

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
1088**

Première édition
First edition
1991-09

**Caractéristiques et mesures des transducteurs
piézocéramiques ultrasonores**

**Characteristics and measurements of ultrasonic
piezoceramic transducers**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 1088: 1991

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
1088**

Première édition
First edition
1991-09

**Caractéristiques et mesures des transducteurs
piézocéramiques ultrasonores**

**Characteristics and measurements of ultrasonic
piezoceramic transducers**

© CEI 1991 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher

Bureau central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Q

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Définitions	8
3.1 Puissance électrique d'entrée	10
3.1.1 Courbe de réponse en fréquence pour la puissance électrique d'entrée	10
3.1.2 Puissance électrique d'entrée à la résonance	12
3.2 Puissance acoustique de sortie	12
3.3 Amplitude de déplacement vibratoire	12
3.3.1 Courbe de réponse en fréquence pour l'amplitude de déplacement vibratoire ..	12
3.3.2 Amplitude de déplacement vibratoire à la résonance	12
3.4 Fréquence de résonance	12
3.5 Largeur de bande	12
3.5.1 Facteur de qualité mécanique du transducteur	14
3.6 Impédance électrique du transducteur	14
3.6.1 Impédance électrique à la résonance	14
3.7 Admittance électrique du transducteur	14
3.7.1 Admittance électrique d'un transducteur bloqué	16
3.8 Sensibilité du transducteur	16
3.8.1 Sensibilité «déplacement – tension»	16
3.8.2 Sensibilité «carré du déplacement – puissance»	16
3.9 Rendement électroacoustique	16
4 Classification des transducteurs	16
4.1 Transducteurs de catégorie P	16
4.2 Transducteurs de catégorie A	18
5 Conditions de mesures	18
5.1 Généralités	18
5.1.1 Charge acoustique	18

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Definitions	9
3.1 Input electrical power	11
3.1.1 Frequency response curve for input electrical power	11
3.1.2 Input electrical power at resonance	13
3.2 Output acoustical power	13
3.3 Vibrational displacement amplitude	13
3.3.1 Frequency response curve for vibrational displacement amplitude	13
3.3.2 Vibrational displacement amplitude at resonance	13
3.4 Frequency of resonance	13
3.5 Bandwidth	13
3.5.1 Mechanical quality factor of the transducer	15
3.6 Electrical impedance of the transducer	15
3.6.1 Electrical impedance at resonance	15
3.7 Electrical admittance of the transducer	15
3.7.1 Electrical admittance of the clamped transducer	17
3.8 Sensitivity of the transducer	17
3.8.1 "Displacement-voltage" sensitivity	17
3.8.2 "Squared displacement-power" sensitivity	17
3.9 Electroacoustical efficiency	17
4 Classification of transducers	17
4.1 Transducers of category P	17
4.2 Transducers of category A	19
5 Measurement conditions	19
5.1 General	19
5.1.1 Acoustical load	19

Articles	Pages
5.2 Préparation des mesures	18
5.2.1 Préparation du transducteur	18
5.2.2 Préparation de l'eau	18
5.3 Conditions de fonctionnement	18
5.4 Prescriptions générales relatives à l'appareillage	20
6 Mesure des quantités électriques	20
6.1 Mesure de la tension à l'entrée du transducteur	20
6.2 Mesure du courant électrique à l'entrée du transducteur	20
6.3 Mesure de déphasage entre le courant et la tension à l'entrée du transducteur	20
6.4 Mesure de puissance électrique d'entrée	20
6.5 Mesure de l'impédance électrique (admittance) du transducteur	20
7 Mesure de l'amplitude de déplacement vibratoire	22
8 Caractéristiques du transducteur et méthodes de mesures	22
8.1 Fréquence de résonance et puissance électrique d'entrée du transducteur à la résonance	22
8.2 Largeur de bande et facteur de qualité mécanique	22
8.3 Amplitude de déplacement vibratoire à la résonance	22
8.4 Sensibilité «déplacement – tension» du transducteur	24
8.5 Puissance acoustique de sortie du transducteur	24
8.6 Rendement électroacoustique du transducteur	24
8.7 Sensibilité «carré du déplacement – puissance» du transducteur	26
8.8 Impédance électrique à la résonance	26
8.9 Admittance électrique du transducteur bloqué	26
ANNEXES	
A Propriétés non linéaires du transducteur	30
B Dépendance de l'impédance de charge sur l'amplitude de déplacement vibratoire	32
C Bibliographie	34

Clause	Page
5.2 Preparation for measurement	19
5.2.1 Preparation of the transducer	19
5.2.2 Preparation of water	19
5.3 Operating conditions	19
5.4 General requirements for the instrumentation	21
6 Measurement of electrical quantities	21
6.1 Measurement of voltage at the input of the transducer	21
6.2 Measurement of electrical current at the input of the transducer	21
6.3 Measurement of the current-voltage phase shift at the input of the transducer	21
6.4 Measurement of the input electrical power	21
6.5 Measurement of electrical impedance (admittance) of the transducer	21
7 Measurement of vibrational displacement amplitude	23
8 Transducer characteristics and measurement methods	23
8.1 Resonance frequency and input electrical power of the transducer at resonance	23
8.2 Bandwidth and quality factor	23
8.3 Vibrational displacement amplitude at resonance	23
8.4 "Displacement-voltage" sensitivity of the transducer	25
8.5 Output acoustical power of the transducer	25
8.6 Electroacoustical efficiency of the transducer	25
8.7 "Squared displacement-power" sensitivity of the transducer	27
8.8 Electrical impedance at resonance	27
8.9 Electrical admittance of the clamped transducer	27
ANNEXES	
A Non-linear properties of the transducer	31
B Dependence of the load impedance on the vibrational displacement amplitude	33
C Bibliography	34

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CARACTÉRISTIQUES ET MESURES DES TRANSDUCTEURS PIÉZOCÉRAMIQUES ULTRASONORES

AVANT-PROPOS

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

Le présent Rapport technique a été établi par le Comité d'Etudes n° 87 de la CEI: Ultrasons.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
87(BC)1	87(BC)3

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**CHARACTERISTICS AND MEASUREMENTS OF ULTRASONIC
PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

This Technical Report has been prepared by IEC Technical Committee No. 87: Ultrasonics.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
87(CO)1	87(CO)3

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

CARACTÉRISTIQUES ET MESURES DES TRANSDUCTEURS PIÉZOCÉRAMIQUES ULTRASONORES

1 Domaine d'application

Le présent Rapport technique spécifie les caractéristiques fondamentales électro-acoustiques des transducteurs piézocéramiques pour l'application industrielle d'énergie ultrasonore. Il spécifie aussi les méthodes destinées aux mesures de ces caractéristiques.

