

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Dielectric and resistive properties of solid insulating materials –
Part 2-3: Relative permittivity and dissipation factor – Contact electrode method
for insulating films – AC methods**

**Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides –
Partie 2-3 : Permittivité relative et facteur de dissipation – Méthode d'électrode
de contact pour films isolants – Méthodes en courant alternatif**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Dielectric and resistive properties of solid insulating materials –
Part 2-3: Relative permittivity and dissipation factor – Contact electrode method
for insulating films – AC methods**

**Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides –
Partie 2-3 : Permittivité relative et facteur de dissipation – Méthode d'électrode
de contact pour films isolants – Méthodes en courant alternatif**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.99, 29.035.01

ISBN 978-2-8322-8684-5

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols.....	7
3.1 Terms and definitions.....	7
3.2 Abbreviated terms and symbols	9
4 Principle of method.....	10
4.1 Principle of measurement.....	10
4.2 Edge effect of electrodes	11
5 Electrodes	11
5.1 Design and manufacture of electrodes	11
5.2 Edge effect of the measuring electrode	13
6 Samples	13
7 Measuring voltage	13
8 Environmental conditions for measurements.....	13
9 Measurement of thickness for films.....	14
10 Measurement procedure	14
11 Report	14
12 Repeatability, reproducibility and replicability	14
Annex A (normative) Correction method of measured permittivity and dielectric dissipation factor for a sample with scabrous surfaces.....	15
A.1 General.....	15
A.2 Physical model.....	15
A.3 Relationship between the measured permittivity and the real permittivity	16
A.4 Relationship between the measured dielectric dissipation factor and the real dielectric dissipation factor.....	21
A.5 Method of correction for the sample with scabrous surfaces.....	25
Annex B (informative) Suggestions for the manufacture of electrodes	26
B.1 General.....	26
B.2 Materials.....	26
B.3 Manufacture of electrodes.....	26
B.4 Evaluation methods of flatness and roughness.....	26
B.5 Resistance of the measuring electrode system.....	26
Bibliography.....	27
Figure 1 – Diagram of the three-electrode system.....	12
Figure A.1 – Schematic diagram of the profile including scabrous surfaces of sample and polished flat electrodes, with the density thickness and apparent thickness (mechanical thickness)	15
Figure A.2 – Physical model of the scabrous surfaces of the sample and polished flat electrodes.....	15

Figure A.3 – Equivalent circuits with the sample, the gap and the electrodes	16
Figure A.4 – Relationship between the measured permittivity, the real permittivity, the void ratio and the contact ratio.....	21
Figure A.5 – Relationship between the measured dielectric dissipation factor, the real dielectric dissipation factor, the void ratio and the contact ratio.....	25
Table 1 – Dimensional parameters of the three-electrode system and the relationship between the measured ϵ_x for the thickness of sample and the measured capacitance	12

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62631-2-3:2024

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**DIELECTRIC AND RESISTIVE PROPERTIES OF
SOLID INSULATING MATERIALS –****Part 2-3: Relative permittivity and dissipation factor –
Contact electrode method for insulating films – AC methods**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 62631-2-3 has been prepared by IEC technical committee 112: Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
112/631/FDIS	112/641/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

A list of all parts in the IEC 62631 series, published under the general title *Dielectric and resistive properties of solid insulating materials*, can be found on the IEC website.

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

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IMPORTANT – The "colour inside" logo on the cover page of this document indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

Measuring the relative permittivity and the dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) of thin insulating polymer films with a thickness of approximately 10 μm to 100 μm without any additional layer is important for insulation applications. There is currently a lack of suitable technology and standard for the measurement of the relative permittivity and dielectric dissipation factor of very thin single-layer polymer films. By using multilayer polymer films with 20 to 50 layers, it can be feasible to get the average value of the relative permittivity and dielectric dissipation factor of an insulating polymer film, but the effect of air gap inside should not be ignored. With metallized electrodes on the surface of the polymer film, it is possible to get acceptable results of the relative permittivity and dielectric dissipation factor of an insulating polymer film in research laboratory. This document provides the measuring technology and the test method for the relative permittivity and dielectric dissipation factor of thin insulating polymer films without any additional layer or metallization on the sample, under technical frequency.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62631-2-3:2024

DIELECTRIC AND RESISTIVE PROPERTIES OF SOLID INSULATING MATERIALS –

Part 2-3: Relative permittivity and dissipation factor – Contact electrode method for insulating films – AC methods

1 Scope

This part of IEC 62631 specifies the measuring technology and the test method for the relative permittivity and dielectric dissipation factor of thin single layer insulating polymer film without any additional metallization on the sample surface. The adaptive thickness range is approximately 10 μm to 100 μm . The proposed frequency is the power frequency (50 Hz or 60 Hz), and it is also suitable in the technical frequency range from 1 Hz to 1 MHz.

2 Normative references

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

IEC 60674-2, *Specification for plastic films for electrical purposes – Part 2: Methods of test*

ISO 4593, *Plastics – Film and sheeting – Determination of thickness by mechanical scanning*

ISO 14644-1, *Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*

ISO 21920-2, *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*

3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols

3.1 Terms and definitions

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

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

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

3.1.1

thin insulating polymer film

insulating polymer film, planar, even and smooth, without any additional layer, with a 10 μm to 100 μm uniform thickness

3.1.2

AC bridge

instrument that uses the balance method to measure the capacitance and loss of a capacitor sample under AC voltage

EXAMPLE Capacitor bridge.

Note 1 to entry: The AC bridge usually works under power frequency with a very high accuracy and with a low applied voltage.

Note 2 to entry: In some special cases, the AC bridge can also work under a technical frequency.

3.1.3

impedance material analyser

instrument that uses the AC current method to measure the capacitance and dielectric loss of a capacitor

Note 1 to entry: The impedance material analyser works under a relatively low voltage and with a large band range, but its accuracy is usually relatively low.

Note 2 to entry: The impedance material analyser uses five terminals to measure the device parameters and therefore a suitable adaptor for the three-electrode sample is necessary.

3.1.4

power frequency

frequency used for the power system, which is usually of 50 Hz or 60 Hz

3.1.5

apparent thickness

mechanical thickness

thickness of a sample measured by a mechanical apparatus, which is equivalent to the "bulking thickness" specified in IEC 60674-2

3.1.6

density thickness

thickness of a sample measured from the density of the sample, which is equivalent to the "gravimetric thickness" specified in IEC 60674-2

3.1.7

void ratio

α

percentage increase between the apparent thickness and the density thickness, which is dependent on the surface roughness

Note 1 to entry: For a sample with a scabrous surface, the apparent thickness and the density thickness are different.

Note 2 to entry: The void ratio α is expressed in per cent (%) and is defined by Formula (1):

$$\alpha = \frac{d_x - d_d}{d_x} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

where

d_x is the apparent thickness of the sample in μm ;

d_d is the density thickness of the sample in μm .

Note 3 to entry: The apparent thickness and the density thickness should be measured by using the same sample in accordance with ISO 4593.

3.1.8 contact ratio

η

percentage ratio of the contact area over the total area

Note 1 to entry: Samples with scabrous surfaces cannot have a perfect contact with the high flatness and low roughness surface of the electrode. The contact area is the area between the dielectric material and the electrode that remain in contact. The total area is the apparent area of the sample, usually equal to the area of the electrode.

Note 2 to entry: The contact ratio is dependent on the sample surface roughness and is defined by Formula (2):

$$\eta = \frac{S_{\text{contact}}}{S_{\text{total}}} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

where

S_{contact} is the contact area;

S_{total} is the total area;

η is the contact ratio in %.

3.1.9 surface roughness of sample

R_a

arithmetic mean height in μm of the sample profile expressed by Formula (3) in accordance with ISO 21920-2

$$R_a = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} |z(x)| dx \quad (3)$$

where

l_e is the evaluation length of the sample profile;

$z(x)$ is the function that describes the height of the assessed scale-limited profile.

3.2 Abbreviated terms and symbols

AC alternating current

HRC hardness Rockwell C scale

RH relative humidity

α void ratio

d_x apparent thickness of the sample in μm

d_d density thickness of the sample in μm

η contact ratio

R_a surface roughness of sample in μm

S area of the electrode

S_{contact} contact area

S_{total} total area

l_e evaluation length of the sample profile

$z(x)$ function that describes the height of the assessed scale-limited profile

$\dot{C}_x$	complex capacitance
C_x	real part of the complex capacitance
ε_0	electric constant
$\dot{\varepsilon}_x$	complex permittivity
ε_x	relative permittivity
ε'	real part of the complex permittivity
ε''	imaginary part of the complex permittivity
d_x	thickness of the planar film sample
$\tan \delta$	dielectric dissipation factor
k	ratio between the measured dielectric dissipation factor and the real dielectric dissipation factor
g	gap between the guarded electrode and the measuring electrode

4 Principle of method

4.1 Principle of measurement

The complex capacitance $\dot{C}_x$ of the dielectric sample with the electrode can be obtained by using an AC bridge or an impedance material analyser. For a planar, even and smooth film sample, the relationship between the complex permittivity $\dot{\varepsilon}_x$ and the complex capacitance $\dot{C}_x$ is expressed by Equation (4).

$$\dot{C}_x = \frac{\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_x S}{d_x} \quad (4)$$

where d_x is the thickness of the planar film sample, S is the area of the electrode and ε_0 is the electric constant (also called permittivity of vacuum). Therefore, the complex permittivity of the dielectric materials can be derived as shown in Equation (5).

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{d_x}{\varepsilon_0 S} \dot{C}_x. \quad (5)$$

The relationship of the complex permittivity $\dot{\varepsilon}_x$ with the real part ε' , imaginary part ε'' and dielectric dissipation factor $\tan \delta$ is expressed as shown in Equation (6).

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_x = \varepsilon' + j\varepsilon'' \\ \tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \\ \varepsilon_x = \varepsilon' \end{cases}, \quad (6)$$

where the real part ε' is called relative permittivity ε_x , and the imaginary part ε'' is called dielectric loss index. By using an AC bridge, the dielectric dissipation factor $\tan \delta$ and the real part C_x of the complex capacitance $\dot{C}_x$ can be measured directly. The relative permittivity ε_x of the dielectric material can be obtained by Equation (7).

$$\varepsilon_x = \frac{d_x}{\varepsilon_0 S} C_x \quad (7)$$

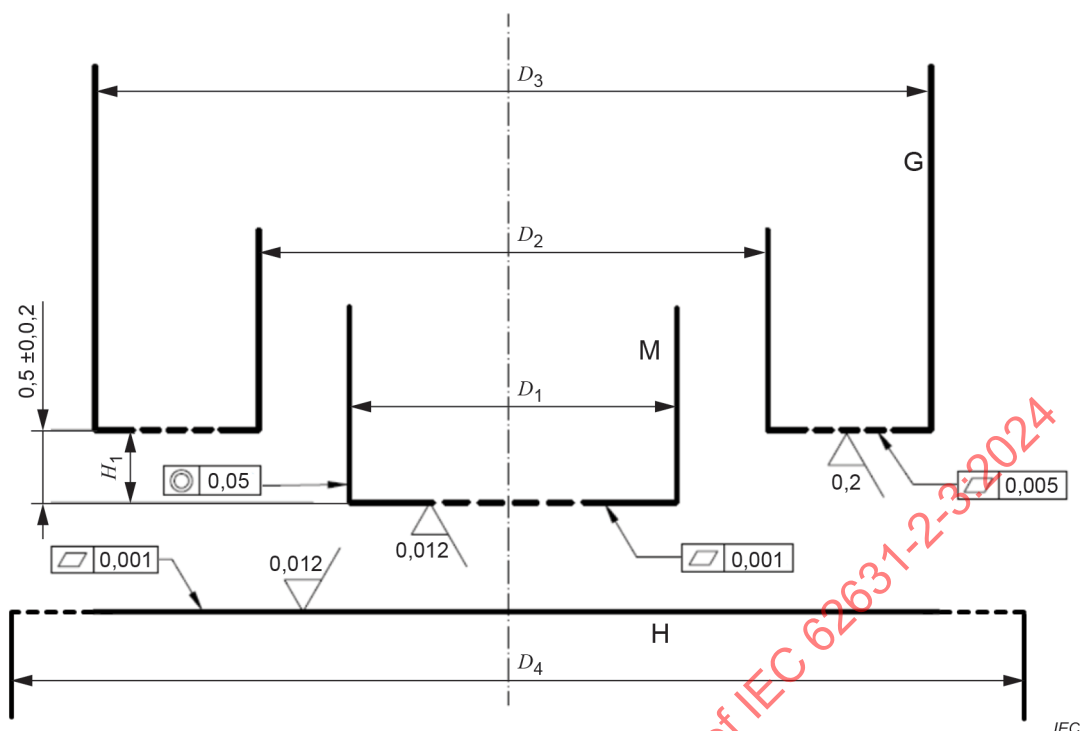
4.2 Edge effect of electrodes

Owing to manufacturing limitations, the gap between the measuring electrode and the guard ring will be more than 0,5 mm. Dielectric measurements are subject to the edge effect of electrodes. In the case of samples having a thickness equal to or greater than 0,5 mm, the guard ring electrode has been found effective to reduce the edge effect of electrodes. However, for samples having a thickness less than 0,5 mm, the guard ring electrode does not significantly reduce the edge effect since the gap between the measuring electrode and the guard ring is much bigger than the thickness of the sample. In this case, owing to the limitation of mechanical manufacture, the gap between the measuring electrode and the guard ring will be much bigger than the thickness of the sample. See also 5.2.

