

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
642-2**

Première édition
First edition
1994-02

**Résonateurs (dispositifs) à céramique
piézoélectrique –**

Partie 2:

Guide pour l'emploi des résonateurs (dispositifs)
à céramique piézoélectrique

Piezoelectric ceramic resonator units –

Part 2:

Guide to the use of piezoelectric ceramic
resonator units



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 642-2: 1994

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} 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 littéraires

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 littéraires et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraires 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.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
642-2**

Première édition
First edition
1994-02

**Résonateurs (dispositifs) à céramique
piézoélectrique –**

Partie 2:

Guide pour l'emploi des résonateurs (dispositifs)
à céramique piézoélectrique

Piezoelectric ceramic resonator units –

Part 2:

Guide to the use of piezoelectric ceramic
resonator units

© CEI 1994 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 pro-
cédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et
les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
 Articles	
1 Introduction	6
1.1 Domaine d'application	6
1.2 Références normatives	6
1.3 Définitions	8
2 Le résonateur à céramique piézoélectrique en tant que composant électronique	12
2.1 Généralités	12
2.2 Mode de vibration en fonction de la fréquence	14
2.3 Circuit électrique équivalent d'un résonateur à céramique piézoélectrique	16
2.4 Caractéristiques de la fréquence en fonction de la température	20
2.5 Paramètres des résonateurs à céramique piézoélectrique	22
2.6 Boîtiers de résonateurs à céramique piézoélectrique	32
3 Le résonateur à céramique piézoélectrique en tant que composant d'un circuit	34
3.1 Généralités	34
3.2 Oscillateurs, notions de base	40
4 Facteurs affectant le coût et la disponibilité commerciale des résonateurs à céramique piézoélectrique	50
4.1 Généralités	50
4.2 Boîtiers des résonateurs à céramique piézoélectrique	54
4.3 Tolérances de fréquence	54
4.4 Coefficient de température	54
4.5 Vieillessement	54
4.6 Conditions climatiques et mécaniques	54
4.7 Considérations générales sur les essais	56
5 Données techniques destinées à accompagner une commande	56
5.1 Liste de vérification des paramètres des résonateurs à céramique piézoélectrique à prescrire dans une spécification particulière	56
5.2 Exigences	56
Annexe A – Bibliographie	60

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Introduction	7
1.1 Scope	7
1.2 Normative references	7
1.3 Definitions	9
2 The piezoelectric ceramic resonator as an electronic component	13
2.1 General	13
2.2 Mode of vibration as a function of frequency	15
2.3 The equivalent electrical circuit of a piezoelectric ceramic resonator	17
2.4 Frequency versus temperature characteristics	21
2.5 Piezoelectric ceramic resonator parameters	23
2.6 Piezoelectric ceramic resonator enclosures	33
3 The piezoelectric ceramic resonator unit as a circuit component	35
3.1 General	35
3.2 Oscillators, basic concept	41
4 Factors affecting cost and availability of piezoelectric ceramic resonator units	51
4.1 General	51
4.2 Piezoelectric ceramic resonator unit enclosures	55
4.3 Frequency tolerances (overall frequency tolerance)	55
4.4 Temperature coefficient	55
4.5 Ageing	55
4.6 Environmental	55
4.7 General testing considerations	57
5 Technical data to accompany order form	57
5.1 Check-list of piezoelectric ceramic resonator unit parameters to be detailed in the specification	57
5.2 Requirements	57
Annex A – Bibliography	60

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RÉSONATEURS (DISPOSITIFS) À CÉRAMIQUE PIÉZOÉLECTRIQUE –**Partie 2: Guide pour l'emploi des résonateurs (dispositifs)
à céramique piézoélectrique****AVANT-PROPOS**

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études 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.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La Norme internationale CEI 642-2 a été établie par le comité d'études 49 de la CEI: Dispositifs piézoélectriques et diélectriques pour la commande et le choix de la fréquence.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
49(BC)250	49(BC)265

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

La CEI 642 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: *Résonateurs (dispositifs) à céramique piézoélectrique pour le contrôle et la sélection de la fréquence*:

CEI 642 (1979), Chapitre I: Valeurs et conditions normalisées, Chapitre II: Conditions de mesure et d'essais (une fois révisée cette norme constituera la partie 1, CEI 642-1).

Amendement 1 (1992)

CEI 642-2 (1994), Partie 2: Guide pour l'emploi des résonateurs (dispositifs) à céramique piézoélectrique.

CEI 642-3 (1992), Partie 3: Encombrements normalisés.

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PIEZOELECTRIC CERAMIC RESONATOR UNITS –

Part 2: Guide to the use of piezoelectric
ceramic resonator units

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 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.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 642-2 has been prepared by IEC technical committee 49: Piezoelectric and dielectric devices for frequency control and selection.

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

DIS	Report on voting
49(CO)250	49(CO)265

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

IEC 642 consists of the following parts, under the general title *Piezoelectric ceramic resonators and resonator units for frequency control and selection*:

IEC 642 (1979), Chapter I: Standard values and conditions, Chapter II: Measuring and test conditions (the revision of IEC 642 will constitute the new part 1, IEC 642-1).

Amendment 1 (1992)

IEC 642-2 (1994), Part 2: Guide to the use of piezoelectric ceramic resonator units.

IEC 642-3 (1992), Part 3: Standard outlines.

Annex A is for information only.

RÉSONATEURS (DISPOSITIFS) À CÉRAMIQUE PIÉZOÉLECTRIQUE –

Partie 2: Guide pour l'emploi des résonateurs (dispositifs) à céramique piézoélectrique

1 Introduction

1.1 Domaine d'application

La présente norme a été établie pour répondre à un désir généralement exprimé, tant par les utilisateurs que par les fabricants, de disposer d'un guide pour l'emploi des résonateurs à céramique piézoélectrique destinés aux oscillateurs afin qu'ils puissent être utilisés dans les meilleures conditions.

Elle attire l'attention sur quelques-unes des questions fondamentales que l'utilisateur devrait examiner avant de commander un résonateur pour une application nouvelle; on espère que, ce faisant, il contribuera à garantir un fonctionnement satisfaisant, un coût et une disponibilité commerciale favorables.

Cette norme n'a pas pour but de développer des notions théoriques ni de couvrir tous les cas qui se présentent en pratique.

Enfin, elle ne peut se substituer à une liaison étroite entre le fabricant et l'utilisateur.

1.2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 642. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 642 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales actuellement en vigueur.

CEI 68: *Essais d'environnement*

CEI 122-2: 1983, *Quartz pour le contrôle et la sélection de la fréquence – Deuxième partie: Guide pour l'emploi des résonateurs à quartz pour le contrôle et la sélection de la fréquence*

CEI 302: 1969, *Définitions normalisées et méthodes de mesures pour les résonateurs piézoélectriques de fréquences inférieures à 30 MHz*

CEI 642: 1979, *Résonateurs et dispositifs en céramique piézoélectrique pour la commande et le choix de la fréquence – Chapitre I: Valeurs et conditions normalisées – Chapitre II: Conditions de mesure et d'essais*

CEI 1253-2: 1993, *Résonateurs à céramique piézoélectrique – Spécification dans le système CEI d'assurance de la qualité des composants électroniques (IECQ) – Partie 2: Spécification intermédiaire – Homologation*

PIEZOELECTRIC CERAMIC RESONATOR UNITS –

Part 2: Guide to the use of piezoelectric ceramic resonator units

1 Introduction

1.1 Scope

This standard has been compiled in response to a generally expressed desire on the part of both users and manufacturers for a guide to the use of piezoelectric ceramic resonator units for oscillators, so that the piezoelectric ceramic resonator units may be used to their best advantage.

It draws attention to some of the more fundamental questions which should be considered by the user before he places his order for a unit for a new application, and in so doing will, it is hoped, help ensure against unsatisfactory performance, unfavourable cost and non-availability.

It is not the function of this standard to explain theory, nor to attempt to cover all the eventualities that may arise in practical circumstances.

Lastly, it should not be considered as a substitute for close liaison between manufacturer and user.

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 642. At the time of publication of this standard, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 642 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 68: *Environmental testing*

IEC 122-2: 1983, *Quartz crystal units for frequency control and selection – Part 2: Guide to the use of quartz crystal units for frequency control and selection*

IEC 302: 1969, *Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators operating over the frequency range up to 30 MHz*

IEC 642: 1979, *Piezoelectric ceramic resonators and resonator units for frequency control and selection – Chapter I: Standard values and conditions – Chapter II: Measuring and test conditions*

IEC 1253-2: 1993, *Piezoelectric ceramic resonators – A specification in the IEC Quality Assessment System for Electronic Components (IECQ) – Part 2: Sectional specification – Qualification approval*

1.3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions suivantes ainsi que celles de la CEI 122-2 et de la CEI 642 s'appliquent.

1.3.1 Termes généraux

1.3.1.1 élément à céramique piézoélectrique: Élément de matériau en céramique piézoélectrique fait selon une forme géométrique, des dimensions et une orientation données, par rapport à l'axe de polarisation.

1.3.1.2 polarisation: Orientation de l'axe de polarisation dans une seule direction en appliquant un champ électrique élevé de courant continu pour créer l'effet piézoélectrique dans le matériau céramique.

1.3.1.3 électrode: Plaque ou film électriquement conducteur, en contact avec ou à proximité d'un élément en céramique, permettant d'appliquer à cet élément un champ électrique.

1.3.1.4 résonateur à céramique piézoélectrique: Élément en céramique piézoélectrique comportant des électrodes et que l'on peut faire vibrer dans un mode spécifique.

1.3.1.5 résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif): Résonateur à céramique piézoélectrique monté dans un boîtier.

1.3.1.6 système de montage: Moyens par lesquels le résonateur à céramique piézoélectrique est monté.

1.3.1.7 mode de vibration: Configuration du mouvement des particules élémentaires dans un corps vibrant, résultant des contraintes appliquées à ce corps.

Les modes de vibration les plus courants sont:

- a) mode d'expansion de surface;
- b) mode de cisaillement d'épaisseur à énergie piégée;
- c) mode d'expansion d'épaisseur à énergie piégée.

1.3.1.8 résonateurs à céramique piézoélectrique fonctionnant sur fondamental: Résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) dans lequel le résonateur est conçu pour fonctionner à la plus basse fréquence d'un mode de vibration donné.

1.3.1.9 résonateur à céramique piézoélectrique fonctionnant sur partiel: Résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) dans lequel le résonateur est conçu pour fonctionner sur un ordre plus élevé que le fondamental du mode de vibration donné.

1.3.1.10 ordre d'un partiel: Rang des partiels successifs d'un mode de vibration donné dans une série des fréquences croissantes en commençant par un pour le mode fondamental.

Pour le mode de cisaillement et le mode d'expansion, l'ordre d'un partiel est égal au quotient de la fréquence du partiel par la fréquence fondamentale, arrondi à l'entier le plus proche.

1.3 Definitions

For the needs of this International Standard, the following definitions and those of IEC 122-2 and IEC 642 apply.

1.3.1 General terms

1.3.1.1 piezoelectric ceramic element: An element of piezoelectric ceramic material made to a given geometric shape, size and orientation with respect to the polarizing axis.

1.3.1.2 polarization: Orientation of the polarization axis in one direction by applying a high d.c. electric field, in order to create the piezoelectric effect in ceramic material.

1.3.1.3 electrode: An electrically conductive plate or film in contact with, or in proximity to, a face of a piezoelectric ceramic element, by means of which an electric field can be applied to the element.

1.3.1.4 piezoelectric ceramic resonator: A piezoelectric ceramic element, with electrodes, which can be made to vibrate in a specific mode.

1.3.1.5 piezoelectric ceramic resonator unit: Piezoelectric ceramic resonator mounted in an enclosure.

1.3.1.6 mounting system: The means by which the piezoelectric ceramic resonator is supported.

1.3.1.7 mode of vibration: The pattern of motion in a vibrating body for the individual particles resulting from stresses applied to the body.

The most common modes of vibration are:

- a) area expansion mode;
- b) trapped thickness shear mode;
- c) trapped thickness expansion mode.

1.3.1.8 fundamental piezoelectric ceramic resonator unit: A piezoelectric ceramic resonator unit in which the resonator is designed to operate at the lowest order of a given mode of vibration.

1.3.1.9 overtone piezoelectric ceramic resonator unit: A piezoelectric ceramic resonator unit in which the resonator is designed to operate at a higher order than the lowest of the given mode of vibration.

1.3.1.10 overtone order: The numbers allotted to successive overtones of a given mode of vibration are an ascending series of integral numbers commencing with the fundamental as unity.

For shear and expansion modes, this overtone order is the integral multiple of the fundamental frequency to which the overtone frequency approximates.

1.3.1.11 boîtier pour résonateur à céramique piézoélectrique: Boîtier assurant la protection du résonateur à céramique piézoélectrique et du système de montage.

1.3.2 Propriétés électriques

1.3.2.1 circuit équivalent du résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif): Circuit électrique de même impédance que le résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) au voisinage de la fréquence de résonance.

Il est généralement représenté par une inductance, une capacité et une résistance en série, cette série étant dérivée par une capacité entre les bornes du résonateur à céramique piézoélectrique. Les paramètres de cette branche série, constituée par l'inductance, la capacité et la résistance sont habituellement donnés par L_1 , C_1 et R_1 respectivement. La capacité parallèle est exprimée par C_o (voir figure 4).

1.3.2.2 fréquence de résonance, f_r : La plus basse des deux fréquences du résonateur à céramique piézoélectrique, dans des conditions spécifiées, pour laquelle le résonateur (dispositif) est équivalent à une résistance pure.

1.3.2.3 fréquence d'antirésonance, f_a : La plus haute des deux fréquences du résonateur à céramique piézoélectrique, dans des conditions spécifiées, pour laquelle le résonateur (dispositif) est équivalent à une résistance pure.

1.3.2.4 fréquence de résonance avec capacité de charge, f_L : Une des deux fréquences du résonateur à céramique piézoélectrique associé à une capacité de charge série ou parallèle, dans des conditions spécifiées, pour laquelle la combinaison est équivalente à une résistance pure.

Cette fréquence est la plus basse des deux fréquences lorsque la capacité de charge est en série, et la plus élevée lorsqu'elle est en parallèle (voir figure 13).

Pour la valeur spécifiée de la capacité de charge (C_L), ces fréquences sont identiques pour toutes les applications pratiques et sont données par:

$$\frac{1}{f_L} = 2\pi \sqrt{\frac{L_1 C_1 (C_o + C_L)}{C_1 + C_o + C_L}}$$

1.3.3 Définitions relatives au résonateur à céramique piézoélectrique en fonctionnement

1.3.3.1 fréquence nominale: Fréquence prescrite par la spécification du résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif).

1.3.3.2 fréquence de fonctionnement, f_w : Fréquence de fonctionnement d'un résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) avec ses circuits associés.

1.3.3.3 gamme de températures de fonctionnement: Gamme de températures mesurée sur le boîtier dans lequel le résonateur à céramique piézoélectrique doit satisfaire aux tolérances spécifiées.

1.3.1.11 piezoelectric ceramic resonator enclosure: The enclosure protecting the piezoelectric ceramic resonator and mounting system.

1.3.2 *Electrical properties*

1.3.2.1 piezoelectric ceramic resonator unit equivalent circuit: The electrical circuit which has the same impedance as the piezoelectric ceramic resonator unit in the neighbourhood of resonance.

