

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 368A

1973

Premier complément à la Publication 368 (1971)

Filtres piézoélectriques

First supplement to Publication 368 (1971)

Piezoelectric filters



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

Révision de la présente publication

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

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
Publié trimestriellement
- **Rapport d'activité de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie utilisée dans la présente publication

Seuls sont définis ici les termes spéciaux se rapportant à la présente publication.

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Symboles graphiques et littéraux

Seuls les symboles graphiques et littéraux spéciaux sont inclus dans la présente publication.

Le recueil complet des symboles graphiques approuvés par la CEI fait l'objet de la Publication 117 de la CEI.

Les symboles littéraux et autres signes approuvés par la CEI font l'objet de la Publication 27 de la CEI.

Autres publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture qui énumère les autres publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

Revision 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 on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
Published quarterly
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology used in this publication

Only special terms required for the purpose of this publication are defined herein.

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

Graphical and letter symbols

Only special graphical and letter symbols are included in this publication.

The complete series of graphical symbols approved by the IEC is given in IEC Publication 117.

Letter symbols and other signs approved by the IEC are contained in IEC Publication 27.

Other IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the inside of the back cover which lists other IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 368A

1973

Premier complément à la Publication 368 (1971)

Filtres piézoélectriques

First supplement to Publication 368 (1971)

Piezoelectric filters



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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembé
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
 CHAPITRE III: GUIDE D'EMPLOI DES FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES	
INTRODUCTION	6
 SECTION UN — LES FILTRES À QUARTZ	
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Introduction technique	8
3. Résonateurs à quartz pour filtres	8
4. Caractéristiques fondamentales des filtres	12
4.1 Caractéristiques générales	12
4.2 Disponibilité commerciale et caractéristiques limites	16
4.3 Niveaux d'entrée	24
5. Emploi et remarques pratiques	26
6. Méthodes de mesure	26
7. Marquage	26
8. Procédure pour la commande d'un filtre	28
9. Termes et définitions	30
BIBLIOGRAPHIE	32
FIGURES	34

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF PIEZOELECTRIC FILTERS	
INTRODUCTION	7
SECTION ONE — QUARTZ CRYSTAL FILTERS	
Clause	
1. Scope	7
2. Technical introduction	9
3. Quartz crystal resonators for filters	9
4. Basic filter characteristics	13
4.1 General characteristics	13
4.2 Availability and limitations	17
4.3 Input levels	25
5. Applications and practical remarks	27
6. Measuring methods	27
7. Marking	27
8. Ordering procedure	29
9. Terms and definitions	31
BIBLIOGRAPHY	32
FIGURES	35

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PREMIER COMPLÉMENT À LA PUBLICATION 368 (1971)

FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 49 de la CEI: Dispositifs piézo-électriques pour la commande et le choix de la fréquence.

Elle constitue le chapitre III de la Publication 368 de la CEI.

Un premier projet de ce chapitre III fut discuté lors de la réunion tenue à Milan en juin 1968. A la suite de cette réunion, un projet définitif, document 49(Bureau Central)58, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en avril 1970.

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

Afrique du Sud (République d')	Israël
Allemagne	Japon
Australie	Pays-Bas
Belgique	Suède
Canada	Suisse
Danemark	Tchécoslovaquie
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
Hongrie	Union des Républiques
Iran	Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 368 (1971)

PIEZOELECTRIC FILTERS

FOREWORD

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

PREFACE

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

It forms Chapter III of IEC Publication 368.

A first draft of Chapter III was discussed at the meeting held in Milan in June 1968. As a result of this meeting, a final draft, document 49(Central Office)58, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1970.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Japan
Belgium	Netherlands
Canada	South Africa (Republic of)
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Germany	Turkey
Hungary	Union of Soviet
Iran	Socialist Republics
Israel	United States of America

PREMIER COMPLÉMENT À LA PUBLICATION 368 (1971)

FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES

CHAPITRE III: GUIDE D'EMPLOI DES FILTRES PIÉZOÉLECTRIQUES

INTRODUCTION

Les filtres électriques sont largement utilisés en communication, télémesure, navigation et pour les appareils de mesure. Dans de nombreux cas, les fonctions d'amplification et de filtrage sont combinées comme dans le cas des transformateurs de liaison entre des lampes ou des transistors. Des exigences récentes portant sur une sélectivité plus grande, une caractéristique de la bande passante plus plate, une atténuation dans la bande d'arrêt plus élevée, une stabilité plus grande et un vieillissement plus faible ont amené l'utilisation accrue de filtres comme dispositifs indépendants distincts des amplificateurs. L'arrivée des circuits intégrés a accéléré cette tendance.

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 surtension (Q), les caractéristiques de température, 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. Ces deux types présentent des similitudes mais aussi des divergences. Cette recommandation a été établie pour répondre au désir généralement exprimé, tant par les usagers que par les constructeurs, de disposer d'un guide d'emploi des filtres piézoélectriques afin que ceux-ci puissent être utilisés au mieux. La section un se rapporte aux filtres à quartz et la section deux se rapporte aux filtres à céramique.

SECTION UN — FILTRES À QUARTZ

1. **Domaine d'application**

Le facteur de surtension (Q) élevé et la grande stabilité des résonateurs à quartz ont été utilisés pour obtenir des filtres électriques très sélectifs, qui sont habituellement appelés filtres à quartz. Les filtres à quartz sont maintenant largement utilisés en communication, télémesure, navigation et pour les appareils de mesure, ainsi que dans les systèmes porteurs à longue distance. Bien que leurs spécifications soient très diverses, la plupart des besoins peuvent être couverts par un petit nombre de types de filtres à quartz normalisés.

Le domaine d'application de cette recommandation se limite principalement aux filtres passe-bande passifs fonctionnant dans la gamme de fréquences de 10 kHz à 100 MHz environ et qui sont disponibles dans le commerce en tant que composés séparés et indépendants. Ne sont pas considérés ici les filtres intégrés dans des systèmes plus complexes. Le but de cette recommandation n'est pas de développer des notions théoriques, ni d'essayer de couvrir tous les cas qui peuvent se présenter dans la pratique. Ce guide n'a été rédigé que pour attirer l'attention sur quelques-uns des problèmes fondamentaux que l'utilisateur devrait examiner avant de commander un filtre pour une nouvelle application. Une telle façon de procéder lui éviterait à coup sûr tout fonctionnement défectueux.

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 368 (1971)

PIEZOELECTRIC FILTERS

CHAPTER III: GUIDE TO THE USE OF PIEZOELECTRIC FILTERS

INTRODUCTION

Electrical filters are widely used in communication, telemetry, navigation and measurement applications. In many cases, the amplification and the filtering are combined as in the case of interstage transformers between tubes or transistors. Recent demands for sharper selectivity, flatter pass-band characteristics, higher stop-band attenuation, higher stability and lower ageing have resulted in increasing use of filters as independent units separated from amplifiers. The advent of integrated circuits has accelerated this trend.

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 commercially.

There are two main types of piezoelectric filters: the quartz crystal filter and the ceramic filter. There are certain similarities as well as dissimilarities between these two types of filters. This recommendation has been compiled in response to a generally expressed desire on the part of both users and manufacturers for a guide to the use of piezoelectric filters, so that the filters may be used to their best advantage. Section One relates to quartz crystal filters and Section Two relates to ceramic filters.

SECTION ONE — QUARTZ CRYSTAL FILTERS

1. Scope

The high Q and the high stability of quartz crystal resonators have been used in obtaining very selective electrical filters, which are commonly called crystal filters. Crystal filters are now widely used in communication, telemetry, navigation and measurement as well as in long distance carrier systems. Although their specifications are very diverse, many of these needs can be served by a few standard types of crystal filters.

The scope of this recommendation is primarily limited to passive band-pass filters in the frequency range about 10 kHz to 100 MHz, which are commercially available as separate and independent units. Filters which are integrated into a larger system are not considered here. It is not the aim of this recommendation to explain theory, nor to attempt to cover all the eventualities which may arise in practical circumstances. This guide draws attention to some of the more fundamental questions which should be considered by the user before he places an order for a unit for a new application. Such a procedure will be the user's insurance against unsatisfactory performance.

Les feuilles particulières normalisées, telles que celles de la recommandation de la CEI, dont ce guide fait partie, 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 feuilles 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 feuilles 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.

Par opposition aux filtres classiques LC, les filtres à quartz offrent des avantages substantiels dans la construction et le prix de fabrication lorsque leurs fréquences de référence sont limitées à quelques gammes étroites de fréquences. Par conséquent, une commande qui ne spécifie pas une ou des fréquences de référence les plus utilisées habituellement peut être coûteuse.

Il faut comprendre que la normalisation n'est jamais stabilisée; elle est en continuelle évolution. Lorsque de nouveaux besoins se présentent, des feuilles particulières sont élaborées pour satisfaire à ces besoins après examen minutieux par la Commission Electrotechnique Internationale.

2. Introduction technique

Il est du plus grand intérêt pour l'utilisateur que le filtre satisfasse à une spécification particulière. Le choix des réseaux internes et des résonateurs à quartz pour satisfaire à cette spécification doit être laissé au fabricant.

Les caractéristiques du filtre sont habituellement exprimées par l'atténuation de transmission en fonction de la fréquence, comme il est indiqué à la figure 1, page 34. Une méthode normalisée pour la mesure de l'atténuation de transmission sera décrite à l'article 6. Dans certaines applications, des caractéristiques telles que la réponse de transition ou le retard de groupe sont plus importantes que l'atténuation de transmission. Ces caractéristiques spéciales ne sont pas examinées ici.

