

**NORME
INTERNATIONALE**

**CEI
IEC**

**INTERNATIONAL
STANDARD**

60368-2-1

Deuxième édition
Second edition
1988-06

Filtres piézoélectriques

**Deuxième partie:
Guide d'emploi des filtres piézoélectriques
Section un – Filtres à quartz**

Piezoelectric filters

**Part 2:
Guide to the use of piezoelectric filters
Section One – Quartz crystal filters**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60368-2-1: 1988

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.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60368-2-1

Deuxième édition
Second edition
1988-06

Filtres piézoélectriques

**Deuxième partie:
Guide d'emploi des filtres piézoélectriques
Section un – Filtres à quartz**

Piezoelectric filters

**Part 2:
Guide to the use of piezoelectric filters
Section One – Quartz crystal filters**

© IEC 1988 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
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

W

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	6

CHAPITRE III: GUIDE D'EMPLOI DES FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES

SECTION UN — FILTRES À QUARTZ

Articles

1. Domaine d'application	6
2. Filtres à quartz - considérations générales	6
2.1 Introduction	6
2.2 Termes et définitions	8
2.3 Types de filtres	16
3. Résonateurs à quartz pour les filtres	24
3.1 Circuit électrique équivalent d'un résonateur à quartz	26
3.2 Résonances indésirables	30
3.3 Utilisation pour le filtrage	30
4. Caractéristiques fondamentales des filtres	32
4.1 Impédance de source et impédance de charge	32
4.2 Facteur de forme	32
4.3 Ondulation dans la bande passante	32
4.4 Affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante	34
5. Disponibilité commerciale et caractéristiques limites	34
5.1 Effet de la largeur de bande sur la fabrication des filtres passe-bande à quartz	36
5.2 Effet des difficultés de fabrication des résonateurs à quartz	44
5.3 Effet dû à l'environnement	46
5.4 Autres effets	48
5.5 Considérations pratiques de construction	54
6. Obtention de la caractéristique optimale	54
6.1 Introduction	54
6.2 Adaptation	56
6.3 Obtention de la spécification de la bande atténuée	58
6.4 Niveau d'entrée	58
7. Méthodes de mesure	64
8. Données techniques destinées à accompagner une commande	64
8.1 Procédure pour la commande	64
8.2 Prescriptions obligatoires	66
8.3 Prescriptions facultatives	66
9. Facteurs affectant le coût des filtres à quartz	68
9.1 Fréquence centrale	68
9.2 Facteur de forme	70
9.3 Affaiblissement dans la bande atténuée	70
9.4 Linéarité de phase et distorsion du retard de groupe	70
9.5 Conditions d'environnement	70
9.6 Considérations générales sur les essais	70
BIBLIOGRAPHIE	74

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
 CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF PIEZOELECTRIC FILTERS SECTION ONE – QUARTZ CRYSTAL FILTERS Clause	
1. Scope	7
2. Crystal filters – general synopsis	7
2.1 Introduction	7
2.2 Terms and definitions	9
2.3 Filter types	17
3. Quartz vibrators for filters	25
3.1 The equivalent electrical circuit of a quartz crystal unit	27
3.2 Unwanted responses	31
3.3 Use in filter applications	31
4. Fundamental filter characteristics	33
4.1 Source and load impedance	33
4.2 Shape factor	33
4.3 Pass-band ripple	33
4.4 Minimum transducer attenuation in the pass band	35
5. Availability and limitations	35
5.1 Effect of bandwidth on availability of crystal band-pass filters	37
5.2 Effect of difficulties in the manufacture of crystal units	45
5.3 Effect of environmental characteristics	47
5.4 Other effects	49
5.5 Practical design considerations	55
6. Obtaining optimum performance	55
6.1 Introduction	55
6.2 Matching	57
6.3 Achieving stop-band specification	59
6.4 Input level	59
7. Measuring methods	65
8. Technical data to accompany order form	65
8.1 Ordering procedure	65
8.2 Mandatory requirements	67
8.3 Optional requirements	67
9. Factors affecting cost of crystal filters	69
9.1 Centre frequency	69
9.2 Shape factor	71
9.3 Stop-band attenuation	71
9.4 Phase linearity and group delay distortion	71
9.5 Environmental conditions	71
9.6 General testing considerations	71
BIBLIOGRAPHY	74

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES

Deuxième partie: Guide d'emploi des filtres piézoélectriques
Section un: Filtres à quartz

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 guide 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 remplace la Publication 368A de la CEI, parue en 1973.

La Publication 368 de la CEI: Filtres piézoélectriques, est composée des parties suivantes:

- 368-1: Première partie: Informations générales, valeurs normalisées et conditions d'essais (chapitres I et II);
- 368-2: Deuxième partie: Guide d'emploi des filtres piézoélectriques (chapitre III);
- 368-3: Troisième partie: Encombrements normalisés (chapitre IV).

La présente publication constitue la section un de la deuxième partie (Chapitre III) et est un guide pour l'emploi des filtres à quartz. Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
49(BC)177-I, II	49(BC)185

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

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans la présente norme:

- Publications n^{os} 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.
- 283 (1968): Méthodes pour la mesure de fréquence et de résistance équivalente des fréquences indésirables des quartz pour filtres.
- 302 (1969): Définitions normalisées et méthodes de mesures pour les résonateurs piézoélectriques de fréquences inférieures à 30 MHz.
- 368-1 (1982): Filtres piézoélectriques, Première partie: Informations générales, valeurs normalisées et conditions d'essais.
- 444: Mesure des paramètres des quartz piézoélectriques par la technique de phase nulle dans le circuit en π .

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PIEZOELECTRIC FILTERS**Part 2: Guide to the use of piezoelectric filters
Section One: Quartz crystal filters**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements for 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 guide has been prepared by IEC Technical Committee No. 49: Piezoelectric devices for frequency control and selection. It supersedes IEC Publication 368A, issued in 1973.

IEC Publication 368: Piezoelectric filters, comprises:

- 368-1: Part 1: General information, standard values and test conditions (Chapters I and II)
- 368-2: Part 2: Guide to the use of piezoelectric filters (Chapter III)
- 368-3: Part 3: Standard outlines (Chapter IV).

The present publication constitutes Section One of Part 2 (Chapter III) and is a guide to the use of quartz crystal filters. The text is based on the following documents:

Six Months' Rule	Report on Voting
49(CO)177-I, II	49(CO)185

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

The following IEC Publications are quoted in this standard:

- Publications Nos. 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.
- 283 (1968): Methods for the measurement of frequency and equivalent resistance of unwanted resonances of filter crystal units.
- 302 (1969): Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators operating over the frequency range up to 30 MHz.
- 368-1 (1982): Piezoelectric filters, Part 1: General information, standard values and test conditions.
- 444: Measurement of quartz crystal unit parameters by zero phase technique in a π -network.

FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES

Deuxième partie: Guide d'emploi des filtres piézoélectriques

CHAPITRE III: GUIDE D'EMPLOI DES FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES SECTION UN — FILTRES À QUARTZ

INTRODUCTION

Le besoin de communication conduit dans le monde entier à un développement permanent de liaisons électroniques de plus en plus complexes. Chaque message possède soit un spectre de fréquences ou une caractéristique dans le domaine temps; une certaine forme de filtrage est nécessaire pour leur séparation. De nouvelles méthodes de filtrage ont été mises au point pour répondre à une demande de diminution des coûts et de miniaturisation des équipements.

Les qualités d'un filtre dépendent principalement des caractéristiques des éléments résonants utilisés dans le filtre. Les résonateurs piézoélectriques sont supérieurs aux circuits résonants classiques LC en ce qui concerne certaines caractéristiques telles que le facteur de qualité (Q), les caractéristiques de température, le taux de vieillissement, les dimensions et le poids. De ce fait, une grande variété de filtres piézoélectriques se trouve actuellement dans le commerce. On rencontre deux types principaux de filtres piézoélectriques: le filtre à quartz et le filtre à céramique. De plus, d'autres matériaux sont utilisés (par exemple, tantalate de lithium, niobate de lithium).

1. Domaine d'application

Ce guide a été établi pour répondre à un désir généralement exprimé, tant par les utilisateurs que par les fabricants, de disposer d'un guide d'emploi des filtres à quartz, afin qu'ils puissent être utilisés au mieux. Ce guide n'a pas pour but de développer des notions théoriques ni de couvrir tous les cas qui peuvent se poser en pratique. Ce guide attire l'attention sur quelques-unes des questions fondamentales que l'utilisateur devrait examiner avant de commander un filtre pour une application nouvelle.

Il est du plus grand intérêt pour l'utilisateur que les caractéristiques du filtre soient conformes à une spécification particulière; cependant il y a lieu que le type de résonateur devant répondre à cette spécification soit laissé au choix du fabricant.

2. Filtres à quartz — considérations générales

2.1 Introduction

Les filtres à quartz sont utilisés depuis plus de quarante ans; aussi peuvent-ils être considérés, à l'ère électronique, comme appartenant au passé.

Un filtre à quartz est une forme spéciale de filtre passif dans lequel au moins un des composants est un résonateur à quartz. Les propriétés principales du résonateur à quartz sont: facteur de qualité Q élevé, stabilité en température et dans le temps élevée.

Outre ces stabilités, le filtre à quartz offre les importantes caractéristiques suivantes: encombrement très réduit, propriétés mécaniques et climatiques excellentes.

PIEZOELECTRIC FILTERS

Part 2: Guide to the use of piezoelectric filters

CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF PIEZOELECTRIC FILTERS SECTION ONE – QUARTZ CRYSTAL FILTERS

INTRODUCTION

The world continues to move in the direction of more extensive and more complex electronic communication links. Individual messages have either a frequency spectrum or a characteristic in the time domain and some form of filtering process is needed to separate them. New methods of filtering have been developed in response to demands for lower system costs and reduced equipment size.

The qualities of a filter are mainly governed by the characteristics of the resonant elements used in the filter. Piezoelectric resonators are superior to conventional LC resonant circuits as regards such characteristics as the quality factor (Q), temperature characteristics, ageing rate, size and weight. Hence, a wide variety of piezoelectric filters is now available. There are two main types of piezoelectric filters: the quartz crystal filter and the ceramic filter. In addition other materials are in use (e.g. lithium tantalate, lithium niobate).

1. Scope

This guide has been compiled in response to a generally expressed desire on the part of both users and manufacturers for guidance on the use of quartz crystal filters so that the crystal filters may be used to their best advantage. It is not the aim of this guide to explain theory, nor to attempt to cover all the eventualities which may arise in practical circumstances. The guide draws attention to some of the more fundamental questions which should be considered by the user before placing an order for a crystal filter for a new application.

It is of prime interest to a user that the filter characteristics should satisfy a particular specification, while the resonators to meet the specification should be at the discretion of the manufacturer.

2. Crystal filters – general synopsis

2.1 Introduction

Crystal filters have been used for more than forty years, so they may already be regarded as old with respect to the electronics era.

A crystal filter is a special form of passive filter in which at least one of the components is a crystal unit (a crystal resonator). The main properties of the crystal resonator are: high quality factor Q , high temperature and time stability.

In addition to the stability properties, important characteristics of crystal filters include very small dimensions and excellent mechanical and climatic properties.

2.2 Termes et définitions

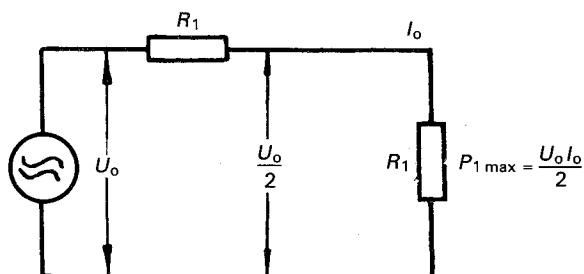
La terminologie exigée pour la définition et l'essai des filtres à quartz est donnée aux articles 3 à 5, Section deux, Chapitre I de la Publication 368-1 de la CEI. Seuls les termes essentiels et leur définition qui sont exigés pour comprendre le texte ci-après sont répétés et expliqués en détail dans ce guide. Voir aussi l'article 4.

2.2.1 Affaiblissement de transmission

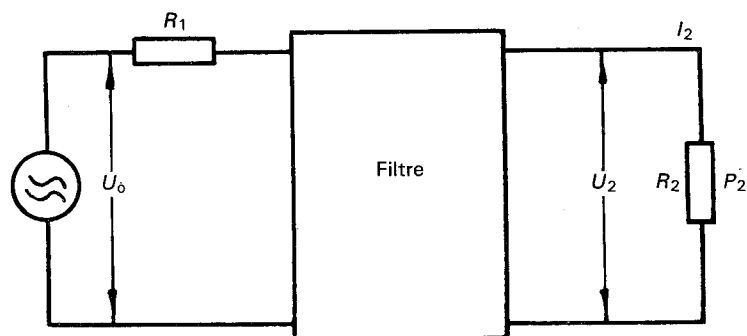
Rapport logarithmique de la puissance disponible d'une source donnée à la puissance que le filtre transmet à une impédance de charge, dans des conditions de fonctionnement spécifiées (voir figure 1 ci-dessous).

$$a_p = 10 \log \frac{P_{1 \max}}{P_2} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

$$a_p = 20 \log \left| \frac{U_o}{2U_2} \right| + 10 \log \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$



Note. — Cas de définition de $P_{1 \max}$.



315/88

FIG. 1. — Circuit d'essai pour la mesure de l'affaiblissement de transmission.

2.2 Terms and definitions

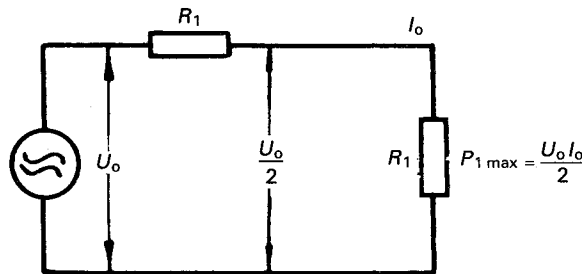
The terms and definitions required for defining and testing crystal filters are provided in IEC Publication 368-1, Chapter I, Section Two, Clauses 3 to 5. Only essential terms and definitions needed for understanding the text to follow will be repeated and explained in detail in this guide. See also Clause 4.

2.2.1 Transducer attenuation

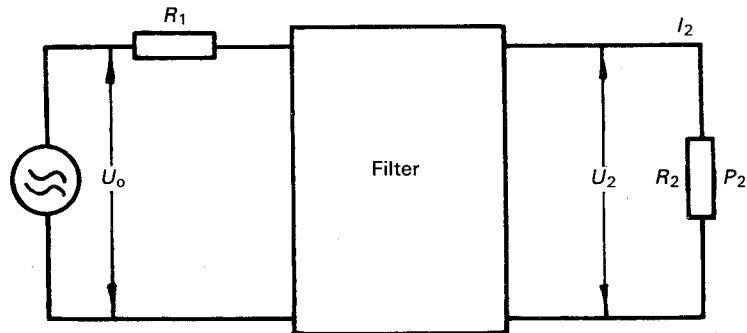
The logarithmic ratio of the available power of the given source to the power that the filter delivers to a load impedance under specified operating conditions (see Figure 1).

$$a_p = 10 \log \frac{P_{1 \max}}{P_2} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

$$a_p = 20 \log \left| \frac{U_o}{2 U_2} \right| + 10 \log \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$



Note. — Case of definition of $P_{1 \max}$.



315/88

FIG. 1. — Test circuit for the measurement of transducer attenuation.

2.2.2 *Affaiblissement d'insertion*

Rapport logarithmique de la puissance transmise à l'impédance de charge avant l'insertion du filtre, à la puissance transmise à l'impédance de charge après l'insertion du filtre (voir figure 1A ci-dessous).

$$a_i = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB}) \quad (1.1)$$

$$a_i = 20 \log \left| \frac{U_o}{2U_2} \right| + 20 \log \frac{2R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{dB}) \quad (2.1)$$

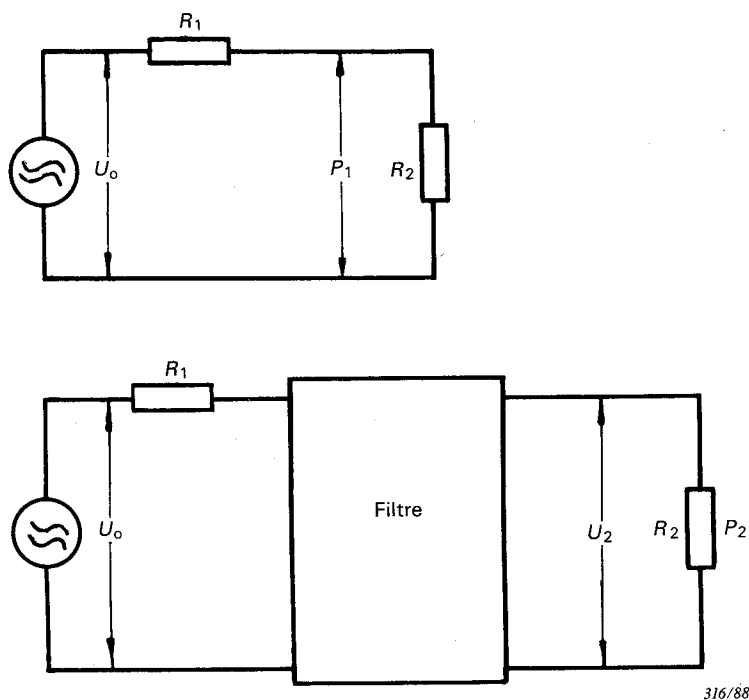


FIG. 1A. — Circuit d'essai pour la mesure de l'affaiblissement d'insertion.

2.2.2 Insertion attenuation

The logarithmic ratio of the power delivered to the load impedance before insertion of the filter to the power delivered to the load impedance after insertion of the filter (see Figure 1A).

$$a_i = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB}) \quad (1.1)$$

$$a_i = 20 \log \left| \frac{U_o}{2U_2} \right| + 20 \log \frac{2R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{dB}) \quad (2.1)$$

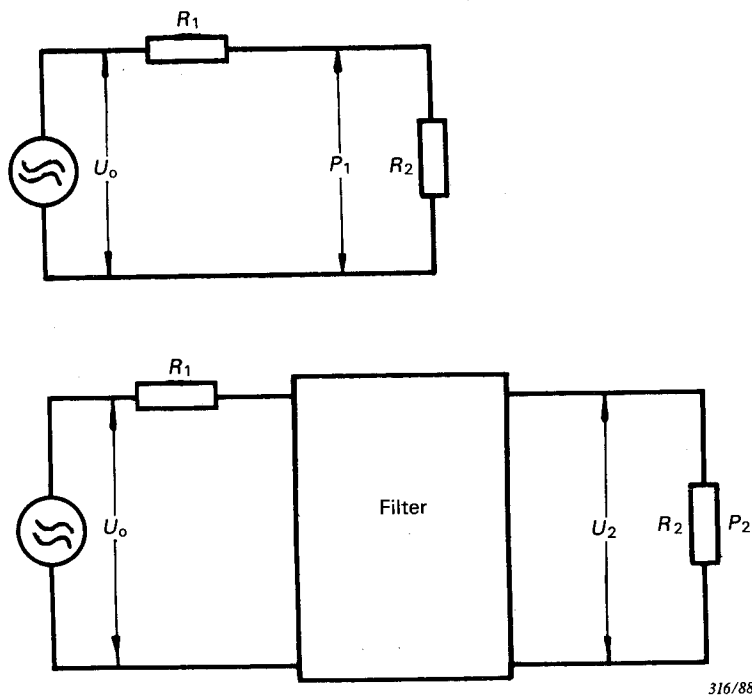


FIG. 1A. — Test circuit for the measurement of insertion attenuation.

La figure 2 ci-dessous montre la forme générale de l'affaiblissement de transmission d'un filtre passe-bande et indique les paramètres les plus importants définissant les caractéristiques d'un filtre.

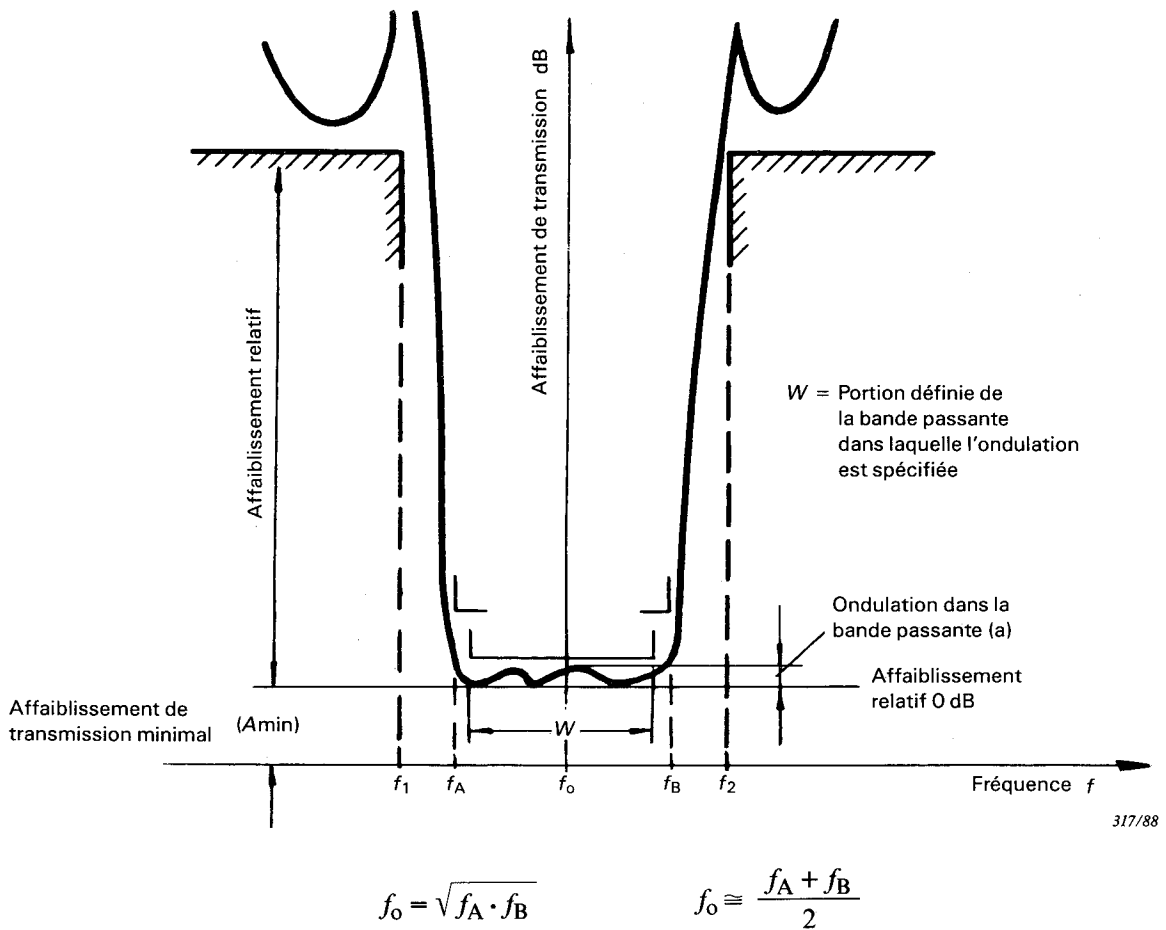


FIG. 2. — Caractéristiques de l'affaiblissement de transmission d'un filtre.

2.2.3 *Affaiblissement d'écho*

Valeur réciproque du module du coefficient de réflexion, donné en décibels. Elle est quantitativement égale à:

$$20 \log \left| \frac{Z_a + Z_b}{Z_a - Z_b} \right| \text{ dB}$$

2.2.4 *Fréquence de référence*

Fréquence définie par la spécification et qui peut être prise comme référence pour d'autres fréquences.

Dans le cas d'un filtre passe-bande avec une caractéristique amplitude-fréquence symétrique, la fréquence de référence est habituellement spécifiée comme la fréquence centrale nominale.

Dans le cas d'un filtre passe-bande avec une caractéristique amplitude-fréquence dissymétrique, la fréquence de référence peut être spécifiée au voisinage d'un bord de la bande passante nominale, telle que la fréquence porteuse intéressée associée à un filtre de bande latérale unique.

Figure 2 shows the general form of the transducer attenuation of a band-pass filter and indicates the most important parameters defining the filter characteristics.

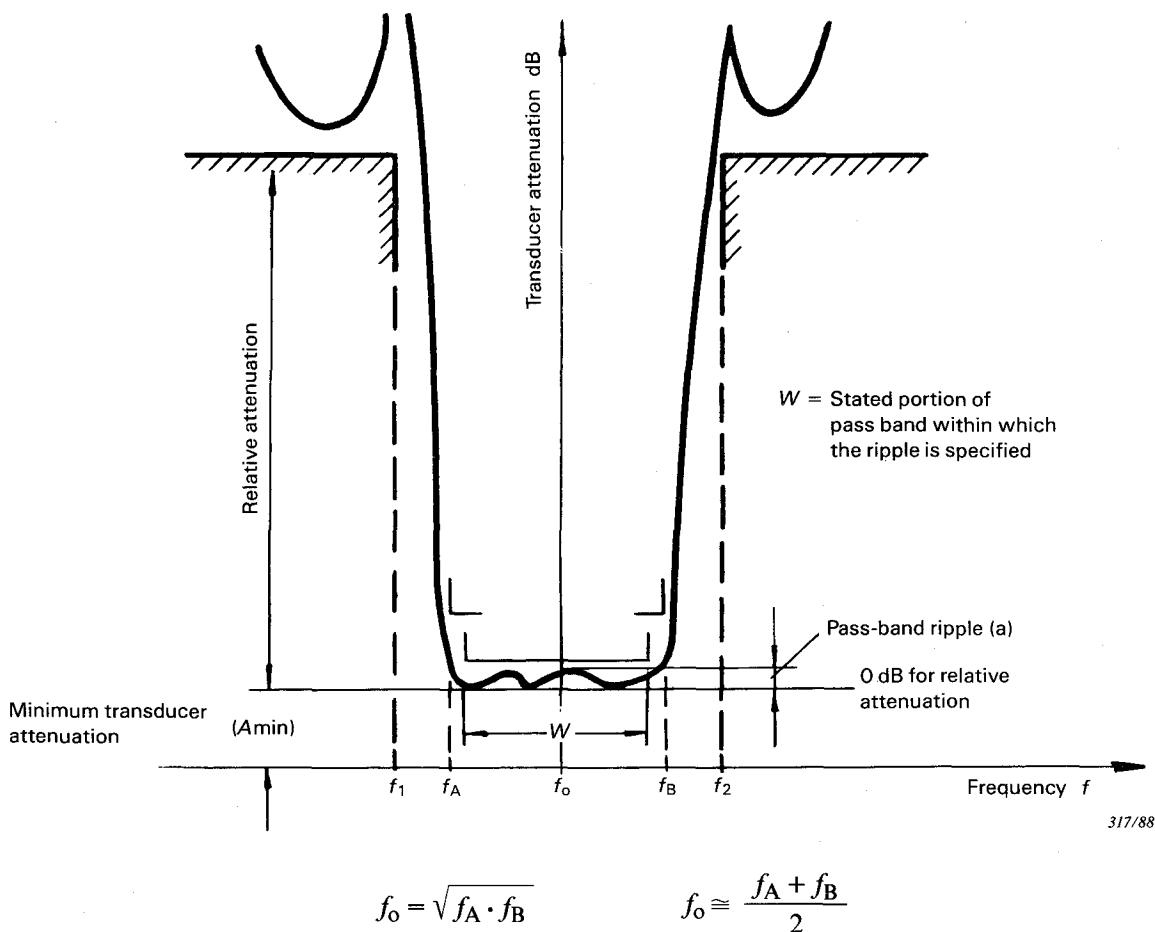


FIG. 2. — Transducer attenuation characteristics of a filter.