It is usually represented by an inductance, capacitance and resistance in series, and this series arm is shunted by the capacitance between the terminals of the piezoelectric ceramic resonator unit. The parameters of the series arm of inductance, capacitance and resistance are usually given by L_1 , C_1 and R_1 respectively. The parallel capacitance is given by C_0 (see figure 4).

1.3.2.2 resonance frequency, f_r : The lower of the two frequencies of a piezoelectric ceramic resonator unit, under specified conditions, at which the electrical impedance of the resonator unit is resistive.

1.3.2.3 anti-resonance frequency, f_a : The higher of the two frequencies of a piezoelectric ceramic resonator unit, under specified conditions, at which the electrical impedance of the resonator unit is resistive.

1.3.2.4 load resonance frequency, f_L : One of the two frequencies of a piezoelectric ceramic resonator unit in association with a series or with a parallel load capacitance, under specified conditions, at which the electrical impedance of the combination is resistive.

This frequency is the lower of the two frequencies when the load capacitance is in series, and the higher when it is in parallel (see figure 13).

For a given value of load capacitance (C_L), these frequencies are identical for all practical purposes and are given by:

$$\frac{1}{f_L} = 2\pi \sqrt{\frac{L_1 C_1 (C_0 + C_L)}{C_1 + C_0 + C_L}}$$

1.3.3 *Operational properties*

1.3.3.1 nominal frequency: The frequency assigned in the specification of the piezoelectric ceramic resonator unit.

1.3.3.2 working frequency, f_w : The operational frequency of the piezoelectric ceramic resonator unit, together with its associated circuitry.

1.3.3.3 operating temperature range: The range of temperature as measured on the enclosure over which the ceramic resonator unit shall work within the specified tolerances.

1.3.3.4 température de référence: Température à laquelle certaines mesures sont faites sur le résonateur à céramique piézoélectrique. Pour les résonateurs à températures contrôlées, la température de référence est le point central de la gamme de température contrôlée.

Pour les résonateurs à céramique piézoélectrique à température non contrôlée, la température de référence est habituellement de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

1.3.3.5 résistance de résonance, R_r : Résistance du résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) à la fréquence de résonance f_r .

1.3.3.6 résistance de résonance à la charge, R_L : Résistance du résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) en série avec une capacité externe à la fréquence de résonance à la charge f_L .

1.3.3.7 niveau d'excitation: Conditions de mesure imposées au résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) s'exprimant par la puissance dissipée.

1.3.3.8 réponse indésirable: Fréquence de résonance d'un résonateur à céramique piézoélectrique autre que la fréquence associée à la fréquence d'oscillation.

1.3.3.9 capacité de charge, C_L : Capacité externe effective associée au résonateur à céramique piézoélectrique (dispositif) qui conditionne la fréquence de résonance à la charge f_L .

1.3.3.10 vieillissement (variation à long terme des paramètres): Relation qui existe entre la fréquence d'oscillation et le temps.

NOTE – Il sera spécifié, conformément aux exigences de l'utilisateur, lorsque les résonateurs à céramique piézoélectrique sont utilisés selon des exigences sévères pour la précision de la fréquence.

2 Le résonateur à céramique piézoélectrique en tant que composant électronique

2.1 Généralités

Les matériaux constitués d'un seul cristal sont appelés monocristaux, tandis que ceux composés de plusieurs éléments sont appelés céramiques.

Les céramiques piézoélectriques sont composées de beaucoup de cristaux. Les monocristaux tels que le cristal de quartz, dans lequel tous les axes de polarisation interne sont orientés dans une seule direction, peuvent être utilisés comme matériaux piézoélectriques en tant que tels.

Cependant, les céramiques, qui sont composées de petits cristaux inégalement orientés, ne présentent pas d'effet piézoélectrique parce que les axes de polarisation des cristaux sont orientés dans les directions aléatoires. Dans ce cas, les céramiques agissent comme matériaux diélectriques. Pour créer l'effet piézoélectrique dans les céramiques il est nécessaire d'orienter l'axe de polarisation dans une seule direction.

Cela est effectué en appliquant un champ électrique d'intensité élevée pendant une longue durée; ce processus est appelé traitement de polarisation.

1.3.3.4 reference temperature: The temperature at which certain piezoelectric ceramic resonator unit measurements are made. For controlled temperature units, the reference temperature is the mid-point of the controlled temperature range.

For non-controlled temperature units, the reference temperature is normally $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.3.3.5 resonance resistance, R_r : The resistance of the piezoelectric ceramic resonator unit at the resonance frequency f_r .

1.3.3.6 load resonance resistance, R_L : The resistance of the piezoelectric ceramic resonator unit in series with an external capacitance at the load resonance frequency f_L .

1.3.3.7 level of drive: Measurement conditions imposed upon the piezoelectric ceramic resonator unit expressed in terms of power dissipated.

1.3.3.8 unwanted response: A state of resonance of a piezoelectric ceramic resonator other than that associated with the oscillation frequency.

1.3.3.9 load capacitance, C_L : The effective external capacitance associated with the piezoelectric ceramic resonator unit which determines the load resonance frequency f_L .

1.3.3.10 ageing (long-term parameter variation): The relation which exists between the oscillation frequency and time.

NOTE – It will be specified, according to user's request, when piezoelectric ceramic resonator units are used under severe requirements for frequency accuracy.

2 The piezoelectric ceramic resonator as an electronic component

2.1 General

Materials, the whole body of which are of crystal, are called single crystals, while those composed of many crystal bodies are called ceramics.

Piezoelectric ceramics are composed of many crystals. Single crystals, like a quartz crystal, in which the internal polarization axes are all oriented in one direction, can be used as piezoelectric materials just as they are.

However, ceramics, which are composed of fine crystals unevenly directed, do not show the piezoelectric effect, since the crystals' polar axes orient in random directions. In this case ceramics act as dielectric materials. In order to create the piezoelectric effect in ceramics it is necessary to orient the polarization axis in one direction.

This is accomplished by applying a direct electric field of high intensity during a long time, and the process is referred to as the polarization treatment.

Les matériaux principaux utilisés pour les résonateurs à céramique piézoélectrique sont le titanate-zirconate de plomb et le titanate de plomb. Le coefficient de température de la fréquence de résonance peut être ajusté en changeant le rapport du zirconate de plomb au titanate de plomb pour chaque mode de vibration.

Les dimensions physiques sont étroitement contrôlées parce qu'elles déterminent la fréquence de résonance. Les fréquences de résonance sont inversement proportionnelles aux dimensions physiques. Les paramètres typiques des céramiques piézoélectriques utilisés pour résonateurs sont donnés dans le tableau 1.

Dans le tableau 1, les constantes de la fréquence sont la fréquence de résonance pour le mode d'expansion planaire fonction du diamètre d'un disque en céramique, et les coefficients de couplage sont aussi pour le mode d'expansion planaire.

Tableau 1 – Données typiques pour les céramiques piézoélectriques utilisées pour résonateurs

Matériau	Constante de la fréquence m/s	Coefficient de couplage k %	Permittivité ϵ	Q_m
PZT-6D	2 510	35	790	830
PZT-6E	2 040	31	820	1 130
PCM-18	2 520	39	1 200	1 800
PCM-67	2 580	32	620	3 130

2.2 Mode de vibration en fonction de la fréquence

La gamme de fréquences couverte par l'ensemble des résonateurs à céramique piézoélectrique couvre approximativement le domaine allant de 10 kHz à 30 MHz. La résonance mécanique est classée conformément à la direction de vibration et au type d'ondes engendrées.

Le mode de vibration dépend de la configuration des électrodes, de la direction de polarisation et de la direction d'excitation. Les différents modes de vibration entraînent des gammes de fréquences différentes des résonateurs.

The basic materials of piezoelectric ceramic resonators are lead zirconate titanate and lead titanate. The temperature coefficient of the resonance frequency can be adjusted by changing the lead zirconate ratio to lead titanate for each mode of vibration.

Physical dimensions are tightly controlled, since they determine the resonance frequency. The resonance frequencies are inversely proportional to physical dimensions. Typical data of piezoelectric ceramics used for resonators are listed in table 1.

In table 1, frequency constants are resonance frequency for planar expansion mode multiplied by diameter of a ceramic disc, and coupling coefficients are also for planar expansion mode.

Table 1 – Typical data of piezoelectric ceramics used for resonators

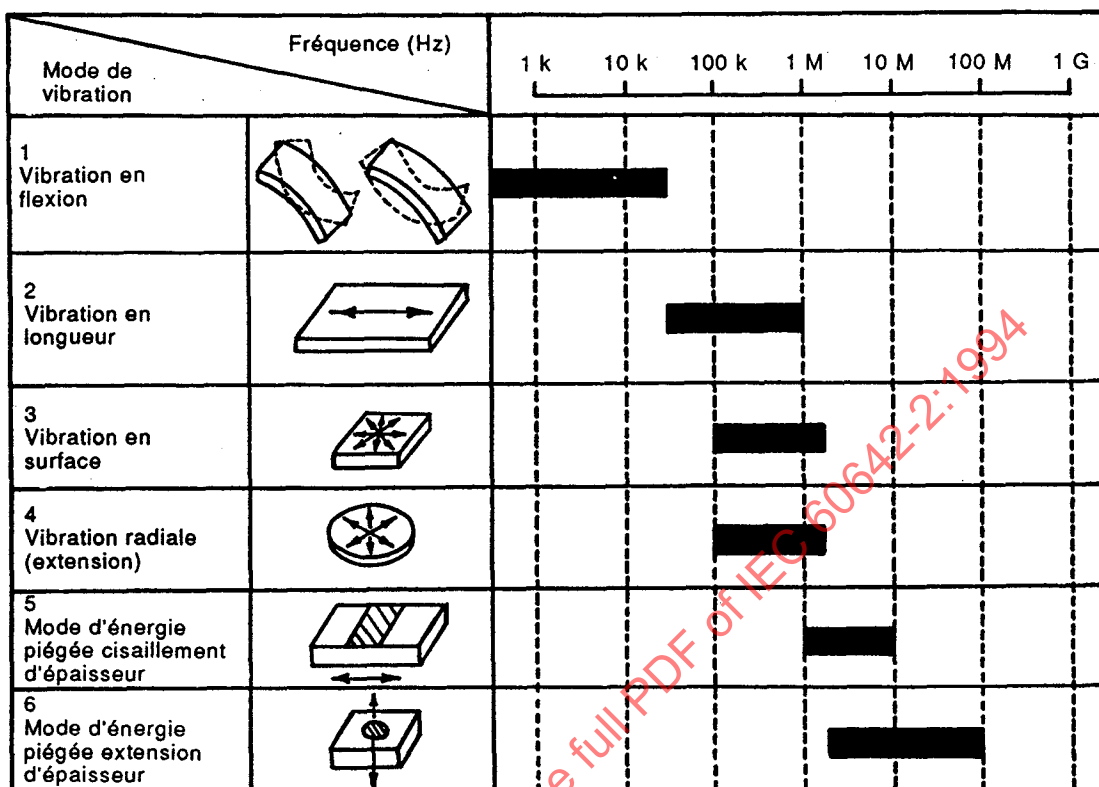
Material	Frequency constant m/s	Coupling coefficient k %	Permittivity ϵ	Q_m
PZT-6D	2 510	35	790	830
PZT-6E	2 040	31	820	1 130
PCM-18	2 520	39	1 200	1 800
PCM-67	2 580	32	620	3 130

2.2 Mode of vibration as a function of frequency

The frequency range covered commercially by piezoelectric ceramic resonators may be taken from 10 kHz to 30 MHz. Mechanical resonance is classified according to the vibration direction and the type of waves generated.

This is referred to as the vibration mode, which depends on the shape of electrodes, direction of polarization and driving direction. Various modes result in various frequency ranges of the resonator.

La figure 1 montre les modes de vibration typiques et les gammes de fréquences des résonateurs à céramique piézoélectrique.



CEI 034194

NOTE – Le signe $\longleftrightarrow$ montre la direction de vibration.

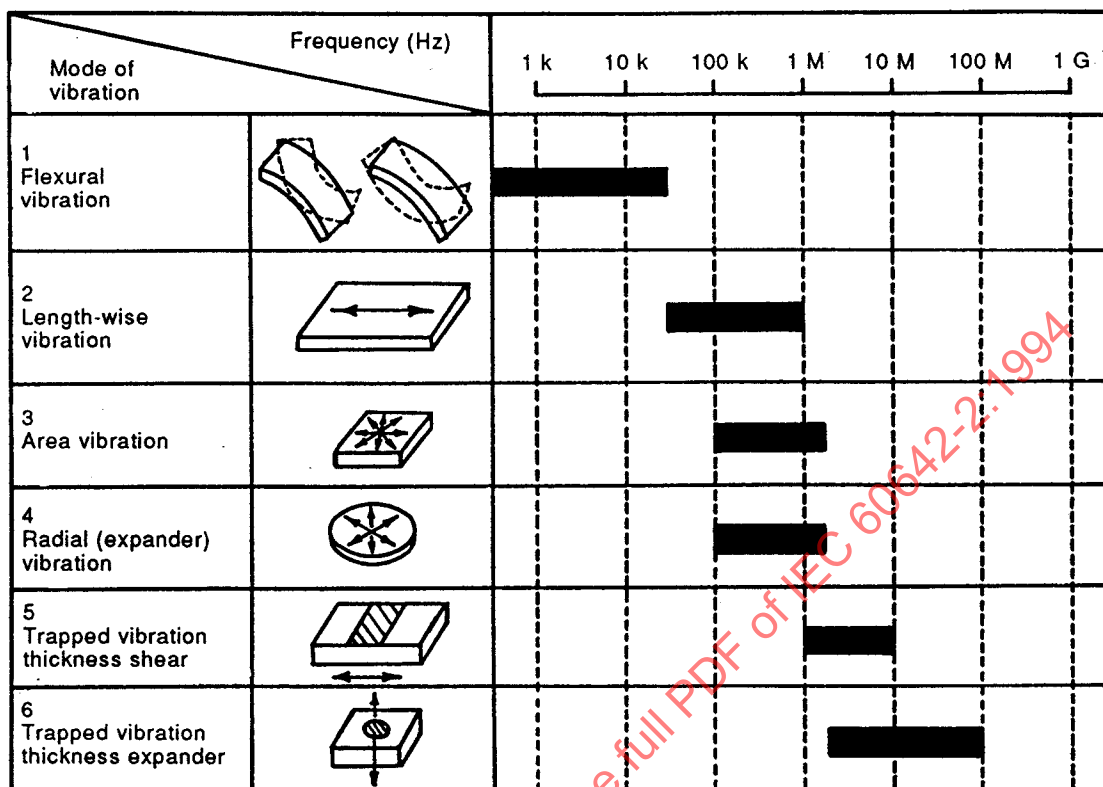
Figure 1 – Modes de vibration et gamme de fréquences des résonateurs à céramique piézoélectrique

2.3 Circuit électrique équivalent d'un résonateur à céramique piézoélectrique

Le résonateur à céramique piézoélectrique se compose d'une lame petite et fine en céramique piézoélectrique, dont les surfaces sont métallisées pour former les électrodes.

La figure 2 montre le symbole pour le résonateur à céramique piézoélectrique dans les circuits électriques. Les caractéristiques de l'impédance et de la phase mesurées entre deux sorties de la figure 2 sont montrées à la figure 3. Cela illustre que le résonateur devient inductif dans la région de fréquences située entre la fréquence de résonance (f_r), qui est résistive à la basse fréquence, et la fréquence d'antirésonance (f_a), qui est résistive à la fréquence élevée. Il devient capacitif dans d'autres régions de la fréquence.

Figure 1 shows typical modes of vibration and frequency ranges of piezoelectric ceramic resonators.