Les caractéristiques de l'atténuation de transmission sont spécifiées en plus par la fréquence de référence, l'atténuation de transmission minimale, l'ondulation dans la bande passante et le facteur de forme, dont les valeurs normalisées sont données dans la Publication 368 de la CEI. La spécification doit être satisfaite entre les températures minimales et maximales de la gamme de température de fonctionnement spécifiée. Cette condition doit être aussi remplie avant et après les essais d'environnement.

3. Résonateurs à quartz pour filtres

Une brève description des résonateurs à quartz est incluse pour que l'utilisateur puisse comprendre la possibilité de réalisation et les limitations dans la construction des filtres à quartz, imposées par les caractéristiques des résonateurs. Dans un filtre conventionnel, 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'atténuation de transmission qui devient alors finie au lieu d'être nulle dans la bande passante. Deuxièmement, ce qui est plus grave, c'est que la finesse de coupure peut être détériorée. Le second effet dépend principalement du facteur de surtension des composants, alors que le premier effet dépend, entre autres, des valeurs absolues des pertes.

Comme il sera décrit sous peu, un résonateur à quartz est équivalent à une combinaison d'éléments réactifs ayant un facteur de surtension (Q) très élevé qui est au moins deux fois supérieur au facteur de surtension (Q) des inductances conventionnelles. Un filtre à quartz utilise des résonateurs à quartz à la place des inductances et des condensateurs et tire avantage du

Standard article sheets, such as those of the IEC recommendation of which this guide forms a part, 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 sheets are compiled to include a wide range of crystal filters with standardized performances. It cannot be over-emphasized that the user should, wherever possible, select his crystal filters from these sheets, when available, even if it may lead to making small modifications to his circuit to enable standard filters to be used. This applies particularly to the selection of the reference frequency.

In contrast to conventional LC filters, quartz crystal filters offer substantial advantages in design and production costs, when their reference frequencies are limited to a few narrow frequency ranges. Hence, an order which does not specify one of the more commonly used reference frequencies may be uneconomical.

It should be understood that standardization is not a fixed, but a continuing process. As new requirements arise, article sheets are prepared to meet these requirements after careful consideration by the International Electrotechnical Commission.

2. Technical introduction

It is of prime interest to a user that the filter characteristics should satisfy a particular specification. The selection of internal networks and quartz crystal resonators to meet that specification should be at the option of the manufacturer.

Filter characteristics are usually expressed in terms of transducer attenuation as a function of frequency, as shown in Figure 1, page 35. A standard method for measuring transducer attenuation will be described in Clause 6. In some applications, such characteristics as transient response or group delay are more important than transducer attenuation. But these special characteristics are not considered here.

Transducer attenuation characteristics are further specified by reference frequency, minimum transducer attenuation, pass-band ripple and shape factor, of which standard values are given in IEC Publication 368. The specification is to be satisfied between the lowest and the highest temperature of the specified operating temperature range. This condition shall also be satisfied before and after environmental tests.

3. Quartz crystal resonators for filters

A brief description of crystal resonators is included here, so that a user may understand the feasibility and the limitation in the design of crystal filters due to the characteristics of resonators. In a conventional filter, inductors and capacitors are used as reactive elements. The inevitable losses associated with actual components yield twofold effects on filter characteristics. Firstly, they will add to the transducer attenuation which then becomes finite instead of zero in the pass band. Secondly, and which is more serious, the sharpness of cutoff may be spoiled. The second effect mostly depends on the Q of components, whereas the first effect depends, among other things, on absolute values of losses.

As will be described shortly, a quartz crystal resonator 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. A crystal filter uses quartz resonators in place of inductors and capacitors and takes advantage of the high Q of resonators to achieve sharpness of cutoff.

facteur de surtension (Q) élevé des résonateurs pour obtenir la finesse de coupure. La figure 2, page 36, montre une comparaison type d'un filtre à quartz avec un filtre classique; ces filtres sont conçus pour avoir des bandes passantes similaires. On peut voir que des coupures plus nettes et des pointes d'atténuation plus aiguës sont obtenues par l'utilisation des résonateurs à quartz, alors qu'il y a peu d'amélioration de l'atténuation d'insertion minimale. L'utilisation des résonateurs à quartz dans un filtre donne aussi des avantages supplémentaires tels qu'une meilleure caractéristique de température et de vieillissement, de petites dimensions et un poids plus faible.

Les caractéristiques électriques d'un résonateur à quartz peuvent être représentées par le circuit équivalent indiqué à la figure 3, page 37. Il consiste en une capacité parallèle C_0 et une branche dynamique comportant une inductance L_1 , une capacité C_1 et une résistance R_1 , en série. D'autres paramètres, commodes pour discuter des caractéristiques des résonateurs pour filtres, sont la fréquence de résonance série f_s , la fréquence de résonance parallèle f_p , le facteur de surtension (Q) et le rapport de capacité r , qui sont aussi définis dans la figure 3. Des résonateurs à quartz analogues sont largement utilisés pour la stabilisation de fréquence des oscillateurs. Il y a, cependant, certaines différences importantes entre les résonateurs pour filtres et les quartz pour oscillateurs. Dans le cas d'un quartz pour oscillateurs, le coefficient de température, les effets du vieillissement sur la fréquence de résonance et le facteur de surtension (Q) sont du plus grand intérêt. Ils sont aussi importants dans le cas d'un résonateur pour filtre, mais à un degré moindre.

Théoriquement, ils imposent la limite inférieure de largeur de bande utile d'un filtre à quartz. La largeur de bande de la plupart des filtres est habituellement beaucoup plus grande que cette limite.

Dans le cas d'un résonateur pour filtre, il est en plus nécessaire de spécifier 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 conventionnelles.

Par exemple:

- a) la gamme des inductances équivalentes possibles à une fréquence particulière n'excède pas environ 50, et pour les quartz fonctionnant aux hautes fréquences la gamme peut être inférieure à 5, comparée à la gamme de 1 000 ou plus pour des inductances conventionnelles acceptables, ou des capacités à une fréquence particulière. Cela impose des limitations sévères à la construction d'un filtre à quartz;
- b) la valeur élevée des inductances équivalentes est une difficulté de plus qu'on rencontre dans la pratique.

Le tableau I donne respectivement les caractéristiques de quartz types pour une fréquence basse (100 kHz) et pour une fréquence élevée (10,7 MHz). Le rapport de capacité r est le rapport de la capacité statique parallèle à la capacité dynamique équivalente. La valeur du rapport de capacité peut être modifiée par le réglage de la configuration des électrodes, mais ne peut pas être inférieure à une certaine valeur minimale qui est une constante inhérente au mode de vibration.

TABLEAU I

Fréquence	Inductance dynamique équivalente	Q	Rapport minimal de capacité r
100 kHz	20-100 H	50 000	130
10,7 MHz	10- 30 mH	150 000	250

Figure 2, page 36 shows a typical comparison of a crystal filter with a conventional filter, both of which are designed to have similar pass bands. It can be seen that much sharper cutoffs and sharper attenuation peaks are obtained by the use of crystal resonators, whereas there is little improvement in the minimum insertion attenuation. The use of crystal resonators in a filter also yields additional advantages such as better temperature and ageing characteristics, small size and lighter weight.

The electrical characteristics of a crystal resonator can be represented by means of the equivalent circuit shown in Figure 3, page 37. It consists of a shunt capacitance C_0 and a dynamic branch comprising equivalent inductance L_1 , capacitance C_1 and resistance R_1 , in series. Other convenient parameters for discussing characteristics of resonators for filters are series resonance frequency f_s , and parallel resonance frequency f_p , quality factor Q and capacitance ratio r , which are also defined in Figure 3. Similar quartz crystal units are widely used for controlling the frequency of oscillators. There are, however, a few important differences between resonators for filters and crystal units for oscillators. With a crystal unit for use in oscillators, the temperature coefficient, the effects of ageing on the resonance frequency and the Q are of prime interest. They are also important in the case of a filter resonator but to a smaller degree.

Theoretically, these determine the lower limit of the usable bandwidth of a crystal filter. The bandwidth of the majority of filters is usually far wider than this limit.

In the case of a resonator for a filter, it is further required that all the reactance parameters are specified in a design. These parameters are determined by such factors as the dimensions of the resonator, the shape and the 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.

For example:

- a) the range of available equivalent inductances at a particular frequency does not exceed about 50 anywhere and for high-frequency crystals may not be as much as 5 compared with a range of 1 000 or more for acceptable conventional inductances or capacitances at a particular frequency. This imposes severe limitations on the design of a crystal filter;
- b) the high value of the equivalent inductances is a further practical difficulty.

Table I presents characteristics of typical crystal units for a low frequency (100 kHz) and a high frequency (10.7 MHz), respectively. The capacitance ratio r is the ratio of the shunt capacitance to the equivalent dynamic capacitance. The value of the capacitance ratio can be modified by the adjustment of the electrode configuration, but cannot be lower than a certain minimum value, which is an inherent constant of a mode of vibration.

TABLE I

Frequency	Equivalent dynamic inductance	Q	Minimum capacitance ratio r
100 kHz	20-100 H	50 000	130
10.7 MHz	10- 30 mH	150 000	250

Le rapport de capacité est aussi une mesure de la séparation entre la fréquence de résonance et celle d'antirésonance, comme indiqué ci-dessous :

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} = \sqrt{1 + \frac{1}{r}} - 1 \simeq \frac{1}{2r}.$$

Par conséquent, le rapport de capacité est étroitement lié à la largeur de bande d'un filtre à quartz.