Le présent rapport est applicable aux transducteurs piézocéramiques de mode longitudinal de vibration fonctionnant à une seule fréquence de résonance jusqu'à 100 kHz.

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour le présent Rapport technique. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur le présent Rapport technique sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique.*

CEI 50(801): *Vocabulaire Electrotechnique International, Chapitre 801, Acoustique et électroacoustique.*

3 Définitions

Pour les besoins du présent Rapport technique, les définitions suivantes s'appliquent.

Liste des symboles

f = fréquence

f_{res} = fréquence de résonance du transducteur

P_e = puissance électrique d'entrée

$P_{e \text{ res}}$ = puissance électrique d'entrée à la résonance

V_T = valeur efficace de la tension à l'entrée du transducteur

$V_{T \text{ res}}$ = valeur efficace de la tension à l'entrée du transducteur à la résonance

I_T = valeur efficace du courant parcourant le transducteur

φ = déphasage entre V_T et I_T

φ_{res} = déphasage entre V_T et I_T à la résonance

CHARACTERISTICS AND MEASUREMENTS OF ULTRASONIC PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS

1 Scope

This Technical Report specifies the essential electroacoustic characteristics of piezoceramic transducers for industrial application of ultrasonic energy. It also specifies the methods of measuring these characteristics.

This report is applicable to piezoceramic longitudinally vibrating transducers which operate at a single resonance frequency up to 100 kHz.

2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this Technical Report. At the time of publication of this standard, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this Technical Report are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology.*

IEC 50(801): *International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 801, Acoustics and electroacoustics.*

3 Definitions

For the purpose of this Technical Report, the following definitions apply.

List of symbols

f	= frequency
f_{res}	= frequency of resonance of the transducer
P_{e}	= input electrical power
$P_{\text{e res}}$	= input electrical power at resonance
V_{T}	= root-mean-square value of voltage at the transducer input
$V_{\text{T res}}$	= root-mean-square value of voltage at resonance
I_{T}	= root-mean-square value of current through the transducer
φ	= phase shift between V_{T} and I_{T}
φ_{res}	= phase shift between V_{T} and I_{T} at resonance

ξ	=	amplitude de déplacement vibratoire
ξ_{res}	=	amplitude de déplacement vibratoire à la résonance
P_a	=	puissance acoustique de sortie du transducteur
Δf	=	largeur de bande
Q	=	facteur de qualité mécanique du transducteur
Z	=	impédance électrique du transducteur
Z_{res}	=	valeur de l'impédance électrique du transducteur à la résonance
R	=	composante réelle de l'impédance électrique
R_{res}	=	composante réelle de l'impédance électrique à la résonance
X	=	composante imaginaire de l'impédance
X_{res}	=	composante imaginaire de l'impédance à la résonance
Y	=	admittance électrique du transducteur bloqué
G	=	composante réelle de l'admittance
B	=	composante imaginaire de l'admittance
Y_{cl}	=	admittance électrique du transducteur bloqué
C_{cl}	=	capacitance du transducteur bloqué
$\tan \delta$	=	tangente de pertes électriques
V_{ξ_V}	=	sensibilité «déplacement-tension» du transducteur
V_{ξ_P}	=	sensibilité «carré du déplacement – puissance» du transducteur
η_{ea}	=	rendement électroacoustique du transducteur
r_s	=	résistance non réactive de faible valeur, connectée en série avec le transducteur
V_r	=	tension de la résistance active connectée en série avec le transducteur
P_{el}	=	puissance de pertes électriques du transducteur

3.1 puissance électrique d'entrée: La puissance active alternative consommée par le transducteur à partir du générateur de puissance à la fréquence considérée.

Symbole: P_e

Unité: Watt, W.

NOTE - La puissance électrique d'entrée peut être exprimée par:

$$P_e = V_T \cdot I_T \cos \varphi \quad (3.1)$$

où V_T est la valeur efficace de la tension à l'entrée du transducteur, I_T est la valeur efficace du courant parcourant le transducteur, φ est le déphasage entre V_T et I_T .

3.1.1 courbe de réponse en fréquence pour la puissance électrique d'entrée: On trace les valeurs de P_e en fonction de la fréquence pour une valeur constante de la tension à l'entrée du transducteur.

Symbole: $P_e(f)$.

ξ	= vibrational displacement amplitude
ξ_{res}	= vibrational displacement amplitude at resonance
P_a	= output acoustical power of the transducer
Δf	= bandwidth
Q	= mechanical quality factor of the transducer
Z	= electrical impedance of the transducer
Z_{res}	= electrical impedance of the transducer at resonance
R	= real component of the impedance
R_{res}	= real component of the impedance at resonance
X	= imaginary component of the impedance
X_{res}	= imaginary component of the impedance at resonance
Y	= electrical admittance of the transducer
G	= real component of the admittance
B	= imaginary component of the admittance
Y_{cl}	= electrical admittance of the clamped transducer
C_{cl}	= capacitance of the clamped transducer
$\tan \delta$	= dielectric loss tangent
V_{ξ_V}	= "displacement-voltage" sensitivity of the transducer
V_{ξ_P}	= "squared displacement-power" sensitivity of the transducer
η_{ea}	= electroacoustical efficiency of the transducer
r_s	= non-reactive small-value resistor connected in series with the transducer
V_r	= voltage across the small-value resistor connected in series with the transducer
P_{el}	= electrical loss power of the transducer

3.1 Input electrical power: The active a.c. power consumed by the transducer from a power generator at a given frequency.

Symbol: P_e

Unit: Watt, W.

NOTE - The input electrical power may be expressed as:

$$P_e = V_T \cdot I_T \cos \varphi \quad (3.1)$$

where V_T is the root mean-square value of voltage at the input of the transducer, I_T is the root mean-square value of current through the transducer; φ is the phase difference between V_T and I_T .

3.1.1 frequency response curve for input electrical power: The values of P_e plotted versus frequency for constant voltage at the input of the transducer.

Symbol: $P_e(f)$.

3.1.2 puissance électrique d'entrée à la résonance: La valeur maximale de la puissance électrique d'entrée en fonction de la fréquence, pour une tension constante à l'entrée du transducteur.

