

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

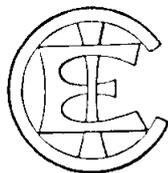
Publication 327

Première édition — First edition

1971

**Méthode de précision pour l'étalonnage en pression des microphones
étalons à condensateur d'un pouce par la technique de la réciprocité**

**Precision method for pressure calibration of one-inch standard
condenser microphones by the reciprocity technique**



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60327:1971

Withdrawn

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 327

Première édition — First edition

1971

**Méthode de précision pour l'étalonnage en pression des microphones
étalons à condensateur d'un pouce par la technique de la réciprocité**

**Precision method for pressure calibration of one-inch standard
condenser microphones by the reciprocity technique**



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

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Explication des termes	6
3.1 Tension à circuit ouvert	6
3.2 Efficacité en pression d'un microphone	6
3.2.1 Niveau d'efficacité en pression d'un microphone	8
3.2.2 Argument de l'efficacité en pression d'un microphone	8
3.3 Impédance électrique d'un microphone	8
3.4 Impédance acoustique d'un microphone	8
3.5 Volume équivalent d'un microphone	8
3.6 Coupleur	8
3.7 Impédance électrique de transfert	10
3.8 Impédance acoustique de transfert	10
3.9 Microphone réciproque	10
4. Principes de l'étalonnage en pression par la méthode de la réciprocité	10
4.1 Généralités	10
4.1.1 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones	12
4.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire	12
4.2 Conditions relatives au coupleur	12
4.3 Méthode de la réciprocité	12
4.4 Evaluation de Z_{ab}	12
4.5 Correction de conduction thermique	14
4.6 Correction de capillarité	16
4.7 Expressions finales du niveau d'efficacité en pression	16
4.7.1 Méthode utilisant trois microphones	16
4.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire	18
5. Précision absolue des étalonnages	18
5.1 Généralités	18
5.2 Facteurs intervenant dans la précision d'un étalonnage	18
5.2.1 Tension de polarisation	18
5.2.2 Pression statique	18
5.2.3 Fréquence	18
5.2.4 Impédance électrique de transfert	18
5.2.5 Correction de conduction thermique	18
5.2.6 Correction de capillarité	18
5.2.7 Section du coupleur	18
5.2.8 Longueur effective du coupleur	20
5.2.9 Volume effectif du coupleur	20
5.2.10 Température du coupleur et des microphones	20
5.2.11 Distribution de pression sur la membrane	20
5.2.12 Pertes acoustiques	20
5.3 Précision globale	20
6. Méthodes et équipement d'étalonnage	22
6.1 Coupleur	22
6.2 Configuration de référence du blindage	22
6.3 Technique de la tension insérée	22
6.4 Influence de la pression statique	22
6.5 Tension de polarisation	24
6.6 Longueur effective du coupleur	24
6.7 Impédance acoustique du microphone	24
6.8 Tension maximale du générateur	24
6.9 Bruit	24
ANNEXE A: Exemples de coupleurs cylindriques pour l'étalonnage des microphones	28

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. Explanation of terms	7
3.1 Open-circuit voltage	7
3.2 Pressure sensitivity of a microphone	7
3.2.1 Pressure sensitivity level of a microphone	9
3.2.2 Pressure sensitivity phase angle of a microphone	9
3.3 Electrical impedance of a microphone	9
3.4 Acoustic impedance of a microphone	9
3.5 Equivalent volume of a microphone	9
3.6 Coupler	9
3.7 Electrical transfer impedance	11
3.8 Acoustic transfer impedance	11
3.9 Reciprocal microphone	11
4. Principles of pressure calibration by reciprocity	11
4.1 General	11
4.1.1 General principles using three microphones	13
4.1.2 General principles using two microphones and an auxiliary sound source	13
4.2 Coupler requirements	13
4.3 Reciprocity procedure	13
4.4 Evaluation of Z_{ab}	13
4.5 Heat-conduction correction	15
4.6 Capillary correction	17
4.7 Final expressions for the pressure sensitivity level	17
4.7.1 Method using three microphones	17
4.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source	19
5. Absolute accuracy of calibration	19
5.1 General	19
5.2 Factors influencing the accuracy of calibration	19
5.2.1 Polarizing voltage	19
5.2.2 Static pressure	19
5.2.3 Frequency	19
5.2.4 Electrical transfer impedance	19
5.2.5 Heat conduction correction	19
5.2.6 Capillary correction	19
5.2.7 Cross-sectional area of the coupler	19
5.2.8 Effective length of the coupler	21
5.2.9 Effective volume of the coupler	21
5.2.10 Temperature of the coupler and microphones	21
5.2.11 Pressure distribution over the diaphragm	21
5.2.12 Acoustic losses	21
5.3 Over-all accuracy	21
6. Calibration methods and equipment	23
6.1 Coupler	23
6.2 Reference configuration of ground-shield	23
6.3 Insert voltage technique	23
6.4 Dependence on static pressure	23
6.5 Polarizing voltage	25
6.6 Effective length of the coupler	25
6.7 Acoustic impedance of the microphone	25
6.8 Maximum generator voltage	25
6.9 Noise	25
APPENDIX A: Examples of cylindrical couplers for calibration of microphones	29

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MÉTHODE DE PRÉCISION POUR L'ÉTALONNAGE EN PRESSION
DES MICROPHONES ÉTALONS A CONDENSATEUR D'UN POUCE
PAR LA TECHNIQUE DE LA RÉCIPROCITÉ**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C E I 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 cette unification internationale, la C E I exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la C E I dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 29 de la C E I: Electroacoustique.

A la suite de la réunion tenue à Baden-Baden en 1962, une série de comparaisons à laquelle participèrent divers laboratoires nationaux d'étalonnage fut organisée. Un projet fut ensuite discuté lors de la réunion tenue à Prague en 1966. Un projet définitif fut préparé par le Secrétariat du Sous-Comité 29C: Dispositifs de mesure, et fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en septembre 1968.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Allemagne	Japon
Australie	Norvège
Belgique	Pologne
Canada	Roumanie
Danemark	Royaume-Uni
Etats-Unis d'Amérique	Suisse
Hongrie	Tchécoslovaquie
Israël	Turquie
Italie	Union des Républiques Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**PRECISION METHOD FOR PRESSURE CALIBRATION
OF ONE-INCH STANDARD CONDENSER MICROPHONES
BY THE RECIPROCITY TECHNIQUE**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I E C 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 this international unification, the I E C expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I E C recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Recommendation has been prepared by I E C Technical Committee No. 29, Electro-acoustics.

As a result of the meeting held in Baden-Baden in 1962, a series of comparisons in which national standardizing laboratories participated was organized. Following this, a draft was discussed at the meeting held in Prague in 1966. A final draft was prepared by the Secretariat of Sub-Committee 29C, Measuring Devices, and was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in September 1968.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Japan
Belgium	Norway
Canada	Poland
Czechoslovakia	Romania
Denmark	Switzerland
Germany	Turkey
Hungary	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Italy	United States of America

MÉTHODE DE PRÉCISION POUR L'ÉTALONNAGE EN PRESSION DES MICROPHONES ÉTALONS A CONDENSATEUR D'UN POUCE PAR LA TECHNIQUE DE LA RÉCIPROCITÉ

1. Domaine d'application

Cette recommandation décrit l'étalonnage des microphones à condensateur d'un pouce utilisés comme étalons de laboratoires. On se limite à l'étalonnage en pression par la méthode de la réciprocité, à l'aide d'un coupleur.

2. Objet

L'objet de cette recommandation est de spécifier des méthodes pour mesurer, avec la plus grande précision possible, certaines caractéristiques des microphones étalons à condensateur, afin que les discussions entre les laboratoires d'essais puissent être fondées sur des résultats clairement exprimés et reproductibles. Bien que l'étalonnage en pression des microphones à condensateur soit un problème général, cette recommandation se limite aux microphones habituellement appelés microphones à condensateur d'un pouce.

Notes 1. – Ces microphones ont généralement un diamètre extérieur de 0,936 in = 23,77 mm.

2. – Des recommandations pour des microphones à condensateur de plus faibles dimensions pourront être l'objet d'études futures.

3. Explication des termes

3.1 Tension à circuit ouvert

La tension à circuit ouvert d'un microphone à une fréquence donnée est la tension apparaissant à ses bornes électriques quand le microphone n'est pas chargé.

Cependant, en raison de la nature capacitive de la capsule, la tension aux bornes électriques dépendra de la charge électrique constituée par le montage mécanique du microphone. Ainsi, pour les besoins de cette recommandation, la tension à circuit ouvert est définie comme la tension apparaissant aux bornes électriques de la capsule, mesurée par la technique de la tension insérée, quand le microphone est relié à un blindage de configuration spécifiée mais n'est pas chargé par ailleurs (voir paragraphes 6.2 et 6.3).

Unité : le volt.V.

3.2 Efficacité en pression d'un microphone

L'efficacité en pression M_p d'un microphone à une fréquence donnée et pour une onde sinusoïdale, est le rapport de la tension à circuit ouvert du microphone à la pression acoustique qui existe sur la face exposée de sa membrane (c'est-à-dire aux bornes acoustiques du microphone), la pression acoustique étant uniformément appliquée sur la surface de la membrane. Ce rapport est une quantité complexe, mais lorsqu'on n'attache pas d'importance à la phase, l'efficacité en pression peut être donnée par le module seulement.

