NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
60377-1

Première édition
First edition
1973-01

Méthodes recommandées pour la détermination des propriétés diélectriques de matériaux isolants aux fréquences supérieures à 300 MHz

Première partie: Généralités

Recommended methods for the determination of the dielectric properties of insulating materials at frequencies above 300 MHz

Part 1: General



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60377-1: 1973

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

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 dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- **«Site web» de la CEI***
- **Catalogue des publications de la CEI**
  Publié annuellement et mis à jour régulièrement
  (Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
  Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique,* la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles,* et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas.*

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

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 in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
  Published yearly with regular updates

  (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
  Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams.*

* See web site address on title page.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
60377-1

Première édition
First edition
1973-01

Méthodes recommandées pour la détermination des propriétés diélectriques de matériaux isolants aux fréquences supérieures à 300 MHz

Première partie: Généralités

Recommended methods for the determination of the dielectric properties of insulating materials at frequencies above 300 MHz

Part 1: General

© IEC 1973 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.

International Electrotechnical Commission 3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
Telefax: +41 22 919 0300 e-mail: inmail@iec.ch IEC web site http: //www.iec.ch

Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE M

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

SOMMAIRE

Pages

PRÉAMBULE 4

PRÉFACE 4

INTRODUCTION 6

Articles

1. Objet et domaine d'application 6

2. Définitions 8
   2.1 Permittivité relative complexe ε_r^* 8
   2.2 Permittivité relative ε'_r 10
   2.3 Indice de pertes ε''_r 10
   2.4 Facteur de dissipation diélectrique tg δ 10

3. Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux isolants 10
   3.1 Fréquence 12
   3.2 Température 12
   3.3 Humidité et autres impuretés 12
   3.4 Structure physique et chimique 12
   3.5 Intensité de champ alternatif 14

4. Description des méthodes de mesure 14
   4.1 Principe des méthodes de mesure 14
   4.2 Dispositif d'essai 16
   4.3 Choix de la méthode d'essai 18

5. Mode opératoire 22
   5.1 Préparation des éprouvettes 22
   5.2 Conditionnement 22
   5.3 Mesures 22

6. Procès-verbal d'essai 22

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

CONTENTS

Page

FOREWORD 5

PREFACE 5

INTRODUCTION 7

Clause

1. Object and scope 7

2. Definitions 9
   2.1 Relative complex permittivity ε_r^* 9
   2.2 Relative permittivity ε'_r 11
   2.3 Loss index ε''_r 11
   2.4 Dielectric dissipation factor tan δ 11

3. Factors influencing dielectric properties of dielectric materials 11
   3.1 Frequency 13
   3.2 Temperature 13
   3.3 Moisture and other impurities 13
   3.4 Physical and chemical structure 13
   3.5 A.C. — Field strength 15

4. Survey on measuring methods 15
   4.1 Principles of measuring methods 15
   4.2 Test arrangement 17
   4.3 Choice of the test method 19

5. Testing procedure 23
   5.1 Preparation of specimens 23
   5.2 Conditioning 23
   5.3 Measurement 23

6. Test report 23

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODES RECOMMANDÉES POUR LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE MATÉRIAUX ISOLANTS AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES À 300 MHz

Première partie: Généralités

PRÉAMBULE

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.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Sous-Comité 15A: Essais de courte durée, du Comité d'Etudes N° 15 de la CEI: Matériaux isolants.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Tel-Aviv en 1966, à Varsovie en 1967 et à Washington en 1970. A la suite de cette dernière réunion, un projet définitif, document 15A(Bureau Central)16, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mai 1971.

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

Afrique du Sud	Israël
Allemagne	Japon
Australie	Pays-Bas
Belgique	Portugal
Canada	Roumanie
Corée (République démocratique populaire de)	Royaume-Uni
	Suède
	Suisse
Danemark	Tchécoslovaquie
Finlande	Turquie
France	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
Iran	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

RECOMMENDED METHODS FOR THE DETERMINATION OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF INSULATING MATERIALS AT FREQUENCIES ABOVE 300 MHz

Part 1: General

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 recommendations and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This recommendation has been prepared by Sub-Committee 15A, Short-time Tests, of IEC Technical Committee No. 15, Insulating Materials.

Drafts were discussed at the meetings held in Tel Aviv in 1966, in Warsaw in 1967 and in Washington in 1970. As a result of this latter meeting, a final draft, document 15A(Central Office)16, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in May 1971.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Korea (Democratic People's Republic of)
Belgium	Netherlands
Canada	Portugal
Czechoslovakia	Romania
Denmark	South Africa
Finland	Sweden
France	Switzerland
Germany	Turkey
Iran	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Japan	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

MÉTHODES RECOMMANDÉES POUR LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE MATÉRIAUX ISOLANTS AUX FRÉQUENCES SUPÉRIEURES À 300 MHz

Première partie: Généralités

INTRODUCTION

Les méthodes de détermination des caractéristiques diélectriques de matériaux isolants peuvent être classées, en gros, en deux catégories principales:

1) Les méthodes à paramètres localisés, qui peuvent être utilisées lorsque la longueur d'onde du champ électromagnétique appliqué est grande par rapport aux dimensions de l'éprouvette. Ces méthodes relativement simples sont traitées dans la Publication 250 de la CEI: Méthodes recommandées pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation des isolants électriques aux fréquences industrielles, audibles et radioélectriques (ondes métriques comprises), et s'appliquent dans la gamme de fréquences allant des fréquences industrielles jusqu'à environ 300 MHz.

2) Les méthodes à paramètres répartis, qui doivent être utilisées lorsque les variations spatiales du champ électromagnétique dans l'éprouvette ne peuvent plus être négligées. La présente recommandation décrit des méthodes qui tiennent compte de la propagation des ondes et qui couvrent la gamme de fréquences de 300 MHz aux fréquences du domaine visible.
Dans une gamme de fréquences étroite encadrant la fréquence « critique » d'environ 300 MHz (représentée en hachuré, figure 1, page 24), on peut utiliser soit l'une, soit l'autre des méthodes principales, le choix dépendant surtout des dimensions et de la permittivité de l'éprouvette.

1. Objet et domaine d'application

La présente recommandation s'applique aux méthodes de détermination de la permittivité relative et du facteur de dissipation diélectrique ainsi que des grandeurs qui s'y rapportent comme l'indice de pertes des matériaux diélectriques aux hyperfréquences (c'est-à-dire depuis environ 300 MHz jusqu'aux fréquences du domaine visible).

A la différence des méthodes de mesure utilisées aux fréquences plus basses (voir Publication 250 de la CEI), les méthodes de mesure traitées dans la présente recommandation sont caractérisées par le fait que les dimensions de l'éprouvette de mesure et/ou du dispositif de mesure à utiliser sont plus grandes ou du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du champ électromagnétique à la fréquence de mesure.

Théoriquement, les méthodes décrites ne s'appliquent qu'aux matériaux d'essai ayant une perméabilité absolue égale à celle du vide. Généralement, on obtient une bonne approximation dans le cas des matériaux diamagnétiques ou paramagnétiques (couramment appelés matériaux non magnétiques) tandis que dans le cas des matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques, on doit adopter des modes opératoires particuliers pour séparer les caractéristiques diélectriques des caractéristiques magnétiques. Toutefois, ces dernières méthodes sont en dehors du domaine d'application de la présente recommandation.

Note sur les propriétés magnétiques. — Les éprouvettes qui présentent des propriétés magnétiques peuvent être essayées conformément à la présente recommandation si la perméabilité est portée à saturation, au moyen d'un champ magnétique statique d'intensité suffisante, en courant continu.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

RECOMMENDED METHODS FOR THE DETERMINATION OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF INSULATING MATERIALS AT FREQUENCIES ABOVE 300 MHz

Part 1: General

INTRODUCTION

Methods for the determination of the dielectric properties of insulating materials may be divided roughly into two main groups:

1) Lumped-parameter methods can be used when the wavelength of the applied electromagnetic field is large compared with the dimensions of the specimen. These relatively simple methods are dealt with in IEC Publication 250, Recommended Methods for the Determination of the Permittivity and Dielectric Dissipation Factor of Electrical Insulating Materials at Power, Audio and Radio Frequencies Including Metre Wavelengths, covering the frequency range from power frequencies up to about 300 MHz.

