

RAPPORT TECHNIQUE

TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**

60444-3

Première édition
First edition
1986-06

Mesure des paramètres des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en π

Partie 3: Méthode fondamentale pour la mesure des paramètres à deux pôles des résonateurs à quartz à la fréquence jusqu'à 200 MHz par la technique de phase dans le circuit en π avec compensation de la capacité parallèle C_0

Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network

Part 3: Basic method for the measurement of two-terminal parameters of quartz crystal units up to 200 MHz by phase technique in a π -network with compensation of the parallel capacitance C_0



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60444-3: 1986

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE

TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**

60444-3

Première édition
First edition
1986-06

Mesure des paramètres des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en π

**Partie 3: Méthode fondamentale pour la mesure des
paramètres à deux pôles des résonateurs à quartz à la
fréquence jusqu'à 200 MHz par la technique de phase
dans le circuit en π avec compensation de la capacité
parallèle C_0**

Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network

**Part 3: Basic method for the measurement of
two-terminal parameters of quartz crystal units
up to 200 MHz by phase technique in a π -network
with compensation of the parallel capacitance C_0**

© IEC 1986 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

e-mail: inmail@iec.ch

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Q

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Circuit de compensation de C_0	6
2.1 Caractéristiques électriques	6
2.2 Caractéristiques mécaniques	10
3. Paramètres des résonateurs à quartz avec et sans compensation de C_0	12
3.1 Fréquence de résonance série f_s et fréquence de résonance f_r	12
3.2 Résistance dynamique R_1 et résistance de résonance R_r	14
3.3 Capacité dynamique C_1 et inductance dynamique L_1	14
4. Circuit d'essai	14
4.1 Circuit en π	16
4.2 Accessoires du circuit en π	16
4.3 Appareils de mesure associés	16
4.4 Circuit de compensation	16
5. Méthode de mesure	18
5.1 Etalonnage initial du circuit en π	18
5.2 Ajustage du circuit de compensation	18
5.3 Mesures de la fréquence et de la résistance	20
5.4 Calcul de la capacité dynamique C_1 et de l'inductance dynamique L_1	22
ANNEXE A — Analyse de la différence de f , R , C_1 et L_1 comme résultat des méthodes de mesure avec et sans compensation de C_0	24
ANNEXE B — Informations supplémentaires relatives à la précision	28
ANNEXE C — Informations supplémentaires relatives aux composants du circuit donnés dans les figures 4a) et 4b)	32

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. C_0 compensation circuit	7
2.1 Electrical specifications	7
2.2 Mechanical specification	11
3. Crystal unit parameters with and without C_0 compensation	13
3.1 Series resonance frequency f_s and resonance frequency f_r	13
3.2 Motional resistance R_1 and resonance resistance R_r	15
3.3 Motional capacitance C_1 and motional inductance L_1	15
4. Test circuit	15
4.1 The π -network	17
4.2 Accessories of the π -network	17
4.3 Associated equipment	17
4.4 Compensation circuit	17
5. Method of measurement	19
5.1 Initial calibration of the π -network	19
5.2 Tuning of the compensation circuit	19
5.3 Frequency and resistance measurement	21
5.4 Evaluation of the motional capacitance C_1 and motional inductance L_1	23
APPENDIX A — Analysis of the difference of f , R , C_1 and L_1 as result of measurement methods with and without compensation of C_0	25
APPENDIX B — Additional information on accuracy	29
APPENDIX C — Additional information on circuit components given in Figures 4a) and 4b)	33

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MESURE DES PARAMÈTRES DES QUARTZ PIÉZOÉLECTRIQUES PAR LA TECHNIQUE DE PHASE NULLE DANS LE CIRCUIT EN π

Troisième partie: Méthode fondamentale pour la mesure des paramètres à deux pôles des résonateurs à quartz à la fréquence jusqu'à 200 MHz par la technique de phase dans le circuit en π avec compensation de la capacité parallèle C_0

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Comité d'Etudes n° 49 de la CEI: Dispositifs piézoélectriques pour la commande et le choix de la fréquence.

Il constitue la troisième partie de la série des publications de la CEI sur les méthodes de mesure par la technique de phase et comprend la méthode fondamentale pour la mesure des paramètres à deux pôles des résonateurs à quartz à la fréquence jusqu'à 200 MHz par la technique de phase dans le circuit en π avec compensation de la capacité parallèle C_0 .

La première partie, comprenant la méthode fondamentale pour la mesure de la fréquence de résonance et de la résistance de résonance des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en π , est parue comme Publication 444-1 de la CEI (deuxième édition, 1986).

La deuxième partie, comprenant la méthode de décalage de phase pour la mesure de la capacité dynamique des quartz, est parue comme Publication 444-2 de la CEI (première édition, 1980).

La quatrième partie, comprenant la méthode pour la mesure de la fréquence de résonance à la charge f_L , de la résistance de résonance à la charge R_L , du décalage de la fréquence de résonance à la charge Δf_L , de la gamme de décalage de fréquence $\Delta f_{L1, L2}$ et de la sensibilité de fréquence relative S , paraîtra comme Publication 444-4 de la CEI.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
49(BC)154	49(BC)172

Pour de plus ample renseignements, consulter le rapport de vote mentionné dans le tableau ci-dessus.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT OF QUARTZ CRYSTAL UNIT PARAMETERS BY ZERO PHASE TECHNIQUE IN A π -NETWORK

Part 3: Basic method for the measurement of two-terminal parameters of quartz crystal units up to 200 MHz by phase technique in a π -network with compensation of the parallel capacitance C_0

FOREWORD

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

PREFACE

This report has been prepared by IEC Technical Committee No. 49: Piezoelectric Devices for Frequency Control and Selection.

It forms Part 3 of the series of IEC publications on phase measuring methods, and contains the basic method for the measurement of two-terminal parameters of quartz crystal units up to 200 MHz by phase technique in a π -network with compensation of the parallel capacitance C_0 .

Part 1, containing a basic method for the measurement of resonance frequency and resonance resistance of quartz crystal units by zero phase technique in a π -network, is issued as IEC Publication 444-1 (second edition, 1986).

Part 2, containing a phase offset method for the measurement of motional capacitance of quartz crystal units, is issued as IEC Publication 444-2 (first edition, 1980).

Part 4, containing a method for the measurement of load resonance frequency f_L , load resonance resistance R_L , load resonance frequency offset Δf_L , frequency pulling range $\Delta f_{L1, L2}$ and pulling sensitivity S , will be issued as IEC Publication 444-4.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
49(CO)154	49(CO)172

Further information can be found in the Report on Voting indicated in the table above.

MESURE DES PARAMÈTRES DES QUARTZ PIÉZOÉLECTRIQUES PAR LA TECHNIQUE DE PHASE NULLE DANS LE CIRCUIT EN π

Troisième partie: Méthode fondamentale pour la mesure des paramètres à deux pôles des résonateurs à quartz à la fréquence jusqu'à 200 MHz par la technique de phase dans le circuit en π avec compensation de la capacité parallèle C_0

1. Domaine d'application

Le présent rapport définit une méthode pour la mesure des paramètres des résonateurs à quartz à l'aide d'une inductance pour compenser les effets de C_0 à la fréquence du résonateur à quartz, avec une exactitude en fonction du type de quartz pour:

- a) la fréquence avec une précision relative se situant entre 10^{-6} et 10^{-8} ;
- b) la résistance avec une précision relative se situant entre 2% et 5%;
- c) la capacité dynamique et l'inductance dynamique avec une précision relative se situant entre 3% et 7%.

Ce rapport est fondé sur le circuit en π décrit dans la Publication 444-1: Mesure des paramètres des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en π , Première partie: Méthode fondamentale pour la mesure de la fréquence de résonance et de la résistance de résonance des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en π .

Sa particularité nouvelle est la compensation de la capacité parallèle C_0 du résonateur à quartz par une inductance à la fréquence du résonateur.

Dans ce rapport, deux circuits possibles pour la compensation de C_0 sont exposés en détail. Les circuits de compensation peuvent être aussi faits de différentes manières, par exemple avec inductance et capacité discrètes ou avec ligne résonante ayant une lame court-circuit mobile. Les exigences pour le circuit de compensation et pour la méthode de mesure sont les mêmes.

2. Circuit de compensation de C_0

2.1 Caractéristiques électriques

Au voisinage immédiat de la fréquence de résonance, un résonateur à quartz peut être traité comme le circuit montré à la figure 1, page 8, où l'effet de C_0 est éliminé par une inductance variable L_p . Cette inductance peut être réalisée par un circuit résonant parallèle qui peut être électroniquement ajusté.

MEASUREMENT OF QUARTZ CRYSTAL UNIT PARAMETERS BY ZERO PHASE TECHNIQUE IN A π -NETWORK

Part 3: Basic method for the measurement of two-terminal parameters of quartz crystal units up to 200 MHz by phase technique in a π -network with compensation of the parallel capacitance C_0

1. Scope

This report specifies a method for the measurement of the parameters of quartz crystal units using an inductance to compensate for the effects of C_0 at the frequency of the crystal unit with accuracy depending on the type of crystals for:

- a) frequency with a fractional accuracy ranging between 10^{-6} and 10^{-8} ;
- b) resistance with a fractional accuracy ranging between 2% and 5%;
- c) motional capacitance and motional inductance with a fractional accuracy ranging between 3% and 7%.