Unité : le volt par newton par mètre carré. $V/(Nm^{-2})$.

Note. – On pourrait noter que le terme « réponse en pression » est parfois utilisé à la place de « efficacité en pression ».

PRECISION METHOD FOR PRESSURE CALIBRATION OF ONE-INCH STANDARD CONDENSER MICROPHONES BY THE RECIPROCITY TECHNIQUE

1. Scope

This Recommendation describes the calibration of one-inch condenser microphones used as laboratory standards. It is restricted to reciprocity pressure calibration by the coupler method.

2. Object

The object of this Recommendation is to specify methods of measuring certain characteristics of standard condenser microphones with the highest obtainable accuracy so that exchanges between testing authorities may be based on clearly expressed and reproducible results. Although the pressure calibration of condenser microphones is a problem of general nature, this Recommendation is restricted to microphones commonly known as one-inch condenser microphones.

Notes 1. – These microphones commonly have an outer diameter of 0.936 in = 23.77 mm.

2. – Recommendations for condenser microphones of smaller dimensions are left for future consideration.

3. Explanation of terms

3.1 *Open-circuit voltage*

The open-circuit voltage of a microphone at a given frequency is the voltage appearing at its electrical terminals when the microphone is electrically unloaded.

However, owing to the capacitative nature of the cartridge, the voltage at the electrical terminals will depend on the electrical load caused by the mechanical attachment to the microphone. Thus, for the purpose of this Recommendation, the open-circuit voltage is defined as the voltage appearing at the electrical terminals of the cartridge as measured by the insert-voltage technique, when the microphone is connected to a specified groundshield configuration but is otherwise unloaded (see Sub-clauses 6.2 and 6.3).

Unit: volt.V.

3.2 *Pressure sensitivity of a microphone*

The pressure sensitivity M_p of a microphone, at a given frequency and for a sinusoidal waveform, is the ratio of the open-circuit voltage of the microphone to the sound pressure that exists at the exposed surface of the diaphragm (i.e. at the acoustical terminals of the microphone), the sound pressure being uniformly applied over the surface of the diaphragm. This ratio is a complex quantity, but when the phase information is of no interest the pressure sensitivity may denote its modulus only.

Unit: volt per newton per square metre. V/(Nm⁻²).

Note. – It should be noted that the term “pressure response” is sometimes used instead of “pressure sensitivity”.

3.2.1 Niveau d'efficacité en pression d'un microphone

Le niveau d'efficacité en pression est égal à 20 fois le logarithme de base 10 du module de l'efficacité en pression M_p exprimé en $V/(Nm^{-2})$.

$$(1 \text{ Nm}^{-2} = 10 \text{ dyn cm}^{-2} = 10 \text{ } \mu\text{bar}).$$

Unité : le décibel. dB.

3.2.2 Argument de l'efficacité en pression d'un microphone

L'argument de l'efficacité en pression d'un microphone à une fréquence donnée est la différence de phase entre la tension à circuit ouvert et la pression acoustique uniforme agissant sur la membrane.

Unité : degré ou radian.

3.3 Impédance électrique d'un microphone

L'impédance électrique d'un microphone à une fréquence donnée est le rapport complexe de la tension appliquée à ses bornes électriques au courant qui en résulte.

Unité : ohm. Ω .

Note. – Cette impédance est une fonction de la charge acoustique sur la membrane.

3.4 Impédance acoustique d'un microphone

L'impédance acoustique d'un microphone à une fréquence donnée est le rapport complexe de la pression acoustique uniformément répartie sur toute la surface de la membrane au flux de vitesse à travers cette surface.

Unité : newton seconde par mètre à la puissance cinq. Nsm^{-5} .

Note. – Cette impédance est une fonction de la charge électrique du microphone.

3.5 Volume équivalent d'un microphone

Il est pratique pour l'étalonnage par la méthode de la réciprocité à l'aide d'un coupleur d'exprimer l'impédance acoustique d'un microphone au moyen d'un volume équivalent complexe V_e d'un gaz enfermé dans une cavité rigide selon l'équation suivante :

$$V_e = \frac{\kappa p_s}{j\omega Z_a} \quad (1)$$

où :

κ est le rapport des chaleurs spécifiques

p_s est la pression statique

ω est la pulsation

Z_a est l'impédance acoustique du microphone

Unité : mètre cube. m^3 .

Notes 1. – Le volume équivalent sera généralement une quantité complexe et une fonction de la fréquence.

2. – Pour de l'air sec à 20 °C et $p_s = 10^5 \text{ Nm}^{-2}$, $\kappa = 1,402$; pour de l'hydrogène sec à 20 °C et $p_s = 10^5 \text{ Nm}^{-2}$, $\kappa = 1,406$.

3.6 Coupleur

Pour les besoins de cette recommandation, un coupleur est un dispositif qui, monté avec deux microphones, constitue une cavité de forme et de dimensions prédéterminées et qui agit comme élément de couplage acoustique entre les deux microphones.

3.2.1 Pressure sensitivity level of a microphone

The pressure sensitivity level is expressed as 20 times the logarithm to the base of 10 of the modulus of the pressure sensitivity M_p expressed in units of $V/(Nm^{-2})$.

$$(1 \text{ Nm}^{-2} = 10 \text{ dyn cm}^{-2} = 10 \text{ } \mu\text{bar}).$$

Unit : decibel. dB.

3.2.2 Pressure sensitivity phase angle of a microphone

The pressure sensitivity phase angle of a microphone at a given frequency is the phase angle between the open-circuit voltage and the uniform sound pressure acting on the diaphragm.

Unit : degree or radian.

3.3 Electrical impedance of a microphone

The electrical impedance of a microphone at a given frequency is the complex ratio of the voltage applied across its electrical terminals to the resulting current.

Unit : ohm. Ω .

Note. – This impedance is a function of the acoustic load on the diaphragm.

3.4 Acoustic impedance of a microphone

The acoustic impedance of a microphone at a given frequency is the complex ratio of the sound pressure to the volume velocity of the diaphragm, the sound pressure being uniformly applied to the diaphragm.

Unit : newton second per metre to the fifth. Nsm^{-5} .

Note. – This impedance is a function of the electrical load on the microphone.

3.5 Equivalent volume of a microphone

In dealing with reciprocity calibration in a closed coupler it is convenient to express the acoustic impedance of a microphone in terms of an equivalent complex volume V_e of a gas enclosed in a rigid cavity according to the following equation:

$$V_e = \frac{\kappa p_s}{j\omega Z_a} \quad (1)$$

where

κ is the ratio of the specific heats

p_s is the static pressure

ω is the angular frequency

Z_a is the acoustic impedance of the microphone

Unit : cubic metre. m^3 .

Notes 1. – The equivalent volume will generally be a complex quantity and a function of frequency.

2. – For dry air at 20 °C and $p_s = 10^5 \text{ Nm}^{-2}$, $\kappa = 1.402$; for dry hydrogen at 20 °C and $p_s = 10^5 \text{ Nm}^{-2}$, $\kappa = 1.406$.

3.6 Coupler

For the purpose of this Recommendation, a coupler is a device which, when fitted with two microphones, forms a cavity of predetermined shape and dimensions acting as an acoustic coupling element between the two microphones.

3.7 Impédance électrique de transfert

Pour les besoins de cette recommandation, il est convenu de définir l'impédance électrique de transfert pour le système de deux microphones couplés acoustiquement comme le rapport de la tension à circuit ouvert du microphone utilisé comme récepteur au courant d'entrée du microphone utilisé comme émetteur sonore.

Note. – Cette impédance est fonction de la configuration du blindage.

3.8 Impédance acoustique de transfert

Pour les besoins de cette recommandation, l'impédance acoustique de transfert d'un système de deux microphones couplés acoustiquement est le rapport de la pression acoustique agissant sur la membrane du microphone utilisé comme récepteur au flux de vitesse en court-circuit produit par le microphone utilisé comme émetteur sonore.

3.9 Microphone réciproque

Considérons un microphone passif linéaire.

A une fréquence particulière donnée, appelons :

p , la pression acoustique sur la membrane comme il est indiqué au paragraphe 3.2

U , la tension aux bornes électriques du microphone

q , le flux de vitesse à travers la surface de la membrane

i , le courant aux bornes électriques

Les équations liant les caractéristiques du microphone peuvent alors être écrites comme suit :

$$\begin{cases} z_{11} i + z_{12} q = U \\ z_{21} i + z_{22} q = p \end{cases} \quad (2)$$

où :

z_{11} est l'impédance électrique du microphone quand la membrane est bloquée

z_{22} est l'impédance acoustique du microphone quand il n'est pas chargé électriquement

On dit que le microphone est réciproque si les coefficients de transduction z_{12} et z_{21} sont tels que $z_{12} = \pm z_{21}$.

Note. – Les microphones à condensateur utilisés comme étalons de laboratoire peuvent être considérés comme réciproques et les équations (2) s'écrivent alors :

$$\begin{cases} Z_e i + M_p Z_a q = U \\ M_p Z_a i + Z_a q = p \end{cases} \quad (2a)$$

où :

$$Z_e = z_{11}, Z_a = z_{22} \text{ et } z_{12} = \pm z_{21} = M_p Z_a$$

4. Principes de l'étalonnage en pression par la méthode de la réciprocité

4.1 Généralités

Un étalonnage de microphone par la méthode de la réciprocité peut être effectué soit au moyen de trois microphones, deux d'entre eux devant être réciproques, soit au moyen d'une source sonore auxiliaire et de deux microphones, dont l'un doit être réciproque.