IEC 034/94

NOTE - shows the direction of vibration

Figure 1 – Mode of vibration and frequency range of piezoelectric ceramic resonator

2.3 The equivalent electrical circuit of a piezoelectric ceramic resonator

A piezoelectric ceramic resonator is a small, thin piece of piezoelectric ceramics, two opposite surfaces of which are metallized to make electrodes.

Figure 2 shows the symbol for piezoelectric ceramic resonator in electric circuits. The impedance and the phase characteristics measured between the two terminals in figure 2 are shown in figure 3. This illustrates that the resonator becomes inductive in the frequency zone between the resonance frequency (f_r), which is resistive at lower frequency, and anti-resonance frequency (f_a), which is resistive at higher frequency. It becomes capacitive in other frequency zones.

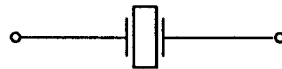
Cela signifie que la vibration mécanique d'un résonateur à deux sorties peut être remplacée par une combinaison d'un circuit de résonance série et parallèle, comme il est montré à la figure 4. Les constantes du circuit équivalent montré à la figure 4 peuvent être déterminées selon les formules suivantes:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 C_1 C_o}{C_1 + C_o}}} = f_r \sqrt{1 + C_1 / C_o} \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r C_1 R_1} \quad (3)$$

Q_m est nommé facteur de qualité mécanique et il est inversement proportionnel aux pertes mécaniques dans un résonateur à céramique piézoélectrique.



CEI 035/94

L'impédance entre deux sorties $Z = R + jX$,

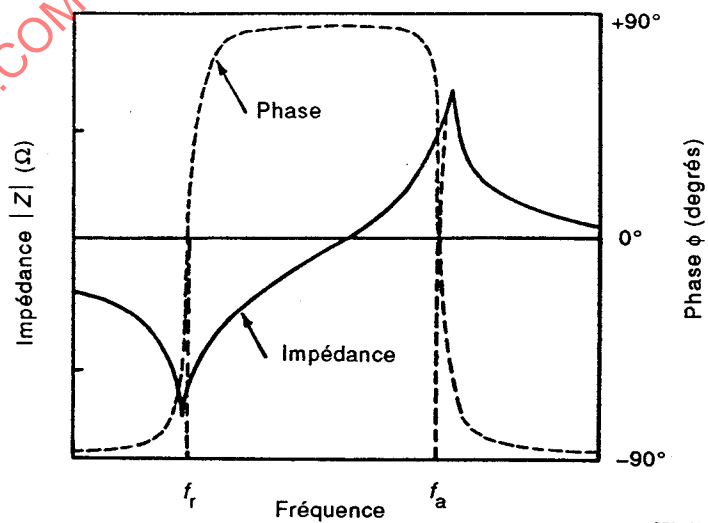
où

R est la composante réelle;

X est la composante réactive.

Phase $\Phi = \tan^{-1} X/R$

Figure 2 – Symbole d'un résonateur à céramique piézoélectrique



CEI 036/94

Figure 3 – Variation des caractéristiques de l'impédance et de la phase au voisinage d'une résonance

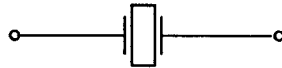
This means that the mechanical vibration of a two-terminal resonator can be replaced equivalently with combination of series and parallel resonance circuit as shown in figure 4. The equivalent circuit constants in figure 4 can be determined from the following formulae:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 C_1 C_o}{C_1 + C_o}}} = f_r \sqrt{1 + C_1 / C_o} \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{1}{2\pi f_r C_1 R_1} \quad (3)$$

Q_m is named mechanical quality factor Q and is inversely proportional to mechanical loss in a piezoelectric ceramic resonator.



IEC 035/94

Impedance between two terminals $Z = R + jX$,

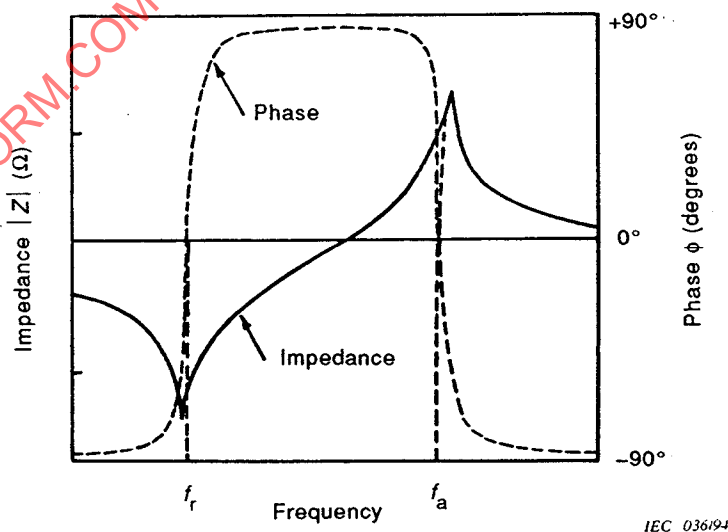
where

R is the real component;

X is the reactive component.

Phase $\Phi = \tan^{-1} X/R$

Figure 2 – The symbol of a piezoelectric ceramic resonator



IEC 036/94

Figure 3 – Impedance and phase variation characteristics by frequency in the vicinity of resonance

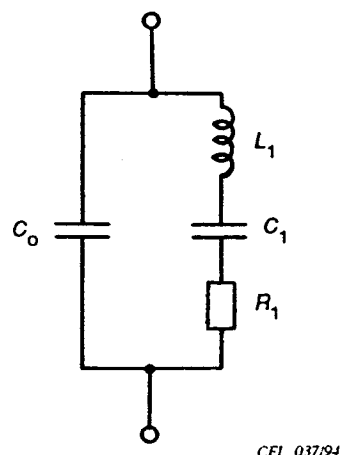


Figure 4 – Circuit équivalent simplifié d'un résonateur à céramique piézoélectrique

2.4 Caractéristiques de la fréquence en fonction de la température

Le coefficient de température de la fréquence de résonance peut être ajusté en changeant le rapport du zirconate de plomb au titanate de plomb pour chaque mode de vibration, tels que les modes d'expansion, de cisaillement et d'épaisseur.

La figure 5 montre un exemple de ces caractéristiques.

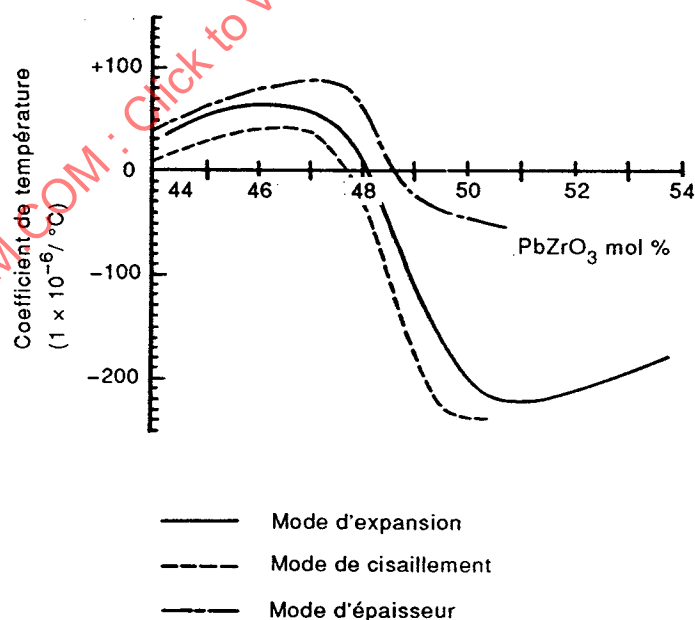


Figure 5 – Caractéristiques du coefficient de température de la fréquence de résonance en fonction du rapport de PbZrO_3 à PbTiO_3

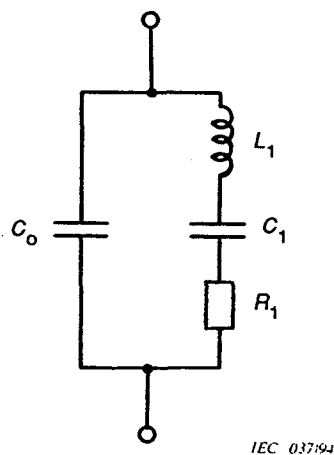


Figure 4 – Simplified equivalent circuit of a piezoelectric ceramic resonator

2.4 Frequency versus temperature characteristics

The temperature coefficient of the resonance frequency can be adjusted by changing the lead zirconate ratio to lead titanate for each vibration mode, such as the expansion, shear and thickness modes.

Figure 5 shows an example of these characteristics.

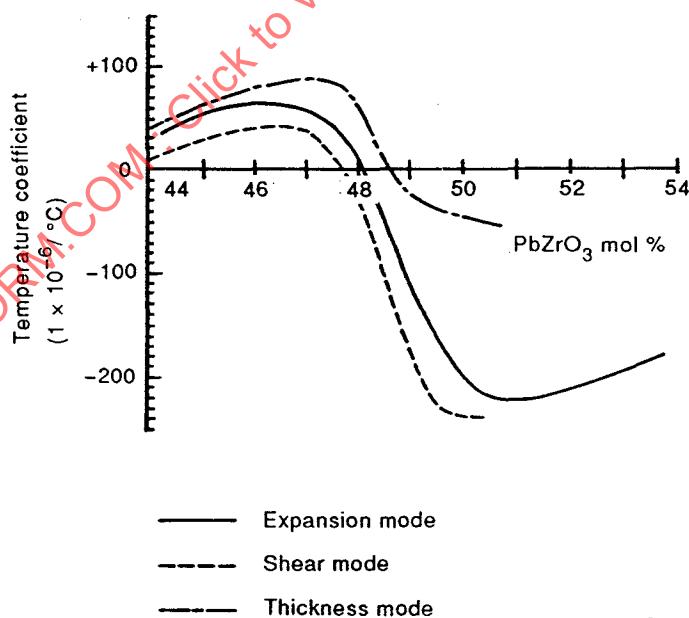


Figure 5 – Temperature coefficient characteristics of resonance frequency by PbZrO_3 ratio to PbTiO_3

2.5 Paramètres des résonateurs à céramique piézoélectrique

2.5.1 Information détaillée sur les paramètres des résonateurs à céramique piézoélectrique

Le circuit électrique équivalent se compose des paramètres dynamiques L_1 , C_1 , R_1 et de la capacité parallèle C_0 . Ils sont tous reliés entre eux et le changement de l'un peut entraîner le changement de tous les autres.

On peut exprimer la relation entre ces paramètres par les équations suivantes à la fréquence de résonance (f_r):

$$2 \pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (4)$$

$$Q_m = \frac{2 \pi f_r L_1}{R_1} \quad (5)$$

NOTE - Les équations exactes peuvent être trouvées dans la CEI 302.

La figure 6 montre la gamme des valeurs de l'inductance réalisables, la figure 7 montre la gamme des valeurs de la capacité réalisables et la figure 8 montre la gamme des résistances réalisables pour différentes gammes de fréquences et de modes de vibration.

2.5.2 Effets du niveau d'excitation

La fréquence de résonance de tous les résonateurs à céramique piézoélectrique est modifiée, dans une certaine mesure, par les variations du niveau d'excitation. C'est pourquoi il est essentiel que le niveau d'excitation spécifié soit celui qui est réellement utilisé dans l'équipement.

Un niveau d'excitation excessif peut avoir également comme conséquence une modification irréversible de la fréquence du résonateur à céramique piézoélectrique et il est capital que l'équipement soit conçu pour que cette éventualité ne puisse se produire.

En général, quand le niveau d'excitation augmente, la variation de fréquence est négative pour les résonateurs à céramique piézoélectrique sur le mode d'expansion et le mode à énergie piégée.

2.5 Piezoelectric ceramic resonator parameters

2.5.1 Detailed information on piezoelectric ceramic resonator parameters

The equivalent electrical circuit consists of the motional parameters L_1 , C_1 , R_1 and the shunt capacitance C_0 . These are all interrelated and a change of one may result in a change in all the others.

The relationship between these parameters can be seen by the following equations at the resonance frequency (f_r):

$$2 \pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (4)$$

$$Q_m = \frac{2 \pi f_r L_1}{R_1} \quad (5)$$

NOTE - The exact equations can be found in IEC 302.

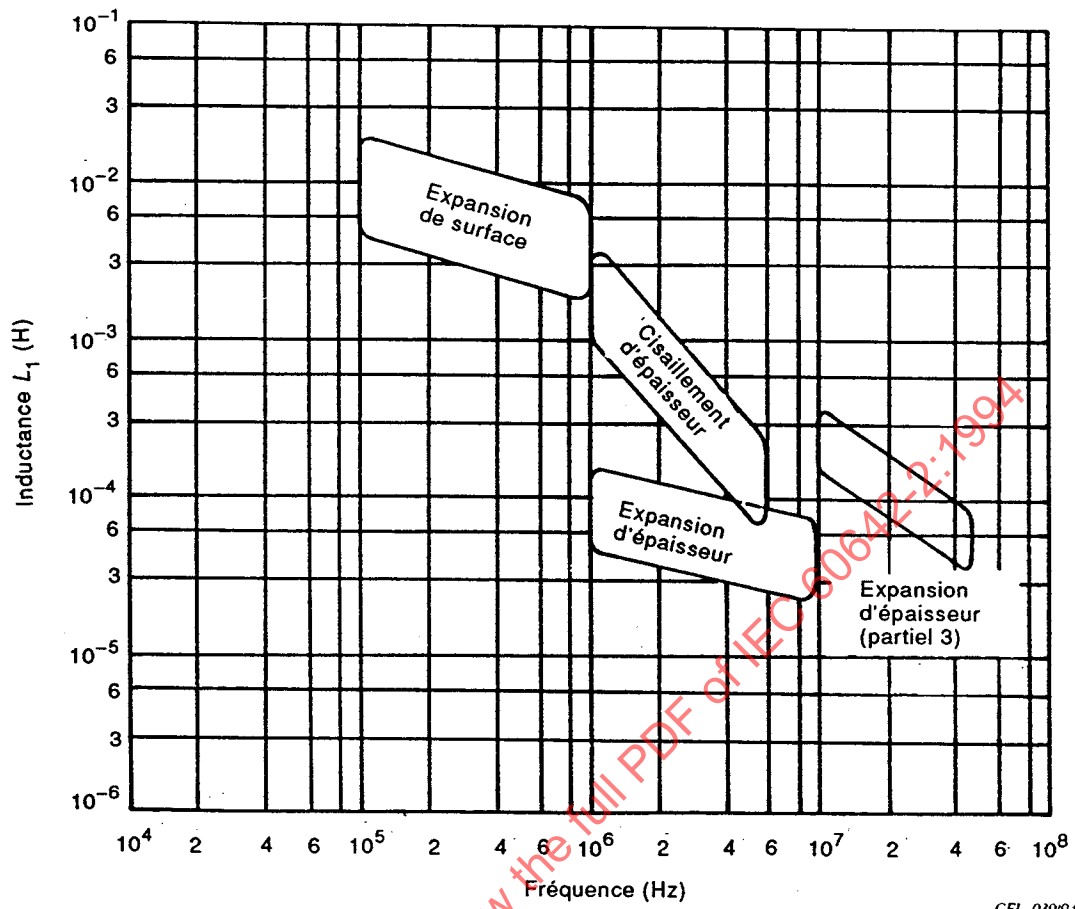
Figure 6 shows a range of realizable inductance values, figure 7 shows a range of realizable capacitance values, and figure 8 shows a range of realizable resistance values in practice for various frequency ranges and vibration modes.