Dans le cas d'un filtre constitué par des quartz et des condensateurs, la bande passante partielle la plus large qui peut être obtenue est $(1/r)$. Si l'on désire des bandes passantes beaucoup plus larges, on peut utiliser des inductances de même que des quartz et des condensateurs. Une bande passante partielle allant jusqu'à $(2/r)^{1/2}$ peut être obtenue. Les inductances peuvent être placées dans le circuit de telle façon que la combinaison de leurs pertes avec celles des résistances de charge ait pour effet de provoquer une atténuation additionnelle constante sans aucun effet sur la finesse de la coupure.

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 destiné à l'utilisation dans un filtre. Parfois, ces modes ont lieu à proximité du mode principal et perturbent 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 sans importance.

Cette condition est plus importante dans le cas des résonateurs pour filtres que dans le cas des quartz pour oscillateurs. Un calcul convenable des dimensions du résonateur, des électrodes et du montage y satisfait habituellement. C'est pourquoi la gamme possible des paramètres du circuit dynamique est plus réduite.

Un résonateur ayant plus d'une paire d'électrodes est parfois utilisé. Il y a aussi des résonateurs utilisant plus d'un mode de vibration principal. Bien que de tels résonateurs à électrodes multiples ou à modes multiples offrent quelques avantages dans la construction pratique d'un filtre, ils apportent peu de changements fondamentaux dans les possibilités de réalisation et les limites des filtres à quartz.

Dans un résonateur à quartz à haute fréquence, on peut « piéger » l'énergie de vibration au voisinage d'une électrode au moyen de la masse chargeant l'électrode. Un résonateur à quartz à modes multiples ou un filtre électromécanique peut être obtenu en utilisant le couplage acoustique mutuel entre plusieurs régions excitées par des électrodes différentes. On peut obtenir, de la sorte, un filtre complet sous une forme intégrée monolithique. Cela rend possible des réductions substantielles en volume et en poids.

4. Caractéristiques fondamentales des filtres

4.1 Caractéristiques générales

Ce qui suit est un bref résumé des caractéristiques des types de filtres individuels utilisant des éléments linéaires passifs. Il faut noter qu'un discriminateur à quartz peut être considéré comme une forme spécifique de filtre incorporant des dispositifs non linéaires. Il y a aussi des filtres utilisant des éléments actifs. Ces deux types de filtres sont hors du domaine d'application de ce guide.

Filtres à bande latérale unique (BLU)

Ils peuvent avoir des caractéristiques d'atténuation symétriques ou dissymétriques selon que l'appareillage utilise une seule fréquence porteuse ou deux fréquences porteuses, l'une et l'autre étant respectivement de chaque côté de la bande passante. La largeur de la bande passante (habituellement à 6 dB) sera d'environ 2,4 kHz à 3,5 kHz en fonction de l'application.

The capacitance ratio is also a measure of the separation between the resonance and the anti-resonance frequencies as shown below:

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} = \sqrt{1 + \frac{1}{r}} - 1 \approx \frac{1}{2r}.$$

Hence, the capacitance ratio is closely related to the bandwidth of a crystal filter.

With a filter consisting of crystal units and capacitors, the widest fractional pass band obtainable is $(1/r)$. If much wider pass bands are required, inductors may be employed as well as crystal units and capacitors. A fractional pass band up to $(2/r)^{1/2}$ may be obtained. Inductors may be placed in such positions in the circuit as to render possible a combination of their losses with those of the load resistances, with the result that the effect of the losses causes only an additional constant attenuation without affecting the sharpness of cutoff.

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. These modes sometimes occur in the vicinity of the main mode and disturb filter characteristics. Such unwanted modes must be suppressed below a certain level or shifted to frequencies which are of no importance.

This requirement is more important for filter resonators than for crystal units for oscillators. It is usually met 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.

A resonator with more than one pair of electrodes is sometimes used. There are also resonators utilizing more than one main mode of vibration. Although such multiple-electrode or multiple-mode resonators offer some advantages in the practical construction of a filter, they introduce little fundamental change in the feasibility and limitations of crystal filters.

In a high-frequency crystal resonator, the vibration energy can be trapped in the vicinity of an electrode by the loading mass of the electrode. A multiple mode resonator or an electromechanical filter can be obtained by utilizing mutual acoustic coupling between several regions energized by different electrodes. Thus, a complete filter can be obtained in a monolithic integrated form. This makes possible substantial reductions in size and weight.

4. **Basic filter characteristics**

4.1 *General characteristics*

The following is a brief summary of the characteristics of individual types of filters using passive linear elements. It should be noted that a crystal discriminator can be regarded as a specific form of a filter incorporating non-linear devices. There are also filters using active elements. Both of these are outside the scope of this guide.

Single side-band (SSB) filters

These 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. The pass bandwidth (typically at 6 dB) will lie between about 2.4 kHz and 3.5 kHz, depending on the application.

Le volume de tels filtres varie de 30 cm^3 à 150 cm^3 dans la gamme de fréquences de 1 MHz à 2 MHz et peut diminuer jusqu'à 16 cm^3 à 9 MHz. L'atténuation relative type dans la bande atténuée est égale à 60 dB. Un exemple de filtre avec une bande passante de 2,5 kHz à 6 dB et une bande passante de 3,6 kHz à 60 dB avec une impédance de charge de 75Ω ou $5\,000 \Omega$ est donné à la figure 4, page 38.

La difficulté de fabrication de ces filtres est principalement fonction de la largeur de bande de transition entre les bandes passantes et les bandes atténuées, particulièrement en ce qui concerne les spécifications pour la suppression de la fréquence porteuse y compris les effets de la température.

Filtres pour les applications en modulation de fréquence

Ceux-ci sont habituellement des filtres pour 10,7 MHz, quoique d'autres fréquences puissent être d'usage courant dans la gamme de fréquences de 8 MHz à 30 MHz.

Les bandes passantes sont spécifiées assez larges pour recevoir l'information acoustique sur la fréquence porteuse compte tenu des conditions de variation de la température et des erreurs non seulement sur la fréquence de l'oscillateur du transmetteur, mais aussi sur celle du récepteur. Les erreurs permises sur ces fréquences sont habituellement fixées par l'administration.

Les atténuations dans la bande atténuée et dans la bande de transition sont déterminées par la position du canal suivant et sa stabilité de fréquence en combinaison avec le spectre de fréquence dû à la modulation du signal superposé. La qualité d'un filtre peut être déterminée par un essai à deux signaux en mesurant l'interférence et la diaphonie dans le canal voulu causées par un signal dans un canal adjacent.

Des filtres types exigent des charges de $1\,000 \Omega$ shuntées par 25 pF. Il est nécessaire de s'assurer que les tolérances sur les charges ne sont pas trop larges de façon à éviter des ondulations indésirables dans la bande passante qui peuvent provoquer une sensibilité aux perturbations et/ou une distorsion inacceptables.

Les volumes des filtres sont habituellement dans la gamme 10 cm^3 à 40 cm^3 avec des atténuations relatives de 50 dB, 80 dB ou 90 dB, en fonction des applications et selon que le filtre donne tout ou partie seulement de la sélectivité demandée au récepteur.

Habituellement, les caractéristiques de la bande passante des filtres spéciaux ne sont pas spécifiées pour les systèmes à modulation de fréquence; voir, à ce propos, la figure 5, page 39, qui donne un exemple à 6 dB maximum spécifié à $\pm 15 \text{ kHz}$ et à 80 dB minimum spécifié à $\pm 30 \text{ kHz}$.

Filtres coupe-bande

Il est difficile de fabriquer des filtres coupe-bande avec des caractéristiques de bande atténuée dissymétriques, mais cela est rarement demandé. Les filtres coupe-bande multiples avec des largeurs de bande de plus de 0,1 % et avec une atténuation substantielle sont rares et difficiles à réaliser. Les réponses indésirables peuvent être gênantes, à moins que la bande atténuée ne soit étroite, car elles introduisent des pertes dans la bande passante. On éprouve d'autres difficultés dues aux imperfections des inductances dans le cas des bandes passantes très larges s'étendant jusqu'aux fréquences une ou plusieurs fois supérieures aux fréquences de la bande atténuée.

Caractéristiques de réponse

Pour les filtres dans lesquels la réponse en amplitude est importante, il existe des courbes de réponse théoriques telles que la courbe de Tchebichev, la courbe extra-plate (Butterworth), la courbe de Papoulis et des courbes correspondant aux fonctions elliptiques. Quand la caractéristique de phase est la plus importante, comme c'est le cas dans les systèmes de transmission numériques, il existe des courbes correspondant à une fonction gaussienne. Il n'est pas de bonne

The volume of such filters varies from 30 cm^3 to 150 cm^3 in the 1 MHz to 2 MHz range to values as low as 16 cm^3 at 9 MHz. Typical relative stop-band attenuation is 60 dB. An example of a filter with 6 dB at 2.5 kHz bandwidth and 60 dB at 3.6 kHz bandwidth, with a load impedance of 75Ω or $5\,000 \Omega$, is given in Figure 4, page 38.

The difficulty of producing these filters is largely a function of the transition bandwidth between the pass band and the stop band, particularly as regards the requirement for carrier suppression including the effect of temperature.

Filters for FM applications

These are usually for 10.7 MHz, although other frequencies may be in common usage such as over the frequency range 8 MHz to 30 MHz.

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.

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. The level of performance may be determined by a two-signal test in which the interference and crosstalk on a wanted channel caused by a signal in an adjacent channel are measured.

Typical filters require loads of $1\,000 \Omega$ shunted by 25 pF. It is necessary to ensure that tolerances on the loads are not too wide, so as to avoid undesirable pass-band ripples which may result in unacceptable distortion and/or sensitivity to interference.

Volumes of filters are usually in the range 10 cm^3 to 40 cm^3 with relative attenuation of 50 dB, 80 dB or 90 dB, depending on the application and on whether the filter provides all or only a part of the receiver selectivity required.