3.7 *Electrical transfer impedance*

For the purpose of this Recommendation, the electrical transfer impedance for the system of two acoustically coupled microphones shall be understood as the ratio of the open-circuit voltage of the microphone used as receiver to the input current of the microphone used as sound transmitter.

Note. – This impedance is a function of the ground-shield configuration.

3.8 *Acoustic transfer impedance*

For the purpose of this Recommendation, the acoustic transfer impedance of a system of two acoustically coupled microphones is the ratio of the sound pressure acting on the diaphragm of the microphone used as a receiver to the short-circuit volume velocity produced by the microphone used as a sound transmitter.

3.9 *Reciprocal microphone*

Consider a linear passive microphone.

At a given single frequency, let:

p be the sound pressure at the diaphragm as explained in Sub-clause 3.2

U be the voltage at the electrical terminals of the microphone

q be the volume velocity of the diaphragm

i be the current through the electrical terminals

The equations of the microphone can then be written as:

$$\begin{cases} z_{11} i + z_{12} q = U \\ z_{21} i + z_{22} q = p \end{cases} \quad (2)$$

where:

z_{11} is the electrical impedance of the microphone when the diaphragm is blocked

z_{22} is the acoustic impedance of the microphone when the electrical terminals are unloaded

The microphone is said to be reciprocal if the transduction coefficients z_{12} and z_{21} are such that $z_{12} = \pm z_{21}$.

Note. – Condenser microphones used as laboratory standards may be considered reciprocal and equation (2) can then be rewritten as:

$$\begin{cases} Z_e i + M_p Z_a q = U \\ M_p Z_a i + Z_a q = p \end{cases} \quad (2a)$$

where:

$$Z_e = z_{11}, Z_a = z_{22} \text{ and } z_{12} = \pm z_{21} = M_p Z_a$$

4. **Principles of pressure calibration by reciprocity**

4.1 *General*

A reciprocity calibration of microphones may be carried out either by means of three microphones, two of which must be reciprocal, or by means of an auxiliary sound source and two microphones, one of which must be reciprocal.

4.1.1 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones

Considérons deux de ces microphones couplés acoustiquement à l'aide d'un coupleur. Utilisons l'un d'entre eux comme source sonore et l'autre comme récepteur. On mesure le rapport de la tension de sortie à circuit ouvert du récepteur au courant d'entrée de l'émetteur. Lorsque l'impédance acoustique de transfert du système est connue, le produit des efficacités en pression des deux microphones couplés peut être déterminé (voir paragraphe 4.3). En effectuant des combinaisons des microphones (a), (b) et (c) deux à deux, on obtient trois de ces produits indépendants mutuellement, desquels on peut déduire l'expression de l'efficacité en pression pour chacun des trois microphones.

4.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Ces deux microphones sont d'abord associés par un coupleur; le produit des efficacités en pression de ces deux microphones couplés est déterminé (voir paragraphe 4.1.1). Ensuite, les deux microphones sont soumis à la même pression acoustique fournie par la source sonore auxiliaire. Le rapport des deux tensions de sortie sera alors égal au rapport des deux efficacités en pression. Ainsi, à partir du produit et du rapport des efficacités en pression des deux microphones, on peut déduire une expression donnant l'efficacité en pression de chacun d'entre eux.

Note. – Dans le but d'obtenir le rapport des efficacités en pression, une méthode de comparaison directe est généralement employée, mais une méthode de comparaison mettant en œuvre un coupleur ayant des parois actives, par exemple en céramique piezo-électrique peut être utilisée.

4.2 Conditions relatives au coupleur

La définition de l'efficacité en pression d'un microphone nécessite que la pression soit uniforme sur la surface de la membrane pendant l'étalonnage. Pour être en accord autant qu'il est possible avec cette définition, les dimensions physiques du coupleur doivent être choisies de façon à satisfaire les conditions du paragraphe 5.2.11.

Notes 1. – Pour faciliter la détermination des propriétés acoustiques du coupleur, il est recommandé que ce coupleur soit réalisé en un matériau rigide.

2. – Il peut être nécessaire d'introduire un gaz autre que l'air afin d'élargir la bande de fréquences (voir paragraphe 6.1).

4.3 Méthode de la réciprocité

On couple acoustiquement à l'aide du coupleur les microphones (a) et (b) d'efficacité en pression $M_p^{(a)}$ et $M_p^{(b)}$. Des équations de la réciprocité (voir paragraphe 3.9, équation (2)) on voit que $M_p = \frac{Z_{12}}{Z_{22}}$ et qu'un courant i_a à travers les bornes électriques du microphone (a) produit un flux de vitesse de court-circuit ($p = 0$ sur la membrane) de valeur $M_p^{(a)} i_a$, ainsi qu'une pression acoustique $p_b = Z_{ab} M_p^{(a)} i_a$ aux bornes acoustiques du microphone (b), Z_{ab} étant l'impédance acoustique de transfert du système. La tension à circuit ouvert du microphone (b) sera alors:

$$U_b = M_p^{(b)} p_b = M_p^{(a)} M_p^{(b)} Z_{ab} i_a$$

Ainsi le produit des efficacités en pression est donné par la relation:

$$M_p^{(a)} M_p^{(b)} = \frac{1}{Z_{ab}} \frac{U_b}{i_a} \quad (3)$$

4.4 Evaluation de Z_{ab}

L'impédance acoustique de transfert $Z_{ab} = \frac{p_b}{M_p^{(a)} i_a}$ peut être évaluée à partir du circuit équivalent de la figure 1, page 26, où $Z_a^{(a)}$ et $Z_a^{(b)}$ sont respectivement les impédances acoustiques des microphones (a) et (b). Dans plusieurs cas, Z_{ab} peut être évalué théoriquement. Supposons que la pression

4.1.1 General principles using three microphones

Let two of the microphones be coupled by a coupler. Using one of them as a sound source and the other as a sound receiver, the ratio of the output open-circuit voltage of the receiver to the input current of the transmitter is measured. When the acoustic transfer impedance of the system is known, the product of the pressure sensitivities of the two coupled microphones can be determined (see Sub-clause 4.3). Using pair-wise combinations of the microphones (a), (b) and (c) three such mutually independent products are available, from which an expression for the pressure sensitivity of each of the three microphones can be derived.

4.1.2 General principles using two microphones and an auxiliary sound source

First, let the two microphones be coupled by a coupler, and the product of the pressure sensitivities of the two coupled microphones be determined (see Sub-clause 4.1.1). Next, let the two microphones be presented to the same sound pressure, set up by the auxiliary sound source. The ratio of the two output voltages will then equal the ratio of the two pressure sensitivities. Thus, from the product and the ratio of the pressure sensitivities of the two microphones, an expression for the pressure sensitivity of each of the two microphones can be derived.

Note. – In order to obtain the ratio of pressure sensitivities, a direct comparison method is widely employed, but comparison involving an active-walled coupler, for instance piezo-electric ceramic, may be used.

4.2 Coupler requirements

The definition of the pressure sensitivity of a microphone requires the sound pressure to be uniform over the surface of the diaphragm during the calibration. To comply as closely as possible with this definition, the physical dimensions of the coupler should be chosen in such a way that the requirement of Sub-clause 5.2.11 is satisfied.

Notes 1. – To facilitate determination of the acoustical properties of the coupler, it is recommended that the coupler be made of a rigid material.

2. – It may be necessary to introduce a gas other than air in order to extend the frequency range (see Sub-clause 6.1).

4.3 Reciprocity procedure

Let the microphones (a) and (b) with the pressure sensitivities $M_p^{(a)}$ and $M_p^{(b)}$ be coupled acoustically by the coupler. From the equations of reciprocity (Sub-clause 3.9, equation (2)) it is seen that

$M_p = \frac{z_{12}}{z_{22}}$ and that a current i_a through the electrical terminals of microphone (a) will produce a short-circuit volume velocity ($p = 0$ at the diaphragm) of $M_p^{(a)} i_a$ and thus a sound pressure $p_b = Z_{ab} M_p^{(a)} i_a$ at the acoustical terminals of microphone (b), where Z_{ab} is the acoustic transfer impedance of the system. The open-circuit voltage of microphone (b) will then be:

$$U_b = M_p^{(b)} p_b = M_p^{(a)} M_p^{(b)} Z_{ab} i_a$$

Thus the product of the pressure sensitivities is given by:

$$M_p^{(a)} M_p^{(b)} = \frac{1}{Z_{ab}} \frac{U_b}{i_a} \quad (3)$$

4.4 Evaluation of Z_{ab}

The acoustic transfer impedance $Z_{ab} = \frac{p_b}{M_p^{(a)} i_a}$ can be evaluated from the equivalent circuit in Figure 1, page 27, where $Z_a^{(a)}$ and $Z_a^{(b)}$ are the acoustic impedances of microphones (a) and (b) respectively. In several cases, Z_{ab} can be evaluated theoretically. Assume the sound pressure to be the same at

acoustique soit la même en n'importe quel point à l'intérieur du coupleur. (Ceci aura lieu lorsque les dimensions physiques du coupleur seront très petites par rapport à la longueur d'onde.) Le coupleur se comporte alors comme une élasticité acoustique pure et d'après le circuit équivalent de la figure 2, page 26, Z_{ab} est donné par:

$$\frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{Z_v} + \frac{1}{Z_a^{(a)}} + \frac{1}{Z_a^{(b)}} = j \frac{\omega}{\kappa p_s} (V + V_e^{(a)} + V_e^{(b)}) \simeq j \frac{\omega}{\kappa p_s} V_{ab} \quad (4)$$

où :