This report is based on the π -network described in IEC Publication 444-1. Measurement of Quartz Crystal Unit Parameters by Zero Phase Technique in a π -network, Part 1: Basic Method for the Measurement of Resonance Frequency and Resonance Resistance of Quartz Crystal Units by Zero Phase Technique in a π -network.

Essentially new is the compensation of parallel capacitance C_0 of the crystal unit by an inductance at the frequency of the crystal unit.

In the report, two possible circuits for compensation of C_0 are discussed in detail. The compensation circuits can also be constructed in different ways; for example: with discrete inductance and capacitance or with a resonant line with a moving shorting link. The requirements for the compensation circuit and the measurement method are the same.

2. C_0 compensation circuit

2.1 Electrical specifications

Close to its resonance frequency a crystal unit can be treated as the circuit of Figure 1, page 9, where the effect of C_0 is eliminated by a variable inductor L_p . This inductor can be realized by a parallel resonant circuit which may be electronically tuned.

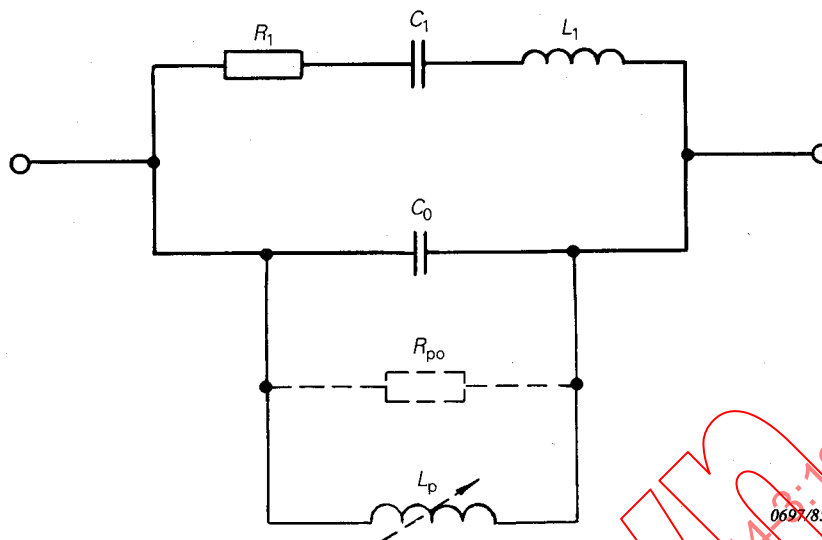
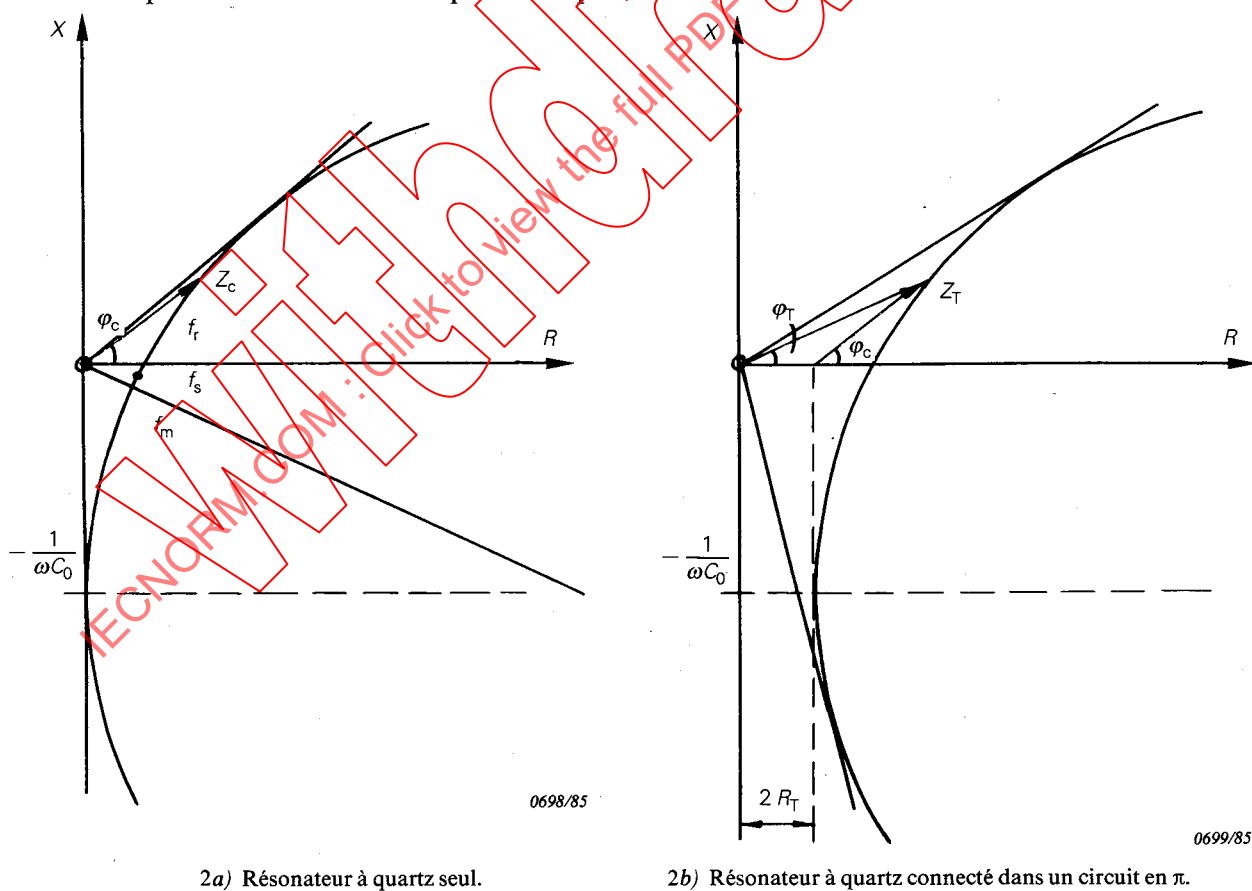


FIG. 1 — Circuit équivalent d'un résonateur à quartz avec une compensation de C_0 .
(Les pertes de L_p sont représentées par R_{po})

L'impédance complexe $Z = R + jX$ du résonateur à quartz non compensé est donnée à la figure 2. La figure 2a) montre l'impédance du résonateur à quartz seul, tandis que la figure 2b) représente le résonateur à quartz connecté dans le circuit en π . La figure 3, page 10, montre l'impédance du résonateur à quartz compensé sous les mêmes conditions.



2a) Résonateur à quartz seul.

2b) Résonateur à quartz connecté dans un circuit en π .

FIG. 2. — Diagramme d'impédance d'un résonateur à quartz sans compensation de la capacité parallèle C_0 .

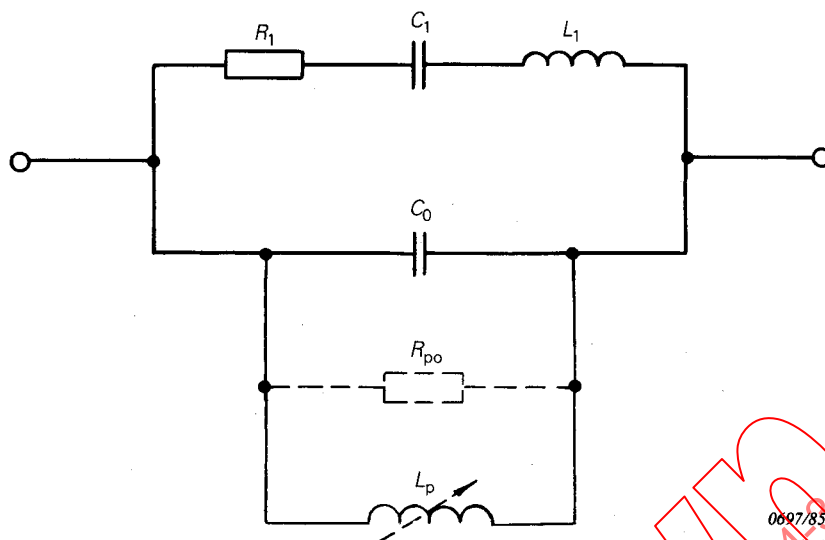


FIG. 1. — Equivalent circuit of a crystal unit with compensation of C_0 .
(The losses of L_p are represented by R_{po})

The complex impedance $Z = R + jX$ of the uncompensated crystal unit is given in Figure 2. Figure 2a) shows the impedance of the crystal unit alone, while Figure 2b) is for the crystal unit connected in the π -network. Figure 3 (page 11) shows the impedance of the compensated crystal unit under the same conditions.