Normally, special filter pass-band characteristics are not specified for FM systems. In this connection, see Figure 5, page 39, which is an example with 6 dB maximum specified at $\pm 15 \text{ kHz}$ and 80 dB minimum specified at $\pm 30 \text{ kHz}$.

Band-stop filters

Band-stop filters are not easily made with asymmetrical stop-band characteristics, but this is rarely a requirement. Multiple band-stop filters with bandwidths of more than 0.1% and a substantial attenuation are rare and difficult to make. Unwanted responses can be troublesome unless the stop bandwidth is narrow because they introduce losses in the pass band. Further difficulties due to inductor imperfections are experienced with very wide pass bands extending to frequencies of one or more orders of magnitude greater than the stop-band frequencies.

Response characteristics

For filters with a marked amplitude response, there exist such theoretical response characteristics as the Chebyshev curve, the extra-flat curve (Butterworth), the Papoulis curve, and curves corresponding to elliptic functions. Where the phase characteristic is more important such as in digital transmission systems, there are curves corresponding to a Gaussian function. It is not good practice to specify the response of a filter solely in terms of these characteristics because

pratique de spécifier un filtre en utilisant ces courbes de réponse seulement car celles-ci sont théoriques par nature, et les filtres rencontrés en pratique ne peuvent que s'approcher de la courbe de réponse idéale. Il faut aussi noter que, puisqu'il existe une relation entre les caractéristiques de phase et d'amplitude, il n'est pas possible d'obtenir les deux caractéristiques indépendamment.

4.2 *Disponibilité commerciale et caractéristiques limites*

Les filtres à quartz sont largement fabriqués et utilisés pour la sélectivité dans toutes les classes d'appareillage portatif dans les applications militaires et commerciales, où la première fréquence intermédiaire est dans la gamme des fréquences radioélectriques. Des types de filtres existent pour les applications dans l'appareillage à modulation de fréquence fonctionnant, par exemple, à la fréquence 10,7 MHz pour les bandes hyperfréquences et pour des espacements entre canaux de 50 kHz, 25 kHz, 20 kHz et 12,5 kHz. L'exemple d'un filtre pour un espacement entre canaux de 50 kHz est donné à la figure 5, page 39.

Des filtres existent aussi pour certaines applications à bande latérale unique (BLU). La fréquence de tels filtres est inférieure à 10 MHz. L'exemple d'un filtre à 1,005 MHz pour la communication duplex BLU est donné à la figure 4, page 38.

En plus, les filtres à quartz sont fortement implantés dans les systèmes de téléphonie FDM pour la sélection des canaux, la sélection et le rejet du signal pilote et enfin pour remplir les conditions exigées des fréquences porteuses. Ces filtres ne sont habituellement fabriqués que sur commande. Les détails concernant les largeurs de bande possibles sont discutés dans le paragraphe 4.2.1.

4.2.1 *Effet de 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 possibles. La plupart des filtres à quartz utilisés sont caractérisés par leur bande passante. La figure 6, page 40, est une représentation graphique de la fréquence de référence en fonction de la largeur de bande des filtres passe-bande à quartz qui peuvent être réalisés sans un travail de recherche particulièrement difficile. Il faut se rappeler que ce graphique n'est qu'un guide de ce qui est techniquement possible. Les délais de livraison dans le commerce dépendent aussi d'autres facteurs tels que la quantité, les conditions d'environnement, les dimensions, le prix, etc.

Les remarques suivantes s'ajoutent aux raisons pour lesquelles, dans certaines régions, les largeurs de bande possibles présentent des difficultés à certaines fréquences de résonance; elles s'appliquent aux filtres ayant des caractéristiques d'atténuation symétriques ou dissymétriques.

Problèmes de la surtension et de la stabilité de fréquence

Dans cette région, les quartz réalisés habituellement ont des facteurs de surtension et des stabilités qui engendrent des difficultés dues à une ou plusieurs des raisons suivantes:

- atténuation minimale très élevée de transmission et/ou la variation en fonction de la température;
- changement de caractéristique en fonction du temps dû au vieillissement du quartz;
- hétérogénéité de forme de la bande passante entre spécimens;
- variation de la fréquence centrale en fonction de la température.

they are theoretical in nature and practical filters can only approximate the ideal response. It should also be noted that since there is a relationship between phase and amplitude characteristics, it is not possible to obtain both characteristics independently.

4.2 *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 where the first IF is in the high-frequency range. Types exist for FM applications at, for example, 10.7 MHz for VHF and UHF bands for 50 kHz, 25 kHz, 20 kHz and 12.5 kHz channel spacing. An example of a 50 kHz channel spacing filter is given in Figure 5, page 39.

Filters exist also for some SSB applications with filter frequencies below 10 MHz. An example of a filter at 1.005 MHz for duplex SSB communication is given in Figure 4, page 38.

In addition, crystal filters are firmly established in FDM telephony systems for channel selection, pilot signal rejection and selection, and carrier supply requirements, although these are not usually available in the open market. Details of available bandwidths are discussed in Sub-clause 4.2.1.

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

The constraints imposed on the design of crystal filters by the available parameters of quartz crystal units, affect the range of available characteristics. Most crystal filters used have band-pass characteristics. Figure 6, page 41, is a graphical representation in terms of reference frequency versus bandwidth of crystal band-pass filters which can be produced without difficult development work. It should be borne in mind that this chart is a guide only to what is technically possible. Commercial availability will depend on other factors such as quantity, environmental requirements, size, cost, etc.

The following notes add to the reasons for which in certain regions there are difficulties relating to the bandwidths available at different reference frequencies; they apply to filters which have symmetrical or asymmetrical attenuation characteristics.

Q and frequency stability problems

In this region, the crystal units normally available will have Q s and stabilities which will produce difficulties due to one or more of the following:

- very high minimum transducer attenuation and/or change with temperature;
- change in characteristic with time due to crystal ageing;
- inconsistency of pass-band shape between samples;
- variation of mid-band frequency with temperature.

Problèmes des transformateurs internes

Dans cette région, le facteur de surtension Q et le coefficient de température des transformateurs deviennent critiques, et il peut être impossible d'atteindre une stabilité adéquate en fonction du temps et de la température ou d'obtenir une résistance parallèle adéquate pour charger le filtre correctement.

Limites du rapport de capacité des quartz

Cette région est difficilement utilisable, quels que soient les circuits utilisés avec les composants passifs. La ligne de démarcation dépend, dans une certaine mesure, de la qualité des transformateurs internes par rapport à la capacité propre.

Gamme des quartz difficiles à fabriquer

Si possible, il faut éviter cette gamme de quartz, ceux-ci étant chers et d'impédance élevée; il est d'ailleurs difficile de réaliser des quartz de mêmes caractéristiques d'un spécimen à l'autre. Même de faibles changements de la fréquence de référence peuvent demander un important travail de recherche pour obtenir une réalisation satisfaisante.

Remarques générales

Le choix de la configuration du réseau varie avec le changement de largeur de la bande passante. Il y a trois types de configurations qui sont habituellement décrits comme ayant :

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

Les caractéristiques principales et les limitations de ces types sont données dans les trois paragraphes suivants.

4.2.2 Filtres à bande passante étroite (par exemple, jusqu'à la bande passante partielle de $1/r$)

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.

4.2.3 Filtres à bande passante intermédiaire (par exemple, avec une largeur de la bande passante partielle de $1/r$ à $4/r$)

Ceux-ci diffèrent du type précédent seulement en ce que des inductances finies non critiques sont nécessaires pour désaccorder la capacité du 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 due au facteur de surtension 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'atténuation théorique. Par ailleurs, les caractéristiques réalisables sont similaires à celles des filtres à bande passante étroite.

Internal transformer problems

In this region, the Q and the temperature coefficient of transformers become critical and it may be impossible to obtain adequate stability with time and temperature or adequate shunt resistance to terminate the filter correctly.

Quartz capacitance ratio limitations

It is difficult to use this range irrespective of the circuitry used with passive components. The dividing line depends to some extent on the quality of internal transformers with respect to self-capacitance.

Difficult crystal range

This range should be avoided if possible since such crystals are expensive, of high impedance, have difficulties in reproducibility of characteristics between one sample and another, and even small changes of reference frequency may require extensive development work to establish a satisfactory design.

General remarks

As the pass bandwidth varies, the choice of network configuration to be used also changes. There are three types of configuration, which are usually described as having:

- narrow pass bandwidth,
- intermediate pass bandwidth,
- wide pass bandwidth.

The principal characteristics and limitations of these types are given in the next three sub-clauses.

4.2.2 *Narrow pass bandwidth filters (e.g., up to a fractional pass bandwidth of $1/r$)*

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.

4.2.3 *Intermediate pass bandwidth filters (e.g., from a fractional pass bandwidth of $1/r$ to $4/r$)*

These differ from the previous type only in that finite but non-critical inductances are required to tune out crystal capacitance and/or load capacitance in order to give the correct response.

This can lead to degradation of the pass-band response, particularly near the upper cutoff due to the Q of the 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.

4.2.4 *Filtres à large bande passante (par exemple, avec une largeur de la bande passante partielle de $4/r$ à $(2/r)^{1/2}$)*

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 quartz (qui dans le cas contraire empêcheraient l'obtention d'une bande passante correcte) mais aussi pour obtenir l'atténuation relative recherchée.

Les inductances sont incorporées de telle sorte, dans la configuration du filtre, que leur surtension donne seulement une augmentation constante de l'atténuation de transmission. L'inductance terminale peut être mise en parallèle ou en série avec la résistance de charge.

L'atténuation de transmission minimale, en décibels, de ce type de filtre est approximativement proportionnelle à l'inverse de la largeur de bande relative pour une surtension spécifiée des inductances ajoutées à la structure d'un quartz.