V est le volume géométrique total du coupleur

$V_e^{(a)}$ est le volume équivalent du microphone (a)

$V_e^{(b)}$ est le volume équivalent du microphone (b)

V_{ab} est la partie réelle de $V + V_e^{(a)} + V_e^{(b)}$

$Z_v = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$ est l'impédance acoustique du coupleur lui-même

Aux fréquences les plus élevées, lorsque les dimensions ne sont pas faibles par rapport à la longueur d'onde, l'évaluation de Z_{ab} devient généralement difficile. Cependant si la forme du coupleur est cylindrique et si le diamètre est égal à celui des diaphragmes des microphones, pour les fréquences auxquelles la transmission par ondes planes est supposée réalisée, le système complet peut être considéré comme une ligne de transmission homogène (voir figure 3, page 26); Z_{ab} est alors donné par la formule:

$$\frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{Z} \left[\left(\frac{Z}{Z_a^{(a)}} + \frac{Z}{Z_a^{(b)}} \right) \cosh \gamma \ell_o + \left(1 + \frac{Z}{Z_a^{(a)}} \cdot \frac{Z}{Z_a^{(b)}} \right) \sinh \gamma \ell_o \right] \quad (5)$$

où :

$$Z = \frac{\rho c}{S}$$

ρ est la densité du gaz à l'intérieur du coupleur

c est la vitesse en espace libre du son dans le gaz

S est la section du coupleur

$\gamma = \alpha + j\beta$ est le coefficient de propagation

ℓ_o est la longueur du coupleur, c'est-à-dire la distance entre les deux membranes

Pour des faibles valeurs de $\beta(\ell_e^{(a)} + \ell_e^{(b)})$ et en négligeant les pertes dans le système acoustique, une expression approchée de $1/Z_{ab}$ est:

$$\frac{1}{Z_{ab}} \simeq j\omega \frac{S \ell_{ab}}{\kappa p_s} \cdot \frac{\sin(\beta \ell_{ab})}{\beta \ell_{ab}} = j \frac{Sc}{\kappa p_s} \sin(\beta \ell_{ab}) \quad (6)$$

où :

$$\ell_e^{(a)} = V_e^{(a)} / S$$

$$\ell_e^{(b)} = V_e^{(b)} / S$$

$$\ell_{ab} = \ell_o + \ell_e^{(a)} + \ell_e^{(b)}$$

4.5 Correction de conduction thermique

Pour évaluer Z_{ab} à l'article précédent, on a supposé que des conditions adiabatiques étaient réalisées dans la cavité. Cependant aux très basses fréquences, les conditions isothermes dominent et le volume de la cavité subit un accroissement apparent dans le rapport κ . Pour une cavité cylindrique de rayon a , de longueur ℓ , en supposant que les parois soient des conducteurs thermiques parfaits qui restent à température constante, le facteur de correction à utiliser dans les équations (10) et (11) est donné par:

any point inside the coupler. (This will take place when the physical dimensions of the coupler are very small compared to the wavelength.) The coupler then behaves as a pure compliance, and from the equivalent circuit in Figure 2, page 27, Z_{ab} is given by:

$$\frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{Z_v} + \frac{1}{Z_a^{(a)}} + \frac{1}{Z_a^{(b)}} = j \frac{\omega}{\kappa p_s} (V + V_e^{(a)} + V_e^{(b)}) \simeq j \frac{\omega}{\kappa p_s} V_{ab} \quad (4)$$

where:

V is the total geometrical volume of the coupler

$V_e^{(a)}$ is the equivalent volume of the microphone (a)

$V_e^{(b)}$ is the equivalent volume of the microphone (b)

V_{ab} is the real part of $V + V_e^{(a)} + V_e^{(b)}$

$Z_v = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$ is the acoustic impedance of the coupler itself

At higher frequencies, when the dimensions are not small compared to the wavelength, the evaluation of Z_{ab} generally becomes complicated. However, if the shape of the coupler is cylindrical and the diameter the same as that of the microphone diaphragms, then, at frequencies where plane-wave transmission can be assumed, the whole system can be considered as a homogeneous transmission line (see Figure 3, page 27); Z_{ab} is then given by:

$$\frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{Z} \left[\left(\frac{Z}{Z_a^{(a)}} + \frac{Z}{Z_a^{(b)}} \right) \cosh \gamma l_o + \left(1 + \frac{Z}{Z_a^{(a)}} \frac{Z}{Z_a^{(b)}} \right) \sinh \gamma l_o \right] \quad (5)$$

where:

$$Z = \frac{\rho c}{S}$$

ρ is the density of the gas enclosed

c is the free-space velocity of sound in the gas

S is the cross-sectional area of the coupler

$\gamma = \alpha + j\beta$ is the propagation coefficient

l_o is the length of the coupler, i.e. the distance between the two diaphragms

For small values of $\beta(l_e^{(a)} + l_e^{(b)})$ and neglecting losses in the acoustical system, the expression can be approximated by:

$$\frac{1}{Z_{ab}} \simeq j\omega \frac{S l_{ab}}{\kappa p_s} \cdot \frac{\sin(\beta l_{ab})}{\beta l_{ab}} = j \frac{S c}{\kappa p_s} \sin(\beta l_{ab}) \quad (6)$$

where:

$$l_e^{(a)} = V_e^{(a)} / S$$

$$l_e^{(b)} = V_e^{(b)} / S$$

$$l_{ab} = l_o + l_e^{(a)} + l_e^{(b)}$$

4.5 Heat-conduction correction

The evaluation of Z_{ab} in the preceding clause assumes adiabatic conditions in the cavity. At very low frequencies, however, isothermal conditions prevail and the volume of the cavity undergoes an apparent increase by the ratio κ . For a cylindrical cavity of radius a and length l , and under the assumption that the walls are perfect thermal conductors and remain at a constant temperature, the correction factor to be used in equation (10) and equation (11) is given by:

$$\Delta_H = \left| \kappa - (\kappa - 1) \frac{32}{\pi^2} \sum_{m=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \sum_{n=1, 2, 3, \dots}^{\infty} \frac{j\delta}{m^2 \xi_n^2 \left\{ \left(\frac{m\pi}{\ell} \right)^2 + \left(\frac{\xi_n}{a} \right)^2 + j\delta \right\}} \right| \quad (7)$$

où:

$$\delta = \frac{\omega \rho C_p}{K}$$

C_p est la chaleur spécifique à pression constante

K est la conductivité thermique du gaz

ξ_n sont les racines positives de $J_c(\xi) = 0$

Note. – Des valeurs appropriées de $10 \log_{10} \Delta_H$ pour différents types de coupleurs sont données dans l'annexe A.

4.6 Correction de capillarité

La cavité comporte normalement des tubes capillaires afin d'égaliser la pression statique à l'intérieur et à l'extérieur du coupleur. Deux de ces tubes capillaires permettent aussi l'introduction d'un gaz de composition différente de celle de l'air.

Aux basses fréquences, lorsque l'impédance de la cavité est élevée, l'effet de shunt des deux tubes capillaires doit être pris en considération. L'impédance acoustique de deux tubes capillaires de longueur et de diamètre égaux, mis en parallèle, est donnée par:

$$Z_C = \frac{4\pi\eta\ell}{(\pi r^2)^2} + j \frac{2\omega\rho\ell}{3\pi r^2} \quad (8)$$

où:

ℓ est la longueur de chaque tube capillaire

r est le rayon de chaque tube capillaire

η est le coefficient de viscosité du gaz

Le facteur de correction à utiliser dans les équations (10) et (11) est alors donné par:

$$\Delta_C = \left| 1 + \frac{Z_{ab}}{Z_C} \right| \quad (9)$$

4.7 Expressions finales du niveau d'efficacité en pression

4.7.1 Méthode utilisant trois microphones

Soit R_{ab} le module de l'impédance électrique de transfert $\frac{U_b}{i_a}$ (paragraphe 4.3). Des expressions similaires peuvent être définies pour les autres paires de microphones. En tenant compte des corrections décrites aux paragraphes 4.5 et 4.6, l'expression finale du niveau d'efficacité en pression du microphone (a), exprimé en décibels par rapport à $1 \text{ V}/(\text{Nm}^{-2})$, lorsque toutes les quantités sont exprimées en unités S.I., est:

$$20 \log_{10} \left| M^{(a)} \right| = 10 \log_{10} \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{bc}} + 10 \log_{10} \left| \frac{Z_{bc}}{Z_{ab} Z_{ca}} \right| + 10 \log_{10} \Delta_H + 10 \log_{10} \Delta_C \quad (10)$$

Des expressions similaires peuvent être obtenues pour les microphones (b) et (c).

$$\Delta_H = \left| \kappa - (\kappa - 1) \frac{32}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{j\delta}{m^2 \xi_n^2 \left\{ \left(\frac{m\pi}{\ell} \right)^2 + \left(\frac{\xi_n}{a} \right)^2 + j\delta \right\}} \right| \quad (7)$$

where:

$$\delta = \frac{\omega \rho C_p}{K}$$

C_p is the specific heat at constant pressure

K is the thermal conductivity of the gas

ξ_n are the positive roots of $J_0(\xi) = 0$

Note. — Appropriate values of $10 \log_{10} \Delta_H$ for typical couplers are given in Appendix A.