2.5.2 Effects of drive level

The resonance frequency of all piezoelectric ceramic resonators will change to some degree with variations of drive level. Therefore, it is necessary that the drive level specified is that actually being used in the equipment.

The effect of excessive drive on the piezoelectric ceramic resonators could also cause an irreversible frequency change and it is essential that the equipment designer ensures that this condition will not occur.

In general, the frequency change with increase of drive level will be negative on both the area expansion mode and energy trapped mode piezoelectric ceramic resonators.



CEI 039/94

Figure 6 – Gammes d'inductances pour différents modes de vibration

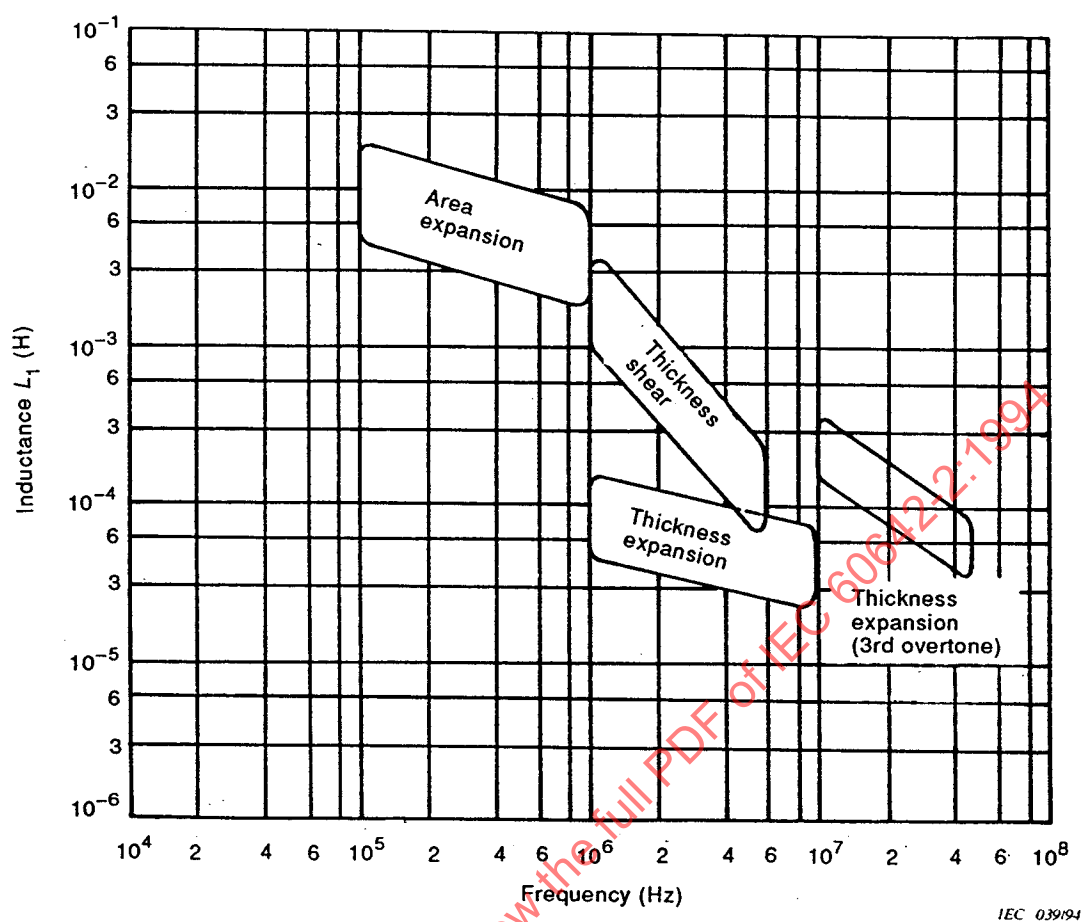
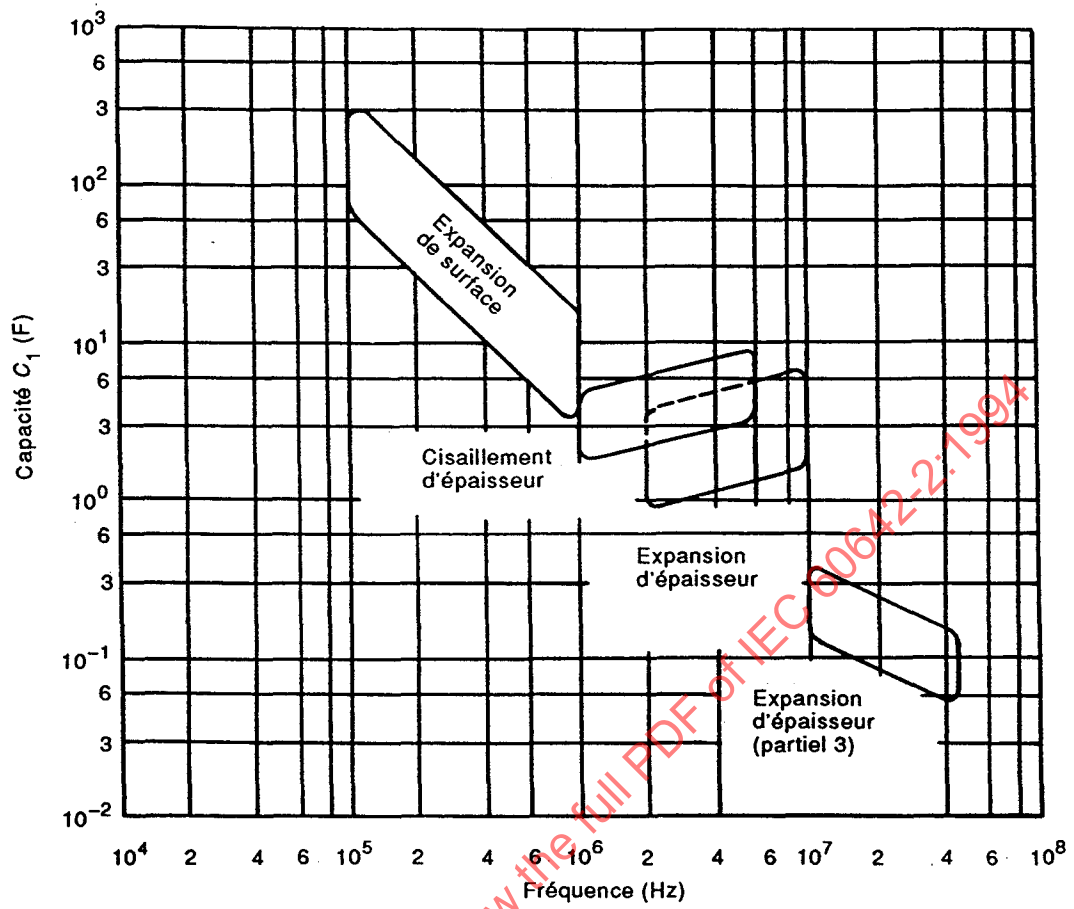
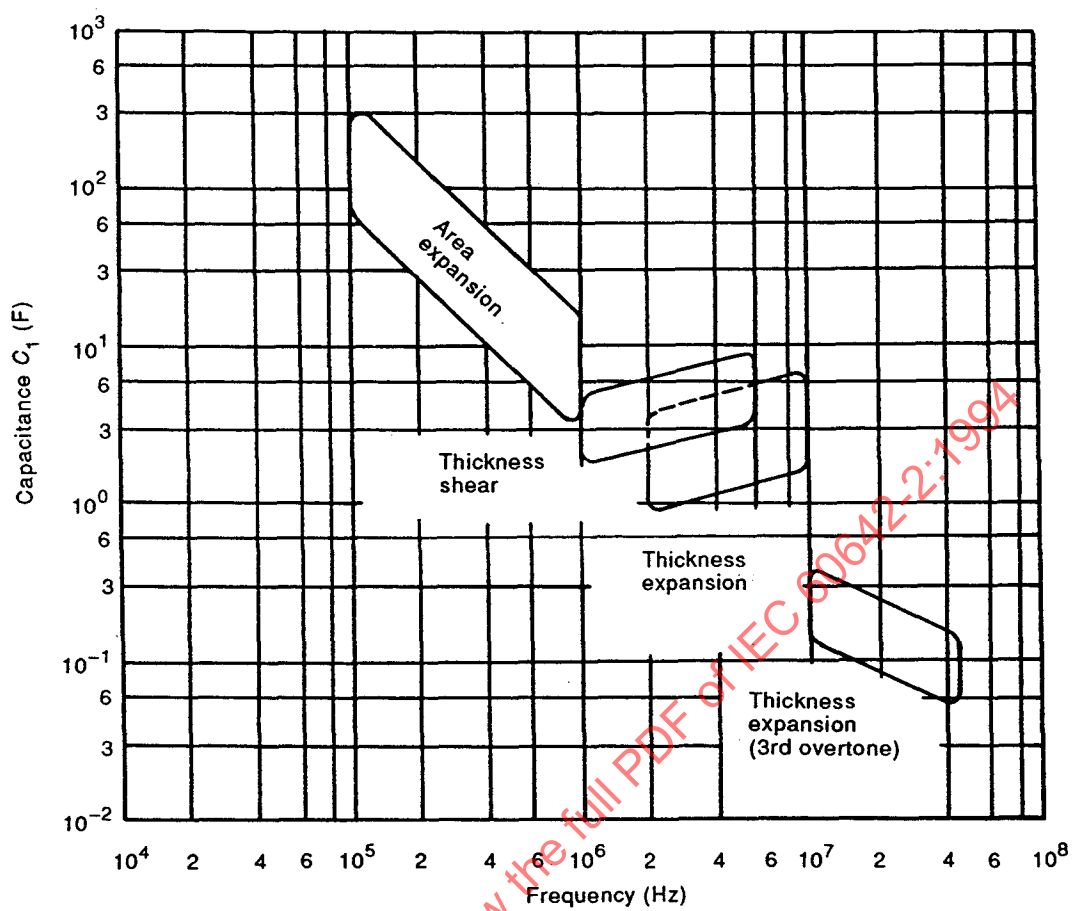


Figure 6 – Inductance ranges for various modes of vibration



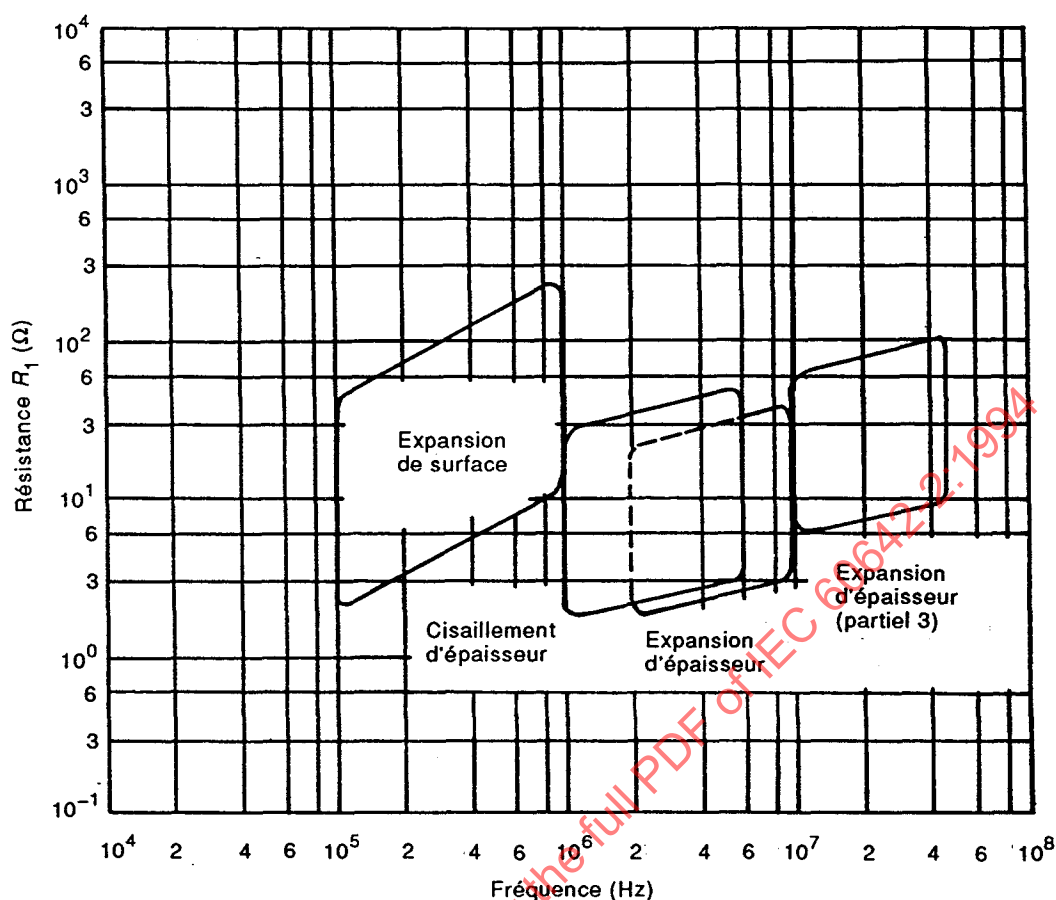
CEI 040/94

Figure 7 – Gamme de capacités pour différents modes de vibration



IEC 040194

Figure 7 – Capacitance ranges for various modes of vibration



CEI 041/94

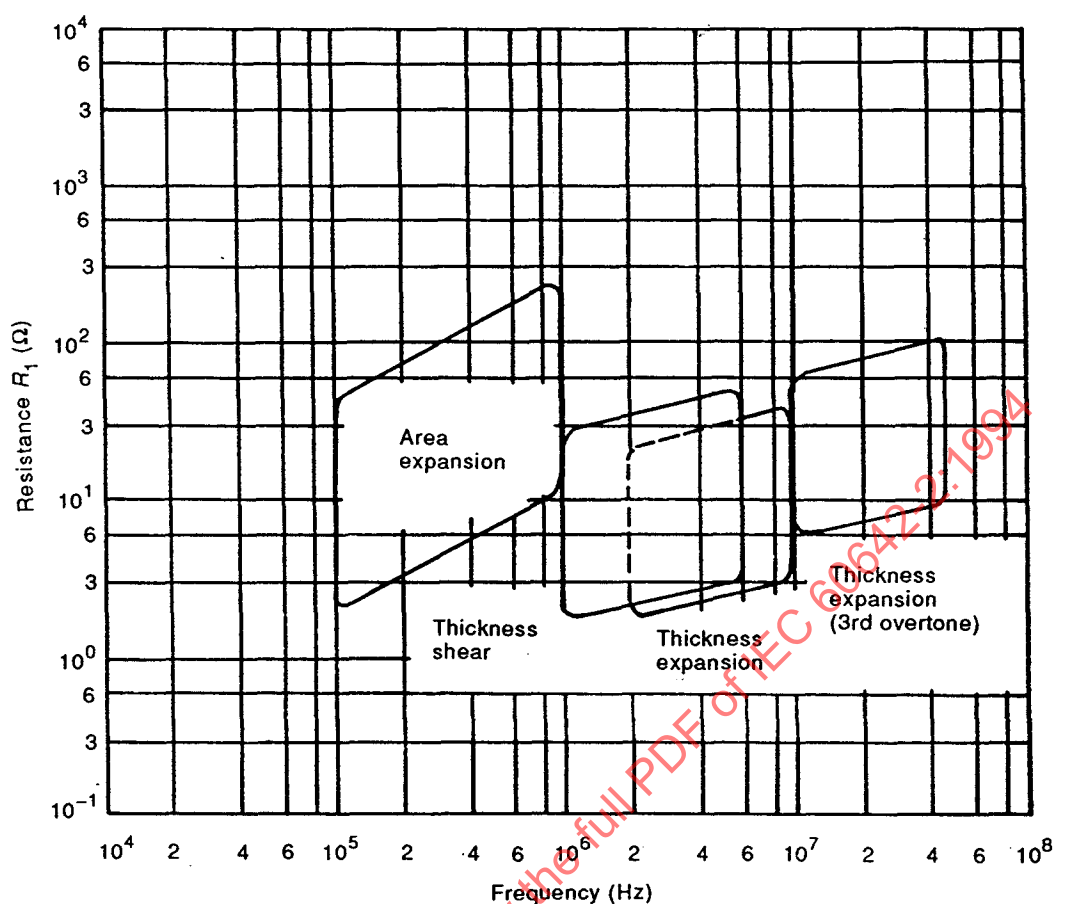
Figure 8 – Gammes de résistances pour différents modes de vibration

2.5.3 Réponses indésirables (réponses parasites)

Tous les résonateurs à céramique piézoélectrique ont des résonances à des fréquences différentes de celles de la résonance principale ou de la résonance qu'on souhaite utiliser.