4.2.5 *Limites de la réaction à la température*

Les filtres à bande étroite ont une réaction à la température qui est presque indépendante de celle de chaque inductance associée. Cette réaction est définie principalement par le coefficient de température des quartz et en premier lieu l'effet se fait sentir sur la variation de la fréquence centrale en relation avec les variations des quartz. Puisque la plupart des 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 très étroites, les différences entre les caractéristiques de température des quartz dans le filtre peuvent provoquer des variations de la valeur de l'ondulation en fonction de la température, et si les condensateurs utilisés ont des coefficients de température importants, ce qui peut arriver avec des condensateurs en céramique, la largeur de bande peut aussi varier en fonction de la température.

Pour les quartz dont la fréquence est inférieure à environ 1 MHz, la variation de la résistance équivalente du quartz en fonction de la température influence considérablement l'atténuation de transmission minimale. Ceci est important dans le cas des filtres pilotes de sélection. 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 bande large, les effets principaux s'exerceront sur la forme de la bande passante en relation avec le coefficient de température des inductances additionnelles et des capacités associées et sur l'atténuation dans la bande atténuée en fonction du coefficient de température des capacités utilisées pour placer les pointes d'atténuation dans la position correcte. L'effet du coefficient de température du quartz sera probablement mineur.

Les filtres pour équipements mobiles tombent habituellement entre la région de bande étroite et celle de bande intermédiaire. Les larges gammes de température dans beaucoup de spécifications demandent une attention particulière du coefficient de température des quartz et du coefficient de température des inductances et des condensateurs associés.

Les filtres BLU ont généralement des exigences plus sévères que les filtres BLI; ceci est dû à la gamme de transition étroite entre la bande latérale désirée et celle que l'on veut éliminer et au rejet de la fréquence porteuse. Même dans le cas des quartz pour fréquences radioélectriques soigneusement contrôlées, la limite pratique supérieure pour les filtres est d'environ 25 MHz.

4.2.6 *Limites des performances dues à l'environnement*

Puisque les résonateurs à quartz ne peuvent pas être complètement immobilisés dans les boîtiers, il faut tenir compte des conditions d'environnement. Puisque virtuellement l'énergie de vibration n'atteint pas les bords des lames à fréquence radioélectrique, ces quartz peuvent être montés solidement par les bords.

4.2.4 *Wide pass bandwidth filters (e.g., from a fractional pass bandwidth of $4/r$ to $(2/r)^{1/2}$)*

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 (which otherwise would prevent the correct bandwidth being obtained) but also to assist in achieving the required stop-band relative attenuation.

The inductors are so positioned in the filter configuration that their Q results only in a constant increase in transducer attenuation. The end inductor may be in shunt or series with the load resistance.

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

4.2.5 *Limitations on temperature performance*

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 crystals and in the first place the effect will be confined to a variation of the mid-band frequency in sympathy with the variations of the crystals. Since most crystals do not have a linear temperature coefficient, measurement at a substantial number of temperatures may be necessary to obtain accurate data.

For very narrow bandwidths, differences in temperature characteristics of the crystals within the filter may result in variations of ripple magnitude with temperature, and if large temperature coefficients for the capacitors are used, as might occur if ceramic capacitors are used, the bandwidth may also vary with temperature.

For crystals used below approximately 1 MHz, variation of the equivalent resistance of the crystal with temperature will affect the minimum transducer attenuation considerably. This is important for pilot selection filters. As the bandwidth increases into the intermediate bandwidth region, the temperature coefficient of the inductance becomes important and can affect ripple and bandwidth.

For wideband 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 positioning the attenuation peaks in the correct position. The effect of crystal temperature coefficient is likely to be minor.

Filters for mobile equipment normally fall into the boundary between the narrow bandwidth and intermediate bandwidth regions. The wide temperature ranges in many specifications require careful attention to the temperature coefficient of the crystals and to the temperature coefficient of the inductances and associated capacitors.

SSB filters generally have more severe requirements than DSB filters due to the narrow transition range between the wanted and unwanted sidebands and to carrier frequency rejection. Even with carefully controlled high-frequency crystals, the upper limit is about 25 MHz for practicable filters.

4.2.6 *Limitations on environmental performance*

Since crystal resonators cannot be completely immersed in encapsulant, special consideration should be given to environmental aspects. Since virtually no vibrational energy reaches the edge of high-frequency plates, these crystals can be robustly mounted at the edges.

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. C'est pourquoi il est important que des conditions d'environnement correctes soient spécifiées avant et non après la construction.

Pour les filtres destinés à être utilisés dans des équipements mobiles, des spécifications d'essais de vibrations de 10 g pendant des périodes de longue durée à des fréquences jusqu'à 500 Hz, des essais de secousses à 40 g et d'accélération linéaire à 13 g ne présentent pas de difficultés.

La résistance aux essais de chocs et de vibrations peut être fonction de la direction d'application. Dans les cas où les exigences sont sévères, il peut être possible d'optimiser le filtre en tenant compte de ces exigences.

4.2.7 *Autres limites*

1. *Atténuation de transmission*

Elle n'est pas obligatoirement inférieure à celle d'un filtre LC ayant la même largeur de bande. Elle peut être plus élevée en raison des difficultés causées par les paramètres des quartz.

2. *Réponses indésirables*

Elle peuvent être gênantes dans certains cas, comme indiqué à l'article 3.

3. *Sensibilité aux erreurs de l'impédance de charge*

Cette sensibilité peut être plus grande que pour un filtre LC. Cela est fonction de la configuration et de la technique de construction utilisées. Si elle est importante, l'effet des erreurs doit être chiffré.

4.2.8 *Normalisation*

Puisqu'il y a beaucoup plus de points de divergence possibles entre les filtres à quartz qu'entre d'autres composants qui ne se composent pas d'un assemblage d'éléments, il est impossible pour l'instant de normaliser les dimensions, la forme, la fréquence de référence et les autres caractéristiques.

Un certain degré de similitude existe entre différents filtres utilisés dans la première fréquence intermédiaire des équipements mobiles, par exemple: 10,7 MHz. Cependant, des divergences peuvent exister entre les produits de différents fabricants de filtres, en particulier en ce qui concerne les impédances de charge. En plus, les caractéristiques données par les fabricants peuvent différer pour une ou plusieurs des raisons suivantes:

Application

Certaines conditions spécifient que ces filtres donnent toute l'atténuation relative exigée, les autres l'augmentent à la deuxième fréquence intermédiaire. Pour certaines applications, la dimension est critique, par exemple pour les récepteurs de poche, tandis que pour les autres le prix est essentiel. De telles applications peuvent nécessiter des caractéristiques différentes de l'atténuation de transmission minimale.

Espacement entre voies

Habituellement, on utilise les espacements suivants entre voies: 50 kHz, 25 kHz, 20 kHz et 12,5 kHz; mais dans quelques pays, on utilise aussi les espacements 60 kHz et 30 kHz. Même dans le cas d'un espacement particulier entre voies, les caractéristiques demandées sont fonction de la stabilité de l'oscillateur local utilisé.

For low-frequency contour modes, the problem is more difficult since strain of the support wires can affect frequency stability and resistance. It is important therefore that the correct environmental requirements are specified before design rather than later.

For filters to be used in mobile equipment, vibration specifications of 10 g for prolonged periods at frequencies up to 500 Hz, bump tests at 40 g and acceleration tests at 13 g, do not present difficulties.

Resistance to shock and vibration tests may be a function of direction of application. Where requirements are severe, it may be possible to optimize the filter unit with this in mind.

4.2.7 *Other limitations*

1. *Transducer attenuation*

This is not necessarily lower than for an LC filter of the same bandwidth. It can be higher due to difficulties caused by crystal parameters.

2. *Unwanted responses*

These can be troublesome in some cases as discussed in Clause 3.

3. *Sensitivity to load impedance errors*

This may be greater than for an LC filter. This is a function of the configuration and design technique used. If important, the effect of errors should be evaluated.

4.2.8 *Standardization*

Since there are many more possible points of difference between various crystal filters than between other components which do not consist of an assembly of elements, it is not possible at the present time to standardize size, shape, reference frequency and other characteristics.

Some degree of similarity does exist between various units used in the first IF of mobile equipment which is, for example, 10.7 MHz. However, differences may exist between products of different filter suppliers with particular reference to terminating impedances. Even then manufacturers' requirements may differ for one or more of the following reasons:

Application

Some requirements specify that these filters provide all the relative attenuation required, others augment it at a second IF. For some applications, size is critical, for example pocket sets, while for others, cost is dominant. Such applications may require different minimum relative attenuation performance.

Channel spacing

50 kHz, 25 kHz, 20 kHz and 12.5 kHz channel spacings are now common, but 60 kHz and 30 kHz also exist in some countries. Even with a particular channel spacing, the characteristics required are a function of the local oscillator stability used.

Modulation

Les exigences de largeur de bande pour la modulation de fréquence et celle d'amplitude peuvent être différentes.

Impédance

En général, les filtres sont conçus pour fonctionner entre des impédances de charge définies.

Stabilité de l'oscillateur local

La largeur de la bande passante exigée d'un filtre sera en partie déterminée par la stabilité de l'oscillateur local en combinaison avec toutes les autres dérives de l'équipement.

4.3 *Niveaux d'entrée*

La caractéristique du niveau d'entrée peut être limitée par les raisons suivantes:

- détérioration des résonateurs à quartz,
- changement de la fréquence ou de l'activité d'un résonateur à quartz,
- changement de l'inductance,
- conditions d'intermodulation.