2) Distributed parameter methods shall be used when the spatial variation of the electromagnetic field over the specimen can no longer be ignored. Methods taking account of wave propagation are described in this recommendation, covering the frequency range from about 300 MHz up to optical frequencies.
In a narrow range of frequencies around the " critical " frequency of about 300 MHz (which is shown shadowed in Figure 1, page 25), either one of the main methods may be used, depending mainly on the dimensions and permittivity of the specimen.

1. Object and scope

This recommendation applies to the procedures for the determination of relative permittivity and dielectric dissipation factor and of quantities related to them, such as loss index, of dielectric materials in the microwave frequency region (i.e. frequencies above about 300 MHz up to optical frequencies).

Unlike the test methods employed at lower frequencies (see IEC Publication 250), the test methods dealt with in this recommendation use test specimen and/or test set-up dimensions larger than or comparable to the wavelength of the electromagnetic field of the test frequency.

In theory, the methods described apply only to test materials having the permeability of absolute vacuum. Good approximation in general is obtained for dia- and paramagnetic materials (so-called non-magnetic materials) whereas with ferro- and ferrimagnetic materials special procedures have to be chosen to separate the dielectric and magnetic properties. These latter methods, however, are beyond the scope of this recommendation.

Note on magnetic properties. — Specimens showing magnetic properties may be tested according to this recommendation if permeability is driven into saturation by a d.c. magnetic bias field of sufficient intensity.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

En prenant des précautions particulières et moyennant l'utilisation de cellules de mesure de conception appropriée, les méthodes décrites permettent d'effectuer les mesures dans le cas des liquides ou des matériaux fusibles aussi bien que dans le cas des matériaux solides.

Les valeurs mesurées dépendent des conditions physiques telles que: fréquence, température, humidité et, dans des cas particuliers, aussi de l'intensité de champ.

Toutes les mesures et tous les calculs de la présente recommandation se basent sur une onde sinusoïdale de pulsation $\omega = 2\pi f$.

2. Définitions

Notes 1. — Toutes les définitions ne s'appliquent qu'aux matériaux diélectriques dont la perméabilité est égale à celle du vide.

2. — Pour les définitions des termes utilisés dans la présente recommandation et qui se rapportent à la propagation des ondes, il convient de se reporter aux groupes 05 et 62 du Vocabulaire Electrotechnique International.

2.1 *Permittivité relative complexe* ε_r^*

La permittivité relative complexe ε_r^* d'un matériau diélectrique est:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \frac{C_x^*}{C_0} \qquad (1)$$

où C_x^* désigne la capacité complexe d'un condensateur de dimensions très faibles [1] dans lequel l'espace à l'intérieur et autour des électrodes est complètement et exclusivement rempli du matériau diélectrique en question et C_0 est la capacité de la même disposition d'électrodes mais dans le vide.

Note. — La capacité complexe d'un condensateur est définie par:

$$j\omega C_x^* = Y_x^* = G_x + j\omega C_x$$

où G_x est la partie réelle (conductance en courant alternatif) et $j\omega C_x$ la partie imaginaire de l'admittance complexe Y_x^* de ce condensateur.

Etant donné que, lorsque la fréquence croît, la longueur d'onde du champ électromagnétique appliqué tend vers une valeur voisine des dimensions de l'éprouvette, on ne peut plus négliger la variation des paramètres des champs électrique (et magnétique) dans la masse de l'éprouvette. Par conséquent, en vue d'une interprétation correcte des résultats de mesure, on doit passer de l'analyse du circuit à paramètres localisés à l'analyse des ondes et à la théorie des lignes de transmission. Cela implique également que les résultats deviennent de plus en plus sensibles au défaut d'homogénéité et à l'anisotropie des éprouvettes.

Il en résulte que:

la permittivité relative complexe ε_r^* d'un matériau diélectrique est proportionnelle au carré du rapport de l'exposant linéique de propagation $\gamma = \alpha + j\beta$ d'une onde électromagnétique dans le matériau à l'exposant linéique $\gamma_0 = j\beta_0$ de cette onde dans le vide:

$$\varepsilon_r^* = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 \qquad (2)$$

où λ_0 est la longueur d'onde dans l'espace libre et λ_c la longueur d'onde critique pour le mode utilisé.

Notes 1. — Dans le cas des ondes planes ou des ondes TEM $\lambda_c = \infty$.

2. — La permittivité relative ε_r de l'air ambiant sec, exempt d'anhydride carbonique à 293 K et à la pression atmosphérique normale, est égale à 1,000 53, de sorte que dans la pratique on peut prendre les valeurs de C_a, c_a et γ_a dans l'air au lieu de C_0, c_0 et γ_0 dans le vide, pour déterminer avec une précision suffisante la permittivité relative ε_r de solides et de liquides.

---

[1] De dimensions très faibles par rapport à la longueur d'onde à l'intérieur du diélectrique.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

With special precautions and by the use of suitably designed measuring cells, liquids and fusible materials can be measured, as well as solid materials, by the methods described.

The measured values are dependent on physical conditions such as frequency, temperature, moisture content, and in special cases on field strength as well.

All measurements and calculations of this recommendation are based on a sinusoidal waveform of angular frequency $\omega = 2\pi f$.

2. Definitions

Notes 1. — All definitions apply only to dielectric materials having the permeability of absolute vacuum.

2. — For the definitions of terms related to wave propagation used in this recommendation, reference should be made to Groups 05 and 62 of the International Electrotechnical Vocabulary.

2.1 *Relative complex permittivity* ε_r^*

The relative complex permittivity ε_r^* of a dielectric material is:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \frac{C_x^*}{C_0} \tag{1}$$

where C_x^* denotes the complex capacitance of a small [1] capacitor in which the space between and around the electrodes is entirely and exclusively filled with the dielectric material in question, and C_0 is the capacitance of the same electrode configuration in absolute vacuum.

Note. — The complex capacitance of a capacitor is defined by:

$$j\omega C_x^* = Y_x^* = G_x + j\omega C_x$$

where G_x is the real part (a.c. conductance) and $j\omega C_x$ the imaginary part of the complex admittance Y_x^* of the said capacitor.

As the wavelength of the applied electromagnetic field with increasing frequency approaches the dimensions of the specimen employed, the variation of the electric (and magnetic) field parameters throughout the specimen can no longer be ignored. Therefore, for a proper interpretation of the measured data it is necessary to turn from lumped circuit analysis to wave analysis and transmission line theory. This means also growing sensitivity of results to inhomogeneity and anisotropy of specimens.

It follows that:

the relative complex permittivity ε_r^* of a dielectric material is proportional to the square of the ratio of the complex propagation coefficient $\gamma = \alpha + j\beta$ of an electromagnetic wave in the dielectric material to that $\gamma_0 = j\beta_0$ in absolute vacuum:

$$\varepsilon_r^* = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 \tag{2}$$

where λ_0 is the wavelength in free space and λ_c is the critical (or cut-off) wavelength of the mode used.

Notes 1. — With plane waves or TEM waves $\lambda_c = \infty$.

2. — The relative permittivity ε_r of ambient dry air free from carbon dioxide at 293 K and normal atmospheric pressure equals 1.000 53, so that in practice measurements of C_a, c_a and γ_a taken in air instead of C_0, c_0 and γ_0 taken in absolute vacuum can be used to determine the relative permittivity ε_r of solids and liquids with sufficient accuracy.