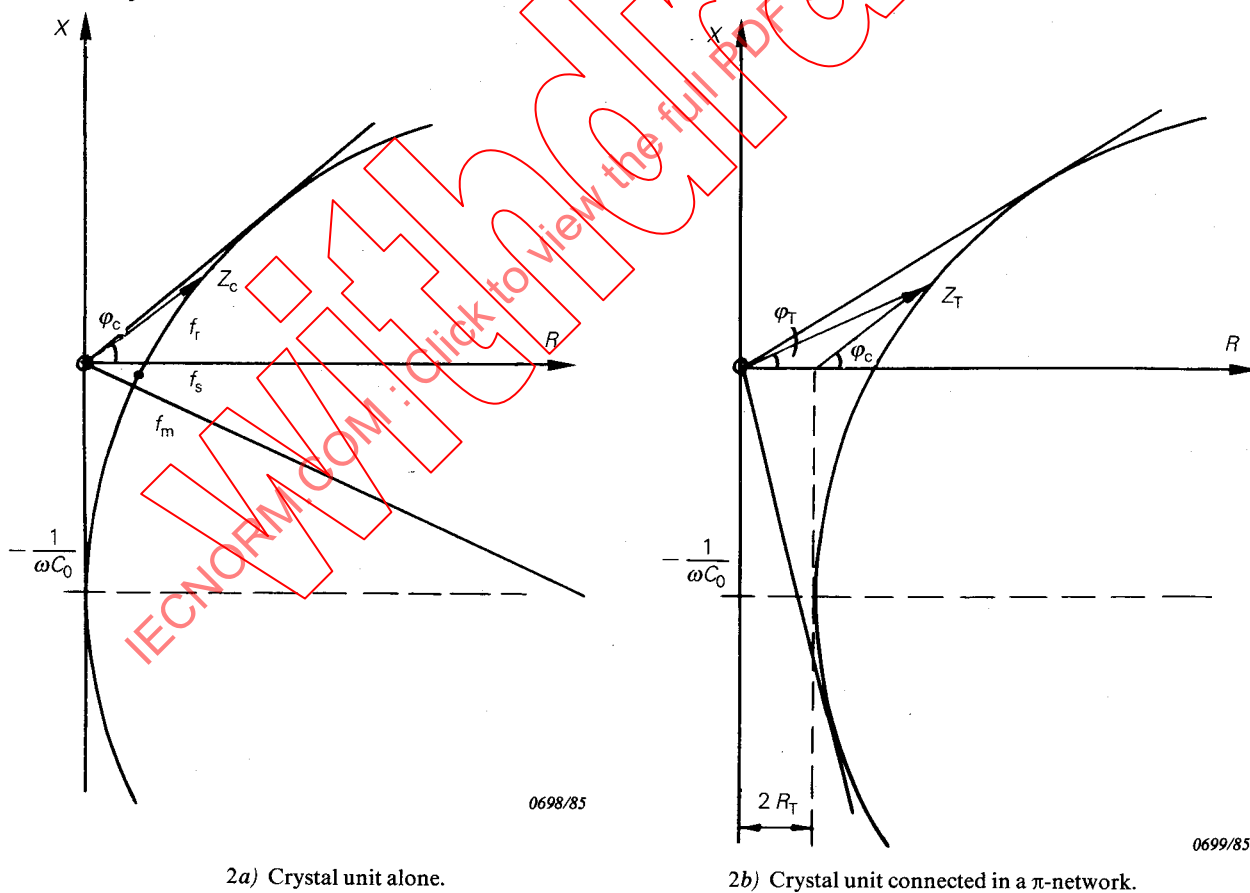
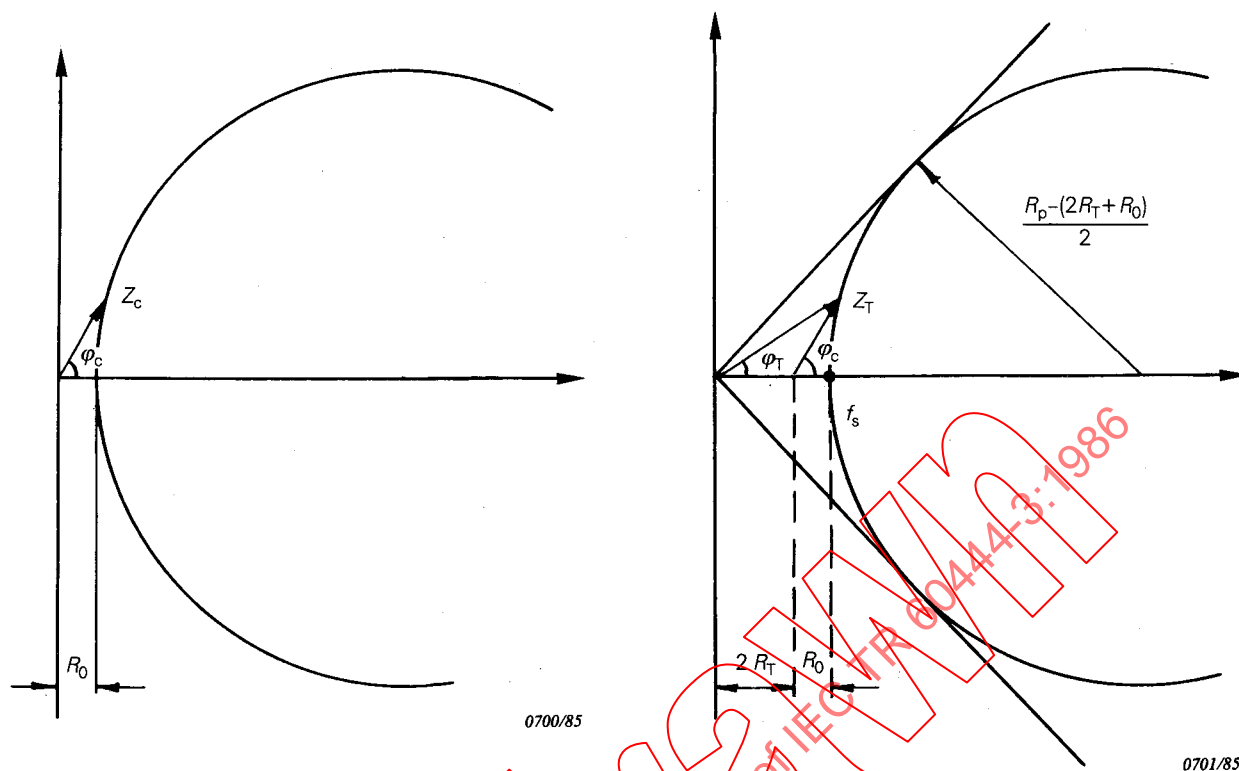


FIG. 2. — Impedance diagram of a crystal unit without compensation of parallel capacitance C_0 .



3a) Résonateur à quartz avec C_0 compensé.

3b) Le même résonateur connecté dans un circuit en π .

FIG. 3. — Diagramme d'impédance d'un résonateur à quartz lorsque C_0 est compensée avec un circuit de compensation proprement ajusté conformément à la figure 1.

L'angle de phase $\varphi = \varphi_T$ entre l'entrée et la sortie du circuit en π pour le résonateur à quartz chargé par la résistance $2R_T = 25 \Omega$ est donné par:

$$\tan \varphi_T = \frac{X}{R} = \frac{X}{R_1 + 2R_T} \quad (1)$$

En première approximation, pour des valeurs petites de φ_T , il peut être exprimé par:

$$\tan \varphi_T = \frac{2\Delta\omega L_1}{R_1 + 2R_T} = \frac{\Delta f}{f} \times 2Q_{\text{eff}} \quad (2)$$

$$\text{avec } Q_{\text{eff}} = \frac{\omega_0 L_1}{R_1 + 2R_T}$$

Comme on peut le voir aux figures 2 et 3, les angles de phase minimal et maximal existent dans les deux cas. Tous les deux ne sont égaux en valeur que pour la capacité parallèle C_0 compensée. De plus, l'impédance est maintenant symétrique par rapport à la fréquence de résonance série f_s .

2.2 Caractéristiques mécaniques

Deux modifications possibles du circuit en π , répondant aux prescriptions du paragraphe 2.1, sont données aux figures 4a) et 4b), page 12.