2.2.3 Return attenuation

The value of the reciprocal of the modulus of the reflexion coefficient, expressed in decibels. Quantitatively it is equal to:

$$20 \log \left| \frac{Z_a + Z_b}{Z_a - Z_b} \right| \text{ dB}$$

2.2.4 Reference frequency

A frequency defined by the specification to which other frequencies may be referred.

In the case of a band-pass filter with a symmetrical frequency-amplitude characteristic, the reference frequency is usually specified as the nominal mid-band frequency.

In the case of a band-pass filter with an asymmetrical frequency-amplitude characteristic, the reference frequency may be specified near one edge of the nominal pass band, such as the intended carrier frequency associated with a single sideband filter.

2.2.5 *Fréquences de coupure de la bande passante*

Fréquences de la bande passante pour lesquelles l'affaiblissement relatif atteint une valeur spécifiée (f_A et f_B à la figure 2, page 12).

2.2.6 *Bande passante*

Bande des fréquences pour lesquelles l'affaiblissement relatif est égal ou inférieur à la valeur spécifiée.

2.2.7 *Bande atténuée*

Bande des fréquences pour lesquelles l'affaiblissement relatif est supérieur ou égal à des valeurs spécifiées. Les fréquences f_1 et f_2 montrées à la figure 2 sont les valeurs spécifiées des fréquences limites de la bande atténuée.

2.2.8 *Bande de transition*

Bande des fréquences entre la fréquence de coupure et le point le plus proche de la bande atténuée adjacente.

2.2.9 *Ondulation dans la bande passante*

Différence entre l'affaiblissement maximal et minimal dans la bande passante ou dans une portion définie de la bande passante.

2.2.10 *Facteur de forme du filtre passe-bande*

Rapport des deux largeurs de bande pour deux valeurs spécifiées de l'affaiblissement (voir figure 3a). Il est possible de définir deux facteurs de forme d'un filtre ayant des caractéristiques d'amplitude-fréquence dissymétriques (voir figure 3b).

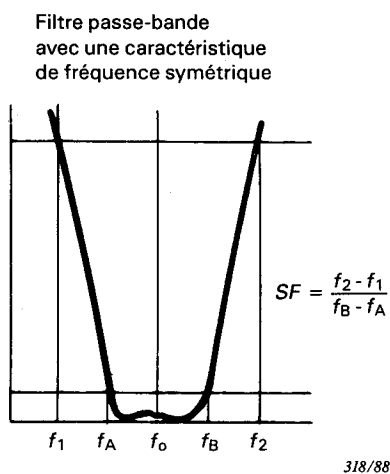


FIG. 3a. — Facteur de forme d'un filtre passe-bande avec une caractéristique de fréquence symétrique.

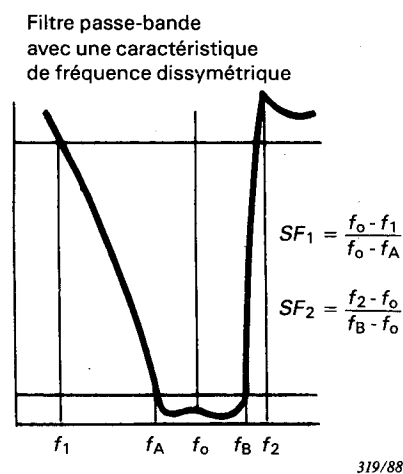


FIG. 3b. — Facteurs de forme d'un filtre passe-bande avec une caractéristique de fréquence dissymétrique.

2.2.11 *Déphasage d'insertion*

Changement de la phase provoqué par l'insertion du filtre dans le système de transmission.

$$\varphi = \varphi_{\text{sortie}} - \varphi_{\text{entrée}} \text{ [degrés] ou [radians]}$$

2.2.12 *Déphasage de transmission*

Angle de phase relatif entre la sortie du filtre et la source.

2.2.5 Cut-off frequencies of pass band

Frequencies of the pass band at which the relative attenuation reaches a specified value (f_A and f_B in Figure 2, page 13).

2.2.6 Pass band

A band of frequencies in which the relative attenuation is equal to or less than a specified value.

2.2.7 Stop band

A band of frequencies in which the relative attenuation is equal to or greater than specified values. The frequencies f_1 and f_2 shown in Figure 2 are the specified stop-band edge frequencies.

2.2.8 Transition band

A band of frequencies between cut-off frequency and the nearest point of the adjacent stop band.

2.2.9 Pass-band ripple

The difference between the maximum and minimum attenuation in the pass band or in a specified portion of the pass band.

2.2.10 Shape factor of a band-pass filter

The ratio of the two bandwidths at two specified values of attenuation (Figure 3a). It is possible to define two shape factors of a filter with asymmetrical amplitude-frequency characteristics (Figure 3b).

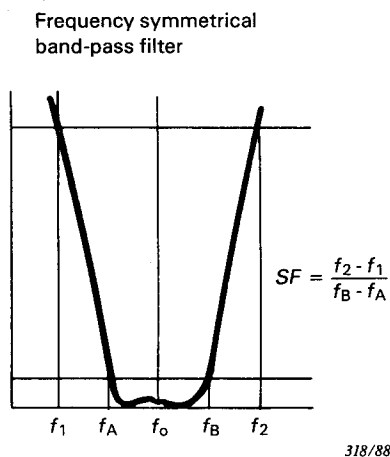


FIG. 3a. — Shape factor for frequency symmetrical band-pass filter.

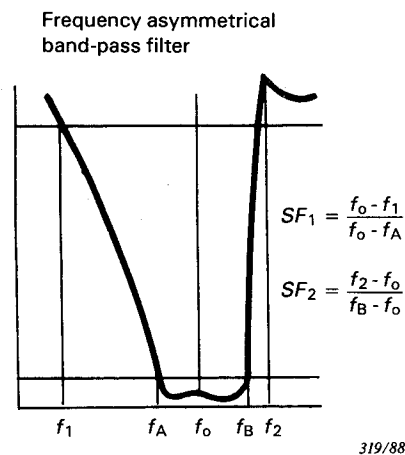


FIG. 3b. — Shape factors for frequency asymmetrical band-pass filter.

2.2.11 Insertion phase shift

Change in phase caused by the insertion of the filter into a transmission system.

$$\varphi = \varphi_{\text{out}} - \varphi_{\text{in}} \text{ [degrees] or [radians]}$$

2.2.12 Transducer phase

Relative angle of the phase between the output of the filter and the source.

2.2.13 *Linéarité de phase*

Déviations maximale de la caractéristique de déphasage de transmission dans la bande passante de la caractéristique de déphasage de transmission, exprimée en termes de dépendance linéaire.

2.2.14 *Retard de groupe ou de boucle*

Temps de propagation du groupe, qui est égal à la dérivée première du déphasage, en radians, par rapport à la fréquence angulaire de l'onde sinusoïdale considérée à la fréquence spécifiée

$$t_g \approx \frac{d\varphi}{d\omega} \quad [s] \quad \omega = 2\pi f$$

2.2.15 *Distorsion de retard de groupe*

Différence entre la valeur la plus basse et la valeur la plus élevée du retard de groupe dans une bande passante spécifiée

$$\Delta t_g = |t_{g \max} - t_{g \min}| \quad [s]$$

2.3 *Types de filtres*

Les filtres à quartz peuvent être classés selon:

- le comportement de la caractéristique d'amplitude;
- l'application;
- le mode de réalisation.

2.3.1 *Classification selon le comportement de la caractéristique de l'amplitude en fonction de la fréquence*

Les filtres à quartz sont classés en quatre groupes: filtres passe-bas, filtres passe-haut, filtres passe-bande, filtres coupe-bande.

2.3.2 *Classification selon l'application*

Les filtres à quartz sont largement utilisés dans de nombreuses applications; aussi est-il assez difficile de donner une liste générale de ces applications. La figure 4, page 18, donne la classification des filtres à quartz en trois groupes principaux, et leurs sous-groupes, selon l'application.

En communication portative mobile ainsi que dans les récepteurs-transmetteurs portatifs, les filtres classiques, différentiels et monolithiques sont largement utilisés comme filtres passe-bande à une voie et à bande latérale unique dans les systèmes de transmission multiplex à répartition en fréquence. En outre, les filtres à quartz sont largement utilisés comme filtres pilotes dans les systèmes de téléphonie.

En communication mobile, les filtres à quartz classiques et monolithiques sont utilisés comme filtres de fréquence intermédiaire non seulement dans les récepteurs à conversion de fréquence unique mais aussi dans les récepteurs à double conversion de fréquence. L'application des filtres à quartz la plus extensive se rencontre dans les étages de fréquence intermédiaire avec espacement entre voies de 12,5 — 20 — 25 — 50 et 100 kHz (100 kHz n'est pratiquement plus utilisé maintenant).

Les bandes passantes sont spécifiées suffisamment larges pour recevoir les signaux acoustiques à la fréquence porteuse sous conditions de température changeante et d'erreurs sur les fréquences des oscillateurs non seulement du transmetteur mais aussi du récepteur. Les erreurs admissibles de ces fréquences sont habituellement prescrites par les autorités compétentes.

2.2.13 *Phase linearity*

Maximum deviation of the transducer phase characteristic in the pass band from the transducer phase characteristic expressed in terms of linear dependence.

2.2.14 *Group or envelope delay*

The time of propagation of the group which is equal to the first derivative of the phase shift, in radians, with respect to the angular frequency of the sinusoidal wave concerned at a specified frequency

$$t_g \approx \frac{d\varphi}{d\omega} \quad [s] \quad \omega = 2\pi f$$

2.2.15 *Group delay distortion*

The difference between lowest and highest value of group delay in a specified frequency band

$$\Delta t_g = |t_{g \max} - t_{g \min}| \quad [s]$$

2.3 *Filter types*

Crystal filters may be classified according to:

- amplitude characteristic behaviour;
- application;
- realization mode.

2.3.1 *Classification according to the behaviour of the amplitude characteristic as a function of frequency*

Crystal filters are classified into four groups: low-pass filters, high-pass filters, band-pass filters and band-stop filters.

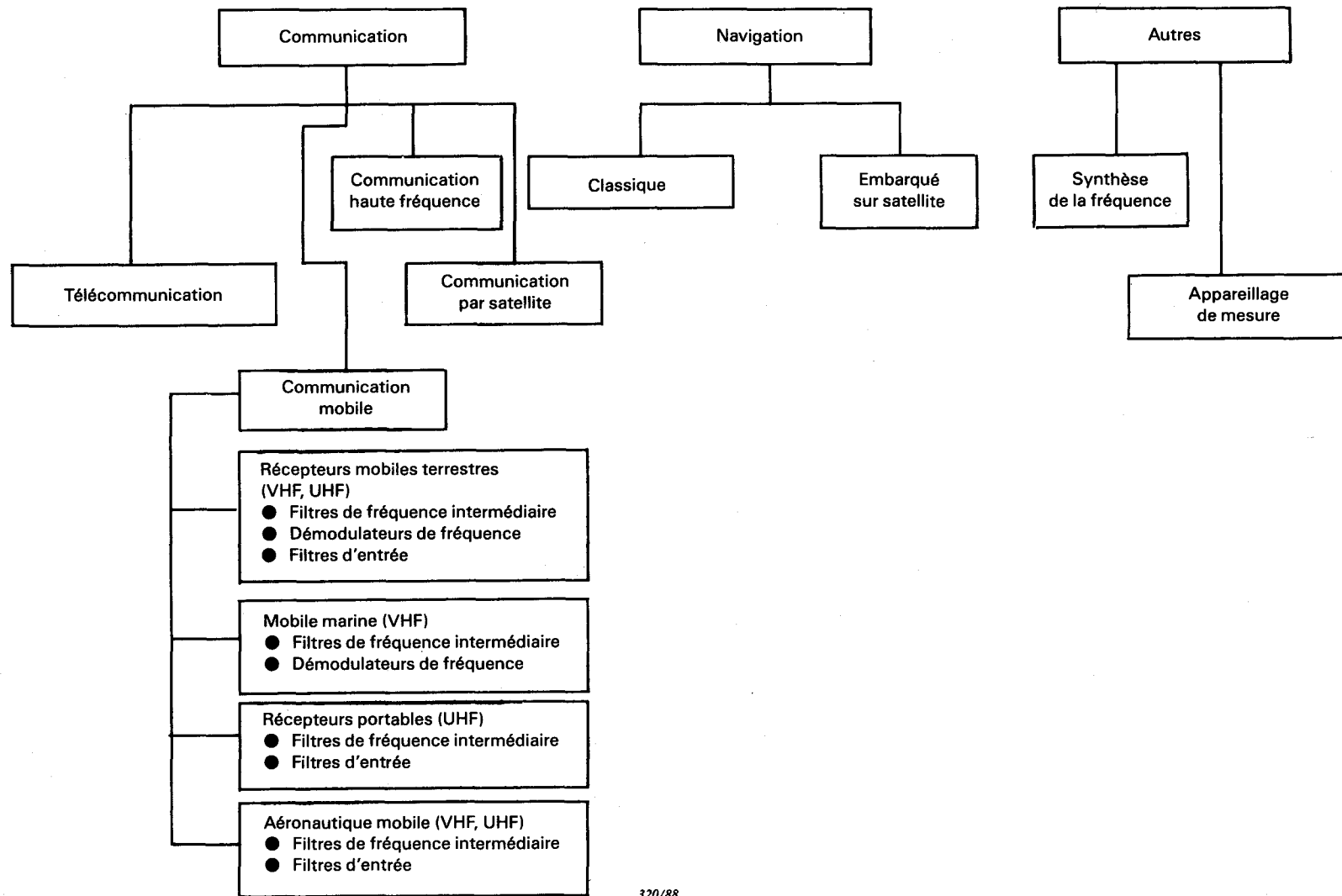
2.3.2 *Classification according to application*

Crystal filters are used in a wide variety of applications and it is therefore rather difficult to generalise. Figure 4, page 19, gives a classification of crystal filters into three major groups and their subgroups according to application.

In portable and mobile communication as well as in paging receivers, conventional, hybrid, and monolithic crystal filters are extensively employed as single-channel single-sideband band-pass filters in frequency-diversity multiplex transmission systems. In addition, crystal filters are widely used as pilot filters in telephony systems.

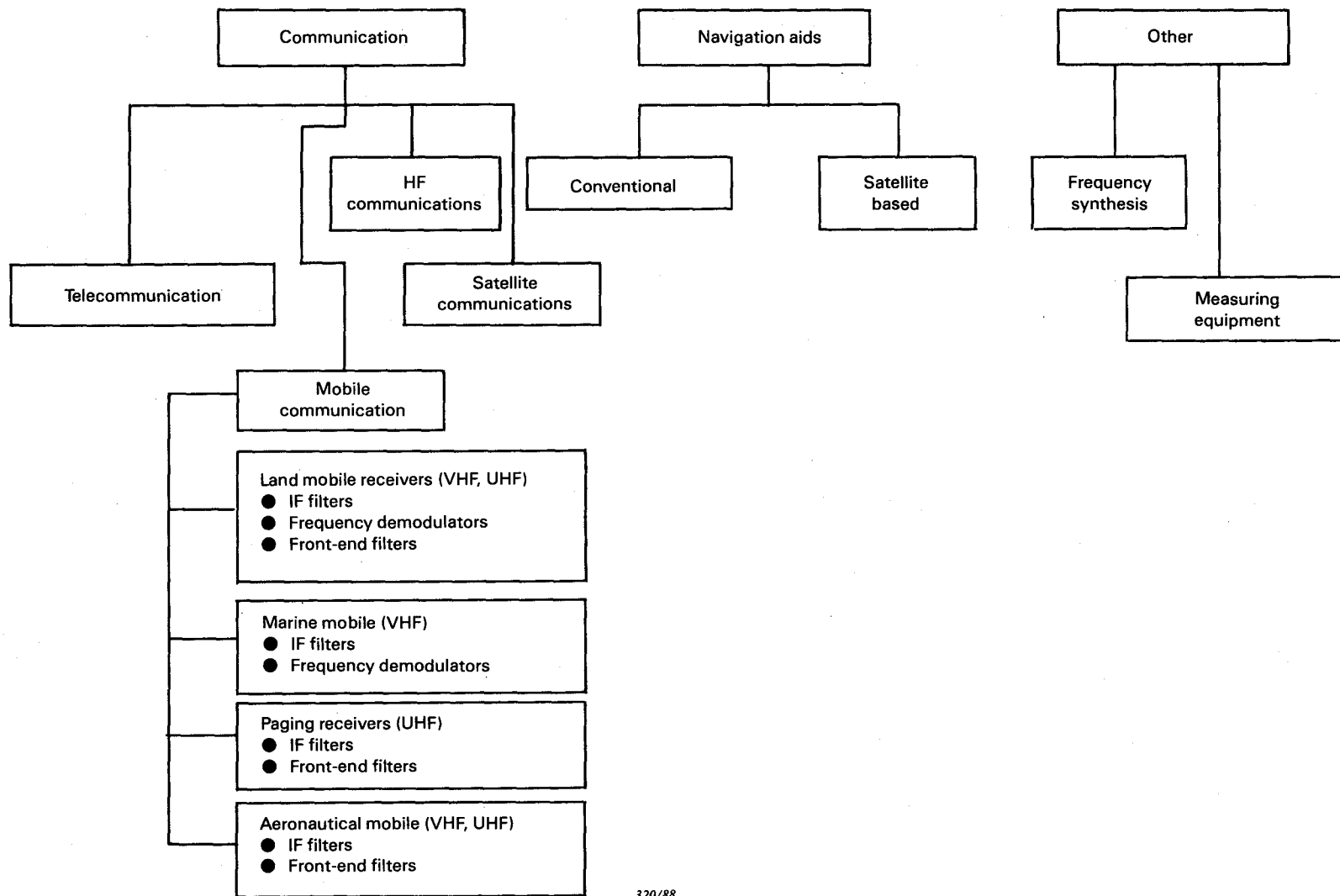
In mobile communications, conventional and monolithic crystal filters are used in IF filters in both single and double conversion receivers. The most extensive application of crystal filters is seen in IF stages with 12.5 — 20 — 25 — 50 and 100 kHz channel spacings (100 kHz is practically no longer in use).

Pass bandwidths are specified wide enough to receive the audio signals on the carrier under conditions of varying temperature and errors in both transmitter and receiver oscillator frequencies. The permissible errors of these frequencies are normally laid down by the responsible authorities.



320/88

FIG. 4. — Classification selon l'application.



320/88

FIG. 4. — Classification according to application.

Les équipements de communication portatifs et mobiles utilisent habituellement la modulation de fréquence; l'affaiblissement dans la bande atténuée ainsi que celui dans la bande de transition sont déterminés par la position de la voie adjacente et sa stabilité de fréquence dans un spectre de fréquences produit par une modulation de signal superposée.

L'application dans les appareils à bande latérale unique et dans ceux à onde modulée manipulée est également d'une grande importance. Dans ces cas les filtres peuvent avoir une caractéristique de l'affaiblissement soit symétrique soit dissymétrique selon que l'équipement utilise une fréquence porteuse unique ou deux fréquences porteuses en alternance, de part et d'autre de la bande passante.

Les filtres monolithiques à deux pôles sont utilisés dans les circuits de démodulation de fréquence des récepteurs mobiles terrestres à bande étroite fonctionnant en modulation de la fréquence.

Dans les systèmes de téléphonie à fréquence porteuse, les filtres monolithiques sont aussi utilisés comme filtres coupe-bande pour l'élimination des fréquences pilotes; comme options en service mobile terrestre et aéronautique, les filtres monolithiques VHF et les filtres monolithiques en tandem sont utilisés comme présélecteurs d'entrée.

Une application très importante des filtres à quartz dans les aides à la navigation se rencontre dans les équipements radar. La caractéristique la plus spécifiée des filtres à quartz utilisés dans les radars est la linéarité de phase. Celle-ci doit être d'environ 1% à 2%. La demande pour une telle caractéristique a eu comme résultat la création d'un système de mesure spécial qui permet de vérifier le temps de propagation.

Les filtres à caractéristique de phase contrôlée sont spécialement essayés pour les applications de poursuite de phase et dans ce cas la différence entre les filtres ne doit pas être supérieure à 5°.

Enfin, les filtres à quartz sont largement utilisés en groupes réunissant jusqu'à 100 filtres passe-bande identiques connectés en parallèle. Un tel système est nommé «filtre en peigne».

Ce terme s'applique aux filtres élémentaires d'ordre deux — ou quatre — qui séparent le spectre de fréquences radar en N bandes, ce qui donne la possibilité de faire l'analyse détaillée d'un spectre de fréquences.

2.3.3 Classification selon la construction

La conception d'un filtre combine:

- la forme du réseau électrique selon lequel le filtre est réalisé;
- le type de la fonction caractéristique sur la base de laquelle le filtre est réalisé;
- la technologie de construction.

Le premier et le troisième point seront considérés plus en détail.

2.3.3.1 Forme du réseau électrique d'un filtre à quartz

En général les filtres à quartz sont réalisés comme:

- a) réseau en treillis (voir figure 5, page 22).
- b) réseau en échelle (voir figure 6, page 22).

Le réseau en treillis est une forme largement utilisée de réseau électrique pour les filtres à quartz. En réalisation pratique, le réseau de la figure 5 est arrangé comme une section de filtre en demi-treillis ou sous la forme appelée Jaumann (voir figure 7, page 22).

Le réseau en échelle est utilisé exclusivement pour les filtres à quartz à largeur de bande très étroite, pour les filtres à quartz à caractéristique de fréquence dissymétrique (filtres BLU) et pour les filtres monolithiques montrés à la figure 9a, page 24.

Portable and mobile communication equipment normally uses frequency modulation and the stop-band and transition-band attenuations are determined by the position of the next channel and its frequency stability together with the frequency spectrum produced by the superimposed signal modulation.

Single sideband and keyed equipment is also of great importance. In these cases the filters may have either symmetrical or asymmetrical attenuation characteristics depending on whether the equipment uses a single-carrier frequency or two alternative carrier frequencies, one on each side of the pass band.

Two-pole monolithic filters are used in frequency demodulation circuits in narrow-band f.m. land mobile receivers.

In carrier telephone systems, monolithic filters are also used as band-stop filters for pilot rejection; as field-installed options in land and aeronautical mobile services, VHF monolithic and tandem monolithic filters are used as front-end preselectors.

A very important application of crystal filters to navigation aids is seen in radar equipment. The most specified characteristic of crystal filters used in radar applications is phase linearity. This phase linearity should be about 1% to 2%. The demands for such a characteristic have resulted in the creation of a special measurement system which allows the verification of propagation time.

Filters with controlled phase characteristic are specially tested for phase tracking and in such cases the difference between filters must not exceed 5°.

Finally, crystal filters are widely used as groups consisting of up to 100 identical band-pass filters in parallel. These are called "comb filters".

The term refers to elementary second — or fourth — order filters which separate the radar frequency spectrum into a number of bands, N , thus enabling detailed frequency spectrum analysis to be performed.

2.3.3 *Classification according to design*

The design of a filter covers:

- the form of the electrical network according to which a filter is designed;
- the type of the characteristic function on the basis of which a filter is designed;
- the mode of technological construction.

The first and the third of these will be considered in more detail.

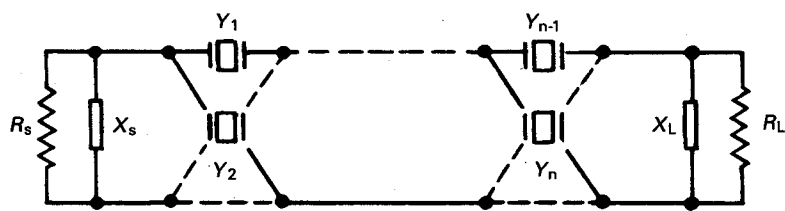
2.3.3.1 *Form of electrical network of crystal filter*

In general, crystal filters are realized as:

- a) lattice network (Figure 5, page 23).
- b) ladder network (Figure 6, page 23).

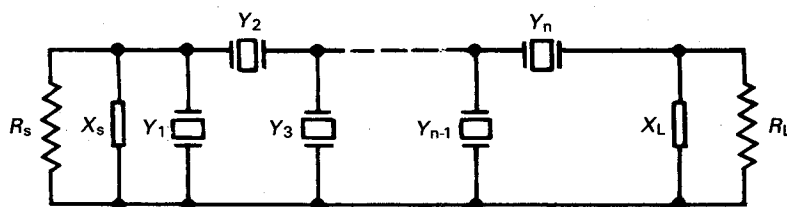
The lattice network is a widely used form of electrical network for crystal filters. In practical realization, the network of Figure 5 is arranged as a half-lattice filter section or the so-called Jaumann form (Figure 7, page 23).

The ladder network is used exclusively for very narrow pass bandwidth crystal filters and for crystal filters with frequency-asymmetrical characteristic (SSB filters) and monolithic filters as shown in Figure 9a, page 25.