Les plus évidentes sont produites aux modes partiels de la résonance principale et, pour les résonateurs à céramique piézoélectrique fonctionnant en mode partiel par construction, aux autres partiels et à la résonance de la fréquence fondamentale elle-même. De plus les résonateurs à céramique piézoélectrique conçus pour le mode d'expansion de surface ont une réponse indésirable à la fréquence du mode de cisaillement d'épaisseur.

Dans un oscillateur correctement conçu, ces réponses entraînent peu de difficultés car, pour la fréquence de fonctionnement, la phase ou le gain de boucle de l'oscillateur est plus favorable à la fréquence assignée qu'à celle des autres partiels ou qu'à la fréquence fondamentale. Cependant, s'il se produisait des résonances indésirables près de la fréquence assignée, des oscillations pourraient apparaître aux fréquences indésirables.



IEC 04194

Figure 8 – Resistance ranges for various modes of vibration

2.5.3 Unwanted responses (spurious responses)

All piezoelectric ceramic resonators have frequency responses other than the main or desired response.

The more obvious ones are the overtones of main response and when piezoelectric ceramic resonators are operated at their overtone by design, other overtones and the fundamental frequency itself are unwanted responses. In addition to the above, piezoelectric ceramic resonators made for area expansion mode have unwanted responses at the frequency of thickness vibration mode.

In properly designed oscillators, these responses rarely cause problems, due to the loop phase or gain of the oscillator being more favourable at the design frequency than at other overtones or the fundamental frequency. However, when unwanted responses are near to the designed frequency, problems of oscillation at those unwanted frequencies could occur.

Les figures 9, 10 et 11 représentent trois exemples de réponses indésirables dans chaque gamme de fréquences des résonateurs à céramique piézoélectrique.

Ces résonances indésirables peuvent être maîtrisées dans une mesure raisonnable pour l'application pratique. C'est plus facile vers la limite inférieure de la fréquence pour le mode d'expansion de surface, mais plus difficile pour le mode de cisaillement d'épaisseur. La technique pour modifier la position et l'amplitude de ces résonances indésirables est fondée sur des modifications de géométrie et de surface des électrodes. Malheureusement, de telles modifications vont affecter les autres paramètres L_1 , C_1 , R_1 , etc.

Dans le cas d'un résonateur à céramique piézoélectrique utilisant le mode de vibration d'épaisseur, les résonances indésirables ne sont pas suffisantes pour causer de problème, parce que ce type utilise le mode de vibration à énergie piégée.

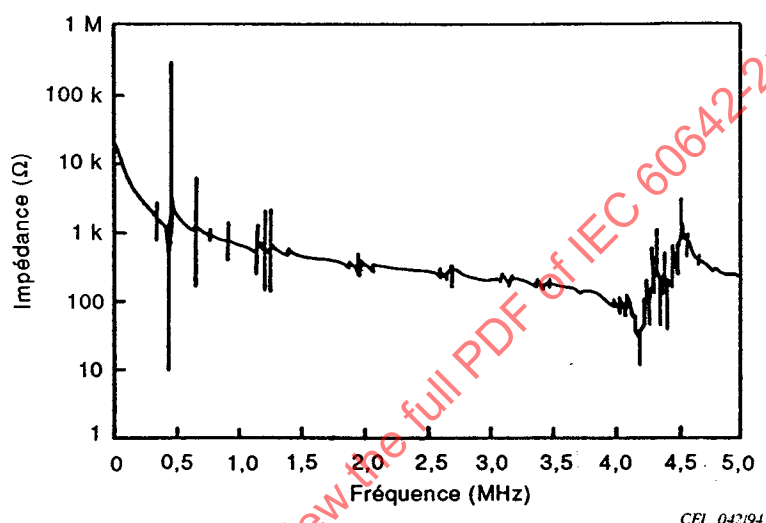


Figure 9 – Caractéristique de l'impédance typique d'un résonateur à céramique piézoélectrique en mode d'expansion de surface

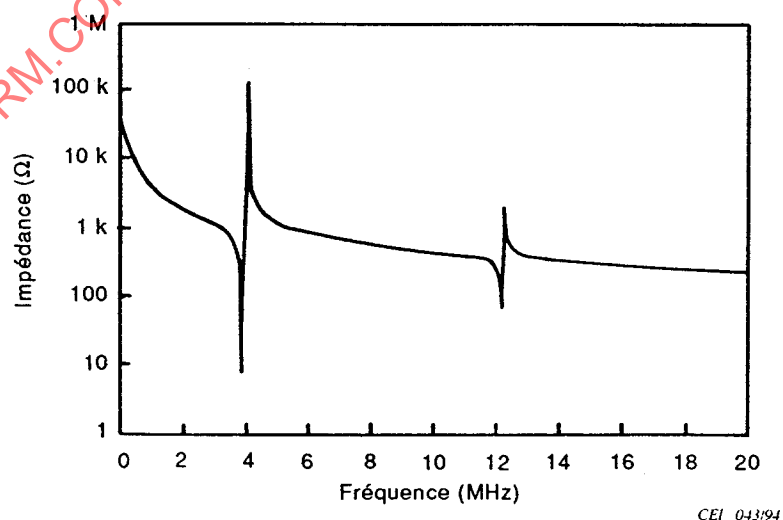


Figure 10 – Caractéristique de l'impédance typique d'un résonateur à céramique piézoélectrique en mode de cisaillement d'épaisseur

Figures 9, 10 and 11 show three examples of unwanted response in each frequency range for piezoelectric ceramic resonators.

These unwanted responses can be controlled reasonably for practical use. This is most feasible for the lower frequency, area expansion mode, but most difficult for the thickness shear mode. The technique for modifying the position and magnitude of these unwanted responses is based on changes of geometry and electrode area. Unfortunately, such changes will affect the other parameters L_1 , C_1 , R_1 , etc.

In the case of a piezoelectric ceramic resonator using thickness vibration mode, the unwanted responses are not great enough to cause serious problems since these types use the trapped energy mode of vibration.

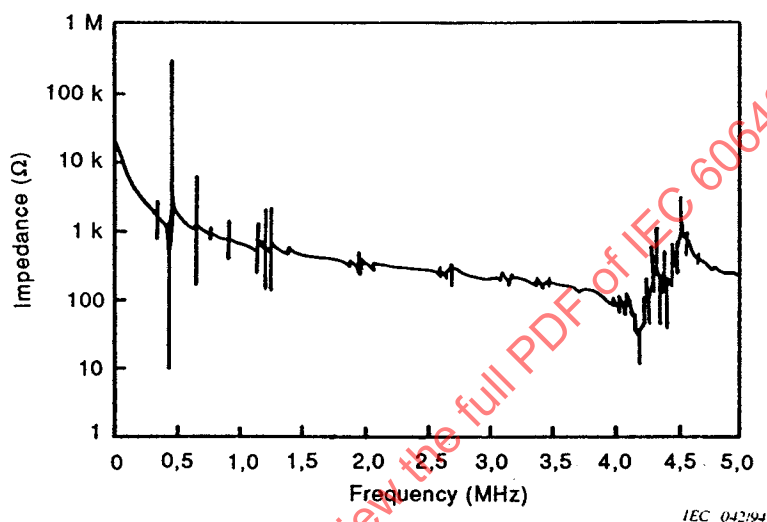


Figure 9 – A typical impedance characteristic of an area expansion mode piezoelectric ceramic resonator

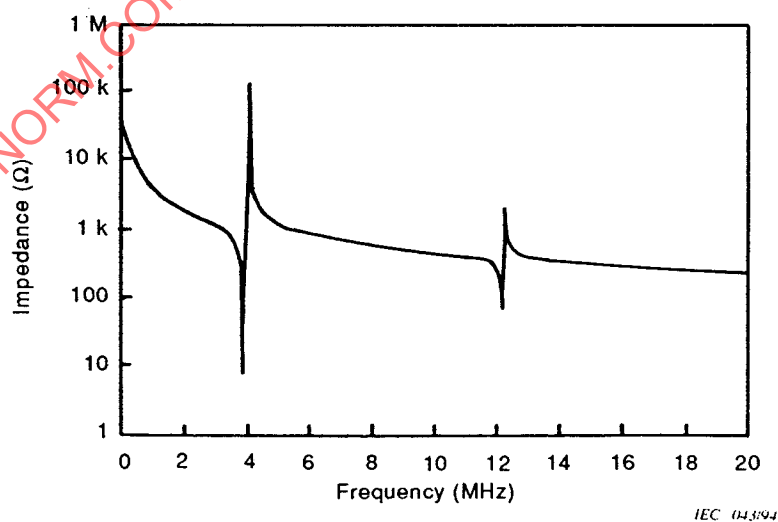


Figure 10 – A typical impedance characteristic of a thickness shear mode piezoelectric ceramic resonator

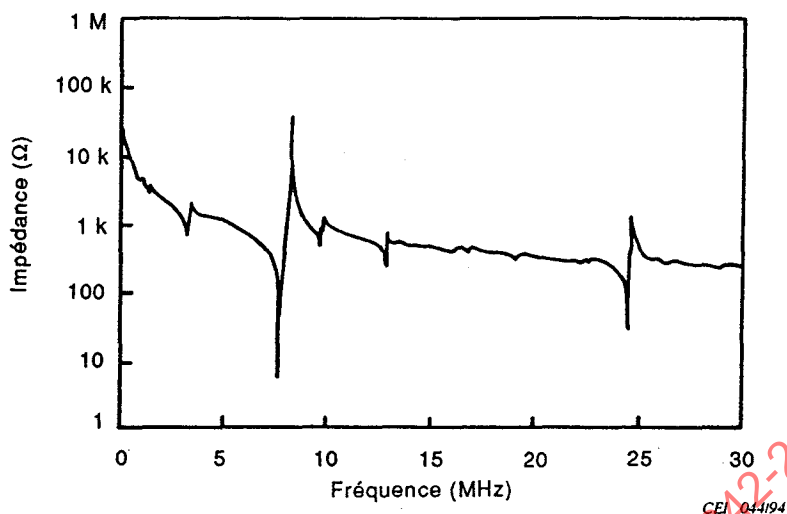


Figure 11 – Caractéristique de l'impédance typique d'un résonateur à céramique piézoélectrique en mode d'expansion d'épaisseur

Il est courant de prescrire un essai visant les résonances indésirables si l'on pense qu'il existe une possibilité pour que l'oscillateur fonctionne à une fréquence indésirable.

Finalement, il convient de consulter le fabricant de résonateurs à céramique piézoélectrique pour toute application pour laquelle les résonances indésirables constituent une difficulté potentielle, pour s'assurer que les circuits d'oscillateur avec les résonateurs à céramique piézoélectrique soient évalués et que le circuit utilisé ou la limite de la réponse indésirable soit spécifié.

Il convient de souligner que toute spécification relative à toute résonance indésirable n'a de signification que si la gamme de fréquences dans laquelle cette prescription s'applique est spécifiée.

2.6 Boîtiers de résonateurs à céramique piézoélectrique

Il y a deux catégories de boîtiers typiques pour les résonateurs à céramique piézoélectrique: les boîtiers en plastique et ceux constitués par moulage dans la résine.

Les boîtiers en plastique sont habituellement utilisés pour les résonateurs à céramique piézoélectrique sur le mode de l'expansion de surface dans la gamme de fréquences inférieure à 1 MHz.

Les boîtiers par moulage dans la résine sont habituellement utilisés pour les résonateurs à céramique piézoélectrique sur le mode d'énergie piégée dans la gamme de fréquences supérieure à 1 MHz.

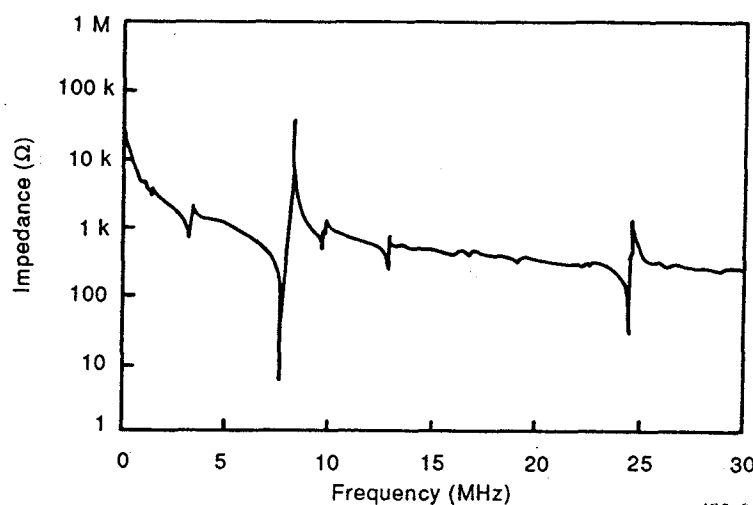


Figure 11 – A typical impedance characteristic of a thickness expansion mode piezoelectric ceramic resonator

It is common to include a test for unwanted responses should it be thought that there is a possibility of the oscillator starting at the unwanted response.

Finally, in any application where unwanted responses are considered to be a potential problem, it is essential that the piezoelectric ceramic resonator manufacturer should be consulted to ensure that actual oscillator circuits with piezoelectric ceramic resonators are evaluated, and that the application circuit or limit of unwanted response should be specified.

It should be realized that any unwanted response requirement is meaningless if the frequency range of application is not specified.

2.6 Piezoelectric ceramic resonator enclosures

There are two kinds of typical enclosures, plastic and dipped resin case for piezoelectric ceramic resonators.

The plastic cases are usually used for enclosures of area expansion mode piezoelectric ceramic resonators in lower than 1 MHz frequency range.

The dipped resin cases are usually used for enclosures of trapped energy mode piezoelectric ceramic resonators in higher than 1 MHz frequency range.

3 Le résonateur à céramique piézoélectrique en tant que composant d'un circuit

3.1 Généralités

3.1.1 Spécification de la tolérance de fréquence et de la gamme de températures de fonctionnement (tolérance totale de fréquence)

L'ingénieur peut spécifier la tolérance de la fréquence uniquement pour la température ambiante. Dans les applications exigeant une tolérance donnée dans la gamme de températures de fonctionnement spécifiée, cela doit être aussi spécifié après la confirmation par le fabricant.