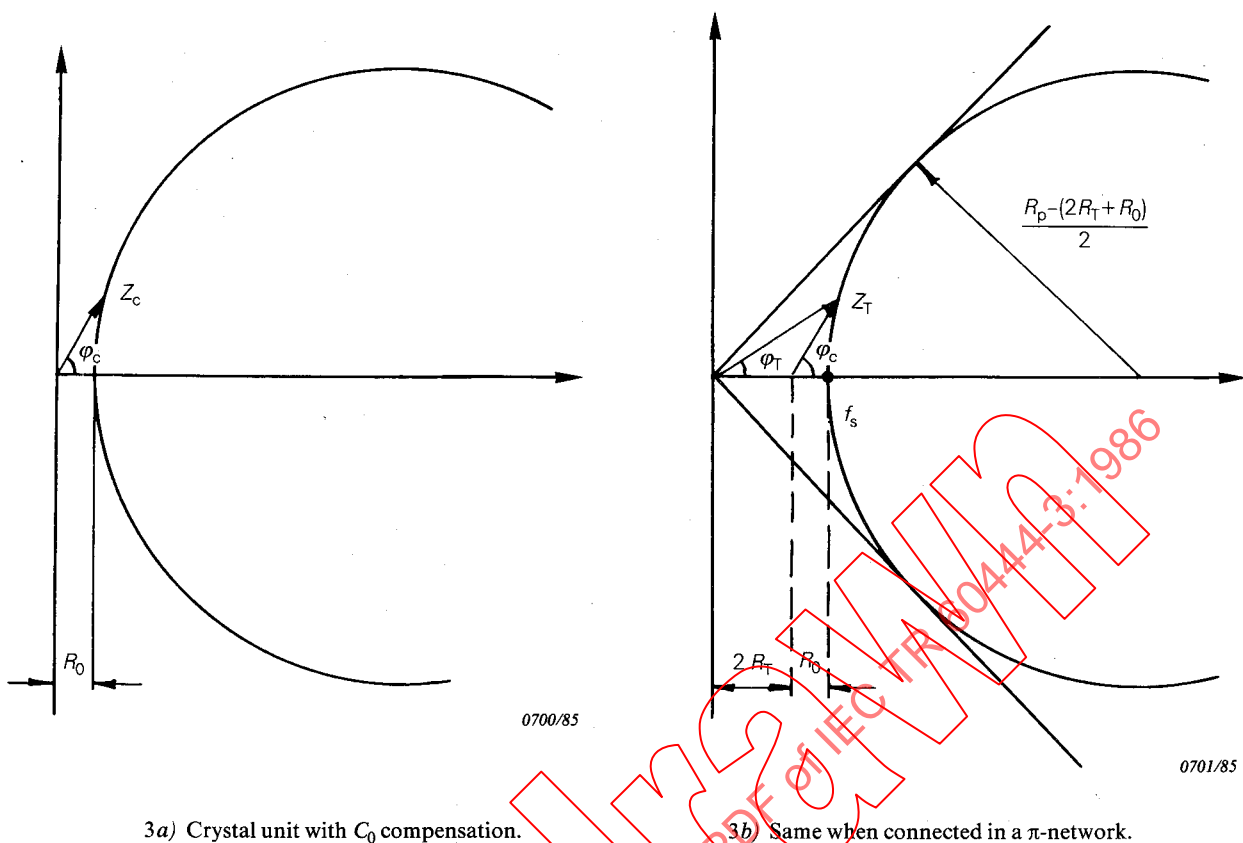


FIG. 3. — Impedance diagram of a crystal unit when C_0 is compensated with a properly tuned compensation network according to Figure 1.

The phase angle $\varphi = \varphi_T$ between input and output of a π -network with a termination for the crystal unit of resistance $2R_T = 25 \Omega$ is given by:

$$\tan \varphi_T = \frac{X}{R} = \frac{X}{R_1 + 2R_T} \quad (1)$$

To a first approximation for small values of φ_T it can be expressed by:

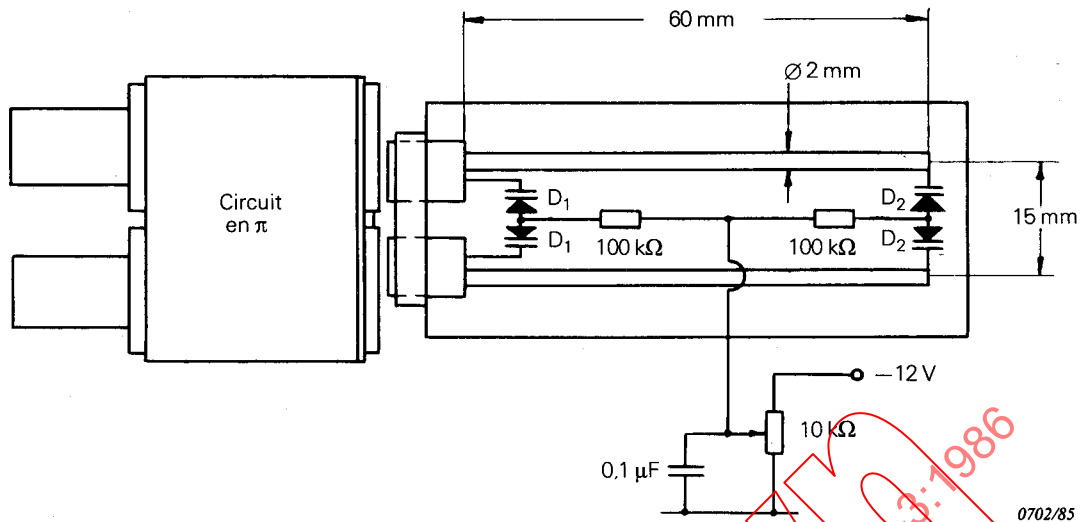
$$\tan \varphi_T = \frac{2\Delta \omega L_1}{R_1 + 2R_T} = \frac{\Delta f}{f} \times 2Q_{\text{eff}} \quad (2)$$

$$\text{with } Q_{\text{eff}} = \frac{\omega_0 L_1}{R_1 + 2R_T}$$

As can be seen from Figures 2 and 3 in both cases, there exists a maximum and a minimum phase angle; both are equal in value only for the compensated parallel capacitance C_0 . Furthermore the impedance is now symmetric with respect to the series resonance frequency f_s .

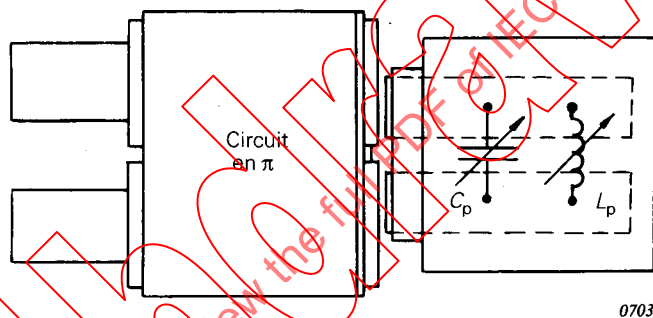
2.2 Mechanical specification

Two possible modifications of the π -network which meet the requirements of Sub-clause 2.1 are given in Figures 4a) and 4b), page 13.



Note. — Une information supplémentaire relative aux composants du circuit est donnée dans l'annexe C.

FIG. 4a). — Schéma simplifié du circuit en π avec ajustage électrique de compensation de C_0 .



Note. — Une information supplémentaire relative aux composants du circuit est donnée dans l'annexe C.

FIG. 4b). — Schéma simplifié du circuit en π avec ajustage mécanique de compensation de C_0 .

3. Paramètres des résonateurs à quartz avec et sans compensation de C_0

3.1 Fréquence de résonance série f_s et fréquence de résonance f_r

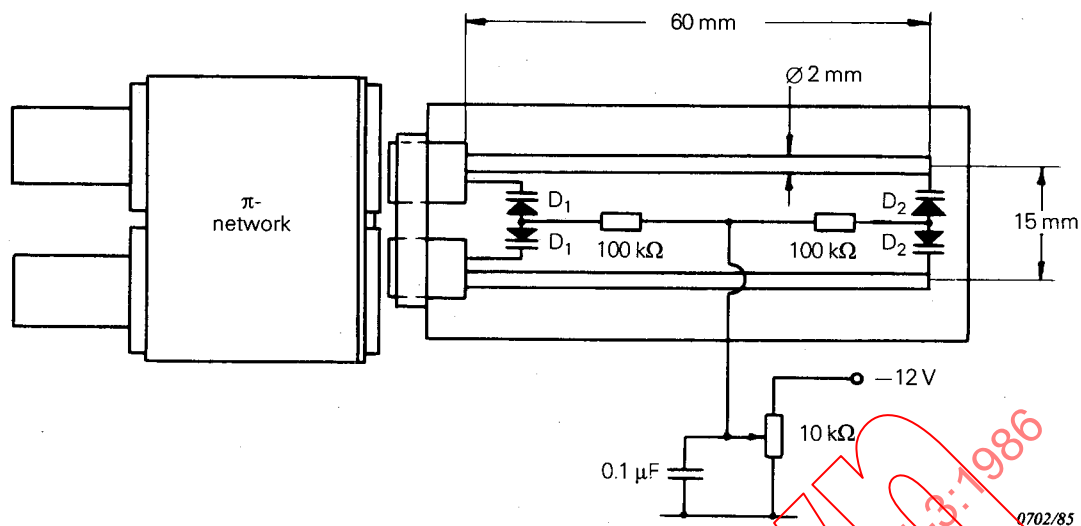
La compensation de C_0 donne la possibilité de faire les mesures directes de la fréquence d'un bras série à la phase nulle

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (3)$$

alors que la Publication 444-1 de la CEI spécifie la mesure directe de la fréquence de résonance par la technique de phase nulle

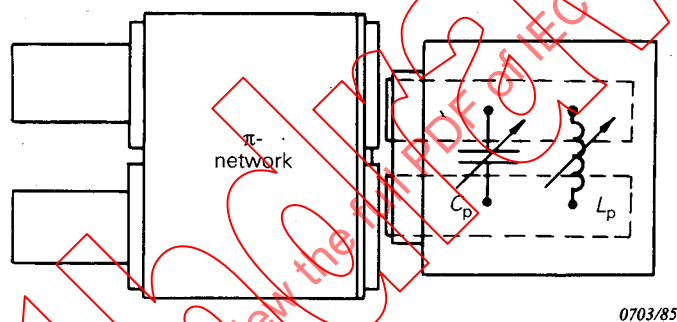
$$f_r = f_s \left(1 + \frac{C_0}{2C_1 Q^2} \right)$$

en première approximation.



Note. — Additional information on circuit components is given in Appendix C.

FIG. 4a). — Simplified diagram of the π -network with electrical adjustment of C_0 compensation.



Note. — Additional information on circuit components is given in Appendix C.

FIG. 4b). — Simplified diagram of the π -network with mechanical adjustment of C_0 compensation.

3. Crystal unit parameters with and without C_0 compensation

3.1 Series resonance frequency f_s and resonance frequency f_r

The compensation of C_0 permits the direct measurement at zero phase of the frequency of the series branch

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (3)$$

whereas IEC Publication 444-1 specifies the direct measurement of the resonance frequency by zero phase technique

$$f_r = f_s \left(1 + \frac{C_0}{2C_1 Q^2} \right)$$

to a first approximation.

3.2 Résistance dynamique R_1 et résistance de résonance R_r

La résistance du bras série R_1 peut être calculée à partir de la résistance R_0 à la phase nulle avec compensation de C_0 , et de la résistance effective R_{po} du circuit de compensation.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{po}}. \quad (4)$$

R_{po} est mesurée à une fréquence un peu inférieure à la fréquence du résonateur à quartz, lorsque l'inductance parallèle L_p est accordée à la capacité parallèle C_0 . La résistance de résonance R_r est mesurée directement sans compensation.

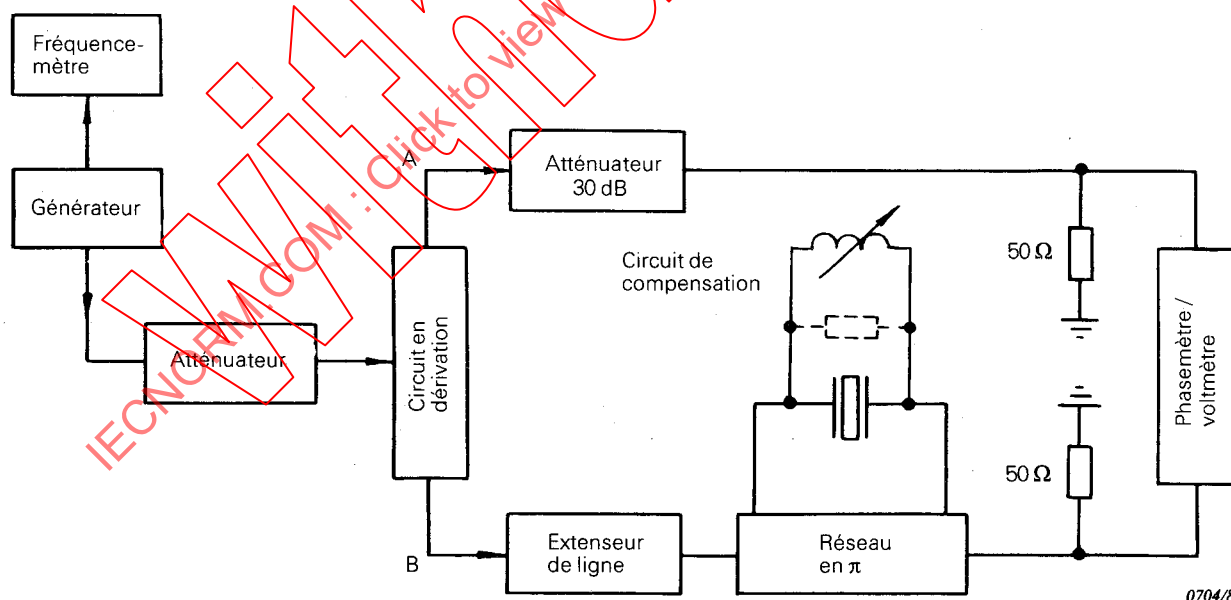
3.3 Capacité dynamique C_1 et inductance dynamique L_1

La capacité dynamique C_1 et l'inductance dynamique L_1 peuvent être calculées de l'équation (1) de l'article 2, à partir des mesures de déphasage. Cette équation peut se résoudre explicitement à partir des mesures effectuées, avec seulement la compensation de C_0 ; sans cette compensation, on utilise souvent l'équation (2) de l'article 2; l'erreur qui en résulte n'est pas négligeable à fréquence et partiel plus élevés.

Une analyse des différences sur f , R , C_1 et L_1 pour les deux cas est donnée dans l'annexe A.

4. Circuit d'essai

Au contraire du circuit de mesure montré à la figure 1 de la Publication 444-1 de la CEI, le boîtier n'est pas mis à la masse. Les capacités internes du boîtier sont incorporées dans la capacité parallèle C_0 pour traiter le résonateur à quartz comme un circuit à deux pôles. L'inductance de compensation L_p et la résistance de perte parallèle R_{po} qui représente les pertes dans L_p sont ajoutées conformément à la figure 1 de l'article 2.



Notes 1. — L'atténuateur de 30 dB peut être souhaitable dans la voie A avec certains phasemètres et voltmètres.

2. — L'extenseur de ligne peut être souhaitable dans la voie B pour faciliter l'égaleur de la longueur électrique des câbles de connexion.

FIG. 5. — Circuit d'essai.

3.2 Motional resistance R_1 and resonance resistance R_r

The series branch resistance R_1 can be calculated from the resistance R_0 at zero phase with C_0 compensation and the effective resistance R_{po} of the compensation circuit

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{po}}. \quad (4)$$

R_{po} is measured slightly below the crystal unit frequency, when the parallel inductance L_p is tuned to the parallel capacitance C_0 . The resonance resistance R_r is measured directly without compensation.

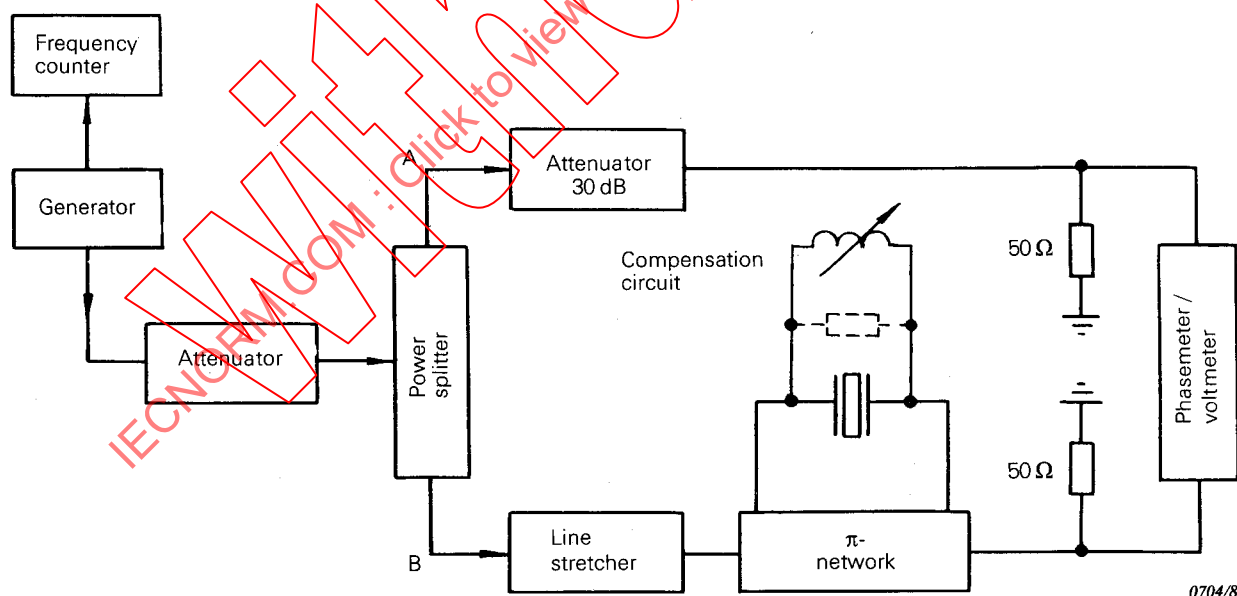
3.3 Motional capacitance C_1 and motional inductance L_1

The motional capacitance C_1 and motional inductance L_1 can be calculated from phase offset measurements in both cases from equation (1) of Clause 2. This equation can only be solved explicitly from measurements with compensation of C_0 . Without this compensation, equation (2) of Clause 2 is often used, with an error which is not negligible at higher frequencies and overtone order.

An analysis of the differences in f , R , C_1 and L_1 for both cases is given in Appendix A.

4. Test circuit

Unlike the circuit diagram shown in Figure 1 of IEC Publication 444-1, the enclosure is not grounded. The internal capacitances to the enclosure are included in the parallel capacitance C_0 in order to treat the crystal unit as a two-terminal circuit. The compensation inductance L_p with the parallel loss resistance R_{po} which represents the losses in L_p are added according to Figure 1 of Clause 2.



Notes 1. — The 30 dB attenuator in channel A may be desirable with certain phasemeters and voltmeters.

2. — The line stretcher in channel B may be desirable for ease of equalizing the electrical length of the cables.

FIG. 5. — Test circuit.

4.1 Circuit en π

Le circuit en π du paragraphe 5.1 de la Publication 444-1 de la CEI doit être utilisé.

4.2 Accessoires du circuit en π

4.2.1 Résistance de référence

Un ensemble de résistances de référence et leurs caractéristiques sont données au paragraphe 5.2.1 de la Publication 444-1 de la CEI.

4.2.2 Lame court-circuit

La lame court-circuit est une plaque métallique aux mêmes dimensions que les résistances de référence du paragraphe 4.2.1.

4.3 Appareils de mesure associés

Les appareils de mesure associés sont indiqués au paragraphe 5.3 de la Publication 444-1 de la CEI.

4.4 Circuit de compensation

4.4.1 Description générale

L'inductance ou le circuit de résonance parallèle avec l'inductance résultante L_p et les pertes représentées par la résistance R_{po} à la fréquence du résonateur à quartz est connecté en parallèle avec le résonateur à quartz, par les lames de contact du circuit en π .

La compensation est faite pour la capacité parallèle C_0 du résonateur à quartz et pour la capacité parasite entre les lames de contact du circuit en π .

4.4.2 Réalisation du circuit de compensation à large bande

Lorsque la compensation doit être utilisée dans une large gamme de fréquence, de préférence au-dessus de 80 MHz, une inductance parallèle accordée avec la tension est connectée directement aux lames de contact du circuit en π . Cela est une solution convenable.