5 Electrodes

5.1 Design and manufacture of electrodes

The design and manufacture of the measuring electrodes is the most critical parameter of this test method. The measuring system is composed of three electrodes, a measuring electrode (M), a guard electrode (G) and a high-voltage electrode (H). The allowed dimensions of the electrodes are provided in Figure 1 and Table 1. The measuring electrode (M) and the high-voltage electrode (H) shall have a surface roughness of less than 0,012 μm and a relative flatness less than 0,5 μm . It shall be noted that the provided surface conditions are very important to ensure adequate contact between the electrodes and the sample. Since the thickness of the sample is relatively thin, the diameter of the measuring electrode should not be too big to avoid a large, measured capacitance that would make the selection of the measuring instrument difficult.



Key

- D_1 diameter of the measuring electrode M
 D_2 inner diameter of the guarded electrode G
 D_3 outer diameter of the guarded electrode G
 D_4 diameter of the high-voltage electrode H

Figure 1 – Diagram of the three-electrode system

In Figure 1, the gap between the guarded electrode and the measuring electrode, which can be calculated by $g = (D_2 - D_1)/2$, is kept to about 1 mm.

Table 1 – Dimensional parameters of the three-electrode system and the relationship between the measured ε_x for the thickness of sample and the measured capacitance

D_1 mm	D_2 mm	D_3 mm	D_4 mm	H_1 mm	ε_x
$37,93 \pm 0,05$	$39,93 \pm 0,1$ or $40,0 \pm 0,1$	60	70	$0,5 \pm 0,02$	$C_x \text{ (pF)} \cdot d_x \text{ (mm)} / 10$ or $C_x \text{ (nF)} \cdot d_x \text{ (}\mu\text{m)} / 10$

The material of electrode M and electrode H shall satisfy the following conditions: good conductivity, non-ferromagnetic, anti-rust, and enough rigidity and hardness. More information about the manufacture of electrodes can be found in Annex B.

The material of electrode G can be a metallic material with good conductivity, non-ferromagnetic, anti-rust, like stainless steel or brass with surface plating protection, etc.

5.2 Edge effect of the measuring electrode

The sample thickness shall be between 10 μm and 100 μm , with the diameter D_1 (37,93 $\pm$ 0,05) mm of electrode M. Therefore, the ratio of the capacitance due to the edge effect of the measuring electrode to the measured capacitance of the sample is not more than 10^{-3} . Since the measurement error caused by the edge effect is much smaller than the errors caused by other factors, such as the measuring error of the thickness and the measurement error of the electrode diameter, for the measurements described in this document, the edge effect error can be neglected.

6 Samples

The sample is a polymer film without any additional layer and having a thickness between 10 μm and 100 μm . The sample shall have a uniform thickness, a soft, planar, even and smooth surface without an evaporated metallization electrode on it. The sample dimension shall be larger than the diameter of the electrode H, approximately 80 mm² $\times$ 80 mm². If the surface roughness R_a of the sample is more than 0,05 μm or, if the void ratio of the sample is more than 1,0 %, except for porous or cellular materials, the measurement results shall be corrected by the method described in Annex A.

The sample is placed between the measuring electrode M and the high-voltage electrode H. The sample is not shown in Figure 1, because it is very thin compared to the sizes of the electrodes.

7 Measuring voltage

The voltage applied on the sample shall ensure that the electric field between electrode H and electrode M is below 10 kV/mm. To minimize the effect of non-linear phenomena, the applied electric field should preferably be $\leq$ 3 kV/mm. If this is not possible, higher electric fields can be used but it should be noted that non-linear phenomena may affect the measurements. If an AC bridge is used, it is suggested that the voltage for the 20 μm sample be kept below 100 V. When using an impedance material analyser, although the voltage applied on the sample is relatively low, its sensitivity and accuracy are also relatively low, therefore the use of an AC bridge is recommended for measurements.

8 Environmental conditions for measurements

To avoid any dust and any fine particles between the electrode and the sample, the measurements shall be carried out in a clean chamber or in a clean room, in accordance with ISO 14644-1.

To avoid any air gap or air bubble that may affect the contact condition between the electrode and the sample, the measurements shall be performed in a vacuum condition. For the purpose of this test, a vacuum condition with 1 Pa (0,007 5 Torr) has been found to be suitable.

NOTE Although no requirements are provided for the temperature conditions of the testing environment, if the temperature is not a known factor potentially affecting the result of the sample under test, the test is initially performed at ambient temperature.

The testing environment relative humidity shall be less than 50 %. Before the measurement, the sample should be immersed in absolute ethanol for 2 s to 3 s then dried for use.

To ensure adequate contact conditions between the sample and the electrodes a pressure between 20 kPa and 50 kPa shall be applied on the sample.

9 Measurement of thickness for films

The thickness of the sample shall be measured in accordance with ISO 4593 and IEC 60674-2.

10 Measurement procedure

Five test specimens are prepared for the required treatments. Each specimen shall be cleaned with absolute ethanol in a clean chamber to ensure that there are no visible particles on the specimens. After further conditioning for 6 h under standard dry conditions (18 °C to 28 °C and < 15 % RH), the surface of the specimens shall be checked again for the presence of particles.

Then relative permittivity and dielectric dissipation factor are acquired by the following steps:

- 1) Measure the thickness for each sample.
- 2) Measure the surface roughness of the samples if necessary.
- 3) Measure the apparent thickness and the density thickness of the samples.
- 4) Measure the capacitance and the dielectric dissipation factor for each sample.
- 5) Then permittivity and dielectric dissipation factor are acquired by Equation (5) and Equation (6).
- 6) If the void ratio of the film sample α is more than 0,01, correct the measured results by using the method in Annex A.

11 Report

The report shall include the following information:

- name, identification, materials specification, colour, source and manufacturer's code of the specimen;
- temperature of the test specimen and relative humidity of the measuring environment;
- condition of the sample pre-treatment;
- vacuum for the measurement;
- measuring instrument identification and accuracy of test equipment;
- location and date of testing;
- test voltage and test frequency;
- mechanical pressure on the sample measuring electrode in Pascal;
- number of samples;
- numbers of tests, date and time of tests;
- each single value and the average of capacitance, permittivity and dielectric dissipation factor respectively;
- any other important observations, if applicable.

12 Repeatability, reproducibility and replicability

The measurements of the relative permittivity and the dielectric dissipation factor are dependent on numerous aspects.

Experiences have shown that measurements are valuable if the repeatability, the reproducibility and the replicability for the relative permittivity are within 5 % and if the dielectric dissipation factor is within 20 % of the measured value.

Annex A (normative)

Correction method of measured permittivity and dielectric dissipation factor for a sample with scabrous surfaces

A.1 General

For a sample with scabrous surfaces, in the case where the void ratio α is bigger than 0,01, it is necessary to correct the measured results because the contact between the sample surface and the electrodes is not so good.

A.2 Physical model

The contact condition between the scabrous surfaces of the sample and the polished flat electrodes is shown in Figure A.1. The apparent thickness (mechanical thickness) is bigger than the density thickness. The void ratio α is determined from the apparent thickness and the density thickness.

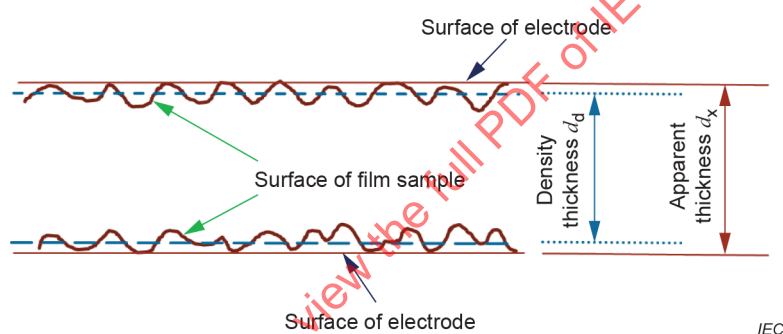


Figure A.1 – Schematic diagram of the profile including scabrous surfaces of sample and polished flat electrodes, with the density thickness and apparent thickness (mechanical thickness)

The physical model for the scabrous surfaces of the sample and polished flat electrodes is shown in Figure A.2. The air gap between the sample and the electrodes can be considered the equivalent concentrated gap with the thickness d_0 , and its surface area is determined by the contact ratio η . The area of the equivalent concentrated gap is $(1 - \eta)S$, where S is the area of the measuring electrode in Equation (4) and Equation (7).

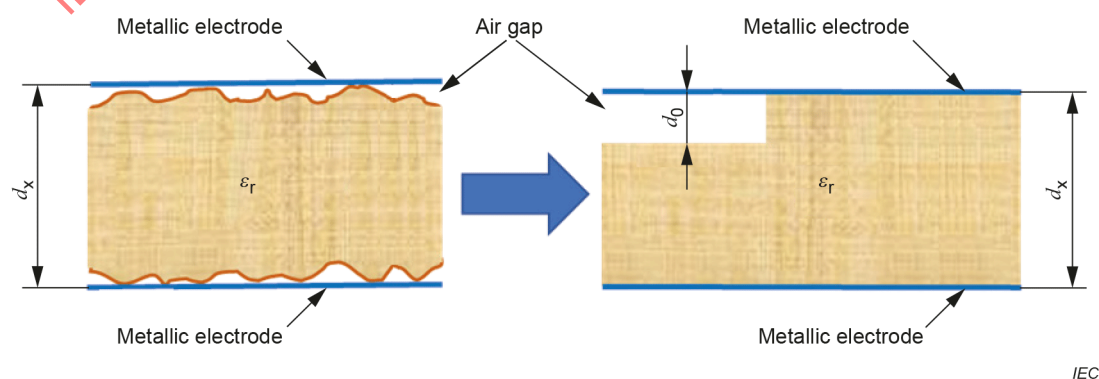


Figure A.2 – Physical model of the scabrous surfaces of the sample and polished flat electrodes

Based on the physical model in Figure A.2, the diagrams of the equivalent circuit are shown in Figure A.3.

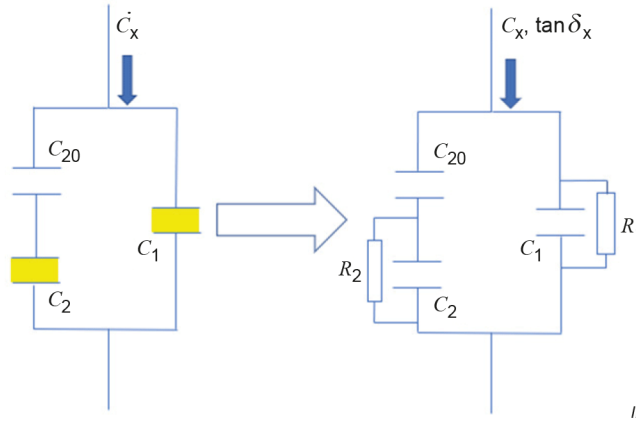


Figure A.3 – Equivalent circuits with the sample, the gap and the electrodes

A.3 Relationship between the measured permittivity and the real permittivity

From the analysis of the equivalent circuit, the following relationship between the measured permittivity ϵ_x and the real permittivity ϵ_r shown in Equation (A.1) can be derived. The relationship between the measured $\tan \delta_x$ and the real $\tan \delta$ is shown in Equation (A.2). In Equation (A.1) and Equation (A.2), α is the void ratio of the film sample, η is the contact ratio, with the limited condition: $\alpha \leq 1 - \eta$.

$$\epsilon_x = \frac{\left(\alpha^2 \eta \epsilon_r^2 + \alpha \eta^2 \epsilon_r - 2 \alpha \eta \epsilon_r + \alpha \epsilon_r \right) \tan^2 \delta + \left(\alpha^2 \eta \epsilon_r^2 - 2 \alpha^2 \eta \epsilon_r - \alpha \eta^2 \epsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + \alpha \epsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2 \eta + 1 \right) \epsilon_r}{\left(\alpha^2 \epsilon_r^2 \tan^2 \delta + \alpha^2 \epsilon_r^2 - 2 \alpha^2 \epsilon_r - 2 \alpha \eta \epsilon_r + \alpha^2 + 2 \alpha \eta + 2 \alpha \epsilon_r + \eta^2 - 2 \alpha - 2 \eta + 1 \right)} \quad (A.1)$$

$$\tan \delta_x = \frac{\left[\alpha^2 \eta \epsilon_r^2 \tan^2 \delta + (\alpha^2 \eta \epsilon_r^2 - 2 \alpha^2 \eta \epsilon_r - 2 \alpha \eta^2 \epsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + 2 \alpha \eta \epsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2 \eta + 1) \right] \tan \delta}{\left(\alpha^2 \eta \epsilon_r^2 + \alpha \eta^2 \epsilon_r - 2 \alpha \eta \epsilon_r + \alpha \epsilon_r \right) \tan^2 \delta + \alpha^2 \eta \epsilon_r^2 - 2 \alpha^2 \eta \epsilon_r - \alpha \eta^2 \epsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + \alpha \epsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2 \eta + 1} \quad (A.2)$$

Equations (A.1) and (A.2) are very complex, but if the higher order term of $\tan \delta$ is ignored, they can be simplified to Equations (A.3) and (A.4) as follows:

$$\epsilon_x = \epsilon_r \frac{1 - \eta + \alpha \eta (\epsilon_r - 1)}{1 - \eta + \alpha (\epsilon_r - 1)} \quad (A.3)$$

$$\epsilon_r = \frac{(\eta + \alpha \eta + \alpha \epsilon_x - 1) \pm \sqrt{(\eta + \alpha \eta + \alpha \epsilon_x - 1)^2 - 4 \alpha \eta (\eta + \alpha - 1) \epsilon_x}}{2 \alpha \eta} \quad (A.4)$$

The result is the same as the result of the equivalent circuit without taking account of the dielectric loss $\tan \delta$.