[1] Small compared with the wavelength within the dielectric.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

3. — La permittivité complexe (absolue) d'un diélectrique est égale au produit de sa permittivité relative complexe ε_r^* par la permittivité absolue du vide ε_0:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^*$$

Dans le système d'unités SI, la permittivité absolue s'exprime en farads par mètre (F/m); en outre la permittivité absolue du vide vaut:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \approx 8{,}854 \cdot 10^{-12} \approx \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ F/m} \tag{3}$$

2.2 *Permittivité relative ε'_r*

La permittivité relative ε'_r d'un diélectrique est la partie réelle de la permittivité complexe définie au paragraphe 2.1. D'après les équations (1) et (2):

$$\varepsilon'_r = \frac{C_x}{C_0} = \lambda_0^2 \left[\frac{\beta^2 - \alpha^2}{(2\pi)^2} + \frac{1}{\lambda_c^2}\right] \tag{4}$$

Note. — Dans le cas où les grandeurs diélectriques sont représentées par des nombres réels, c'est-à-dire: ε'_r et tg δ (voir le paragraphe 2.4) au lieu de ε'_r et ε''_r, on écrit alors en omettant le signe prime:

$$\varepsilon'_r = \varepsilon_r$$

2.3 *Indice de pertes ε''_r*

L'indice de pertes ε''_r d'un isolant est la partie imaginaire de la permittivité relative complexe définie au paragraphe 2.1. D'après les équations (1) et (2):

$$\varepsilon''_r = \frac{G_x}{j\omega C_0} = \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right)^2 \cdot \frac{\alpha\beta}{2} \tag{5}$$

2.4 *Facteur de dissipation diélectrique [1] tg δ*

Le facteur de dissipation diélectrique [1] tg δ d'un diélectrique est la tangente du déphasage (angle de pertes δ) entre le champ électrique appliqué E et le déplacement diélectrique D qui en résulte dans l'isolant, les deux étant fonctions sinusoïdales du temps à la même pulsation $\omega = 2\pi f$.

Etant donné que les composantes de E et de D dans le diélectrique ne peuvent en général être mesurées, on mesure le facteur de dissipation diélectrique d'un volume donné (c'est-à-dire du matériau diélectrique) comme le rapport de l'énergie électrique dissipée à 2π fois l'énergie électrique restituable accumulée dans ce volume par demi-période d'oscillation. Ce rapport est donc équivalent à:

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r} \tag{6}$$

L'inverse du facteur de dissipation tg δ est appelé facteur de qualité (Q):

$$\frac{1}{\text{tg } \delta} = Q$$

3. Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux isolants

La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique mesurés d'un matériau isolant donné sont déterminés par la polarisation diélectrique résultant dans l'éprouvette d'essai. Divers paramètres physiques externes ou internes tels que fréquence, température, intensité du champ électrique, rayonnements ionisants, humidité et autres impuretés, structure chimique, homogénéité et isotropie (« structures physique et chimique ») etc., affectent les valeurs mesurées.

---

[1] Dans certains pays, on utilise le terme « tangente de l'angle de pertes » de préférence à « facteur de dissipation diélectrique » parce que le résultat de mesure de pertes est donné sous forme de tangente de l'angle de pertes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

3. — The complex (absolute) permittivity of a dielectric material is the product of its complex relative permittivity ε_r^* and the electric constant (or permittivity of absolute vacuum) ε_0:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^*$$

In the SI system, the absolute permittivity has the unit farad per metre (F/m); furthermore, the electric constant ε_0 has the following value:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \approx \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ F/m} \tag{3}$$

2.2 *Relative permittivity ε'_r*

The relative permittivity ε'_r of a dielectric material is the real part of the complex relative permittivity, defined in Sub-clause 2.1. According to equations (1) and (2):

$$\varepsilon'_r = \frac{C_x}{C_0} = \lambda_0^2 \left[\frac{\beta^2 - \alpha^2}{(2\pi)^2} + \frac{1}{\lambda_c^2} \right] \tag{4}$$

Note. — If the dielectric quantities are noted as real numbers, i.e. ε'_r and tan δ (see Sub-clause 2.4) instead of ε'_r and ε''_r, the prime is omitted:

$$\varepsilon'_r = \varepsilon_r$$

2.3 *Loss index ε''_r*

The loss index ε''_r of a dielectric material is the imaginary part of the relative complex permittivity defined in Sub-clause 2.1. According to equations (1) and (2):

$$\varepsilon''_r = \frac{G_x}{j\omega C_0} = \left(\frac{\lambda_0}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{\alpha \beta}{2} \tag{5}$$

2.4 *Dielectric dissipation factor [1] tan δ*

The dielectric dissipation factor [1] tan δ of a dielectric material is the tangent of the phase angle (loss angle δ) between the applied field strength E and the resulting dielectric displacement D within the insulating material, both varying sinusoidally with time at one and the same angular frequency $\omega = 2\pi f$.

As the field components E and D within the dielectric in general are not accessible to measurement, the dielectric dissipation factor of a given volume (e.g. of the dielectric material) is measured as the ratio of the electric energy dissipated to 2π times that reversibly stored in that volume per one half-period of oscillation. This ratio is also equivalent to:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r} \tag{6}$$

The reciprocal of the dissipation factor tan δ is called quality factor (Q-factor):

$$\frac{1}{\tan \delta} = Q$$

3. Factors influencing dielectric properties of dielectric materials

The measured permittivity and dielectric dissipation factor of a given dielectric material are determined by the resulting dielectric polarization of the test specimen. Various external and internal physical parameters such as frequency, temperature, electrical field strength, ionizing radiation, moisture and other impurities, chemical structure, homogeneity and isotropy (" physical and chemical structure ") etc., affect the measured data.

---

[1] Certain countries refer to " loss tangent " in preference to " dielectric dissipation factor " because the result of the measurement of the loss is reported as the tangent of the loss angle.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Par conséquent, pour une interprétation cohérente des résultats d'essai, il est nécessaire de connaître l'état de l'éprouvette d'essai et de garder sous contrôle tous les paramètres ci-dessus.

Dans ce qui suit, on traite séparément les influences des paramètres: fréquence, température, humidité et autres impuretés, structures physique et chimique, ainsi que l'intensité du champ électrique, sur les propriétés diélectriques mesurées.

Note. — La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique mesurés dans la gamme de fréquences considérée dans la présente recommandation résultent surtout de la polarisation dipolaire due aux molécules polaires et de la polarisation d'origine atomique.

3.1 *Fréquence*

Etant donné que pour les matériaux techniques, ε'_r et tg δ ne sont pas constants dans la large gamme de fréquences où ils sont utilisés, il est nécessaire de mesurer le facteur de dissipation et la permittivité aux fréquences auxquelles le diélectrique sera utilisé. Pour des interpolations précises entre des valeurs mesurées à un petit nombre de fréquences, il est parfois possible d'obtenir un tracé de courbe ajusté par la méthode de Debye pour une zone d'absorption; on peut également utiliser efficacement un tracé Cole-Cole.

3.2 *Température*

L'aptitude d'un matériau diélectrique à être polarisé dépend également de la température. Par conséquent, les fréquences correspondant aux maximums de l'indice de pertes (et ainsi à ceux du facteur de dissipation diélectrique) varient avec la température. Il s'ensuit que le coefficient de température de l'indice de pertes peut être positif ou négatif selon la position du maximum de l'indice de pertes par rapport à la fréquence et à la température de mesure.

On attire particulièrement l'attention sur le fait que des changements irréversibles des propriétés diélectriques de la matière étudiée peuvent se produire au cours d'un bref intervalle de temps, par exemple pendant une mesure à des températures élevées. A ce sujet, voir également les paragraphes 3.3 et 3.4.

3.3 *Humidité et autres impuretés*

Le degré de polarisation est augmenté par l'absorption d'eau ou la formation d'un film d'eau à la surface du diélectrique, ce qui affecte la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité en courant continu. Le conditionnement des éprouvettes est, de ce fait, d'une importance capitale et la régulation du degré d'humidité, tant avant que pendant l'essai, est indispensable pour l'interprétation correcte des résultats d'essai.

Le degré de polarisation dépend aussi des impuretés introduites par contamination physique ou par des ingrédients chimiques, par exemple solvants ou plastifiants. Par conséquent, on doit s'assurer que le matériau à essayer n'est pas affecté ou ne l'est que de façon connue par les opérations de prélèvement d'éprouvettes ou bien par des traitements appliqués ensuite, par exemple à des températures élevées.

3.4 *Structure physique et chimique*

La direction du vecteur polarisation du champ électromagnétique par rapport à la structure de l'éprouvette exerce une forte influence sur le résultat de mesure. Des résultats de mesure différents peuvent être obtenus à cause du manque d'homogénéité (comme dans les stratifiés) ou de l'anisotropie, par exemple dans le cas des cristaux, sauf si toutes les mesures sur les éprouvettes sont effectuées en étant rapportées de la même façon à une caractéristique identifiable du matériau.