Symbole: $P_{e\ res}$

Unité: Watt, W.

3.2 puissance acoustique de sortie: La puissance acoustique rayonnée par un transducteur dans le milieu.

Symbole: P_a

Unité: Watt, W.

3.3 amplitude de déplacement vibratoire: Amplitude de la composante axiale pour le déplacement vibratoire de l'appareil ultrasonore ou de l'extrémité de sortie du concentrateur fixé au transducteur de catégorie A.

Symbole: ξ

Unité: micromètre, μm .

NOTE - Pour un transducteur de catégorie P, il s'agit de l'amplitude des déplacements vibratoires normaux de la surface rayonnante à un point donné.

3.3.1 courbe de réponse en fréquence pour l'amplitude de déplacement vibratoire: On trace les valeurs de l'amplitude de déplacement vibratoire en fonction de la fréquence pour une valeur constante de la tension à l'entrée du transducteur.

Symbole: $\xi(f)$.

3.3.2 amplitude de déplacement vibratoire à la résonance: La valeur maximale de l'amplitude de déplacement vibratoire en fonction de la fréquence pour une valeur constante de la tension à l'entrée du transducteur.

Symbole: ξ_{res}

Unité: micromètre, μm .

3.4 fréquence de résonance: Pour les transducteurs de catégorie P, c'est une fréquence correspondant à la valeur maximale de la courbe de réponse en fréquence pour la puissance d'entrée, ou, pour les transducteurs de catégorie A, à la valeur maximale de la courbe de fréquence pour l'amplitude de déplacement vibratoire [VEI 801-04-06 modifié].

Symbole: f_{res}

Unité: kilohertz, kHz.

3.5 largeur de bande: Intervalle de fréquence autour de la résonance situé dans la courbe de réponse en fréquence du transducteur, limité, du part et d'autre de f_{res} , par les fréquences correspondant aux valeurs de P_e , égales à 0,5 de sa valeur maximale (pour le transducteur de catégorie P), ou aux valeurs de ξ égales à 0,707 fois sa valeur maximale (pour le transducteur de catégorie A).

Symbole: Δf

Unité: kilohertz, kHz.

3.1.2 input electrical power at resonance: The maximal value of the input electrical power for varying frequency at constant voltage at the input of the transducer.

Symbol: $P_{e\text{res}}$

Unit: Watt, W.

3.2 output acoustical power: Acoustical power radiated by the transducer into a medium.

Symbol: P_a

Unit: Watt, W.

3.3 vibrational displacement amplitude: The amplitude of the axial component of vibrational displacement of the tool or concentrator tip for an A-category transducer.

Symbol: ξ

Unit: micrometre, μm .

NOTE - For a P-category transducer, this is the amplitude of normal vibrational displacement of the radiating surface at a given point.

3.3.1 frequency response curve for vibrational displacement amplitude: The values of the vibrational displacement amplitude plotted versus frequency for constant voltage at the input of the transducer.

Symbol: $\xi(f)$.

3.3.2 vibration displacement amplitude at resonance: The maximal value of the vibrational displacement amplitude for varying frequency at constant voltage at the input of the transducer.

Symbol: ξ_{res}

Unit: micrometre, μm .

3.4 frequency of resonance: Frequency corresponding to the maximum of the frequency response curve for the input electrical power (for P-category transducer) or vibrational displacement amplitude (for A-category transducer [IEV 801-04-06 modified]).

Symbol: f_{res}

Unit: kilohertz, kHz.

3.5 bandwidth: The interval of the frequency response curve of the transducer bounded on both sides of f_{res} by frequencies corresponding either to values of P_e equal to 0,5 of its maximal value (for a P-category transducer) or to values of ξ equal to 0,707 of its maximal value (for an A-category transducer).

Symbol: Δf

Unit: kilohertz, kHz.

3.5.1 facteur de qualité mécanique du transducteur: Rapport de la fréquence de résonance sur la largeur de bande

$$Q = \frac{f_{\text{res}}}{\Delta f} \quad (3.2)$$

Symbole: Q .

3.6 impédance électrique du transducteur: A une fréquence donnée dans le cas où la tension d'excitation (simple harmonique) est de forme sinusoïdale établie, l'impédance électrique du transducteur à cette fréquence est le rapport (exprimé sous forme complexe) de la valeur de la tension à l'entrée du transducteur sur la valeur du courant parcourant le transducteur:

$$Z = R + jX,$$

où R et X sont respectivement ses composantes réelle et imaginaire de l'impédance.

Symbole: Z

Unité: ohm.

NOTES

- 1 L'impédance électrique peut aussi être représentée sous la forme: (3.3)
 $Z = |Z| (\cos \varphi + j \sin \varphi)$

où la valeur absolue de l'impédance du transducteur $|Z| = \frac{V_T}{I_T}$ est égale au rapport de la tension efficace à l'entrée du transducteur sur le courant efficace correspondant, I_T
 et φ est l'angle de déphasage entre le courant et la tension.

Les relations suivantes s'en déduisent:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} ; \tan \varphi = \frac{X}{R} \quad (3.4)$$

- 2 Pour les grandes puissances, l'impédance d'entrée peut dépendre de la tension d'excitation.

3.6.1 impédance électrique à la résonance: Valeur de l'impédance électrique du transducteur à sa fréquence de résonance.

Symbole: Z_{res} .

NOTE - Les valeurs respectives des composantes de l'impédance électrique sont désignées comme R_{res} , X_{res} , $|Z_{\text{res}}|$ et φ_{res} .

3.7 admittance électrique du transducteur: La valeur réciproque (inverse) de l'impédance électrique peut être exprimée sous la forme complète

$$Y = G + jB,$$

avec G et B désignant respectivement ses composantes réelle et imaginaire.

Symbole: Y

Unité: siemens, S.

NOTE - Les composantes réelle et imaginaire de l'admittance sont liées aux composantes de l'impédance électrique par les relations:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} ; B = \frac{-X}{R^2 + X^2} \quad (3.5)$$

3.5.1 mechanical quality factor of the transducer: The ratio of the frequency of resonance to the bandwidth

$$Q = \frac{f_{\text{res}}}{\Delta f} \quad (3.2)$$

Symbol: Q .

3.6 electrical impedance of the transducer: For simple harmonic (sinusoidal-steady-state) transducer excitation at a given frequency, the electrical impedance of the transducer at that frequency is the ratio (expressed in complex form) of the voltage at the input of the transducer to the current flowing through the transducer:

$$Z = R + jX$$

where R and X are the real and imaginary components of the impedance respectively.