Le circuit est constitué principalement d'une inductance de ligne parallèle et de condensateurs shunts accordés simultanément (diodes à capacité variable).

Les points de connexion du circuit de compensation dans le circuit en π ne sont pas critiques.

4.4.3 Exigences pour le circuit de compensation de la capacité parallèle C_0

4.4.3.1 Au voisinage de la fréquence de résonance série, la phase du circuit entier en essai (résonateur à quartz et circuit de compensation parallèle accordé à la fréquence du résonateur) est donnée par l'expression:

$$\varphi = \arctan \frac{X_1 - (R_1^2 + X_1^2) B_p}{R_1 + (R_1^2 + X_1^2) G_p} \approx \arctan \frac{X_1 - R_1^2 B_p}{R_1 + R_1^2 G_p},$$

où $Z_1 = R_1 + jX_1 \approx R_1 + j2\Delta\omega L_1$ est l'impédance de la composante dynamique, et

$$Y_p = G_p + jB_p \approx \frac{1}{R_{po}} + j2\Delta\omega(C_0 + C_p)$$

est l'admittance du circuit parallèle au voisinage de la résonance. L'influence du circuit de compensation sur la caractéristique de phase du résonateur à quartz est négligeable lorsque nous faisons:

4.1 The π -network

The π -network of Sub-clause 5.1 of IEC Publication 444-1 shall be used.

4.2 Accessories of the π -network

4.2.1 Reference resistors

A set of reference resistors used and their performance is given in Sub-clause 5.2.1 of IEC Publication 444-1.

4.2.2 Shorting blank

The shorting blank is a metal plate with the same dimensions as the reference resistors of Sub-clause 4.2.1.

4.3 Associated equipment

The associated equipment is indicated in Sub-clause 5.3 of IEC Publication 444-1.

4.4 Compensation circuit

4.4.1 General description

An inductance or a parallel resonance circuit with the resulting inductance L_p and the losses represented by resistance R_{po} at the crystal frequency is connected in parallel with the crystal unit and the contact plates of the π -network.

The compensation is performed for the parallel capacitance C_0 of the crystal unit and the parasitic capacitance between the contact plates of the π -network.

4.4.2 Arrangement of wideband compensation circuit

As compensation should be used over a wide frequency range, preferably above 80 MHz, a voltage tuned parallel inductance connected directly to the contact plates of the π -network is a convenient solution.

The circuit consists basically of a parallel-line inductance and simultaneously tuned shunt capacitors (varactor diodes).

The connection points of the compensation circuit to the π -network are not critical.

4.4.3 Requirements for the compensation circuit for parallel capacitance C_0

4.4.3.1 In the vicinity of the series resonance frequency, the phase of the whole circuit under test (crystal unit and parallel compensation circuit tuned to the crystal frequency) is given by the expression:

$$\varphi = \arctan \frac{X_1 - (R_1^2 + X_1^2) B_p}{R_1 + (R_1^2 + X_1^2) G_p} \approx \arctan \frac{X_1 - R_1^2 B_p}{R_1 + R_1^2 G_p},$$

where $Z_1 = R_1 + jX_1 = R_1 + j2\Delta\omega L_1$ is the impedance of the motional arm and

$$Y_p = G_p + jB_p = \frac{1}{R_{po}} + j2\Delta\omega(C_0 + C_p)$$

is the admittance of the parallel circuit around the resonance. The influence of the compensation circuit on the phase characteristic of the crystal unit is negligible if we make:

$$C_0 + C_p \ll \frac{L_1}{R_1^2} \text{ et } R_{po} \gg R_1.$$

Les valeurs pratiques de C_0 , C_p , R_{po} et R_1 sont telles que $C_0 + C_p < 50 \text{ pF}$ et $R_{po} > 10 R_1$.

Dans ces conditions, les erreurs sur les valeurs de R_1 et L_1 calculées avec les expressions (4) et (6) respectivement de l'article 5 sont inférieures à 1 %.

4.4.3.2 R_{po} ne doit pas changer de plus de 1 % lorsque la fréquence est abaissée de 1 %, parce que R_{po} ne peut pas être mesurée à la fréquence du résonateur. La mesure est effectuée 1 % en dessous de la fréquence nominale du résonateur à quartz, parce que le bras série est ici capacitif avec une déviation de phase égale à $0,3^\circ$ de 90° pour $Q_{\text{eff}} > 10\,000$.

4.4.3.3 La compensation doit être possible pour des valeurs de capacité parallèle comprises entre 0 et 10 pF, et pour les fréquences jusqu'à 200 MHz.

5. Méthode de mesure

5.1 Etalonnage initial du circuit en π

5.1.1 Insérer la lame court-circuit dans le circuit en π .

5.1.2 Ajuster le générateur de signaux à la fréquence nominale du résonateur à quartz et ajuster le niveau de sortie de manière que la tension V_{Bs} soit 30 mV.

5.1.3 Enlever la lame court-circuit.

5.1.4 Relever la tension V_{Bo} lue en voie B. L'atténuation de diaphonie, donnée par

$$a_c = 20 \log \frac{V_{Bs}}{V_{Bo}},$$

doit être supérieure à 60 dB.

5.1.5 S'assurer que les exigences du paragraphe 4.1 pour les résistances de référence et la lame court-circuit du paragraphe 4.2 sont satisfaites.

5.2 Ajustage du circuit de compensation

5.2.1 Connecter le circuit de compensation du paragraphe 4.4 au circuit en π .

5.2.2 Insérer la lame court-circuit.

5.2.3 Ajuster la fréquence du générateur de signaux à la fréquence nominale du résonateur à quartz moins 1 %.

5.2.4 Relever les tensions lues dans les voies A et B, V_{AsP} et V_{BsP} et calculer

$$K_P = \frac{V_{BsP}}{V_{AsP}}.$$

5.2.5 Insérer le résonateur à quartz.

5.2.6 Ajuster l'inductance parallèle L_p à la tension minimale de la voie B, V_{BP} et calculer

$$R_{po} = \left(K_P \frac{V_{AP}}{V_{BP}} - 1 \right) 2R_T \quad (5)$$

Note. — La phase lue est égale à la phase avec lame court-circuit mais n'est pas très stable par suite de la valeur relativement élevée de R_{po} .

$$C_0 + C_p \ll \frac{L_1}{R_1^2} \text{ and } R_{po} \gg R_1.$$

Practical values of C_0 , C_p , R_{po} and R_1 are such that $C_0 + C_p < 50 \text{ pF}$ and $R_{po} > 10 R_1$.

Under these conditions, the errors in R_1 and L_1 values calculated respectively with expressions (4) and (6) of Clause 5 are less than 1 %.

4.4.3.2 R_{po} shall not change more than 1 % when the frequency is lowered by 1 %, as R_{po} cannot be measured at the crystal frequency. The measurement is performed 1 % below the nominal frequency of the crystal unit, as the series branch is capacitive there with a phase deviation of 0.3° from 90° for $Q_{\text{eff}} > 10\,000$.

4.4.3.3 The compensation shall be possible for parallel capacitance values between 0 and 10 pF and for frequencies up to 200 MHz.

5. Method of measurement

5.1 Initial calibration of the π -network

5.1.1 Insert the shorting blank in the π -network.

5.1.2 Adjust the signal generator to the nominal frequency of the crystal unit and adjust the output level so that the voltage V_{Bs} is 30 mV.

5.1.3 Remove the shorting blank.

5.1.4 Read the voltage of channel B, V_{Bo} . The "cross-talk" attenuation, given by

$$a_c = 20 \log \frac{V_{Bs}}{V_{Bo}},$$

shall be greater than 60 dB.

5.1.5 Check whether the requirements of Sub-clause 4.1 for the reference resistors and the shorting blank of Sub-clause 4.2 are fulfilled.

5.2 Tuning of the compensation circuit

5.2.1 Connect the compensation circuit of Sub-clause 4.4 to the π -network.

5.2.2 Insert the shorting blank.

5.2.3 Adjust the frequency of the signal generator to the nominal frequency of the crystal unit minus 1 %.

5.2.4 Take the A- and B-channel readings V_{AsP} and V_{BsP} and calculate

$$K_P = \frac{V_{BsP}}{V_{AsP}}.$$

5.2.5 Insert the crystal unit.

5.2.6 Adjust the parallel inductance L_p for minimum voltage of channel B, V_{BP} and calculate

$$R_{po} = \left(K_P \frac{V_{AP}}{V_{BP}} - 1 \right) 2R_T \quad (5)$$

Note. — The phase reading is equal to the phase with the shorting blank but not as stable due to the relatively high value of R_{po} .

5.2.7 Ajuster le générateur de signaux à la fréquence du résonateur à quartz pour donner une lecture de phase nulle conformément au paragraphe 5.3.1.

5.2.8 Corriger l'inductance de compensation pour donner des lectures égales de la tension aux déphasages symétriques, par exemple $\pm 20^\circ$.

5.2.9 Le réglage du circuit de compensation doit être répété pour chaque résonateur à quartz avec capacité parallèle et/ou fréquence nominale différentes.

5.3 Mesures de la fréquence et de la résistance

5.3.1 Etalonnage initial

5.3.1.1 Insérer la lame court-circuit dans le circuit en π avec l'inductance compensée.

5.3.1.2 Ajuster la fréquence du générateur de signaux à la fréquence nominale du résonateur à quartz et ajuster la puissance de sortie de façon à donner le niveau d'excitation requis du résonateur à quartz.