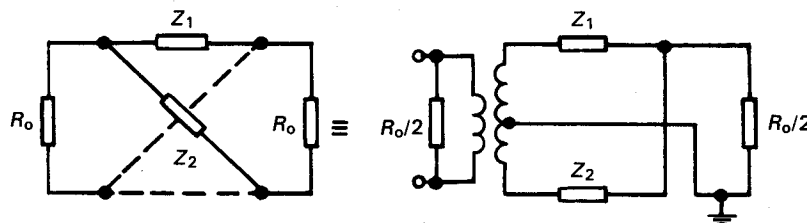
321/88

FIG. 5. — Filtre à quartz en treillis.



322/88

FIG. 6. — Filtre à quartz en échelle.



323/88

FIG. 7. — Filtre à quartz en demi-treillis (filtre Jaumann).

2.3.3.2 Mode technologique de construction

En pratique, les filtres à quartz sont réalisés comme:

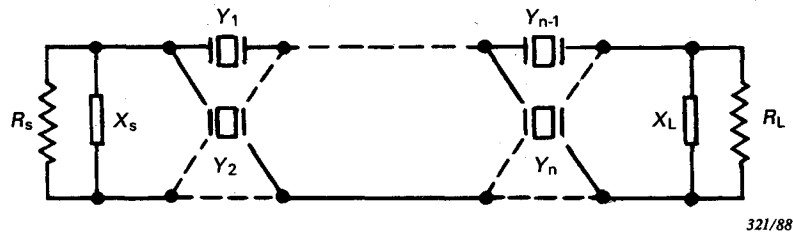
- filtres à quartz classiques;
- filtres à quartz monolithiques.

Les filtres à quartz classiques sont composés de résonateurs à quartz, de transformateurs et de condensateurs. Les filtres utilisés en pratique sont fabriqués par montage en série de sections comme il est montré à la figure 8, page 24, en utilisant un quartz classique à résonateur unique. Les sections ne sont pas habituellement égales et sont interconnectées par condensateurs parallèles comme il est montré à la figure 9b, page 24; ces capacités peuvent servir à compenser la capacité parallèle C_0 des résonateurs à quartz. Toutefois, ces capacités parallèles varient inversement, en fonction de la largeur de bande relative du filtre, ce qui fixe une largeur maximale possible de bande pour un type donné de résonateur à quartz.

Dans la plupart des cas les filtres monolithiques sont réalisés par un montage tandem de sections comme il est montré à la figure 9a; ces sections sont interconnectées de la manière montrée à la figure 9b. Ces filtres sont aussi appelés «filtres polyolithiques».

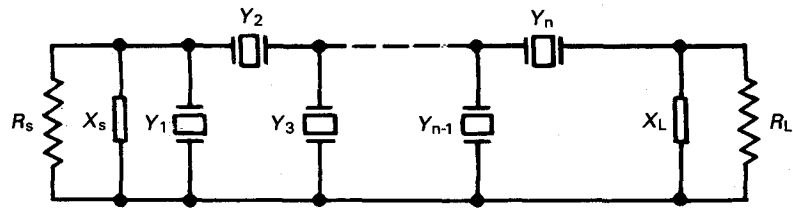
Les avantages les plus importants des filtres monolithiques sur les filtres à quartz classiques sont les suivants:

- un transformateur différentiel n'est pas exigé comme dans le cas des constructions classiques;



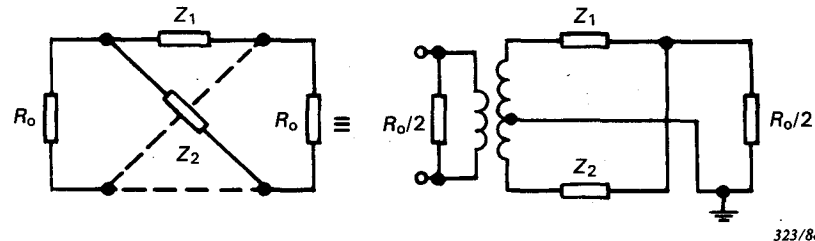
321/88

FIG. 5. — Lattice crystal filter.



322/88

FIG. 6. — Ladder crystal filter.



323/88

FIG. 7. — Half-lattice (Jaumann) crystal filter.

2.3.3.2 Mode of technological construction

Practical crystal filters are made as:

- conventional crystal filters;
- monolithic crystal filters.

Conventional crystal filters are made up of crystal units, transformers and capacitors. Practical filters are made by the tandem connection of sections, as shown in Figure 8, page 25, using conventional single resonator crystals. The sections usually are not equal and are interconnected by shunt capacitors, as shown in Figure 9b, page 25, and these can be used to compensate the parallel capacitance C_o of the crystals. However, these shunt capacitances vary inversely as the fractional bandwidth of the filter and this fixes a maximum possible bandwidth for a given crystal unit type.

In most cases monolithic filters are made from tandem connection of sections, as shown in Figure 9a and these sections are interconnected in the same manner as shown in Figure 9b. These filters are also called polyolithic filters.

The most important advantages of monolithic filters over the conventional crystal filters are:

- no differential transformer is required as in the case with conventional designs;

- la fiabilité est plus élevée, en raison du nombre plus réduit de composants (suite à l'élimination du transformateur différentiel et au nombre réduit de résonateurs);
- les dimensions sont considérablement plus petites, avec des caractéristiques optimales;
- le rapport coût-efficacité est amélioré.

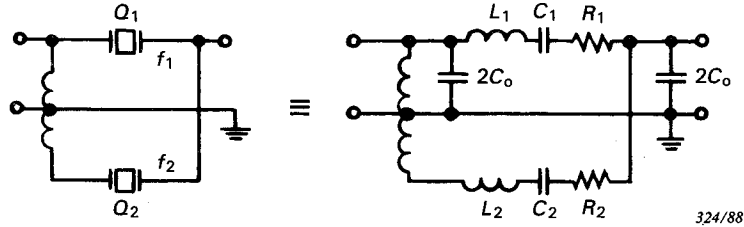


FIG. 8. — Section d'un filtre en demi-treillis.

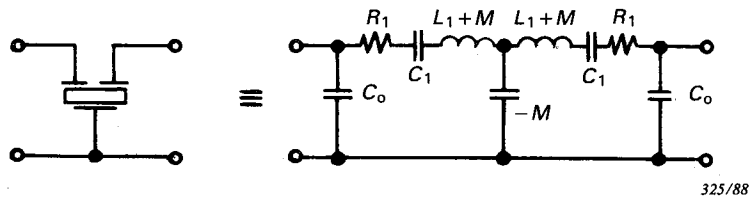


FIG. 9a. — Section d'un filtre à résonateurs couplés.

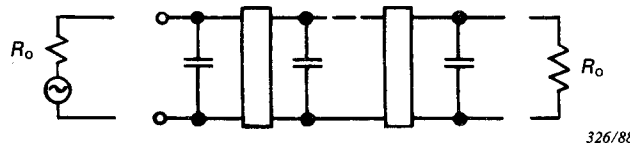


FIG. 9b. — Connexion en tandem des sections d'un filtre.

3. Résonateurs à quartz pour les filtres

Une brève description des résonateurs à quartz est donnée ici pour que l'utilisateur de filtres puisse comprendre la faisabilité et les limitations rencontrées dans la conception des filtres à quartz du fait des caractéristiques des résonateurs.

Dans les filtres à quartz classiques, les inductances et les condensateurs sont utilisés comme éléments réactifs. Les pertes inévitables associées aux composants réels donnent un effet double sur les caractéristiques d'un filtre. Premièrement, elles augmentent l'affaiblissement de transmission qui devient alors fini au lieu d'être nul dans la bande passante. Deuxièmement, les fréquences de coupure de la bande passante peuvent être détériorées. Le second effet dépend principalement du facteur de qualité Q des composants.

Puisqu'un résonateur à quartz est équivalent à une combinaison d'éléments réactifs ayant un facteur de qualité Q très élevé, qui est au moins de deux ordres de magnitude supérieur au facteur de qualité Q des inductances classiques, les problèmes associés à l'affaiblissement dans la bande passante et à la détérioration des fréquences de coupure sont encore présents mais à un degré considérablement moindre.

- higher reliability due to a smaller number of components (a result of the elimination of the differential transformer and a reduced number of resonators);
- considerably smaller size with optimal electrical characteristics;
- improved cost/effectiveness.

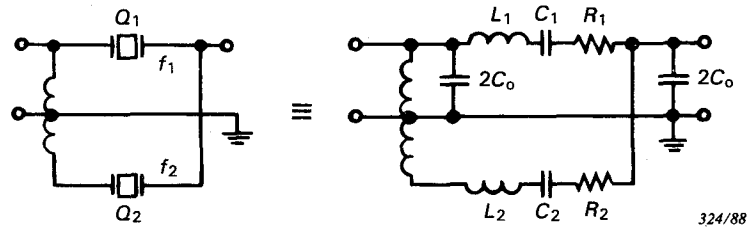


FIG. 8. — Half-lattice filter section.

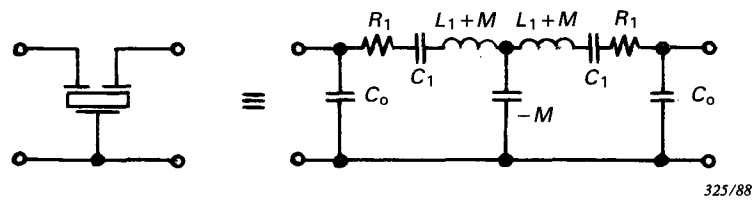


FIG. 9a. — Coupled resonator filter section.

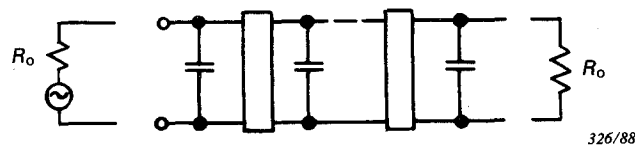


FIG. 9b. — Tandem connection of filter sections.

3. Quartz vibrators for filters

A brief description of crystal vibrators is included here, so that the filter user may understand the feasibility and limitations in the design of a crystal filter due to the characteristics of vibrators.

In conventional crystal filters, inductors and capacitors are used as reactive elements. The inevitable losses associated with actual components yield twofold effects on filter characteristics. Firstly, they add to the transducer attenuation which then becomes finite instead of zero in the pass band. Secondly, the cut-off frequencies of the pass band may be deteriorated. The second effect mostly depends on the quality factor, Q , of components.

Since a crystal vibrator is equivalent to a combination of reactive elements with very high Q , which is at least two orders of magnitude better than the Q of conventional inductors, the problems related to the attenuation in the pass band and degradation of cut-off frequencies are still present, but to a considerably smaller degree.

3.1 Circuit électrique équivalent d'un résonateur à quartz

3.1.1 Circuits équivalents

Les propriétés de tout résonateur piézoélectrique faiblement amorti, vibrant mécaniquement sur n'importe quel mode et excité par l'intermédiaire d'électrodes, peuvent être représentées, au voisinage de la fréquence de résonance, par un circuit électrique équivalent qui comprend une capacité (C_1), une inductance (L_1) et une résistance (R_1) en série shuntées par une deuxième capacité (C_0).

Le circuit équivalent du résonateur à quartz est représenté à la figure 10 ci-dessous.

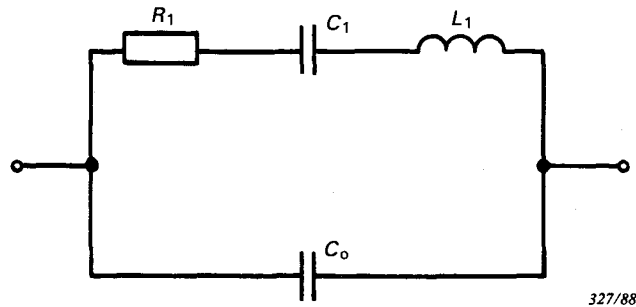


FIG. 10. — Circuit équivalent simplifié d'un résonateur à quartz.

L'inductance représente la masse vibrante, la capacité série, l'élasticité de l'élément de quartz et la résistance, ses frottements internes, les pertes mécaniques dans le système de montage et les pertes acoustiques dans l'espace environnant. La capacité parallèle est composée de la capacité statique entre les électrodes et des capacités parasites du système de montage.

- L_1 = inductance dynamique (henry)
- C_1 = capacité dynamique (farad)
- C_h = capacité de boîtier (farad)
- C_e = capacité d'électrode (farad)
- $C_0 = C_e + C_h$, capacité effective parallèle (farad)
- R_1 = résistance dynamique (ohm)

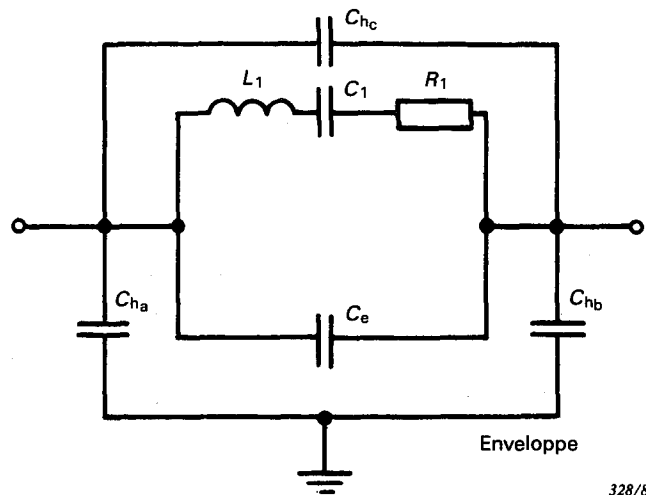


FIG. 11. — Circuit équivalent d'un résonateur à quartz.

Notes 1. — Cette représentation d'un résonateur à quartz n'est exacte que si les paramètres sont constants et indépendants de la fréquence et de l'amplitude. Les paramètres sont indépendants de la fréquence si le résonateur ne possède pas d'autre mode de vibration au voisinage de la résonance particulière. Généralement, le mode principal est suffisamment isolé des autres modes pour permettre cette hypothèse. Si tel n'est pas le cas, les équations et les méthodes de mesure que l'on utilise normalement ne s'appliquent pas. On peut déterminer la validité de la représentation du circuit en mesurant et en représentant graphiquement l'impédance ou l'admittance du résonateur en fonction de la fréquence.

2. — Le circuit équivalent simplifié habituellement utilisé est montré à la figure 10, ci-dessus.

3. — Il convient de remarquer sur la figure 11 que la capacité parallèle totale est déterminée par divers paramètres dépendant des sorties du résonateur et de la mise à la masse de l'enveloppe. On ne doit pas oublier que, dans un circuit à haute impédance, l'enveloppe doit normalement être mise à la masse.

3.1 The equivalent electrical circuit of a quartz crystal unit

3.1.1 Equivalent circuits

The properties of any mode of a lightly damped mechanical vibrator piezoelectrically excited through electrodes can be represented near a resonance frequency by an equivalent electrical circuit which consists of a capacitance (C_1), inductance (L_1) and resistance (R_1) in series, shunted by a second capacitance (C_0).

A representation of the crystal unit equivalent circuit is shown in Figure 10.

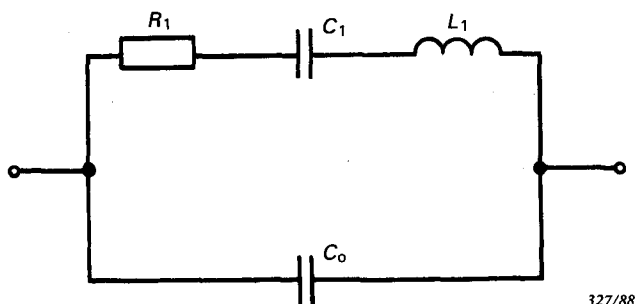
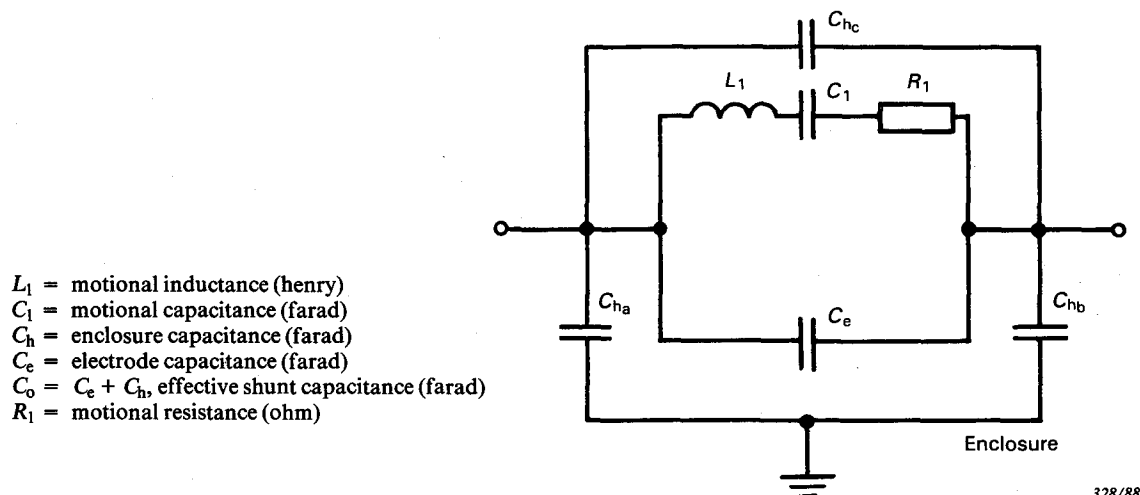


FIG. 10. — Simplified equivalent circuit of a crystal unit.

The inductance represents the vibrating mass, the series capacitance, the compliance of the quartz element and the resistance, the internal friction of the element, mechanical losses in the mounting system and acoustical losses to the surrounding environment. The shunt capacitance is made up of the static capacitance between the electrodes, together with stray capacitance of the mounting system.



- L_1 = motional inductance (henry)
- C_1 = motional capacitance (farad)
- C_h = enclosure capacitance (farad)
- C_e = electrode capacitance (farad)
- $C_0 = C_e + C_h$, effective shunt capacitance (farad)
- R_1 = motional resistance (ohm)

FIG. 11. — Crystal unit equivalent circuit.

Notes 1. — This representation of a crystal unit is true only if the parameters are constant and independent of frequency and amplitude. The parameters are independent of frequency if the vibrator has no other mode of motion near the particular resonance. Generally, the mode in question is sufficiently isolated from other modes to permit this assumption. When this is not true the equations and measuring methods normally used do not apply. The validity of the circuit representation can be determined by measuring and plotting the impedance or admittance of the vibrator as a function of frequency.

2. — A commonly used simplified equivalent circuit is shown in Figure 10, above.

3. — It should be noted from Figure 11 that the total crystal parallel capacitance is determined by varying conditions of crystal terminations and earthing the enclosure. It should be borne in mind that with a high-impedance circuit the enclosure should be earthed.

Ce circuit simple a deux fréquences à phase nulle, l'une à la résonance (f_r) et l'autre à l'anti-résonance (f_a) (voir figure 12).

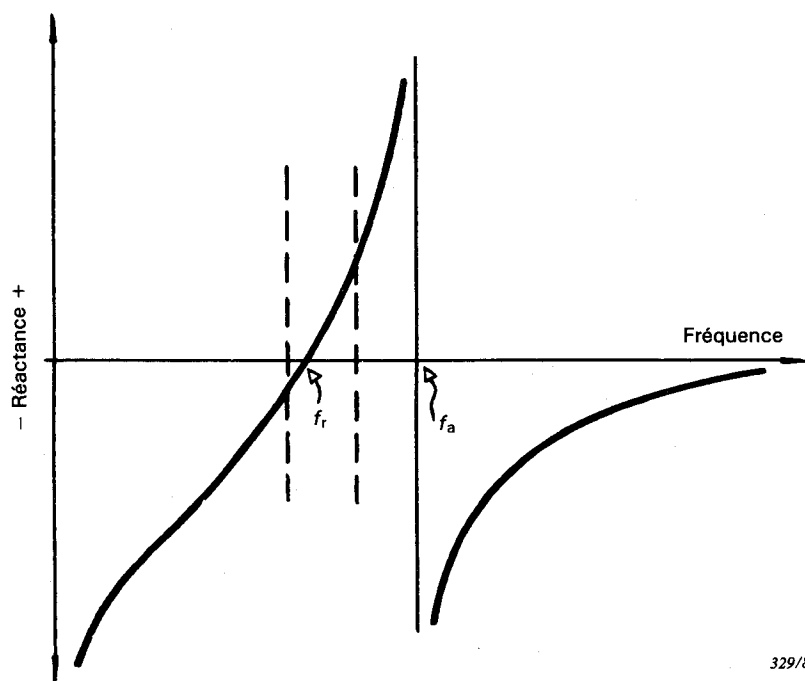


FIG. 12. — Courbe caractéristique de la variation réactance/fréquence au voisinage de la résonance.

Dans les applications pour filtres, la largeur de bande est influencée par le rapport $r = \frac{C_o}{C_1}$. En général, plus élevé est ce rapport, plus étroite est la largeur de bande.

3.1.2 Renseignements détaillés sur les paramètres du résonateur

Les paramètres du circuit électrique équivalent se composent des paramètres dynamiques L_1 , C_1 , R_1 et de la capacité parallèle C_o . Tous ces paramètres sont étroitement liés entre eux et une variation de l'un peut entraîner une variation de tous les autres. Les relations entre ces paramètres apparaissent dans les équations suivantes, dont toutes sont des approximations communément acceptées dans l'industrie:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad r = \frac{C_o}{C_1}$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_o + C_1}{L_1 C_1 C_o}}$$

$$\frac{f_a - f_r}{f_r} = \sqrt{1 + \frac{1}{r}} \approx \frac{1}{2r}$$

$$Q = \frac{2\pi f_r L_1}{R_1}$$

Note. — On peut trouver les équations exactes dans la Publication 302 de la CEI.

There are two zero-phase frequencies associated with this simple circuit, one is at resonance (f_r), another at anti-resonance (f_a) (Figure 12).

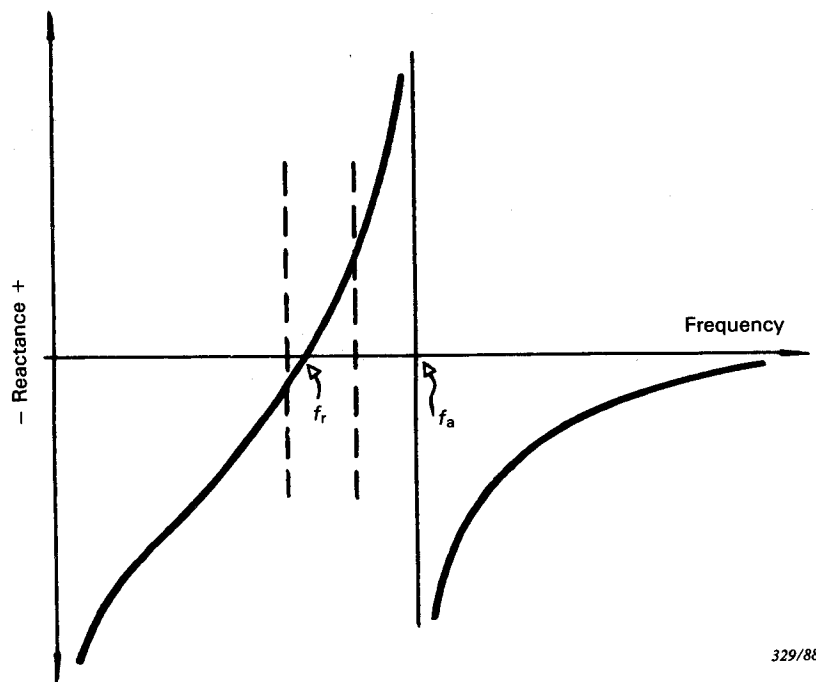


FIG. 12. — Reactance/frequency variation characteristic in the vicinity of resonance.

In filter applications, the bandwidth is affected by the ratio $r = \frac{C_0}{C_1}$. In general, the higher the ratio, the narrower the bandwidth.

3.1.2 Detailed information on crystal unit parameters

The parameters of the equivalent electrical circuit consist of motional parameters L_1 , C_1 , R_1 and the shunt capacitance C_0 . All of these are 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, all of which are commonly accepted approximations used in industry:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad r = \frac{C_0}{C_1}$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_1 C_0}} \quad \frac{f_a - f_r}{f_r} = \sqrt{1 + \frac{1}{r}} = \frac{1}{2r} \quad Q = \frac{2\pi f_r L_1}{R_1}$$

Note. — The exact equations may be found in IEC Publication 302.

3.2 Résonances indésirables

Tous les vibrateurs en cristal 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 à des modes partiels de la résonance principale et, pour les résonateurs à quartz fonctionnant sur un mode partiel par construction, à d'autres partiels et à la fréquence fondamentale elle-même.

Ces résonances indésirables peuvent être maîtrisées dans une certaine mesure, plus facilement vers la limite inférieure de fréquence pour un mode longitudinal et plus difficilement pour les vibrateurs à cisaillement d'épaisseur. La technique pour modifier la position et l'amplitude des résonances indésirables est fondée sur des modifications de géométrie et d'électrode. Malheureusement, de telles modifications vont affecter les autres paramètres C_1 , L_1 , R_1 , etc., et dans les cas extrêmes, le format de l'enveloppe pourrait être un facteur limitatif. La mise sous vide de l'enveloppe augmente l'amplitude de la résonance indésirable. Ces résonances indésirables peuvent aussi déformer la réponse désirée en fonction des changements de la température et du niveau d'excitation.

Finalement, il convient de consulter le fabricant des résonateurs à quartz pour toute application pour laquelle les résonances indésirables constituent une difficulté potentielle, par exemple pour les filtres à quartz, avant de statuer sur une prescription. Il est en effet essentiel de s'assurer que des prescriptions réalistes sont spécifiées. Dans cet ordre d'idée, il convient de se rendre compte que toute prescription relative à une résonance indésirable n'a de signification que si la gamme de fréquences dans laquelle cette prescription s'applique est spécifiée.

3.3 Utilisation pour le filtrage

Dans le cas des résonateurs pour oscillateurs, la tolérance de fréquence sous conditions déterminées est généralement une prescription importante à la température de référence, dans la gamme des températures de fonctionnement et en fonction du temps.

Lorsqu'il s'agit de résonateurs à quartz utilisés pour le filtrage, ces prescriptions sont aussi importantes; mais les valeurs et tolérances des éléments du circuit équivalent ainsi que la position et l'amplitude des résonances indésirables le sont davantage. Pour ces résonateurs, il est nécessaire de spécifier dans l'étude tous les paramètres de réactance. Ces paramètres sont déterminés par des facteurs tels que les dimensions du résonateur, la configuration et la position des électrodes et le mode de vibration. Puisque ces facteurs ne peuvent pas être choisis arbitrairement, la gamme possible de ces paramètres est relativement limitée en comparaison de celle des inductances classiques.