Symbol: Z

Unit: ohm.

NOTES

1 The electrical impedance can also be represented in the form: (3.3)

$$Z = |Z| (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

where $|Z| = \frac{V_T}{I_T}$ is the absolute value of the impedance equal to the ratio of the root-mean-square voltage at the input of the transducer to the root-mean-square current;

and φ is the phase shift between the current and voltage.

The following relations are valid:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}; \tan \varphi = \frac{X}{R} \quad (3.4)$$

2 For high-power operation, the input impedance may depend on the driving voltage.

3.6.1 electrical impedance at resonance: The value of electrical impedance at the frequency of resonance.

Symbol: Z_{res} .

NOTE - The respective values of the components of electrical impedance are denoted by R_{res} , X_{res} , $|Z_{\text{res}}|$, and φ_{res} .

3.7 electrical admittance of the transducer: The reciprocal form of the electrical impedance, which is expressed in complex form as

$$Y = G + jB,$$

where G and B are the real and imaginary components of the admittance, respectively.

Symbol: Y

Unit: siemens, S.

NOTE - The real and imaginary components of the admittance are related to the components of the electrical impedance by:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}; B = \frac{-X}{R^2 + X^2} \quad (3.5)$$

3.7.1 admittance électrique du transducteur bloqué: Impédance électrique du transducteur en l'absence de vibrations mécaniques.

Symbole: Y_{cl}

Unité: siemens, S.

NOTE - Les valeurs respectives des composantes réelle et imaginaire de l'admittance électrique sont désignées par G_{cl} et B_{cl} . La capacité du transducteur bloqué est liée à la composante imaginaire de l'admittance électrique et vaut:

$$G_{cl} = B_{cl}/2\pi f. \quad (3.6)$$

3.8 Sensibilité du transducteur

3.8.1 sensibilité «déplacement – tension»: Le rapport de l'amplitude de déplacement vibratoire à la résonance sur l'amplitude de la tension à l'entrée du transducteur est exprimé par la forme suivante:

$$V_{\xi V} = \frac{\xi_{res} \cdot \sqrt{2}}{V_{T res}} \quad (3.7)$$

où $V_{T res}$ est la valeur efficace de la tension à la résonance.

Symbole: $V_{\xi V}$

Unité: $\mu\text{m}/\text{V}$.

3.8.2 sensibilité «carré du déplacement – puissance»: Rapport du carré de l'amplitude de déplacement vibratoire à la résonance sur la puissance électrique d'entrée

$$V_{\xi p} = \frac{\xi_{res}^2}{P_{e res}} \quad (3.8)$$

Symbole: $V_{\xi p}$

Unité: $(\mu\text{m})^2/\text{W}$.

NOTE - La sensibilité «carré du déplacement – puissance» est une mesure de rendement du transducteur de catégorie A.

3.9 rendement électroacoustique: Rapport de la puissance acoustique, rayonnée par transducteur de catégorie P dans un milieu à la puissance électrique d'entrée

$$\eta_{ea} = \frac{P_a}{P_e} \quad (3.9)$$

Symbole: η_{ea}

4 Classification des transducteurs

4.1 Transducteurs de catégorie P

Transducteurs conçus pour rayonner une puissance acoustique dans un gaz ou un liquide.

NOTE - Un transformateur mécanique donné, fixé à l'extrémité de la face de sortie du transducteur pour assurer une meilleure adaptation au milieu, peut être considéré comme faisant partie du transducteur.

3.7.1 electrical admittance of the clamped transducer: Electrical admittance of the transducer in the absence of mechanical vibrations.

Symbol: Y_{cl}

Unit: siemens, S.

NOTE - The respective values of real and imaginary components of the electrical admittance are denoted by G_{cl} and B_{cl} . The capacitance of the clamped transducer is related to the imaginary components of the electrical admittance and expresses as:

$$G_{cl} = B_{cl}/2\pi f. \quad (3.6)$$

3.8 Sensitivity of the transducer

3.8.1 "displacement-voltage" sensitivity: The ratio of the vibrational displacement amplitude at resonance to the voltage amplitude at the input of the transducer which is expressed as:

$$V_{\xi V} = \frac{\xi_{res} \cdot \sqrt{2}}{V_{T res}} \quad (3.7)$$

where $V_{T res}$ is the root-mean-square value of voltage at resonance.

Symbol: $V_{\xi V}$

Unit: $\mu\text{m}/\text{V}$.

3.8.2 "squared displacement-power" sensitivity: The ratio of the squared vibrational displacement amplitude at resonance to the input electrical power

$$V_{\xi p} = \frac{\xi_{res}^2}{P_{e res}} \quad (3.8)$$

Symbol: $V_{\xi p}$

Unit: $(\mu\text{m})^2/\text{W}$.

NOTE - The "squared displacement-power" sensitivity is a measure of the efficiency of an A-category transducer.

3.9 electroacoustical efficiency: The ratio of the acoustical power radiated by a P-category transducer into a medium to the input electrical power

$$\eta_{ea} = \frac{P_a}{P_e} \quad (3.9)$$

Symbol: η_{ea}

4 Classification of transducers

4.1 Transducers of category P

Transducers designed for radiating acoustical power into gases or liquids.

NOTE - A given mechanical transformer attached to the transducer output endface for improving the match between the transducer and medium is considered part of the transducer.

4.2 Transducteurs de catégorie A

Transducteurs destinés au traitement des solides.

NOTE - Un transformateur mécanique donné, avec un outil fixé à l'extrémité de sortie du transducteur peut être considéré comme faisant partie du transducteur.

5 Conditions de mesures

5.1 Généralités

Les mesures des caractéristiques d'un transducteur doivent être effectuées dans des conditions qui se rapprochent au mieux des conditions réelles de fonctionnement des dispositifs ultrasonores telles que la température ambiante du milieu, le moyen de refroidissement, le support du transducteur, les conditions de charge acoustique.

5.1.1 Charge acoustique

Si le fabricant n'a pas spécifié de prescription spéciale quant au type de charge acoustique, les mesures doivent être effectuées sans aucune autre charge que l'air, pour les transducteurs de catégorie A; l'eau doit être le type de liquide à employer pour les mesures des transducteurs de catégorie P.

NOTE - En cas de mesures avec une charge acoustique liquide le niveau de liquide en cuve doit être pris en considération, ainsi que l'éventuel changement des paramètres opératoires du milieu selon la puissance acoustique rayonnée à la cavitation (voir annexe B).