4.6 Capillary correction

The cavity is normally fitted with capillary tubes in order to equalize the static pressure inside and outside the coupler. Two such capillary tubes also permit the introduction of a gas having a composition different from that of air.

At low frequencies, where the impedance of the cavity is high, the shunting effect of the two capillary tubes must be taken into account. The acoustic impedance of two capillary tubes of equal length and diameter, in parallel, is given by:

$$Z_c = \frac{4\pi\eta\ell}{(\pi r^2)^2} + j \frac{2\omega\ell}{3\pi r^2} \quad (8)$$

where:

ℓ is the length of each capillary tube

r is the radius of each capillary tube

η is the coefficient of viscosity of the gas

The correction factor to be used in equation (10) and equation (11) is then given by:

$$\Delta_c = \left| 1 + \frac{Z_{ab}}{Z_c} \right| \quad (9)$$

4.7 Final expressions for the pressure sensitivity level

4.7.1 Method using three microphones

Let the modulus of the electrical transfer impedance $\frac{U_b}{i_a}$ from Sub-clause 4.3 be denoted by R_{ab} with similar expressions for the other pairs of microphones. Taking into account the correction in Sub-clauses 4.5 and 4.6, the final expression for the pressure sensitivity level of microphone (a) in decibels relative to $1 \text{ V}/(\text{Nm}^{-2})$, where all quantities are in S.I. units, is:

$$20 \log_{10} \left| M_p^{(a)} \right| = 10 \log_{10} \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{bc}} + 10 \log_{10} \left| \frac{Z_{bc}}{Z_{ab} Z_{ca}} \right| + 10 \log_{10} \Delta_H + 10 \log_{10} \Delta_c \quad (10)$$

Similar expressions apply for microphones (b) and (c).

4.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Si l'on utilise seulement deux microphones et une source sonore auxiliaire, l'expression finale est:

$$20 \log_{10} \left| M_p^{(a)} \right| = 10 \log_{10} R_{ab} + 10 \log_{10} \left| \frac{M_p^{(a)}}{M_p^{(b)}} \right| - 10 \log_{10} \left| Z_{ab} \right| + 10 \log_{10} \Delta_H + 10 \log_{10} \Delta_C \quad (11)$$

où le rapport des deux efficacités en pression est mesuré par comparaison avec la source auxiliaire (voir paragraphe 4.1.2).

5. Précision absolue des étalonnages

5.1 Généralités

Plusieurs facteurs influenceront la précision absolue d'un étalonnage par la méthode de la réciprocité. En plus des facteurs figurant dans les formules des paragraphes 4.4 et 4.7, l'efficacité en pression dépend de la tension de polarisation. D'autres facteurs, tels que la non-uniformité de la pression acoustique sur la membrane, produiront des erreurs qui, dans la pratique, peuvent être difficilement corrigées.

5.2 Facteurs intervenant dans la précision d'un étalonnage

Les facteurs qui agissent sur l'étalonnage d'une manière connue doivent être mesurés avec la plus grande précision possible et il est recommandé que les quantités suivantes soient mesurées avec au moins la précision définie ci-dessous.

5.2.1 Tension de polarisation

La tension de polarisation du microphone doit être mesurée avec une précision de 0,05%.

5.2.2 Pression statique

La pression statique doit être mesurée avec une précision de 0,1%.

5.2.3 Fréquence

Lorsque la fréquence entre directement dans le calcul de l'efficacité en pression, elle doit être mesurée avec une précision de 0,1%. Autrement, la plus grande, quelle qu'elle soit, des deux précisions suivantes: 0,1% ou 1 Hz est suffisante.

5.2.4 Impédance électrique de transfert

La quantité R_{ab} (voir paragraphe 4.7) doit être déterminée avec une précision de 0,1%.

5.2.5 Correction de conduction thermique

La correction de conduction thermique Δ_H doit être déterminée avec une précision de 0,1%.

5.2.6 Correction de capillarité

Le facteur de correction de capillarité Δ_C doit être déterminé avec une précision de 0,1%.

5.2.7 Section du coupleur

La section S du coupleur figurant dans l'équation (6) doit être mesurée avec une précision de 0,2%.

4.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source

If only two microphones and an auxiliary sound source are used, the final expression is:

$$20 \log_{10} \left| M_p^{(a)} \right| = 10 \log_{10} R_{ab} + 10 \log_{10} \left| \frac{M_p^{(a)}}{M_p^{(b)}} \right| - 10 \log_{10} \left| Z_{ab} \right| + 10 \log_{10} \Delta_H + 10 \log_{10} \Delta_C \quad (11)$$

where the ratio of the two pressure sensitivities is measured by comparison against the auxiliary source (see Sub-clause 4.1.2).

5. Absolute accuracy of calibration

5.1 General

Several factors will influence the absolute accuracy of a reciprocity calibration. In addition to the factors present in the formulae in Sub-clauses 4.4. and 4.7, the pressure sensitivity depends on the polarizing voltage. Other factors, such as a non-uniform pressure distribution over the diaphragm will produce errors which in practice are difficult to correct for.

5.2 Factors influencing the accuracy of calibration

Factors which affect the calibration in a known way shall be measured with as high an accuracy as practicable and it is advisable that the following quantities be measured with at least the accuracy stated.

5.2.1 Polarizing voltage

The polarizing voltage of the microphone shall be measured with an accuracy of 0.05%.

5.2.2 Static pressure

The static pressure shall be measured with an accuracy of 0.1%.

5.2.3 Frequency

When the frequency enters directly into the calculation of the pressure sensitivity, it shall be measured with an accuracy of 0.1%. Otherwise, an accuracy of 0.1% or 1 Hz, whichever is the greater, is sufficient.

5.2.4 Electrical transfer impedance

The quantity R_{ab} (see Sub-clause 4.7) shall be determined with an accuracy of 0.1%.

5.2.5 Heat conduction correction

The heat conduction correction Δ_H shall be determined with an accuracy of 0.1%.

5.2.6 Capillary correction

The capillary correction factor Δ_C shall be determined with an accuracy of 0.1%.

5.2.7 Cross-sectional area of the coupler

The cross-sectional area S of the coupler to be used in equation (6) shall be measured with an accuracy of 0.2%.

5.2.8 *Longueur effective du coupleur*

La longueur effective ℓ_{ab} du coupleur figurant dans l'équation (6), qui tient compte des impédances acoustiques des microphones, doit être déterminée avec une précision de 0,3%.

5.2.9 *Volume effectif du coupleur*

Le volume effectif V_{ab} figurant dans l'équation (4) doit être mesuré avec une précision de 0,3%.

5.2.10 *Température du coupleur et des microphones*

La température du coupleur et des microphones doit être mesurée avec une précision de 1 °C.

Note. – Si un préamplificateur est connecté tout près du microphone récepteur pendant l'étalonnage, on doit prendre soin de vérifier que le transfert de chaleur est minimal et que les températures du coupleur et des microphones sont aussi uniformes que possible.

5.2.11 *Distribution de pression sur la membrane*

La définition de l'efficacité en pression implique que la pression acoustique soit uniforme sur la membrane. Cependant, il est possible que, dans le coupleur, une distribution uniforme de pression acoustique n'existe pas sur la surface de la membrane, en particulier pour la partie haute du domaine de fréquence pour lequel le coupleur est utilisé.

Le champ acoustique dans un coupleur cylindrique idéal sera de symétrie de révolution pourvu que l'excitation soit symétrique. La tension de sortie d'un microphone dont la membrane est soumise à une pression acoustique de distribution non uniforme et de symétrie de révolution différera de la tension de sortie lorsque la membrane est soumise à une pression acoustique de distribution uniforme ayant la même valeur moyenne; en effet, le microphone est normalement plus sensible à la pression acoustique au centre de la membrane. Il est recommandé que la distribution de pression acoustique de symétrie de révolution, à laquelle est soumise la surface de la membrane pendant l'étalonnage, reste uniforme à mieux que $\pm 0,1$ dB près. Dans ce cas l'erreur sur la tension de sortie d'un microphone idéal ne dépassera pas 0,05 dB (un microphone à condensateur idéal est un microphone pour lequel les propriétés mécaniques et acoustiques sont à symétrie de révolution parfaite).

Un champ acoustique ayant une composante non symétrique dont la valeur moyenne est nulle sur une section du coupleur peut être produit si, par exemple, les membranes des microphones ne sont pas perpendiculaires à l'axe de symétrie ou si la source sonore elle-même est génératrice de champs asymétriques. Cette condition existera lorsque la longueur d'onde n'est pas grande par rapport aux dimensions du coupleur. La tension de sortie d'un microphone idéal ne serait pas influencée par cette distribution asymétrique de pression mais celle d'un microphone ordinaire peut être influencée, bien que l'effet soit d'importance secondaire. Pour le moment, il n'est cependant pas possible d'établir jusqu'à quel point une distribution asymétrique est tolérable.

5.2.12 *Pertes acoustiques*

L'expression simplifiée de Z_{ab} (équation 6) ne doit être employée que dans la gamme de fréquences dans laquelle la valeur de $\beta\ell_{ab}$ ne dépasse pas 2.