Les articles du présent guide traitant de ces sujets donnent quelques renseignements sur ces facteurs; mais, d'une façon générale, une coopération étroite doit exister avec le fabricant de quartz lorsque le résonateur à quartz doit être utilisé comme élément d'un filtre.

Alors que les résonateurs à quartz pour oscillateurs peuvent être souvent choisis à partir des listes types contenues dans les catalogues des fabricants, les résonateurs utilisés pour le filtrage doivent faire l'objet d'une discussion préalable avec le fabricant afin d'aboutir à une spécification qui soit satisfaisante pour chacun.

Une description plus complète de ce sujet est donnée dans la Publication 122-2 de la CEI. Les méthodes de mesure des paramètres d'un résonateur à quartz sont décrites dans les Publications 302 et 444 de la CEI.

Pour la mesure des résonances indésirables, il faut se rapporter à la Publication 283 de la CEI.

3.2 *Unwanted responses*

All crystal elements have frequency responses other than the main, or wanted, response.

The more obvious ones are the overtones of the main response and, for crystal units operating at their overtone by design, other overtones and the fundamental frequency itself.

To a limited extent these unwanted responses may be controlled. This is most feasible at the lower end, longitudinal mode, and most difficult for the thickness shear crystal elements. The technique for modifying these unwanted response positions and magnitude is based on changes of geometry and plating area. Unfortunately, such changes will affect the other parameters C_1 , L_1 , R_1 , etc., and in an extreme case, the enclosure size could be a limiting factor. Evacuation of the enclosure increases the unwanted response magnitude. These unwanted responses may also distort the desired response due to temperature and level of drive changes.

Finally, in any application where unwanted responses are considered to be a potential problem, e.g., crystal filters, crystal manufacturers should be consulted before any attempt to specify the requirement is made. This is essential to ensure that realistic requirements are specified. In this connection it should be realised that any unwanted response requirement is meaningless unless a frequency range over which it applies is specified.

3.3 *Use in filter applications*

For oscillator crystals, the frequency tolerance under stated conditions is usually an important requirement at the reference temperature, over the operating temperature range and as a function of time.

With crystals for use in filter applications, these requirements are also important, but more important are the values and tolerances for the crystal equivalent circuit elements and the position and magnitude of unwanted responses. For a resonator used in filters, all reactance parameters must be stated in a design. These parameters are determined by such factors as the dimensions of the resonator, the shape and location of electrodes and the mode of vibration. Since these factors cannot be chosen arbitrarily, the available range of the parameters is relatively restricted in comparison with the range of conventional inductors.

The clauses of this guide dealing with these subjects give some information about these factors, but, in general, all applications of crystal units for use as filter elements require close consultation with the crystal manufacturer.

Whilst crystals for oscillator applications can often be chosen from standard lists contained in crystal manufacturers' catalogues, crystals for filter application should be discussed with the manufacturer before a mutually satisfactory specification can be achieved.

A more complete description of the subject is provided in IEC Publication 122-2. The methods of measuring crystal parameters are described in IEC Publications 302 and 444.

For measurement of unwanted responses refer to IEC Publication 283.

4. Caractéristiques fondamentales des filtres

Les termes et définitions les plus importants nécessaires pour comprendre les caractéristiques électriques d'un filtre à quartz sont donnés dans le paragraphe 2.2. Certains d'entre eux sont expliqués dans ce guide pour définir clairement le filtre à quartz et ses caractéristiques électriques.

4.1 Impédance de la source et impédance de la charge

L'impédance de la source est l'impédance externe présentée à l'entrée du filtre, tandis que l'impédance de la charge est l'impédance externe présentée aux bornes de sortie du filtre.

Dans le cas des filtres à quartz, les impédances de la source et de la charge sont:

- une combinaison résistance-capacité en parallèle,
- une combinaison résistance-inductance-capacité en parallèle, ou
- une résistance seulement.

4.2 Facteur de forme

Le facteur de forme d'un filtre à quartz est un paramètre qui définit, en termes de nombres, la finesse de la caractéristique de l'amplitude dans la bande de transition. La détermination du facteur de forme exige que les limites de la bande passante et celles de la bande atténuée soient spécifiées (par exemple, 3 dB et 60 dB). La représentation graphique du facteur de forme d'un filtre passe-bande est donnée aux figures 3a et 3b, page 14.

En général, le facteur de forme est une mesure de la sélectivité d'un filtre; il dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont:

- l'ordre du filtre (le nombre de résonateurs dans le filtre);
- l'approximation, c'est-à-dire le choix de la fonction caractéristique.

4.3 Ondulation dans la bande passante

L'ondulation dans la bande passante, comme elle est définie dans le paragraphe 2.2.9, est une caractéristique du filtre très souvent source de difficultés en pratique.

Il est très difficile de donner une définition de «l'ondulation» pouvant être appliquée à tous les cas possibles. Quand elle n'est pas satisfaisante, il faut consulter le fabricant.

«L'ondulation» est une propriété qui, dans beaucoup de cas, empêche l'obtention des caractéristiques optimales d'un filtre à quartz en réalisation pratique. C'est pourquoi il est essentiel de connaître les raisons de «l'ondulation» trop élevée d'un filtre.

Il serait désirable de réaliser un filtre avec la valeur de «l'ondulation» la plus basse possible. Cependant, cela est très difficile à atteindre et «l'ondulation» est présente dans chaque type de filtre réalisé. Les principales causes de l'existence de «l'ondulation» sont les suivantes:

- valeurs finies du facteur de qualité Q des résonateurs à quartz et des transformateurs incorporés dans les filtres à quartz;
- tolérances sur tous les éléments (résonateurs, transformateurs, condensateurs) incorporés dans les filtres à quartz;
- variation des valeurs nominales des éléments avec la température (dépendance de la température);
- adaptation interne du filtre aux impédances de charge spécifiées;
- largeur relative de la bande passante. Les filtres à bande passante relative plus large sont plus sensibles à tous ces facteurs que les filtres à bande passante relative plus étroite;
- ordre du filtre. En réalisation pratique, les filtres d'ordre plus bas (à plus petit nombre de résonateurs) sont davantage influencés par les facteurs mentionnés ci-dessus que les filtres d'ordre plus élevé.

4. Fundamental filter characteristics

The most important terms and definitions required for understanding the electrical characteristics of a crystal filter are provided in Sub-clause 2.2. Some of these will be explained here for the purpose of clearly defining a crystal filter and its electrical characteristics.

4.1 Source and load impedance

Source impedance is the external impedance presented to the input of the filter, while load impedance is the external impedance presented at the output side of the filter.

In the case of crystal filters, source and load impedances are:

- parallel resistance-capacitance combination,
- parallel resistance-inductance-capacitance combination, or
- resistance alone.

4.2 Shape factor

The shape factor of a crystal filter is a parameter defining, in terms of numbers, the sharpness of the amplitude characteristic in the transition band. Determination of the shape factor requires the limits of the pass- and stop-bands to be specified (e.g., 3 dB and 60 dB). Graphical representation of the shape factor of band-pass filters is given in Figures 3a and 3b, page 15.

In general, the shape factor is a measure of filter selectivity and depends on numerous factors, the most important of which are:

- filter order (the number of resonators in a filter);
- approximation, i.e., the choice of characteristic function.

4.3 Pass-band ripple

Pass-band ripple, as defined in Sub-clause 2.2.9, is a filter characteristic which very often causes practical difficulties.

It is very difficult to give a definition of "ripple" which would apply to all possible cases. Wherever this is not quite clear, the manufacturer should be consulted.

"Ripple" is the property which, in many cases, prevents optimal filter characteristics being obtained in crystal filter applications. It is therefore essential to recognize the reasons for the "ripple" of a filter being too high.

It would be desirable to manufacture a filter with the lowest possible "ripple" magnitude. However, this is extremely difficult to achieve and "ripple" is present in any type of actual filter. The main reasons for the existence of "ripple" include:

- finite value of the quality factor, Q , of crystal resonators and transformers incorporated in crystal filters;
- tolerances on all components (resonators, transformers, capacitors) incorporated in crystal filters;
- variation of nominal values of components with temperature (temperature dependence);
- internal filter matching to specified terminating impedances;
- relative pass bandwidth. Filters with wider relative pass bandwidths are more sensitive to all the factors stated than those with narrower relative pass bandwidths;
- filter order. In practical realization, lower-order filters (with a smaller number of resonators) are more affected by the factors mentioned than higher-order filters.

En pratique, l'utilisation des filtres à quartz est la source d'une détérioration complémentaire, à savoir une «ondulation» accrue. Ce phénomène sera discuté plus en détail dans le texte ci-après mais on peut déjà dire que des impédances de la source et de la charge inadéquates à l'entrée et à la sortie du filtre sont les causes principales de cette «ondulation» accrue.

La présence d'ondulation est plus ou moins critique suivant le type d'application du filtre. Chacune des applications des filtres à quartz (AM, FM, transmission de données, etc.) a ses tolérances particulières qui sont difficiles à définir avec précision. C'est pourquoi aucune conclusion générale n'est donnée ici.

4.4 *Affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante*

L'affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante est une grandeur existant dans tous les filtres à quartz utilisés en pratique. Les raisons principales de la présence de cette grandeur sont les suivantes:

- une valeur finie du facteur de qualité Q des résonateurs à quartz et des transformateurs utilisés pour la réalisation d'un filtre à quartz;
- adaptation interne d'un filtre aux impédances terminales spécifiées.

L'affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante dépend de:

- l'ordre du filtre (plus élevé est l'ordre du filtre, plus élevée est la valeur de l'affaiblissement);
- la largeur de la bande passante relative (la valeur de l'affaiblissement est plus élevée pour des largeurs de bande relative étroites).

5. **Disponibilité commerciale et caractéristiques limites**

Les filtres à quartz sont largement fabriqués et utilisés pour la sélectivité dans toutes les classes d'équipement mobile dans les applications militaires, commerciales et dans les télécommunications. Cependant, la réalisation de ces filtres à quartz est limitée par de nombreux facteurs tels que les paramètres disponibles des résonateurs à quartz, le facteur de qualité Q des résonateurs à quartz, la stabilité de fréquence des résonateurs à quartz dans la gamme de températures, le facteur de qualité Q des transformateurs internes, etc.

Les filtres passe-bande représentent la forme la plus largement utilisée des filtres à quartz.

Le diagramme donné à la figure 13, page 36 (la région dans l'aire ombrée) est une représentation graphique de la disponibilité commerciale des filtres passe-bande à quartz en terme de fréquence centrale. Il faut se rappeler que ce graphique n'est qu'un guide de ce qui est techniquement possible. La disponibilité commerciale réelle dépendra d'autres facteurs tels que les conditions électriques et d'environnement, les dimensions, le prix et le niveau technologique du fabricant.

Les types de résonateurs à quartz utilisés dans les filtres sont montrés dans les régions ombrées, tandis que les problèmes limitant la disponibilité commerciale des filtres à quartz sont donnés au-dehors de ces régions.

Practical application of crystal filters causes further degradation, i.e., increased “ripple”. This phenomenon will be discussed in detail later in the text. At this point, it should be stated that inadequate source and load impedances presented at the input and output sides of the filter are the main reasons for increased “ripple” in practical usage.

The presence of “ripple” is more or less critical, depending on the type of filter application. Each application of crystal filters (AM, FM, data transmission, etc.) has its particular tolerances which are difficult to define precisely. That is why no general conclusion will be given here.

4.4 *Minimum transducer attenuation in the pass band*

Minimum transducer attenuation in the pass band is a quantity existing in all practical crystal filters. The main reasons for the presence of this quantity are:

- finite value of the quality factor, Q , of crystal resonators and transformers employed in the manufacture of a crystal filter;
- internal filter matching to specified terminating impedances.

Minimum transducer attenuation in the pass band depends on:

- filter order (the higher the order of the filter, the greater the magnitude of the attenuation);
- relative pass bandwidth (the magnitude of the attenuation is greater for narrow relative bandwidths).

5. **Availability and limitations**

Crystal filters are manufactured in quantity and widely used for selectivity in all classes of mobile equipment in military and commercial applications and in telecommunications. However, the manufacture of crystal filters is restricted by numerous factors such as the available parameters of crystal units, the Q of crystal units, frequency stability of crystal units in the temperature range, the Q of internal transformers, etc.

Crystal band-pass filters represent the most widely used form of crystal filters.

The diagram given in Figure 13, page 37 (the region within the shaded area) is a graphical representation of the availability of crystal band-pass filters in terms of centre frequency. It should be borne in mind that this chart is a guide only to what is technically possible. Actual availability will depend on other factors such as electrical and environmental requirements, size, cost and technological level of manufacturers' knowledge.

The types of crystal vibrators used in filters are presented within shaded areas, while the problems restricting the availability of crystal filters are stated outside these areas.

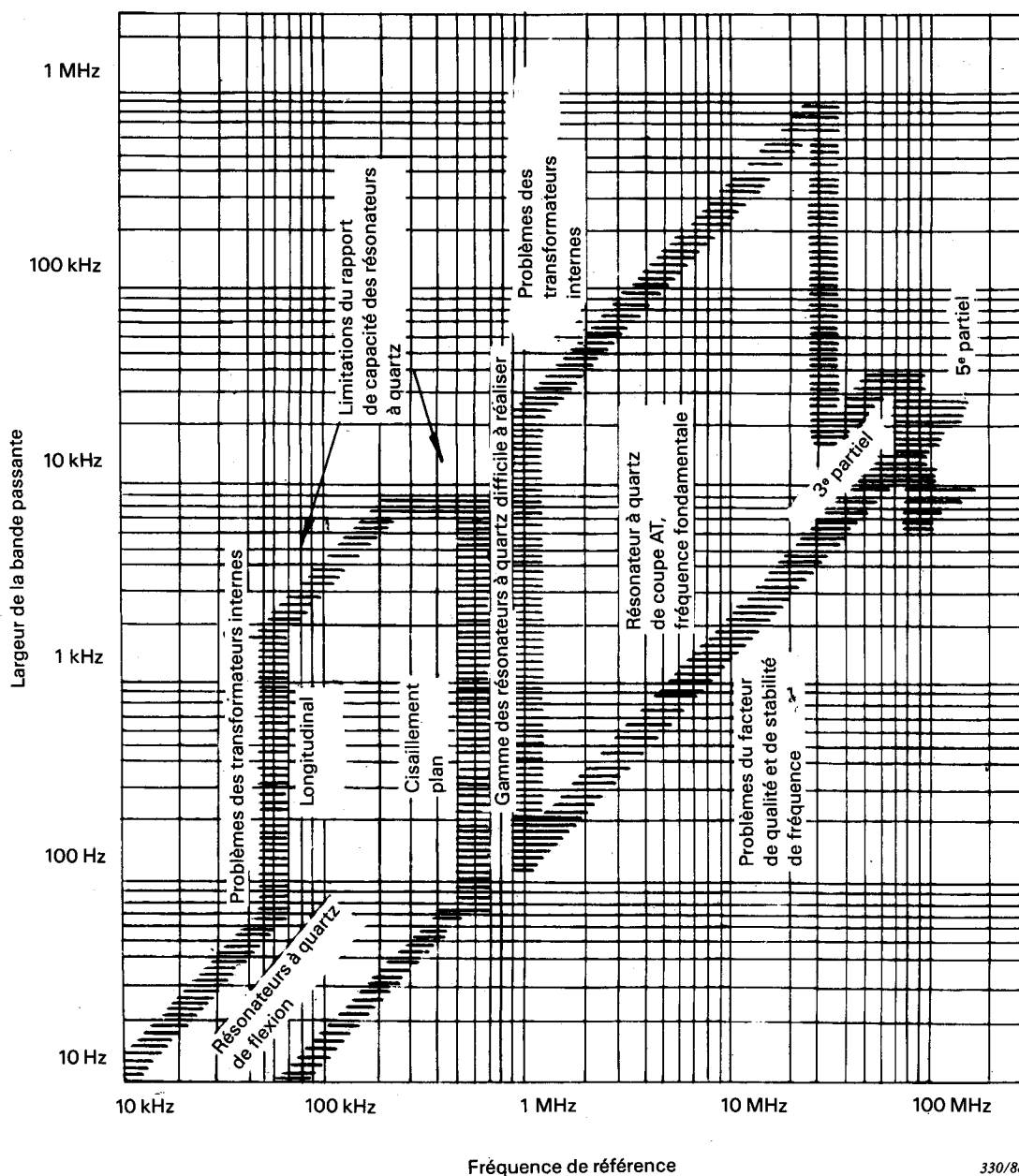


FIG. 13. — Disponibilité commerciale des filtres passe-bande à quartz.

Les filtres monolithiques, qui sont une forme spéciale de filtres à quartz, sont très largement utilisés. La représentation graphique de la disponibilité commerciale des filtres monolithiques à quartz est donnée à la figure 14, page 38.

Chaque facteur affectant la disponibilité commerciale des filtres passe-bande à quartz est considéré dans les paragraphes suivants.

5.1 Effet de la largeur de bande sur la fabrication des filtres passe-bande à quartz

Les contraintes imposées à la réalisation des filtres à quartz par les paramètres possibles des résonateurs à quartz affectent la gamme des caractéristiques disponibles.

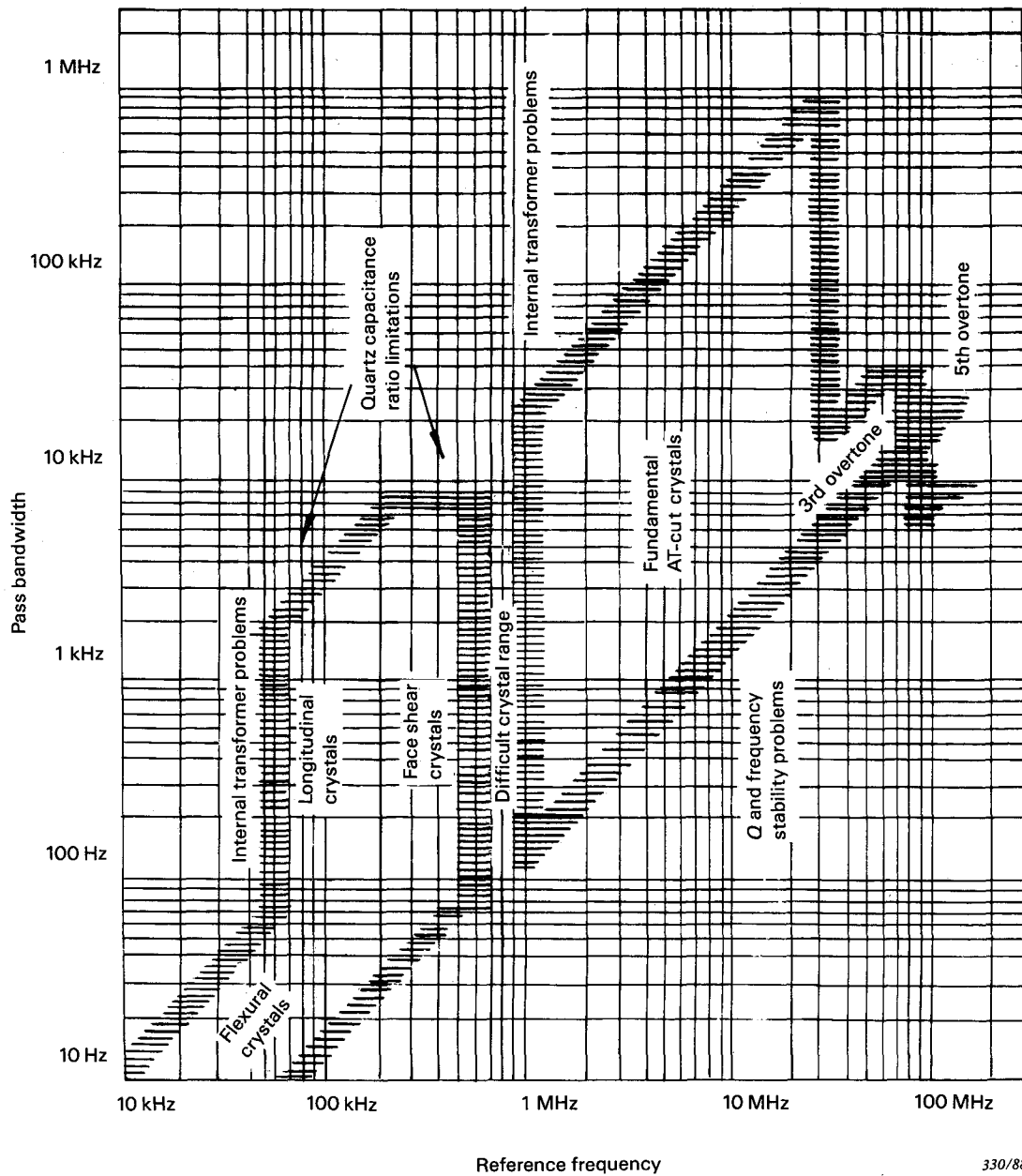


FIG. 13. — Availability of crystal band-pass filters.

Monolithic filters, a special form of practical embodiment of crystal filters, are in very wide use. Graphical representation of the availability of monolithic crystal filters is given in Figure 14, page 39.

Each factor affecting the availability of crystal band-pass filters will be considered in the following sub-clauses.

5.1 *Effect of bandwidth on availability of crystal band-pass filters*

The constraints imposed on the design of crystal filters by the available parameters of crystal resonators affect the range of available characteristics.

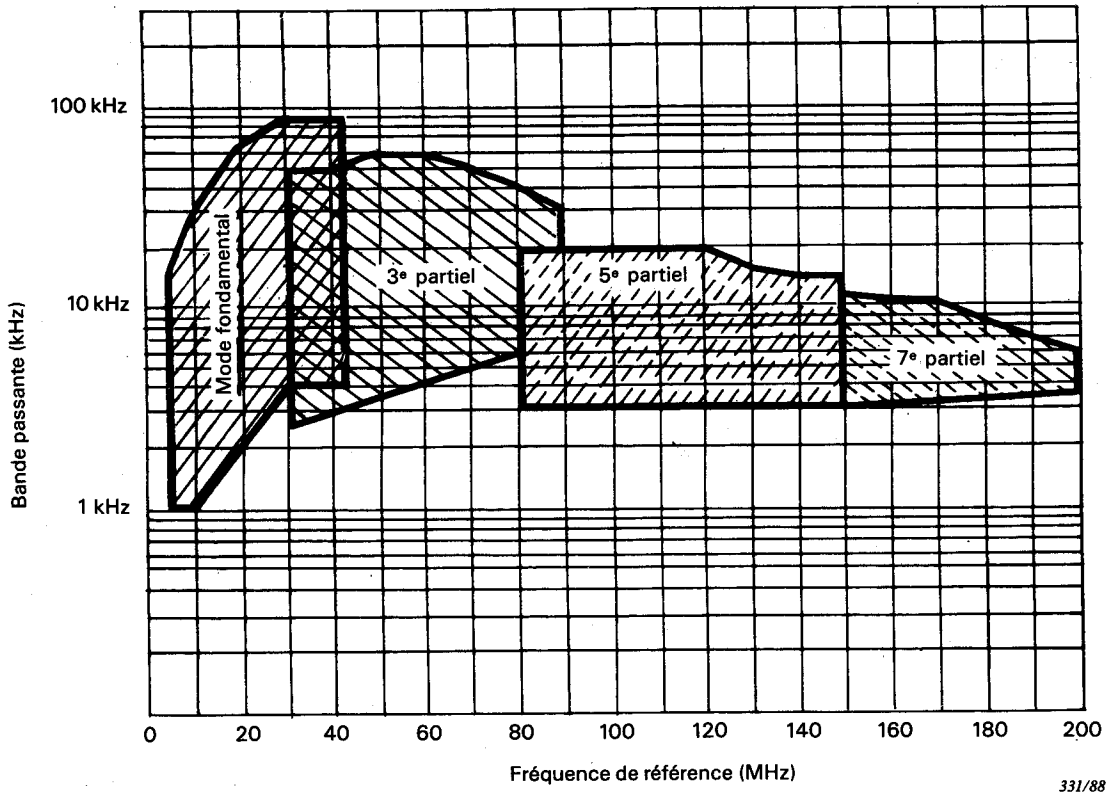


FIG. 14. — Disponibilité commerciale des filtres monolithiques à quartz.

5.1.1 *Limites du rapport de capacité (r) des résonateurs à quartz*

Les difficultés de réalisation pratique des résonateurs à quartz avec un rapport de capacité (r) exigé ont rendu nécessaire d'utiliser des configurations différentes de réseaux pour les filtres pratiques.

Les filtres passe-bande à quartz peuvent être classés en trois catégories de base:

- à bande passante étroite;
- à bande passante intermédiaire;
- à bande passante large.

a) *Filtres à bande passante étroite*

Cette catégorie comprend les filtres ayant une bande passante relative

$$\left(\frac{BP\ 3\ dB \times 100}{f_0} \right) \text{ de } 0,005\% \text{ à } 0,3\%.$$

Ceux-ci peuvent être en échelles, en treillis ou hybrides. Ils contiennent des transformateurs et des inductances uniquement pour permettre l'adaptation des impédances aux charges ou pour que le filtre assure le passage dissymétrique/symétrique. Les transformateurs peuvent également être utilisés pour accroître l'affaiblissement du filtre aux fréquences éloignées de la région immédiate de la bande passante.

b) *Filtres à bande passante intermédiaire*

Cette catégorie comprend les filtres ayant une bande passante relative de 0,3% à 1%.