5.2 Préparation des mesures

5.2.1 Préparation du transducteur

Toutes les surfaces et les parties du transducteur, plongées dans l'eau pendant les mesures, doivent être soigneusement nettoyées avant immersion de façon à les libérer de toute souillure et de graisse.

Si l'on n'a pas spécifié des prescriptions spéciales quant à la position du transducteur en condition de fonctionnement, le transducteur doit être positionné durant les mesures de telle sorte que les bulles gazeuses ne puissent pas s'accumuler sur sa surface.

5.2.2 Préparation de l'eau

L'eau doit être dégazée par chauffage à 70 °C, puis soumise à l'action des ultrasons pendant 2 h sans chauffage additionnel; l'intensité ultrasonore doit être suffisante pour produire la cavitation; et enfin on terminera par un refroidissement à la température correspondant aux conditions de fonctionnement.

5.3 Conditions de fonctionnement

Au cours des mesures, la valeur de la tension d'excitation alternative doit correspondre à la tension assignée. Il n'est pas recommandé d'extrapoler les valeurs des paramètres mesurées à un faible niveau de puissance à celles correspondant à un fort niveau de puissance.

4.2 *Transducers of category A*

Transducers designed for different kinds of treatment of solids.

NOTE - A given mechanical transformer with a tool attached to the transducer output endface is considered part of the transducer.

5 *Measurement conditions*

5.1 *General*

Transducer characteristics shall be measured under conditions as close as possible to actual operating conditions of ultrasonic devices with due regard to the following important factors: ambient temperature, cooling, transducer support, type of acoustical load.

5.1.1 *Acoustical load*

If the type of acoustical load is not specified by the manufacturer, A-category transducer measurement shall be made without an external load other than air and P-category transducers shall be loaded with water.

NOTE - In the case of liquid acoustical load, allowance should be made for the liquid level in the measuring tank and for changes of the medium due to cavitation, depending on the acoustical power (see annex B).

5.2 *Preparation for measurement*

5.2.1 *Preparation of the transducer*

Before immersion, all surfaces and parts of the transducer that will be immersed in water during measurement shall be carefully cleaned so as to be free from contamination and grease.

If no special requirements for the position of the transducer during operation are specified, the transducer shall be positioned so as to avoid the accumulation of bubbles on its surface.

5.2.2 *Preparation of water*

The water shall be degassed by heating up to 70 °C and then ultrasonically treated for 2 h without additional heating at an ultrasonic intensity sufficient to produce cavitation. It shall then be cooled to the operating temperature.

5.3 *Operating conditions*

During measurement, the a.c. driving voltage shall have the rated value. It is not permissible to extrapolate the value of the parameters measured at low power level to those corresponding to a high power level.

Les valeurs de la tension d'excitation, de la puissance électrique d'entrée et autres paramètres qui peuvent changer les résultats des mesures, doivent être représentées en regard des résultats des mesures.

Pendant les mesures il convient de veiller à ne pas dépasser les limites assignées de puissance d'entrée et l'amplitude indiquées par le fabricant.

5.4 Prescriptions générales relatives à l'appareillage

La fréquence et la dynamique du générateur de puissance d'excitation doivent être appropriées au transducteur à mesurer; il en est de même des appareils de mesures.

6 Mesure des quantités électriques

6.1 Mesure de la tension à l'entrée du transducteur

La valeur de la tension à l'entrée du transducteur est déterminée directement par lecture de la graduation d'un voltmètre connecté à l'entrée du transducteur; l'impédance d'entrée du voltmètre doit être au moins 100 fois plus grande que l'impédance électrique du transducteur. L'erreur de mesure ne doit pas dépasser $\pm 1\%$.

6.2 Mesure du courant électrique à l'entrée du transducteur

Le courant électrique à l'entrée du transducteur peut être déterminé directement par lecture des données d'un ampèremètre haute fréquence connecté en série avec le transducteur. L'erreur de mesure ne doit pas dépasser $\pm 1,5\%$.

NOTE - Le courant d'entrée peut également être calculé par le rapport V_f/r_s , où V_f est la tension à travers une petite résistance non-réactive égale à r_s , connectée en série avec le transducteur. La valeur de r_s doit être connue avec une précision de $\pm 0,5\%$ ou mieux; l'erreur de mesure ne doit pas dépasser $\pm 1\%$.

6.3 Mesure de déphasage entre le courant et la tension à l'entrée du transducteur

Le déphasage est lu directement sur un phasemètre électronique. L'erreur de mesure ne doit pas dépasser $\pm 2^\circ$.

6.4 Mesure de puissance électrique d'entrée

La valeur de la puissance électrique d'entrée est déterminée directement par lecture sur un wattmètre électronique relié à l'entrée du transducteur. L'erreur de mesure devra être inférieure à $\pm 5\%$.

NOTE - La valeur de la puissance électrique d'entrée peut être calculée par l'équation (3.1), V_T , I_T , et φ étant mesuré selon 6.1 à 6.3.

6.5 Mesure de l'impédance électrique (admittance) du transducteur

L'impédance électrique (admittance) d'un transducteur est mesurée directement au moyen d'un pont d'impédance (pont d'admittance). L'erreur de mesure doit être inférieure à $\pm 5\%$.

NOTE - La valeur de l'impédance électrique peut être également calculée par l'équation (3.3) et la valeur de

$$\text{l'admittance électrique par la relation } Y = \frac{I_T}{V_T} (\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad (6.1)$$

où V_T , I_T et φ sont mesurés selon 6.1 à 6.3.

The values of driving voltage, input electrical power, and other parameters that may influence measurement results shall be reported together with the measurement results obtained.

Care shall be taken that the input power and vibration amplitude do not exceed the rated values specified by the manufacturer.

5.4 General requirements for the instrumentation

The frequency and dynamic range of the driving power generator, as well as of the measuring instruments, shall be adequate for the transducer to be measured.

6 Measurement of electrical quantities

6.1 Measurement of voltage at the input of the transducer

The voltage at the input of the transducer is measured directly by a voltmeter connected to the input terminals of the transducer; the voltmeter input impedance shall be at least 100 times larger than the electrical impedance of the transducer. The measurement error shall not exceed $\pm 1\%$.

6.2 Measurement of electrical current at the input of the transducer

Electrical current at the input of the transducer is measured directly by a high-frequency ammeter connected in series with the transducer. The measurement error shall not exceed $\pm 1,5\%$.