Détérioration des résonateurs à quartz

Cela 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 quartz. Même si les conditions normales sont satisfaisantes, les implications des essais ou d'autres conditions anormales, telles que le filtre étant ouvert à ses bornes de sortie, doivent être prises en considération, parce que cela peut amener une puissance trop importante sur le quartz.

L'impédance d'entrée d'un filtre dans la bande atténuée peut changer considérablement, en conséquence les niveaux dans cette bande doivent être exprimés en termes rapportés au potentiel de la source équivalente.

Changement de la fréquence du résonateur à quartz et/ou de la résistance

Les niveaux maximaux dans les limites desquels on demande au filtre de fonctionner doivent être spécifiés. Pour des bandes très étroites, cela sera plus important que pour les filtres ayant une bande plus large, ce qui est dû à la plus grande stabilité de fréquence nécessaire. Les filtres utilisant des quartz basse fréquence ne doivent pas être soumis à des niveaux d'excitation supérieurs à 1 mW lorsqu'ils sont correctement chargés, sauf permission 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. De très bas niveaux d'excitation peuvent être appliqués dans les récepteurs de télécommunication. Habituellement, les caractéristiques des filtres ne sont pas affectées par des niveaux très bas pouvant être inférieurs à 1 pW.

Variations de l'inductance

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

Modulation

Bandwidth requirements for FM and AM may differ.

Impedance

In general, filters are designed to operate between specific terminating impedances.

Local oscillator stability

The pass bandwidth required of the filter will be partly determined by the local oscillator stability combined with any drift of the equipment.

4.3 *Input levels*

Drive level performance may be limited by reason of:

- crystal resonator damage,
- crystal resonator frequency and/or activity change,
- inductance change,
- intermodulation requirements.

Crystal resonator damage

This may be a function of signal frequency and whether the filter is correctly loaded. Sensitivity to high drive levels will be highly dependent on 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.

The input impedance of a filter in the stop band may vary considerably, hence levels in the stop band should be expressed in terms of equivalent source potential.

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. Filter 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. Very low drive levels can be experienced in communication receivers. Characteristics of filters are not normally affected by operating at the low levels which may be below 1 pW.

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.

5. Emploi et remarques pratiques

Les types normalisés de filtres à quartz sont le plus largement utilisés pour le filtrage de la fréquence intermédiaire et pour la production de la bande latérale unique, quoiqu'il y ait beaucoup d'applications importantes en navigation, en télémesure, dans les appareils de mesure aussi bien que dans les systèmes de transmission par courants porteurs. Par exemple, la sélectivité élevée du filtre à quartz pour fréquence intermédiaire rend possible le récepteur à changement de fréquence unique qui est schématisé à la figure 7, page 42. Les caractéristiques d'un filtre à quartz sont largement déterminées par son circuit interne. Il est toutefois nécessaire de prendre certaines précautions pour obtenir une caractéristique satisfaisante, quand le filtre est inséré entre des circuits extérieurs, particulièrement entre des tubes ou transistors.

Il est important que:

- 1) L'entrée et la sortie soient correctement chargées par les résistances spécifiées. A fréquence élevée, il est souvent exigé que les capacités parasites soient maintenues inférieures à des valeurs spécifiées ou parfois ajustées à certaines valeurs spécifiées. La figure 8, page 42, montre les caractéristiques d'un filtre à 10,7 MHz chargé par des résistances respectivement de 10 k Ω et 15 k Ω . Le filtre a été conçu pour être chargé par 15 k Ω . La figure 9, page 43, montre des caractéristiques du même filtre chargé par des résistances correctes, avant et après l'insertion de capacités parasites de 5 pF aux bornes non seulement d'entrée mais aussi de sortie. Des distorsions considérables dans la bande passante dues à des charges incorrectes peuvent être observées sur ces deux figures.
- 2) Le couplage parasite entre les bornes d'entrée et de sortie doit être maintenu minimal par une mise à la masse ou un blindage efficaces. Dans le cas contraire, on ne peut pas réaliser l'atténuation garantie dans la bande atténuée. La figure 10, page 43, montre qu'un couplage parasite de 0,5 pF seulement réduit considérablement l'affaiblissement du filtre 10,7 MHz dans les bandes atténuées.
- 3) Le niveau du signal d'entrée doit être maintenu inférieur à une valeur spécifiée. Une excitation trop élevée tend à créer différents effets indésirables. Cette précaution est particulièrement nécessaire quand le filtre est utilisé dans un émetteur pour la production du signal de bande latérale unique.
- 4) Dans bien des cas, des transformateurs sont utilisés dans un filtre à quartz pour obtenir un changement convenable d'impédance. Ces transformateurs peuvent ne pas être adaptés pour supporter des tensions continues et il faut faire très attention avant d'utiliser de tels raccordements.

6. Méthodes de mesure

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

7. Marquage

Le marquage comprend le numéro de type, la fréquence de référence et la marque d'origine ainsi que toute autre indication supplémentaire facultative qui doit faire l'objet d'un accord entre le client et le fabricant.

5. Applications and practical remarks

The most extensive applications of standard type crystal filters are seen in intermediate frequency filtering and in single sideband generation, although there are numerous important applications in navigation, telemetry and measurement as well as carrier systems. For example, the high selectivity of an IF crystal filter makes a single conversion receiver as shown schematically in Figure 7, page 42, possible. 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 between outside circuits, especially between tubes or transistors.

The following is important:

- 1) Both input and output terminals of a filter should be properly loaded by specified resistances. At a high frequency it is frequently required that stray capacitances are kept below specified values or sometimes are adjusted to certain values. Figure 8, page 42, shows the characteristics of a 10.7 MHz filter loaded by resistances of 10 k Ω and 15 k Ω , respectively. The filter was designed to be loaded by 15 k Ω . Figure 9, page 43, shows characteristics of the same filter, which is loaded by correct resistances, before and after the insertion of stray capacitances of 5 pF in both input and output terminations. Considerable distortions in the pass band due to improper loads can be observed in both figures.
- 2) Stray coupling between input and output terminals should be kept to a minimum by proper earthing or shielding. Otherwise the guaranteed loss at the stop band may not be obtained. Figure 10, page 43, shows that a stray coupling of only 0.5 pF greatly reduces the attenuation of a 10.7 MHz filter in the attenuation bands.
- 3) The level of the input signal should be kept below a specified value. Overdriving tends to create various undesirable effects. This precaution is especially necessary when a filter is used in a transmitter for the generation of single sideband signal.
- 4) In many cases, transformers are used in a crystal filter to obtain proper impedance conversion. These transformers may not be suitable for the application of direct voltages and care should be exercised before such connections are used.

6. Measuring methods

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

7. Marking

Marking includes type number, reference frequency and mark of origin with additional marking to be agreed upon between customer and manufacturer.

8. Procédure pour la commande d'un filtre

Lorsque les exigences peuvent être satisfaites par un filtre normalisé, il suffira de spécifier la feuille particulière correspondante.

Lorsque les exigences ne peuvent être complètement satisfaites d'après une feuille particulière, cette feuille devra être indiquée ainsi que les différences connues.

Dans les rares cas où les différences sont telles qu'il n'est pas raisonnable de se référer à une feuille particulière existante, il y aura lieu de préparer une nouvelle feuille particulière de conception similaire à celle déjà utilisée pour les feuilles particulières normalisées.

La liste de contrôle suivante doit être utilisée pour la commande d'un filtre à quartz et doit être prise en considération pendant l'élaboration d'une spécification :

Application

Description

Conditions électriques :

- fréquence de référence
- caractéristiques de la bande passante
 - atténuation de transmission maximale
 - ondulation maximale
 - largeur de la bande passante
 - autres conditions
- atténuation relative dans la bande de transition
- atténuation relative dans la bande atténuée
 - de à
 - réponses indésirables
- impédances de charge
- niveau d'entrée maximal
- niveau d'entrée
- résistance d'isolement
- autres conditions (par exemple phase, réponse transitoire).

Conditions d'environnement :

- gamme de températures
 - de fonctionnement
 - de service
 - de stockage
- secousses
- chocs
- vibration
- accélération
- humidité
- autres conditions (par exemple étanchéité, cycles de température).

8. Ordering procedure

When the requirements can be met by a standard item, it will be sufficient to specify the corresponding article sheet.

When the requirements cannot wholly be met by an existing article sheet, the article sheet 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 article sheet, a new sheet is to be prepared in a similar form to that already used for standard article sheets.

The following check list will be useful for ordering a crystal filter and should be considered in drawing up a specification:

Application

Description

Electrical requirements:

- reference frequency
- pass-band characteristics
 - maximum transducer attenuation
 - maximum ripple
 - bandwidth
 - others
- transition band relative attenuation
- stop-band relative attenuation
 - from to
 - unwanted responses
- load impedances
- maximum input level
- input level
- insulation resistance
- others (e.g., phase, transient response).

Environmental requirements:

- temperature range
 - operating
 - operable
 - storage
- bumping
- shock
- vibration
- acceleration
- humidity
- others (e.g., sealing, temperature cycling)

Conditions de dimensions, poids, marquage, etc.:

- longueur
- largeur
- hauteur
- marquage
- fils et dispositifs accessoires de montage
- poids
- autres conditions (par exemple soudabilité)

Conditions de mesures et d'essais:

- spécifications correspondantes
- autorité compétente d'inspection
- niveaux de qualité acceptables
- essais de type
- autres conditions.

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

Il faut clairement indiquer dans la spécification si le filtre doit fonctionner sous des conditions de choc, vibration ou accélération. Si tel est le cas, la possibilité de la production de bruit et sa limite acceptable doivent être considérées, mais ceci concerne seulement les filtres basse fréquence.

9. Termes et définitions

Les termes et définitions doivent être conformes à la Publication 368 de la CEI, Chapitre I, section deux, article 6.

Physical requirements:

- length
- width
- height
- marking
- terminals and mounting accessories
- weight
- others (e.g., solderability, etc.)

Inspection requirements:

- related specifications
- inspection authority
- acceptable quality levels
- type tests
- others.

In an unsymmetrical 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.

It should be clearly stated in the specification whether the filter is required to operate whilst under conditions of shock, vibration or acceleration. If it is, the possibility of noise generation and its acceptable limit should be considered, but is only of concern for lower-frequency filters.

9. **Terms and definitions**

The terms and definitions shall be in accordance with IEC Publication 368, Chapter I, Section Two, Clause 6.

BIBLIOGRAPHIE — BIBLIOGRAPHY

Ouvrages — Books

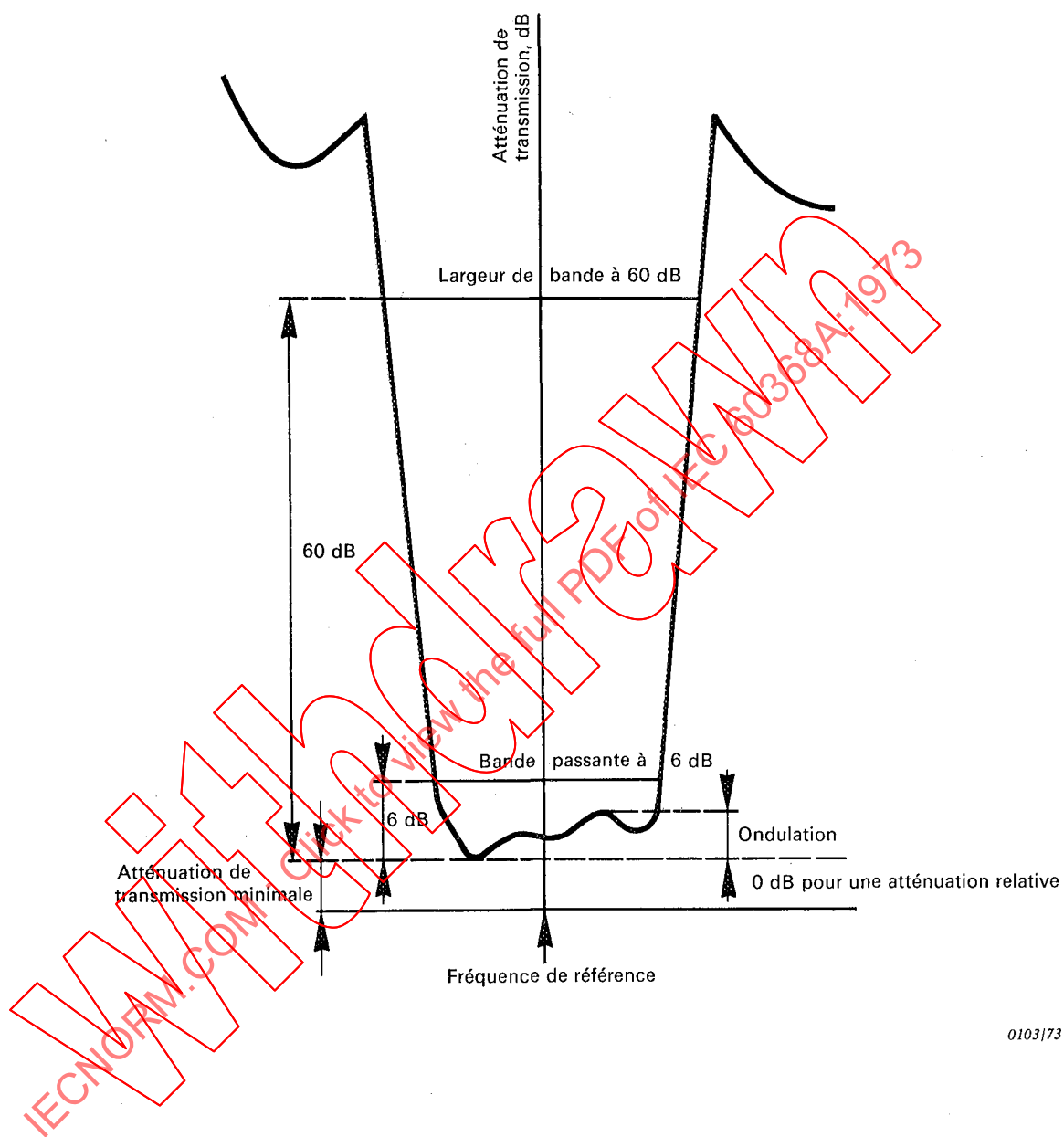
1. N. Bosiy: *Electricheskie Filtry (Electrical Filters)*, Publ. House « Tekhnicheskaya Literatura », Kiev, 1960.
2. R. A. Heising, ed.: *Quartz Crystals for Electrical Circuits*, D. Van Nostrand, Princeton, 1964.
3. W. Herzog: *Siebschaltungen mit Schwingkristallen*, Dieterrichsche Verlag, Wiesbaden, 1949.
4. D. Indjoudjian et P. Andrieux: *Les Filtres à Cristaux Piézoélectriques*, Gauthier-Villars, Paris, 1953.
5. W. P. Mason, *Electromechanical Transducers and Wave Filters*, D. Van Nostrand, Princeton, 1948.
6. W. P. Mason: ed.: *Physical Acoustics, Vol. 1, Part A, Methods and Devices*, Academic Press, New York, 1964.
7. Ya. Velikin, Z. Gelmont, E. Zeljah: *Piezoelectricheskie Filtry (Piezoelectric filters)*, Publ. House « Svyaz », Moscow, 1966.
8. P. Vigoureux and C. F. Booth: *Quartz Vibrations and Their Applications*, H. M. Stationery Office, London, 1950.

Articles spécialisés — Specialist articles

(Les articles importants cités dans les ouvrages donnés ci-dessus sont omis).
(Important articles quoted in the above books are omitted).

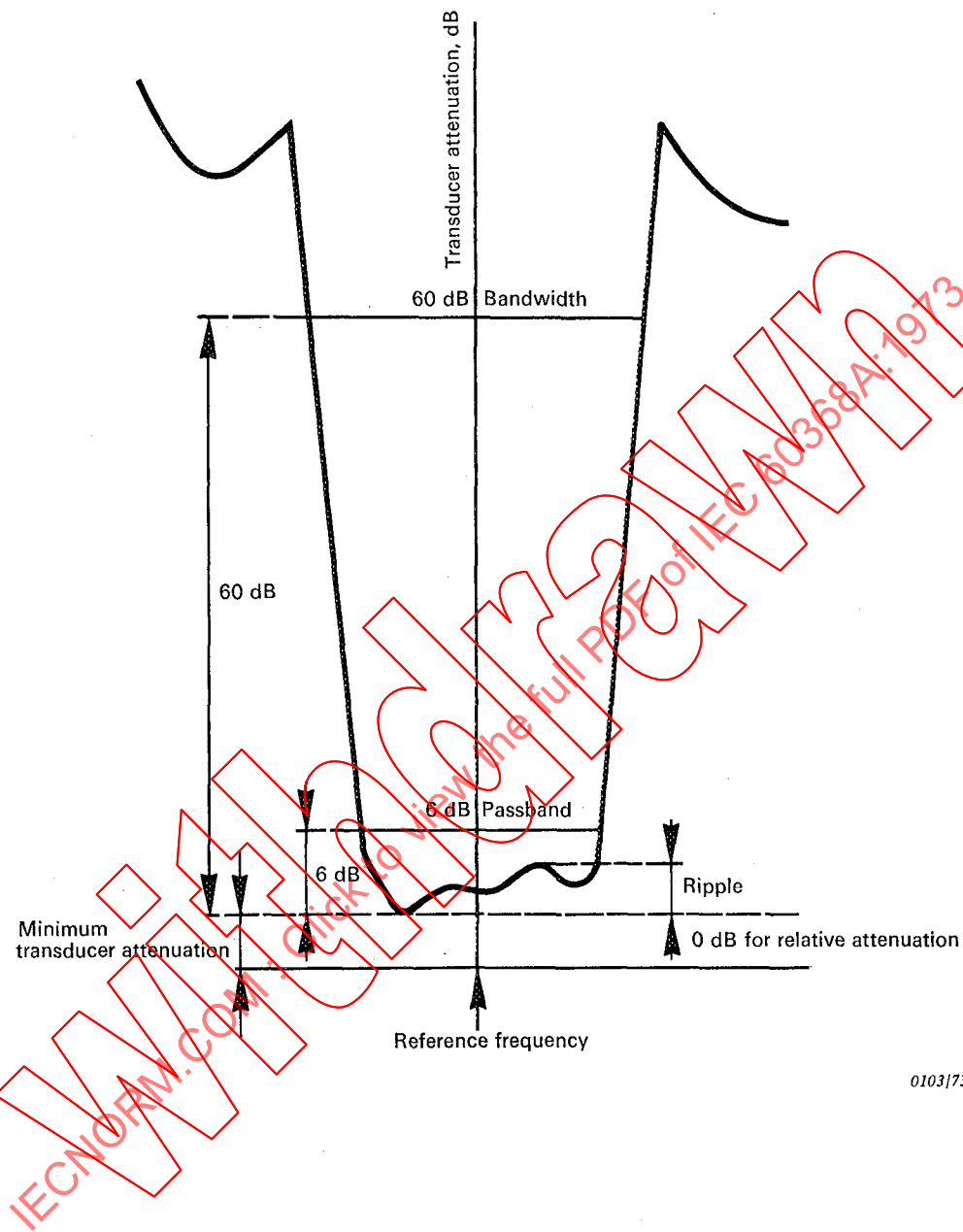
1. R. Bechmann: *Single Response Thickness Shear Mode Resonators Using Circular Bevelled Plates*, J. Sci. Inst. 29, 73, 1952.
2. R. Bechmann: *High-Frequency Quartz Filter Crystals*, Proc. IRE, 46, 617, 1958.
3. R. Bechmann and F. K. Priebe: *Crystals for Filter Application*, Frequency 1, 19, Jan/Feb, 18, May/June, 18, Nov./Dec., 1963.
4. R. Bechmann, T. J. Lukaszek and H. Wasshauser: *Improvements in HF and VHF Quartz Filter Crystals*, Proc. IEEE 53, 1160, 1965.
5. J. Birch: *A Selective Damping Technique for the Suppression of Unwanted Resonances in High-Frequency Filter Crystals*, Proc. IEE 109B, Sup. 22, 317, 1962.
6. J. Birch: *Design and Performance of Thickness Shear Vibrating Quartz Filter Crystals*, Proc. IEE 112, 159, 1965.
7. D. R. Curran and W. J. Gerber: *Quartz Uni-Wafer Filters, a Thin Film Device*, Wescon Paper 18.2.1964.
8. D. R. Curran and D. J. Koneval: *Energy Trapping and the Design of Single and Multi-Electrode Filter Crystals*, Proc. 18th Freq. Control Symp., 1964.
9. D. R. Curran and D. J. Koneval: *Factors in the Design of VHF Filter Crystals*, Proc. 19th Freq. Control Symp., 1965.
10. M. Dishal: *Condensed Version of Modern Network Theory Design Data for One Class of Crystal Filters*, IRE Nat. Conv. Rec. Pt. 8, 1957.
11. I. Koga: *Radio Frequency Vibrations of Rectangular AT-cut Quartz Plates*, J. Appl. Phys. 34, 2357, 1963.
12. D. I. Kosowsky: *High-Frequency Crystal Filter Design Techniques and Applications*, Proc. IRE 46, 419, 1958.
13. D. I. Kosowsky: *Synthesis and Realization of Crystal Filters*, M.I.T. Tech. Rept. No. 298, 1955.
14. R. D. Mindlin: *Thickness-Shear and Flexural Vibrations of Crystal Plates*, J. Appl. Phys. 22, 316, 1951.
Note: Beaucoup d'autres sont dans: J. Appl. Phys. and J. Acoust. Soc. Am.
Many others are in: J. Appl. Phys. and J. Acoust. Soc. Am.
15. Y. Nakazawa: *High-Frequency Crystal Electromechanical Filters*, Proc. 16th Freq. Control Sym. 373, 1962.
16. T. R. O'Meara: *The Synthesis of a Class of Wide-Band Lattice Crystal Filters with Symmetrical Insertion Loss*, Trans. IRE CT-7, 121, 1960.
17. T. R. O'Meara: *On the Synthesis of the Crystal-Capacitor Lattice-Filter with Symmetrical Insertion Loss Characteristics*, IRE Trans. on Circuit Theory, June 1958.
18. M. Onoe: *Equivalent Circuits of Piezoelectric Vibrators Having Split Electrode*, J. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan, 37, 113, 1954.
19. M. Onoe: *Limitations in Crystal Filter Design due to Capacitance Ratios*, J. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan, 37, 480, 1954.
20. M. Onoe and H. Jumonji: *Analysis of Piezoelectric Resonators Vibrating in Trapped Energy Modes*, J. Inst. Elect. Comm. Engrs. Japan, 48, 1574, 1965.

21. M. Onoe, H. Jumonji and N. Kobori: *High-Frequency Crystal Filters Employing Multiple Mode Resonators Vibrating in Trapped Energy Modes*, Proc. 20th Freq. Control Symp., 1966.
22. W. Poschenrieder: *Steile Quarzfilter Grosser Bandbreite in Abzweigschaltung*, NTZ 9, 561, 1956.
23. J. D. Schoeffler: *A Solution to the Approximation and Realization Problems for Crystal Ladder Filters*, IEEE International Conv. Rec., 1964.
24. J. D. Schoeffler: *On the Existence and Realization of Crystal Ladder Filters*, Proc. 1st Allerton Conf. on Systems and Circuit Theory, Nov. 1963.
25. J. D. Schoeffler: *Insertion Loss Design of Symmetrical Lattice Piezoelectric Resonant Filters with Symmetrical or Unsymmetrical Pass Bands*, Trans. IRE, CT-9, 251, 1962.
26. W. Shockley, D. R. Curran and D. H. Koneval: *Energy Trapping and Related Studies of Multiple Electrode Filter Crystals*, Proc. 17th Freq. Control. Symp. 88, 1963.
27. R. C. Smythe: *The Synthesis of Crystal-Capacitor Tandem All-Pole Bandpass Filters on the Insertion-Loss Basis*, Proc. 18th Freq. Control Symp. 1964.
28. R. A. Sykes: *A New Approach to the Design of High-Frequency Crystal Filters*, IRE Nat. Conv. Rec. Pt. 2, 18, 1958.
29. R. A. Sykes and W. D. Beaver: *High-Frequency Monolithic Crystal Filters with Possible Application to Single Frequency and Single Side Band Use*, Proc. 20th Freq. Control Symp. 1966.
30. A. D. Waren, W. J. Gerber and D. R. Curran: *Application of Energy Trapping to Quartz-Filter Design*, Proc. 19th Freq. Control Symp. 1965.
31. A. D. Waren and J. D. Schoeffler: *Approximation Problem for Resonator Ladder Filters*, Trans. IEEE CT-12, 215, 1965.
32. H. Yoda: *Quartz Crystal Mechanical Filter*, Proc. 13th Freq. Control Symp. 405 and Suppl., 1959.



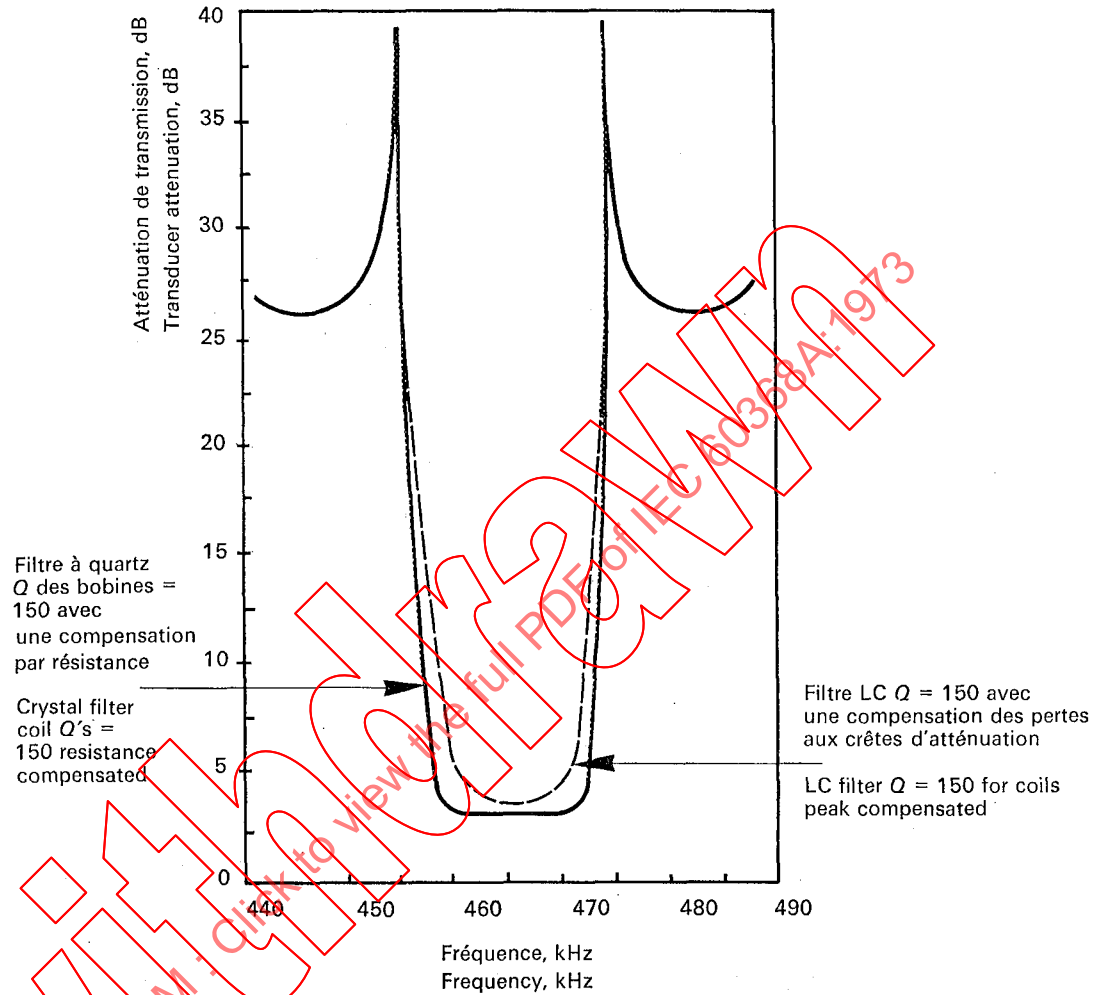
0103/73

FIG. 1. — Caractéristiques de l'atténuation de transmission d'un filtre.



0103/73

FIG. 1. — Transducer attenuation characteristics of a filter.



0104/73

FIG. 2. — Comparaison des caractéristiques d'un filtre à quartz avec celles d'un filtre classique LC.
Comparison of characteristics of a crystal filter and a conventional LC filter.