Ils diffèrent du type précédent seulement par la nécessité d'utiliser des inductances finies

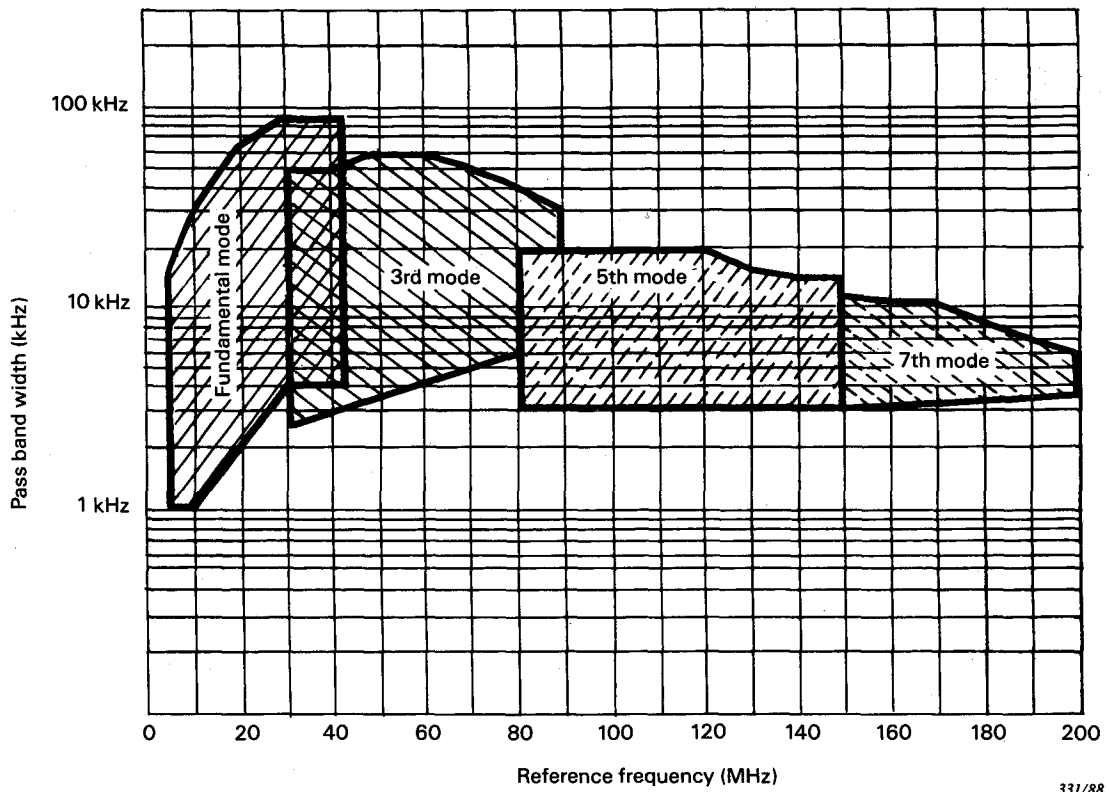


FIG. 14. — Availability of monolithic crystal filters.

5.1.1 Quartz capacitance ratio (r) limitations

The difficulties arising in the practical design of crystal resonators with required capacitance ratio (r) have made it necessary to use different network configurations for practical crystal filters.

Crystal band-pass filters can be divided into three basic categories:

- narrow pass bandwidth;
- intermediate pass bandwidth;
- wide pass bandwidth.

a) Narrow pass bandwidth filters

This category includes filters with the relative pass bandwidth

$$\left(\frac{\text{BW 3 dB} \times 100}{f_0} \right) \text{ ranging from 0.005\% to 0.3\%}.$$

These may be of ladder, lattice or hybrid configuration. They contain transformers and inductors only for the purpose of matching the impedance to the load, or for conversion from unbalanced to balanced conditions in the filter. The transformers may also be used to augment the stop-band characteristics at frequencies away from the immediate pass-band region.

b) Intermediate pass bandwidth filters

This category includes filters with the relative pass bandwidth ranging from 0.3% to 1%.

These differ from the previous type only in that finite but non-critical inductances are

mais non critiques pour désaccorder la capacité du résonateur à quartz et/ou la capacité de charge afin de donner la réponse correcte. Cela peut mener à une dégradation de la réponse de la bande passante, particulièrement au voisinage de la coupure supérieure en raison du facteur de qualité Q des inductances ajoutées. Une autre modification peut être observée à une certaine distance de la bande passante. Elle est due à la présence des inductances qui peuvent soit augmenter, soit diminuer l'affaiblissement théorique. Par ailleurs, les caractéristiques réalisables sont similaires à celles des filtres à bande passante étroite.

c) *Filtres à large bande passante*

Cette catégorie comprend les filtres ayant une bande passante relative de 0,9% à 4%.

Ceux-ci diffèrent considérablement des deux types précédents par l'utilisation d'inductances qui exigent des valeurs précises et qui sont incorporées dans la construction non seulement pour désaccorder les capacités des résonateurs à quartz, mais aussi pour obtenir l'affaiblissement relatif de la bande atténuée recherchée. Les filtres à large bande passante utilisent des inductances mises en parallèle ou en série avec les résonateurs à quartz.

Les inductances sont incorporées de telle sorte que, dans la configuration du filtre, leur facteur de qualité Q donne seulement une augmentation constante de l'affaiblissement de transmission.

L'affaiblissement de transmission minimal, en décibels, de ce type de filtre est approximativement proportionnel à l'inverse de la largeur de bande relative pour un facteur de qualité Q spécifié des inductances ajoutées à la structure du résonateur à quartz.

La représentation graphique de ces trois catégories de filtres est donnée à la figure 15, page 42

5.1.2 *Effet du facteur de qualité Q des résonateurs à quartz*

La valeur du facteur de qualité Q des résonateurs à quartz impose des contraintes à la bande passante. La largeur de bande minimale qui peut être atteinte à toute fréquence est, en principe, fonction du facteur de qualité Q maximal des résonateurs à quartz.

L'effet du facteur de qualité Q sur les caractéristiques d'un filtre se reflète en:

- affaiblissement de transmission minimal très élevé dans la bande passante;
- pertes très élevées aux fréquences de coupure de la bande passante.

La figure 16 (page 44) donne un exemple typique de l'effet du facteur de qualité Q d'un résonateur à quartz sur la largeur de bande passante d'un filtre à quartz d'ordre huit et de largeur de bande égale à 2,4 kHz.

5.1.3 *Limitations de la performance en température et problèmes de la stabilité de fréquence*

La fréquence des résonateurs à quartz utilisés dans les filtres peut varier avec:

- la température de fonctionnement;
- le temps (vieillessement).

Une description plus complète sur ce sujet est donnée dans la Publication 122-2 de la CEI.

Les inductances utilisées dans les filtres à quartz peuvent aussi se modifier avec la température et le temps.

L'effet des modifications sur la bande passante du filtre se traduit par:

- la variation de l'affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante avec la température;
- la variation de la fréquence centrale avec la température ou dans le temps en raison du vieillissement du résonateur à quartz;
- la variation des caractéristiques de l'affaiblissement due au vieillissement (particulièrement important dans les filtres BLU);

required to tune out crystal capacitance and/or load capacitance in order to give the correct response. This can lead to degradation of this pass-band response, particularly near the upper cutoff due to the quality factor, Q , of added inductors. Another modification may be observed some distance from the pass band due to the presence of the inductors which may either increase or reduce the theoretical attenuation. Otherwise, available characteristics are similar to those for narrow pass bandwidth filters.

c) *Wide pass bandwidth filters*

This category includes filters with the relative pass bandwidth ranging from 0.9% to 4%.

These differ considerably from either of the previous types by utilizing inductances which require accurate values and which are incorporated specifically in the design not only to tune out crystal capacitances but also to assist in achieving the required stop-band relative attenuation. Wide-band filters utilize inductances either in series or in parallel with the crystal resonators.

The inductors are so positioned in the filter configuration that their quality factor, Q , results only in constant increase in transducer attenuation.

The minimum transducer attenuation in decibels of this type of filter is approximately proportional to the inverse of the fractional bandwidth for a specified quality factor, Q , of the inductances added to the crystal resonator.

A graphical representation of these three filter categories is given in Figure 15, page 43.

5.1.2 *Effect of Q of crystal units*

The value of the Q of crystal units imposes constraints on pass bandwidth. The minimum bandwidth obtainable at any frequency is principally a function of the maximum Q of crystal resonators.

The effect of low Q on filter characteristics is reflected in:

- very high minimum transducer attenuation in the pass band;
- very high losses at the cut-off frequencies of the pass band.

Figure 16 (page 45) below presents a typical example of the effect of the Q of the crystal unit on pass bandwidth of an eighth-order crystal filter with 2.4 kHz bandwidth.

5.1.3 *Limitations on temperature performance and frequency stability problems*

The frequency of crystal units used in filters may vary with:

- operating temperature;
- time (ageing).

A more complete description of this subject is provided in IEC Publication 122-2.

The inductors used in crystal filters may also change with temperature and time.

The effect of the changes stated on filter pass bandwidth is reflected in:

- the variation of minimum transducer attenuation in the pass band with temperature;
- variation of centre frequency with temperature or with time due to crystal resonator ageing;
- variation of attenuation characteristics due to ageing (particularly important with SSB filters);

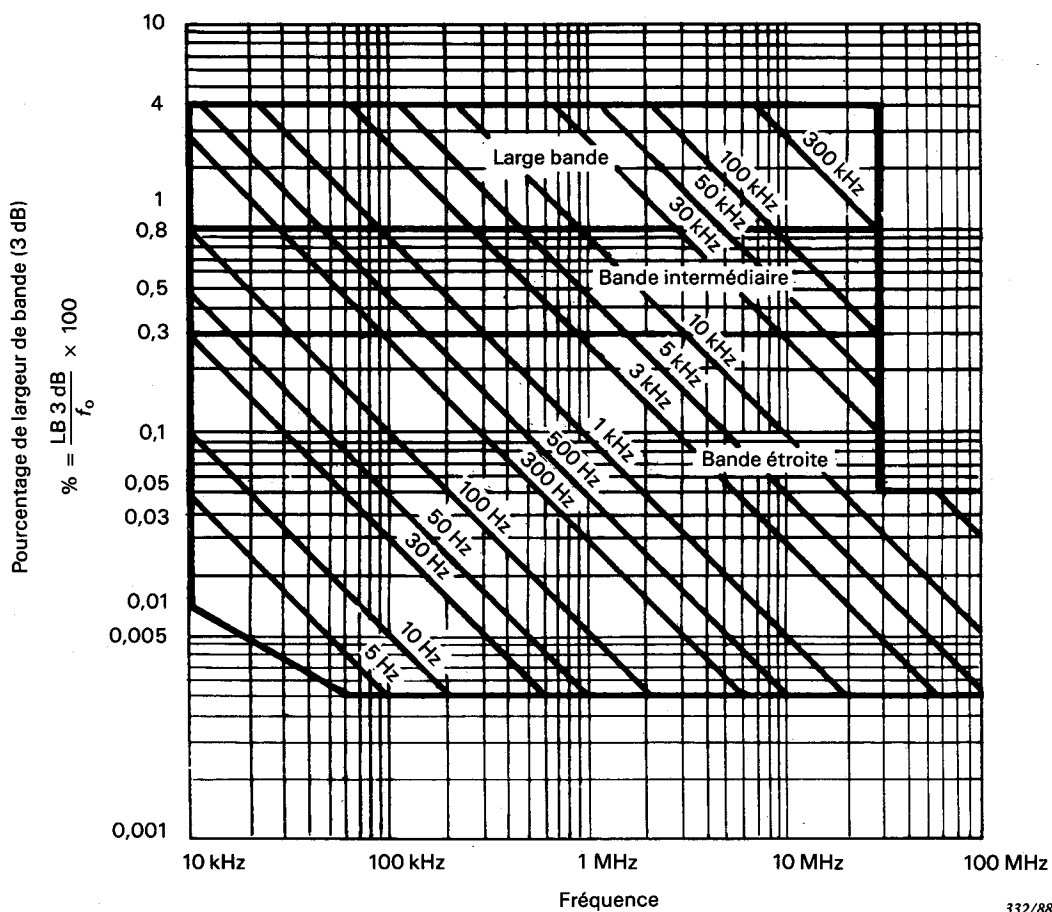


FIG. 15. — Gamme des filtres à quartz à bande passante étroite, intermédiaire et large.

- anomalies des caractéristiques des filtres parmi des échantillons d'une même série de fabrication;
- augmentation de l'ondulation dans la bande passante avec la température.

Les filtres à bande étroite ont une performance en température qui est presque indépendante de celle de chaque inductance associée. Cette performance est principalement déterminée par le coefficient de température des résonateurs à quartz et en premier lieu l'effet se fait sentir sur la variation de la fréquence centrale. Puisque la plupart des résonateurs à quartz n'ont pas un coefficient de température linéaire, il est nécessaire de faire la mesure à un grand nombre de températures pour obtenir des données exactes. Dans le cas des bandes passantes étroites, les différences entre les caractéristiques de température des résonateurs à quartz dans le filtre peuvent provoquer des variations de la valeur de l'ondulation en fonction de la température.

A mesure que la largeur de bande augmente dans la région de la bande intermédiaire, le coefficient de température de l'inductance devient important et peut influencer l'ondulation et la largeur de bande.

Pour les filtres à large bande, les effets principaux s'exerceront sur la forme de la bande passante en relation avec le coefficient de température des inductances additionnelles et de leurs capacités associées, et sur l'affaiblissement dans la bande atténuée en fonction du coeffi-

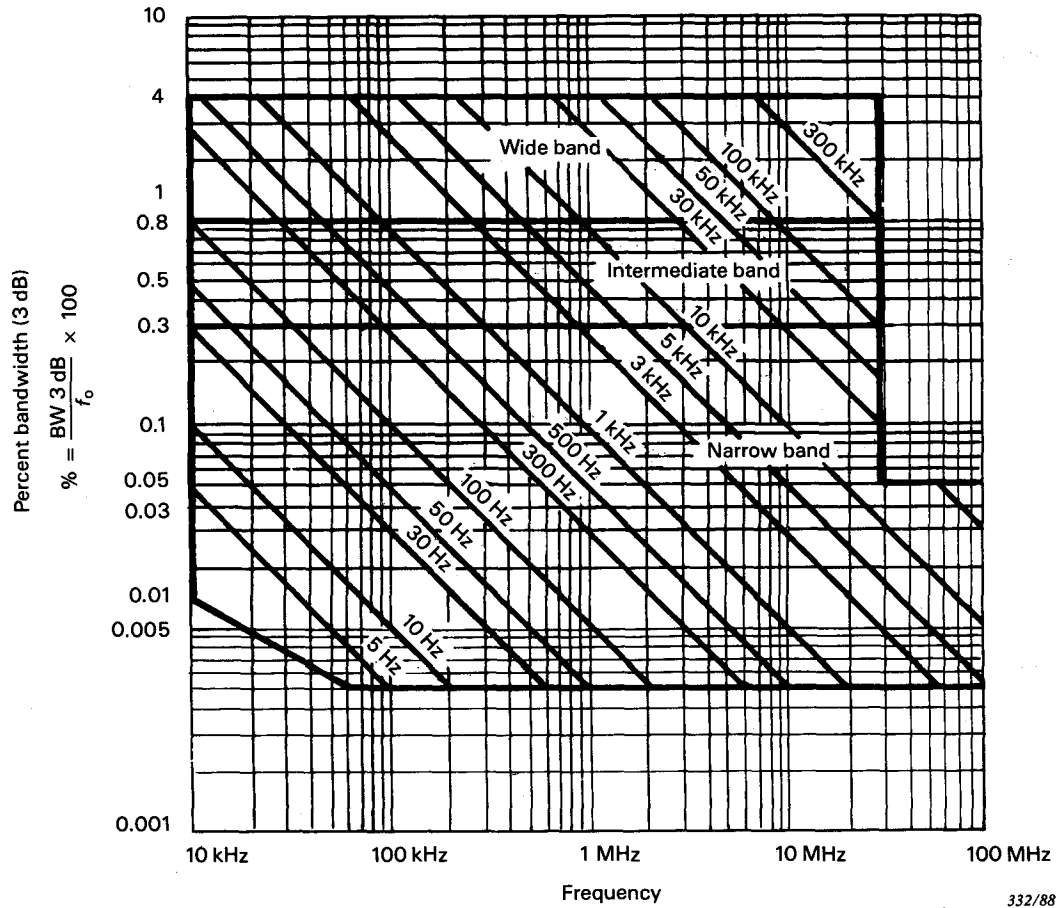


FIG. 15. — Range of narrow, intermediate and wide band crystal filters.

- inconsistency of filter characteristics between samples of a single production run;
- increase in pass-band ripple with temperature.

Narrow-band filters will possess a temperature performance which is almost independent of that of any associated inductances. The performance will be mainly determined by the temperature coefficient of the crystal units and in the first place the effect will be confined to a variation of the centre frequency. Since most crystal units do not have a linear temperature coefficient, measurement at a substantial number of temperatures may be necessary to obtain accurate data. For narrow bandwidths, differences in temperature of the crystal units within the filter may result in variation of ripple magnitude with temperature.

As the bandwidth increases into the intermediate bandwidth region, the temperature coefficient of the inductance becomes important and can affect ripple and bandwidth.

For wide-band filters, the main effects will be upon pass-band shape, due to the temperature coefficient of the added inductances and their associated capacitances, and upon stop-band attenuation dependent on the temperature coefficient of capacitances used for

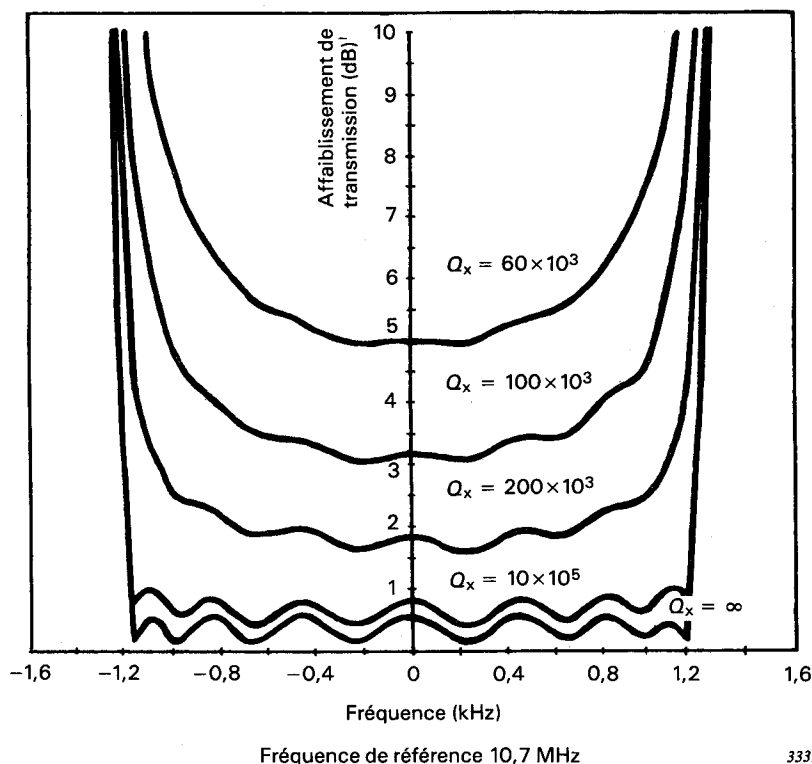


FIG. 16. — Effet du facteur de qualité Q des résonateurs à quartz sur les caractéristiques de l'affaiblissement de transmission d'un filtre à quartz à 10,7 MHz, de bande passante égale à 2,4 kHz.

cient de température des capacités utilisées pour placer les pointes d'affaiblissement. L'effet du coefficient de température du résonateur à quartz sera probablement mineur.

5.1.4 Problèmes des transformateurs internes

Des transformateurs sont employés dans presque toutes les formes de réseaux utilisés dans les filtres à quartz en pratique. Leur facteur de qualité et leur coefficient de température sont critiques et peuvent causer l'instabilité avec le temps et la température ou changer la résistance de charge équivalente du filtre.

Les principaux effets d'un transformateur à faible facteur de qualité Q sur la largeur de la bande passante d'un filtre comprennent:

- un affaiblissement de transmission minimal plus élevé dans la bande passante;
- une «ondulation» plus élevée;
- un effet sur la fréquence de coupure supérieure de la bande passante;
- une augmentation de l'ondulation dans la bande passante avec la température.

L'effet du facteur de qualité Q des transformateurs sur la caractéristique d'un filtre dans la bande passante est montré à la figure 17, page 46.

5.2 Effet des difficultés de fabrication des résonateurs à quartz

Il existe certaines gammes de fréquences dans lesquelles la fabrication des filtres à quartz n'est pas souhaitable car le développement et la fabrication de résonateurs à quartz pour de tels filtres seraient trop onéreux. Une production en série de tels résonateurs à quartz est très

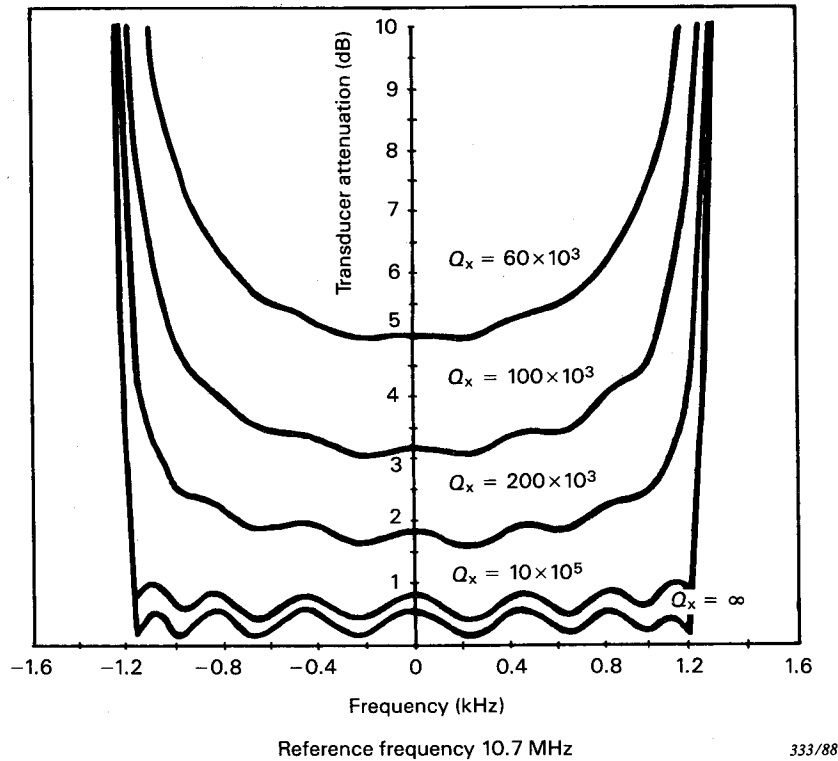


FIG. 16. — Effect of Q of crystal resonators on transducer attenuation characteristics of a 10.7 MHz crystal filter for 2.4 kHz bandwidth.

positioning the attenuation peaks. The effect of crystal resonator temperature coefficient is likely to be minor.

5.1.4 Internal transformer problems

Transformers are employed in nearly all forms of network used in practical crystal filters. The Q and the temperature coefficient of transformers are critical and may cause instability with time and temperature or change the equivalent terminating resistance of the filter.

The main effects of low Q transformers upon filter pass bandwidth include:

- higher minimum transducer attenuation in the pass band;
- higher “ripple”;
- effect on the upper cut-off frequency of the pass band;
- increase in pass-band ripple with temperature.

The effect of the Q of transformers on the filter characteristic in the pass band is shown in Figure 17, page 47.

5.2 Effect of difficulties in the manufacture of crystal units

Certain frequency ranges exist in which the production of crystal filters is undesirable, since the development and manufacture of crystal units for such filters would be too expensive. Quantity production of such crystal units is very difficult and results in inconsis-

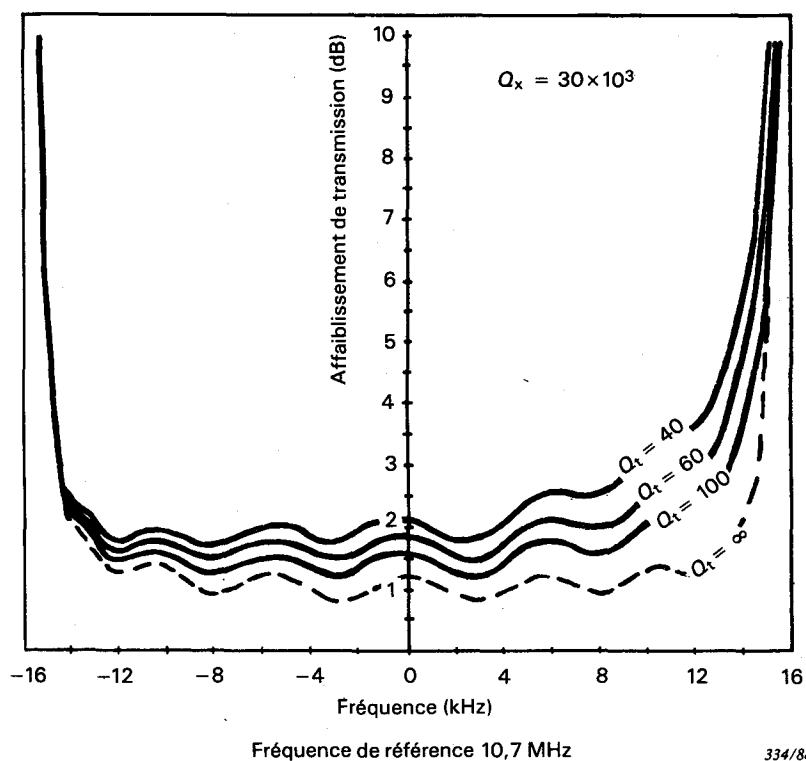


FIG. 17. — Effet du facteur de qualité Q d'un transformateur sur les caractéristiques de l'affaiblissement de transmission d'un filtre à quartz à 10,7 MHz.

difficile et a pour résultat une incompatibilité entre échantillons. En outre, des changements très petits de la fréquence de référence ou des paramètres électriques exigent un travail de développement très important pour obtenir une construction satisfaisante.

5.3 Effet dû à l'environnement

La caractéristique la plus remarquable des filtres à quartz est, peut-être, la très grande stabilité de leurs paramètres électriques sous des variations extrêmes de température, stabilité qui n'est pas même approchée par n'importe quel autre type de filtre. Cela peut être dit aussi pour la stabilité à long terme de ces filtres.

Quand ils sont correctement conçus pour un environnement à contraintes élevées, les filtres à quartz satisfont aux essais militaires ou spatiaux applicables tels que chocs, vibrations, humidité, température, altitude, corrosion et autres.

Les problèmes associés à des exigences d'environnement sévères sont diversement dépendants selon le résonateur à quartz utilisé, de la bande de fréquences, du montage, de l'immobilisation dans le boîtier. Tous ces problèmes ne peuvent pas être traités ici, aussi n'en sera-t-il cité que quelques-uns.