NOTE - Current at the input of the transducer can be determined from the ratio V_r/r_s , where V_r is voltage across a low-value non-reactive resistor r_s connected in series with the transducer. The resistance shall be known with an accuracy of $\pm 0,5\%$ or better; the error of measuring voltage shall not exceed $\pm 1\%$.

6.3 Measurement of the current-voltage phase shift at the input of the transducer

The phase shift is measured directly by an electronic phase-meter. The measurement error shall not exceed $\pm 2^\circ$.

6.4 Measurement of the input electrical power

The input electrical power is measured directly by an electronic wattmeter connected to the input terminals. The measurement error shall not exceed $\pm 5\%$.

NOTE - The input electrical power may be calculated by equation (3.1), V_T , I_T , and φ being measured in accordance with 6.1 to 6.3.

6.5 Measurement of electrical impedance (admittance) of the transducer

The electrical impedance or admittance of the transducer is measured directly by an impedance or admittance bridge. The measurement error shall not exceed $\pm 5\%$.

NOTE - Electrical impedance may be calculated by equation (3.3) and electrical admittance, by the relation

$$Y = \frac{I_T}{V_T} (\cos \varphi - j \sin \varphi) \quad (6.1)$$

where V_T , I_T and φ are measured in accordance with 6.1 to 6.3.

7 Mesure de l'amplitude de déplacement vibratoire

La méthode du microscope optique est la méthode fondamentale de mesure de l'amplitude du déplacement vibratoire. Dans cette méthode, un microscope est focalisé sur un point de la surface latérale, spécialement éclairé, de l'extrémité de l'outil ou de l'extrémité du concentrateur. Lorsque le transducteur est mis en vibration à une fréquence ultrasonore, ce point éclairé devient une ligne droite orientée le long de l'axe du concentrateur pour la vibration purement axiale. S'il se produit des vibrations transversales, la ligne est inclinée par rapport à l'axe du transducteur; dans le cas d'un déphasage entre vibrations axiale et transversale le point décrit une ellipse. L'amplitude du segment rectiligne ou de l'ellipse projetée sur l'axe du concentrateur est égale au double de l'amplitude du déplacement vibratoire. Le grossissement du microscope doit être environ de 100 à 500 fois. La mesure est possible pour une amplitude minimale de déplacement égale à 2 μm .

NOTE - L'amplitude de déplacement vibratoire peut être mesurée en utilisant un accéléromètre ou un capteur de vibrations de types différents. L'erreur de mesure ne doit pas être supérieure à 5%.

8 Caractéristiques du transducteur et méthodes de mesures

8.1 Fréquence de résonance et puissance électrique d'entrée du transducteur à la résonance

La fréquence de résonance et la puissance électrique d'entrée du transducteur à la résonance sont déterminées à partir de la courbe de réponse en fréquence pour la valeur de la puissance électrique d'entrée. La puissance électrique d'entrée correspondant à la fréquence d'excitation donnée est mesurée selon 6.4, et la fréquence est mesurée avec un fréquencemètre électronique. Lorsqu'on relève la courbe de réponse en fréquence, la tension à l'entrée du transducteur doit être maintenue au niveau imposé. Le type de charge acoustique doit être spécifié. La valeur de la puissance électrique d'entrée d'un transducteur à la résonance $P_{e\text{ res}}$ est égale au maximum de $P_e(f)$, et la fréquence d'excitation, pour laquelle cette puissance est maximale, correspond à la fréquence de résonance du transducteur f_{res} .

8.2 Largeur de bande et facteur de qualité mécanique

La largeur de bande est déterminée à partir de la courbe de réponse en fréquence pour les variations de la puissance électrique d'entrée en fonction de la fréquence (voir 8.1). On détermine la largeur de bande par l'intervalle de fréquence qui sépare les fréquences situées de part et d'autre de la fréquence de résonance (voir 3.5), pour lesquelles les valeurs P_e sont égales à $0,5 P_{e\text{ res}}$.

Le facteur de qualité mécanique est calculé par l'équation (3.2).

Les conditions de fonctionnement doivent correspondre aux valeurs assignées des paramètres, le type de charge acoustique doit être spécifié.

8.3 Amplitude de déplacement vibratoire à la résonance

L'amplitude de déplacement vibratoire est mesurée en accord avec l'article 7 pour la valeur assignée de la tension d'entrée du transducteur. Le type de charge acoustique et les conditions de fonctionnement du transducteur doivent être spécifiés. La fréquence d'excitation pour la mesure de l'amplitude ne peut différer de la fréquence de résonance de plus de $0,16 f_{\text{res}}/Q$ (Hz).

7 Measurement of vibrational displacement amplitude

The amplitude of vibrational displacement is measured by a microscope which is focused on to a point chosen on a specially illuminated side surface of the instrument or concentrator tip. When the instrument is vibrated at an ultrasonic frequency, the bright point turns to a straight line oriented along the concentrator axis for purely axial vibrations and at some angle to the axis if the vibrations have a transverse component; if there is a phase shift between the axial and transverse vibrations, the bright point describes an ellipse. The magnitude of the straight segment or ellipse projected onto the concentrator axis is twice the vibrational displacement amplitude. The microscope magnification shall be in the range of 100 to 500. An amplitude of not less than 2 μm can be measured by this method.

NOTE - The amplitude of vibrational displacements can also be measured by accelerometers or vibrometers of different types. The measurement error shall not exceed 5%.

8 Transducer characteristics and measurement methods

8.1 Resonance frequency and input electrical power of the transducer at resonance

The resonance frequency and input electrical power of the transducer at resonance are determined from the frequency response curve for input electrical power. The input power at a given driving frequency is measured in accordance with 6.4, and frequency by an electronic frequency meter. While measuring the frequency response curve, the voltage at the input of the transducer shall be kept at the rated level. The type of acoustical load shall also be specified. The input electrical power of the transducer at resonance, $P_{e \text{ res}}$, is equal to the maximum of $P_e(f)$, and the driving frequency at which this maximum occurs is equal to the resonance frequency of the transducer, f_{res} .

8.2 Bandwidth and quality factor

The bandwidth is determined from the frequency response curve for the input electrical power (see 8.1) as the difference between the frequencies on both sides of f_{res} at which the values of P_e are equal to $0,5 P_{e \text{ res}}$ (see 3.5).

The quality factor is determined by equation (3.2).