The simplified Equation (A.5) and Equation (A.6) for the relationship between the measured $\tan \delta_x$ and the real $\tan \delta$ are as follows:

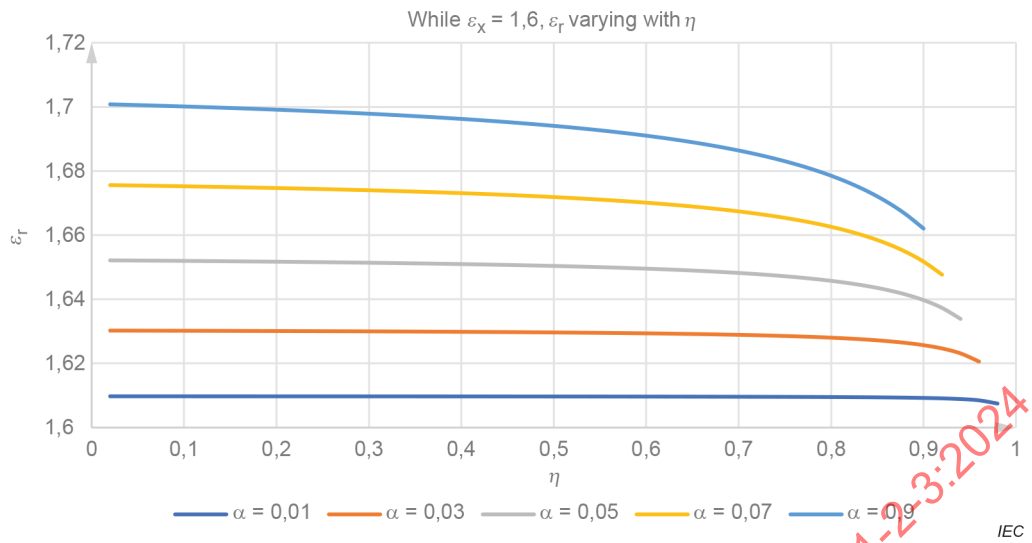
$$\tan \delta_x = \frac{(\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - 2\alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + 2\alpha \eta \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1) \tan \delta}{\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - \alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + \alpha \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1} \quad (\text{A.5})$$

$$\tan \delta = \left(1 + \frac{\alpha \varepsilon_r (1 - \eta)^2}{\alpha \eta (\varepsilon_r - 1)^2 + \eta + 2 \cdot \varepsilon_r - 2\eta \varepsilon_r} + (1 - \eta)^2 - \alpha \right) \tan \delta_x = k \tan \delta_x \quad (\text{A.6})$$

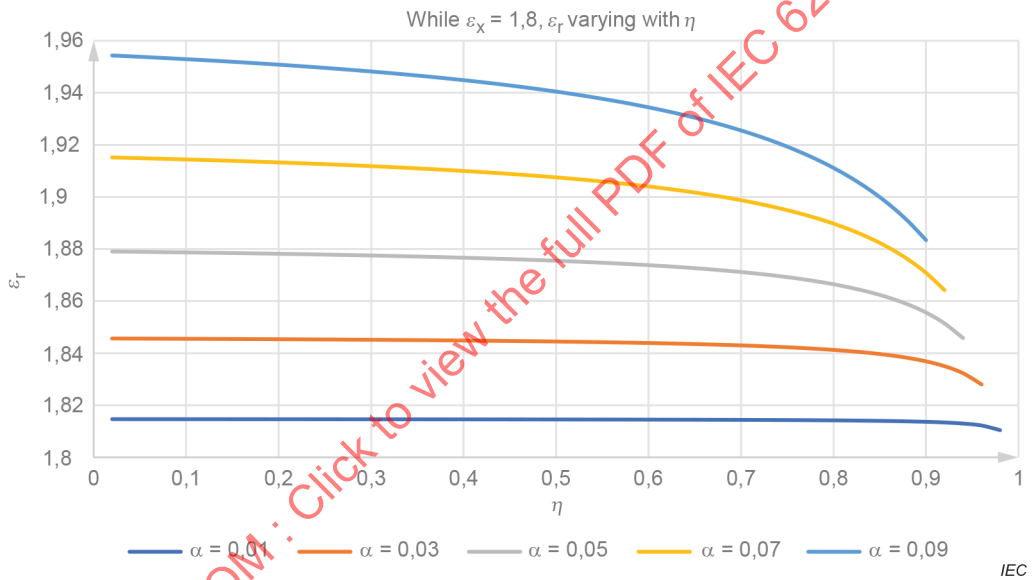
Equations (A.4) and (A.6) are still too complex to understand, so they are shown in figures.

The relationship between permittivity ε_r , and contact ratio η , is shown in Figure A.4.

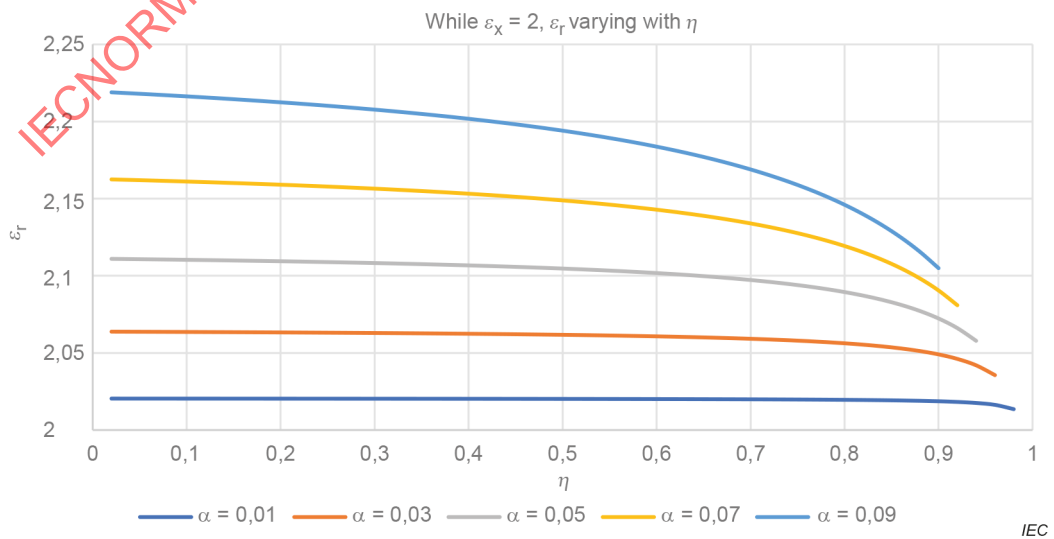
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62631-2-3:2024



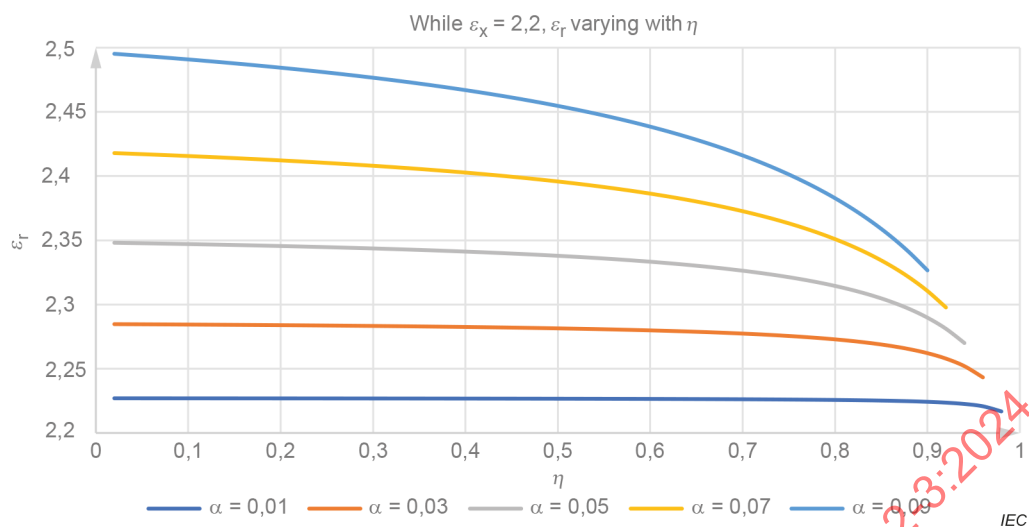
a) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 1,6$



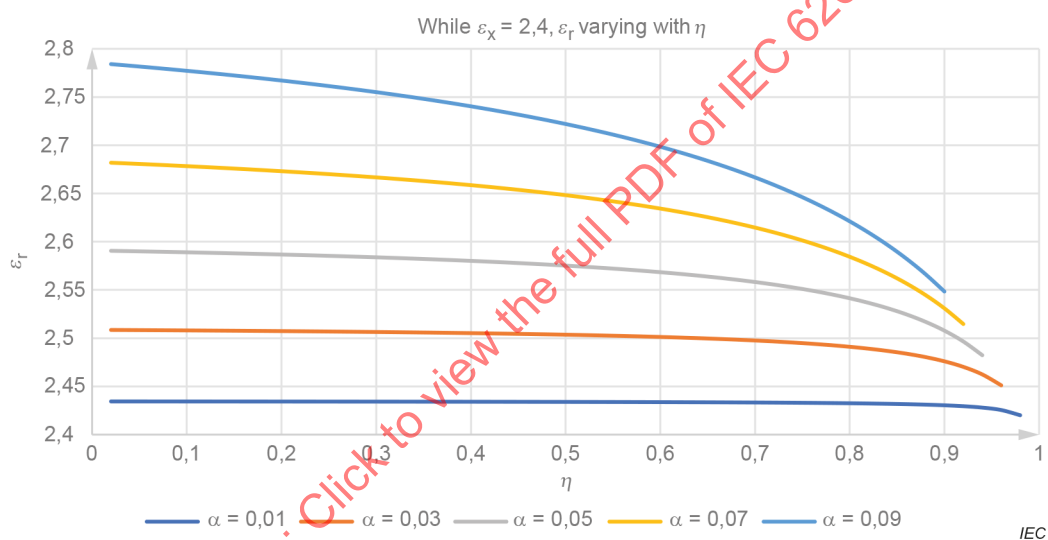
b) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 1,8$



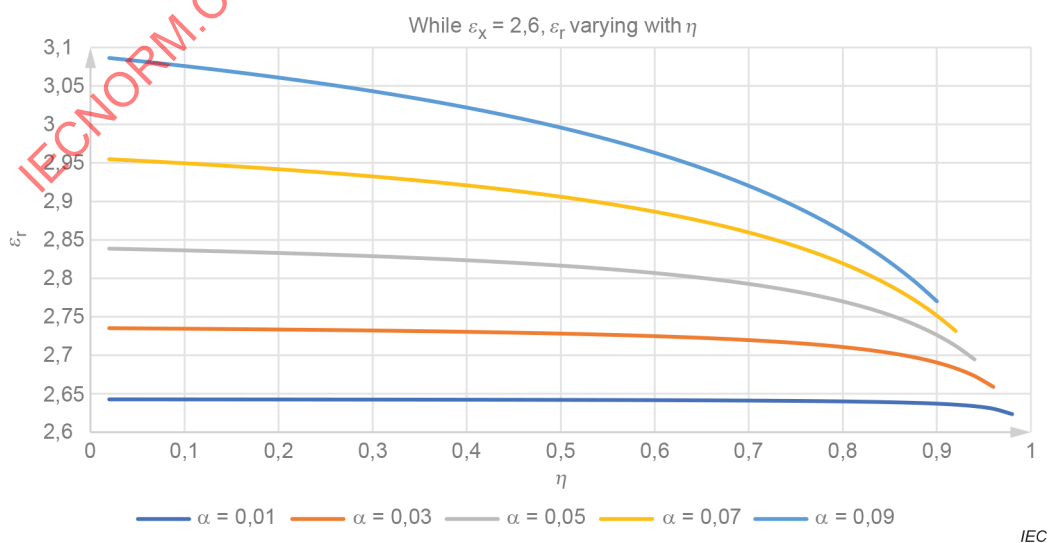
c) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 2,0$