- Pour les lames à fréquence radioélectrique et parce que virtuellement l'énergie de vibration n'atteint pas les bords des lames, ces résonateurs à quartz peuvent être montés solidement par les bords.
- Pour les modes de contour à fréquence basse, ce problème est plus difficile parce que la déformation des fils supports peut affecter la stabilité de fréquence et la résistance.

Une conclusion générale peut être faite que les filtres à quartz de fréquence plus élevée, utilisant des résonateurs de coupe AT, peuvent résister à une contrainte mécanique plus forte.

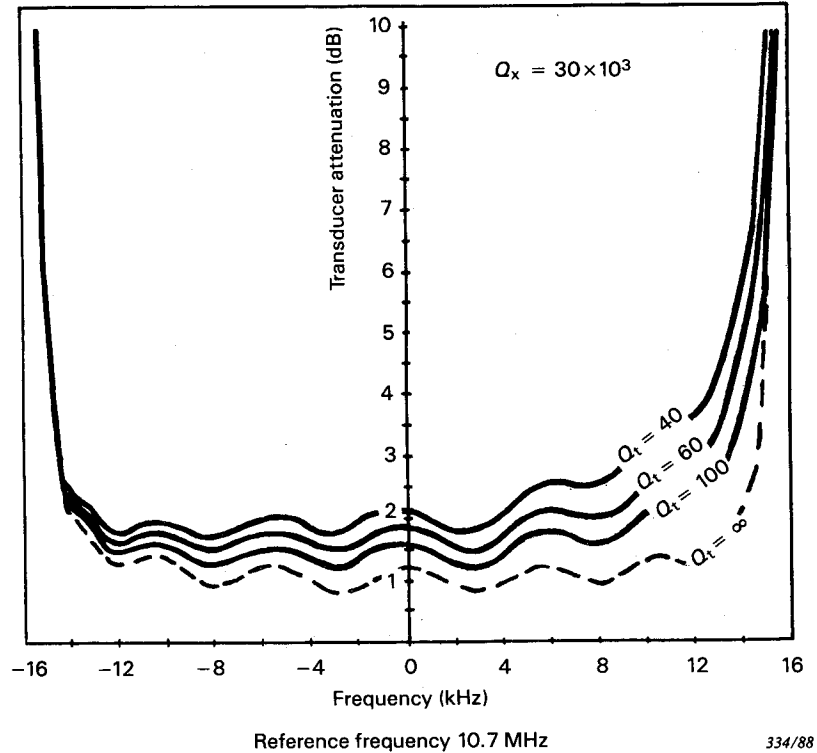


FIG. 17. — Effect of Q of a transformer on transducer attenuation characteristics of a 10.7 MHz crystal filter.

tency between samples. In addition, very small changes of reference frequency or electrical parameters require extensive development work to obtain a satisfactory design.

5.3 Effect of environmental characteristics

Perhaps the most outstanding characteristic of crystal filters is the very high stability of their electrical parameters under extreme temperature variations, a stability that is not even approached by any other type of filter. The same can also be said of the long term stability of crystal filters.

When correctly designed for high-stress environments, crystal filters will pass the applicable military or space tests such as shock, vibration, humidity, temperature, altitude, corrosion and others.

Problems associated with severe environmental requirements are diverse depending on the crystal unit used, i.e., on frequency band, mounting, encapsulation. Since all these problems cannot be treated here, only some of them will be mentioned.

- For high-frequency plates, since virtually no vibrational energy reaches the edge of high-frequency plates, these crystals can be robustly mounted at the edges.
- For low-frequency contour modes, the problem is more difficult since strain of the support wires can affect frequency stability and resistance.

A general conclusion may be reached that crystal filters for the higher frequency ranges with AT-cut resonators are capable of withstanding higher mechanical strain.

Pour les filtres à quartz destinés à être utilisés dans les équipements mobiles, et surtout dans les équipements militaires mobiles ou les équipements spatiaux, il est très important que les conditions d'environnement correctes soient spécifiées avant et non après la construction. Il est essentiel que le fabricant possède une information complète concernant toutes ces exigences ainsi que l'emplacement du filtre dans l'équipement, le mode de montage (position du filtre par rapport à l'axe principal de l'équipement), etc.

Une information plus détaillée concernant les exigences liées à l'environnement est donnée dans la Publication 368-1 de la CEI.

5.4. *Autres effets*

5.4.1 *Résonances indésirables*

Du fait que le résonateur à quartz utilise une structure mécanique complexe, il y a de nombreux modes de vibration autres que le mode principal retenu pour l'utilisation dans un filtre.

Pour une information plus détaillée, voir le paragraphe 3.2.

Parfois, ces modes ont lieu à proximité du mode principal et perturbent gravement les caractéristiques des filtres. De tels modes indésirables doivent être éliminés ou affaiblis au-dessous d'un certain niveau ou déplacés jusqu'à des fréquences non gênantes. Cela peut être fait, comme il est mentionné dans le paragraphe 3.2, par un calcul convenable des dimensions du résonateur, des électrodes et du montage. C'est pourquoi la gamme possible des paramètres du circuit équivalent est plus réduite.

L'effet des résonances indésirables est plus remarquable dans la bande atténuée d'un filtre passe-bande ou dans la bande passante d'un filtre coupe-bande. La figure 18, page 50, montre un exemple d'un filtre passe-bande ayant des distorsions dans la bande atténuée dues à la présence de résonances indésirables, et la figure 19, page 50, montre le même type de filtre avec les modes indésirables d'un résonateur à quartz supprimés au-dessous d'un certain niveau.

Dans le cas des filtres à large bande, des modes indésirables peuvent avoir lieu dans la bande passante, introduisant ainsi une distorsion de la caractéristique de l'affaiblissement dans la bande passante, comme des caractéristiques de phase et de retard de groupe.

Le coefficient de température de quelques modes indésirables diffère de celui du mode principal. A des températures différentes des températures normales, la distorsion de la caractéristique d'un filtre a souvent lieu compte tenu de la présence de modes indésirables qui ont été supprimés au-dessous d'un certain niveau à la température ambiante. Ce phénomène peut devenir très critique dans la bande de transition des filtres BLU.

Toutes les limites de la réalisation des filtres à quartz dues aux modes indésirables doivent être prévues et prises en considération avant la construction.

5.4.2 *Limites sur les caractéristiques phase/temps*

Les caractéristiques phase/temps d'un filtre peuvent être sans importance dans certaines applications. Lorsqu'elles sont importantes, elles doivent être définies uniquement dans les régions où elles doivent être prises en compte.

Il y a trois sortes de spécification de la phase:

- 1) *Arbitraire*. Dans ce cas la caractéristique phase-fréquence n'est pas spécifiée sauf (dans des cas très spéciaux) lorsqu'elle peut être obtenue dans les limites de certaines tolérances pour tous les filtres d'une série particulière de fabrication.
- 2) *Linéaire*. Dans ce type de caractéristique de phase, le déphasage varie directement avec le changement de la fréquence jusqu'à la tolérance spécifiée dans la bande passante (voir figure 20a, page 52). Cette caractéristique est une condition nécessaire pour l'obtention d'une caractéristique optimale dans le domaine-temps.

For crystal filters to be used in mobile equipment, and especially in military mobile equipment or space equipment, it is very important that the correct environmental requirements are specified before design rather than later. It is essential that the manufacturer has complete information concerning all these requirements as well as the location of the filter within equipment, the mode of mounting (filter position with respect to the main axis of equipment), etc.

More details regarding environmental requirements are provided in IEC Publication 368-1.

5.4 *Other effects*

5.4.1 *Unwanted responses*

Because a crystal resonator has a complex mechanical structure, there are numerous modes of vibration other than the main mode which is intended for use in a filter.

For more details, see Sub-clause 3.2.

These modes sometimes occur in the vicinity of the main mode and seriously disturb filter characteristics. Such unwanted modes must be suppressed below a certain level or shifted to frequencies which are of no importance. It can be done, as mentioned in Sub-clause 3.2, by a suitable design of the dimensions of the resonator, the electrodes and the mounting. It is for this reason that the available range of equivalent circuit parameters is more restricted.

The effect of unwanted modes is most prominent in the stop band of a band-pass filter or in the pass band of a band-stop filter. Figure 18, page 51, shows an example of a band-pass filter with distortions in the stop band due to the presence of unwanted modes, and Figure 19, page 51, the same filter type with the unwanted modes of the crystal unit suppressed below a certain level.

With wide-band filters, unwanted modes may occur in the pass band, thus introducing distortion of the attenuation characteristic in the pass band as well as of the phase- and group-delay characteristics.

The temperature coefficient of some unwanted modes differs from that of the main mode. At temperatures other than standard, the distortion of a filter characteristic often occurs on account of the presence of unwanted modes which were suppressed below a certain level at the ambient temperature. This phenomenon may become very critical in the transition band of SSB filters.

All the limitations on the realization of crystal filters due to unwanted modes must be foreseen and taken into account prior to design.

5.4.2 *Limitations on phase/time characteristics*

The phase/time characteristics of a filter may not be important in certain applications. If they are important, they should be defined only in those regions in which they matter.

There are three basic kinds of phase specification:

- 1) *Arbitrary*. In this type the phase versus frequency characteristic is not specified – except to say (in some very special cases) that whatever it is it must be reproduced, within some tolerances, in all filters of a particular production run.
- 2) *Linear*. In this type of phase characteristic, the phase shift varies directly with frequency, to a stated tolerance, over the pass band (Figure 20a, page 53). This characteristic is a necessary condition for optimum time-domain response.

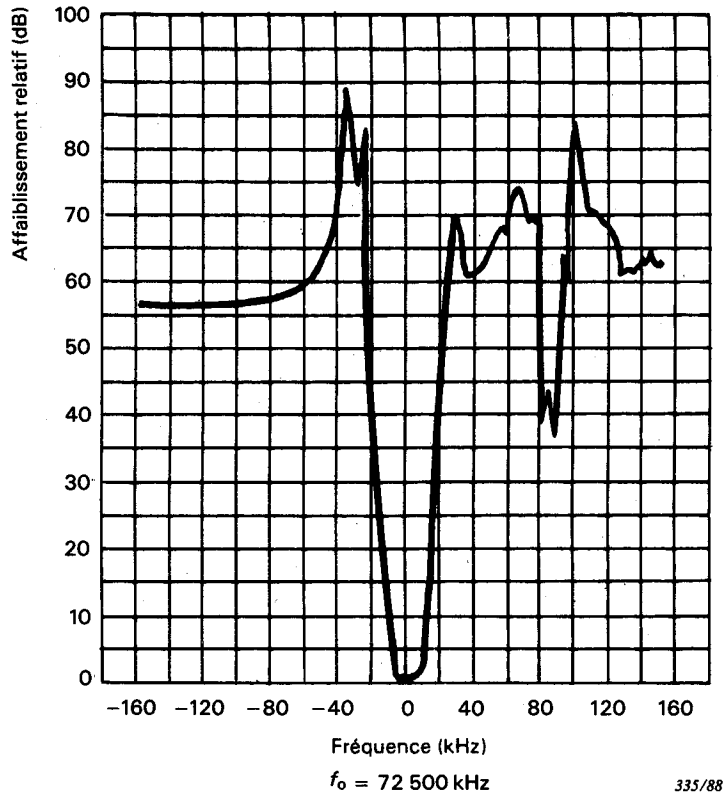


FIG. 18. — Effet des modes indésirables sur les caractéristiques de la bande atténuée d'un filtre à quartz.

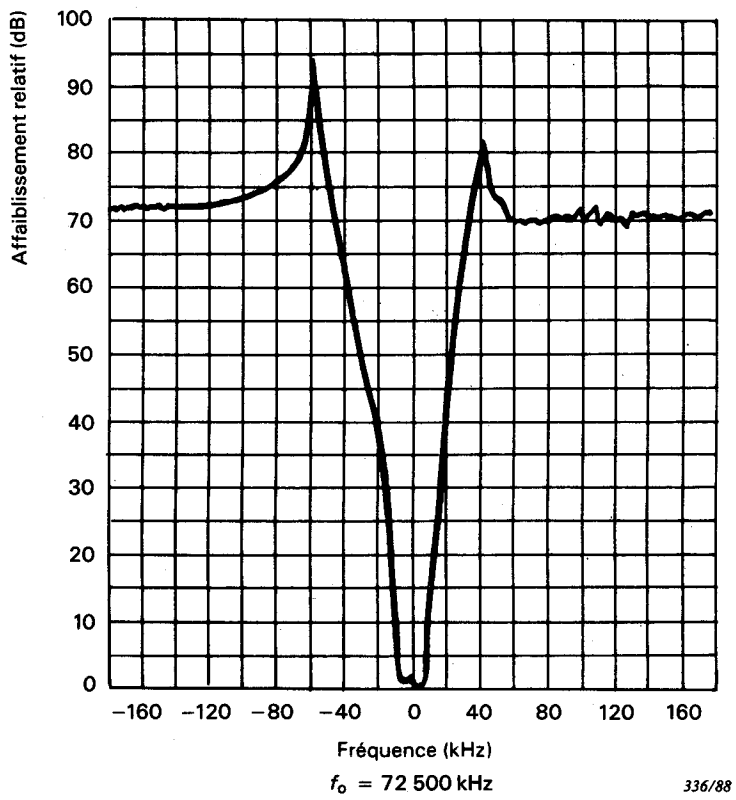


FIG. 19. — Filtre à quartz avec modes indésirables supprimés.

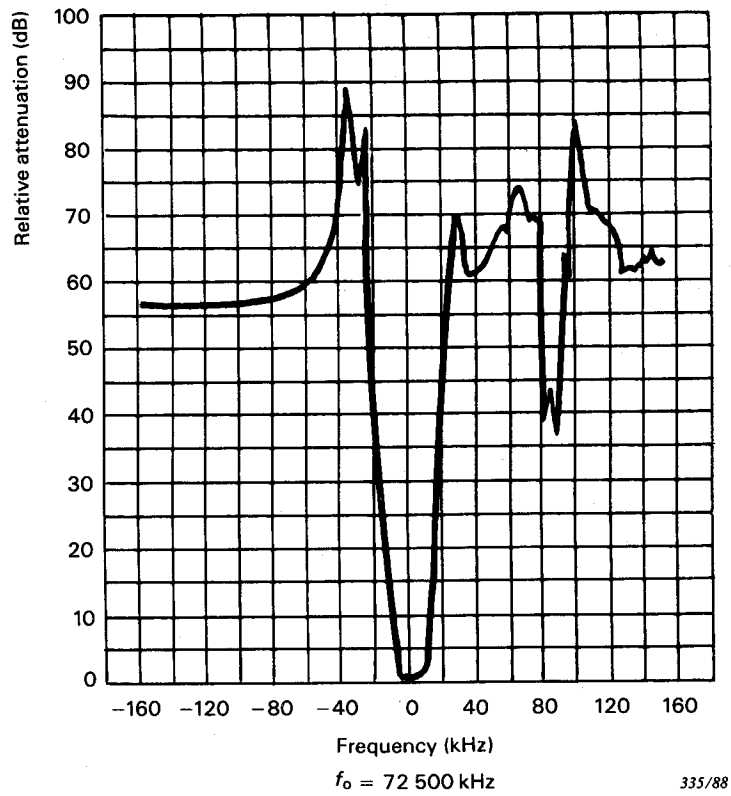


FIG. 18. — Effect of unwanted modes on stop-band characteristics of crystal filter.

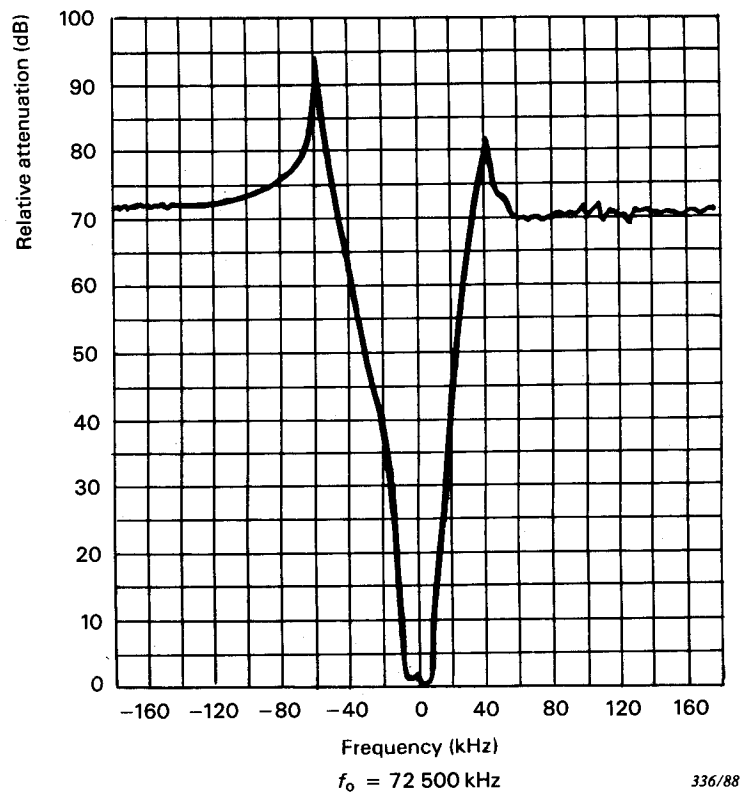


FIG. 19. — Crystal filter with unwanted modes suppressed.

3) *Contrôlée (et linéaire)*. Dans ce type de caractéristique de phase, non seulement le déphasage doit être une fonction linéaire de la fréquence dans la bande passante, mais aussi la pente (même l'interception, dans quelques applications très difficiles) de la caractéristique phase-fréquence est spécifiée avec une tolérance donnée. Ceci peut être nécessaire pour l'optimisation de filtres à caractéristiques de retard de boucle ou de retard de groupe (voir figure 20b ci-dessous).

Le problème d'obtention des caractéristiques de phase spéciales est classique et il est inhérent aux procédures de synthèse de tous les filtres, et pas seulement pour les filtres à quartz. Les problèmes de construction des filtres à quartz conduisent au même type de solution que pour les filtres classiques.

Un filtre peut être caractérisé par sa caractéristique d'amplitude et par sa caractéristique de phase simultanément. Puisqu'il existe une relation particulière entre les deux, les filtres qui s'approchent le mieux des caractéristiques d'amplitude dans la bande passante et dans la bande atténuée ont de grandes distorsions de phase. Vice versa, les filtres ayant une bonne linéarité de phase exhibent seulement une mauvaise sélectivité, insuffisamment élevée pour la plupart des applications.

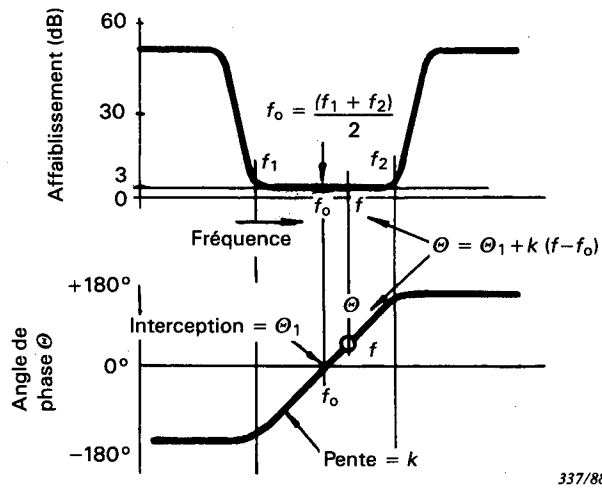


FIG. 20a. — Caractéristique de phase typique linéaire.

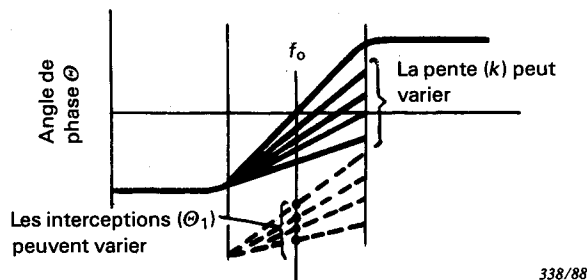
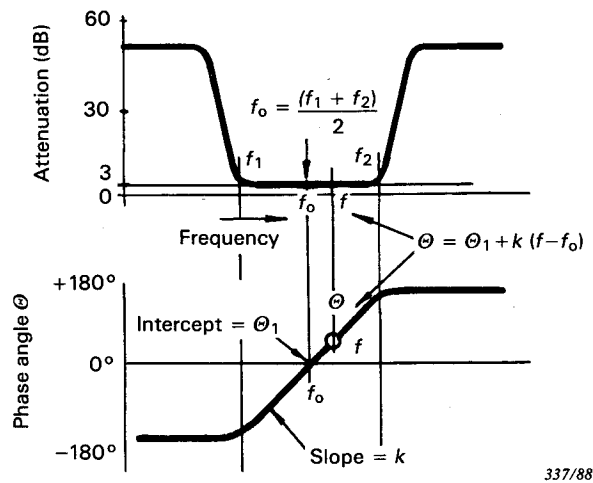


FIG. 20b. — Caractéristique de phase linéaire avec pente spécifiée.

3) *Controlled (and linear)*. In this type of phase characteristic, not only must the phase shift be a linear function of frequency over the pass band, but the slope (even the intercept, in some very critical applications) of the phase versus frequency characteristic is specified to a given tolerance. This may be necessary in optimizing filters for envelope-delay or group-delay characteristics (Figure 20b).

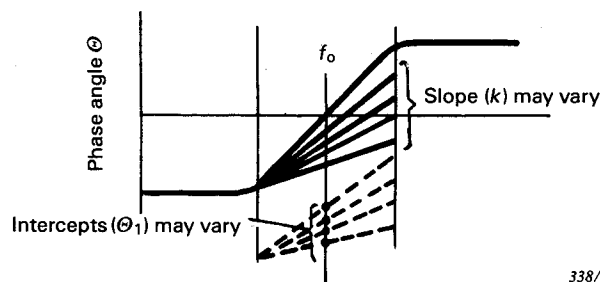
The problem of attaining special phase characteristics is classical, and is inherent in all filter synthesis procedures, not just for crystal filters. Crystal filter design problems are overcome by the same kind of solution as conventional filters.

A filter may be characterized by its amplitude and phase characteristics simultaneously. Since there is a particular relationship between these characteristics, the filters which best approximate the amplitude characteristics in the pass band and the stop band have large phase distortions. On the other hand, filters with good phase linearity exhibit only poor selectivity, which is not high enough for the majority of applications.



337/88

FIG. 20a. — Typical linear phase characteristic.



338/88

FIG. 20b. — Linear phase characteristic with specified slope.

L'approche classique est dans l'utilisation d'égaliseurs de phase en conjonction avec des filtres sélectifs. Ces égaliseurs sont habituellement plus complexes que les filtres eux-mêmes. Ces dernières années, un progrès considérable a été atteint dans la synthèse des fonctions de transfert, qui sont un compromis entre la caractéristique d'amplitude appropriée dans la bande atténuée et la caractéristique de phase linéaire convenable pour une application désirée (par exemple, pour les systèmes de transmission de données).

5.5 *Considérations pratiques de construction*

Pour présenter une information plus complète sur la disponibilité commerciale des filtres à quartz, le tableau I est une tentative pour donner une revue de la disponibilité commerciale des filtres à quartz par rapport aux autres paramètres saillants affectant les caractéristiques électriques d'un filtre. Ce tableau ne doit pas être considéré comme exhaustif. Les paramètres sont interdépendants, ce qui empêche d'optimiser certains d'entre eux. Il est possible d'améliorer quelques paramètres, mais on ne peut faire cela qu'au prix d'une détérioration des autres.

i) *Valeur normale ou typique ou gamme*

Peut être obtenue en utilisant des procédés technologiques normalisés.

ii) *Performance élevée ou optimale*

Peut être obtenue en utilisant des procédés technologiques compliqués.

iii) *Niveau technologique ou limites théoriques*

Possibilité d'obtention limitée qui résulte des gammes limitées des paramètres des résonateurs à quartz et approximations disponibles de la fonction caractéristique.

6. **Obtention de la caractéristique optimale**

6.1 *Introduction*

Les caractéristiques d'un filtre à quartz sont principalement déterminées par le réseau interne du dispositif. Certaines précautions sont cependant exigées pour obtenir une bonne performance lorsque le filtre est inséré entre des réseaux extérieurs.

TABLEAU I

Gammes pratiques des paramètres saillants

Paramètre	Valeur normale ou typique ou gamme	Performance élevée ou optimale	Limites technologiques ou théoriques
Fréquence centrale	10 kHz à 32 MHz	10 kHz à 180 MHz	1 kHz à 230 MHz
Facteur de forme	2,0:1 pour 60 dB/3 dB	1,2:1 pour 60 dB/2 dB	1,04:1 pour 60 dB/1 dB
Affaiblissement de transmission minimal	3 dB à 12 dB	1 dB	0,1 dB
Ondulation	1 à 2 dB max	0,5 dB max	0
Affaiblissement dans la bande atténuée	60 dB	100 dB	120 dB
Linéarité de phase	± 10% à 100%	± 5%	± 1%
Tolérance de retard	± 10% à 100%	± 5%	± 1%
Réglage de phase (entre deux filtres)	± 20°	± 5°	1°
Impédance selon la fréquence (dans la bande supérieure à 1 dB)	± 10% à ± 70%	± 10%	± 5%

The classical approach is to employ phase equalizers in conjunction with selective filters. These equalizers are usually more complex than the filters themselves. In recent years, considerable progress has been made in the synthesis of transfer functions which are a compromise between an appropriate amplitude characteristic in the stop band and a linear phase characteristic suitable for the intended applications (e.g. data transmission systems).

5.5 Practical design considerations

To present more complete information on the availability of crystal filters, Table I is an attempt to give a review of the availability of crystal filters with respect to other parameters of importance for the electrical characteristics of a filter. This table should not be regarded as exhaustive. Parameters are interdependent and this prevents some of them from being optimized. It is possible to improve some parameters, but only at the expense of others.

- i) *Normal or typical value or range*
Obtainable by employing standard technological procedures.
- ii) *High performance or optimum*
Obtainable by employing sophisticated technological procedures.
- iii) *State-of-the-art or theoretical limits*
Limited obtainability resulting from restricted ranges of crystal parameters and available approximations of the characteristic function.

6. Obtaining optimum performance

6.1 Introduction

The characteristics of a crystal filter are governed largely by the network inside the unit. Certain precautions, however, are required in order to obtain a satisfactory performance when the filter is inserted in an external circuit.