5.3.1.3 Relever les tensions lues dans les voies A et B, V_{As} et V_{Bs} , et calculer

$$K = \frac{V_{Bs}}{V_{As}}$$

5.3.1.4 Mettre le phasemètre à zéro.

5.3.1.5 Insérer la résistance de référence de 25Ω .

5.3.1.6 Corriger la lecture du phasemètre jusqu'au zéro en changeant l'inductance de compensation et/ou la position du point de zéro du phasemètre.

5.3.1.7 Insérer la résistance de 75Ω .

5.3.1.8 Corriger la lecture du phasemètre jusqu'au zéro comme décrit au paragraphe 5.3.1.6.

5.3.1.9 La valeur lue au phasemètre après insertion de la résistance de 25Ω et celle qui est lue après insertion de la résistance de 75Ω ne doivent pas différer de plus de $0,2^\circ$. Dans le cas contraire les points des paragraphes 5.3.1.5 à 5.3.1.8 doivent être répétés.

5.3.2 Etalonnage du circuit de compensation

Le réglage du circuit de compensation du résonateur à quartz est effectué conformément aux prescriptions des paragraphes 5.2.2 à 5.2.9.

5.3.3 Mesure de la fréquence de résonance série f_s

f_s est donnée par la lecture de fréquence à la phase nulle lorsqu'une compensation est effectuée conformément au paragraphe 5.3.2.

5.3.4 Calcul de la résistance dynamique R_1

5.3.4.1 A la fréquence de résonance série, la résistance de phase nulle R_0 se calcule à partir des valeurs lues V_{Ao} et V_{Bo}

$$R_0 = \left(K \frac{V_{Ao}}{V_{Bo}} - 1 \right) 2R_T.$$

5.3.4.2 La résistance dynamique R_1 est calculée de R_0 et de R_{po} conformément au paragraphe 3.2.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{po}} \quad (4)$$

- 5.2.7 Adjust the frequency of the signal generator to the crystal frequency in order to give zero phase reading according to Sub-clause 5.3.1.
- 5.2.8 Correct the compensation inductance in order to give equal voltage readings at symmetric phase offsets, for example $\pm 20^\circ$.
- 5.2.9 The tuning of the compensation circuit shall be repeated for each crystal unit with different parallel capacitance and/or nominal frequency.

5.3 *Frequency and resistance measurement*

5.3.1 *Initial calibration*

- 5.3.1.1 Insert the shorting blank in the π -network with compensation inductance.
- 5.3.1.2 Adjust the frequency of the signal generator to the nominal crystal frequency and adjust the power output in order to give the required level of drive of the crystal unit.
- 5.3.1.3 Take the channel A and channel B readings V_{As} and V_{Bs} and calculate

$$K = \frac{V_{Bs}}{V_{As}}.$$

- 5.3.1.4 Set the phasemeter to zero.
- 5.3.1.5 Insert the $25\ \Omega$ resistor.
- 5.3.1.6 Correct the phasemeter reading to zero by varying the compensation inductance and/or the zero set point of the phasemeter.
- 5.3.1.7 Insert the $75\ \Omega$ resistor.
- 5.3.1.8 Correct the phasemeter reading to zero as in Sub-clause 5.3.1.6.
- 5.3.1.9 The phasemeter reading on insertion of the $25\ \Omega$ resistor shall not deviate by more than 0.2° from the reading on insertion of the $75\ \Omega$ resistor. Otherwise steps of Sub-clauses 5.3.1.5 to 5.3.1.8 shall be repeated.

5.3.2 *Calibration of the compensation circuit*

The tuning of the compensation circuit to the crystal unit is performed according to Sub-clause 5.2.2 to 5.2.9.

5.3.3 *Measurement of the series resonance frequency f_s*

f_s is given by the frequency reading at zero phase when the compensation is performed according to Sub-clause 5.3.2.

5.3.4 *Evaluation of the motional resistance R_1*

- 5.3.4.1 At the series resonance frequency the zero phase resistance R_0 is calculated from the voltage readings V_{Ao} and V_{Bo}

$$R_0 = \left(K \frac{V_{Ao}}{V_{Bo}} - 1 \right) 2R_T.$$

- 5.3.4.2 The motional resistance R_1 is calculated from R_0 and R_{po} according to Sub-clause 3.2.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{po}} \quad (4)$$

5.4 Calcul de la capacité dynamique C_1 et de l'inductance dynamique L_1

5.4.1 Angle de phase d'un résonateur à quartz avec C_0 compensée

Conformément à l'article 2, l'angle de phase d'un résonateur à quartz dans le circuit en π est donné par

$$\tan \varphi = \frac{X}{R_1 + 2R_T},$$

avec sa résistance de charge R_T du circuit en π .

5.4.2 Angle de phase maximal

L'angle de phase maximal d'un résonateur à quartz avec compensation de C_0 , conformément à la figure 3, page 10, est donné par:

$$\varphi_{\max} = \sin^{-1} \left[\frac{R_{po}^2}{R_{po}^2 + 2R_{po}(R_1 + 2R_T) + 4R_1R_T} \right] \quad (5)$$

par exemple, $R_{po} = 1\,000\,\Omega$, $R_1 = 100\,\Omega$ et $2R_T = 25\,\Omega$

$\varphi_{\max} = \pm 52,8^\circ$.

5.4.3 Calcul de l'inductance dynamique L_1

Deux mesures de fréquence $f_{+\varphi}$ et $f_{-\varphi}$ sont faites à des décalages de phase positive et négative identiques $+\varphi$ et $-\varphi$ avec φ inférieur à $\varphi_{\max}$ de l'équation (5), préférentiellement à $0,5\varphi_{\max}$ ou $\varphi = 20^\circ$ comme valeur normalisée convenable et L_1 est alors calculée:

$$L_1 = \left[\frac{R_1^2 (R_0 + 2R_T)}{2\pi R_0^2 (f_{+\varphi} - f_{-\varphi})} \right] \cdot a \cdot \tan \varphi_T \quad (6)$$

où

$$R_0 = \frac{R_{po}R_1}{R_{po} + R_1}; \quad a = 1 + \frac{R_1^3 (R_0 + 2R_T)^2}{R_0^4 (R_{po} + R_1)} \tan^2 \varphi_T.$$

5.4.4 Calcul de la capacité dynamique C_1

C_1 est calculée avec l'équation (3) du paragraphe 3.1

$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 L_1}. \quad (7)$$

5.4.5 Calcul du facteur de qualité Q

Le facteur de qualité, Q , est donné par

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1}. \quad (8)$$

5.4 Evaluation of the motional capacitance C_1 and motional inductance L_1

5.4.1 Phase angle of a crystal unit with compensated C_0

According to Clause 2 the phase angle of a crystal unit in a π -network is given by

$$\tan \varphi = \frac{X}{R_1 + 2R_T},$$

where R_T is the terminating resistance of the π -network.

5.4.2 Maximum phase angle

The maximum phase angle of a crystal unit with compensated C_0 according to Figure 3, page 11, is given by:

$$\varphi_{\max} = \sin^{-1} \left[\frac{R_{po}^2}{R_{po}^2 + 2R_{po}(R_1 + 2R_T) + 4R_1R_T} \right] \quad (5)$$

Example, $R_{po} = 1\,000\,\Omega$, $R_1 = 100\,\Omega$ and $2R_T = 25\,\Omega$

$\varphi_{\max} = \pm 52.8^\circ$.

5.4.3 Evaluation of the motional inductance L_1

Two frequency measurements $f_{+\varphi}$ and $f_{-\varphi}$ are performed at identical positive and negative phase offsets $+\varphi$ and $-\varphi$, with φ smaller than $\varphi_{\max}$ of equation (5), preferably at $0.5\varphi_{\max}$ or $\varphi = 20^\circ$ as a convenient standard value and L_1 is then calculated:

$$L_1 = \left[\frac{R_1^2 (R_0 + 2R_T)}{2\pi R_0^2 (f_{+\varphi} - f_{-\varphi})} \right] \cdot a \cdot \tan \varphi_T \quad (6)$$

where

$$R_0 = \frac{R_{po}R_1}{R_{po} + R_1}; \quad a = 1 + \frac{R_1^3 (R_0 + 2R_T)^2}{R_0^4 (R_{po} + R_1)} \tan^2 \varphi_T.$$

5.4.4 Evaluation of the motional capacitance C_1

With equation (3) of Sub-clause 3.1, C_1 is calculated from

$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 L_1}. \quad (7)$$

5.4.5 Evaluation of the quality factor Q

Q is given by

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1}. \quad (8)$$

ANNEXE A

ANALYSE DE LA DIFFÉRENCE DE f , R , C_1 ET L_1 COMME RÉSULTAT DES MÉTHODES DE MESURE AVEC ET SANS COMPENSATION DE C_0

A1. Différence de fréquences et résistances

A1.1 Conformément au paragraphe 3.1, la différence relative théorique de fréquence entre f_r et f_s est donnée en première approximation par

$$\frac{f_r - f_s}{f_s} \approx \frac{C_0}{2C_1 Q^2} \approx \frac{r}{2Q_1^2},$$

où $r = \frac{C_0}{C_1}$ = rapport des capacités du résonateur à quartz.

A1.2 La différence relative théorique entre R_r et R_1 est approximativement égale à:

$$\frac{R_r - R_1}{R_1} \approx \frac{C_0^2}{C_1^2 Q^2} \approx \left(\frac{r}{Q}\right)^2$$

De nouveau, $r = \frac{C_0}{C_1}$.