5.3 *Précision globale*

La précision globale que l'on peut obtenir dans un étalonnage par la méthode de la réciprocité dépend de la précision de l'équipement d'étalonnage auxiliaire et du soin pris pendant l'assemblage du coupleur et des microphones.

Si les précisions individuelles spécifiées ci-dessus sont obtenues, on peut estimer que la précision globale est approximativement égale à 0,05 dB aux fréquences basses et moyennes et diminue jusqu'à 0,1 dB environ à 10 kHz.

5.2.8 *Effective length of the coupler*

The effective length ℓ_{ab} of the coupler to be used in equation (6), which includes the acoustic impedances of the microphones, shall be determined with an accuracy of 0.3%.

5.2.9 *Effective volume of the coupler*

The effective volume V_{ab} to be used in equation (4) shall be measured with an accuracy of 0.3%.

5.2.10 *Temperature of the coupler and microphones*

The temperature of the coupler and microphones shall be measured with an accuracy of 1 °C.

Note. – If a pre-amplifier is connected close to the receiver microphone during the calibration, care should be taken that heat transfer is minimized and that the temperature of the coupler and microphones is as uniform as possible.

5.2.11 *Pressure distribution over the diaphragm*

The definition of the pressure sensitivity involves a sound pressure uniformly applied over the diaphragm. In a coupler, however, a uniform pressure distribution may not exist over the surface of the diaphragm in the upper part of the frequency range for which the coupler is used.

The sound field in a pure cylindrical coupler will be rotationally symmetric, provided it is symmetrically excited. The output voltage of a microphone presented to a rotationally symmetric non-uniform pressure distribution over the surface of the diaphragm will differ from the output voltage of the microphone when presented to a uniform pressure distribution having the same mean value, because the microphone normally is most sensitive to a sound pressure at the centre of the diaphragm. It is recommended that the rotationally symmetric sound pressure distribution during a calibration should be uniform to better than ± 0.1 dB over the surface of the diaphragm, in which case the error in the output voltage from an ideal microphone will not exceed 0.05 dB. (An ideal condenser microphone is a microphone for which the mechanical and acoustical properties have perfect rotational symmetry.)

A sound field having an asymmetric component whose mean value is zero over a cross-sectional area of the coupler may be produced if, for instance, the diaphragms of the microphones are not perpendicular to the axis of symmetry or if the sound source itself generates asymmetric fields. This condition will take place when the wavelength is not great compared to the dimensions of the coupler. The output voltage of an ideal microphone would not be influenced by this asymmetric pressure distribution but that of an ordinary microphone may be, although the effect is of second order. At present, however, it is not possible to state to what extent an asymmetric pressure distribution can be tolerated.

5.2.12 *Acoustic losses*

The simplified expression for Z_{ab} (equation 6) shall only be used in the frequency range where $\beta\ell_{ab}$ does not exceed 2.

5.3 *Over-all accuracy*

The over-all accuracy which can be obtained by a reciprocity calibration depends on the accuracy of the auxiliary equipment and the care taken during the assembly of coupler and microphones.

If the individual accuracies specified above are achieved, it is estimated that the over-all accuracy is approximately 0.05 dB at low and middle frequencies decreasing to about 0.1 dB at 10 kHz.

6. Méthodes et équipement d'étalonnage

6.1 Coupleur

La forme et les dimensions du coupleur doivent être choisies de telle façon que les conditions du paragraphe 5.2.11 soient satisfaites. Tant que la plus grande dimension du coupleur est inférieure à $\lambda/20$ (λ étant la longueur d'onde dans le gaz) la pression acoustique dans le coupleur sera véritablement uniforme et indépendante de la forme. Aux fréquences plus élevées, cette condition n'est pas satisfaite à moins de remplir la cavité d'hélium ou d'hydrogène.

Des exemples de coupleurs sont indiqués dans l'annexe A.

Notes 1. – Les coupleurs cylindriques utilisés dans un domaine de fréquence où leur dimensions ne sont pas faibles par rapport à la longueur d'onde doivent être fabriqués avec le plus grand soin afin que des champs asymétriques ne soient pas excités.

2. – L'influence sur un microphone non idéal, d'une distribution de pression acoustique asymétrique à l'intérieur d'un coupleur peut être mise en évidence, en changeant la position relative du coupleur et des microphones, par exemple en faisant subir à chaque microphone une légère rotation autour de son axe. Si un tel changement affecte l'impédance acoustique de transfert, on devra prendre cet effet en considération lorsque la précision globale sera évaluée.

3. – Si le coupleur est rempli d'un gaz autre que l'air, il faut prendre soin d'éviter les fuites du gaz vers la cavité derrière la membrane du microphone en recouvrant les surfaces en contact d'une mince couche de graisse. Si une diffusion de gaz a lieu à travers la membrane, les microphones ne peuvent être étalonnés de cette manière car il n'est pas possible de faire des corrections pour des changements de la viscosité et de la densité du gaz derrière la membrane.

6.2 Configuration de référence du blindage

Conformément au paragraphe 3.1, la tension à circuit ouvert doit être mesurée aux bornes électriques du microphone lorsque celui-ci est relié à un blindage de référence spécifié. Dans ce but, la configuration indiquée à la figure 4, page 26, doit être utilisée, l'écran étant relié à la terre.

Si quelque autre montage est utilisé, on doit vérifier que l'efficacité en pression mesurée est affectée de moins de 0,02 dB par rapport à sa valeur lorsqu'on utilise la configuration de référence.

Note. – Si le constructeur spécifie une valeur maximale pour la force à appliquer au contact électrique central du microphone, cette valeur limite ne doit pas être dépassée.

6.3 Technique de la tension insérée

La technique de la tension insérée (ou méthode de substitution) est utilisée pour déterminer la tension à circuit ouvert d'un microphone lorsque celui-ci est chargé électriquement.

Considérons un microphone ayant une impédance interne et une tension de circuit ouvert données, relié à une impédance de charge. Afin de mesurer la tension à circuit ouvert, une impédance petite par rapport à l'impédance de charge est mise en série avec le microphone, et une tension d'étalonnage lui est appliquée. Appliquons alternativement une pression acoustique et une tension d'étalonnage de même fréquence. On ajuste la tension d'étalonnage jusqu'à ce qu'elle donne la même chute de tension à travers l'impédance de charge que celle qui résulte de l'application de la pression acoustique sur le microphone; les amplitudes de la tension d'étalonnage mesurée et de la tension à circuit ouvert seront alors égales.

6.4 Influence de la pression statique

La résistance et l'élasticité acoustiques de la cavité derrière la membrane et par suite l'efficacité en pression du microphone dépendent de la pression statique. Cette influence est faible. Elle peut être évaluée pour un microphone à étudier, en effectuant des étalonnages par la méthode de la réciprocité à différentes valeurs de la pression statique.

6. Calibration methods and equipment

6.1 Coupler

The shape and dimensions of the coupler should be chosen in such a way that the requirement of Sub-clause 5.2.11 is satisfied. As long as the greatest dimension of the coupler is less than $\lambda/20$ (where λ is the wavelength of sound in the gas), the sound pressure will be substantially uniform in the coupler, independent of the shape. At higher frequencies, this requirement cannot be met unless the cavity is filled with helium or hydrogen.

Examples of couplers are shown in Appendix A.

Notes 1. – Cylindrical couplers used in a frequency range where the dimensions are not small compared to the wavelength shall be manufactured with the utmost care so that asymmetric sound fields are not excited.

2. – The influence on a non-ideal microphone of an asymmetric sound pressure distribution in the coupler may be ascertained by changing the relative position of coupler and microphones, for instance by incrementally rotating each microphone about its axis. If such a change affects the electrical transfer impedance, this effect should be taken into account when estimating the over-all accuracy.
3. – If the coupler is filled with a gas other than air, care should be taken to avoid leakage of the gas to the cavity behind the diaphragm of the microphone by sealing the contacting surfaces with a thin layer of vacuum grease. If diffusion of the gas through the diaphragm takes place, the microphones cannot be calibrated in this way as it is not possible to make corrections for the change in viscosity and density of the gas behind the diaphragm.

6.2 Reference configuration of ground-shield

In accordance with Sub-clause 3.1, the open-circuit voltage shall be measured at the electrical terminals of the microphone when it is attached to a specified ground-shield configuration. For that purpose, the configuration shown in Figure 4, page 27, shall be used, with the shield connected to ground potential.

If any other arrangement is used, it should be ascertained that the measured pressure sensitivity is affected by less than 0.02 dB compared to the reference configuration.

Note. – Where the manufacturer specifies a maximum force to be applied to the central electrical contact of the microphone, this limit must not be exceeded.

6.3 Insert voltage technique

The insert voltage technique (also referred to as the substitution method) is used to determine the open-circuit voltage of a microphone when it is electrically loaded.

Let a microphone having a certain open-circuit voltage and internal impedance be connected to a load impedance. To measure the open-circuit voltage, an impedance small compared with the load impedance is connected in series with the microphone and a calibrating voltage applied across it. Let a sound pressure and a calibrating voltage of the same frequency be applied alternately. When the calibrating voltage is adjusted until it gives the same voltage drop across the load impedance as results from the sound pressure on the microphone, the open-circuit voltage will be equal in magnitude to the calibrating voltage.

6.4 Dependence on static pressure

The acoustic resistance and the compliance of the cavity behind the diaphragm, and thus the pressure sensitivity of the microphone, depend on the static pressure. This dependence is small. It can be determined for a microphone under test by making reciprocity calibrations at different static pressures.

6.5 Tension de polarisation

Dans le but d'obtenir la précision recommandée, on doit avoir la possibilité, quand on détermine la tension de polarisation, de mesurer cette tension directement aux bornes de la capsule.

6.6 Longueur effective du coupleur

Une méthode convenable pour mesurer la longueur effective d'un coupleur dont le diamètre est le même que celui des membranes des microphones est de déterminer les résonances longitudinales dans le coupleur en prenant en considération les impédances acoustiques des microphones.

6.7 Impédance acoustique du microphone

On peut obtenir l'impédance acoustique du microphone à l'aide d'une méthode indirecte basée sur la mesure de l'admittance électrique Y : on suppose que le microphone puisse être représenté par un réseau électro-acoustique à deux paires de bornes telles que les équations de réciprocité (2a), paragraphe 3.9, le montrent. Pendant la mesure de l'admittance électrique, le microphone doit être chargé par un tube quart d'onde ($p = 0$ dans l'équation (2a)) et l'impédance acoustique du microphone est alors tirée de la formule :

$$Z_a = \frac{Z_e - Y^{-1}}{M_p^2} \quad (12)$$

Z_e , l'impédance électrique lorsque la membrane est bloquée, peut être déduite de mesures faites à une fréquence suffisamment élevée pour que l'inertie de la membrane l'empêche effectivement d'entrer en mouvement ($q = 0$ dans l'équation (2a)).

Lorsqu'on utilise un coupleur de grand volume, on introduit une erreur négligeable en considérant uniquement la partie imaginaire de l'impédance acoustique du microphone (se reporter à l'approximation introduite dans l'équation (4)). Une méthode de mesure convenable est celle qui utilise un tube résonant en demi-longueur d'onde. A la fréquence considérée, la longueur du tube est réglée de façon à entrer en résonance quand il est successivement terminé par le microphone à essayer et un microphone fictif ayant les mêmes dimensions, mais une impédance acoustique infinie. La variation de la longueur du tube multipliée par la section donne le volume équivalent du microphone et par suite la partie imaginaire de l'impédance acoustique.

6.8 Tension maximale du générateur

La tension utilisée pour l'excitation de la source microphonique doit être telle que la présence d'harmoniques n'introduise pas une erreur supérieure à 0,02 dB dans la détermination du niveau d'efficacité en pression.

6.9 Bruit

Le bruit ou toute autre influence parasite, telle que la diaphonie, d'origine acoustique ou autre, ne doit pas affecter la détermination du niveau d'efficacité en pression de plus de 0,02 dB. Des filtres passe-bandes peuvent être utilisés afin d'améliorer le rapport signal à bruit.

6.5 *Polarizing voltage*

In order to achieve the recommended accuracy when determining the polarizing voltage, provision shall be made for measuring this voltage directly at the terminals of the cartridge.

6.6 *Effective length of the coupler*

A suitable method for measuring the effective length of a coupler having the same diameter as the diaphragm of the microphones is to determine length resonances of the coupler, taking into account the acoustic impedances of the microphones.

6.7 *Acoustic impedance of the microphone*

The acoustic impedance of the microphone can be obtained by an indirect method based upon the measurement of the electrical admittance Y , on the assumption that the microphone can be represented by an electro-acoustic two-port network as described by the reciprocity equations (2a), Sub-clause 3.9. During the electrical admittance measurements the microphone shall be loaded with a quarter-wave tube ($p = 0$ in equation (2a)) and the acoustic impedance of the microphone is then determined from:

$$Z_a = \frac{Z_e - Y^{-1}}{M_p^2} \quad (12)$$

Z_e , the electrical impedance with diaphragm blocked, may be determined from measurements made at a frequency sufficiently high that the diaphragm inertia effectively prevents motion ($q = 0$ in equation (2a)).

With couplers of large volume, negligible error is introduced if only the imaginary part of the acoustic impedance of the microphone is considered (see the approximation introduced in equation (4)). A suitable method for measuring this utilizes an adjustable half-wave resonant tube. At the frequency considered, the length of the tube is tuned to resonance when successively terminated with the microphone to be measured and a dummy microphone having the same dimensions but an infinite acoustic impedance. The increment in the length of the tube multiplied by the cross-sectional area then gives the equivalent volume of the microphone, and hence the imaginary part of the acoustic impedance.

6.8 *Maximum generator voltage*

The voltage used to excite the source microphone shall be such that the presence of harmonics introduces an error of less than 0.02 dB in the determination of the pressure sensitivity level.

6.9 *Noise*

Noise or other interference such as crosstalk, whether of acoustical or other origin, shall not affect the determination of the pressure sensitivity level by more than 0.02 dB. Band pass filters may be used to improve the signal-to-noise ratio.

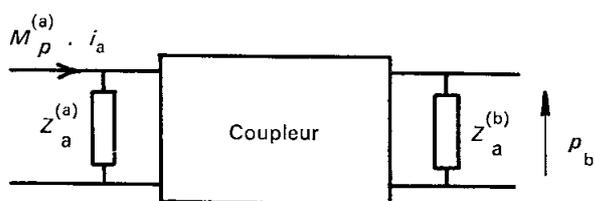


FIG. 1. – Circuit équivalent, pour l'évaluation de l'impédance acoustique de transfert Z_{ab} .

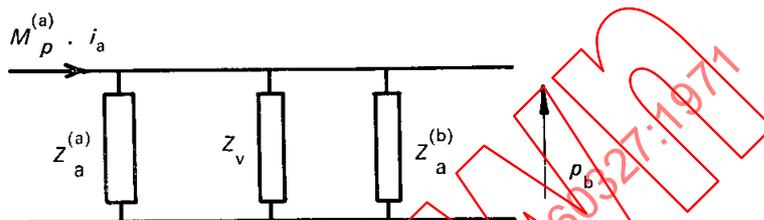


FIG. 2. – Circuit équivalent, pour l'évaluation de Z_{ab} , quand les dimensions du coupleur sont petites par rapport à la longueur d'onde.

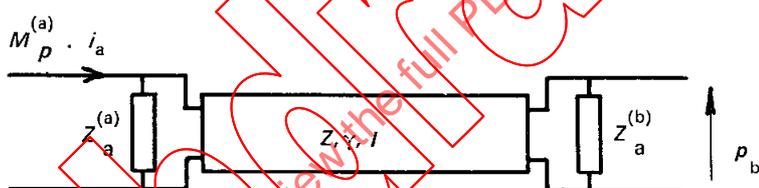
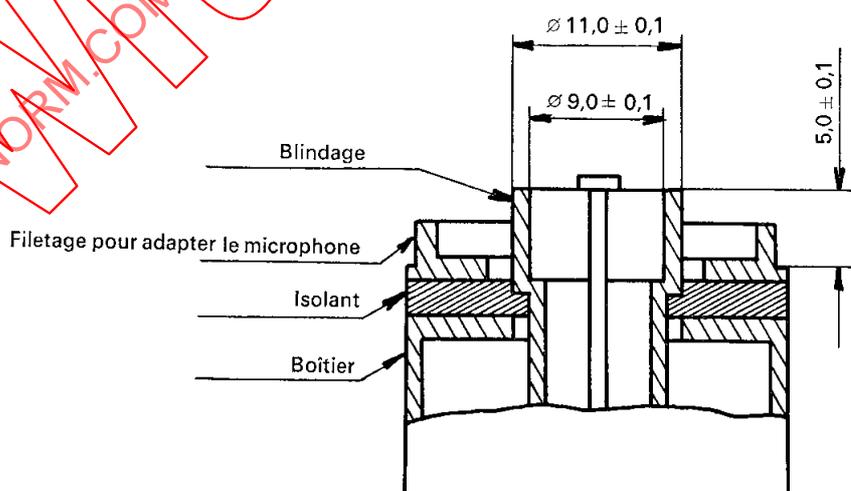


FIG. 3. – Circuit équivalent, pour l'évaluation de Z_{ab} , quand on peut supposer qu'une transmission en ondes planes dans le coupleur est réalisée.



Dimensions en millimètres.

FIG. 4. – Montage mécanique du microphone, montrant la configuration de référence du blindage.

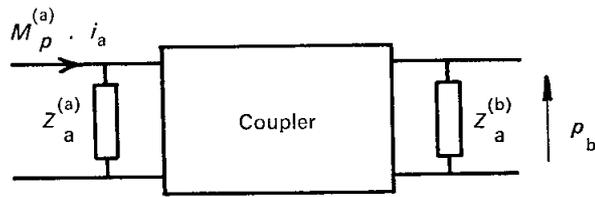


FIG. 1. – Equivalent circuit for evaluating the acoustic transfer impedance Z_{ab} .

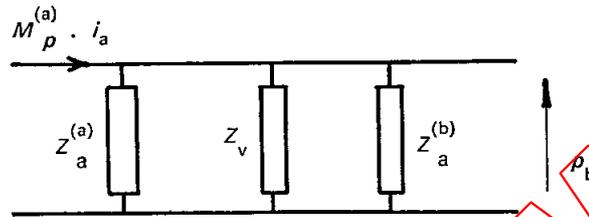


FIG. 2. – Equivalent circuit for evaluating Z_{ab} , when coupler dimensions are small compared to wavelength.