TABLE I
Practical ranges of main parameters

Parameter	Normal or typical value or range	High or optimum performance	State-of-the-art or theoretical limits
Centre frequency	10 kHz to 32 MHz	10 kHz to 180 MHz	1 kHz to 230 MHz
Shape factor	2.0:1 for 60 dB/3 dB	1.2:1 for 60 dB/2 dB	1.04:1 for 60 dB/1 dB
Minimum transducer attenuation	3 dB to 12 dB	1 dB	0.1 dB
Ripple	1 to 2 dB max	0.5 dB max	0
Stop band attenuation	60 dB	100 dB	120 dB
Phase linearity	± 10% to 100%	± 5%	± 1%
Delay tolerance	± 10% to 100%	± 5%	± 1%
Phase tracking (between two filters)	± 20°	± 5°	1°
Impedance versus frequency (over 1 dB bandwidth)	± 10% to ± 70%	± 10%	± 5%

Pour obtenir une performance optimale du filtre à quartz, les exigences suivantes doivent être prises en considération:

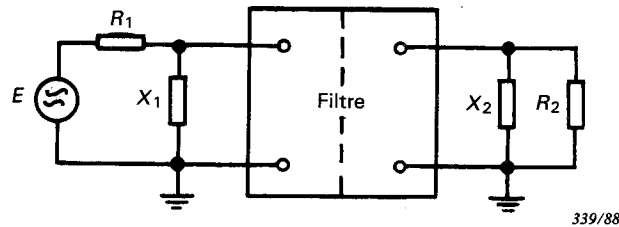
- l'adaptation;
- le couplage parasite;
- le niveau d'entrée.

Puisqu'il est très difficile de remplir toutes ces exigences, cet article est centré sur celles qui sont essentielles pour l'obtention d'une performance optimale du filtre. En outre, lorsque ces exigences ne sont pas satisfaites, les effets indésirables qui en résultent sont indiqués.

6.2 Adaptation

Les résistances de charge exigées sont soit déterminées par synthèse du filtre, soit spécifiées d'avance. Dans le dernier cas, les circuits de transformation sont incorporés aux terminaisons d'entrée et de sortie d'un filtre à quartz pour l'adaptation.

La plupart des fabricants de filtres à quartz spécifient l'impédance de charge nécessaire en R (ohms) en parallèle avec C (pF) ou L (μ H) (voir figure 21 ci-dessous). Puisqu'il est impossible de remplir toutes ces exigences, les terminaisons incorrectes permises sont données ci-après.



- R_1 — partie résistive des impédances de charge
- R_2 — partie résistive des impédances de charge
- X_1 — partie réactive des impédances de charge
- X_2 — partie réactive des impédances de charge

FIG. 21. — Adaptation des filtres à quartz.

Puisque les filtres d'ordre huit sont les plus largement utilisés, les exemples montrant l'effet du changement des conditions de la charge sont donnés ci-après, aux paragraphes 6.2.1 et 6.2.2.

6.2.1 Résistance de charge

Une adaptation imparfaite de la résistance produisant des effets identiques sur tous les filtres de même ordre, pour n'importe quelle bande passante, fréquence centrale et impédance de charge à condition que les caractéristiques d'approximation soient égales, la figure 22, page 60, donne une représentation générale de l'effet de variation de la résistance de charge d'un filtre d'ordre huit de conception Chebyshev 0,1 dB. La courbe (a) présente la caractéristique idéale d'un filtre sans pertes. La courbe (b) montre le filtre avec l'erreur zéro sur tous les composants et la perte maximale permise dans les résonateurs à quartz. Les courbes (c) et (d) montrent l'effet d'une altération de la charge résistive par un facteur de 0,7 et 1,3 respectivement. Cela a pour effet d'élever l'ondulation et de réduire la largeur de la bande passante des limites supérieure et inférieure respectivement.

Comme on peut le voir en figure 22, l'effet de la variation de la résistance de charge est tolérable même jusqu'à $\pm 30\%$ de sa valeur nominale.

To obtain optimum performance of a crystal filter, the following requirements should be taken into account:

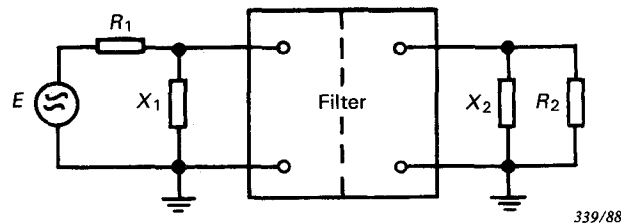
- matching;
- stray coupling;
- input level.

Since it is very difficult to meet all these requirements, the present clause will concentrate on those which are essential for optimum performance of a filter. In addition, undesirable effects resulting from failure to meet these requirements will be pointed out.

6.2 Matching

The terminating resistances required are either determined by filter synthesis or specified in advance. In the latter case, transforming circuits are incorporated at input and output terminations of the crystal filter for the purpose of matching.

Most manufacturers of crystal filters state the necessary terminating impedance as R (ohms) in parallel with C (pF) or L (μ H) (Figure 21). Since it is impossible to accurately meet all these requirements, allowable mis-terminations will be stated here.



- R_1 — resistive portion of the terminating impedances
 R_2 — resistive portion of the terminating impedances
 X_1 — reactive portion of the terminating impedances
 X_2 — reactive portion of the terminating impedances

FIG. 21. — Matching the crystal filters.

Since eighth-order filters are the most widely used, examples illustrating the effect of the variation in terminating conditions are given in Sub-clauses 6.2.1 and 6.2.2.

6.2.1 Resistance termination

Since resistance mismatching produces identical effects upon all filters of the same order, for any pass band, centre frequency and terminating impedance, provided the approximating characteristics are equal, Figure 22, page 61, gives a general representation of the effect of variations in the resistance termination of an eighth-order, 0.1 dB Chebyshev design filter. Curve (a) presents the ideal characteristic of a lossless filter. Curve (b) shows the filter with zero error on all components and maximum allowable loss in the crystal resonators. Curves (c) and (d) show the effect of altering the resistive termination by a factor of 0.7 and 1.3, respectively. The effect of this is to increase the ripple and reduce the pass bandwidth at the upper and lower edges, respectively.

As may be seen from Figure 22 the effect of variation in resistance termination is tolerable even up to $\pm 30\%$ of the nominal value of resistance termination.

L'exemple présenté donne seulement l'information essentielle sur l'effet de la résistance de charge sur les caractéristiques de la bande passante d'un filtre. Il faut prendre en considération le fait que des résistances de charge différentes des valeurs nominales sont rencontrées en service.

Note. — Ces exemples ont été obtenus d'une analyse par ordinateur. Les impédances de charge spécifiées sont les valeurs nominales obtenues par la synthèse des filtres.

Les symboles suivants sont utilisés:

Q_x — Facteur de qualité du résonateur à quartz

R_s — Résistance série du résonateur à quartz

$R_{\text{charge}} = R_1 = R_2$ — Partie résistive de l'impédance de charge

$C_{\text{charge}} = C_1 = C_2$ — Partie capacitive de l'impédance de charge.

6.2.2 Capacité de charge

Ce qui vient d'être énoncé au paragraphe 6.2.1 pour une adaptation imparfaite de la résistance est valable aussi pour la capacité. Les courbes (a) et (b) de la figure 23, page 60, montrent l'effet d'une altération de la capacité de charge par un facteur de 0,7 et de 1,3 respectivement.

L'effet est d'augmenter l'ondulation pour une capacité élevée et de diminuer l'ondulation pour une basse capacité. Les bords de la bande passante sont moins affectés que dans le cas d'une adaptation imparfaite de la résistance.

Conclusion:

Comme on peut le voir dans les figures montrant les caractéristiques de la bande passante pour des variations de la résistance avec capacité fixée, une erreur de $\pm 30\%$ de la résistance de charge change la caractéristique de la fréquence (l'ondulation); néanmoins, cette caractéristique est encore dans les limites utilisables.

Une analyse similaire appliquée aux filtres d'ordre inférieur montre que ces derniers sont plus affectés par la variation des charges résistives et capacitives.

Les diagrammes donnés ici présentent les caractéristiques d'un filtre dont tous les éléments restants sont supposés idéaux, c'est-à-dire sans tolérances ni pertes. Une appréciation fine des caractéristiques d'un filtre en fonction de la résistance de charge changée peut être obtenue seulement par l'analyse de chaque cas particulier.

6.3 Obtention de la spécification de la bande atténuée

Pour obtenir l'affaiblissement spécifié dans la bande atténuée, le couplage parasite entre les bornes d'entrée et de sortie doit être maintenu minimal par une mise à la masse ou par un blindage efficace. Un filtre à 8 pôles conçu pour donner un affaiblissement de la voie adjacente de 90 dB avec une marge confortable aura un affaiblissement théorique de 110 dB. Avec un montage d'essai suffisamment bon, des affaiblissements supérieurs à 100 dB peuvent être atteints, mais cette caractéristique peut être considérablement détériorée lorsqu'un soin insuffisant est apporté au circuit.

L'exemple typique de l'effet du couplage parasite sur les caractéristiques de la bande atténuée est donné à la figure 24, page 62.

On peut constater que les filtres d'ordre élevé, les filtres avec des bandes relatives plus larges et les filtres avec une valeur élevée de la résistance de charge sont plus sensibles au couplage parasite capacitif ou inductif.

Les filtres avec une basse impédance d'entrée et de sortie (par exemple de 50 Ω ou de 75 Ω) sont plus souvent affectés par le couplage du courant de fuite aux bornes de la mise à la masse.

6.4 Niveau d'entrée

Le niveau du signal d'entrée doit être maintenu inférieur à une valeur spécifiée. La surexcitation tend à créer des effets indésirables tels que:

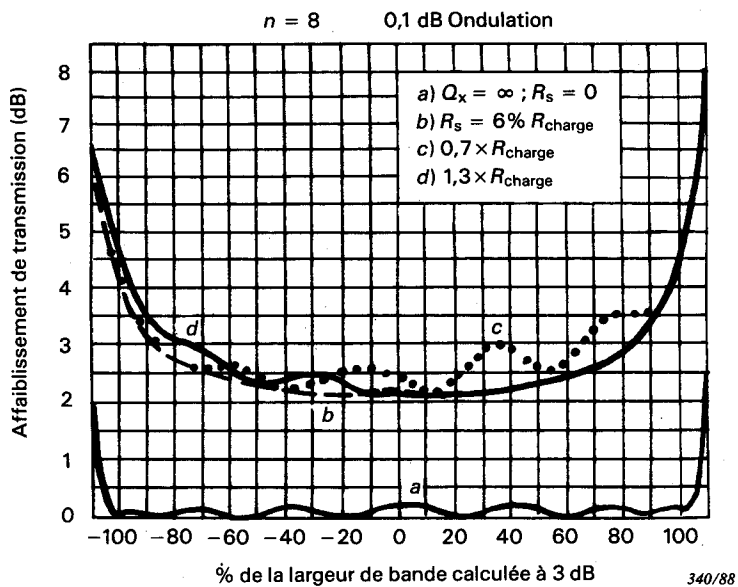


FIG. 22. — Effet produit par l'altération de la résistance de charge.

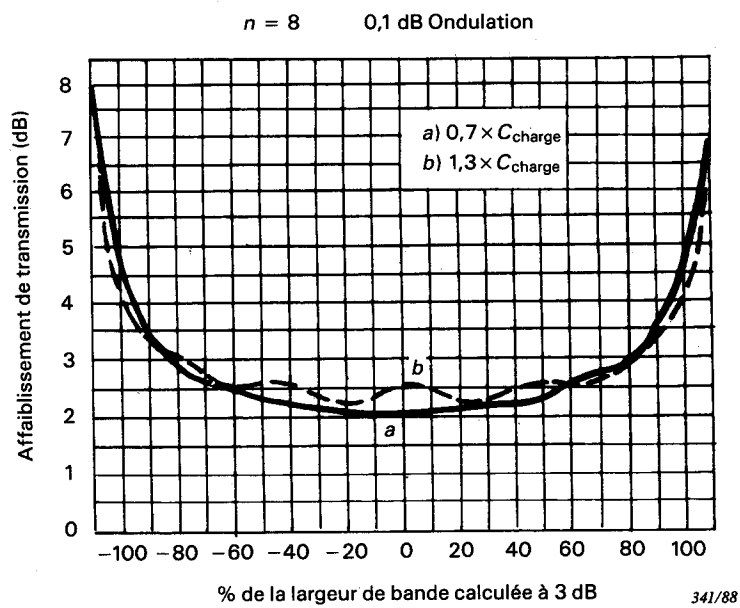


FIG. 23. — Effet produit par l'altération de la capacité de charge.

The example presented provides only essential information on the effect of resistance termination on the pass-band characteristics of a filter. A fact to be taken into account is that resistance terminations differing from the nominal values are encountered in service conditions.

Note. — These examples have resulted from computer analysis. The terminating impedances stated are nominal values obtained by filter synthesis.

The following symbols are used:

Q_x — Quality factor of crystal resonator

R_s — Series resistance of crystal resonator

$R_{load} = R_1 = R_2$ — Resistive portion of terminating impedance

$C_{load} = C_1 = C_2$ — Capacitive portion of terminating impedance.

6.2.2 Capacitance termination

The general statements in Sub-clause 6.2.1 for resistance mismatching apply to capacitance mismatching as well. Curves (a) and (b) of Figure 23, page 61, show the effect of altering the terminating capacitance by a factor of 0.7 and 1.3, respectively.

The effect is to increase the ripple for high capacitance and reduce the ripple for low capacitance. The pass-band edges are less affected than in the case involving resistive mis-termination.

Conclusion:

As may be seen from the figures showing the pass-band characteristics under variation of resistance with fixed capacitance, a $\pm 30\%$ error in the terminating resistance changes the frequency characteristic (ripple); nevertheless, the characteristic is still within usable limits.

A similar analysis applied to lower-order filters shows that these are more affected by the variation of resistive and capacitive terminations.

The diagrams given here present filter characteristics with all the remaining filter elements assumed ideal, i.e. with no tolerances or losses. A proper insight into the behaviour of filter characteristics as a function of changed resistance termination may be obtained only by analyzing each particular case.

6.3 Achieving stop-band specification

To obtain the specified stop-band attenuation, stray coupling between input and output terminals should be kept to a minimum by proper earthing or shielding. An 8-pole filter designed to give an adjacent channel attenuation of 90 dB with a comfortable margin will have a theoretical attenuation of 110 dB. With a sufficiently good test jig, attenuations of over 100 dB can be achieved but this performance can be drastically reduced in service if insufficient care is taken with the circuit layout.

A typical example of the effect of stray coupling on stop-band characteristics is given in Figure 24, page 63.

It may be stated that higher-order filters, filters with greater relative pass bandwidths, and filters with high value of terminating resistance are more sensitive to capacitive or inductive stray coupling.

Filters with low input and output impedance (e.g. 50 Ω or 75 Ω) are often more affected by earth current coupling through the earthing terminals.

6.4 Input level

The level of the input signal should be kept below a specified value. Overdriving tends to create undesirable effects, such as:

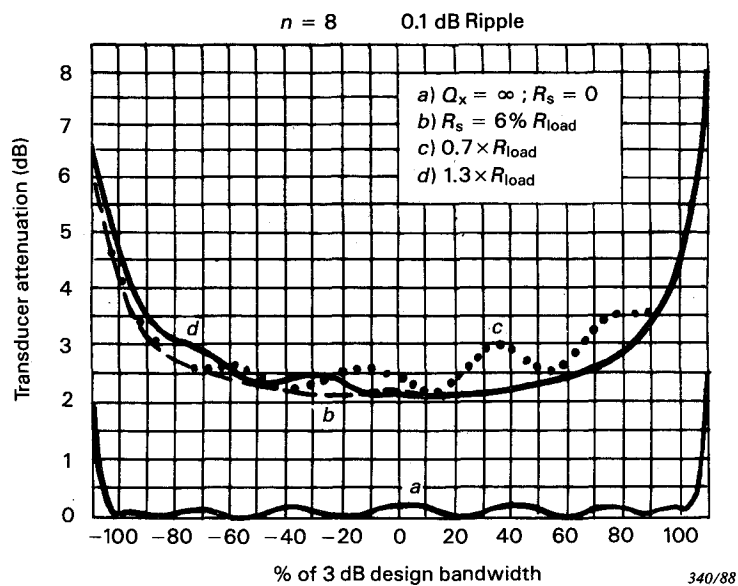


FIG. 22. — Effect of termination error, resistance.

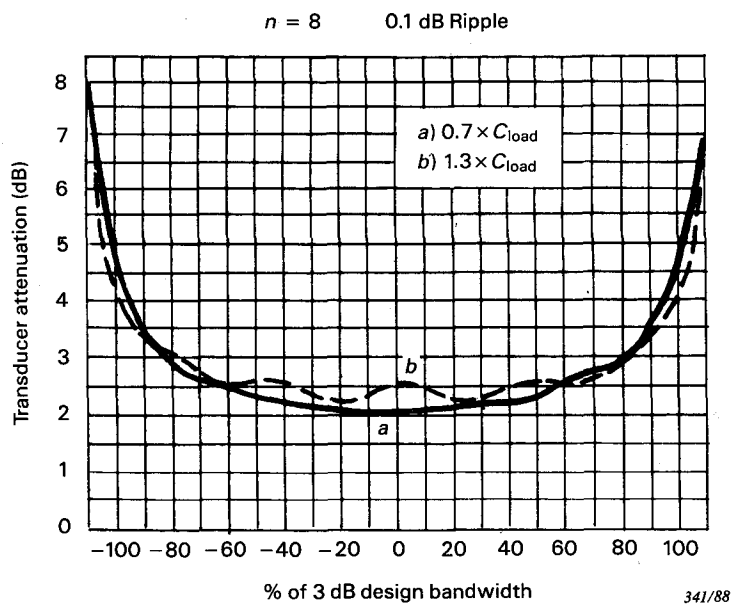


FIG. 23. — Effect of termination error, capacitance.

- détérioration des résonateurs à quartz;
- changement de la fréquence et/ou de la résistance d'un résonateur à quartz;
- changement de l'inductance;
- distorsion d'intermodulation.

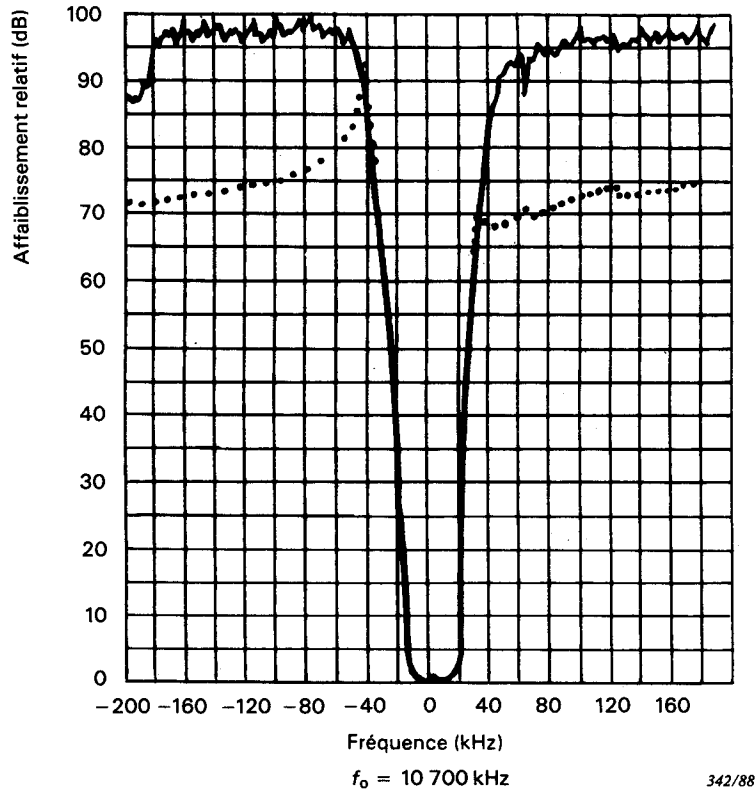


FIG. 24. — Effet du couplage parasite sur les caractéristiques de la bande atténuée d'un filtre à quartz.

Détérioration des résonateurs à quartz

La cause peut provenir de la fréquence du signal et de la charge incorrecte du filtre. La sensibilité aux niveaux d'excitation élevés dépend fortement de la fréquence de résonance des résonateurs à quartz. Même si les conditions normales sont satisfaisantes, les implications des essais ou d'autres conditions anormales, telles que le filtre en circuit ouvert à ses bornes de sortie, doivent être prises en considération, car une puissance trop importante pourrait être appliquée au résonateur à quartz.

Changement de la fréquence et/ou de la résistance d'un résonateur à quartz

Les niveaux maximaux dans les limites desquels on demande au filtre de fonctionner doivent normalement être spécifiés. Cela est plus important pour les filtres à bande très étroite qui nécessitent une plus grande stabilité de la fréquence que pour les filtres à large bande. Les filtres utilisant des résonateurs à quartz basse fréquence ne doivent normalement pas être soumis à des niveaux d'excitation supérieurs à 1 mW lorsqu'ils sont correctement chargés, sauf accord explicite du fabricant. Pour les filtres dans lesquels on utilise des résonateurs vibrant en cisaillement d'épaisseur, des niveaux d'entrée jusqu'à 10 mW sont normalement acceptables lorsqu'ils sont correctement chargés.

- crystal resonator damage;
- crystal resonator frequency and/or resistance change;
- inductance change;
- intermodulation distortion.

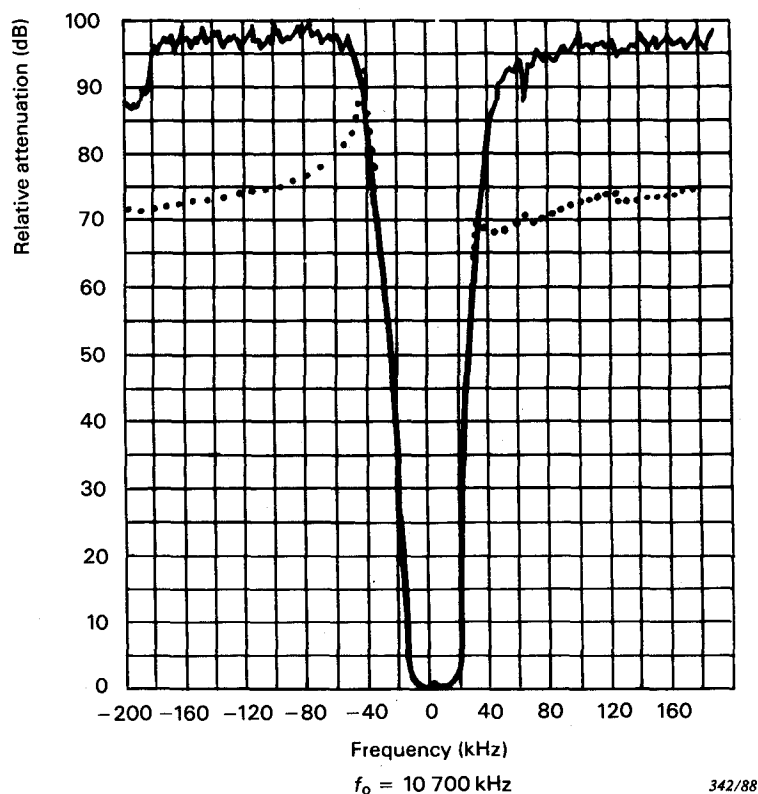


FIG. 24. — Effect of stray coupling on stop-band characteristics of a crystal filter.

Crystal resonator damage

This may depend on signal frequency and whether the filter is correctly loaded. Sensitivity to high drive levels will be highly dependent on the resonance frequency of the crystal elements. Even if normal conditions are satisfactory, the implications of testing and other abnormal conditions such as the filter being open-circuited at the output terminals should be considered, since this could result in substantially greater power reaching the crystal resonator.

Crystal resonator frequency and/or resistance change

The maximum levels at which the filter is required to operate within limits should be stated. For very narrow bandwidths, this will be more important than for wider bandwidth filters due to the greater frequency stability required. Filters using low-frequency crystals should not be subjected to drive levels in excess of 1 mW when correctly terminated unless the manufacturer specifically agrees to it. For filters using thickness shear resonators, drive levels up to 10 mW when correctly terminated are normally acceptable.

Le niveau d'excitation maximal autorisé peut être plus élevé pour les fréquences dans la bande atténuée que pour celles dans la bande passante.

A des niveaux d'excitation très bas comme ceux qui peuvent être appliqués dans les récepteurs de communication ou dans les analyseurs de spectre, les effets non linéaires des résonateurs à quartz peuvent affecter les caractéristiques des filtres.

Variations de l'inductance

Ces variations sont habituellement négligeables pour les filtres haute fréquence, mais doivent normalement être prises en considération dans le cas des filtres basse fréquence. Quand il passe du courant continu dans le transformateur d'entrée ou dans celui de sortie d'un filtre, le niveau du courant continu doit normalement faire l'objet d'un accord avec le fabricant.

7. Méthodes de mesure

Les méthodes de mesure doivent être conformes au Chapitre II, Conditions d'essais, de la Publication 368-1 de la CEI.

8. Données techniques destinées à accompagner une commande

Les spécifications particulières ainsi que les spécifications nationales ou les feuilles de caractéristiques publiées par les constructeurs détermineront les combinaisons possibles de fréquence de référence, de largeur de la bande passante, d'ondulation, de facteur de forme, d'impédance de charge, etc. Ces spécifications particulières sont groupées pour couvrir une large gamme de filtres à quartz possédant des caractéristiques normalisées. On ne saurait trop insister sur le fait que l'utilisateur devrait, partout où cela est possible, choisir ses filtres à quartz à partir de ces spécifications particulières, même si cela peut l'amener à apporter de légères modifications à son circuit pour permettre l'emploi de filtres normalisés. Cela est particulièrement le cas dans la sélection de la fréquence de référence.

8.1 Procédure pour la commande d'un filtre

Lorsqu'un filtre à quartz, normalisé et choisi dans une liste publiée, peut satisfaire aux prescriptions, il suffit d'indiquer la spécification particulière correspondante.

Lorsque les prescriptions ne peuvent être respectées entièrement par une spécification particulière existante, il convient de citer la spécification avec les différences connues.

Dans le rare cas où les différences sont telles qu'il n'est pas raisonnable de les noter sur une spécification existante, on doit établir une nouvelle spécification semblable à celle qui est déjà utilisée comme spécification normalisée. Il faut noter que, lorsque des exigences spéciales sont spécifiées, cela conduit obligatoirement à des coûts supérieurs.