Note. — Les matériaux dont la structure présente une certaine périodicité, comme les stratifiés, peuvent avoir une réponse en fréquence qui diffère de celle de leurs constituants si la longueur d'onde est comparable à la période de cette structure.

Des éprouvettes ayant la même composition chimique mais des structures chimiques différentes comme des résines durcissables soumises à des conditions différentes de durcissement ou des polymères polymérisés à des degrés différents donneront également des résultats différents.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Therefore to interpret consistently the results obtained from a test, it is necessary to know the state of the test specimen and to keep all the afore-mentioned parameters under control.

In the following, the influences of frequency, temperature, moisture and other impurities, of physical and chemical structure and of electrical field strength on the measured dielectric properties are discussed separately.

Note. — The permittivity and dielectric dissipation factor measured within the frequency range covered by this recommendation mostly originate from dipole polarization due to polar molecules and from atomic polarization.

3.1 *Frequency*

As, for technical materials, ε'_r and tan δ are not constant over the wide frequency range over which they are used, it is necessary to measure the dissipation factor and the permittivity at those frequencies at which the dielectric material will be used. For accurate interpolation between data measured at a few frequencies, it may sometimes be possible to obtain a Debye curve to fit over an absorption region; also, effective use may be made of a Cole-Cole plot.

3.2 *Temperature*

The polarizability of a dielectric material depends also on its temperature. Therefore the frequencies of the loss index maxima (and correspondingly of the dielectric dissipation factor) vary with temperature. Accordingly, the temperature coefficient of loss index can be positive or negative depending on the position of the loss index maximum with respect to the measuring frequency and the test temperature.

Special attention is drawn to the fact that irreversible changes of the dielectric properties of the material investigated may occur in a short time, for example during a measurement at elevated temperatures. In this respect, see also Sub-clauses 3.3 and 3.4.

3.3 *Moisture and other impurities*

The polarizability is increased by absorption of water or by the formation of a water film on the surface of the dielectric, thus affecting the permittivity, the dissipation factor and the d.c. conductivity. Conditioning of test specimens is therefore of decisive importance and control of the moisture content, both before and during testing, is imperative if test results are to be interpreted correctly.

The polarizability is also subject to impurities introduced by physical contamination or chemical additives, for example solvents or plasticizers. Therefore care shall be taken to ensure that the material to be tested is not affected or affected only in a controlled way by the sampling procedures or by subsequent treatments e.g. at elevated temperatures.

3.4 *Physical and chemical structure*

The direction of polarization of the electromagnetic field relative to the structure of the specimen under test strongly influences the result of the measurement. Different results may be obtained due to inhomogeneity (as in laminates) or to anisotropy, for example in crystals, unless all measurements on the specimens are made in the same relation to some identifiable feature of the material.

Note. — Materials showing some periodicity in their structure such as laminates may have a frequency response different from that of their constituents if the wavelength is comparable with the period of this structure.

Specimens which have the same chemical composition but different chemical structures, e.g. curable resins subjected to different curing conditions or polymers of a different degree of polymerization, will also give different results.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

3.5 *Intensité de champ alternatif*

Généralement, la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique ne dépendent pas de l'intensité du champ tant qu'aucune décharge partielle ne se produit dans le diélectrique. Toutefois, dans le cas de matériaux ferroélectriques, un effet de variation en fonction du champ peut encore être observable aux fréquences inférieures du spectre hyperfréquence, mais il disparaît rapidement lorsque la fréquence croît.

4. Description des méthodes de mesure

4.1 *Principe des méthodes de mesure*

4.1.1 *Introduction*

La caractéristique des méthodes de détermination des propriétés diélectriques dans la gamme de fréquences considérée dans la présente recommandation réside dans le fait qu'aussi bien l'amplitude que la phase des composantes des champs magnétique et électrique varient d'un point à un autre de l'éprouvette et de l'appareil de mesure, du fait que la longueur d'onde du rayonnement est comparable aux dimensions de l'éprouvette et de l'appareil. Dans les matériaux non magnétiques, cet effet commence par se manifester vers quelques dizaines de MHz, et, à partir de 600 MHz et au-dessus, on ne peut plus le négliger. De ce fait, l'appareil de mesure et souvent aussi les grandeurs mesurées diffèrent de ceux utilisés dans les méthodes pour fréquences plus basses (Publication 250 de la CEI).

4.1.2 *Paramètres physiques disponibles pour les mesures*

La permittivité et les pertes agissent sur les effets suivants:

a) La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques et par conséquent leur longueur d'onde, dans un milieu donné, varient en sens inverse de la permittivité du milieu en question (voir paragraphe 2.1).

b) A toute discontinuité de la permittivité d'un milieu dans lequel se propage une onde, une fraction de l'énergie de l'onde est réfléchie; la valeur de cette fraction dépend du rapport des permittivités des deux côtés de la discontinuité.

c) Du fait que l'onde provoque une polarisation du milieu, elle perd de l'énergie de façon continue tout le long de son trajet de propagation, de sorte que l'amplitude de l'onde est affaiblie proportionnellement à l'indice de pertes du milieu.

Effets sans rapport avec la permittivité

d) Un faisceau de fréquence f donnée et de section donnée peut se propager non seulement suivant un seul mode mais suivant un certain nombre de modes de différentes vitesses et par conséquent avec de différentes longueurs d'onde. Les modes qui existent dans un cas particulier dépendent de la section du faisceau et du système d'excitation du faisceau.

e) En tout point où la section du faisceau varie, il se produit une réflexion de l'énergie et éventuellement un changement de mode (ce qui se traduit également par une perte d'énergie d'un mode donné). L'affaiblissement peut se produire même dans le vide du fait des pertes de diffraction du faisceau ou de la valeur finie de la conductivité de la structure guidant le faisceau. Afin de séparer les effets dus aux propriétés du matériau de ceux dus aux perturbations indésirables du champ de l'onde d'essai et, par conséquent, d'obtenir des résultats cohérents et reproductibles, il est important d'utiliser dans l'appareil de mesure un système de transmission uniforme, c'est-à-dire ne comportant pas de discontinuités importantes pouvant donner lieu à des réflexions ou à des pertes. Les propriétés du système même doivent être bien connues aux fréquences de mesure et, par conséquent, ne pas varier du tout ou ne varier que d'une façon prévisible après insertion de l'éprouvette. On ne doit utiliser que des dispositifs de mesure simples, à la fois pour réduire le nombre d'incertitudes sur les conditions d'essai et pour simplifier les calculs.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

3.5 *A.C. — Field strength*

In general, permittivity and dielectric dissipation factor are independent of field strength so long as no partial discharge occurs in the dielectric. With ferro-electric bodies, however, a field-dependent effect may still be observable at the lower microwave frequencies, but it rapidly vanishes as the frequency increases.

4. Survey on measuring methods

4.1 *Principles of measuring methods*

4.1.1 *Introduction*

The characteristic feature of methods for the determination of dielectric properties in the frequency range covered by this recommendation is that the electric and magnetic components of the field vary both in amplitude and phase from point to point of the specimen and of the measuring apparatus, because the wavelength of the radiation is comparable with the dimensions of the specimen and the apparatus. In non-magnetic materials, this effect first becomes obvious in the tens-of-MHz region and can no longer be ignored from about 600 MHz upwards. The measuring apparatus, and often the measured quantities too, therefore differ from those used in the methods for lower frequencies (IEC Publication 250).

4.1.2 *Physical effects available for measurement*

The permittivity and loss govern the following effects:

a) The propagation velocity of electromagnetic waves, and hence their wavelength within a given medium, is related inversely to the permittivity of the medium in question (see Sub-clause 2.1).

b) At any discontinuity of the permittivity of a medium transmitting a wave, a fraction of the energy of the wave is reflected; the magnitude of the fraction depends on the ratio of the permittivities at the two sides of the discontinuity.

c) Because the wave polarizes the medium, energy is lost continuously along its path of travel; the wave amplitude is therefore attenuated in proportion to the loss index of the medium.

Effects not related to permittivity

d) A beam of given frequency f and of given cross-section may propagate not only in one mode but in a variety of modes of different velocities and hence different wavelengths. The modes which exist in a particular case depend on the beam cross-section and on the beam-launching system.

e) Reflection of energy and/or mode conversion (which also results in loss of energy in a given mode) takes place at any point at which the beam cross-section changes. Attenuation may still occur even in absolute vacuum due to diffraction losses from the beam or to the finite conductivity of the beam-guiding structure.