A1.3 Les valeurs pour les différences entre f_r et f_s aussi bien qu'entre R_r et R_1 sont données dans le tableau AI pour les résonateurs à quartz typiques destinés à la commande de la fréquence.

A1.4 Pour les résonateurs fonctionnant sur partiels, le produit ($Q \times f$) est en théorie presque constant et donc la différence de fréquence en 10^{-6} et la différence de résistance en pourcentage sont proportionnelles au carré de la fréquence. En outre, le rapport de C_0 et C_1 devient plus important en augmentant la fréquence, ce qui provoque encore de plus grandes différences.

A2. Différences de C_1 et L_1 pour les mesures avec et sans compensation de C_0

La capacité dynamique et l'inductance dynamique sont habituellement tirées des mesures sans compensation de C_0 de l'équation:

$$\tan \varphi = \frac{2\Delta\omega L_1}{R_1 + 2R_T} \text{ avec } \varphi = \pm 45^\circ.$$

Cette formule comporte deux simplifications:

- 1) R_r est assimilé à R_1 avec l'erreur indiquée au paragraphe A1.2;
- 2) l'influence de C_0 n'est pas prise en considération, ce qui ne donne ni une tension maximale de la voie B à la phase nulle ni des écarts symétriques de fréquence pour des différences égales de phase avec signe opposé; pour les résonateurs à quartz fonctionnant à fréquence élevée, il est souvent impossible d'obtenir une différence de phase égale à $\pm 45^\circ$.

L'erreur résultante ne peut s'exprimer de façon explicite. Elle a été calculée par des techniques itératives et est donnée dans le tableau AI pour des résonateurs à quartz typiques.

APPENDIX A

ANALYSIS OF THE DIFFERENCE OF f , R , C_1 AND L_1 AS RESULT OF MEASUREMENT METHODS WITH AND WITHOUT COMPENSATION OF C_0

A1. Differences of frequencies and resistances

A1.1 According to Sub-clause 3.1, the theoretical fractional frequency difference between f_r and f_s is given to a first approximation by

$$\frac{f_r - f_s}{f_s} \approx \frac{C_0}{2C_1 Q^2} \approx \frac{r}{2Q_1^2},$$

where $r = \frac{C_0}{C_1}$ = ratio of capacitances of the crystal unit.

A1.2 The theoretical fractional difference between R_r and R_1 is approximately:

$$\frac{R_r - R_1}{R_1} \approx \frac{C_0^2}{C_1^2 Q^2} \approx \left(\frac{r}{Q}\right)^2.$$

Again, $r = \frac{C_0}{C_1}$.

A1.3 Values for the fractional difference between f_r and f_s as well as between R_r and R_1 are given in Table AI for typical oscillator crystals.

A1.4 For overtone crystals the product ($Q \times f$) in theory is nearly constant and thus the frequency difference in 10^{-6} and the resistance difference in per cent are proportional to the square of the frequency. Furthermore, the ratio of C_0 and C_1 becomes larger with increasing frequency, thus giving still greater differences.

A2. Differences of C_1 and L_1 for measurements with and without compensation of C_0

The motional capacitance and motional inductance is commonly taken from measurements, without compensation of C_0 , from the equation:

$$\tan \varphi = \frac{2\Delta\omega L_1}{R_1 + 2R_T} \text{ with } \varphi = \pm 45^\circ.$$

This expression includes two simplifications:

- 1) R_r is taken to be equal to R_1 with the error indicated in Sub-clause A1.2;
- 2) the influence of C_0 is not taken into account, which gives neither a maximum of the voltage of the B-channel at zero phase nor symmetric frequency shifts for equal and opposite phase shifts, and for high frequency crystals, phase shifts of as great as $\pm 45^\circ$ are often impossible to achieve.

The resulting error cannot be expressed explicitly. It has been calculated by iterative techniques and is given in Table AI for typical crystal units.

TABLEAU AI

Valeurs typiques pour les paramètres des résonateurs à quartz et différences théoriques calculées entre paramètres avec et sans compensation ajoutée

f (MHz)	C_1 (fF)	R_1 (Ω)	$Q(10^3)$	$\frac{f_r - f_s}{f_s}$ (1×10^{-6})	$\frac{R_r - R_1}{R_1}$ (%)	ΔC (%) (A partir de la différence de phase de 45°)
15	30	7	50	+ 0,04	+ 0,02	+ 0,002
45	2,3	14	111	+ 0,11	+ 0,06	+ 0,29
75	0,76	30	93	+ 0,49	+ 0,9	+ 2,7
105	0,36	55	76	+ 1,56	+ 6,0	(voir note)

Note. — On ne peut pas mesurer la capacité dynamique C_1 des résonateurs à quartz fonctionnant sur le 7^e partiel avec une différence de phase de $\pm 45^\circ$, parce que l'angle de phase maximal sans compensation est d'environ $+36^\circ$.

A3. Gamme de fréquence pour compensation

Les résonateurs à quartz fonctionnant sur fréquences inférieures à 80 MHz peuvent être mesurés sans compensation de C_0 , la différence entre la fréquence f_r et f_s étant théoriquement inférieure à 1×10^{-6} , celle entre R_r et R_1 théoriquement inférieure à 2% et l'erreur sur la capacité dynamique, sur l'inductance dynamique et sur le facteur de qualité Q étant théoriquement inférieure à 5%.

Les résonateurs à quartz à fréquences supérieures à 80 MHz doivent être mesurés avec compensation de la capacité parallèle C_0 .

TABLE AI

Typical values for parameters of oscillator crystal units, and the calculated theoretical differences between parameters increased with and without compensation

f (MHz)	C_1 (fF)	R_1 (Ω)	$Q(10^3)$	$\frac{f_r - f_s}{f_s}$ (1×10^{-6})	$\frac{R_r - R_1}{R_1}$ (%)	ΔC (%) (from 45° phase offset)
15	30	7	50	+0.04	+0.02	+0.002
45	2.3	14	111	+0.11	+0.06	+0.29
75	0.76	30	93	+0.49	+0.9	+2.7
105	0.36	55	76	+1.56	+6.0	(see note)

Note. — C_1 of crystal units operating at the 7th overtone cannot be measured with phase offset of $\pm 45^\circ$, as the maximum phase angle without compensation is about $+36^\circ$.

A3. Frequency range for compensation

Crystal units of frequencies below 80 MHz may be measured without compensation of C_0 ; the difference between the frequencies f_r and f_s is theoretically less than 1×10^{-6} , the difference between R_r and R_1 is theoretically less than 2% and the error for the motional capacitance, for the motional inductance and for the quality factor is theoretically less than 5%.

Crystal units at frequencies above 80 MHz should be measured with compensation of parallel capacitance C_0 .

ANNEXE B

INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES RELATIVES À LA PRÉCISION

L'annexe A de la Publication 444-1 de la CEI donne l'information supplémentaire relative à la précision. Cette annexe donne les effets de la compensation de la capacité parallèle C_0 , sur la précision de mesure de f_s et R_1 .

B1. Précision de la mesure de la fréquence f_s avec compensation de C_0

- B1.1 La fréquence de résonance série f_s est mesurée à la phase nulle qui est déterminée par les résistances de référence de 25 Ω et 75 Ω du paragraphe 5.3. L'écart de phase dû aux différentes résistances des résonateurs à quartz est inférieur à 0,5° (voir Publication 444-1 de la CEI). Pour les phasemètres ayant une précision de résolution de 0,2° l'erreur de fréquence résultante est donnée par

$$\frac{\Delta f_s}{f} < \frac{\tan 0,7^\circ}{2Q}$$

Pour les facteurs de qualité supérieurs à 10 000, une précision supérieure à $0,6 \times 10^{-6}$ peut être théoriquement atteinte pour la fréquence de résonance série lorsqu'une compensation de C_0 est utilisée.

B2. Précision de mesure de la résistance R_1 avec compensation de C_0

- B2.1 La résistance de résonance série R_1 est évaluée par comparaison avec les résistances de référence à phase nulle en prenant en considération la résistance R_{p0} du circuit de compensation.

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{p0}} \quad (4)$$

- B2.2 L'erreur sur R_1 due à l'erreur dans la phase nulle de 0,7° conformément à l'article B1 est 0,007% et peut donc être négligée.
- B2.3 La somme des erreurs dues aux lectures du voltmètre dans les voies A et B peut atteindre 2%. L'erreur due aux erreurs dans les valeurs des résistances de référence (Publication 444-1 de la CEI) peut être de 2%, soit au total une erreur maximale de 4% sur la mesure de R_0 .
- B2.4 En raison de sa valeur relativement grande, R_{p0} ne peut être mesurée qu'avec une précision approximative de 10%. La résistance de R_{p0} (voisine de 1 000 Ω) est en général au moins 10 fois plus grande que celle de R_1 , ce qui entraîne une erreur supplémentaire sur la valeur de R_1 inférieure à 1%.
- B2.5 C'est pourquoi on peut obtenir, pour la valeur de résistance à la résonance série R_1 , une précision globale de l'ordre de 2% à 5% lorsqu'on utilise la compensation de C_0 .

B3. Précision des mesures de capacité dynamique, d'inductance dynamique et de facteur de qualité en utilisant les méthodes de compensation de C_0

- B3.1 C_1 , L_1 et Q sont évalués à partir de la résistance de résonance série et des mesures de la fréquence aux déphasages.
- B3.2 L'influence de R_1 attendue est donnée dans l'article B2.