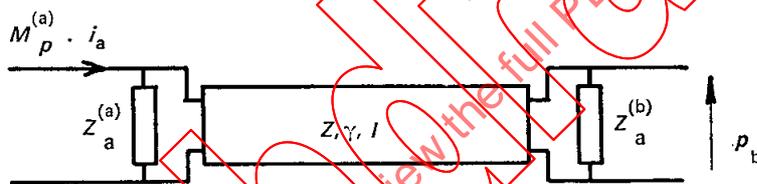
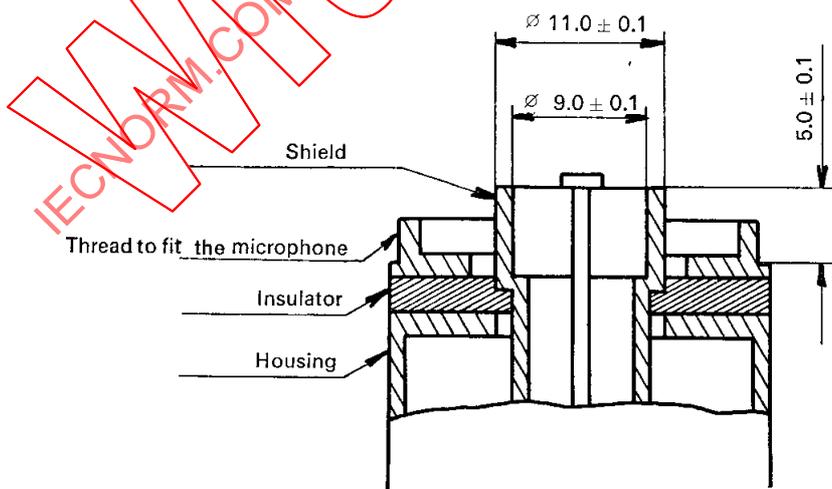


FIG. 3. – Equivalent circuit for evaluating Z_{ab} , when plane wave transmission in the coupler can be assumed.



Dimensions in millimetres.

FIG. 4. – Mechanical attachment to microphone, showing the ground-shield reference configuration.

ANNEXE A

EXEMPLES DE COUPLEURS CYLINDRIQUES POUR L'ÉTALONNAGE DES MICROPHONES

1. Généralités

Le coupleur utilisé pour l'étalonnage par la méthode de la réciprocité doit produire une distribution uniforme de la pression acoustique sur la surface de la membrane du microphone récepteur (voir paragraphe 3.2). A cause de la propagation radiale, cette condition idéale ne peut être qu'approchée. Afin d'élargir la gamme de fréquences dans lequel le coupleur peut être utilisé (en ce qui concerne seulement la propagation radiale), il est favorable que la fréquence de résonance radiale soit aussi élevée que possible, ce qui nécessite un coupleur de faible diamètre. Pour des raisons pratiques, le diamètre du coupleur ne doit pas être inférieur à celui des membranes.

Il est cependant possible pour un coupleur donné, d'augmenter la fréquence de résonance par l'introduction dans ce coupleur d'un gaz tel que l'hydrogène ou l'hélium à la place de l'air (voir paragraphe 6.1). Il est alors théoriquement possible de multiplier la fréquence maximale utilisable du coupleur par un facteur égal au rapport des vitesses du son dans l'hydrogène et dans l'air. On doit cependant noter que la vitesse de propagation dans la membrane du microphone émetteur est presque indépendante du gaz utilisé et n'est donc pas augmentée dans la même proportion que la vitesse du son dans le gaz enclos.

L'impédance acoustique de transfert Z_{ab} (paragraphe 4.3 et 4.4) du système total constitue un élément important dans l'étalonnage par la méthode de la réciprocité utilisant un coupleur clos; elle doit être connue avec une grande précision. Aux fréquences où la longueur d'onde est grande par rapport aux dimensions du coupleur, la distribution de pression acoustique est uniforme dans le coupleur tout entier et Z_{ab} est déterminé par le volume effectif du coupleur, c'est-à-dire la somme du volume géométrique du coupleur et des volumes équivalents des microphones (équation (4)). Aux fréquences où la longueur d'onde ne peut pas être considérée comme étant grande par rapport aux dimensions du coupleur, une propagation existera et il est difficile d'obtenir une expression théorique de l'impédance de transfert à moins que le coupleur ait une forme très simple. L'équation (6) exprime l'impédance de transfert d'un coupleur cylindrique d'un diamètre égal à celui des membranes des microphones. Dans les autres cas, la correction de propagation peut être déterminée empiriquement.

Les figures 5 et 6, page 32, montrent une représentation schématique des principes de construction de deux coupleurs qui, dans la bande de fréquences donnée, remplissent les conditions d'un coupleur envisagé dans ce document. Les emplacements des tubes capillaires (figure 5 et figure 6) peuvent être choisis au gré de l'utilisateur.

Exemple I

A la figure 5, le diamètre du coupleur a été choisi égal au diamètre des membranes des microphones.

Ce coupleur répond aux prescriptions de cette recommandation jusqu'à 10 kHz quand il est rempli d'air et jusqu'à 20 kHz lorsqu'il est rempli d'hydrogène.

Le tableau I donne les valeurs des corrections de conduction thermique d'après l'équation (7) lorsque le coupleur est respectivement rempli d'air et d'hydrogène.

Les équations (5) ou (6) doivent être utilisées pour calculer Z_{ab} .

APPENDIX A

EXAMPLES OF CYLINDRICAL COUPLERS FOR CALIBRATION OF MICROPHONES

1. General

The coupler used in a reciprocity calibration should produce a uniform sound pressure distribution over the surface of the diaphragm of the receiver microphone (see Sub-clause 3.2). Due to radial wave motion, this ideal condition can only be approximated. In order to extend the frequency range over which the coupler can be used (but only as regards the radial wave motion), it is advantageous for the radial resonance frequency to be as high as possible, which calls for a coupler of small diameter. For practical reasons, the diameter of the coupler should not be less than the diameter of the diaphragms.

For a given coupler, however, it is possible to raise the resonance frequencies by introducing into the coupler a gas like hydrogen or helium instead of air (see Sub-clause 6.1). Theoretically it should then be possible to extend the upper usable frequency of the coupler by a factor equal to the ratio of the velocities of sound in hydrogen (helium) and air. It should, however, be noted that the wave-velocity in the diaphragm of the transmitter microphone is almost independent of the gas in the coupler and thus not increased by the same factor as the velocity of sound in the enclosed gas.

An important quantity in reciprocity calibration using a closed coupler is the acoustic impedance Z_{ab} of the total system (see Sub-clauses 4.3 and 4.4) which must be known with a high accuracy. At frequencies where the wavelength is great compared to the dimensions of the coupler, the sound pressure distribution is uniform in the whole coupler and Z_{ab} is determined by the effective volume of the coupler, i.e. the sum of the geometrical volume of the coupler and the equivalent volumes of the microphones (see equation (4)). At frequencies where the wavelength cannot be considered great compared to the dimensions of the coupler, wave motion will exist and it is difficult to obtain a theoretical expression for the transfer impedance unless the coupler has a very simple form. Equation (6) expresses the transfer impedance of a cylindrical coupler with a diameter equal to the diameter of the diaphragms of the microphones. In other cases, the wave motion correction may be determined empirically.

Figures 5 and 6, page 33, show schematic representations of the construction principles of two couplers, which, in the stated frequency range, fulfil the requirements of a coupler given in this document. The locations of the capillary tubes in Figures 5 and 6 may be chosen to suit the individual arrangement.

Example I

The diameter of the coupler in Figure 5 has been chosen to equal the diameter of the diaphragms of the microphones.

This coupler will meet the requirements of this Recommendation up to 10 kHz when filled with air, and up to 20 kHz when filled with hydrogen.

Table I gives the values of the heat-conduction correction in accordance with equation (7), when the coupler is filled with air and hydrogen respectively.

Equations (5) or (6) should be used to calculate Z_{ab} .

Exemple II

La figure 6, page 32, montre un coupleur caractérisé par un plus grand volume. Les dimensions du coupleur sont choisies de façon que l'augmentation de pression sur la membrane du microphone due au mode de propagation longitudinale soit en partie annulée par la diminution de pression due au mode de propagation radiale. Ce coupleur répond aux prescriptions de cette recommandation jusqu'à 2,8 kHz quand il est rempli d'air et jusqu'à 10 kHz quand il est rempli d'hydrogène à condition d'effectuer les corrections de propagation données à la figure 7, page 34.

Le tableau II donne les valeurs des corrections de conduction thermique définies d'après l'équation (7) quand le coupleur est rempli d'air ou d'hydrogène.

L'équation (4) doit être utilisée pour calculer Z_{ab} .

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60327:1971
Withdrawn

Example II

The coupler shown in Figure 6, page 33, is characterized by having a greater volume. The dimensions of the coupler are so selected that the pressure increase on the diaphragm of the microphone due to the longitudinal mode is partly cancelled by the pressure decrease due to the radial mode. This coupler will meet the requirements of this Recommendation up to 2.8 kHz when filled with air and up to 10 kHz when filled with hydrogen, when the wave motion corrections in Figure 7, page 35, are used.

Table II gives the values of the heat-conduction corrections in accordance with equation (7), when the coupler is filled with air or with hydrogen.

Equation (4) should be used to calculate Z_{ab} .

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60327:1971
Withdrawn