La liste ci-après indique les prescriptions à faire figurer dans les spécifications. Outre la spécification des limites attribuées aux caractéristiques choisies, il est également nécessaire de prescrire la sévérité de l'essai requis, c'est-à-dire la périodicité selon laquelle l'essai est effectué, le pourcentage à essayer et le nombre toléré de défauts.

The maximum allowed input level may be higher for frequencies in the stop band than for those in the pass band.

At very low drive levels that may be experienced in communication receivers or spectrum analyzers, the filter characteristics may be affected due to non-linear effects of the crystal resonators.

Inductance changes

These are usually negligible for high-frequency filters but should be considered for low-frequency filters. Where d.c. is passing through the input or output filter transformer, the direct current level should be agreed upon with the manufacturer.

7. Measuring methods

The measuring methods shall be in accordance with Chapter II, Test conditions, of IEC Publication 368-1.

8. Technical data to accompany order form

Detail specifications and national specifications or the data sheets issued by manufacturers will define the available combinations of reference frequency, pass bandwidth, ripple, shape factor, terminating impedance, etc. These specifications are compiled to include a wide variety of crystal filters with standardized characteristics. It cannot be over-emphasized that the user should, wherever possible, select his crystal filters from such specifications, when available, even if it may necessitate making small modifications to his circuit to enable standard filters to be used. This applies particularly to the selection of the reference frequency.

8.1 Ordering procedure

When the requirements can be met by a standard crystal filter chosen from a published list, it will be sufficient to specify the corresponding detail specification.

When the requirements cannot wholly be met by an existing detail specification, the detail specification should be quoted, together with known differences.

In a rare case, where the differences are such that it is not reasonable to quote an existing detail specification, a new sheet is to be prepared in a similar form to that already used for standard detail specifications. It should be noted that if any special requirements are called for this will invariably lead to increased cost.

The following list of requirements is for guidance when writing specifications. In addition to the fixing of limits for the characteristics chosen, it is also necessary to include the severity of the testing required, i.e., how often the test shall be performed, the percentage to be tested and the acceptable failure rate.

8.2 *Prescriptions obligatoires*

Prescriptions	Paragraphe et chapitre de la Publication 368-1 de la CEI
8.2.1 Application	
8.2.2 Description	
8.2.2.1 Prescriptions électriques	
1) fréquence de référence	I/4.3
2) caractéristiques de la bande passante	I/4.4
— bande passante à ... dB	I/4.5
— ondulation maximale	I/4.19
— affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante	I/4.11
3) affaiblissement relatif dans la bande de transition	I/4.8
4) affaiblissement relatif dans la bande atténuée de ... à	I/4.7
— résonances indésirables	I/3.6
5) impédances de charge	I/3.14
— portion active des impédances de charge	
— portion réactive des impédances de charge	
6) niveau d'entrée maximal	I/3.10
7) résistance d'isolement	II/5
8.2.2.2 Conditions d'environnement spécifiées	
1) gamme de températures	I/8.2
— de fonctionnement	
— de service	
— de stockage	
2) secousses	II/13
3) chocs ²	II/15
4) vibrations	II/14
5) humidité	II/17.2, 17.4
6) étanchéité	II/7
8.2.2.3 Caractéristiques physiques	
1) longueur	
2) largeur	
3) hauteur	
4) marquage	I/9
5) bornes et accessoires de montage	
6) poids	
8.2.2.4 Prescriptions pour le contrôle	
1) spécifications applicables	
2) autorité d'inspection	
3) niveaux de qualité acceptables	
4) essais de type	
5) contrôle de réception	
8.3 <i>Prescriptions facultatives</i>	
8.3.1 Prescriptions pour les caractéristiques électriques	
1) caractéristiques de phase	I/4.10, 4.2

8.2 *Mandatory requirements*

Requirements

IEC Publication
368-1
Chapter/Clause

8.2.1 Application

8.2.2 Description

8.2.2.1 Electrical requirements

- 1) reference frequency I/4.3
- 2) pass-band characteristics I/4.4
 - bandwidth at ... dB I/4.5
 - maximum ripple I/4.19
 - minimum transducer attenuation in pass band I/4.11
- 3) transition band relative attenuation I/4.8
- 4) stop-band relative attenuation from ... to I/4.7
 - unwanted responses I/3.6
- 5) load impedances I/3.14
 - resistive portion of load impedances
 - reactive portion of load impedances
- 6) maximum input level I/3.10
- 7) insulation resistance II/5

8.2.2.2 Environmental requirements

- 1) temperature range I/8.2
 - operating
 - operable
 - storage
- 2) bump II/13
- 3) shock II/15
- 4) vibration II/14
- 5) humidity II/17.2, 17.4
- 6) sealing II/7

8.2.2.3 Physical requirements

- 1) length
- 2) width
- 3) height
- 4) marking I/9
- 5) terminals and mounting accessories
- 6) weight

8.2.2.4 Inspection requirements

- 1) related specifications
- 2) inspection authority
- 3) acceptable quality levels
- 4) type tests
- 5) incoming inspection

8.3 *Optional requirements*

8.3.1 Electrical requirements

- 1) phase characteristics I/4.10, 4.2

2) caractéristiques du retard de groupe	I/4.9, 4.2
3) impédance d'entrée	I/3.12
4) affaiblissement d'écho	II/4.1.4
5) intermodulation	II/4.1.5

8.3.2 Conditions d'environnement spécifiées

1) vieillissement	II/9
2) robustesse des sorties	II/10
3) essai de traction sur les sorties	II/10.1
4) essai de couple	II/10.2
5) accélération constante	II/16
6) soudabilité des sorties	II/11
7) variations rapides de température	II/12
8) séquence climatique	II/17
— chaleur sèche	II/17.1
— essai accéléré de chaleur humide, premier cycle	II/17.2
— froid	II/17.3
— essai accéléré de chaleur humide, cycles restants	II/17.4
— chaleur humide, essai de longue durée	II/18
9) basse pression atmosphérique	II/19
10) moisissures	II/20

Recommandations:

1. — Toujours décrire l'application.

Le type d'application d'un filtre doit toujours être décrit. La spécification des exigences à remplir par le filtre, et par le circuit dans lequel il sera utilisé, offre de nombreux avantages non seulement pour le fabricant, mais aussi pour l'utilisateur. Le fabricant peut, d'après son expérience, proposer une meilleure solution entraînant la modification du circuit.

2. — Toujours spécifier les tolérances et les gammes.

Dans la spécification des prescriptions électriques et physiques, il convient de donner non seulement les valeurs nominales mais aussi les tolérances admissibles maximales.

Dans un filtre dissymétrique (filtre BLU), il est recommandé que les conditions pour la bande atténuée et pour la bande passante soient spécifiées en se référant à des fréquences précises plutôt que de définir les largeurs de bande dans les deux régions.

9. Facteurs affectant le coût des filtres à quartz

Introduction

Presque tous les facteurs qui concernent la spécification des filtres à quartz affectent leur coût et leur disponibilité commerciale. L'information plus détaillée sur la disponibilité commerciale et les limitations des filtres à quartz est donnée à l'article 5. Une revue générale des caractéristiques saillantes, donnée dans le tableau I, fournit aussi une information essentielle sur les facteurs affectant le coût des filtres à quartz.

Le présent article appelle l'attention seulement sur les facteurs les plus importants affectant le coût des filtres à quartz. Les relations existantes entre ces facteurs sont soulignées.

9.1 *Fréquence centrale*

La fréquence centrale d'un filtre à quartz doit être choisie seulement après consultation avec le fabricant. Le type de résonateur à quartz à incorporer dans le filtre sera aussi déterminé par la fréquence centrale choisie. Comme beaucoup de résonateurs à quartz sont fabriqués sur mesure, le coût d'un tel résonateur est affecté par de nombreux facteurs. Il est recommandé que la fréquence centrale soit choisie dans les gammes de fréquences pour lesquelles on considère que le fabricant est déjà apte à produire des filtres et pour lesquelles les résonateurs à quartz peuvent être construits sans un travail de développement complètement nouveau.

2) group-delay characteristics	I/4.9, 4.2
3) input impedance	I/3.12
4) return attenuation	II/4.1.4
5) intermodulation	II/4.1.5
8.3.2 Environmental requirements	
1) ageing	II/9
2) robustness of terminations	II/10
3) tensile test on terminations	II/10.1
4) torque test	II/10.2
5) acceleration, steady state	II/16
6) solderability of terminations	II/11
7) rapid change of temperature	II/12
8) climatic sequence	II/17
— dry heat	II/17.1
— accelerated damp heat, first cycle	II/17.2
— cold	II/17.3
— accelerated damp heat, remaining cycles	II/17.4
— damp heat, long term exposure	II/18
9) low-air pressure	II/19
10) mould growth	II/20

Recommendations:

1. — Always describe the application.

The type of application of a filter should always be stated. The specification of requirements to be met by the filter and of the circuit in which it will be used offers a number of advantages to both manufacturer and user. The manufacturer may, on the basis of his experience, propose a better solution involving modification to the circuit.

2. — Always give tolerances and ranges.

Both nominal values and maximum allowable tolerances should be stated when specifying the electrical and physical requirements.

In an asymmetrical filter (SSB filter) it is recommended that the stop-band and pass-band requirements be specified with reference to precise frequencies rather than by quoting bandwidths in both regions.

9. Factors affecting cost of crystal filters

Introduction

Almost all factors concerning the specification for crystal filters affect their cost and availability. Details of the availability and limitations of crystal filters are discussed in Clause 5. The general review of the main filter characteristics given in Table I also provides essential information on the factors affecting the cost of crystal filters.

This clause considers only the most important factors affecting the cost of filters. The relationships between these factors are pointed out.

9.1 Centre frequency

The centre frequency of a crystal filter should be selected only after consulting the manufacturer. The type of resonator to be incorporated in the filter will also be determined by the chosen centre frequency. Because many crystal resonators are custom-made devices, the cost of such a resonator will be affected by numerous factors. It is recommended that a centre frequency be selected within the frequency ranges for which the manufacturer is already considered to be able to produce filters and within which crystal resonators can be produced without entirely new development work.

En prenant en considération les limitations de largeur de la bande passante, la fréquence centrale d'un filtre doit être spécifiée dans une gamme de fréquence telle que la largeur de bande exigée soit obtenue par réalisation d'un filtre à bande étroite, sachant que les filtres à bande intermédiaire sont considérés comme étant les plus coûteux, suivis par les filtres à large bande et à bande étroite.

9.2 *Facteur de forme – Affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante*

La relation entre le facteur de forme et l'affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante d'un côté, et le prix d'un filtre de l'autre, est très importante. Un facteur de forme plus bas exige un ordre de filtre plus élevé, c'est-à-dire un plus grand nombre de résonateurs. Cela mènera à un coût relatif plus grand et à un affaiblissement de transmission minimal dans la bande passante plus élevée. L'utilisateur a toujours besoin d'un filtre ayant une sélectivité la plus élevée possible au plus bas prix. Il est recommandé de consulter le fabricant avant de spécifier les prescriptions pour le facteur de forme, afin qu'une comparaison des coûts puisse être faite.

9.3 *Affaiblissement dans la bande atténuée*

Tous les points examinés dans le paragraphe 9.2 s'appliquent aussi à l'affaiblissement dans la bande atténuée. L'utilisateur doit savoir ce qui peut être atteint et maintenu dans son équipement, c'est-à-dire les valeurs de l'affaiblissement dans la bande atténuée. Une exigence pour un affaiblissement trop élevé dans la bande atténuée et qui ne peut pas être satisfaite par l'équipement, conduit à un coût inutile.

9.4 *Linéarité de phase et distorsion du retard de groupe*

Les filtres à quartz spéciaux sont des filtres qui ont été conçus pour optimiser une ou plusieurs des caractéristiques suivantes: réponse à un échelon, réponse aux impulsions à radiofréquence de durée spécifiée, réponse en impulsion par rapport à la fréquence (sélectivité transitoire), réponse à un signal balayé en ondes entretenues, caractéristique de phase/fréquence et caractéristique de retard de groupe/fréquence.

Les difficultés d'application des approximations appropriées pour la réalisation de ces filtres, des tolérances très sévères sur tous les éléments d'un filtre, des méthodes de mesure compliquées, etc., font que ce groupe de filtres est plus coûteux, sous tous les aspects, que les autres filtres à quartz. L'utilisateur doit étudier le savoir-faire technologique du fabricant avant d'écrire une spécification, pour qu'ils puissent ensemble atteindre un compromis et éviter une «sur-spécification».

9.5 *Conditions d'environnement*

Effet des conditions climatiques et mécaniques sur le prix des filtres à quartz

La CEI donne une norme d'essais qui est généralement acceptée comme fixant le niveau de référence minimal qui couvre les applications les plus souvent rencontrées. Des essais supplémentaires ou spéciaux peuvent être coûteux car, dans le cas le plus élémentaire, le fabricant peut ne pas disposer d'un matériel d'essai correspondant ou, dans d'autres cas, ces essais peuvent nécessiter la réalisation d'un filtre spécial.

L'utilisateur ne doit spécifier que les prescriptions qui peuvent être atteintes par l'équipement. En outre, la sévérité des prescriptions d'utilisateur doit normalement être réduite au minimum, car une sévérité excessive pour les essais conduit par la suite à des techniques de réalisation plus compliquées, ce qui mène à un coût considérablement plus élevé.

9.6 *Considérations générales sur les essais*

Le coût et la durée des essais peuvent être très élevés. C'est pourquoi les méthodes d'essais doivent normalement être définies avant la livraison et être incorporées dans le contrat entre l'utilisateur et le fabricant.

Taking into account the limitations on pass bandwidth, the centre frequency of a filter is to be specified within such a frequency range that the bandwidth required is obtainable by manufacturing a narrow-band filter, since it is usually found that intermediate-band filters are most expensive, followed by wide-band and narrow-band filters.

9.2 *Shape factor – Minimum transducer attenuation in the pass band*

The way in which the cost of the filter depends on the shape factor and minimum transducer attenuation in the pass band is extremely important. A lower shape factor requires a higher order of the filter, i.e., a greater number of resonators; this will lead to increased relative cost and higher minimum transducer attenuation in the pass band. A user always needs a filter with the highest possible selectivity at the lowest possible price. Consultation with the manufacturer is recommended before specifying the requirements for shape factor so that a comparison of costs can be made.

9.3 *Stop-band attenuation*

All the points stated in Sub-clause 9.2 apply to the stop-band attenuation as well. A user should be aware of what is attainable in practical applications, i.e., the values of stop-band attenuation achievable and maintainable in his equipment. A requirement for stop-band attenuation too high to be achieved by the equipment represents unnecessary cost.

9.4 *Phase linearity and group delay distortion*

Crystal filters designed to optimize one or more of the following characteristics: step response, response to an RF pulse of specific duration, pulse response versus frequency (transient selectivity), response to a swept CW signal, phase versus frequency and group delay versus frequency are special forms of crystal filters.

Difficulties in applying appropriate approximations to the realization of these filters, very severe tolerances on all filter elements, complicated measurement methods, etc., make this filter group more expensive, in all respects, in comparison with other crystal filters. A user should study the technological capability of a manufacturer before writing the specification, so that they can together reach a compromise and avoid overspecification.

9.5 *Environmental conditions*

Effect of environmental conditions upon cost of crystal filters

IEC gives standard tests which are generally accepted as being the minimum reference level which adequately covers most usual applications. Additional or special tests can be expensive to perform because, in the simplest case, the manufacturer may not have access to the testing equipment or, in other cases, may need to design special "non-standard" filters.

A user should specify only requirements corresponding to what is achievable by the equipment. In addition, the severity of user's requirements should be reduced to a minimum, since excess severity of testing results in more complicated production techniques and this leads to considerably higher cost.

9.6 *General testing considerations*

The cost and time of testing may be very high. Test methods should therefore be defined prior to delivery and included in the contract between user and manufacturer.

Les filtres sont livrés comme suit:

- a) sans compte rendu d'essais;
- b) avec compte rendu certifié d'essais;
- c) avec essais d'acceptation.

Dans les cas *b)* et *c)*, la spécification particulière doit normalement prescrire les essais de l'examen visuel, les caractéristiques mécaniques, climatiques et électriques ainsi que la forme du compte rendu d'essais à soumettre. De plus, dans le cas *c)*, il convient de réfléchir attentivement à l'importance de chacun des paramètres et de vérifier si l'on peut les considérer comme «critiques», «majeurs» ou «mineurs» pour chaque prescription particulière. Le niveau de qualité acceptable doit normalement être aussi spécifié.

La Publication 368-1, Chapitre II, Conditions d'essais, de la CEI donne des détails sur les méthodes d'essai normalisées. En général, celles-ci peuvent être utilisées dans chaque situation. L'équipement que l'on trouve dans le commerce peut être utilisé à condition qu'une corrélation ait été établie avec le circuit de mesure présenté.

La méthode la plus coûteuse consiste à livrer du matériel spécial et à exiger des essais spécifiques qui ne sont pas incorporés dans des procédures connues.

Filters are supplied as follows:

- a) with no test record;
- b) with certified test record;
- c) with acceptance tests.

In cases *b)* and *c)*, the detail specification should specify the visual examination and the electrical and environmental characteristics to be tested as well as the form of the test record to be submitted. In addition, in case *c)*, careful thought should be given to the importance of each of the parameters by assessing whether they can be considered as “critical”, “major” or “minor” for any particular requirement. The acceptable quality level should also be stated.

Details of standard test methods are covered in IEC Publication 368-1, Chapter II, Test conditions. In general, these may be used in any situation. Commercially available equipment may be used provided a correlation with the measuring circuit described has been established.

The most expensive method is to supply special equipment and to request specific tests which are not included in known procedures.

BIBLIOGRAPHIE/BIBLIOGRAPHY

Les textes cités ci-dessous ne sont mentionnés qu'à titre indicatif; ils ne sont pas disponibles auprès du Bureau central de la CEI.

The references given below are quoted for information purposes only; they are not obtainable from the IEC Central Office.

Ouvrages/Books

1. Bosiy, N.: "Electricheskie Filtry [Electrical Filters]", Technicheskaya Literatura, Kiev, 1960.
2. Heising, R.A., ed.: "Quartz Crystals for Electrical Circuits", D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, New Jersey, 1964.
3. Herzog, W.: «Siebschaltungen mit Schwingkristallen», Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1962.
4. Indjoundjian, D. & Andrieux, P.: «Les Filtrés à Cristaux Piézoélectriques», Gauthier-Villars, Paris, 1953.
5. Mason, W.P.: "Electromechanical Transducers and Wave Filters", D. Van Nostrand Co., Inc., Princeton, New Jersey, 1948.
6. Velikin, Y., Gelmont, Z. & Zeljah, E.: "Piezoelectricheskie Filtry [Piezoelectric Filters]", Svjaz, Moscow, 1966.
7. Vigoureux, P. & Booth, C.F.: "Quartz Vibrations and their Applications", H.M. Stationery Office, London, 1950.
8. Zverev, A.: "Handbook of Filter Synthesis", John Wiley, New York, 1967.
9. Humpherys, D.: "The Analysis, Design and Synthesis of Electrical Filters", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1970.
10. Sheahan, D. & Johnson, R.: "Modern Crystal Mechanical Filters", IEEE Press, 1977.
11. Temes, G. & Mitra, S.: "Modern Filter Theory and Design", John Wiley, New York, 1973.

Articles

1. Beaver, W.: "Theory and Design Principles of the Monolithic Crystal Filter", Ph.D. Thesis, Lehigh University, 1967.
2. Bechmann, R. & Priebe, F.K.: "Crystals for Filter Application", Frequency 1, 19, January/February, 18, May/June, 18, November/December, 1963.
3. Bechmann, R., Lukaszek, T.J. & Wasshausen, H.: "Improvements in HF and VHF Quartz Filter Crystals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, 1160, 1965.
4. Bidart, M.: «Méthodes modernes de Conception d'un Filtre à Quartz», *L'onde électrique*, vol. 51, avril 1971.
5. Birch, J.: "A Selective Damping Technique for the Suppression of Unwanted Resonances in High-Frequency Filter Crystals", *Proceedings of the IEEE* 109B, Supp. 22, 317, 1962.
6. Curran, D.R. & Koneval, D.J.: "Energy Trapping and the Design of Single and Multi-Electrode Filter Crystals", *Proceedings of the 18th Frequency Control Symposium*, 1964.
7. Curran, D.R. & Koneval, D.J.: "Factors in the Design of VHF Filter Crystal", *Proceedings of the 19th Frequency Control Symposium*, 1965.
8. Christian, E. & Eisenmann, E.: "Consideration for the Design of Crystal Filters", *Proceedings of the 3rd Allerton Conference on Circuit System Theory*, October 1965.
9. Dishal, M.: "Condensed Version of Modern Network Theory Design Data for One Class of Crystal Filters", *IRE National Convention Records*, Pt. 8, 1957.
10. Dishal, M.: "Modern Network Theory Design of Single-Side-Band Crystal Ladder Filters", *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, No. 9, September 1965.
11. Dillan, L.R. & Lind, L.F.: "Cascade Synthesis of Monolithic Crystal Filters Possessing Finite Transmission Zeros", *Circuit Theory and Applications*, vol. 3, 1975.
12. Humpherys, D.: "Network-Synthesis of Narrow Band Crystal Filters", *Electro-Technology*, November 1965.
13. Kosowsky, D.I.: "High-Frequency Crystal Filter Design Techniques and Applications", *Proceedings of the IRE*, 46, 419, 1958.
14. Kosowsky, D.I.: "Synthesis and Realization of Crystal Filters", *M.I.T. Technical Report*, No. 298, 1955.
15. Kostrev, V.E.: "Sintez kvarcevih polinomialnih filtrow", *Electrosvjaz*, No 1, 1966.
16. Nakazawa, Y.: "High-Frequency Crystal Electromechanical Filters", *Proceedings of the 16th Frequency Control Symposium*, 1962.
17. O'Meara, T.R.: "The Synthesis of a Class of Wide-Band Lattice Crystal Filters with Symmetrical Insertion Loss", *Transactions of the IRE*, CT-7, 121, 1960.
18. O'Meara, T.R.: "On the Synthesis of the Crystal-Capacitor Lattice-Filter with Symmetrical Insertion Loss Characteristics", *Transactions of the IRE on Circuit Theory*, June 1958.
19. Onoe, M.: "Equivalent Circuits of Piezoelectric Vibrators having Split Electrodes", *J. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan*, 37, 113, 1954.
20. Onoe, M.: "Limitations in Crystal Filter Design due to Capacitance Ratios", *J. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan*, 37, 480, 1954.
21. Onoe, M. & Jumonji, H.: "Analysis of Piezoelectric Resonators Vibrating in Trapped Energy Modes", *J. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan*, 48, 1574, 1965.
22. Onoe, M., Jumonji, H. & Kobori, N.: "High-Frequency Crystal Filters Employing Multiple Mode Resonators Vibrating in Trapped Energy Modes", *Proceedings of the 20th Frequency Control Symposium*, 1966.
23. Onoe, M.: "Crystal, Ceramic and Mechanical Filters in Japan", *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, No., 1, January 1979.

24. Poschenrieder, W.: «Steile Quartzfilter grosser Bandbreite in Abzweigschaltung», *NTZ*, 9, 561, 1956.
25. Schoeffler, J.D.: "A Solution to the Approximation and Realization Problems for Crystal Ladder Filters", *IEEE International Convention Records*, 1964.
26. Schoeffler, J.D.: "On the Existence and Realization of Crystal Ladder Filters", *Proceedings of the 1st Allerton Conference on Systems and Circuit Theory*, November 1963.
27. Schoeffler, J.D.: "Insertion Loss Design of Symmetrical Lattice Piezoelectric Resonant Filters with Symmetrical or Unsymmetrical Pass Bands", *Transactions of the IRE*, CT-9, 251, 1962.
28. Shockley, W, Curran, D.R. & Koneval, D.H.: "Energy Trapping and Related Studies of Multiple Electrode Filter Crystals", *Proceedings of the 17th Frequency Control Symposium*, 1963.
29. Sykes, R.A.: "A New Approach to the Design of High-Frequency Crystal Filters", *IRE National Convention Records*, Pt. 2, 18, 1958.
30. Sykes, R.A. & Beaver, W.D.: "High-Frequency Monolithic Crystal Filters with Possible Applications to Single Frequency and Single Side Band Use", *Proceedings of the 20th Frequency Control Symposium*, 1966.
31. Szentirmai, G.: "The Synthesis of Narrow-Band Crystal Band-Elimination Filters", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. CT-15, No. 4, December 1968.
32. Sheanan, D.F. & Johnson, R.A.: "Crystal and Mechanical Filters", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 22, No. 2, February 1975.
33. Smythe, R.C.: "The Synthesis of Crystal-Capacitor Tandem Lattice All-Pole Band-Pass Filters on the Insertion-Loss Basis", *Proceedings of the 18th Frequency Control Symposium*, 1964.
34. Simmonds, T.H.: "The Evolution of the Discrete Crystal Single Side-Band Selection Filter in the Bell System", *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, No. 1, January 1979.
35. Smith, W.L.: "The Application of Piezoelectric Coupled-Resonator Devices to Communications Systems", *Proceedings of the 22nd Frequency Control Symposium*, 1968.
36. Sheanan, D.F.: "Polyolithic Crystal Filters", *Proceedings of the 29th Frequency Control Symposium*, 1975.
37. Waren, A.D., Gerber, W.J. & Curran, D.R.: "Application of Energy Trapping to Quartz-Filter Design", *Proceedings of the 19th Frequency Control Symposium*, 1965.
38. Waren, A.D. & Schoeffler, J.D.: "Approximation Problems for Resonator Ladder Filters", *Transactions of the IEEE*, CT-12, 215, 1965.
39. Waren, A.D.: "Approximation and Realization Problems for Crystal Ladder Filters", Ph.D. Thesis, Case Institute of Technology, 1964.
40. Yoda, H.: "Quartz Crystal Mechanical Filter", *Proceedings of the 13th Frequency Control Symposium*, 1959.
41. Yee, H.K.H.: "Finite-Pole Frequencies in Monolithic Crystal Filters", *Proceedings of the IEEE*, January 1971.
42. Zverev, A.I. & Humpherys, D.S.: "The Synthesis of Symmetrical Nonelementary Selective Networks with Crystals", *Proceedings of the 1st Symposium on Network Theory, Belgrade*, February 1968.

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

ICS 31.140