In order to separate the effects of the material properties from those of unwanted disturbances of the test-wave field, and thus obtain consistent and reproducible results, it is important to use for the measuring apparatus a uniform transmission system, that is one in which there are no significant discontinuities to cause reflections or losses. The properties of the system itself must be well known at the measuring frequency, and must either not change at all or change only in a predictable manner, after insertion of the test specimen. Only simple test arrangements should be used, both to reduce the number of uncertainties concerning the test conditions and to simplify the calculations.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

4.2 *Dispositif d'essai*

L'appareil dans lequel on dispose l'éprouvette d'essai peut être:

4.2.1 *Un appareil à résonance*

Une portion uniforme d'une voie de transmission est mise en court-circuit à ses deux extrémités et mise en couplage lâche avec un générateur et un récepteur. On obtient le maximum de transfert d'énergie du générateur ou du récepteur lorsque les courts-circuits sont séparés par un multiple de la demi-longueur d'onde à la fréquence de mesure. Des détails à ce sujet (« Méthode de résonance ») seront donnés dans la deuxième partie de la Publication 377 (à l'étude). Les résultats sont obtenus sous forme de valeurs de Q (voir paragraphe 2.4) de variation de fréquences ou de dimensions suivant que, pour rétablir la résonance après insertion de l'éprouvette, on a maintenu constantes soit les dimensions du résonateur soit la fréquence de mesure.

Note. — Etant donné que cette méthode fait appel à des réflexions multiples du faisceau, elle convient particulièrement à la mesure des facteurs de dissipation les plus faibles, même dans le cas de petites quantités du matériau d'essai. Pour obtenir la plus haute sensibilité possible, on peut utiliser des résonateurs fixes. De tels appareils ne peuvent être utilisés qu'à une seule fréquence qui dépend dans une certaine mesure des formes, des dimensions et des propriétés diélectriques de l'éprouvette d'essai.

4.2.2 *Ligne de transmission ou appareil à pont*

Une portion uniforme de ligne de transmission est mise en court-circuit à l'une de ses extrémités, la seconde étant adaptée à son impédance caractéristique. Les résultats sont obtenus sous forme d'impédance d'entrée (c'est-à-dire d'angle de phase et de coefficient de réflexion) d'une partie de la section qui est complètement remplie du matériau en essai. De ce fait, la méthode est également connue sous le nom de « Méthode de mesure d'impédance d'entrée » et des détails sur la mesure seront donnés dans la troisième partie de la Publication 377 (à l'étude).

Note. — Les méthodes de mesure de l'impédance d'entrée s'adaptent facilement à toute fréquence dans la bande passante du système de transmission utilisé et de ce fait présentent des propriétés de large bande. Etant donné qu'on utilise une seule réflexion sur l'éprouvette, elles sont toutefois limitées à la mesure de facteurs de dissipation qui ne sont pas trop faibles.

4.2.3 *Méthodes d'espace libre*

Une section de transmission homogène s'étend sans conditions aux limites entre le générateur et le récepteur (ou bien elle est adaptée à son impédance caractéristique à ses deux extrémités). Lorsqu'une éprouvette est introduite dans la ligne, on obtient des résultats sous forme d'angle de diffraction ou de réfraction du faisceau et de coefficient d'affaiblissement. Etant donné que la méthode fait appel aux ondes progressives et qu'elle est largement utilisée dans le domaine du rayonnement visible, on l'appelle « Méthode optique » (quatrième partie de la Publication 377, à l'étude).

Dans le cas où un faisceau de référence existe, on peut également utiliser les méthodes à ondes stationnaires. On obtient alors des résultats exprimés en facteur de transmission et en angle de phase. Cette méthode est appelée « Méthode de pont à transmission » et sera traitée dans la troisième partie de la Publication 377 (à l'étude).

Notes 1. — Les méthodes optiques, qui ne sont applicables dans le cas de faisceaux non guidés que si les effets de bords sont négligeables, exigent de grandes quantités de matériaux d'essai (mesure faite par référence à la longueur d'onde de mesure). Par conséquent, les méthodes optiques ne deviennent généralement applicables qu'à partir de 30 GHz environ. Leur supériorité sur toutes les autres méthodes croît avec la fréquence en raison des pertes intrinsèques plus faibles et du fait que la mesure ne porte pas sur une longueur (qui présente l'inconvénient d'avoir une faible valeur lorsque la longueur d'onde est petite) mais sur un angle qui ne dépend pas sensiblement de la longueur d'onde.

2. — Les mesures par transmission sont particulièrement recommandées dans le cas des éprouvettes de haute permittivité.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

4.2 *Test arrangement*

The apparatus in which the test specimen is inserted may consist of:

4.2.1 *Resonance apparatus*

A uniform transmission section is short-circuited at both ends and loosely coupled to a generator and receiver. Maximum energy transfer between generator and receiver is established when the separation of the short-circuits is a multiple of one-half the working wavelength. Details of this (the " Resonance Method ") will be given in Part 2 of Publication 377 (under consideration). Results are obtained in terms of Q (see Sub-clause 2.4) and of frequency shift or dimensional shift to restore resonance after insertion of the test specimen, at constant resonator dimensions or constant test frequency respectively.

Note. — As this method employs multiple beam reflection, it is especially suited to the detection of the lowest dissipation factors, even with small quantities of test material. To achieve the highest sensitivity possible, fixed resonators may be used; such apparatus can be used only at a single frequency, which depends to some extent on the shape, size and dielectric properties of the test specimen.

4.2.2 *Transmission line or bridge apparatus*

A uniform transmission section is short-circuited at one end, the other being matched to its characteristic impedance. Results are obtained in terms of the input impedance (i.e. phase angle and reflection coefficient) of a part of the section which is filled (completely) with the test material. The method is therefore also known as the " Input Impedance Measuring Method ", and details of the measurement will be given in Part 3 of Publication 377 (under consideration).

Note. — Input impedance measuring methods are easily matched to any frequency within the transmission band of the transmission system used, thus exhibiting broad-band features. They are, however, limited to the detection of not too low dissipation factors, as only a single reflection from the specimen is employed.

4.2.3 *Free space methods*

A homogeneous transmission section extends indefinitely between generator and receiver (or is matched to its characteristic impedance at both ends). When the specimen is inserted into the line, results are obtained in terms of beam diffraction or reflection angle and attenuation coefficient. As the method employs travelling waves and is widely used in the optical field, it is referred to as the " Optical Method " (Part 4 of Publication 377, under consideration).

If a reference beam is established, standing wave methods also may be applicable. Results are then obtained in terms of the transmission coefficient and phase angle. This method is referred to as " Transmission Type Bridge Method " and will be dealt with in Part 3 of Publication 377 (under consideration).

Notes 1. — Optical methods, which are feasible with unguided beams only if fringing effects are negligible, require large quantities of test materials (as measured in terms of the operating wavelength). Therefore optical methods in general become applicable only from about 30 GHz upwards. With increasing frequency, they become increasingly superior to all other methods, due to lower inherent losses and because the measurement is not that of a length (which is an inconveniently short one when the wavelength is short) but that of an angle which is not sensitive to change of wavelength.

2. — Transmission measurements are especially recommended for high permittivity specimens.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Les trois méthodes des paragraphes 4.2.1 à 4.2.3 peuvent toutes faire usage de faisceaux non guidés. La méthode du paragraphe 4.2.1 ainsi que la méthode du pont à transmission du paragraphe 4.2.2 peuvent aussi utiliser des ondes guidées, le choix du mode de propagation dépend alors de la longueur d'onde, de la quantité de matériau disponible, de la précision nécessaire requise, du mode de prélèvement ainsi que des pertes à détecter. Généralement, on peut utiliser des ondes guidées jusqu'à 60 GHz environ et des ondes non guidées au-dessus de 30 GHz inclus.

Note. — Dans le cas des ondes guidées, on utilise les guide d'ondes avec le mode dominant afin d'éviter toute ambiguïté sur la propagation. En ce qui concerne la prescription ci-dessus, on utilise des lignes coaxiales depuis les fréquences les plus basses jusqu'à environ 7 GHz, des guides d'ondes creux de section transversale rectangulaire ou circulaire entre 4 GHz et 60 GHz. A partir d'environ 30 GHz, une propagation du type quasi optique devient réalisable.