3.1.2 Capacité de charge et recalage de fréquence

Dans de nombreuses applications, il est nécessaire de recaler la fréquence de résonance du résonateur à céramique piézoélectrique en agissant sur un élément réactif de charge. Cela peut être nécessaire pour compenser la tolérance de fabrication ou asservir la boucle de phase et en modulation de fréquence.

Dans la plupart des applications, l'élément réactif de charge est capacitif et pour cette raison, seul ce cas sera exposé ci-après. Les formules de transformation pour les éléments inductifs ou les combinaisons peuvent être trouvées dans la CEI 302.

Les figures 13a, 13b et 13c représentent respectivement la fréquence de résonance d'un résonateur seul et le décalage de la fréquence de résonance en fonction de la capacité de charge.

Dans la figure 13c, la capacité de charge C_L est en parallèle avec le résonateur à céramique piézoélectrique (f_r) et cette combinaison fonctionne comme un résonateur à céramique piézoélectrique avec une fréquence de résonance à la charge f_L (fréquence de fonctionnement f_w).

La fréquence de résonance en charge peut être calculé en utilisant la formule:

$$f_L = f_r \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_o + C_L}} \quad (6)$$

$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} \quad (7)$$

La figure 14 montre un exemple de décalage de la fréquence de fonctionnement provoqué par la capacité de charge C_L connectée en parallèle.

Il faut remarquer qu'une tolérance de ± 10 % pour une capacité de charge de 30 pF peut conduire à une erreur de fréquence approximativement égale à $\pm 0,05$ % pour un résonateur à céramique piézoélectrique.

3 The piezoelectric ceramic resonator unit as a circuit component

3.1 General

3.1.1 Specifying frequency tolerance and operating temperature range (overall frequency tolerance)

The engineer may specify a frequency tolerance only at room temperature. In applications that require a given tolerance over a specified operating temperature range, this shall also be specified after confirmation by the manufacturer.

3.1.2 Load capacitance and frequency pulling

For many applications, there are requirements to pull the resonance frequency of a piezoelectric ceramic resonator unit by using a load reactive element. This may be necessary in order to trim out the manufacturing tolerance or in phase locked loop and frequency modulation applications.

In most applications, the load reactive element is capacitive and therefore only this case is considered now. The transforming formula for inductive elements or combinations may be found in IEC 302.

Figures 13a, 13b and 13c shows respectively the resonance frequency of a resonator unit and load resonance frequency shift by load capacitance.

In figure 13c, the load capacitance C_L is in parallel with a piezoelectric ceramic resonator unit (f_r), and the combination will act as a piezoelectric ceramic resonator unit with a load resonance frequency f_L (working frequency f_w).

The load resonance frequency can be calculated using the formula:

$$f_L = f_r \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_o + C_L}} \quad (6)$$

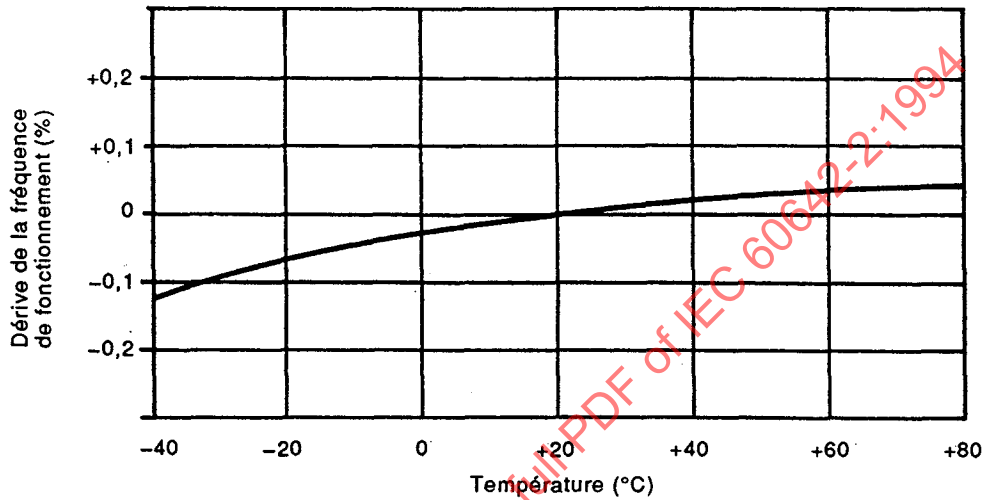
$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} \quad (7)$$

Figure 14 shows an example of the working frequency change by a parallel connected lead capacitance C_L .

It should be noted that a tolerance of $\pm 10\%$ at 30 pF parallel connected capacitance can lead to a frequency error of around $\pm 0,05\%$ on a piezoelectric ceramic resonator unit.

La caractéristique en température de la fréquence de résonance d'un résonateur à céramique piézoélectrique est presque linéaire. Bien que le mode de vibration change, l'écart de la fréquence des résonateurs à céramique piézoélectrique reste dans les limites de $\pm 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ à $\pm 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ dans la gamme de températures de fonctionnement. La compensation de température est très simple en comparaison avec les résonateurs à quartz qui ont des courbes de température-fréquence paraboliques.

La figure 12 montre l'exemple de la caractéristique réelle de la fréquence de fonctionnement d'un résonateur à céramique piézoélectrique en fonction de la température.



CEI 045/94

Figure 12 – Caractéristique fréquence en température typique de la fréquence de fonctionnement d'un résonateur à céramique piézoélectrique

Temperature characteristic of the resonance frequency of a piezoelectric ceramic resonator unit is almost linear. Even though the mode of vibration changes, the frequency change of piezoelectric ceramic resonator units remains within $\pm 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ to $\pm 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ within the operating temperature range. Temperature compensation is very simple compared to quartz crystal units, which have parabolic frequency versus temperature curves.

Figure 12 shows an example of actual measurement for temperature stability of working frequency with a piezoelectric ceramic resonator unit.

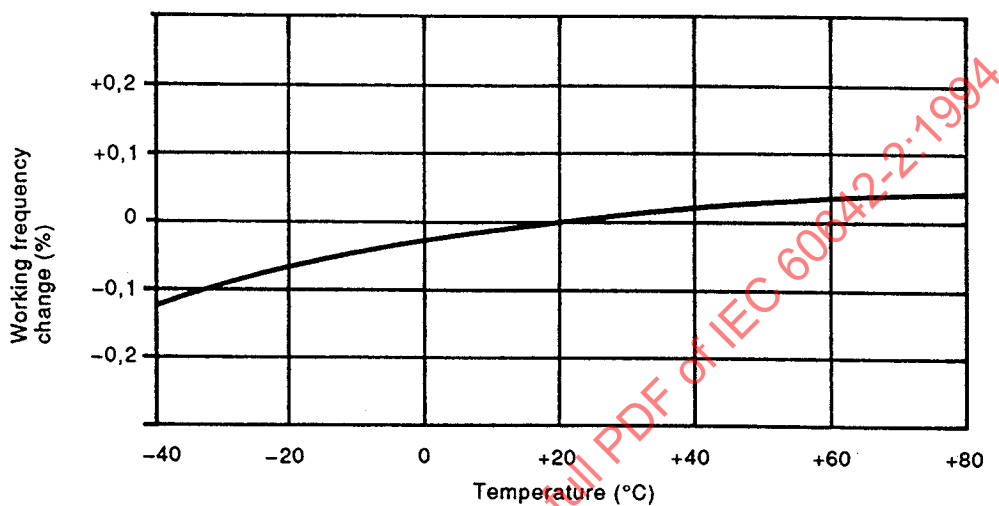


Figure 12 – A typical frequency versus temperature characteristic of working frequency with a piezoelectric ceramic resonator unit

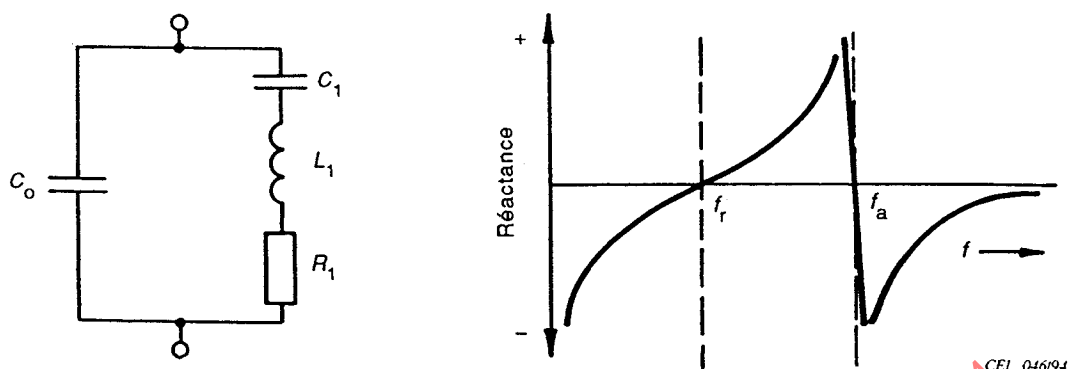


Figure 13a – Résonateur à céramique piézoélectrique seul

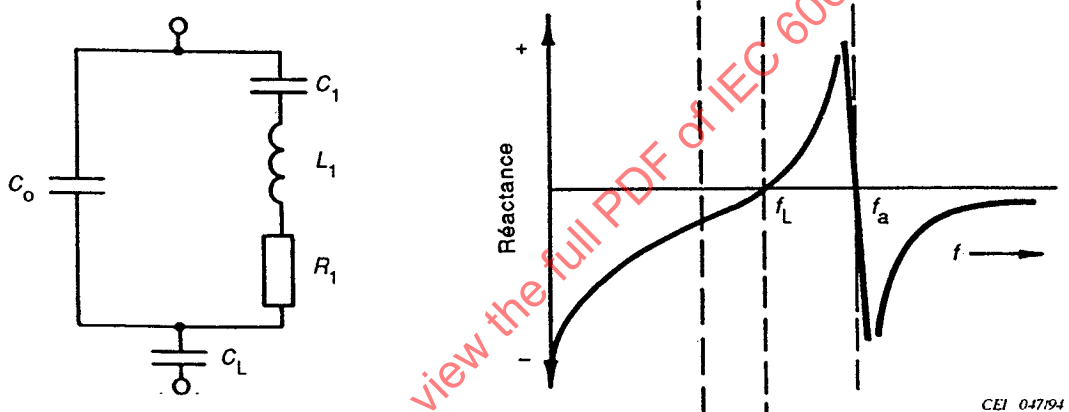


Figure 13b – Résonateur à céramique piézoélectrique connecté en série avec une capacité de charge C_L

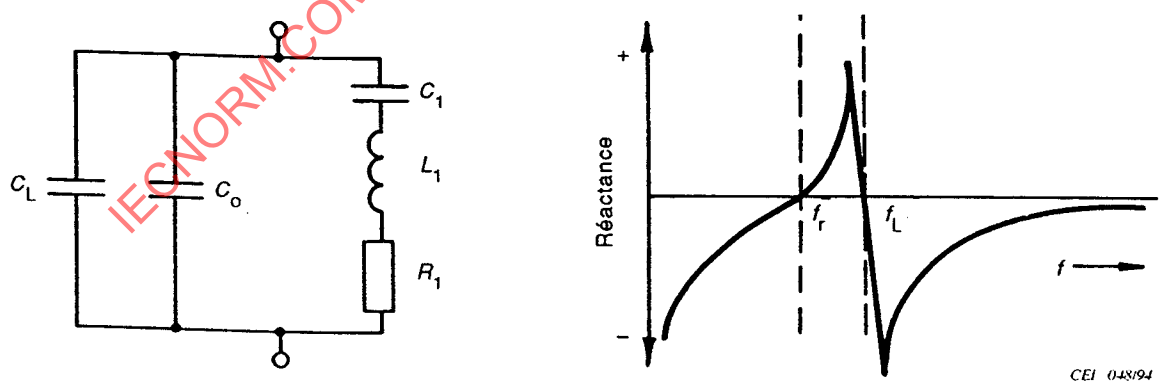


Figure 13c – Résonateur à céramique piézoélectrique connecté en parallèle avec une capacité de charge C_L

Figure 13 – Décalage de la fréquence de résonance à la charge f_L causé par la capacité de charge C_L

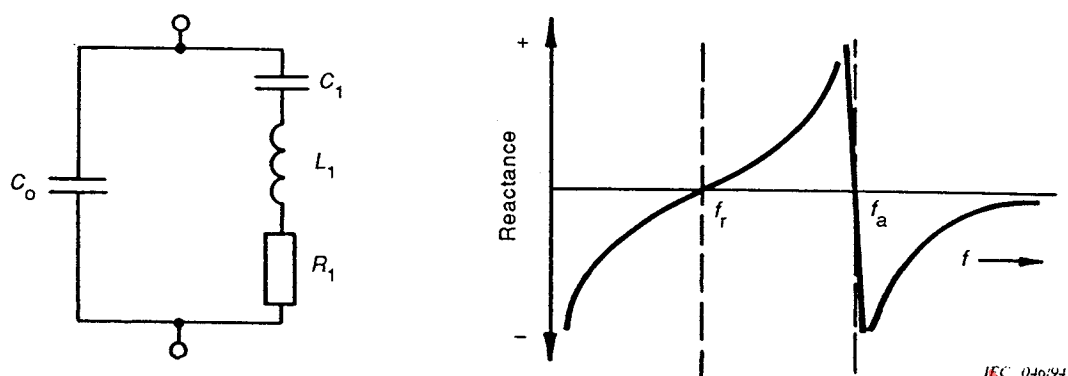
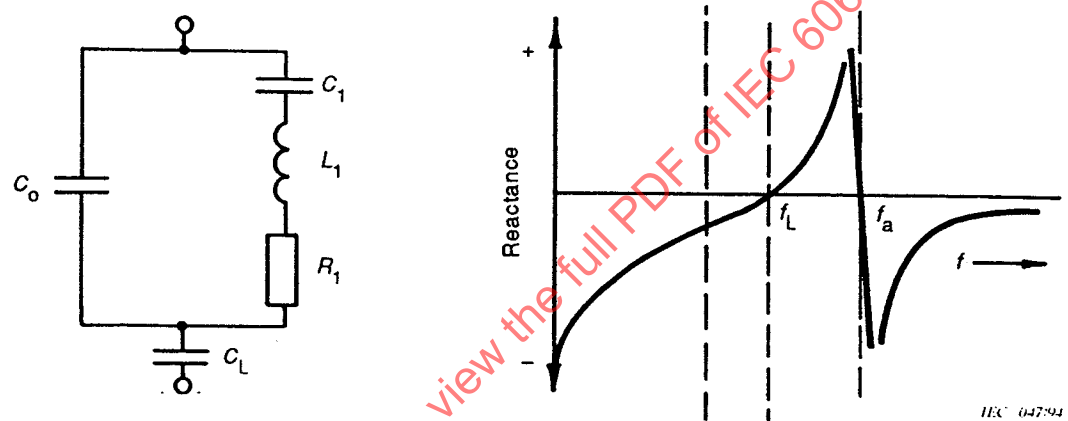
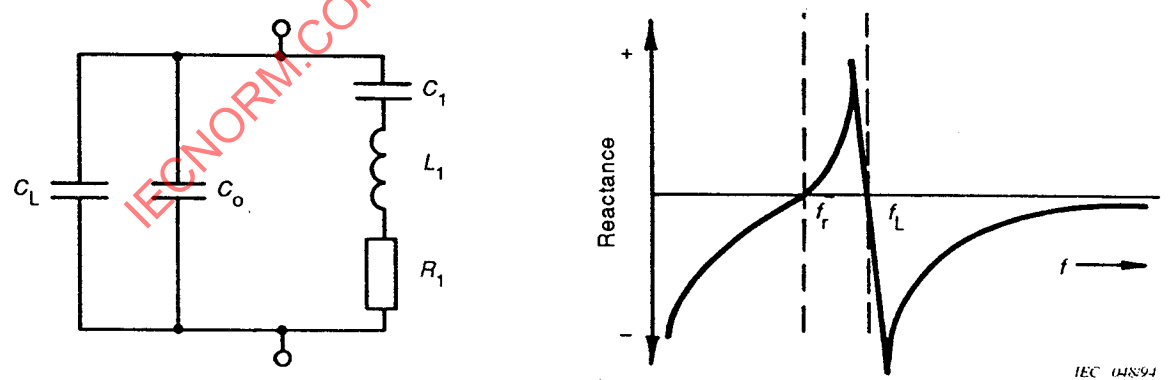