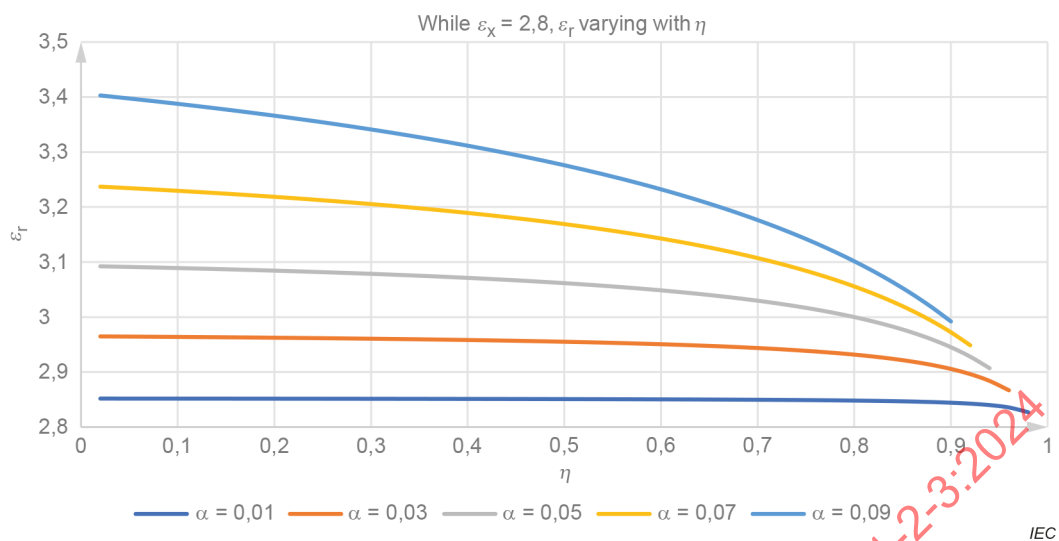
d) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 2,2$



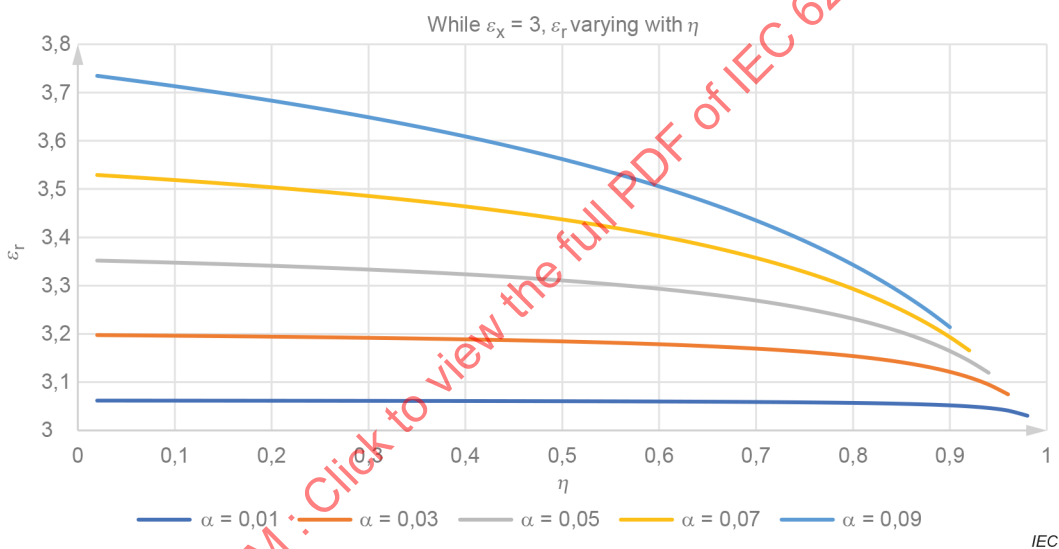
e) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 2,4$



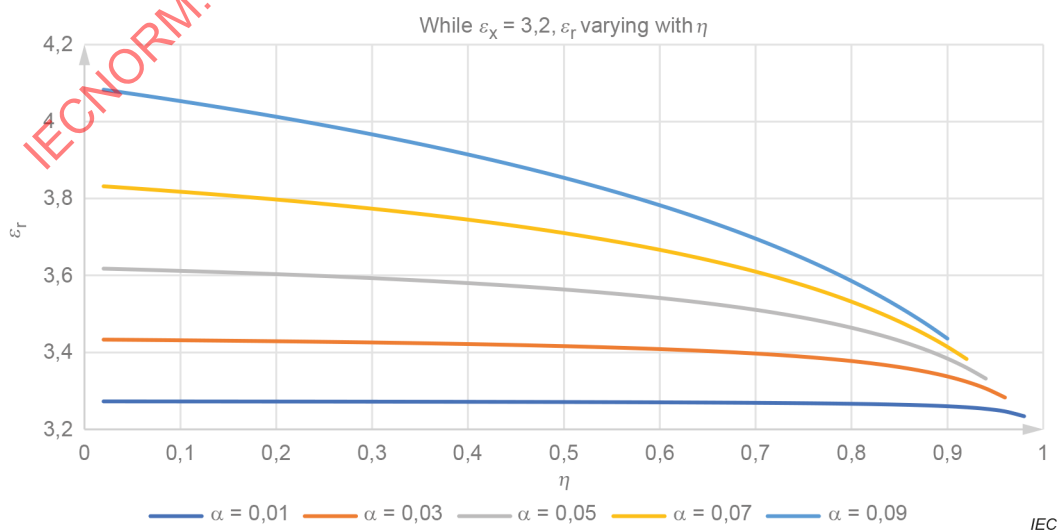
f) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 2,6$



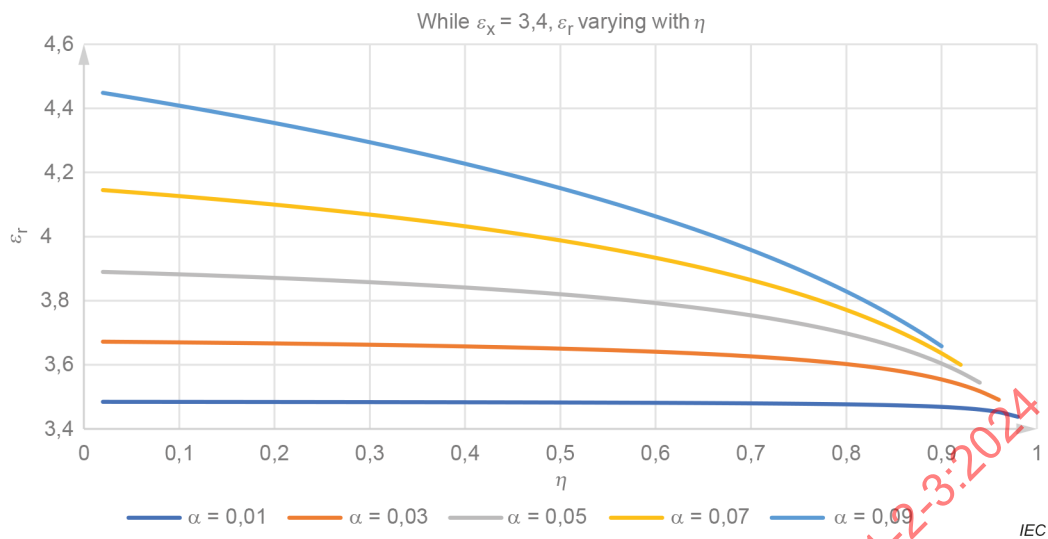
g) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 2,8$



h) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 3,0$



i) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 3,2$



j) Relationship between permittivity ε_r and contact ratio η while $\varepsilon_x = 3,4$

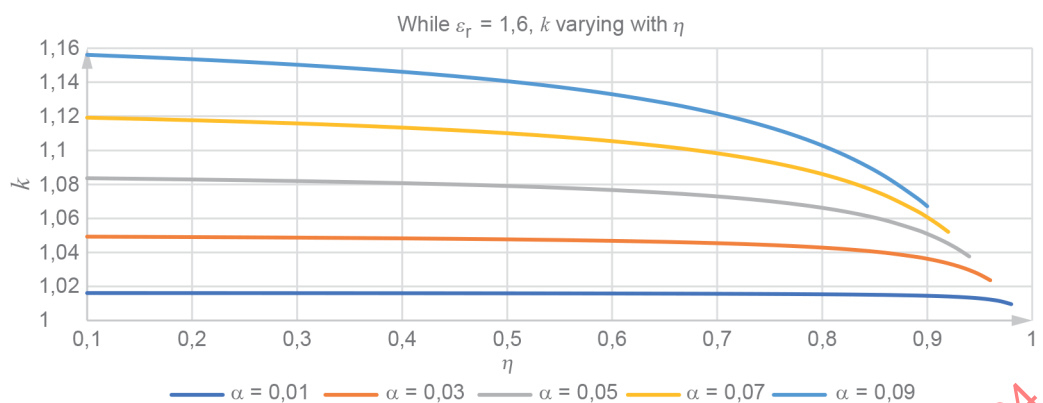
Figure A.4 – Relationship between the measured permittivity, the real permittivity, the void ratio and the contact ratio

A.4 Relationship between the measured dielectric dissipation factor and the real dielectric dissipation factor

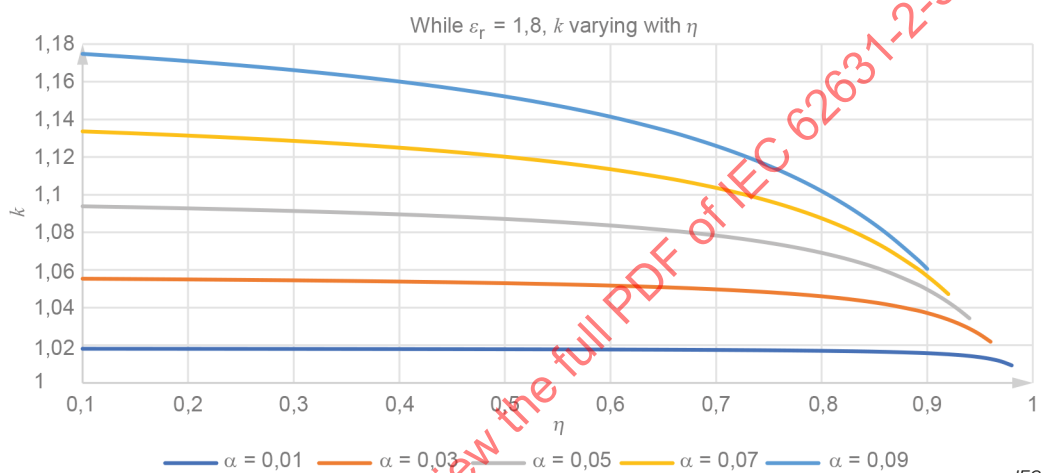
The dielectric loss $\tan \delta$, is given by:

$$\tan \delta = \left(1 + \frac{\alpha \cdot \varepsilon_r \cdot (1 - \eta)^2}{\alpha \cdot \eta \cdot (\alpha \cdot (\varepsilon_r - 1)^2 + \eta + 2 \cdot \varepsilon_r - 2 \cdot \eta \cdot \varepsilon_r) + (1 - \eta)^2 - \alpha} \right) \cdot \tan \delta_x = k \cdot \tan \delta_x \quad (\text{A.7})$$

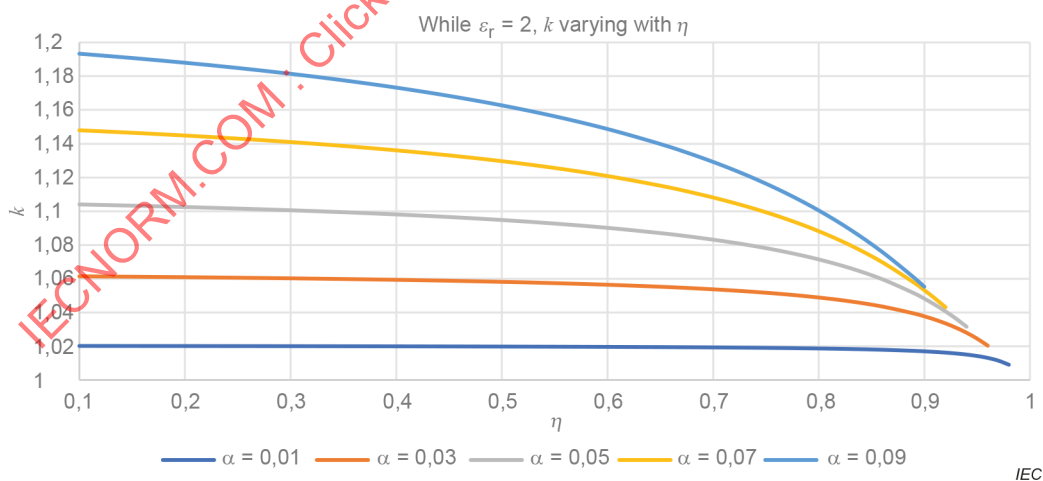
There is only a small difference ($1,02 \leq k \leq 1,32$) between a measured $\tan \delta_x$ and a real $\tan \delta$ in any case. They are shown in Figure A.5 as follows.