4.3 *Choix de la méthode d'essai*

Le choix de la méthode d'essai dépend de divers facteurs qui peuvent s'opposer l'un à l'autre. Dans ce qui suit, ces facteurs sont examinés séparément.

4.3.1 *Fréquence ou longueur d'onde*

Aux fréquences élevées, il peut être difficile d'obtenir la précision mécanique suffisante si ce n'est pour les méthodes optiques (paragraphes 4.2.3 et 4.3.4). Aux fréquences plus basses, on préfère les ondes guidées car elles permettent de réduire les dimensions de l'appareil d'essai et des éprouvettes.

A cause de l'effet pelliculaire dans les conducteurs métalliques, en général l'affaiblissement dû aux guides d'ondes croît avec la fréquence, ce qui augmente la difficulté de détermination de l'indice de pertes des matériaux à faibles pertes.

Note. — A la même fréquence d'utilisation, les guides d'ondes creux présentent un affaiblissement inférieur à celui des lignes coaxiales. Dans le cas d'un guide d'ondes creux de section circulaire, le mode H_{01} présente la propriété re narquable d'une décroissance de l'affaiblissement lorsque la fréquence croît.

Conformément à ces considérations, on préfère les méthodes faisant usage d'ondes guidées aux fréquences jusqu'à environ 60 GHz tandis qu'on peut utiliser des faisceaux non guidés à partir de 30 GHz environ.

4.3.2 *Forme et quantité du matériau en essai*

Les éprouvettes doivent satisfaire aux conditions imposées par les dispositifs d'essai. Il en résulte qu'en général des opérations d'usinage sont nécessaires (voir les méthodes de mesure respectives). Etant donné que le matériau à essayer peut se présenter non sous forme massive mais seulement en plaque, feuille (film), tige (fil) ou tube, on peut choisir la méthode d'essai d'après la forme et la quantité de matériau d'essai existant. Une condition essentielle pour les mesures diélectriques est que l'éprouvette soit d'une seule pièce.

a) Dans le cas de méthodes de résonance, l'éprouvette peut remplir toute la section du faisceau (pour ce cas, voir le paragraphe *b* ci-dessous). Du fait de la haute sensibilité propre à ces méthodes, ces mesures sont également applicables dans le cas des éprouvettes en forme de sphère, tige ou disque, à condition d'employer un mode approprié. Toutefois, la sensibilité à de faibles variations de propriétés et la précision des résultats dépendent dans une large mesure du mode utilisé, du rapport du volume du résonateur à celui de l'éprouvette ainsi que de la précision de détermination de ce rapport.

b) Les méthodes de mesure d'impédance nécessitent des éprouvettes qui s'étendent sur toute la section du faisceau. Il est nécessaire de réaliser un ajustage étroit sur toutes les surfaces qui sont perpendiculaires aux lignes du champ électrique (c'est-à-dire aux conducteurs externe et interne de lignes coaxiales, à la face large dans le cas de guides rectangulaires creux).

Note. — Le problème d'ajustage est largement simplifié lorsqu'on utilise le mode H_{01} circulaire.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

All three methods, Sub-clauses 4.2.1 to 4.2.3, may use unguided beams. The method in Sub-clause 4.2.1 and the transmission type bridge method of Sub-clause 4.2.2 may also employ guided waves, the choice of the propagation mode depending on the operating wavelength, the quantity of test material available, the accuracy of the sampling procedure required and the losses to be detected as well. In general guided waves may be used up to about 60 GHz, unguided waves from 30 GHz upwards.

Note. — With guided waves in general, waveguides are operated in their fundamental mode to exclude ambiguity of propagation. With respect to the requirement stated above, coaxial guides are used from the lowest frequencies up to about 7 GHz, hollow guides of rectangular or circular cross-section between about 4 GHz and 60 GHz. From about 30 GHz upwards, quasi-optic propagation becomes feasible.

4.3 *Choice of the test method*

The choice of the test method is affected by various considerations which may conflict with each other. In the following, these considerations are treated separately.

4.3.1 *Frequency or wavelength*

At high frequencies it may be difficult to work to the required mechanical precision for any but optical methods (Sub-clauses 4.2.3 and 4.3.4). At lower frequencies, guided waves are preferred due to reduction of size of test apparatus and of test specimens.

Due to the skin-effect of metallic conductors, in general the attenuation of waveguides rises with increasing frequency, thus making determination of loss index of low loss materials increasingly difficult.

Note. — Hollow guides at the same working frequency show lower attenuation than coaxial guides. With circular hollow guides, the H_{01}-mode has the outstanding property that attenuation decreases as frequency increases.

In accordance with these considerations, methods using guided waves are preferred at frequencies up to about 60 GHz, whereas unguided beams may be used from about 30 GHz upwards.

4.3.2 *Test material shape and quantity*

Test specimens shall conform to the requirements of the test set-up. Therefore, in general, machining procedures are necessary (see the respective measuring methods). As the material to be tested may be available not in bulk but only in plate, sheet (film), rod (wire) or tube form, the test method may be chosen also with respect to the shape and quantity of test material being at hand. An essential condition for dielectric measurements is that the specimen be of a single piece.

a) For resonance methods, the specimens may fill the cross-section of the beam (for this case, see Sub-clause *b* below). Due to the high inherent sensitivity with these methods, the techniques are applicable also to ball, rod or disk shaped specimens so long as suitable modes are employed. Sensitivity to small variations in the properties and the accuracy of results, however, greatly depend on the mode used, the ratio of volumes of resonator and specimen including the accuracy in obtaining this ratio.

b) Impedance measuring methods need specimens which cover completely the beam cross-section. Tight fitting is required at all surfaces that are perpendicular to lines of electric field strength (i.e. inner and outer conductor of coaxial guides, broad side of rectangular hollow guides).

Note. — The fitting problem is much simplified when the circular H_{01}-mode is used.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

L'égalité de longueurs d'éprouvettes (afin d'obtenir la même sensibilité de mesure) implique que les appareils d'essai à ondes guidées avec leur mode dominant exigent moins de matériau d'essai que les appareils à ondes non guidées. De même, les lignes coaxiales exigent encore moins de matériau que dans le cas des guides d'ondes, à la même fréquence de mesure. Dans le cas du matériel à guides d'ondes creux, il est essentiel d'ajuster aussi étroitement que possible les dimensions de l'éprouvette à celles du guide.

c) Les méthodes optiques exigent des éprouvettes de grande section par rapport à celle du faisceau. L'épaisseur de l'échantillon doit être au moins égale à la demi-longueur d'onde de propagation.

4.3.3 *Propriétés diélectriques des matériaux en essai*

a) Permittivité

Les matériaux diélectriques de permittivité relative jusqu'à 100 environ peuvent être essayés par l'une quelconque des méthodes citées. Toutefois, on ne doit pas oublier qu'en raison de la présence du diélectrique des modes d'ordre plus élevé résultant d'imperfections quelconques peuvent se propager dans l'éprouvette, ce qui fausse les mesures. Pour des permittivités relatives à partir de 100 environ, il peut être préférable de recourir aux méthodes par transmission du fait qu'elles permettent d'obtenir une grande précision.

Dans le cas des matériaux anisotropes, les résultats obtenus dépendent de la position respective des axes de l'éprouvette par rapport à la direction de polarisation du faisceau. Par conséquent, l'éprouvette doit être usinée pour s'adapter aux conditions d'essai en ce qui concerne le mode utilisé.

b) Facteur de dissipation diélectrique et indice de pertes

Les méthodes de résonance sont les plus appropriées pour la mesure de très faibles pertes. Dans le cas des méthodes d'impédance, la limite inférieure est imposée par l'affaiblissement du système de transmission à vide.

Les limites supérieures de pertes à mesurer sont déterminées :

1) dans le cas de méthodes de résonance, par le désaccord de l'effet de résonance;

2) dans le cas des méthodes d'impédance, par une adaptation approximative de la partie de la ligne remplie par l'éprouvette et par les pertes propres de l'éprouvette. On peut revenir aux limites mesurables en réduisant le volume de l'éprouvette. Dans tous les cas, des pertes élevées affectent très sensiblement la précision que l'on peut atteindre dans les mesures de permittivité.