The operating conditions shall correspond to the rated values of the parameters; the type of acoustical load shall be specified.

8.3 Vibrational displacement amplitude at resonance

The vibrational displacement amplitude is measured in accordance with clause 7 for the rated value of the voltage at the input of the transducer. The type of acoustical load and transducer operating conditions shall be specified. The driving frequency may differ from the resonance frequency by not more than $0,16 f_{\text{res}} / Q$ (Hz).

8.4 Sensibilité «déplacement – tension» du transducteur

La sensibilité «déplacement – tension» est calculée par l'équation (3.7). L'amplitude de déplacement vibratoire et la valeur efficace de la tension à l'entrée du transducteur sont déterminées à la fréquence de résonance.

8.5 Puissance acoustique de sortie du transducteur

La puissance acoustique de sortie rayonnée par un transducteur dans un milieu est déterminée à partir de la courbe de réponse en fréquence de la puissance électrique d'entrée dans les conditions de fonctionnement du transducteur respectivement avec charge nominale et sans charge (voir figure 1). Lorsqu'on relève les données de la courbe de réponse en fréquence de la puissance électrique, la tension d'entrée doit être égale à la valeur assignée (voir 8.1). En l'absence d'une charge acoustique, la tension d'entrée doit être réduite de manière telle que l'amplitude de déplacement vibratoire soit égale à celle spécifiée aux conditions normales avec charge.

La puissance acoustique de sortie du transducteur est calculée par l'équation

$$P_a = P_{e\ res} - P'_{e\ res} - P_{el} + P'_{el} \quad (8.1)$$

où $P_{e\ res}$ est la puissance électrique d'entrée du transducteur chargé à la fréquence de résonance f_{res} (segment $\overline{AB}$ sur la figure 1); P_{el} est la puissance de pertes électriques d'un transducteur chargé à la fréquence de résonance f_{res} (segment $\overline{BC}$ sur la figure 1). $P'_{e\ res}$ est la puissance électrique d'entrée d'un transducteur sans charge à la fréquence de résonance f'_{res} (segment $\overline{A_1B_1}$ la figure 1); P'_{el} est la puissance de pertes électriques d'un transducteur sans charge à la fréquence de résonance f'_{res} (segment $\overline{B_1C_1}$ sur la figure 1).

Les valeurs de la puissance électrique d'entrée pour le transducteur avec charge et sans charge aux fréquences de résonance respectives sont déterminées à partir de 8.1. Les valeurs P_{el} et P'_{el} , correspondant aux fréquences de résonance f_{res} et f'_{res} , sont définies par les équations

$$P_{el} = af_{res'} \quad (8.2)$$

$$P'_{el} = a'f'_{res} \quad (8.3)$$

Le coefficient a est défini comme la valeur du rapport $P_e(f_i)/f_i$ à cinq fréquences f_i inférieures à f_{res} ($1 - \frac{2}{Q}$) et supérieures à f_{res} ($1 + \frac{2}{Q}$), où Q est le facteur de qualité mécanique du transducteur avec charge. Le coefficient a' est défini comme la valeur moyenne du rapport $P'_e(f_i)/f_i$ à cinq fréquences f_i inférieures à f'_{res} ($1 - \frac{2}{Q'}$) et supérieures à f'_{res} ($1 + \frac{2}{Q'}$), où Q' représente le facteur de qualité mécanique du transducteur sans charge.

8.6 Rendement électroacoustique du transducteur

Le rendement électroacoustique d'un transducteur de catégorie P est calculé à partir de l'équation (3.9).

La valeur de P_a est déterminée à la fréquence de résonance selon 8.5; la valeur de P_e est déterminée à la fréquence de résonance selon 8.1. Le type de charge acoustique et les conditions du fonctionnement doivent être spécifiés (voir 5.3).

8.4 "Displacement-voltage" sensitivity of the transducer

"Displacement-voltage" sensitivity of the transducer is calculated by equation (3.7). The vibrational displacement amplitude and effective voltage at the input of the transducer are determined at the resonance frequency.

8.5 Output acoustical power of the transducer

The output acoustical power radiated by the transducer into a medium is determined from the frequency response curves for the input electrical power measured both with the rated transducer load and without load (see figure 1). While measuring the frequency response curve of the loaded transducer, the input voltage shall be kept at its rated level (see 8.1). In the absence of an acoustical load, the input voltage shall be reduced so that the vibrational displacement amplitude is equal to that specified for the normally loaded condition.

The output acoustical power of the transducer is calculated by the equation

$$P_a = P_{e \text{ res}} - P'_{e \text{ res}} - P_{el} + P'_{el} \quad (8.1)$$

where $P_{e \text{ res}}$ is the input electrical power of the loaded transducer at the resonance frequency f_{res} (segment $\overline{AB}$ in figure 1); P_{el} is the electrical loss power of the transducer at the resonance frequency f_{res} (segment $\overline{BC}$ in figure 1). $P'_{e \text{ res}}$ is the input electrical power of the unloaded transducer at the resonance frequency f'_{res} (segment $\overline{A_1B_1}$ in figure 1); P'_{el} is the electrical loss power of the unloaded transducer at the resonance frequency f'_{res} (segment $\overline{B_1C_1}$ in figure 1).

The values of the input electrical power of the loaded and unloaded transducer at the respective resonance frequencies are determined in accordance with 8.1. The values of P_{el} and P'_{el} , corresponding to resonance frequencies f_{res} and f'_{res} , are calculated by the equations

$$P_{el} = a f_{\text{res}} \quad (8.2)$$

$$P'_{el} = a' f'_{\text{res}} \quad (8.3)$$

The coefficient a is determined as the mean value of the ratio $P_e(f_i)/f_i$ at five frequencies f_i lying below $f_{\text{res}} (1 - \frac{2}{Q})$ and above $f_{\text{res}} (1 + \frac{2}{Q})$, where Q is the quality factor of the loaded transducer. The coefficient a' is determined as the mean value of the ratio $P'_e(f_i)/f_i$ at five frequencies f_i lying below $f'_{\text{res}} (1 - \frac{2}{Q'})$ and above $f'_{\text{res}} (1 + \frac{2}{Q'})$, where Q' is the quality factor of the unloaded transducer.

8.6 Electroacoustical efficiency of the transducer

Electroacoustical efficiency of the P-category transducer is calculated by equation (3.9).

The output acoustical power P_a is determined at the resonance frequency in accordance with 8.5; the input electrical power P_e is determined at the resonance frequency in accordance with 8.1. The type of acoustical load and operating conditions shall be specified (see 5.3).

8.7 Sensibilité «carré du déplacement – puissance» du transducteur

La sensibilité «carré du déplacement – puissance» d'un transducteur chargé de catégorie A est calculée par l'équation (3.8).

La valeur de $P_{e\ res}$ est déterminée à la fréquence de résonance à partir de 8.1; la valeur de l'amplitude de déplacement vibratoire à la résonance est définie selon 8.3. Le type de charge acoustique et les conditions de fonctionnement doivent être spécifiés.

8.8 Impédance électrique à la résonance

La méthode en 6.5 est utilisée pour mesurer l'impédance électrique.

La tension électrique à l'entrée du transducteur doit être maintenue au niveau de la valeur assignée. Pendant la mesure de l'impédance électrique, la fréquence d'excitation ne devra pas s'écarter de la fréquence de résonance de plus de $0,01 f_{res}/Q$.

8.9 Admittance électrique du transducteur bloqué

Pour obtenir les valeurs de la capacité du transducteur bloqué et la tangente des pertes électriques (voir 3.7.1), on mesure la courbe de réponse en fréquence de l'impédance électrique (admittance) d'un transducteur.

Les valeurs des composantes de l'impédance électrique (admittance) sont mesurées (suivant la méthode décrite en 6.5) en dehors de la zone de résonance à cinq fréquences f_i inférieures à $f_{res} (1 - \frac{2}{Q})$ et supérieures à $f_{res} (1 + \frac{2}{Q})$ pour la valeur moyenne de la tension d'excitation. La valeur de la capacité du transducteur bloqué est déterminée comme la valeur efficace de

$$- \frac{1}{2\pi f_i} + \frac{X_i}{R_i^2 + X_i^2}$$

(ou la valeur moyenne de $B_i/2\pi f_i$), R_i et X_i étant les valeurs des composantes réelle et imaginaire de l'impédance électrique du transducteur (B_i étant la valeur de la composante imaginaire d'admittance) relatives à une fréquence donnée f_i . La tangente de pertes électriques est déterminée comme le rapport G_i/B_i (G_i étant la valeur de la composante réelle d'admittance aux mêmes fréquences).

8.7 "Squared displacement-power" sensitivity of the transducer

"Squared displacement-power" sensitivity of the loaded A-category transducer is calculated by equation (3.8).

The input electrical power $P_{e\text{ res}}$ is determined at the resonance frequency in accordance with 8.1; the vibrational displacement amplitude at resonance is determined in accordance with 8.3. The type of acoustical load and operating conditions shall be specified.

8.8 Electrical impedance at resonance

Electrical impedance is measured by the method described in 6.5.

The voltage at the input of the transducer shall be kept at the rated level. While measuring the electrical impedance, the driving frequency may differ from the resonance frequency by not more than $0,01 f_{\text{res}}/Q$.

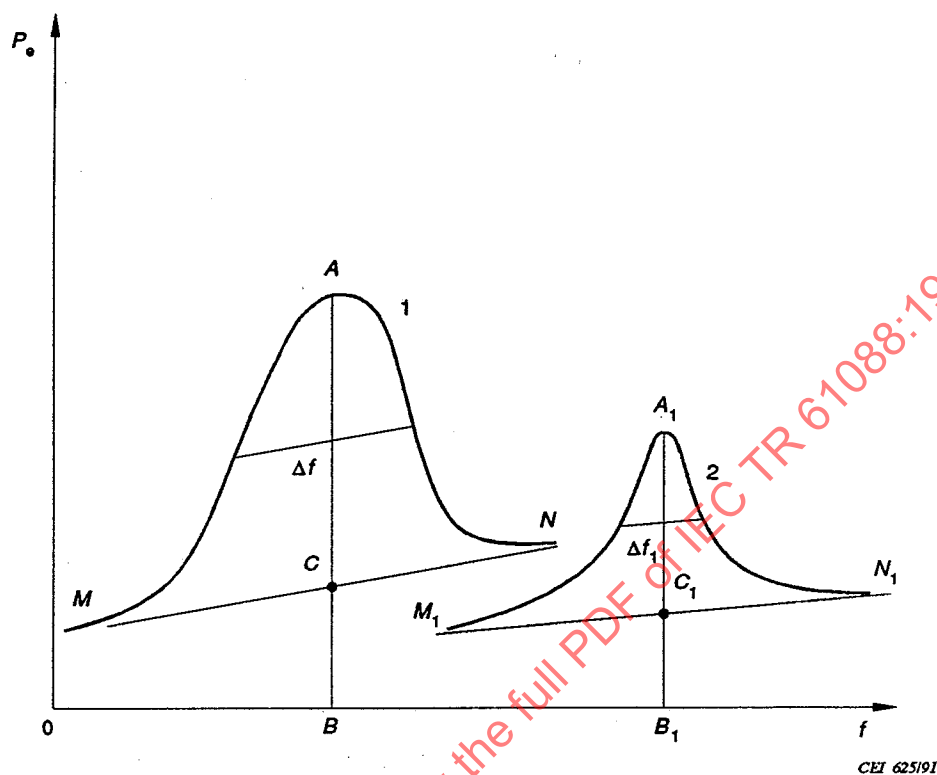
8.9 Electrical admittance of the clamped transducer

The capacitance of the clamped transducer and the dielectric loss tangent (see 3.7.1) are determined from the frequency response curve for the electrical impedance (admittance) of the transducer.

The components of the electrical impedance (admittance) are measured (according to 6.5) in the non-resonance region at five frequencies f_i below $f_{\text{res}} (1 - \frac{2}{Q})$ and above $f_{\text{res}} (1 + \frac{2}{Q})$ for the rated value of the driving voltage. The capacitance of the clamped transducer shall be determined as the mean value of

$$- \frac{1}{2\pi f_i} + \frac{X_i}{R_i^2 + X_i^2}$$

(or the mean value of $B_i/2\pi f_i$), where R_i and X_i are the real and imaginary components of the electrical impedance (B_i is the imaginary component of the admittance) at one of the given frequencies f_i . The dielectric loss tangent is determined as the ratio G_i/B_i (G_i is the real component of the admittance at the same frequencies).



MN et M_1N_1 sont les caractéristiques en fréquence de la puissance de pertes électriques dans les conditions respectives avec charge (1) et sans charge (2).

Figure 1 – Caractéristiques en fréquence de la puissance électrique d'entrée du transducteur