Figure 13a – Piezoelectric ceramic resonator unit alone

Figure 13b – Piezoelectric ceramic resonator unit with a series connected load capacitance C_L Figure 13c – Piezoelectric ceramic resonator unit with a parallel connected load capacitance C_L Figure 13 – Load resonance frequency change f_L by load capacitance C_L

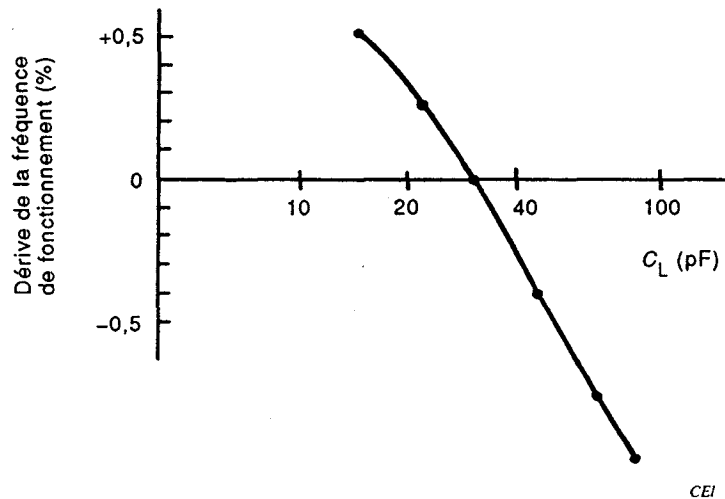


Figure 14 – Exemple de décalage de la fréquence de fonctionnement lorsque la capacité de charge C_L est connectée en parallèle

3.1.3 Influence de la capacité de charge sur la résistance dynamique R_1

La résistance dynamique R_1 est un autre paramètre important du circuit équivalent d'un résonateur à céramique piézoélectrique. Ce paramètre détermine le facteur de qualité Q du résonateur à céramique piézoélectrique et définit le niveau d'oscillation qui doit avoir chaque circuit d'oscillation. La résistance de charge pour un résonateur à céramique piézoélectrique dépend de la capacité de charge pour faire le circuit d'oscillation.

Comme il est décrit, la fréquence de fonctionnement dans un circuit approprié est approximativement identique à la capacité de charge soit branchée en série ou en parallèle. Si la capacité de charge C_L a été définie, la résistance de charge à la résonance peut être calculée de la manière suivante:

$$R_L = R_1 \left(1 + \frac{C_o}{C_L} \right)^2 \quad (8)$$

On doit se souvenir que R_1 ne change pas; de cette manière les paramètres effectifs du réseau de chaque utilisateur peuvent être facilement calculés.

Dans la plupart des cas, la résistance d'un résonateur particulier ne peut pas être prévue en fabrication; il est seulement possible de garantir les valeurs maximales prescrites dans la spécification.

3.2 Oscillateurs, notions de base

Ce paragraphe décrit la relation qui existe entre le résonateur à céramique et l'oscillateur.

3.2.1 Facteurs affectant la fréquence

Il faut comprendre que dans un oscillateur dont la fréquence est définie principalement par un résonateur à céramique piézoélectrique, le circuit et les conditions de fonctionnement ont une influence significative sur la fréquence de fonctionnement.

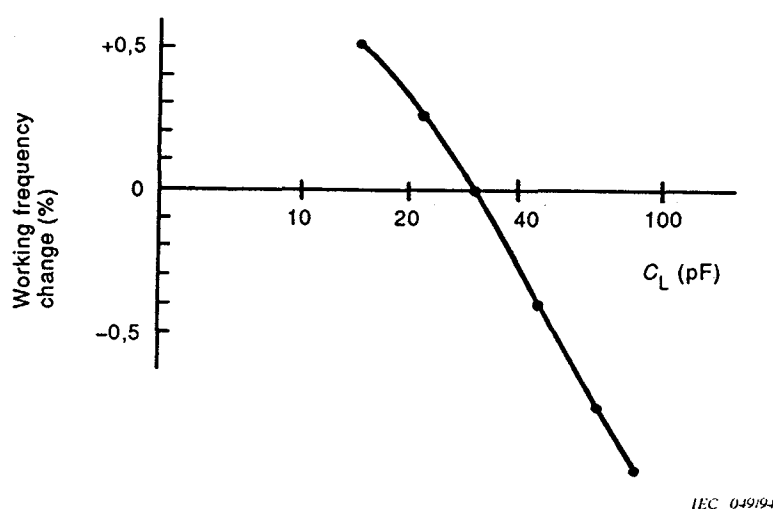


Figure 14 – An example of working frequency change due to a parallel connected load capacitance C_L

3.1.3 The effects of load capacitance on motional resistance R_1

The equivalent circuit of the piezoelectric ceramic resonator unit has another important parameter R_1 . This parameter controls the Q of the piezoelectric ceramic resonator unit and defines the level of oscillation in any oscillation circuit. The load resistance for a piezoelectric ceramic resonator unit depends upon the load capacitance to make an oscillator circuit.

As described, the working frequency in an appropriate circuit is approximately the same as the frequency with a series or parallel connection of the load capacitance. If the load capacitance C_L is designated, the load resistance may be calculated as follows:

$$R_L = R_1 \left(1 + \frac{C_o}{C_L} \right)^2 \quad (8)$$

It should be remembered that R_1 does not change; thus, the effective parameters of any user network can be readily calculated.

In most cases, the resistance of a particular unit cannot be predicted during manufacture; it is only possible to ensure the maximum values in the specification.

3.2 Oscillators, basic concept

The following subclauses deal with the relationship of the piezoelectric ceramic resonator unit to the oscillator.

3.2.1 Factors affecting the frequency

In an oscillator in which frequency is to be decided principally by a piezoelectric ceramic resonator unit, it should be understood that the circuit and conditions of operation have a significant effect on the working frequency.

Bien que le résonateur à céramique piézoélectrique ait été ajusté en fabrication à la fréquence nominale, les conditions dans lesquelles la fréquence de fonctionnement sera obtenue par le résonateur doivent être exactement définies.

3.2.2 Types des oscillateurs

D'une façon générale, les circuits d'oscillation de base peuvent être groupés en trois catégories suivantes:

- a) ceux qui utilisent un circuit de réaction positive;
- b) ceux qui utilisent l'élément de résistance négative;
- c) ceux qui utilisent le retard dans le temps de transfert ou de la phase.

Dans le cas des résonateurs à céramique piézoélectrique, l'utilisation du circuit de réaction positive est recommandée.

3.2.3 Principe de base d'un circuit d'oscillation de réaction positive

Parmi les circuits d'oscillation de réaction positive avec LC, on utilise en général le circuit d'oscillation d'ajustage d'anticouplage, les circuits de Colpitts et de Hartley. La figure 15 montre le schéma des circuits de Colpitts et de Hartley en utilisant les LC.

A la figure 15, un transistor est utilisé comme forme la plus simple d'amplificateur. Les fréquences de fonctionnement sont approximativement les mêmes que la fréquence de résonance du circuit consistant en L , C_{L1} et C_{L2} dans le circuit de Colpitts ou consistant en C , L_1 et L_2 dans le circuit de Hartley. Ces fréquences peuvent être représentées par les formules suivantes:

Circuit de Colpitts:
$$f_w = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \left(\frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} \right)}} \quad (9)$$

Circuit de Hartley:
$$f_w = \frac{1}{2\pi \sqrt{C (L_1 + L_2)}} \quad (10)$$

Dans le réseau LC classique, l'inductance peut être remplacée par un résonateur à céramique piézoélectrique, en prenant en considération l'avantage du fait que le résonateur fonctionne comme une inductance entre la fréquence de résonance et celle d'anti-résonance (voir figure 3).

Le circuit de Colpitts est le plus largement utilisé. Puisque le circuit de Hartley utilise deux inductances, il n'est pas recommandé pour le résonateur à céramique piézoélectrique. Dans le circuit de Hartley, l'utilisation d'une inductance est cependant nécessaire pour compléter le circuit. Cela augmente le prix du circuit et crée une oscillation instable.

Le principe de fonctionnement de ces circuits d'oscillation est montré à la figure 16. L'oscillation a lieu lorsque les conditions suivantes sont satisfaites.

- Le gain de boucle: $\alpha \times \beta \geq 0 \text{ dB}$
 La phase de boucle: $\theta_1 + \theta_2 = n \times 360^\circ$
 où $n = 0$ ou un entier quelconque

Although a piezoelectric ceramic resonator unit is adjusted during manufacture to a nominal frequency, the conditions under which the working frequency is to be operated by a resonator unit shall be adequately defined.

3.2.2 Types of oscillators

Generally, basic oscillator circuits can be grouped into the following three categories:

- a) use of positive feedback;
- b) use of negative resistance element;
- c) use of delay in transfer time or phase.

In the case of piezoelectric ceramic resonator units, the use of positive feedback is recommended.

3.2.3 Basic principle of oscillation circuit using positive feedback

Among the positive feedback oscillation circuits using LC, the tuning type anti-coupling oscillation circuit, Colpitts and Hartley circuits, are typically used. Figure 15 shows circuit schematics of Colpitts and Hartley circuits using LC.

In figure 15, a transistor, which is the most basic amplifier, is used. The working frequencies are approximately the same as the resonance frequency of the circuit consisting of L , C_{L1} and C_{L2} in the Colpitts circuit, or consisting of C , L_1 and L_2 in the Hartley circuit. These frequencies can be represented by the following formulae:

Colpitts circuit:
$$f_w = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \left(\frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} \right)}} \quad (9)$$

Hartley circuit:
$$f_w = \frac{1}{2\pi \sqrt{C (L_1 + L_2)}} \quad (10)$$

In an LC-network, the inductor can be replaced by a piezoelectric ceramic resonator unit, taking advantage of the fact that the resonator works as inductance between resonance and anti-resonance frequencies (refer to figure 3).

This is most commonly used in the Colpitts circuit. As the Hartley circuit uses two inductors, it is not recommended for a piezoelectric ceramic resonator unit. In the Hartley circuit, the use of one inductor is still necessary in order to complete the circuit. This increases the cost of the circuit and creates an unstable oscillation.

The operating principle of these oscillation circuits can be seen in figure 16. Oscillation occurs when the following conditions are satisfied.

Loop gain:	$\alpha \times \beta \geq 0 \text{ dB}$
Loop phase	$\theta_1 + \theta_2 = n \times 360^\circ$ where $n = 0$ or some integer

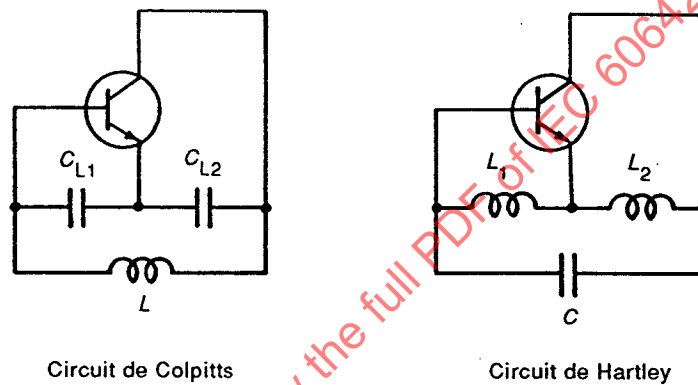
3.2.4 Circuits inverseurs MOS et leur évaluation

Dans la figure 17 l'amplificateur inverseur provoque le retard de phase $\theta_1 = -180^\circ$ dans le circuit de Colpitts, et le réseau LC classique du circuit à réaction provoque le retard de phase $\theta_2 = 180^\circ$. Ici, le résonateur à céramique piézoélectrique peut donner n'importe quel retard de phase entre 0° et 180° par petits changements entre la fréquence de résonance (f_r) et celle d'antirésonance (f_a).

La figure 18 montre les exemples des caractéristiques phase-gain réellement mesurées et calculées par simulation.

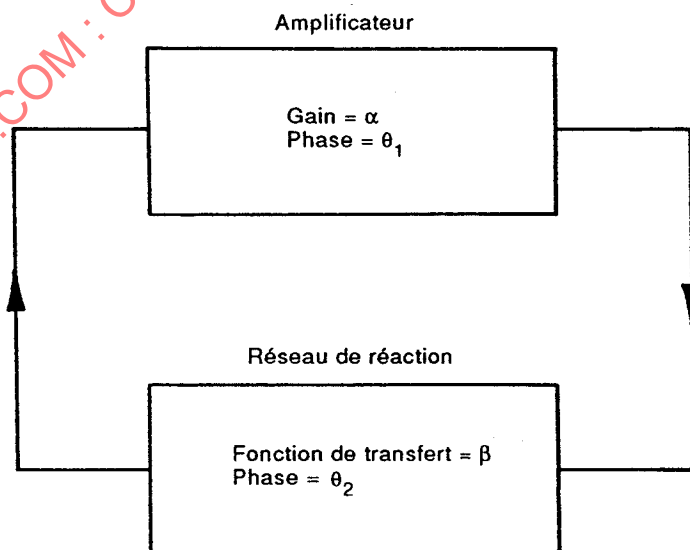
3.2.5 Conception d'un oscillateur et considérations pratiques sur les oscillateurs

Comme la plupart des microprocesseurs comportent un circuit oscillateur, le dispositif oscillateur utilisant un résonateur à céramique piézoélectrique possède une porte inverseur. La figure 19 montre le circuit oscillateur utilisant un inverseur C-MOS.



CEI 050/94

Figure 15 – Configuration de base d'un circuit d'oscillation LC classique



CEI 051/94

Figure 16 – Principe de fonctionnement d'un circuit oscillateur

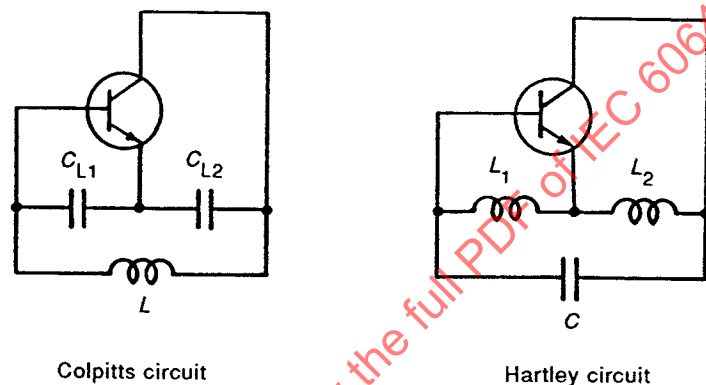
3.2.4 Typical MOS-inverter circuit and its evaluation

In figure 17 the inverting amplifier causes phase lag $\theta_1 = -180^\circ$ in the Colpitts circuit, and the LC-network of the feedback circuit causes a phase lag $\theta_2 = 180^\circ$. Here, the ceramic resonator unit can provide anything from 0° to 180° phase lag by small frequency changes between the resonance (f_r) and anti-resonance (f_a) frequencies.

Figure 18 shows examples of gain-phase characteristics by actual measuring and computed simulation.

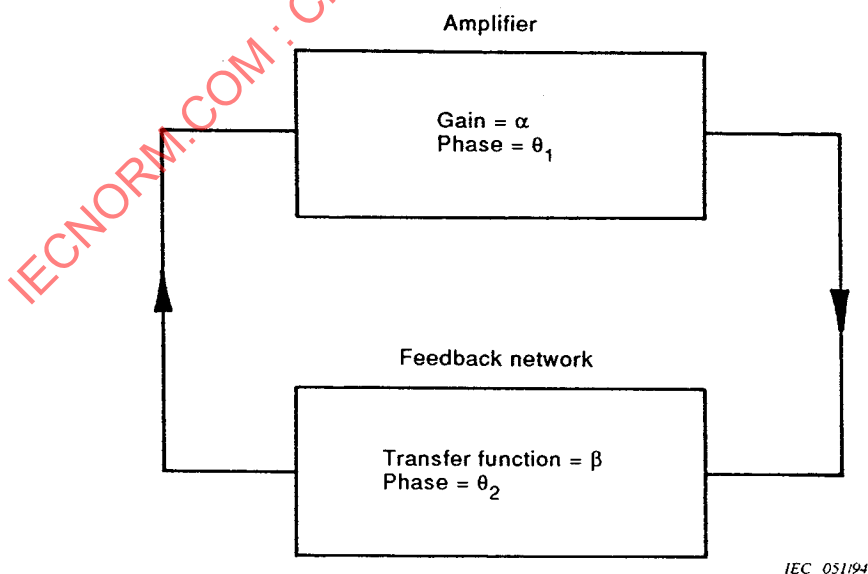
3.2.5 Oscillator design and practical considerations

As most microprocessors incorporate an oscillator circuit, the oscillation device using a piezoelectric ceramic resonator unit usually employs an inverter gate. Figure 19 shows the C-MOS inverter oscillation circuit.



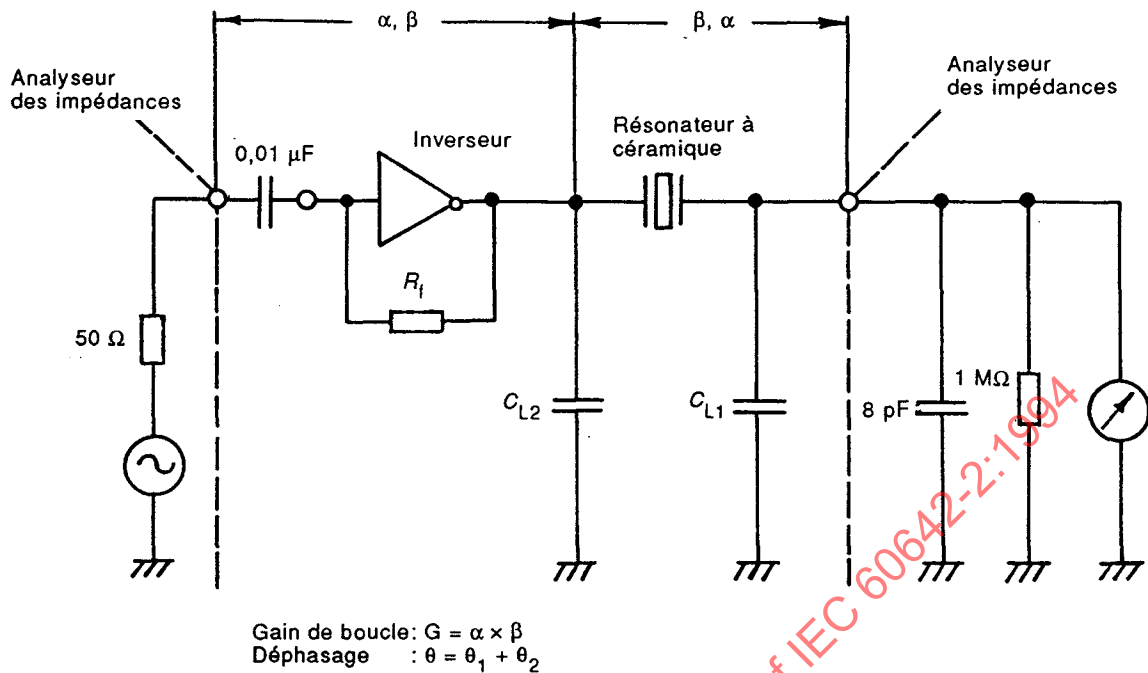
IEC 050/94

Figure 15 – Basic configuration of LC-oscillation circuit



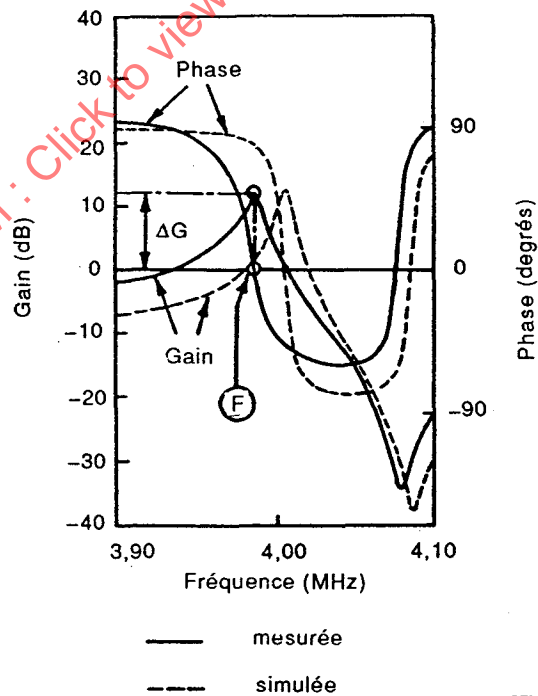
IEC 051/94

Figure 16 – Operating principle of an oscillation circuit



CEI 052/94

Figure 17 – Circuit de mesure pour obtenir la caractéristique phase-gain



CEI 053/94

Figure 18 – Caractéristiques gain-phase réellement mesurées et calculées par simulation

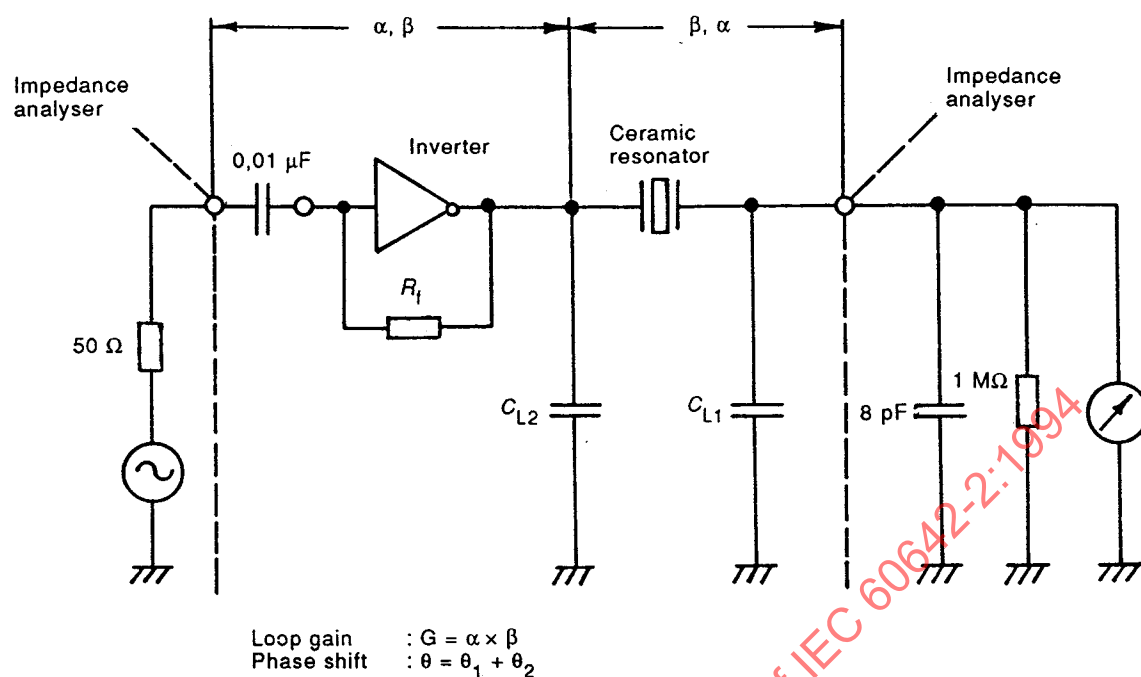


Figure 17 – Measuring circuit to obtain gain-phase characteristic

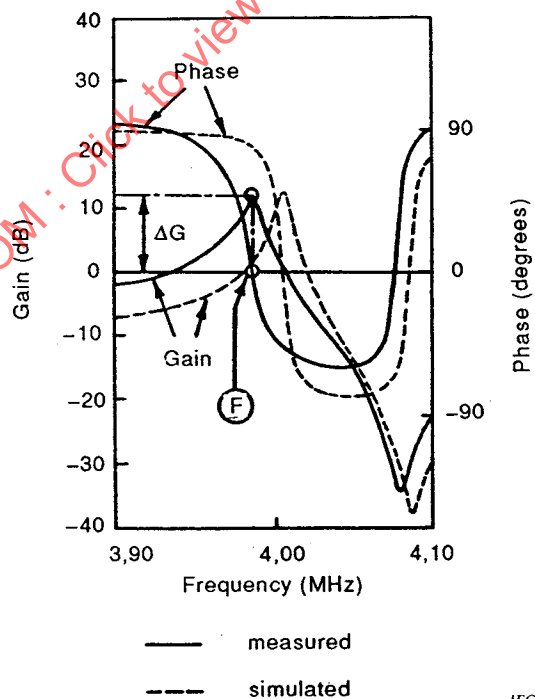


Figure 18 – Gain-phase characteristics showing actual measurements and computer simulation

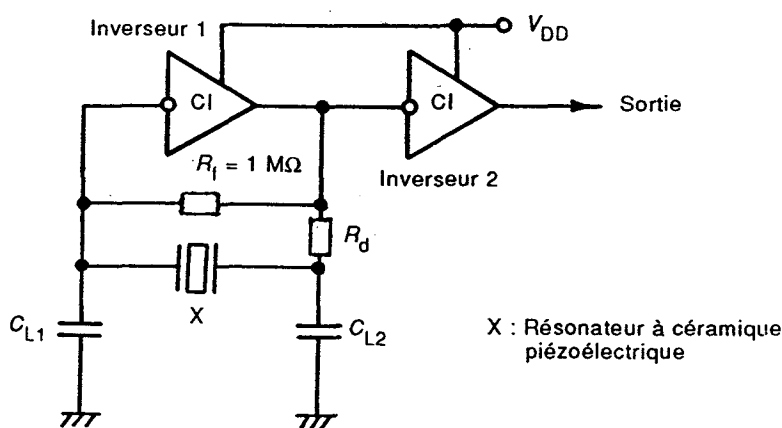


Figure 19 – Circuit de base oscillateur avec un inverseur C-MOS et un résonateur à céramique piézoélectrique

Pour obtenir une oscillation stable avec un résonateur à céramique piézoélectrique, les points suivants doivent être soigneusement considérés:

- 1) Il doit avoir une marge de gain suffisante.
- 2) Il doit être exempt d'oscillations irrégulières telles que les oscillations parasites.
- 3) La résistance R_f du circuit de réaction

La résistance R_f du circuit de réaction donne une réaction négative au niveau de l'inverseur pour le placer dans une région linéaire de manière que l'oscillation commence lorsque la puissance est appliquée.

Si la valeur de R_f est trop grande et si la résistance d'isolement de l'inverseur d'entrée diminue par accident, l'oscillation stoppera à cause de la perte du gain de boucle.

De plus, si R_f est trop grande, le bruit émanant des autres circuits peut être introduit dans le circuit oscillateur.

Evidemment, si R_f est très faible, le gain de boucle sera bas. Une résistance R_f de 1 MΩ est généralement utilisée avec un résonateur à céramique piézoélectrique.

- 4) Capacité de charge C_{L1} , C_{L2}

Les capacités de charge C_{L1} et C_{L2} donnent le retard de phase de 180°. La valeur appropriée dépend du circuit intégré et de la fréquence d'oscillation. Lorsque les valeurs de C_{L1} et C_{L2} sont trop élevées, le gain de boucle ne peut avoir une marge de gain suffisante.

- 5) Oscillations parasites

Lorsque les valeurs de capacités de charge sont trop basses, le gain de boucle à une fréquence élevée sera plus grand, ce qui augmente la probabilité d'oscillations parasites. Une résistance d'amortissement R_d donne le moyen de réduire le gain dans la région haute fréquence, empêchant ainsi la possibilité d'oscillations parasites et supprimant les oscillations parasites telles que les oscillations CR.

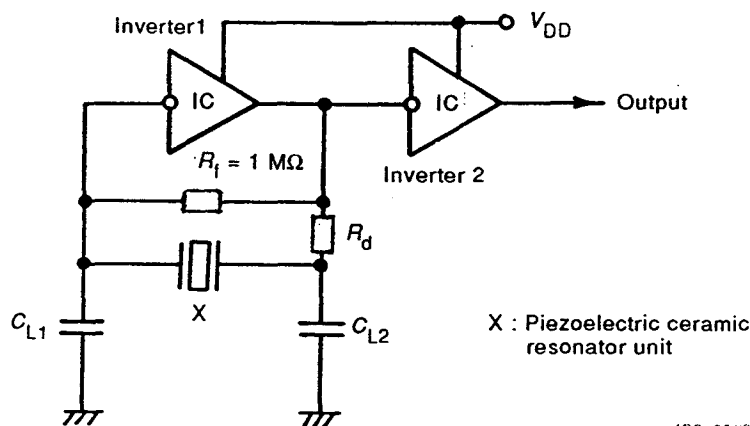


Figure 19 – Basic oscillator circuit with a C-MOS inverter and a piezoelectric ceramic resonator unit

To obtain stable oscillation with a piezoelectric ceramic resonator unit, the following items should be carefully considered:

- 1) It must have enough gain margin.
- 2) It must be free from irregular oscillation such as spurious oscillation.
- 3) *Feedback resistor R_f*

Feedback resistor R_f provides negative feedback around the inverter in order to put it in the linear region, so that oscillation will start when power is applied.

If the value R_f is too large, and if the insulation resistance of the input inverter is accidentally decreased, oscillation will stop, due to the loss of loop gain.

Also, if R_f is too large, noise from other circuits can be introduced into the oscillation circuit.

Obviously, if R_f is too small, loop gain will be low. An R_f of $1\text{ M}\Omega$ is generally used with a piezoelectric ceramic resonator unit.

- 4) *Load capacitance C_{L1} , C_{L2}*

Load capacitances C_{L1} and C_{L2} provide the phase lag of 180° . The proper value depends on the IC and the oscillation frequency. If C_{L1} and C_{L2} values are too high, the loop gain cannot have enough gain margin.

- 5) *Spurious oscillation*

If the load capacitance values are too low, the loop gain at the high frequency will be increased, consequently the probability of spurious oscillation will increase. A damping resistor R_d provides a means of reducing the gain in the high-frequency area, thus preventing the possibility of spurious oscillation, and suppressing irregular oscillation such as CR oscillation.