4.3.4 *Conditions mécaniques*

Les conditions mécaniques concernent la précision sur les dimensions ainsi que l'état de finition de surface, aussi bien du dispositif guidant l'onde que de l'éprouvette, et également la précision des mesures de longueurs ou d'angles.

a) La précision sur les dimensions est particulièrement importante lorsqu'on utilise du matériel à guides d'ondes non normalisé (par exemple cavités) ou lorsqu'on utilise des guides d'ondes près de leur fréquence de coupure ainsi que lors de l'adaptation des éprouvettes aux dimensions du guide d'ondes (les méthodes correspondantes seront traitées dans les deuxième et troisième parties de la Publication 377 [à l'étude]).

Note. — On ne doit pas utiliser les guides d'ondes à des fréquences inférieures à 1,25 fois la fréquence de coupure du mode considéré.

Dans le cas de méthodes basées sur les ondes non guidées, ces conditions s'appliquent au système d'excitation du faisceau aussi bien qu'à la planéité de la surface de l'éprouvette.

Le mouvement des parties mobiles doit être régulier et sans secousses.

Note. — Les tolérances sur les dimensions caractéristiques doivent être d'au moins $\pm \frac{\lambda_g}{1\,000}$, où λ_g est la longueur de l'onde qui se propage.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Having equal specimen length (in order to have equal sensitivity in measurement) means that test apparatus using guided waves in their fundamental mode requires less test material than that using unguided waves; likewise, coaxial waveguides require still less than hollow guides at the same working frequency. With waveguide equipment, it is essential to fit the test specimen to the waveguide dimensions as closely as possible.

c) Optical methods require test specimens whose cross-section is large compared to that of the beam. The specimen thickness should equal at least one-half of the propagating wavelength.

4.3.3 *Dielectric properties of test material*

a) Permittivity

Insulating materials having relative permittivities up to about 100 may be tested by any one of the methods enumerated. It must be borne in mind, however, that, due to the presence of the dielectric, higher order modes set up by any imperfections may propagate within the specimen, thus causing erroneous readings. With relative permittivities from about 100 upwards, transmission methods may be preferable by virtue of the high accuracy obtainable.

With anisotropic materials, the results obtained depend on the positioning of the axes of the specimens with respect to the polarization axis of the beam. Therefore, the specimens must be cut to match the test conditions with respect to the mode employed.

b) Dielectric dissipation factor and loss index

Resonance methods are most suited for detecting very small losses. With impedance methods, the lower limit is imposed by the attenuation of the empty transmission system.

The upper limits of losses measurable are set:

1) with resonance methods, by the off-set of the resonance effect, and
2) with impedance methods, by approximate matching of the line section filled with the specimen and by the specimen's own losses. Reduction of volume of the specimen will reestablish the measuring criterion. High losses, however, in any case will greatly affect the accuracy obtainable in permittivity measurements.

4.3.4 *Mechanical requirements*

Mechanical requirements concern the dimensional precision and the surface finish of the wave guiding structure as well as of the specimen, and also the accuracy to which length or angle readings can be taken.

a) Dimensional precision is especially important when non-standard waveguide equipment is being used (e.g. cavities) or if waveguides are used close to their cut-off frequency, and in matching of specimens to the waveguide dimensions (the respective methods will be dealt with in Part 2 and Part 3 of Publication 377 [under consideration]).

Note. — Waveguides should not be used below a frequency equalling 1.25 times the cut-off frequency of the respective mode.

With methods using unguided waves, these requirements apply to the beam launching system and to the surface flatness of the specimen as well.

All moving parts must move smoothly and without any back-lash.

Note. — Tolerances of characteristic dimensions shall conform to at least $\pm \frac{\lambda_g}{1\,000}$, where λ_g is the propagating wavelength.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

b) Un haut degré de finition de surface est nécessaire particulièrement dans le cas des structures métalliques de guidage du faisceau car, du fait d'un effet pelliculaire prononcé, toute irrégularité d'une surface lisse entraîne un nouvel accroissement de l'affaiblissement.

c) Dans toutes les méthodes à ondes stationnaires, la précision de la détermination de l'enveloppe de l'onde stationnaire doit être de l'ordre de $\pm \frac{\lambda_g}{1\,000}$, où λ_g est la longueur de l'onde qui se propage. Il s'ensuit que, dans la gamme des ondes millimétriques, il est recommandé de recourir aux méthodes optiques.

4.3.5 *Température*

La température exerce une influence sur la cohérence des mesures dans les méthodes utilisant des ondes guidées du fait qu'elle fait varier non seulement la longueur caractéristique du dispositif de mesure, mais aussi l'adaptation de l'éprouvette au guide d'ondes, et, dans le cas des guides d'ondes creux, elle fait également varier la longueur d'onde de coupure.

5. Mode opératoire

5.1 *Préparation des éprouvettes*

Les éprouvettes doivent être taillées dans un matériau massif ou préparées par une technique normalisée appropriée afin d'obtenir la forme voulue. Les mesures des dimensions de l'éprouvette effectuées ensuite doivent être faites avec précision, avec une tolérance de $\pm \left(\frac{\lambda_g}{1\,000} + 0{,}005 \text{ mm} \right)$.

5.2 *Conditionnement*

Le conditionnement doit être conforme aux spécifications applicables.

5.3 *Mesures*

Les mesures électriques sont effectuées conformément à la méthode utilisée, en suivant les parties correspondantes de la Publication 377 (à l'étude), ainsi qu'aux instructions des constructeurs du matériel utilisé.

6. Procès-verbal d'essai

Le procès-verbal d'essai doit donner les renseignements suivants, s'il y a lieu:

— Type et désignation de l'isolant et forme sous laquelle il est fourni. Mode de prélèvement, forme, dimensions de l'éprouvette et date du prélèvement. Les renseignements précis sur le traitement de l'éprouvette aux surfaces de contact sont également importants.
— Méthode et durée du conditionnement des éprouvettes.
— Température et humidité relative au cours de l'essai et température de l'éprouvette.
— Appareil de mesure et méthode d'essai appliquée.
— Puissance hyperfréquence appliquée.
— Fréquence appliquée ou longueur d'onde dans l'espace libre.
— Mode d'oscillation appliquée. (L'information sur la position de l'axe privilégié de l'éprouvette par rapport à la direction du champ électrique appliqué est très importante.)
— Permittivité relative ε_r (valeur moyenne).
— Facteur de dissipation tg δ ou indice de pertes diélectriques ε''_r (valeurs moyennes).
— Date de l'essai.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

b) High surface finish is required especially with all metallic beam guiding structures, as due to the pronounced skin effect any disturbance of a smooth surface will cause further increase of attenuation.

c) With all methods employing standing waves, determination of the standing wave pattern must be correct at least to a quantity of the order of $\pm \frac{\lambda_g}{1\,000}$, where λ_g is the propagating wavelength. Consequently, in the millimetre range of wavelengths, it is advisable to turn to optical methods.

4.3.5 *Temperature*

Temperature influences the consistency of measurements with methods using guided waves in that it changes not only the characteristic length of the measuring assembly, but also the match of the specimen to the waveguide and, with hollow guides, the cut-off wavelength as well.

5. Testing procedure

5.1 *Preparation of specimens*

The specimen shall be cut from the solid material or prepared by an appropriately standardized technique in order to obtain the desired shape. The subsequent measurements of the dimensions of the specimen shall be made accurately with a tolerance of $\pm \left(\frac{\lambda_g}{1\,000} + 0.005 \text{ mm}\right)$.

5.2 *Conditioning*

Conditioning shall be made in accordance with the relevant specifications.

5.3 *Measurement*

Electrical measurements are made in accordance with the method employed, following the respective parts of Publication 377 (under consideration) and with the instructions of the manufacturers of the equipment used.