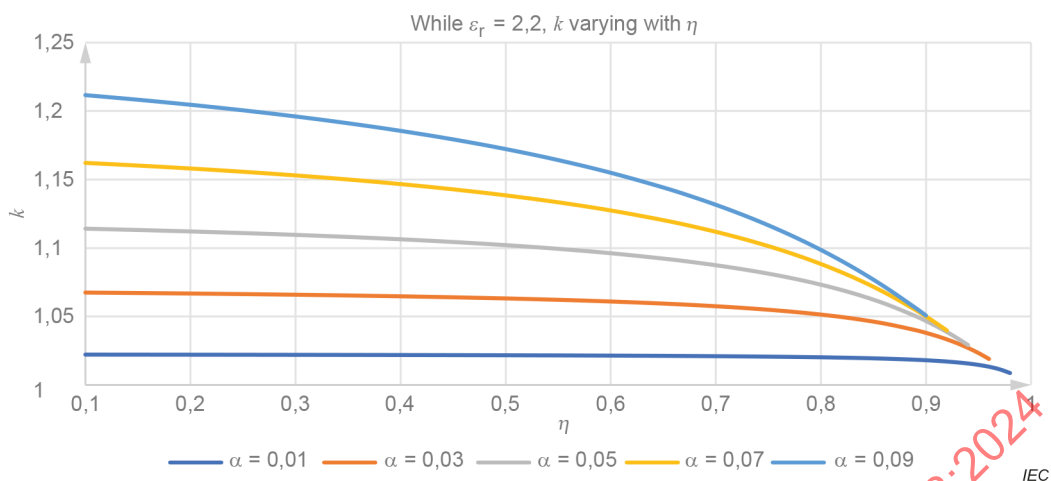
a) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 1,6$



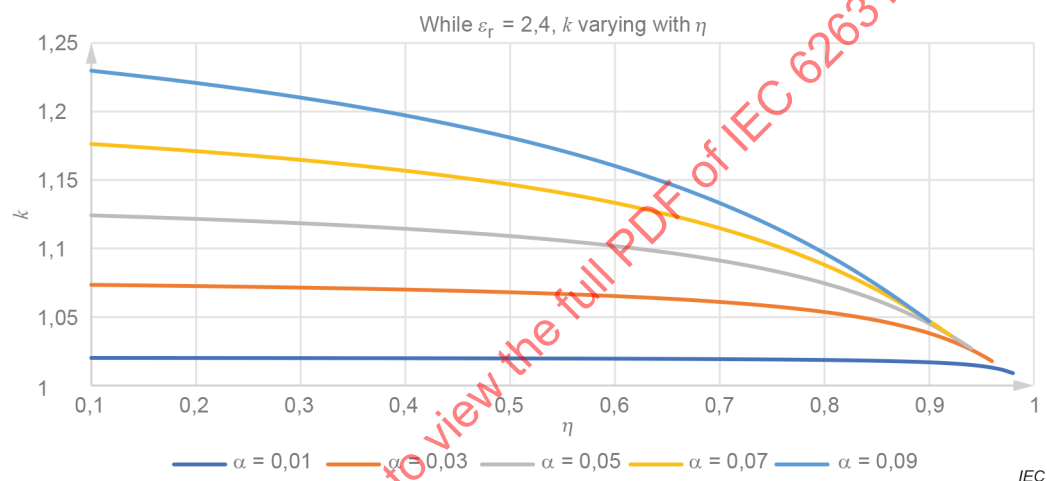
b) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 1,8$



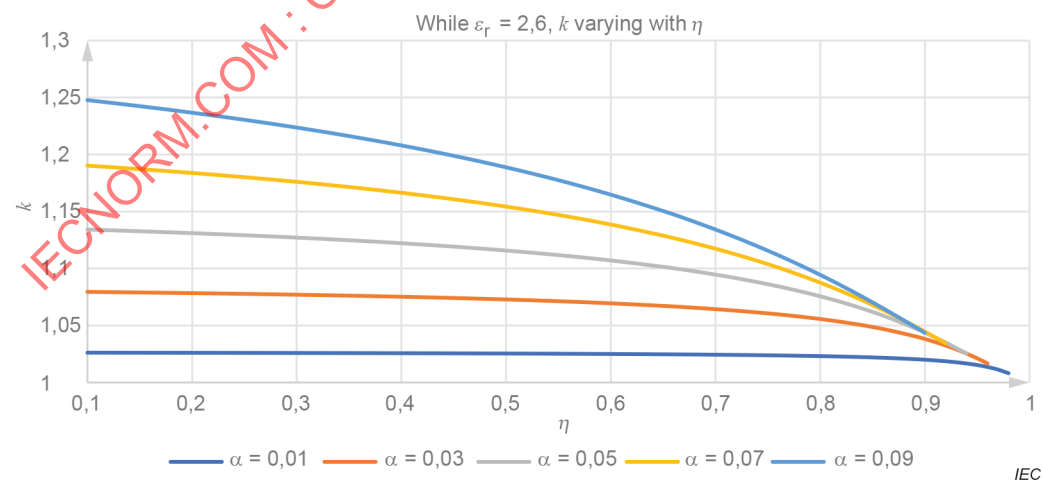
c) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 2,0$



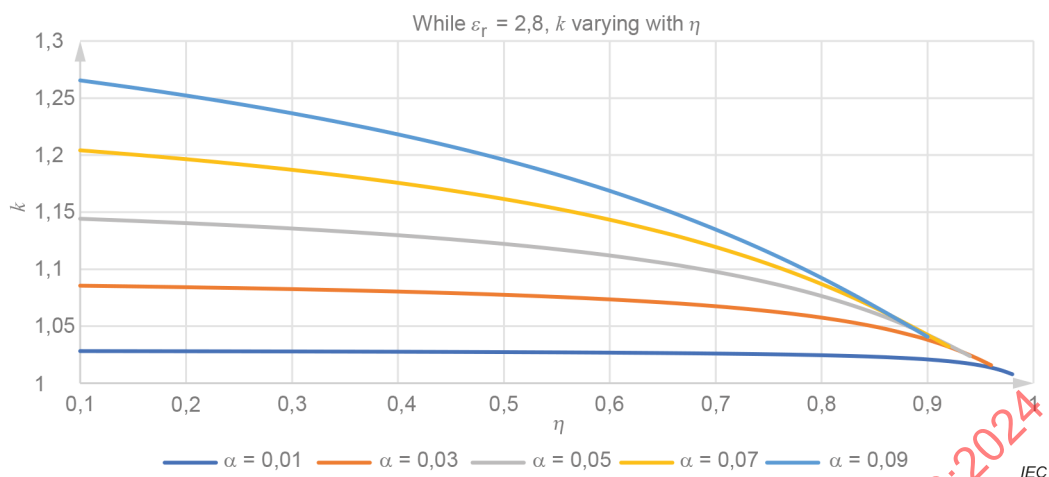
d) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 2,2$



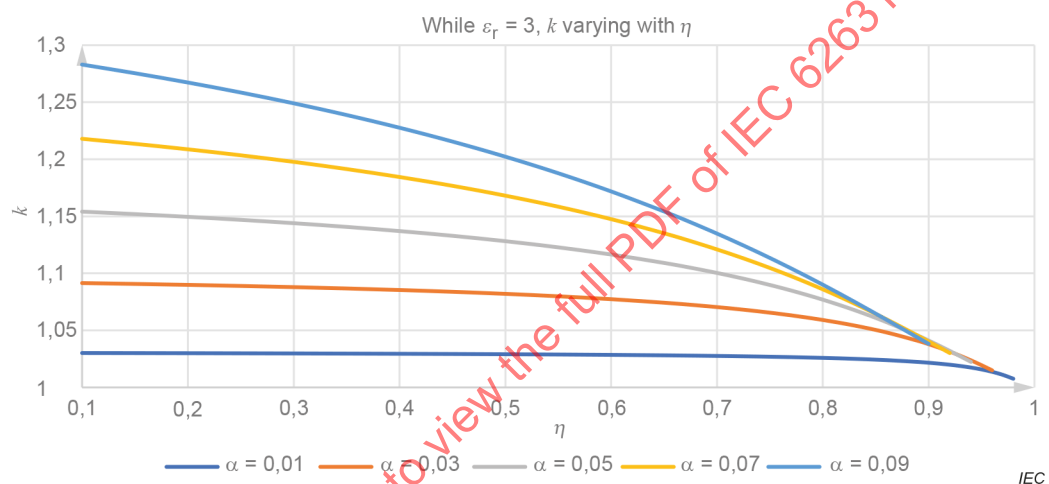
e) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 2,4$



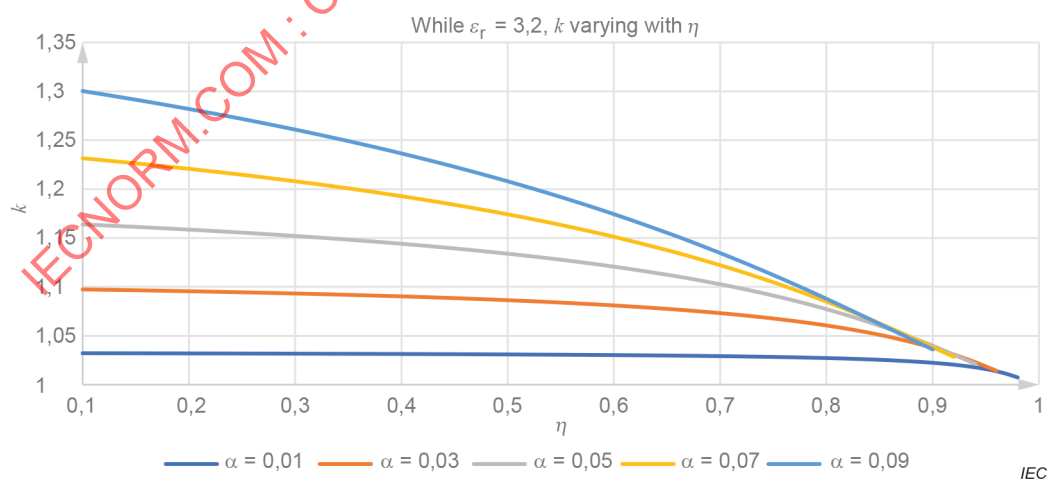
f) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 2,6$



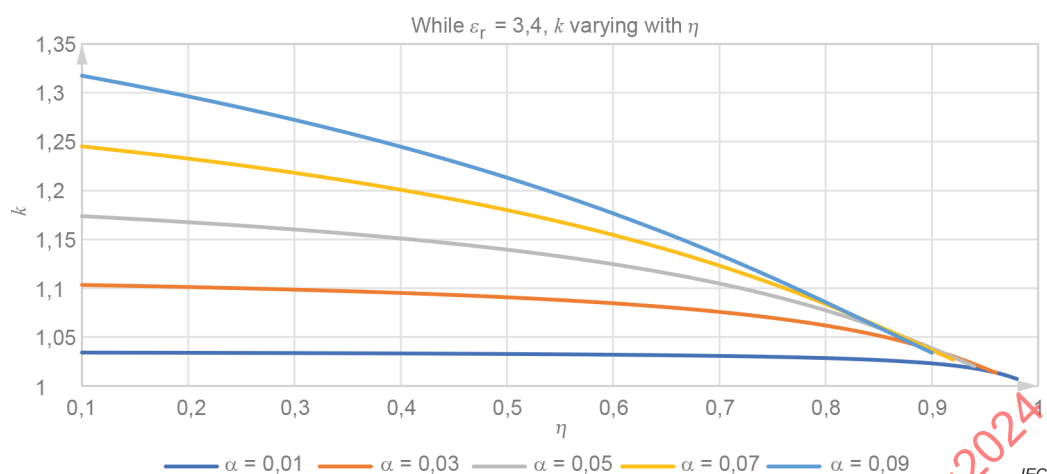
g) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 2,8$



h) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 3,0$



i) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 3,2$



j) Relationship between difference k and contact ratio η while $\varepsilon_r = 3,4$

Figure A.5 – Relationship between the measured dielectric dissipation factor, the real dielectric dissipation factor, the void ratio and the contact ratio

A.5 Method of correction for the sample with scabrous surfaces

When the surface roughness R_a of the sample is over $0,05 \mu\text{m}$, or the void ratio of the sample is bigger than 1,0 %, except in the case of porous or cellular materials, it is recommended to correct the measured results.

The measured permittivity can be corrected by Equation (A.4), and the measured dielectric dissipation factor can be corrected by Equation (A.6). They also can be corrected by using the correcting curves in Figure A.4 and Figure A.5. For the correction factor α (void ratio), it can be determined by the apparent thickness and density thickness in accordance with Equation (1). For the correction factor η (contact ratio), it can be determined by the surface analysis and Equation (2). The specific method can be found in ISO 25178-2. From Figure A.4 and Figure A.5, it can be noted that the correcting permittivity (real permittivity) is not sensitive to the contact ratio from 0,2 to 0,6. Therefore, for the sample with a single scabrous surface, it can be 0,5. For the sample with a double scabrous surface, it can be 0,3. For the correcting dielectric dissipation factor (real dielectric dissipation factor), there is only a small difference ($1,02 \leq k \leq 1,32$) between a measured $\tan \delta_x$ and a real $\tan \delta$ in any case. Therefore, it can be kept to $k = 1,2$ for the sample with a single scabrous surface, and to $k = 1,25$ for the sample with a double scabrous surface.

Annex B (informative)

Suggestions for the manufacture of electrodes

B.1 General

The high flatness and the low roughness of the electrode's measuring surface are key requirements for measurement in this document. Therefore, the following recommendations are provided.

B.2 Materials

The material for the measuring electrode M and the high-voltage electrode H shall have adequate rigidity and hardness, not for the electrical measurement, but for the mechanical manufacture, in order to obtain high flatness and low roughness as specified in 5.1. The electrode manufacturer shall take into consideration both the material and the related heat treatment process. The suggested hardness is within an HRC rating of 58 to 62. An example of material is the alloy 7Mn15Cr2Al3V2WMo (C 0,65 to 0,75, Si $\leq$ 0,80, Mn 14,50 to 16,00, Cr 2,00 to 2,50, Mo 0,50 to 0,80, W 0,50 to 0,80, V 1,50 to 2,00, Al 2,70 to 3,30, P $\leq$ 0,040, S $\leq$ 0,0030), which is an austenitic non-magnetic tool steel.

B.3 Manufacture of electrodes

A high precision grinding machine is required to produce electrodes with good quality. For the final grinding step, the grinding wheel shall be up to a No. 2000.

B.4 Evaluation methods of flatness and roughness

For the evaluation of the flatness of the electrode's surface, the optical interferometry method has been found adequate, as described in ISO 25178-2.

Many methods can be used to evaluate the roughness of the electrode surface, for example the scanning probe profiler or the microscope. The scanning probe profiler method can be a simpler option. Refer to ISO 21920-2 which specifies terms, definitions and parameters for the determination of surface texture by profile methods.

B.5 Resistance of the measuring electrode system

The total resistance of the measuring electrodes system shall be less than 1 Ω .

Bibliography

IEC 60050-212, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 212: Electrical insulating solids, liquids and gases*, available at <https://www.electropedia.org>

IEC 62631-2-1:2018, *Dielectric and resistive properties of solid insulating materials – Part 2-1: Relative permittivity and dissipation factor – Technical Frequencies (0,1 Hz – 10 MHz) – AC Methods*

ISO 25178-2, *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*

ISO 3534-1:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*

ISO 3534-2:2006, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Applied statistics*

ISO 3534-3:2013, *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 3: Design of experiments*

Michal Lisowski and Adam Skopec, "Effective area of thin guarded electrode in determining of permittivity and volume resistivity", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp.24-31, Vol.16, No.1, February 2009

Jun Li, Tianhua Lv, Wenhao Zhang, Feihu Zheng, Yang Xu, Zhengxiang Shen, and Yewen Zhang, "Measuring Technique and Error Analysis of Complex Permittivity of Polymer Films Based on Contact Method", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 72, 1006711, 2023

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes, définitions, abréviations et symboles.....	33
3.1 Termes et définitions	33
3.2 Abréviations et symboles	35
4 Principe de la méthode	36
4.1 Principe de mesure	36
4.2 Effet de bord des électrodes	37
5 Électrodes	37
5.1 Conception et fabrication des électrodes.....	37
5.2 Effet de bord de l'électrode de mesure.....	39
6 Échantillons.....	39
7 Tension de mesure	39
8 Conditions environnementales des mesurages	39
9 Mesurage de l'épaisseur des films	40
10 Procédure de mesure	40
11 Rapport	40
12 Répétabilité, reproductibilité et répliquabilité	40
Annexe A (normative) Méthode de correction de la permittivité mesurée et du facteur de dissipation diélectrique pour un échantillon à surfaces rugueuses.....	41
A.1 Généralités	41
A.2 Modèle physique.....	41
A.3 Relation entre la permittivité mesurée et la permittivité réelle.....	42
A.4 Relation entre le facteur de dissipation diélectrique mesuré et le facteur de dissipation diélectrique réel.....	47
A.5 Méthode de correction pour l'échantillon à surfaces rugueuses.....	51
Annexe B (informative) Suggestions pour la fabrication des électrodes.....	52
B.1 Généralités	52
B.2 Matériaux.....	52
B.3 Fabrication des électrodes	52
B.4 Méthodes d'évaluation de la planéité et de la rugosité	52
B.5 Résistance du système d'électrode de mesure.....	52
Bibliographie.....	53
Figure 1 – Schéma du système à trois électrodes	38
Figure A.1 – Schéma du profil comprenant les surfaces rugueuses de l'échantillon et les électrodes plates polies, avec la masse surfacique et l'épaisseur apparente (épaisseur mécanique)	41
Figure A.2 – Modèle physique des surfaces rugueuses de l'échantillon et des électrodes plates polies	41

Figure A.3 – Circuits équivalents avec l'échantillon, l'espace et les électrodes	42
Figure A.4 – Relation entre la permittivité mesurée, la permittivité réelle, le rapport de vide et le rapport de contact.....	47
Figure A.5 – Relation entre le facteur de dissipation diélectrique mesuré, le facteur de dissipation diélectrique réel, le rapport de vide et le rapport de contact	51
 Tableau 1 – Les paramètres dimensionnels du système à trois électrodes et la relation entre ϵ_x mesurée pour l'épaisseur de l'échantillon et la capacité mesurée.....	 38

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62631-2-3:2024

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES ET RÉSISTIVES
DES MATÉRIAUX ISOLANTS SOLIDES –****Partie 2-3: Permittivité relative et facteur de dissipation –
Méthode d'électrode de contact pour films isolants –
Méthodes en courant alternatif**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété. À la date de publication du présent document, l'IEC n'a reçu aucune déclaration relative à des droits de brevets, qui pourraient être exigés pour la mise en œuvre du présent document. Toutefois, il est rappelé aux responsables de cette mise en œuvre qu'il ne s'agit peut-être pas des informations les plus récentes, qui peuvent être obtenues dans la base de données disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 62631-2-3 a été établie par le comité d'études 112 de l'IEC: Évaluation et qualification des systèmes et matériaux d'isolement électrique. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
112/631/FDIS	112/641/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les directives ISO/IEC, Partie 1 et les directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62631, publiées sous le titre général *Propriétés diélectriques et résistives des matériaux isolants solides*, se trouve sur le site web de l'IEC.

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

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de ce document indique qu'il contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Le mesurage de la permittivité relative et du facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) de films polymères isolants minces d'une épaisseur d'environ 10 μm à 100 μm sans couche supplémentaire est important pour les applications d'isolation. Il existe actuellement un manque de technologies et de normes appropriées pour le mesurage de la permittivité relative et du facteur de dissipation diélectrique de films polymères monocouches très minces. L'utilisation des films polymères multicouches de 20 couches à 50 couches peut permettre d'obtenir la valeur moyenne de la permittivité relative et du facteur de dissipation diélectrique d'un film polymère isolant, mais il convient de ne pas ignorer l'incidence de l'entrefer à l'intérieur du film. Il est possible d'obtenir, avec des électrodes métallisées sur la surface du film polymère, des résultats acceptables de la permittivité relative et du facteur de dissipation diélectrique d'un film polymère isolant en laboratoire de recherche. Le présent document fournit la technologie de mesure et la méthode d'essai pour la permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique de films polymères isolants minces sans couche supplémentaire ou métallisation sur l'échantillon, sous fréquence technique.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62631-2-3:2024

PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES ET RÉSISTIVES DES MATÉRIAUX ISOLANTS SOLIDES –

Partie 2-3: Permittivité relative et facteur de dissipation – Méthode d'électrode de contact pour films isolants – Méthodes en courant alternatif

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62631 spécifie la technologie de mesure et la méthode d'essai pour la permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique d'un film polymère isolant monocouche mince sans métallisation supplémentaire sur la surface de l'échantillon. La plage d'épaisseurs adaptatives est d'environ 10 µm à 100 µm. La fréquence proposée est la fréquence industrielle (50 Hz ou 60 Hz), et elle est également appropriée dans la plage de fréquences techniques comprises entre 1 Hz et 1 MHz.

2 Références normatives

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

IEC 60674-2, *Spécification pour les films en matière plastique à usages électriques – Partie 2: Méthodes d'essai*

ISO 4593, *Plastiques – Film et feuille – Détermination de l'épaisseur par examen mécanique*

ISO 14644-1, *Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 1: Classification de la propreté particulière de l'air*

ISO 21920-2, *Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface: Méthode du profil – Partie 2: Termes, définitions et paramètres d'état de surface*

3 Termes, définitions, abréviations et symboles

3.1 Termes et définitions

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

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

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

3.1.1

film polymère isolant mince

film polymère isolant plan, régulier et lisse sans couche supplémentaire, d'une épaisseur uniforme de 10 µm à 100 µm

3.1.2

pont alternatif

instrument qui utilise la méthode de la balance pour mesurer la capacité et la perte d'un échantillon de condensateur sous une tension alternative

EXEMPLE Pont de condensateur.

Note 1 à l'article: En général, le pont alternatif fonctionne sous une fréquence industrielle avec une très grande exactitude et une faible tension appliquée.

Note 2 à l'article: Dans certains cas particuliers, le pont alternatif peut également fonctionner sous une fréquence technique.

3.1.3

analyseur de matériau à impédance

instrument qui utilise la méthode en courant alternatif pour mesurer la capacité et la perte diélectrique d'un condensateur

Note 1 à l'article: L'analyseur de matériau à impédance fonctionne sous une tension relativement faible et avec une large plage de bandes, mais son exactitude est généralement relativement faible.

Note 2 à l'article: L'analyseur de matériau à impédance utilise cinq bornes pour mesurer les paramètres du dispositif et nécessite donc un adaptateur approprié pour l'échantillon à trois électrodes.

3.1.4

fréquence industrielle

fréquence utilisée pour le réseau d'énergie électrique, qui est généralement de 50 Hz ou 60 Hz

3.1.5

épaisseur apparente

épaisseur mécanique

épaisseur d'un échantillon mesurée par un appareil mécanique, qui est équivalente à "l'épaisseur moyenne d'une feuille en liasse" spécifiée dans l'IEC 60674-2

3.1.6

masse surfacique

épaisseur d'un échantillon mesurée à partir de la masse volumique de l'échantillon, qui est équivalente à "l'épaisseur gravimétrique" spécifiée dans l'IEC 60674-2

3.1.7

rapport de vide

α

pourcentage d'augmentation entre l'épaisseur apparente et la masse surfacique, qui dépend de la rugosité de la surface

Note 1 à l'article: Pour un échantillon à une surface rugueuse, l'épaisseur apparente et la masse surfacique sont différentes.

Note 2 à l'article: Le rapport de vide α est exprimé en pourcentage (%) et est défini par la Formule (1):

$$\alpha = \frac{d_x - d_d}{d_x} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

où

d_x est l'épaisseur apparente de l'échantillon en μm ;

d_d est la masse surfacique de l'échantillon en μm .

Note 3 à l'article: Il convient de mesurer l'épaisseur apparente et la masse surfacique en utilisant le même échantillon, conformément à l'ISO 4593.

3.1.8**rapport de contact** η

rapport en pourcentage de la surface de contact sur la surface totale

Note 1 à l'article: Les échantillons à surfaces rugueuses ne peuvent pas avoir un contact parfait avec la surface à haute planéité et à faible rugosité de l'électrode. La surface de contact est la surface entre le matériau diélectrique et l'électrode qui restent en contact. La surface totale est la surface apparente de l'échantillon, qui est généralement égale à la surface de l'électrode.

Note 2 à l'article: Le rapport de contact dépend de la rugosité de surface de l'échantillon et est défini par la Formule (2):

$$\eta = \frac{S_{\text{contact}}}{S_{\text{total}}} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

où

 S_{contact} est la surface de contact; S_{total} est la surface totale; η est le rapport de contact en %.**3.1.9****rugosité de surface de l'échantillon** R_a

hauteur moyenne arithmétique en μm du profil de l'échantillon, exprimée par la Formule (3) conformément à l'ISO 21920-2

$$R_a = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} |z(x)| dx \quad (3)$$

où

 l_e est la longueur de mesure du profil de l'échantillon; $z(x)$ est la fonction qui décrit la hauteur du profil évalué limité à l'échelle.**3.2 Abréviations et symboles**

AC (alternating current) courant alternatif

HRC échelle de dureté Rockwell C

HR humidité relative

 α rapport de vide d_x épaisseur apparente de l'échantillon en μm d_d masse surfacique de l'échantillon en μm η rapport de contact R_a rugosité de surface de l'échantillon en μm S surface de l'électrode S_{contact} surface de contact S_{total} surface totale l_e longueur de mesure du profil de l'échantillon

$z(x)$	fonction qui décrit la hauteur du profil évalué limité à l'échelle
$\dot{C}_x$	capacité complexe
C_x	partie réelle de la capacité complexe
ε_0	constante électrique
$\dot{\varepsilon}_x$	permittivité complexe
ε_x	permittivité relative
ε'	partie réelle de la permittivité complexe
ε''	partie imaginaire de la permittivité complexe
d_x	épaisseur de l'échantillon de film plan
$\tan \delta$	facteur de dissipation diélectrique
k	rapport entre le facteur de dissipation diélectrique mesuré et le facteur de dissipation diélectrique réel
g	espace entre l'électrode gardée et l'électrode de mesure

4 Principe de la méthode

4.1 Principe de mesure

La capacité complexe $\dot{C}_x$ de l'échantillon diélectrique avec l'électrode peut être obtenue en utilisant un pont alternatif ou un analyseur de matériau à impédance. Pour un échantillon de film plan, régulier et lisse, la relation entre la permittivité complexe $\dot{\varepsilon}_x$ et la capacité complexe $\dot{C}_x$ est exprimée par l'Équation (4).

$$\dot{C}_x = \frac{\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_x S}{d_x} \quad (4)$$

où d_x est l'épaisseur de l'échantillon de film plan, S est la surface de l'électrode et ε_0 est la constante électrique (aussi appelée permittivité du vide). Par conséquent, la permittivité complexe des matériaux diélectriques peut être dérivée comme cela est indiqué dans l'Équation (5).

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{d_x}{\varepsilon_0 S} \dot{C}_x \quad (5)$$

La relation de la permittivité complexe $\dot{\varepsilon}_x$ avec la partie réelle ε' , la partie imaginaire ε'' et le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ est exprimée comme cela est indiqué dans l'Équation (6).

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_x = \varepsilon' + j\varepsilon'' \\ \tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \\ \varepsilon_x = \varepsilon' \end{cases}, \quad (6)$$

où la partie réelle ε' est appelée permittivité relative ε_x , et la partie imaginaire ε'' est appelée indice de pertes diélectriques. En utilisant un pont alternatif, le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$ et la partie réelle C_x de la capacité complexe $\hat{C}_x$ peuvent être mesurés directement. La permittivité relative ε_x du matériau diélectrique peut être obtenue par l'Équation (7).

$$\varepsilon_x = \frac{d_x}{\varepsilon_0 S} C_x \quad (7)$$

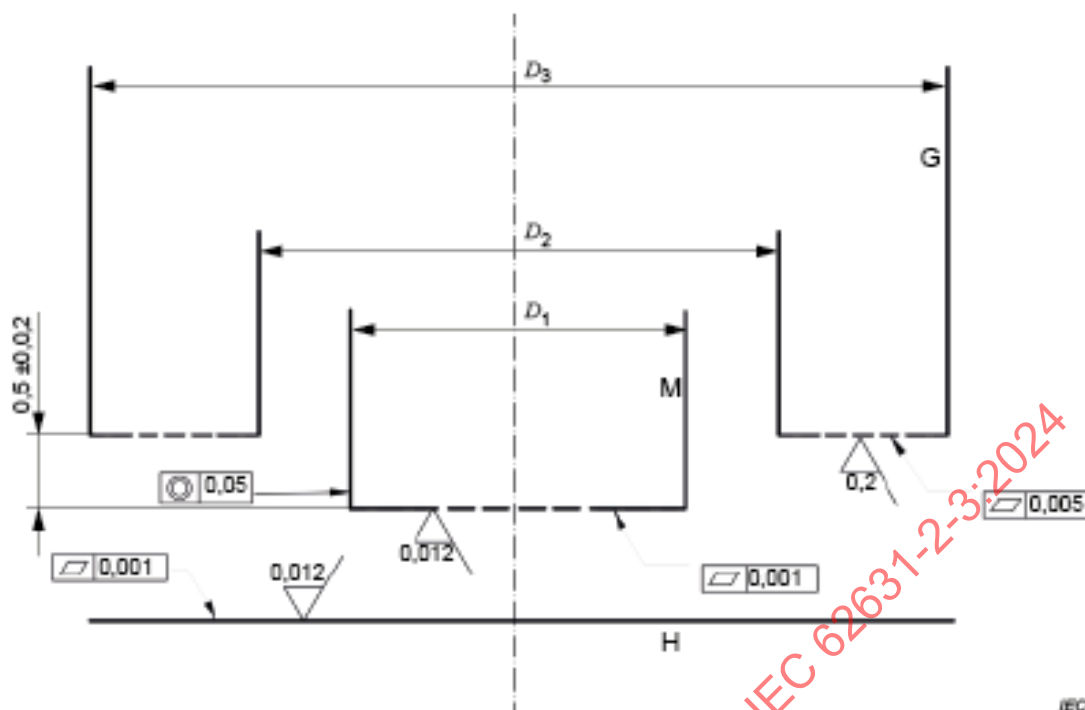
4.2 Effet de bord des électrodes

En raison des limites de la fabrication, l'espace entre l'électrode de mesure et l'anneau de garde est supérieur à 0,5 mm. Les mesurages diélectriques sont soumis à l'effet de bord des électrodes. Dans le cas des échantillons ayant une épaisseur supérieure ou égale à 0,5 mm, l'électrode avec anneau de garde s'est avérée efficace pour réduire l'effet de bord des électrodes. Cependant, pour des échantillons ayant une épaisseur inférieure à 0,5 mm, l'électrode avec anneau de garde ne réduit pas significativement l'effet de bord car l'espace entre l'électrode de mesure et l'anneau de garde est beaucoup plus grand que l'épaisseur de l'échantillon. Dans ce cas, en raison des limites de la fabrication mécanique, l'espace entre l'électrode de mesure et l'anneau de garde est beaucoup plus grand que l'épaisseur de l'échantillon. Voir également 5.2.

5 Électrodes

5.1 Conception et fabrication des électrodes

La conception et la fabrication des électrodes de mesure constituent le paramètre le plus essentiel de cette méthode d'essai. Le système de mesure comprend trois électrodes, une électrode de mesure (M), une électrode de garde (G) et une électrode à haute tension (H). Les dimensions admises des électrodes sont indiquées à la Figure 1 et dans le Tableau 1. L'électrode de mesure (M) et l'électrode à haute tension (H) doivent avoir une rugosité de surface inférieure à 0,012 μm et une planéité relative inférieure à 0,5 μm . Il doit être noté que les états de la surface fournis sont très importants pour assurer le contact approprié entre les électrodes et l'échantillon. L'épaisseur de l'échantillon étant relativement faible, il convient que le diamètre de l'électrode de mesure ne soit pas trop grand afin d'éviter une grande capacité mesurée qui rendrait le choix de l'instrument de mesure difficile.



Légende

- | | |
|-------|--|
| D_1 | diamètre de l'électrode de mesure M |
| D_2 | diamètre intérieur de l'électrode gardée G |
| D_3 | diamètre extérieur de l'électrode gardée G |
| D_4 | diamètre de l'électrode à haute tension H |

Figure 1 – Schéma du système à trois électrodes

À la Figure 1, l'espace entre l'électrode gardée et l'électrode de mesure, qui peut être calculé par $g = (D_2 - D_1)/2$, est maintenu à environ 1 mm.

Tableau 1 – Les paramètres dimensionnels du système à trois électrodes et la relation entre l' ϵ_x mesurée pour l'épaisseur de l'échantillon et la capacité mesurée

D_1 mm	D_2 mm	D_3 mm	D_4 mm	H_1 Mm	ε_x
$37,93 \pm 0,05$	$39,93 \pm 0,1$ ou $40,0 \pm 0,1$	60	70	$0,5 \pm 0,02$	$C_x \text{ (pF)} \cdot d_x \text{ (mm)} / 10$ ou $C_x \text{ (nF)} \cdot d_x \text{ (}\mu\text{m)} / 10$

Le matériau de l'électrode M et de l'électrode H doit satisfaire aux conditions suivantes: avoir une bonne conductivité ainsi qu'une rigidité et une dureté suffisantes, être non ferromagnétique et antirouille. De plus amples informations sur la fabrication des électrodes peuvent être consultées à l'Annexe B.

Le matériau de l'électrode G peut être un matériau métallique de bonne conductivité, non ferromagnétique, antirouille, comme l'acier inoxydable ou le laiton protégé par placage de la surface, etc.

5.2 Effet de bord de l'électrode de mesure

L'épaisseur de l'échantillon doit être comprise entre 10 μm et 100 μm , avec le diamètre D_1 de (37,93 $\pm$ 0,05) mm de l'électrode M. Par conséquent, le rapport entre la capacité due à l'effet de bord de l'électrode de mesure et la capacité mesurée de l'échantillon ne dépasse pas 10^{-3} . L'erreur de mesure provoquée par l'effet de bord étant beaucoup plus faible que les erreurs provoquées par d'autres facteurs (par exemple, l'erreur de mesure de l'épaisseur et l'erreur de mesure du diamètre de l'électrode), pour les mesurages décrits dans le présent document, l'erreur de l'effet de bord peut être ignorée.

6 Échantillons

L'échantillon est un film polymère sans couche supplémentaire et a une épaisseur comprise entre 10 μm et 100 μm . Il doit avoir une épaisseur uniforme, une surface douce, plane, régulière et lisse, sans électrode de métallisation évaporée. La dimension de l'échantillon doit être supérieure au diamètre de l'électrode H, environ 80 mm² $\times$ 80 mm². Lorsque la rugosité de surface R_a de l'échantillon est supérieure à 0,05 μm ou lorsque le rapport de vide de l'échantillon est supérieur à 1,0 %, sauf pour les matériaux poreux ou alvéolaires, les résultats de mesure doivent être corrigés à l'aide de la méthode décrite à l'Annexe A.

L'échantillon est placé entre l'électrode de mesure M et l'électrode à haute tension H. Il n'est pas représenté à la Figure 1, car il est très mince par rapport aux tailles des électrodes.

7 Tension de mesure

La tension appliquée sur l'échantillon doit assurer que le champ électrique entre l'électrode H et l'électrode M est inférieur à 10 kV/mm. Pour réduire le plus possible l'effet du phénomène non linéaire, il convient que le champ électrique appliqué soit inférieur ou égal à 3 kV/mm. Lorsque cela n'est pas possible, les champs électriques supérieurs peuvent être utilisés. Mais il convient de noter que le phénomène non linéaire peut affecter les mesurages. Lorsqu'un pont alternatif est utilisé, il est suggéré de maintenir la tension au-dessous de 100 V pour l'échantillon de 20 μm . Lors de l'utilisation d'un analyseur de matériau à impédance, bien que la tension appliquée sur l'échantillon soit relativement faible, sa sensibilité et son exactitude sont également relativement faibles, c'est pourquoi il est recommandé d'utiliser un pont alternatif pour les mesurages.

8 Conditions environnementales des mesurages

Pour éviter la pénétration de poussière et de particules fines entre l'électrode et l'échantillon, les mesurages doivent être effectués dans une chambre propre ou dans une salle propre conformément à l'ISO 14644-1.

Pour éviter tout entrefer ou toute bulle d'air pouvant affecter la condition de contact entre l'électrode et l'échantillon, les mesurages doivent être effectués dans un vide. Pour les besoins du présent essai, un vide d'une valeur de 1 Pa (0,007 5 Torr) s'est avéré approprié.

NOTE Bien qu'aucune température ne soit fournie pour les conditions de températures de l'environnement d'essai, dans le cas où la température n'est pas un facteur connu susceptible d'affecter le résultat de l'échantillon soumis à l'essai, l'essai est initialement réalisé à température ambiante.

L'humidité relative de l'environnement d'essai doit être inférieure à 50 %. Avant le mesurage, il convient d'immerger l'échantillon dans de l'éthanol absolu pendant 2 s à 3 s, puis de le sécher pour l'utilisation.

Pour assurer des conditions de contact appropriées entre l'échantillon et les électrodes, une pression comprise entre 20 kPa et 50 kPa doit être appliquée sur l'échantillon.

9 Mesurage de l'épaisseur des films

Le mesurage de l'épaisseur de l'échantillon doit être effectué conformément à l'ISO 4593 et à l'IEC 60674-2.

10 Procédure de mesure

Cinq éprouvettes sont préparées pour les traitements exigés. Chaque éprouvette doit être nettoyée avec de l'éthanol absolu dans une chambre propre pour assurer qu'il n'y a pas de particules visibles sur les éprouvettes. Après un conditionnement supplémentaire de 6 h dans des conditions sèches normalisées (18 °C à 28 °C et < 15 % HR), la vérification de la surface des éprouvettes doit être effectuée à nouveau pour détecter la présence de particules.

Ensuite, la permittivité relative et le facteur de dissipation sont acquis par les étapes suivantes:

- 1) Mesurer l'épaisseur de chaque échantillon.
- 2) Mesurer la rugosité de surface des échantillons lorsque cela est nécessaire.
- 3) Mesurer l'épaisseur apparente et la masse surfacique des échantillons.
- 4) Mesurer la capacité et le facteur de dissipation diélectrique de chaque échantillon.
- 5) Ensuite, la permittivité et le facteur de dissipation sont acquis par l'Équation (5) et l'Équation (6).
- 6) Lorsque le rapport de vide de l'échantillon de film α est supérieur à 0,01, corriger les résultats mesurés en utilisant la méthode de l'Annexe A.

11 Rapport

Le rapport doit comporter les informations suivantes:

- nom, identification, spécification des matériaux, couleur, source et code de l'éprouvette attribué par le fabricant;
- température de l'éprouvette et humidité relative de l'environnement de mesure;
- conditions de prétraitement des échantillons;
- vide pour le mesurage;
- identification des instruments de mesure et exactitude du matériel d'essai;
- lieu et date des essais;
- tension d'essai et fréquence d'essai;
- pression mécanique sur l'électrode de mesure de l'échantillon en Pascal;
- nombre d'échantillons;
- nombre d'essais, date et heure des essais;
- chaque valeur et la valeur moyenne de la capacité, de la permittivité et du facteur de dissipation diélectrique respectivement;
- toutes autres informations jugées importantes, le cas échéant.

12 Répétabilité, reproductibilité et répliquabilité

Les mesurages de la permittivité relative et du facteur de dissipation diélectrique dépendent de nombreux facteurs.

Les expériences ont démontré que les mesurages sont valables lorsque la répétabilité, la reproductibilité et la répliquabilité de la permittivité relative se situent à moins de 5 % et lorsque le facteur de dissipation diélectrique se situe à moins de 20 % de la valeur mesurée.

Annexe A (normative)

Méthode de correction de la permittivité mesurée et du facteur de dissipation diélectrique pour un échantillon à surfaces rugueuses

A.1 Généralités

Pour un échantillon à surfaces rugueuses, dans le cas où le rapport de vide α est supérieur à 0,01, il est nécessaire de corriger les résultats mesurés car le contact entre la surface de l'échantillon et les électrodes n'est pas très bon.

A.2 Modèle physique

La Figure A.1 représente la condition de contact entre les surfaces rugueuses de l'échantillon et les électrodes plates polies. L'épaisseur apparente (épaisseur mécanique) est plus grande que la masse surfacique. Le rapport de vide α est déterminé à partir de l'épaisseur apparente et de la masse surfacique.

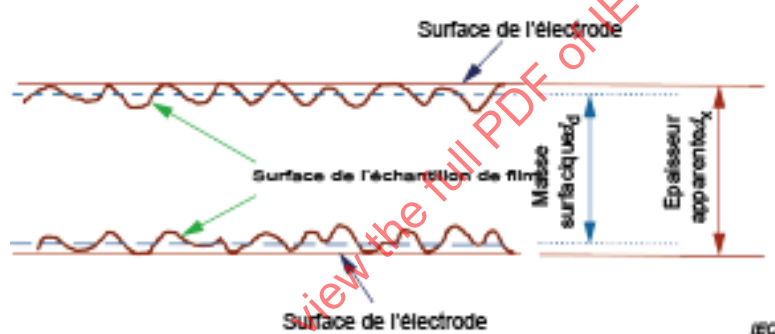


Figure A.1 – Schéma du profil comprenant les surfaces rugueuses de l'échantillon et les électrodes plates polies, avec la masse surfacique et l'épaisseur apparente (épaisseur mécanique)

La Figure A.2 représente le modèle physique des surfaces rugueuses de l'échantillon et des électrodes plates polies. L'entrefer entre l'échantillon et les électrodes peut être considéré comme l'espace concentré équivalent avec l'épaisseur d_0 , et sa surface est déterminée par le rapport de contact η . La surface de l'espace concentré équivalent est $(1 - \eta)S$, S étant la surface de l'électrode de mesure dans les Équations (4) et (7).

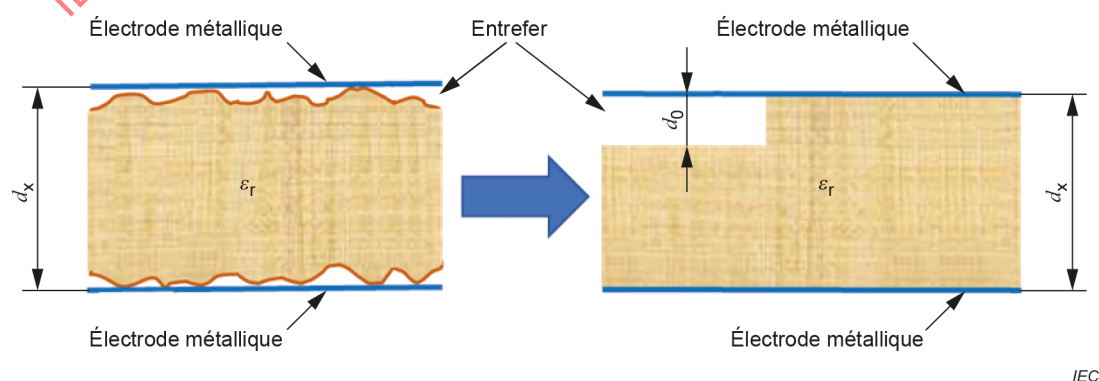


Figure A.2 – Modèle physique des surfaces rugueuses de l'échantillon et des électrodes plates polies

Sur la base du modèle physique de la Figure A.2, les schémas du circuit équivalent sont représentés à la Figure A.3.

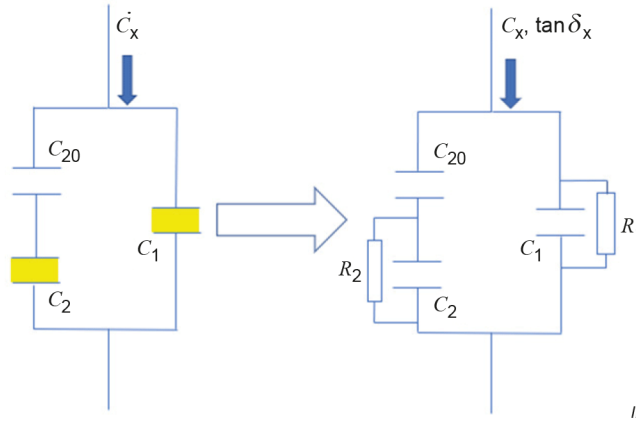


Figure A.3 – Circuits équivalents avec l'échantillon, l'espace et les électrodes

A.3 Relation entre la permittivité mesurée et la permittivité réelle

L'analyse du circuit équivalent permet de déduire la relation suivante entre la permittivité mesurée ε_x et la permittivité réelle ε_r représentée par l'Équation (A.1). La relation entre la $\tan \delta_x$ mesurée et la $\tan \delta$ réelle est présentée dans l'Équation (A.2). Dans les Équations (A.1) et (A.2), α est le rapport de vide de l'échantillon de film, η est le rapport de contact, avec la condition de limitation: $\alpha \leq 1 - \eta$.

$$\varepsilon_x = \frac{\left(\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 + \alpha \eta^2 \varepsilon_r - 2\alpha \eta \varepsilon_r + \alpha \varepsilon_r \right) \tan^2 \delta + \left(\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - \alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + \alpha \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1 \right)}{\left(\alpha^2 \varepsilon_r^2 \tan^2 \delta + \alpha^2 \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \varepsilon_r - 2\alpha \eta \varepsilon_r + \alpha^2 + 2\alpha \eta + 2\alpha \varepsilon_r + \eta^2 - 2\alpha - 2\eta + 1 \right)} \varepsilon_r \quad (\text{A.1})$$

$$\tan \delta_x = \frac{\left[\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 \tan^2 \delta + (\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - 2\alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + 2\alpha \eta \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1) \right] \tan \delta}{\left(\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 + \alpha \eta^2 \varepsilon_r - 2\alpha \eta \varepsilon_r + \alpha \varepsilon_r \right) \tan^2 \delta + \alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - \alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + \alpha \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1} \quad (\text{A.2})$$

Les Équations (A.1) et (A.2) sont très complexes, mais lorsque le terme d'ordre supérieur de $\tan \delta$ est ignoré, elles peuvent être simplifiées en Équation (A.3) et Équation (A.4) comme suit:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_r \frac{1 - \eta + \alpha \eta (\varepsilon_r - 1)}{1 - \eta + \alpha (\varepsilon_r - 1)} \quad (\text{A.3})$$

$$\varepsilon_r = \frac{(\eta + \alpha \eta + \alpha \varepsilon_x - 1) \pm \sqrt{(\eta + \alpha \eta + \alpha \varepsilon_x - 1)^2 - 4\alpha \eta (\eta + \alpha - 1) \varepsilon_x}}{2\alpha \eta} \quad (\text{A.4})$$

Le résultat est le même que celui du circuit équivalent sans tenir compte de la perte diélectrique $\tan \delta$.

Les Équations simplifiées (A.5) et (A.6) pour la relation entre la $\tan \delta_x$ mesurée et la $\tan \delta$ réelle sont les suivantes:

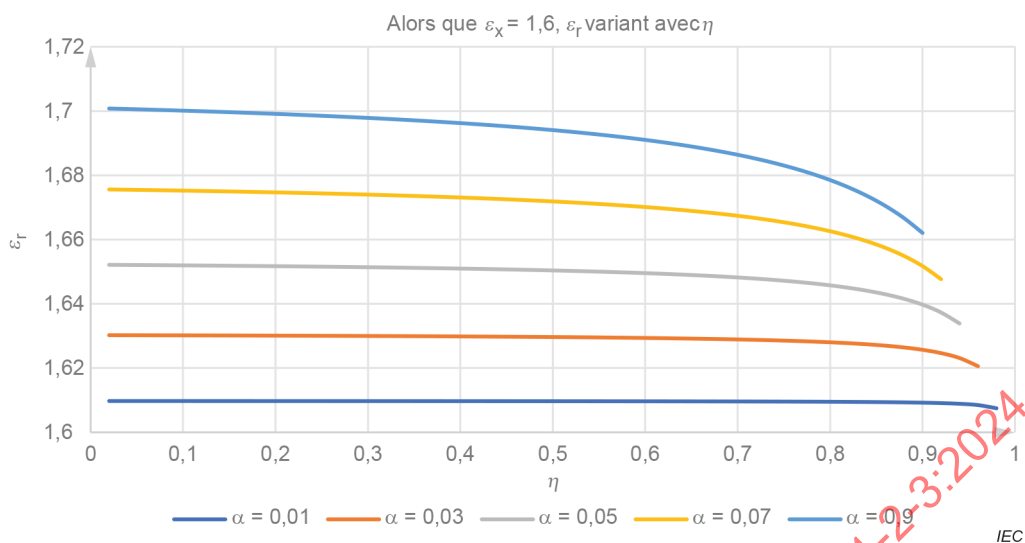
$$\tan \delta_x = \frac{\left(\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - 2\alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + 2\alpha \eta \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1 \right) \tan \delta}{\alpha^2 \eta \varepsilon_r^2 - 2\alpha^2 \eta \varepsilon_r - \alpha \eta^2 \varepsilon_r + \alpha^2 \eta + \alpha \eta^2 + \alpha \varepsilon_r + \eta^2 - \alpha - 2\eta + 1} \quad (\text{A.5})$$

$$\tan \delta = \left(1 + \frac{\alpha \varepsilon_r (1-\eta)^2}{\alpha \eta \left(\alpha (\varepsilon_r - 1)^2 + \eta + 2 \cdot \varepsilon_r - 2\eta \varepsilon_r \right) + (1-\eta)^2 - \alpha} \right) \tan \delta_x = k \tan \delta_x \quad (\text{A.6})$$

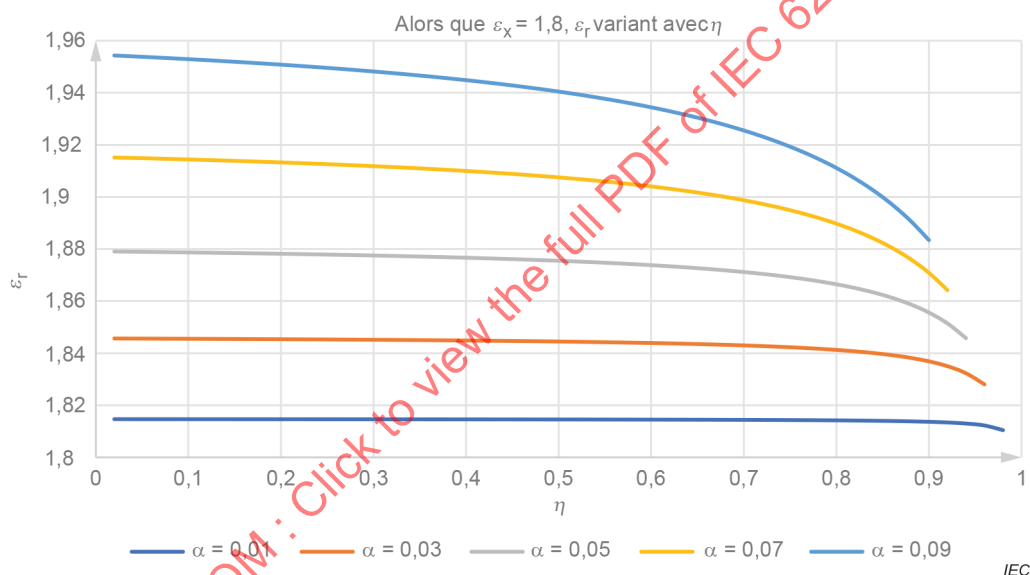
Les Équations (A.4) et (A.6) sont encore trop complexes pour être comprises, et sont donc représentées par des figures.

La relation entre la permittivité ε_r et le rapport de contact η est représentée à la Figure A.4.

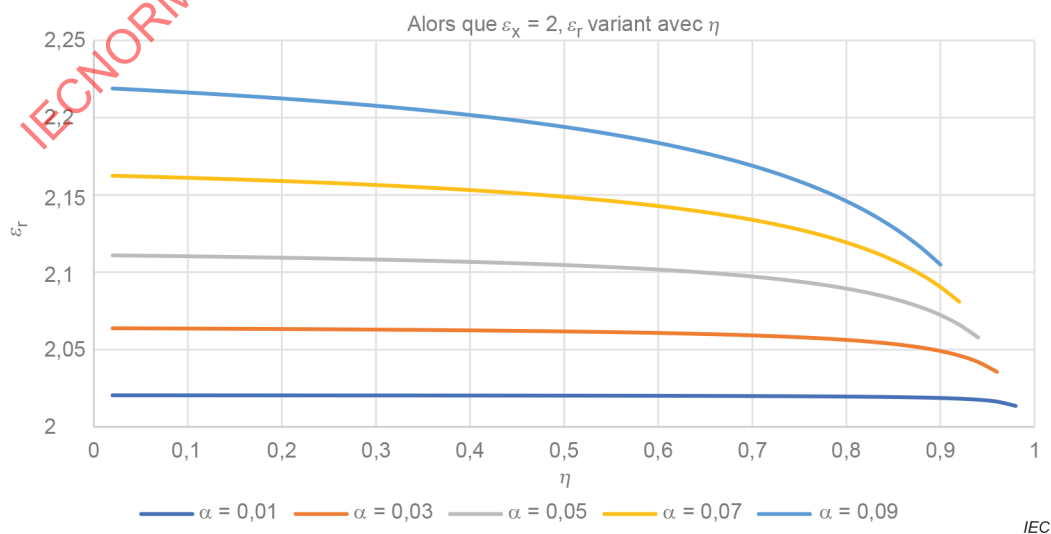
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62631-2-3:2024



a) Relation entre la permittivité ε_r et le rapport de contact η alors que $\varepsilon_x = 1,6$



b) Relation entre la permittivité ε_r et le rapport de contact η alors que $\varepsilon_x = 1,8$



c) Relation entre la permittivité ε_r et le rapport de contact η alors que $\varepsilon_x = 2,0$