f_n)$$

$$\approx 20 \lg_{10} \left(\frac{\int_{S_r} |\underline{H}_n(f_n, \mathbf{r})| dS}{\int_{S_r} |\underline{H}_0(f_n, \mathbf{r})| dS} \right) \quad (12)$$

20.7.3.2 Méthode de mesure

- Mesurer la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ en un nombre suffisant de points de balayage $\mathbf{r}_r[m]$ pour $0 \leq m \leq M$ sur la surface du radiateur conformément au 20.7.1.
- Procéder à une analyse modale conformément au 20.7.2 et choisir la réceptance $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ avec $n = 0, 1, 2$. Déterminer la fréquence naturelle $\omega_n = 2\pi f_n$ des modes de résonance de premier et deuxième rang ($n = 1, 2$).
- Calculer le niveau de résonance relatif $R_{REL,n}(f_n)$ aux fréquences naturelles f_n avec $n = 1, 2$ conformément à la Formule (12).

NOTE Un niveau de résonance relatif $R_{REL,n}(f_n)$ supérieur à -5 dB indique une résonance importante dans le radiateur, susceptible de provoquer une distorsion impulsive, comme un frottement de la bobine acoustique. La distorsion impulsive peut être mesurée à l'aide de la méthode définie dans l'IEC 60268-21.

20.7.4 Centre de gravité

20.7.4.1 Généralités

Le centre de gravité par rapport au point de pivot doit être mesuré en coordonnées cartésiennes (y_{CG}, z_{CG}) ou en coordonnées polaires (d_M, γ_M).

NOTE Un déséquilibre dans les parties mobiles du transducteur peut être dû à la distribution asymétrique de la masse par rapport au point de pivot (voir Klippel [13]). Le point de pivot est le point de croisement des lignes nodales entre les modes de résonance de premier et deuxième rang et correspond à l'origine du système de coordonnées, comme le montre la Figure 4. La distribution asymétrique peut être due à des variations d'épaisseur des composants, à une distribution de colle non homogène, etc. Si le centre de gravité ne se trouve pas au point de pivot ($y_{CG} \neq 0, z_{CG} \neq 0$), le déplacement de translation et les angles d'inclinaison entraînent des moments d'excitation des modes de résonance de premier et deuxième rang. La distance d_M entre le centre de gravité et le point de pivot montre l'ampleur du déséquilibre et l'angle γ_M révèle la direction du déséquilibre.

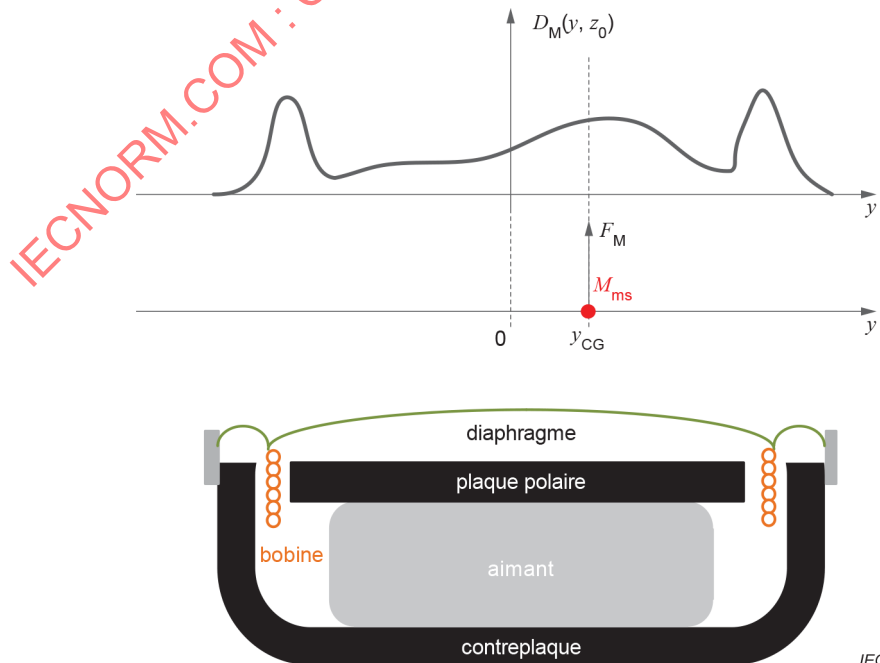


Figure 4 – Fonction de distribution de masse asymétrique $D_M(y, z_0)$ dans le système mécanique d'un micro-haut-parleur qui éloigne le centre de gravité du point de pivot

20.7.4.2 Méthode de mesure

- Mesurer la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ en un nombre suffisant de points de balayage $\mathbf{r}_r[i]$ pour $0 \leq m \leq M$ sur la surface du radiateur conformément au 20.7.1.
- Procéder à une analyse modale conformément au 20.7.2 et choisir les fonctions de transfert modal $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ avec $n = 0, 1, 2$. Déterminer la forme de mode $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, la fréquence naturelle ω_n , le facteur de perte modal η_n , le gain modal α_n du mode piston ($n = 0$) et les gains modaux α_n des deux modes de résonance ($n = 1, 2$).
- Ajuster le modèle de paramètres localisés développé pour les modes de résonance (voir [13]) aux données de résultats de l'analyse modale.
- Calculer les coordonnées du centre de gravité en fonction des paramètres identifiés du modèle de mode de résonance selon Cardenas [14].

20.7.5 Centre de rigidité

20.7.5.1 Généralités

Le centre de rigidité par rapport au point de pivot doit être mesuré en coordonnées cartésiennes (y_{CK}, z_{CK}) ou en coordonnées polaires (d_K, γ_K).

NOTE Si le centre de rigidité ne se trouve pas au point de pivot ($y_{CK} \neq 0, z_{CK} \neq 0$), le déséquilibre des efforts de rappel entraîne des moments d'excitation des modes de résonance de premier et deuxième rang. Ces déséquilibres correspondent à une distribution asymétrique de la rigidité sur la périphérie de la suspension. La distance d_K entre le centre de rigidité et le point de pivot montre l'ampleur du déséquilibre et l'angle γ_K révèle la direction du déséquilibre.

20.7.5.2 Méthode de mesure

- Mesurer la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ en un nombre suffisant de points de balayage $\mathbf{r}_r[i]$ pour $0 \leq m \leq M$ sur la surface du radiateur conformément au 20.7.1.
- Procéder à une analyse modale conformément au 20.7.2 et choisir les fonctions de transfert modal $\underline{H}_n(f, \mathbf{r}_r)$ avec $n = 0, 1, 2$. Déterminer la forme de mode $\Phi_n(\mathbf{r}_r)$, la fréquence naturelle ω_n , le facteur de perte modal η_n , le gain modal α_n du mode piston ($n = 0$) et les gains modaux α_n des deux modes de résonance ($n = 1, 2$).
- Ajuster le modèle de paramètres localisés développé pour les modes de résonance (voir Cardenas [14]) aux données de résultats de l'analyse modale.
- Calculer les coordonnées du centre de rigidité en fonction des paramètres identifiés du modèle de mode de résonance selon Cardenas [14].

20.7.6 Centre du facteur de force

20.7.6.1 Généralités

Le centre de distribution du facteur de force par rapport au point de pivot doit être mesuré en coordonnées cartésiennes (y_{CB}, z_{CB}) ou en coordonnées polaires (d_B, γ_B).

NOTE Si le centre de distribution du facteur de force ne se trouve pas au point de pivot ($y_{CB} \neq 0, z_{CB} \neq 0$) dans les transducteurs électrodynamiques, le déséquilibre de la force de Lorentz répartie sur la bobine acoustique entraîne des moments d'excitation des modes de résonance de premier et deuxième rang. La distribution asymétrique peut être due à une densité de flux magnétique non homogène B dans l'entrefer, associée à des positions décalées dans les parties en fer et à des imperfections qui apparaissent au cours du processus d'aimantation. La distance d_B entre le centre de distribution du facteur de force et le point de pivot montre l'ampleur du déséquilibre et l'angle γ_B révèle la direction du déséquilibre.

20.7.6.2 Méthode de mesure

- Mesurer la réceptance $\underline{H}_{X,F}(f, \mathbf{r}_r[m])$ en un nombre suffisant de points de balayage $\mathbf{r}_r[m]$ pour $0 \leq m \leq M$ sur la surface du radiateur conformément au 20.7.1.