6. Test report

In the test report, the following information shall be given when relevant:

— Type and designation of the insulating material as well as the form in which it is delivered. Method of sampling, shape, dimensions of the test specimen and date of sampling. Exact information on the treatment of the specimen at the contact areas is important.
— Method and duration of conditioning the specimens.
— Temperature and relative humidity during the test and temperature of the specimen.
— Measuring apparatus and test method applied.
— Applied microwave power.
— Applied frequency or free space wavelength.
— Applied wave mode. (Information on the position of a preferred axis of the specimen with respect to the direction of the electric field applied is very important.)
— Relative permittivity ε_r (average value).
— Dielectric dissipation factor tan δ or dielectric loss index ε''_r (average values).
— Date of test.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

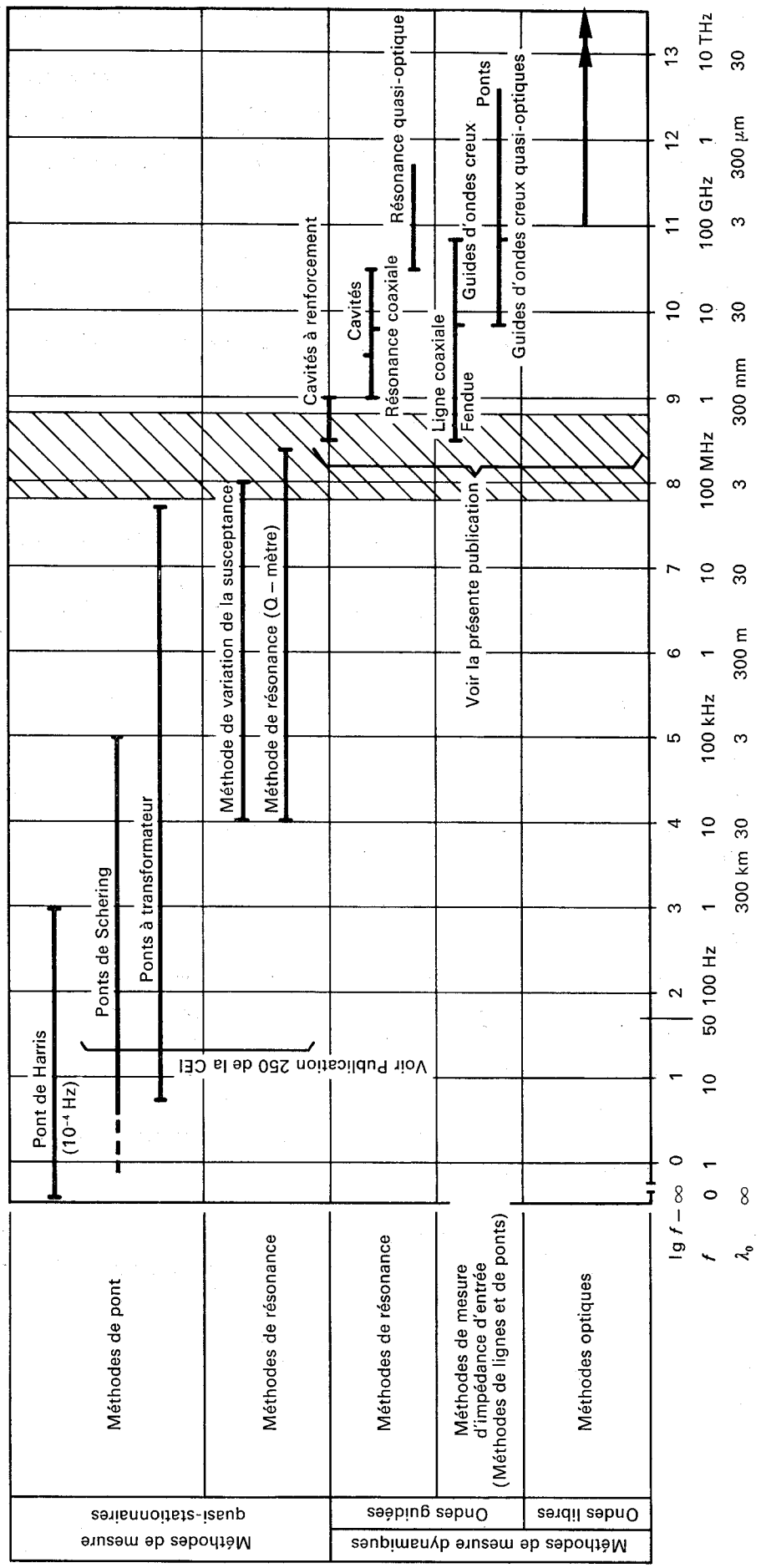

FIG. 1. — Méthodes de mesure en courant alternatif.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

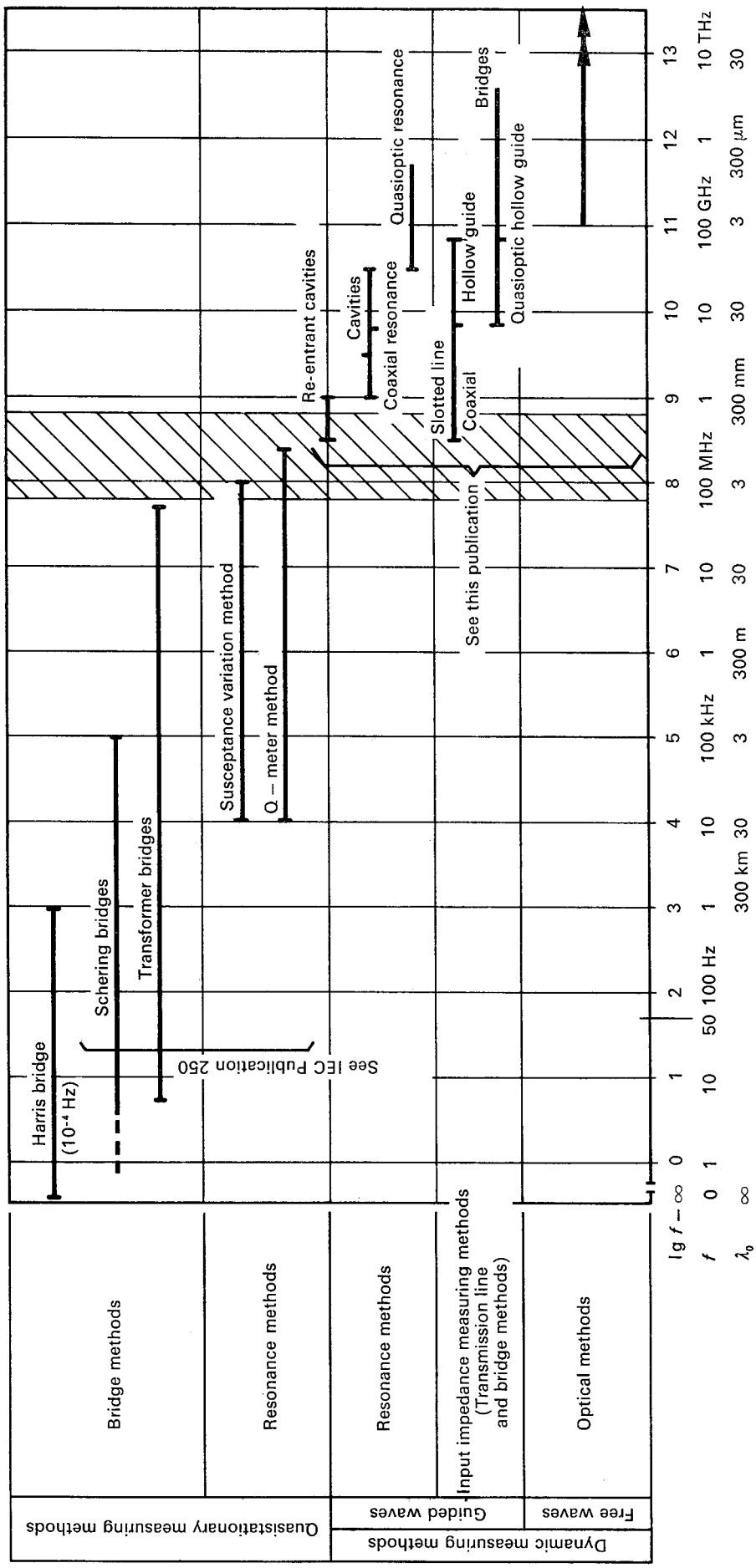

FIG. 1. — A.C. measuring methods.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

--`,,,`,,`-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

--`,,,``,,-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

ICS 17.220.99 ; 29.035.01

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale