

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

IEC STANDARD

Publication 60-4

Première édition — First edition

1977

DEUXIÈME IMPRESSION 1987

SECOND IMPRESSION 1987

Techniques des essais à haute tension

Quatrième partie: Guide d'application des dispositifs de mesure

High-voltage test techniques

Part 4: Application guide for measuring devices



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**
- **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**
- **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

NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

IEC STANDARD

Publication 60-4

Première édition — First edition

1977

DEUXIÈME IMPRESSION 1987

SECOND IMPRESSION 1987

Techniques des essais à haute tension

Quatrième partie: Guide d'application des dispositifs de mesure

High-voltage test techniques

Part 4: Application guide for measuring devices



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 Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6
INTRODUCTION	8
SECTION UN – GÉNÉRALITÉS	
Articles	
1. Domaine d'application	8
2. Objet	8
SECTION DEUX – MESURE DES TENSIONS CONTINUES	
3. Généralités	8
4. Dispositifs de mesure de la valeur permanente des tensions continues	10
5. Dispositifs de mesure de la tension d'ondulation	10
6. Détermination des rapports de division de tension et des coefficients de conversion	12
7. Détermination de la réponse amplitude-fréquence d'un circuit de mesure	12
8. Sources d'erreurs possibles et précautions	12
SECTION TROIS – MESURE DES TENSIONS ALTERNATIVES	
9. Généralités	14
10. Dispositifs de mesure de l'amplitude des tensions alternatives	14
11. Dispositifs de mesure de l'amplitude des harmoniques	16
12. Détermination des rapports de division et des coefficients de conversion	16
13. Détermination de la réponse d'amplitude-fréquence d'un circuit de mesure	18
14. Sources d'erreurs possibles et précautions	18
SECTION QUATRE – MESURE DES TENSIONS DE CHOC	
15. Généralités	18
16. Constituants du circuit de mesure	20
16.1 Diviseur de tension	20
16.2 Conducteur à haute tension	20
16.3 Résistance d'amortissement	22
16.4 Oscillographe	22
16.5 Voltmètre de crête	22
16.6 Câble coaxial et dispositifs d'adaptation	24
16.7 Retours de terre	24
17. Détermination du rapport des diviseurs de tension et des coefficients de conversion	24
18. Réponse d'un circuit de mesure	26
19. Modalités expérimentales pour mesurer la réponse à l'échelon unité	28
20. Détermination des paramètres de réponse à partir des oscillogrammes de réponse à l'échelon	30
20.1 Détermination du point virtuel initial $0'$ et de l'amplitude unité	30
20.2 Détermination du temps de réponse T	30
20.3 Détermination du temps de distorsion initial T_0	32
20.4 Détermination du temps de réponse T_i du circuit sans conducteur haute tension	32
20.5 Détermination de la zone de résonance	34
20.6 Détermination du temps de réponse partiel T_α	34
21. Détermination des paramètres de réponse par la méthode de l'éclateur à sphères	34
21.1 Détermination du temps de réponse T	34
21.2 Détermination du temps de réponse partiel T_α ou T'_α	36
21.3 Détermination du temps de réponse T_i du circuit de mesure sans conducteur haute tension	36
21.4 Détermination de la zone de fréquence de résonance	38
22. Relation entre les paramètres de réponse et les erreurs de mesure	38
22.1 Erreurs causées par le temps de réponse T	38
22.2 Erreurs causées par le temps de réponse partiel T_α	40
22.3 Erreurs causées par le temps de distorsion initial T_0	40
23. Critères relatifs aux corrections	40
23.1 Conditions pour que les mesures soient suffisamment précises sans corrections	40
23.2 Conditions de corrections des mesures et limites d'application des corrections	42
23.3 Procédures lorsque les oscillations mesurées excèdent le niveau permis	46
24. Evaluation d'un circuit de mesure par la méthode de comparaison	46

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7
INTRODUCTION	9
SECTION ONE – GENERAL	
Clause	
1. Scope	9
2. Object	9
SECTION TWO – MEASUREMENT OF DIRECT VOLTAGES	
3. General	9
4. Systems for measuring the steady-state value of direct voltages	11
5. Systems for measuring ripple voltage	11
6. Determination of voltage ratios and scale factors	13
7. Determination of the amplitude-frequency response of a measuring system	13
8. Possible sources of error and precautions	13
SECTION THREE – MEASUREMENT OF ALTERNATING VOLTAGES	
9. General	15
10. Systems for measuring the amplitude of alternating voltages	15
11. Systems for measuring the amplitude of harmonics	17
12. Determination of voltage ratios and scale factors	17
13. Determination of the amplitude-frequency response of a measuring system	19
14. Possible sources of errors and precautions	19
SECTION FOUR – MEASUREMENT OF IMPULSE VOLTAGES	
15. General	19
16. Measuring system components	21
16.1 Voltage divider	21
16.2 High voltage lead	21
16.3 Damping resistor	23
16.4 Oscilloscope	23
16.5 Peak voltmeter	23
16.6 Coaxial cable and matching devices	25
16.7 Earth returns	25
17. Determination of voltage divider ratios and scale factors	25
18. Response of a measuring system	27
19. Experimental procedure for measuring the unit step response	29
20. Determination of the response parameters from step response oscillograms	31
20.1 Determination of the virtual starting point $0'$ and unit amplitude	31
20.2 Determination of the response time T	31
20.3 Determination of the initial distortion time T_0	33
20.4 Determination of the response time T_1 of the system without high voltage lead	33
20.5 Determination of the resonant frequency range	35
20.6 Determination of partial response time T_a	35
21. Determination of the response parameters by the sphere-gap method	35
21.1 Determination of the response time T	35
21.2 Determination of the partial response time T_a or T_a'	37
21.3 Determination of the response time T_1 of the system without high voltage lead	37
21.4 Determination of the resonant frequency range	39
22. Relation of response parameters to measuring errors	39
22.1 Errors caused by response time T	39
22.2 Errors caused by partial response time T_a	41
22.3 Errors caused by initial distortion time T_0	41
23. Criteria relating to corrections	41
23.1 Conditions for measurements to be sufficiently accurate without corrections	41
23.2 Conditions for correcting measurements and limits of application of the corrections	43
23.3 Procedures for cases when recorded oscillations exceed permitted level	47
24. Evaluation of a measuring system by comparison method	47

Articles	Pages
25. Sources d'erreurs diverses, précautions	46
25.1 Rapport du diviseur pour des chocs de longue durée	46
25.2 Effets de proximité	48
25.3 L'effet de couronne, précautions	48
25.4 Contrôle du niveau de perturbations	48
SECTION CINQ – MESURE DES COURANTS DE CHOC	
26. Généralités	50
27. Dispositifs de mesure couramment utilisés	50
27.1 Constituants du circuit de mesure	52
27.2 Réponse à l'échelon des circuits de mesure de courant	52
28. Précautions	54
SECTION SIX – ERREURS DE MESURE	
29. Evaluation statistique	54
ANNEXE A – Diviseurs à résistance	58
ANNEXE B – Bases mathématiques du temps de réponse T	60
ANNEXE C – Procédure pour déterminer si les oscillations sont présentes sur l'objet en essai	64
FIGURES	66

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60060-4:1977

Clause	Page
25. Various sources of errors, precautions	47
25.1 Divider ratio for long impulse duration	47
25.2 Proximity effects	49
25.3 Corona effects, precautions	49
25.4 Disturbance level check	49
SECTION FIVE – MEASUREMENT OF IMPULSE CURRENTS	
26. General	51
27. Commonly used measuring systems	51
27.1 Measuring system components	53
27.2 Step response of current measuring systems	53
28. Precautions	55
SECTION SIX – MEASURING ERRORS	
29. Statistical evaluation	55
APPENDIX A – Resistor dividers	59
APPENDIX B – Mathematical basis for response time T	61
APPENDIX C – Procedure to determine if oscillations are present across the test object	65
FIGURES	66

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60060-4:1977

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TECHNIQUES DES ESSAIS À HAUTE TENSION

Quatrième partie: Guide d'application des dispositifs de mesure

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 norme a été établie par le Comité d'Etudes N° 42 de la CEI: Technique des essais à haute tension.

Elle constitue la révision de la partie de la Publication 60 de la CEI qui traite des procédés de mesures et d'étalonnage nécessaires afin de remplir les conditions de précision spécifiées. Elle remplace plus particulièrement la section huit, les annexes et les notes techniques de la Publication 60 de la CEI.

Lors d'une réunion tenue à Bucarest en 1962, une discussion générale avait eu lieu au sujet des modifications et additifs à prévoir pour la Publication 60 de la CEI, alors en cours d'impression. Il en résulta des projets qui furent diffusés et discutés à Aix-les-Bains en 1964, à Tokyo en 1965, à Londres en 1968, à Leningrad en 1971 et à Ottawa en 1975. A la suite de cette dernière réunion, un projet, document 42(Bureau Central)27, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en avril 1976.

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

Allemagne	Japon
Autriche	Norvège
Belgique	Pologne
Brésil	Roumanie
Canada	Royaume-Uni
Corée (République de)	Suède
Danemark	Suisse
Egypte	Tchécoslovaquie
Espagne	Turquie
Etats-Unis d'Amérique	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
France	Yougoslavie
Italie	

Autres publications de la CEI citées dans la présente norme:

- Publications n°s 52: Recommandations pour la mesure des tensions au moyen d'éclateurs à sphères (une sphère à la terre).
- 60-2: Techniques des essais à haute tension, Deuxième partie: Modalités d'essais.
- 60-3: Techniques des essais à haute tension, Troisième partie: Dispositifs de mesure.
- 186: Transformateurs de tension.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES

Part 4: Application guide for measuring devices

FOREWORD

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

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 42, High-Voltage Testing Techniques.

It constitutes a revision of that part of IEC Publication 60 which deals with measuring and calibration procedures which will satisfy the specified requirements for accuracy. More specifically it replaces Section eight, the appendices and the technical notes of the IEC Publication 60.

During a meeting in Bucharest in 1962, a general discussion was held concerning which modifications and addenda were foreseen for IEC Publication 60, then being printed. Subsequent drafts were circulated and discussed in Aix-les-Bains in 1964, in Tokyo in 1965, in London in 1968, in Leningrad in 1971 and in Ottawa in 1975. As a result of this latter meeting, a draft, Document 42(Central Office)27, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1976.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Norway
Belgium	Poland
Brazil	Romania
Canada	Spain
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Egypt	Turkey
France	Union of Soviet
Germany	Socialist Republics
Italy	United Kingdom
Japan	United States of America
Korea (Republic of)	Yugoslavia

Other IEC publications quoted in this standard:

- Publications Nos. 52: Recommendations for Voltage Measurement by Means of Sphere-gaps (One Sphere Earthed).
- 60-2: High-voltage Test Techniques, Part 2: Test Procedures.
60-3: High-voltage Test Techniques, Part 3: Measuring Devices.
186: Voltage Transformers.

TECHNIQUES DES ESSAIS À HAUTE TENSION

Quatrième partie: Guide d'application des dispositifs de mesure

SECTION UN – GÉNÉRALITÉS

1. Domaine d'application

Ce guide d'application est applicable:

- aux mesures des tensions continues;
- aux mesures des tensions alternatives;
- aux mesures des tensions de choc;
- aux mesures des courants de choc;
- aux erreurs de mesure.

2. Objet

L'objet de ce guide d'application est de présenter des renseignements sur:

- des dispositifs de mesure pour des tensions continues;
- des dispositifs de mesure pour des tensions alternatives;
- des dispositifs de mesure pour des tensions de choc;
- des dispositifs de mesure pour des courants de choc;
- l'évaluation statistique des erreurs de mesure.

En général, l'emploi des dispositifs et des procédés de mesure et d'étalonnage décrits ci-après remplira les conditions de précision spécifiées dans la Publication 60-3 de la CEI: Techniques des essais à haute tension, troisième partie: Dispositifs de mesure. L'emploi de ces procédés n'est pas obligatoire; d'autres peuvent être utilisés s'il est établi qu'ils donnent la même précision. Les mesures de tension à l'aide d'éclateurs à sphères sont examinées dans la Publication 52 de la CEI: Recommandations pour la mesure des tensions au moyen d'éclateurs à sphères (une sphère à la terre).

SECTION DEUX – MESURE DES TENSIONS CONTINUES

3. Généralités

Les circuits de mesure des tensions continues comprennent généralement un appareil de mesure et une impédance élevée aux bornes de laquelle apparaît la presque totalité de la tension d'essai. L'impédance est de valeur élevée afin de réduire la consommation de la puissance du circuit de mesure. Quelques-uns des circuits les plus communément utilisés pour mesurer la valeur permanente et l'amplitude de l'ondulation sont décrits ci-dessous.

HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES

Part 4: Application guide for measuring devices

SECTION ONE – GENERAL

1. Scope

This application guide is applicable to:

- measurement of direct voltages;
- measurement of alternating voltages;
- measurement of impulse voltages;
- measurement of impulse currents;
- measuring errors.

2. Object

The object of this application guide is to provide information on:

- measuring devices for direct voltages;
- measuring devices for alternating voltages;
- measuring devices for impulse voltages;
- measuring devices for impulse currents;
- statistical evaluation of measuring errors.

In general, use of the devices and of the measuring and calibration procedures described herein will satisfy the requirements of accuracy specified in IEC Publication 60-3, High-voltage Test Techniques, part 3: Measuring Devices. Their use is not mandatory: others may be used if they are shown to have equal accuracy. Voltage measurements with sphere-gaps are dealt with in IEC Publication 52, Recommendations for Voltage Measurement by Means of Sphere-gaps (One Sphere Earthed).

SECTION TWO – MEASUREMENT OF DIRECT VOLTAGES

3. General

Systems for measuring direct voltages generally consist of a measuring instrument and a high impedance across which almost the entire test voltage will appear. The value of the impedance is made high to minimize the power consumption of the measuring system. Some of the more commonly used systems for measuring the steady-state and ripple values are described below.

4. Dispositifs de mesure de la valeur permanente des tensions continues

a) Appareil utilisé avec une résistance série

Un appareil de mesure de courant continu est connecté en série avec une résistance stable de valeur ohmique élevée.

b) Appareil utilisé avec un diviseur de tension

Un voltmètre est raccordé au bras basse tension d'un diviseur de tension à résistance. La résistance du voltmètre doit être prise en considération pour déterminer le rapport du diviseur.

Note. – Selon le type d'instrument utilisé, ces méthodes détermineront la moyenne arithmétique, la valeur efficace, ou la valeur de crête de la tension.

c) Voltmètre électrostatique

Un voltmètre électrostatique comporte deux électrodes qui sont raccordées aux points entre lesquels la haute tension doit être mesurée. Le champ électrostatique entre les électrodes engendre une force d'attraction qui est proportionnelle à la valeur efficace de la tension. La valeur efficace de la haute tension peut être déduite de la mesure de cette force. Ce principe de mesure peut être utilisé dans la gamme de fréquences comprises entre zéro et plusieurs mégahertz. Si le circuit de mesure n'est pas blindé, il faudra faire particulièrement attention aux erreurs dues aux champs parasites ou aux charges d'espace.

d) Voltmètre à armature tournante

Un voltmètre à armature tournante est un dispositif à condensateur dont les bornes sont raccordées aux points entre lesquels la tension est à mesurer. C'est essentiellement une capacité variable dont la valeur varie cycliquement entre deux valeurs fixes. Un appareil de mesure associé à un dispositif de commutation ou de redressement approprié mesure la variation de charge, qui est en général proportionnelle à la valeur moyenne de la tension continue. Grâce à un choix adéquat de la fréquence de variation de la capacité, et de son déphasage par rapport à la tension à mesurer, on peut déterminer la valeur de crête ou toute autre valeur intermédiaire.

5. Dispositifs de mesure de la tension d'ondulation

a) Oscillographe utilisé avec un diviseur de tension

Un oscillographe est raccordé au bras basse tension d'un diviseur de tension ayant une réponse en fréquence appropriée. On notera que la capacité du câble entre le diviseur et l'appareil peut modifier la réponse en fréquence.

b) Appareil utilisé avec un filtre

Un tel dispositif consiste en général en un appareil connecté au circuit de façon que la composante continue soit éliminée par filtrage. Une disposition type comprend une capacité haute tension en série avec une résistance aux bornes de laquelle est connecté un appareil de mesure de tension.

c) Appareil mesurant le courant redressé traversant un condensateur

Un condensateur, en série avec un dispositif redressant les deux alternances, est raccordé entre les points où la tension est à mesurer. L'amplitude d'ondulation U_r est liée à la valeur moyenne du courant redressé I_r à travers la capacité, par la relation:

$$U_r = \frac{I_r}{4 C f}$$

où:

C = capacité du condensateur

f = fréquence fondamentale de l'ondulation

4. Systems for measuring the steady-state value of direct voltages

a) *Instrument used with series resistor*

A direct current measuring instrument is connected in series with a stable high ohmic value resistor.

b) *Instrument used with voltage divider*

A voltmeter is connected across the low voltage arm of a resistance voltage divider. The resistance of the voltmeter must be taken into account when determining the ratio of the divider.

Note. – Depending on the type of instrument used, these methods will determine the arithmetic mean, the r.m.s. or the peak value of the voltage.

c) *Electrostatic voltmeter*

An electrostatic voltmeter has two electrodes which are connected to the points between which the high voltage is to be measured. The electrostatic field between the electrodes generates an attracting force which is proportional to the r.m.s. value of the voltage. By measurement of this force, an indication of the r.m.s. value of the high voltage can be derived. This measuring principle can be used over the range of frequencies from zero up to several megahertz. If the measuring system is not shielded, special attention should be given to errors caused by stray fields and space charges.

d) *Generating voltmeter*

A generating voltmeter is a capacitive device the input terminals of which are connected to the points between which the voltage is to be measured. It is essentially a variable capacitor, the capacitance being cyclically changed between two fixed values. A measuring instrument together with a suitable switching or rectifying device measures the change of charge which, in general, is proportional to the mean value of the direct voltage. By a suitable choice of frequency of the capacitance variation and its phase angle relative to the voltage to be measured, the peak value or any intermediate value can be determined.

5. Systems for measuring ripple voltage

a) *Oscilloscope used with voltage divider*

An oscilloscope is connected to the low voltage arm of a voltage divider having a suitable frequency response. It should be noted that the capacitance of the cable between the divider and the instrument can modify the frequency response.

b) *Instrument used with filter*

Such a device consists in general of an instrument connected to the circuit in such a way that the d.c. component is filtered out. A typical arrangement consists of a high voltage capacitor in series with a resistor across which a voltage measuring instrument is connected.

c) *Instrument measuring the rectified current through a capacitor*

A capacitor in series with a full-wave rectifier is connected to the points between which the voltage is to be measured. The ripple amplitude U_r is related to the rectified mean current I_r flowing through the capacitor by:

$$U_r = \frac{I_r}{4 C f}$$

where:

C = capacitance of the capacitor

f = fundamental frequency of the ripple

Si l'ampèremètre mesurant le courant capacitif est raccordé de manière qu'une seule alternance sur deux du courant soit mesurée, le facteur 4 de la relation ci-dessus est remplacé par le facteur 2.

La méthode a une application limitée: si l'ondulation possède plus d'un pic par alternance, la précision dépend du type de redresseur utilisé.

6. Détermination des rapports de division de tension et des coefficients de conversion

a) Appareil utilisé avec une résistance en série

La valeur ohmique de la résistance série est déterminée généralement par une mesure au pont à basse tension alimenté en tension continue. Le coefficient de conversion est déduit de cette valeur et des caractéristiques de l'instrument.

Le coefficient de conversion peut également être déterminé par comparaison lors du fonctionnement en parallèle avec un circuit de mesure de tension continue approuvé.

La stabilité de la résistance série dépendant de la tension et de la température peut être vérifiée en soumettant des fractions de résistances à des essais appropriés dans la gamme de tensions et de températures à l'intérieur de laquelle ils doivent être utilisés.

b) Appareil utilisé avec un diviseur de tension

Les procédés pour déterminer le rapport des diviseurs de tension sont exposés à l'article 17.

c) Voltmètre électrostatique et voltmètre à armature tournante

Les circuits de mesure de ces types peuvent être étalonnés par comparaison lors du fonctionnement en parallèle avec d'autres circuits de mesure approuvés.

Note. – Dans les interactions de faisceaux de protons ou de deutérons avec différents noyaux légers, il existe des énergies de résonance connues avec précision pour lesquelles la section efficace de la réaction nucléaire est maximale. Ce phénomène permet l'étalonnage très précis des systèmes de mesure des hautes tensions continues.

7. Détermination de la réponse amplitude-fréquence d'un circuit de mesure

Pour déterminer la réponse d'amplitude-fréquence d'un circuit de mesure, on applique une tension sinusoïdale entre ses bornes d'entrée. Le rapport de l'amplitude de sortie à l'amplitude d'entrée est noté en fonction de la fréquence. La gamme de fréquences doit s'étendre d'une valeur basse à au moins la fréquence importante la plus élevée présente dans la tension à mesurer. Les mesures se font habituellement à une faible valeur de la tension d'entrée.

8. Sources d'erreurs possibles et précautions

Quand on utilise des circuits de mesure de tension continue ayant une résistance très élevée, il faut prendre soin d'éviter les erreurs dues à l'effet de couronne ou aux courants de fuite sur les surfaces isolantes qui peuvent être contaminées par la pollution ou par la buée. Des électrodes convenablement dimensionnées, des circuits de garde et des traitements de surface réduisent ces erreurs et permettent, par conséquent, de réduire les exigences relatives à la valeur du courant.

Des erreurs peuvent également être provoquées par des résistances ayant un coefficient de tension ou de température important et par des appareils sujets à dérive.

Les voltmètres à armature tournante et les voltmètres électrostatiques peuvent introduire des erreurs dues à la distorsion du champ provoquée par les charges électrostatiques à la surface des matériaux isolants ou dans l'espace.

If the ammeter measuring the capacitor current is connected so that only alternate half-cycles of current are measured, the factor 4 in the above expression becomes 2.

The method is of limited application. If the ripple has more than one peak during each half-cycle, then the accuracy depends upon the type of rectifier which is used.

6. Determination of voltage ratios and scale factors

a) Instrument used with series resistor

The resistance of the series resistor is generally determined by a low voltage bridge measurement using direct voltage. From this value and the characteristics of the instrument, the scale factor is deduced.

The scale factor can also be determined by comparison during parallel operation with an approved direct voltage measuring system.

The voltage and temperature stability of the series resistor at high voltage can be verified by subjecting individual components of the resistor to suitable tests over the range of voltages and temperatures at which they will operate.

b) Instrument used with voltage divider

Methods for determining the ratio of voltage dividers are discussed in Clause 17.

c) Electrostatic voltmeter and generating voltmeter

Measuring systems of these types can be calibrated by comparison during parallel operation with other approved measuring systems.

Note. – During reactions between proton or deuteron beams with different light nucleus elements, precisely known resonant energies exist for which the cross-section for a reaction is a maximum. This effect can be used as a very accurate absolute calibration method for high d.c. voltage measuring systems.

7. Determination of the amplitude-frequency response of a measuring system

To determine the amplitude-frequency response of a measuring system, a sinusoidal voltage is applied between its input terminals. The ratio of the output to the input amplitudes is recorded as a function of frequency. The range of frequencies should extend from a low value to at least the highest of importance present in the voltage to be measured. The measurements are usually made at a low value of input voltage.

8. Possible sources of error and precautions

When using direct voltage measuring systems of very high resistance, care must be exercised to avoid errors due to corona effects, or to leakage currents across insulating surfaces which may be contaminated by pollution or condensed moisture. Suitably dimensioned high voltage electrodes, guard circuits and surface treatment minimize such errors and thus the requirements for current level can be reduced.

Errors can also be caused by resistors which have significant voltage or temperature coefficients and by instruments which are subject to drift.

Generating and electrostatic voltmeters may develop errors due to field distortion arising from electrostatic charges on the surface of insulating materials or in space.

Une contrainte excessive des constituants de l'équipement de mesure, lors du contournement d'un objet à l'essai ou des erreurs de mesure dues à des décharges partielles, peuvent survenir dans un circuit dont la réponse aux fréquences hautes excède notablement sa réponse dans la plage des fréquences basses. Ces phénomènes sont habituellement associés à la présence d'inductances parasites.

SECTION TROIS – MESURE DES TENSIONS ALTERNATIVES

9. Généralités

Les circuits de mesure des tensions alternatives consistent généralement en un appareil de mesure et un transformateur de tension, un diviseur de tension ou une impédance élevée aux bornes de laquelle apparaît la presque totalité de la tension d'essai. Les appareils ont généralement une impédance élevée de façon à ne pas charger le circuit d'essais dans des limites inacceptables. On décrit ci-dessous quelques-uns des dispositifs les plus couramment utilisés pour la mesure des hautes tensions alternatives et des amplitudes des harmoniques.

10. Dispositifs de mesure de l'amplitude des tensions alternatives

Les dispositifs ci-dessous mesureront en général la valeur de crête ou la valeur efficace d'une tension alternative ou la valeur moyenne d'une tension alternative redressée selon le type d'appareil ou la disposition utilisée. La mesure du courant redressé à travers une capacité (méthode *c*) donne l'amplitude crête à crête et le voltmètre électrostatique (méthode *d*) donne la valeur efficace.

a) Appareil utilisé avec un transformateur de tension

Un voltmètre est raccordé sur l'enroulement basse tension d'un transformateur de tension du type inductif ou capacitif. En général, l'impédance d'entrée ne limite pas le choix de l'appareil.

b) Appareil utilisé avec un diviseur de tension

Un voltmètre ou un oscillographe est raccordé sur le bras basse tension du diviseur par un câble de mesure. En général, l'impédance d'entrée du circuit de mesure basse tension comprenant le câble de mesure affecte le rapport du diviseur. Dans la plupart des cas, on emploie un diviseur de tension capacitif avec un circuit basse tension mesurant la valeur de crête de la haute tension.

c) Condensateur utilisé avec un dispositif redresseur

Un condensateur en série avec un dispositif redressant les deux alternances est raccordé aux points où la tension est à mesurer. La valeur de crête de la tension U_p est liée à la valeur moyenne du courant redressé I_r à travers la capacité par la relation

$$U_p = \frac{I_r}{4 C f}$$

où:

C = capacité du condensateur

f = fréquence de la tension alternative

Si l'ampèremètre mesurant le courant capacitif est raccordé de manière qu'une seule alternance sur deux du courant soit mesurée, le facteur 4 de la relation ci-dessus est remplacé par le facteur 2.

La méthode a une application limitée. Si l'ondulation possède plus d'un pic par alternance, la précision dépend du type de redresseur utilisé.

Overstressing of components in measuring equipment upon flashover of a test object or measuring errors due to partial discharges can occur in a measuring system having a high frequency response appreciably in excess of its response in the low frequency range. These phenomena are usually associated with the presence of stray inductance.

SECTION THREE – MEASUREMENT OF ALTERNATING VOLTAGES

9. General

Systems for measuring alternating voltages generally consist of a measuring instrument and a voltage transformer, voltage divider, or a high impedance across which almost the entire test voltage will appear. The devices usually have high impedance to keep the loading of the test circuit within acceptable limits. Some of the more commonly used systems for measuring high alternating voltages and the amplitudes of harmonics are described.

10. Systems for measuring the amplitude of alternating voltages

The following systems will in most cases measure the peak or the r.m.s. value of an alternating voltage or the mean value of a rectified alternating voltage according to the type of instrument and arrangement used. Measurement of the rectified capacitance current (method *c*) will determine the peak-to-peak amplitude, and the electrostatic voltmeter (method *d*) measures the r.m.s. value.

a) Instrument used with voltage transformer

A voltmeter is connected across the low voltage winding of a voltage transformer of either the inductive or capacitive type. In general, the choice of the instrument is not restricted by its input impedance.

b) Instrument used with voltage divider

A voltmeter or an oscilloscope is connected across the low voltage arm of the divider through a measuring cable. In general, the input impedance of the low voltage measuring circuit including the measuring cable affects the divider ratio. In most cases, a capacitive voltage divider together with a low voltage circuit measuring the peak value of the high voltage is used.

c) Capacitor used with a rectifying device

A capacitor in series with a full-wave rectifier is connected to the points between which the voltage is to be measured. The peak value of the voltage U_p is related to the rectified mean current I_r flowing through the capacitor by

$$U_p = \frac{I_r}{4 C f}$$

where:

C = capacitance of the capacitor

f = frequency of the alternating voltage

If the ammeter measuring the capacitor current is connected so that only alternate half-cycles of current are measured, the factor 4 in the above expression becomes 2.

The method is of limited application. If the waveform has more than one peak during each half-cycle, then the accuracy depends upon the type of rectifier which is used.

d) Voltmètre électrostatique

Ce dispositif est décrit au point *c)* de l'article 4 pour l'emploi avec des tensions continues. Il peut être aussi utilisé pour mesurer la valeur efficace des tensions alternatives dans une large gamme de fréquences jusqu'à plusieurs mégahertz.

e) Voltmètre à armature tournante

Ce dispositif est décrit au point *d)* de l'article 4 pour l'emploi avec des tensions continues. Un tel voltmètre peut aussi être utilisé pour la mesure des tensions alternatives. Grâce à un choix adéquat de la fréquence de variation de la capacité, et de son déphasage par rapport à la tension à mesurer, on peut déterminer la valeur de crête ou toute autre valeur intermédiaire.

f) Appareil utilisé avec une résistance additionnelle

Un appareil de mesure de courant alternatif est connecté en série avec une résistance stable de grande valeur.

11. Dispositifs de mesure de l'amplitude des harmoniques

a) Oscilloscope utilisé avec un diviseur de tension

Un oscilloscope est connecté sur le bras basse tension d'un diviseur de tension capacitif. Ce procédé n'est satisfaisant que si la précision de l'enregistrement et de l'analyse consécutive est suffisante pour garantir que les prescriptions sont satisfaites. Cette méthode a une précision limitée, surtout dans le cas d'harmoniques de faible amplitude.

b) Appareil utilisé avec un filtre

Un filtre est utilisé pour supprimer la composante fondamentale de la tension, et la valeur efficace des harmoniques résiduels est mesurée avec un instrument approprié. En variante, mais avec moins de précision, la valeur de crête de l'ensemble des harmoniques peut être mesurée.

c) Analyseur d'harmoniques utilisé avec un diviseur de tension

Ce dispositif permet la mesure séparée de la valeur efficace de la composante fondamentale et de chaque harmonique.

12. Détermination des rapports de division de tension et des coefficients de conversion

a) Appareil utilisé avec un transformateur de tension

Les méthodes pour la détermination du rapport des transformateurs de tension sont traitées dans la Publication 186 de la CEI: Transformateurs de tension.

b) Appareil utilisé avec des diviseurs de tension

Les méthodes pour la détermination du rapport des diviseurs de tension sont décrites à l'article 17.

c) Voltmètre électrostatique et voltmètre à armature tournante

Les circuits de mesure de ces types sont généralement étalonnés par comparaison pendant le fonctionnement en parallèle avec d'autres circuits de mesure approuvés.

d) Appareil utilisé avec une résistance série

Les méthodes pour étalonner les circuits de ce type sont décrites au point *a)* de l'article 6. Cependant, l'impédance de cette résistance et le coefficient de conversion doivent être déterminés dans la gamme de fréquences des tensions alternatives à mesurer.

d) Electrostatic voltmeter

This device is described in Item *c)* of Clause 4 for use with direct voltages. It can also be used for measuring the r.m.s. value of alternating voltages in a large range of frequencies up to several megahertz.

e) Generating voltmeter

A generating voltmeter is described in Item *d)* of Clause 4 for use with direct voltages. Such a voltmeter may also be used for the measurement of alternating voltages. By a suitable choice of frequency of the capacitance variation and its phase angle relative to the voltage to be measured the peak value or any intermediate value can be determined.

f) Instrument used with series resistance

An alternating current measuring instrument is connected in series with a stable high ohmic value resistor.

11. Systems for measuring the amplitude of harmonics

a) Oscilloscope used with voltage divider

An oscilloscope is connected across the low voltage arm of a capacitor voltage divider. This method is sufficient only if the accuracies of both the recording and the subsequent analysis are sufficient to ensure that the requirements are met. The method has limited accuracy especially in the case of low amplitude harmonics.

b) Instrument used with filter

A filter is used to suppress the fundamental component of the voltage and the r.m.s. value of the residual harmonics is measured with an appropriate instrument. Alternatively, but with less accuracy, the peak value of the combined harmonics may be measured.

c) Wave analyser used with voltage divider

This system permits separate measurement of the r.m.s. value of the fundamental and each harmonic.

12. Determination of voltage ratios and scale factors

a) Instrument used with voltage transformer

Methods for determining the ratio of voltage transformers are covered in IEC Publication 186, Voltage Transformers.

b) Instrument used with voltage dividers

Methods for determining the ratio of voltage dividers are described in Clause 17.

c) Electrostatic voltmeter and generating voltmeter

Measuring systems of these types can be calibrated by comparison during parallel operation with other approved measuring systems.

d) Instrument used with series resistance

Methods for calibrating systems of this type are described in Item *a)* of Clause 6. However, the impedance of this resistor and the scale factor should be determined within the frequency range of the alternating voltages to be measured.

13. Détermination de la réponse amplitude-fréquence d'un circuit de mesure

Pour déterminer la réponse amplitude-fréquence d'un circuit de mesure, on applique une tension sinusoïdale entre ses bornes d'entrée. Le rapport entre l'amplitude de sortie et l'amplitude d'entrée est enregistré en fonction de la fréquence. La gamme de fréquences doit s'étendre d'une valeur basse à au moins la fréquence importante la plus élevée présente dans la tension à mesurer. Les mesures se font habituellement à une faible valeur de la tension d'entrée.

14. Sources d'erreurs possibles et précautions

Du fait de la haute impédance de certains diviseurs de tension ou éléments d'impédance série, l'effet de couronne et les capacités parasites peuvent provoquer de graves erreurs. De telles erreurs peuvent souvent être réduites par l'emploi d'électrodes convenablement dimensionnées et de circuits de garde. Pour éviter de tels effets sur les diviseurs capacitifs, il est recommandé, lorsque le condensateur n'est pas efficacement blindé, que la capacité série totale, exprimée en picofarads, soit au moins de 30 à 40 fois égale à la longueur hors tout, exprimée en mètres.

Des erreurs peuvent être dues également à des résistances ayant un coefficient de tension ou de température important et à des appareils sujets à dérive.

Les voltmètres électrostatiques et à armature tournante peuvent conduire à des erreurs dues à la distorsion du champ provenant des charges électrostatiques situées à la surface des matériaux isolants ou dans l'espace.

Lorsqu'une capacité série haute tension est utilisée pour la mesure de tension, une protection particulière des instruments de mesure est nécessaire pendant les essais de décharge disruptive. La décharge disruptive d'un objet à l'essai raccordé en parallèle avec un circuit de mesure de ce type peut entraîner l'apparition d'impulsions de courant à front raide dans les redresseurs et les appareils qui doivent être convenablement protégés.

Une contrainte excessive des constituants de l'appareillage de mesure lors de la décharge disruptive d'un objet à l'essai, ou des erreurs de mesure dues à des décharges partielles peuvent survenir dans un circuit dont la réponse aux fréquences hautes excède notablement sa réponse dans la plage des fréquences basses. Ces phénomènes sont habituellement associés à la présence d'inductances parasites.

SECTION QUATRE – MESURE DES TENSIONS DE CHOC

15. Généralités

Les circuits de mesure pour les tensions de choc de foudre et de manœuvres doivent être capables d'enregistrer des tensions ayant des vitesses de variation beaucoup plus élevées que celles d'autres types de haute tension. Par conséquent, les constituants du circuit doivent être spécialement conçus pour avoir une bonne réponse transitoire. De ce fait, une grande partie de cette section traite des méthodes de détermination des caractéristiques de réponse des circuits de mesure et des erreurs causées par une réponse insuffisante. Un circuit utilisé pour déterminer la réponse d'un système de mesure est représenté à la figure 1, page 66. D'autres circuits sont aussi utilisables.

Il est également important que le circuit de mesure ne représente pas, pour le circuit générateur, une charge telle que ce dernier ne puisse développer les grandes vitesses de variation de tension souhaitées sur l'objet à l'essai.

13. Determination of the amplitude-frequency response of a measuring system

To determine the amplitude-frequency response of a measuring system, a sinusoidal voltage is applied between its input terminals. The ratio of the output to the input amplitudes is recorded as a function of frequency. The range of frequencies should extend from a low value to at least the highest of importance present in the voltage to be measured. The measurements are usually made at a low value of low input voltage.

14. Possible sources of errors and precautions

Due to the high impedances of some voltage dividers and series impedance elements, the effects of corona and stray capacitances may result in serious errors. Such errors can often be minimized by the use of suitably dimensioned high-voltage electrodes and guard circuits. To avoid such effects on capacitor dividers, it is recommended that, when the capacitor is not effectively shielded, the total series capacitance in picofarads be at least 30 to 40 times its overall length in metres.

Errors may also be caused by resistors which have significant voltage or temperature coefficients and by instruments which are subject to drift.

Electrostatic and generating voltmeters may develop errors due to field distortion arising from electrostatic charges on the surfaces of insulating materials or in space.

When a high-voltage series capacitor is used for voltage measurement, special protection of the measuring instruments is necessary during disruptive discharge tests. Disruptive discharge of a test object connected in parallel with measuring systems of this type results in the application of fast rising current surges to the rectifiers and instruments, which should be suitably protected.

Overstressing of components in measuring equipment upon disruptive discharge of a test object, or measuring errors due to partial discharges, can occur in a measuring system having a high-frequency response appreciably in excess of its response in the low-frequency range. These phenomena are usually associated with the presence of stray inductances.

SECTION FOUR – MEASUREMENT OF IMPULSE VOLTAGES

15. General

Measuring systems for lightning and switching impulse voltages must be capable of recording much higher rates of change of voltage than those used for measuring other types of high voltage. Consequently, the components of the system should be specifically designed to have a good transient response. Therefore, a large portion of this section deals with methods for determining the response characteristics of measuring systems and the errors introduced by an inadequate response. A circuit used for checking the response characteristic of a measuring system is shown in Figure 1, page 66. Other circuits are also applicable.

It is also important that the measuring system does not load the generating system so heavily that it is prevented from developing the required high rates of change of voltage across the test object.

Des tensions induites par les courants élevés ou par des tensions extérieures au système de mesure ne sont pas prises en compte dans l'examen de la réponse et des erreurs de mesure. Il faut être particulièrement prudent quand on utilise les mesures de la réponse pour les essais comportant des courants élevés.

Il convient de se rappeler que la tension aux bornes de l'objet à l'essai est rarement identique, à tous égards, à la tension aux bornes du diviseur de tension.

16. Constituants du circuit de mesure

La plupart des circuits de mesure de choc à haute tension (à l'exception des éclateurs à sphères) consistent en un diviseur de tension, un oscillographe ou un appareil indicateur ou les deux à la fois, des conducteurs à haute tension, des câbles de mesure à basse tension ainsi que des circuits de retour à la terre. Une résistance d'amortissement à haute tension peut aussi être utilisée. Dans les paragraphes ci-après, on expose les principales particularités de ces constituants.

16.1 Diviseur de tension

La plupart des diviseurs haute tension ont des capacités parasites réparties par rapport aux masses et aux objets voisins sous tension. Dans les diviseurs à résistance, ces capacités affectent les caractéristiques de réponse car elles doivent être chargées et déchargées à travers la résistance du diviseur; dans les diviseurs capacitifs, les capacités parasites affectent le coefficient de conversion.

L'effet de la capacité parasite dans les diviseurs à résistance peut être réduit en maintenant la résistance à une valeur aussi faible que possible sans charger excessivement le circuit générateur et en utilisant des électrodes de blindage à l'extrémité haute tension du diviseur. Ces électrodes fournissent un chemin capacitif pour charger les capacités parasites par rapport au sol.

Dans les diviseurs capacitifs, la capacité du diviseur doit être assez grande pour réduire l'effet de la capacité parasite. Les diviseurs capacitifs peuvent, en raison des inductances parasites du bras basse tension, provoquer un dépassement ou des oscillations de valeur élevée dans le cas de chocs à front raide.

Les diviseurs mixtes comportent des capacités et des résistances. Pour ces diviseurs, l'effet de la capacité parasite dépend de la façon dont les constituants sont branchés.

16.2 Conducteur haute tension

La longueur, la position et le diamètre du conducteur reliant la borne haute tension du diviseur de tension à la borne haute tension de l'objet à l'essai peuvent influencer le fonctionnement du circuit de mesure. Pour toute mesure, la longueur de ce conducteur doit être précisée et rester dans la gamme pour laquelle le circuit de mesure a été étalonné. Sa position doit, si elle est importante, être approximativement la même pendant les essais et pendant l'étalonnage.

L'idéal serait que le diamètre du conducteur soit assez grand pour empêcher l'effet de couronne, effet qui peut affecter le fonctionnement du circuit de mesure. Si l'effet de couronne ne peut pas être évité, il est préférable d'utiliser un conducteur de petit diamètre. Des décharges intenses au voisinage du diviseur doivent être évitées.

Normalement, le conducteur haute tension doit être raccordé directement à la borne haute tension de l'objet à l'essai et non au générateur de choc ou à un point quelconque du conducteur les reliant. Cela évite d'introduire, dans la mesure, la chute de tension inductive dans ce conducteur. Cependant, quand on mesure des chocs de foudre pleins normalisés ou des chocs coupés

The induced voltages from heavy currents, or voltages outside of the measuring system, are not taken into account when considering the response and the measuring errors. Special care should be taken when the result of response measurements are applied to tests with heavy currents.

It should be realized that the voltage across the test object is rarely identical in all respects to that across the voltage divider.

16. Measuring system components

Most high-voltage impulse measuring systems (except sphere-gaps) consist of a voltage divider, an oscilloscope or an indicating instrument or both, high-voltage leads, low-voltage measuring cables and earth return circuits. A high-voltage damping resistor may also be included. Important features of these components are explained in the following sub-clauses.

16.1 Voltage divider

Most high-voltage dividers have distributed stray capacitances to earth and to neighbouring earthed or live objects. In resistor dividers, these capacitances affect the response characteristics since they must be charged and discharged through the divider resistance; in capacitor dividers, the stray capacitances affect the scale factor of the system.

The effect of stray capacitance can be reduced in resistor dividers by keeping the resistance as low as possible without unduly loading the generating system and by using shielding electrodes at the high-voltage end of the divider. These electrodes provide a capacitive path for charging the stray capacitance to earth.

In capacitor dividers, the capacitance of the divider should be large enough to minimize the effect of stray capacitance. Capacitor dividers for rapidly changing impulses may have large overshoots or oscillations in their output due to parasitic inductances in the low-voltage arm.

Mixed dividers consist of both capacitive and resistive elements. In such dividers, the effect of stray capacitance depends on the manner in which the component parts are connected.

16.2 High-voltage lead

The length, position and diameter of the lead connecting the high-voltage terminal of the voltage divider to the high-voltage terminal of the test object may all influence the performance of the measuring system. For any particular measurement, the length of the lead should be stated and it should be within the range of lengths for which the measuring system was calibrated. When important, its position should be approximately the same for a test as during calibration.

Ideally, the diameter of the lead should be large enough to prevent corona since corona on the lead can affect the performance of the measuring system. When corona cannot be prevented, it is better to use a small diameter lead. Vigorous discharges in the vicinity of the divider should be avoided.

The high-voltage lead should normally be connected directly to the high-voltage terminal of the test object and not to the impulse generator or any point on the interconnecting lead. This avoids inclusion in the measurement of the inductive voltage drop in this lead. However, when measuring full standard lightning impulses or impulses chopped on the tail, it can in general be

sur la queue, on peut admettre en général que l'erreur due au raccordement du diviseur sur un point intermédiaire du conducteur entre le générateur et l'objet à l'essai est négligeable si la condition $\sqrt{LC} \leq 0,05 \mu\text{s}$ est satisfaite. Dans cette relation, L est l'inductance en microhenrys de la partie du conducteur située entre le diviseur et l'objet à l'essai (en gros $1 \mu\text{H/m}$) et C est, en microfarads, la capacité équivalente de l'objet. La longueur totale du conducteur entre le diviseur de tension et l'objet à l'essai est alors considérée comme étant le conducteur haute tension du circuit de mesure.

16.3 Résistance d'amortissement

Une résistance très peu inductive peut être branchée en série avec le conducteur haute tension pour amortir les oscillations. Une telle résistance peut être placée soit près du diviseur de tension, soit à l'entrée du conducteur à haute tension. Dans le premier cas, la résistance est considérée comme faisant partie du diviseur; le circuit est alors un circuit à deux constituants. Dans le cas contraire, le circuit est à trois constituants.

Quelle que soit la position de la résistance, il faut tenir compte de sa valeur quand on détermine le rapport du circuit.

La résistance peut avoir une influence appréciable sur la réponse du circuit de mesure. Ce guide d'application ne traite que des circuits à deux constituants.

16.4 Oscilloscope

Un oscilloscope de choc est essentiellement un appareil blindé avec soin ayant une grande vitesse d'écriture et avec un balayage unique pouvant être déclenché en synchronisme avec le choc. L'alimentation haute tension de l'appareil doit être stabilisée et pratiquement sans ondulation. Un moyen d'étalonner la vitesse de balayage ainsi que la déviation verticale doit être fourni. L'enregistrement photographique des oscillogrammes doit également être prévu.

Il est important que les plaques de déviation de l'oscilloscope restent dans les mêmes conditions de mise à la terre et de polarisation pendant l'étalonnage et pendant l'enregistrement des tensions de choc. Normalement, les oscilloscopes de choc ne sont pas équipés d'amplificateurs et les conducteurs allant aux plaques de déviation sont aussi courts que possible de façon à obtenir un bon fonctionnement aux fréquences élevées. Les oscilloscopes avec amplificateurs sont tout à fait acceptables s'ils ont une réponse suffisamment rapide et une précision de mesure de tension suffisamment élevée. Cependant, ces appareils sont particulièrement sensibles aux perturbations.

L'oscilloscope est normalement équipé d'un connecteur d'entrée pour le câble coaxial venant du diviseur de tension. L'impédance d'entrée, mesurée sur ce connecteur doit, selon le type de diviseur, être soit adaptée à l'impédance caractéristique du câble coaxial, soit aussi élevée que possible (voir paragraphe 16.6). Quelquefois, les deux possibilités sont prévues. Dans les deux cas, la capacité d'entrée de l'oscilloscope doit être aussi faible que possible. L'appareil peut également comporter un atténuateur interne donnant une réduction par paliers de la tension entre le connecteur d'entrée et les plaques de déviation.

16.5 Voltmètre de crête

Le voltmètre de crête est un appareil qui fonctionne habituellement en chargeant une capacité à travers des redresseurs à une tension proportionnelle à la valeur de crête des chocs à mesurer. La charge, maintenue sur le condensateur, est lue au moyen d'un amplificateur à très haute impédance et d'un appareil enregistreur ou indicateur incorporé dans l'appareil. Un tel appareil donne une erreur dépendant de la forme de choc à mesurer et qui doit être déterminée expérimentalement. L'impédance d'entrée de l'appareil est soumise à des limitations identiques à celles

assumed that the error due to connecting the divider to an intermediate point on the lead between the generator and test object is negligible if the condition $\sqrt{LC} \leq 0.05 \mu\text{s}$ is fulfilled. In this relationship, L is the inductance in microhenrys of that part of the lead which is between the divider and the test object (roughly $1 \mu\text{H/m}$) and C is the effective capacitance of the test object in microfarads. The total length of lead between the voltage divider and the test object is then considered to be the high-voltage lead of the measuring system.

16.3 *Damping resistor*

A resistor of very low inductance may be inserted in the high-voltage lead to damp oscillations. This resistor may either be located close to the divider or at the input end of the high-voltage lead. In the first case the resistor is considered to be a part of the divider and the system is then described as a two-component system. In the second case the system is described as a three-component system.

Whatever the position of the resistor, its value must be taken into account when determining the ratio of the system.

The resistor may have an appreciable influence on the response of the measuring system. Only two-component systems are dealt with in this application guide.

16.4 *Oscilloscope*

An impulse oscilloscope is essentially a well screened instrument with a high-writing speed and with a single sweep time base which can be triggered in synchronism with the impulse. The high-voltage supplies of the instrument should be stabilized and have practically no ripple. Means of calibrating the sweep speed and the voltage deflection sensitivity should be provided. Provision should also be made for photographic recording of the oscillograms.

It is important that the deflection plates of the oscilloscope remain under the same conditions of earthing and biasing during the calibration and during the recording of the impulse voltages. Impulse oscilloscopes are not normally equipped with amplifiers and the leads to the deflection plates are kept as short as possible to obtain good high-frequency performance. Oscilloscopes with amplifiers are quite acceptable if they have a sufficiently fast response and their voltage measuring accuracy is sufficiently high. However, such instruments are especially sensitive to disturbances.

The oscilloscope is normally provided with an input connector for the coaxial cable from the voltage divider. The input impedance as measured at this connector should either match the characteristic impedance of the coaxial cable or be as high as possible depending on the type of the divider (see Sub-clause 16.6). Sometimes, both possibilities are provided for. In either case, the input capacitance of the oscilloscope should be kept to a minimum. The instrument may also include an internal attenuator to provide a stepwise division of voltage between the input connector and the deflection plates.

16.5 *Peak voltmeter*

The peak voltmeter is an instrument which usually functions by charging a capacitor through rectifiers, to a voltage which is proportional to the peak value of the impulse to be measured. The charge is retained on the capacitor and is read by means of a very high-impedance amplifier plus a recording or indicating instrument which is incorporated into the device. Such a device has an error which depends on the shape of the impulse to be measured and should be determined experimentally. The input impedance of the instrument is subject to the same restrictions

mentionnées à propos de l'oscillographe. On notera que la plupart des appareils de ce type ont été reconnus comme très sensibles aux parasites, surtout pour la mesure des chocs coupés de façon très raide.

Note – Il est important de déterminer le coefficient de conversion total, la stabilité, les caractéristiques de réponse et la sensibilité aux perturbations des oscillographes de choc et des voltmètres de crête. Les méthodes à appliquer sont à l'étude.

16.6 *Câble coaxial et dispositifs d'adaptation*

Tout câble utilisé du côté basse tension dans un système de mesure doit être coaxial et de type haute fréquence. Les pertes diélectriques de l'isolation et la résistance du conducteur intérieur du câble et de la gaine peuvent introduire des erreurs. Il est essentiel que les câbles soient adaptés à l'une des extrémités ou aux deux afin de prévenir les réflexions multiples qui pourraient introduire des erreurs de mesure.

Si le câble est raccordé simultanément à deux instruments ou plus et si la longueur des câbles supplémentaires n'est pas négligeable par rapport à celle du câble principal, un système d'adaptation doit être prévu pour chacun des câbles; quand la longueur des câbles supplémentaires est négligeable, aucune adaptation supplémentaire n'est prévue, et un seul câble est adapté.

Avec les diviseurs à résistance, le câble est normalement adapté à l'extrémité côté instrument et quelquefois aux deux extrémités (voir figure 2a, page 66). Toute atténuation ou dispositif de raccordement inséré dans le circuit doit être adapté à l'impédance du câble. Avec les diviseurs capacitifs, le câble n'est généralement adapté qu'au côté diviseur en plaçant la résistance d'adaptation en série avec le câble (voir figure 2b, page 66). Toute atténuation ou dispositif de raccordement inséré dans le circuit doit avoir une impédance d'entrée aussi élevée que possible. D'autres méthodes d'adaptation peuvent être utilisées à condition que la réponse du système respecte les spécifications données à l'article 23.

16.7. *Retours de terre*

Il existe normalement plusieurs points dans les circuits du générateur de choc et de mesure qui sont interconnectés et connectés à la borne de terre de l'objet en essai. Il est important que l'impédance entre tous ces points soit aussi faible que possible. Des précautions spéciales sont nécessaires aux endroits où existent des courants de terre élevés, c'est-à-dire au raccordement de terre de l'objet à l'essai, du générateur de choc et de tout condensateur de front. On peut obtenir une telle réduction de l'impédance en prenant des conducteurs de retour de terre constitués de grandes feuilles métalliques non magnétiques, ou en réalisant des connexions courtes sur une grande feuille métallique ou un grillage dans ou sur le sol de la zone d'essai.

17. **Détermination du rapport des diviseurs de tension et des coefficients de conversion**

Le coefficient de conversion d'un système de mesure est généralement obtenu en multipliant le rapport du diviseur par la sensibilité de l'instrument. Cette sensibilité est déterminée par les méthodes habituelles.

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination des rapports:

- a) En les calculant à partir des mesures d'impédances des constituants individuels.
- b) En mesurant simultanément les tensions d'entrée et de sortie du diviseur.
- c) En utilisant l'un des divers types de ponts dans lesquels la tension de sortie du diviseur est comparée à la tension de sortie d'un diviseur ajustable très précis. (Cette méthode est généralement plus précise que les deux précédentes.)

as noted for the oscilloscope. It should be noted that most instruments of this type have been found to be very subject to interference, especially when measuring impulses which are sharply chopped.

Note. - It is important to check the overall scale factor, the stability, the response characteristics and the sensitivity to disturbances both for impulse oscilloscopes and peak voltmeters. Methods for this checking are under consideration.

16.6 *Coaxial cable and matching devices*

Any measuring cable on the low voltage side of a measuring system should be coaxial and of the high-frequency type. The dielectric loss of the insulation and the resistance of the inner conductor of the cable and that of the sheath may introduce errors. It is essential that the cables be matched at one or both ends to prevent multiple reflections which might result in measurement errors.

If the cable is connected to two or more instruments at the same time and the length of the additional connecting cables is not negligible with respect to that of the main cable, a matching device should be inserted and all cables matched. When the lengths of the additional cables are negligible no matching devices are used and only one cable is matched.

With resistor dividers, the cable is normally matched at the instrument end and sometimes at both ends (see Figure 2a, page 66). Any attenuator or connecting device inserted in the cable should match the cable impedance. When capacitor dividers are used, the cable is usually matched only at the divider end by connecting the matching impedance in series with the cable (see Figure 2b, page 66). Any attenuator or connecting device inserted in the cable should have an input impedance as high as possible. Other methods of matching may be used provided that the response of the system meets the requirements specified in Clause 23.

16.7 *Earth returns*

There are normally several points in the impulse generating and measuring systems which are interconnected and connected to the earth terminal of the test object. It is important that the impedance between all of these points be kept to a minimum. Special care is necessary in areas of heavy earth currents, that is at the earth terminals of the test object, of the impulse generator, and of any front capacitor. This reduction of impedance may be accomplished by the use of earth return conductors consisting of large non-magnetic metal sheets or by making short earth connections to a large metal sheet or mesh in or on the floor of the test area.

17. **Determination of voltage divider ratios and scale factors**

The scale factor of a measuring system is usually obtained by multiplying the voltage ratio of the dividers by the sensitivity of the instrument. This sensitivity is determined by conventional methods.

Various methods are available for the determination of the ratio:

- a) By calculation of the ratio based on the measurement of the impedance of the individual components.
- b) By simultaneous measurements of the input and output voltages of the divider.
- c) By the use of some form of bridge circuit in which the output of the divider is balanced against the output of an accurate adjustable divider. (This method is usually more accurate than the two former methods.)

Le rapport de tension d'un diviseur est généralement déterminé à basse tension. Pour les diviseurs à résistance, on peut utiliser une tension continue ou alternative pour *b*) ou *c*). Pour les diviseurs capacitifs, on utilise les tensions alternatives. Il est recommandé, pour vérifier que le rapport est valable dans une certaine gamme de fréquences, de le déterminer pour plusieurs fréquences, par exemple fréquence industrielle et 1 kHz.

En complément de la détermination du rapport, il est normalement nécessaire de vérifier que le rapport est constant à mieux que $\pm 1\%$ dans la région des temps de crête pour laquelle l'utilisation est prévue et qu'il n'est pas modifié de plus de 5% pour la plus longue durée jusqu'à mi-valeur à considérer. Cette vérification doit être faite en utilisant la réponse à l'échelon ou par comparaison avec un système de mesure approuvé lors de l'application des formes d'onde adéquates.

Avec les diviseurs capacitifs ou mixtes, il est généralement nécessaire de déterminer le coefficient de conversion du système de mesure dans le montage réel d'essai afin de vérifier le rapport de tension du diviseur si celui-ci a été déterminé indépendamment. Cela est nécessaire par la présence des capacités parasites qui peuvent affecter le rapport du diviseur et, de plus, le rapport mesuré à l'aide d'une tension alternative à basse fréquence peut être différent de celui qui est valable pour la mesure des tensions de choc.

Une méthode convenable pour déterminer le coefficient de conversion est de faire des mesures simultanées avec deux circuits – le circuit à contrôler et un autre comprenant soit un diviseur à résistance approprié, soit un autre circuit de mesure approuvé. Pour cette détermination, on doit utiliser une tension de choc du type de celle à mesurer. L'essai peut se faire à un niveau de tension très inférieur à la tension nominale du circuit à l'essai et, par conséquent, on peut employer un diviseur à résistance ou un circuit de mesure approuvé de tension nominale relativement basse. Cependant, le rapport de tension déterminé à basse tension peut différer de celui correspondant à tension élevée, s'il existe dans le circuit de mesure des effets dépendant de la tension, par exemple l'effet de couronne.

18. Réponse d'un circuit de mesure

La meilleure façon d'évaluer la précision d'une mesure de choc est d'utiliser une certaine forme de réponse généralisée du circuit de mesure. Le type de réponse qui a été adopté pour les circuits de mesure de choc est la réponse à l'échelon unité.

En principe, la réponse à l'échelon d'un circuit de mesure de tension de choc est l'oscillogramme obtenu en appliquant un échelon de tension entre les deux bornes d'entrée. En pratique, le système est modifié et on obtient une réponse modifiée appelée «réponse expérimentale à l'échelon unité».

Cette réponse peut être utilisée pour connaître certains paramètres de la réponse, utiles pour déterminer la précision de la mesure. Ces paramètres sont énumérés, ci-après, avec l'indication de leur utilisation. Leur détermination à partir des oscillogrammes correspondant à la réponse expérimentale à l'échelon est décrite à l'article 20. Ils peuvent aussi être obtenus à l'aide d'un éclateur à sphères, comme il est indiqué à l'article 21:

The voltage ratio of a divider is usually determined at low voltage. For dividers of the resistor type, measurements can be made according to *b*) or *c*) with either alternating or direct voltage. For capacitor dividers alternating voltages are used. To check that the determined ratio is applicable within a given frequency range, it is recommended that the ratio be determined at several frequencies, for example power frequency and 1 kHz.

In addition to the determination of the ratio it is normally necessary to check that the voltage ratio is constant within $\pm 1\%$ for the region of times to peak for which the divider is intended to be used, and does not change more than 5% for the longest time to half value to be considered. This check should be done by means of the step response or by comparison with an approved measuring system during the application of the appropriate impulse shapes.

With dividers of the capacitor or mixed type, it is generally necessary to check the scale factor of the system in the actual test arrangement to verify the voltage ratio when this ratio has been determined independently. This is because the presence of stray capacitances can affect the voltage ratio and moreover, the ratio measured with a low frequency alternating voltage may differ from that applicable when measuring impulse voltages.

A suitable method for checking the scale factor is to make simultaneous measurements using two systems – the system to be checked and one involving either a suitable resistor divider or some other approved measuring system. In the check, an impulse voltage of the type to be measured should be used. The test may be done at a voltage level well below the rated voltage of the system being checked, thus a resistor divider or approved measuring system of relatively low voltage rating may be used. However, it should be recognized that the voltage ratio determined at low voltage may differ from that applicable at high voltage if there are voltage-dependent effects in the measuring system, as for example, corona.

18. Response of a measuring system

The accuracy of an impulse measurement can best be evaluated by using some form of generalized response of the measuring system. The type of response which has been selected for impulse measuring systems is the unit step response.

In principle, the step response of an impulse voltage measuring system is the oscillogram obtained when a step voltage is applied between the two input terminals. In practice, the system is modified and an approximate step response called the “experimental unit step response” is obtained.

This response can be used to obtain certain parameters of the true response which are useful for determining the accuracy of a measurement. These parameters are listed below together with an indication of their applicability. Their determination from experimental step response oscillograms is described in Clause 20. They can also be obtained with the use of a sphere-gap as described in Clause 21.

Paramètres de réponse

<i>Paramètres</i>	<i>Utilisation</i>
Temps de réponse: T (paragraphe 20.2)	Détermination des erreurs dans les mesures des impulsions coupées sur le front, corrections
Temps de réponse partiel: T_a ou T_a' (paragraphe 20.6)	Correction de mesure des oscillations superposées
Temps de réponse de la connexion: T_ℓ (paragraphe 20.4)	Utilisé pour déterminer T lorsqu'on change la longueur de la connexion haute tension. (T_ℓ est contenu dans T)
Temps de réponse sans connexion haute tension: T_i (paragraphe 20.4)	Paramètre de qualité du diviseur à fournir par le constructeur
Temps de réponse expérimental: T_n (paragraphe 20.2)	Utilisé pour la détermination de T
Temps de distorsion initial: T_0 (paragraphe 20.3)	Mesure des paramètres de temps et de l'amplitude des chocs coupés sur le front
Zone de résonance: f_r (paragraphe 20.5)	Mesure des oscillations superposées
Zéro virtuel: $0'$ (paragraphe 20.1)	Considéré comme étant le point de départ de l'échelon, de la réponse et du signal à mesurer

19. Modalités expérimentales pour mesurer la réponse à l'échelon unité

On fait descendre verticalement, à partir de l'extrémité d'entrée haute tension du circuit de mesure, un conducteur de même diamètre que le conducteur haute tension du système de mesure raccordé à un petit générateur d'échelon placé au sol, comme représenté sur la figure 1, page 66. Le générateur d'échelon doit avoir une impédance pratiquement nulle pendant la production de l'échelon et la mesure de la réponse; il comprend un interrupteur rapide qui court-circuite les deux bornes d'entrée. L'échelon est généré en appliquant une tension sur les bornes d'un interrupteur et ensuite celui-ci est fermé. On peut utiliser à cet effet, des relais à contacts mouillés au mercure ou de petits éclateurs ayant un champ sensiblement uniforme (d'environ 1 mm d'écartement) que l'on fait amorcer. Les grands éclateurs ne sont pas satisfaisants pour une détermination précise car ils ne permettent pas une variation suffisamment rapide de la tension et ils n'ont pas une impédance suffisamment basse après l'amorçage.

Si on utilise un relais à contacts mouillés, la source de tension peut être une source continue à basse tension, connectée par l'intermédiaire d'une résistance limitant le courant. La grandeur de sortie du diviseur de tension pourra être trop faible pour être enregistrée avec l'oscilloscope normal de choc et un oscilloscope de plus grande sensibilité devra être utilisé. Cet oscilloscope devrait avoir des caractéristiques de réponse aussi voisines que possible de celles de l'oscilloscope de choc normal sans quoi des informations erronées sur le comportement du circuit de mesure seraient obtenues lors de la mesure de variations rapides de tension. Il est également important que l'impédance normale au sol de la sortie du diviseur et que la disposition normale des connexions soient conservées lorsque cet oscilloscope est utilisé, surtout dans le cas de diviseurs capacitifs.

Si un éclateur à champ uniforme est utilisé comme interrupteur, le choc appliqué peut avoir un front de 10-15 μ s, l'amplitude étant ajustée pour faire amorcer l'éclateur sur la crête de la

Response parameters

<i>Parameters</i>	<i>Application</i>
Response time: T (Sub-clause 20.2)	Determination of errors in measurements of front chopped impulses, corrections
Partial response time: T_a or T'_a (Sub-clause 20.6)	Correction of measurement of superimposed oscillations
Lead response time: T_l (Sub-clause 20.4)	Used to determine T when length of H.V. lead is changed. (T_l is a component of T)
Response time of system without H.V. lead: T_t (Sub-clause 20.4)	Quality parameter of divider to be supplied by manufacturer
Experimental response time: T_n (Sub-clause 20.2)	Used for the determination of T
Initial distortion time: T_o (Sub-clause 20.3)	Measurement of time parameters and amplitude of front chopped impulses
Resonant frequency range: f_r (Sub-clause 20.5)	Measurement of superimposed oscillations
Virtual zero: $0'$ (Sub-clause 20.1)	Considered to be the starting point of the step, of the response and also of the signal to be measured

19. Experimental procedure for measuring the unit step response

From the high-voltage input terminal of the measuring system, a conductor of the same diameter as the high-voltage lead of the measuring system is arranged to run vertically downward to a small step generator located at ground, as illustrated in Figure 1, page 66. The step generator must have essentially zero impedance while generating the step and during the subsequent response, and is some form of high-speed switch which short-circuits the two input terminals. The voltage step is generated by applying a voltage across the switch and then closing the switch. Suitable switches for the purpose are a mercury-wetted relay, or a small gap having an essentially uniform field (of about 1 mm spacing) which is caused to spark over. Large gaps are not satisfactory for an accurate determination because they do not have a sufficiently fast rate of change of voltage nor do they have a sufficiently low impedance after sparkover.

If a mercury-wetted relay is used, the voltage source can be a low direct voltage source connected through a current limiting resistor. The output from the voltage divider will generally be too low to record with the normal impulse oscilloscope and an oscilloscope having a higher sensitivity will have to be used. This oscilloscope should have response characteristics similar to those of the impulse oscilloscope normally used, as otherwise erroneous information will be obtained about the behaviour of the measuring system when measuring rapid rates of change of voltage. It is also important that the normal impedance to earth from the divider output and the normal cabling arrangements be maintained when using this oscilloscope, especially when taking the response of capacitive dividers.

If a gap having an essentially uniform field is used as the switch, an impulse having a front of 10–15 μ s can be applied, the amplitude being adjusted to cause the gap to spark over at or near

tension ou à son voisinage. Pour les diviseurs capacitifs, on peut utiliser des tensions continues ou alternatives. La tension d'amorçage de l'éclateur peut être augmentée en augmentant la pression. Ceci peut supprimer le besoin d'amplification et permettre, par conséquent, d'utiliser l'oscillographe de choc normal.

On recommande d'exécuter l'essai avec des conducteurs à haute tension de différentes longueurs couvrant la gamme de celles utilisées en pratique.

On recommande aussi d'enregistrer les oscillogrammes de réponse avec plusieurs vitesses de balayage (voir paragraphe 20.1).

20. Détermination des paramètres de réponse à partir des oscillogrammes de réponse à l'échelon

Des exemples d'oscillogrammes obtenus par la méthode de l'échelon unité sont représentés sur la figure 3, page 67. Dans la plupart d'entre eux, la partie initiale est arrondie, comme à la figure 3c, ou présente des bosses ou des oscillations comme aux figures 3f à 3h. La forme de cette partie initiale, désignée par « pied de l'oscillogramme » est importante pour l'analyse des oscillogrammes de chocs sur le front.

Pour établir les paramètres de réponse, il faut déterminer un point virtuel 0'; une procédure pour le déterminer est donnée au paragraphe 20.1. Le point virtuel 0' est considéré comme le point initial de l'échelon, de la réponse et aussi du signal à mesurer pendant un essai.

20.1 Détermination du point virtuel initial 0' et de l'amplitude unité

Le point virtuel initial 0' de l'oscillogramme de réponse est défini comme étant l'intersection de l'axe des temps et de la droite tangente à la partie la plus raide du front de la réponse.

Dans le cas d'une réponse comportant des oscillations sur le front, on utilise la tangente à une courbe lissée, tracée au milieu des oscillations. Dans le cas d'une distorsion initiale significative comme sur les figures 3f, 3g, 3h, la partie distordue est négligée pour tracer la tangente, et le point virtuel zéro est déterminé comme ci-dessus. Il est évident que la détermination de 0' implique une certaine part d'arbitraire, particulièrement dans le cas des réponses ayant une grande distorsion initiale. Il faut aussi déterminer le niveau de l'amplitude unité. Dans la Publication 60-3 de la CEM, cette amplitude est définie à l'aide du rapport du circuit (voir paragraphe 25.1). Une méthode simple mais suffisamment précise est de prendre, comme amplitude unité, le niveau que la réponse approche ou autour duquel elle oscille. Cela peut nécessiter l'utilisation de différentes vitesses de balayage. Pour déterminer clairement cette référence, il peut être souhaitable d'éliminer les oscillations de la réponse à l'échelon. Cela peut être fait pour les diviseurs capacitifs en introduisant une résistance à la jonction du conducteur du circuit de mesure et de l'interrupteur utilisé pour produire l'échelon.

20.2 Détermination du temps de réponse T

Pour déterminer le temps de réponse T , on détermine les surfaces T_α , T_β , etc. comprises entre l'échelon et la réponse à l'échelon unité, chacun étant supposé commencer à 0'. Dans le cas où il y a un écart entre le début de l'oscillogramme de réponse et la ligne droite utilisée pour déterminer 0' comme montré aux figures 3c à 3h, cet écart initial est négligé et la ligne droite est considérée comme la réponse pour cette partie.

Dans le circuit expérimental utilisé pour déterminer les paramètres de réponse, un conducteur vertical doit être employé pour raccorder le conducteur horizontal du diviseur au générateur d'échelon. On obtient alors une réponse approximative à l'échelon T_n , appelée « temps de réponse expérimental » et qui est donnée par:

$$T_n = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - \dots$$

the peak of the voltage. For capacitor dividers, direct or alternating voltages may be used. The sparkover voltage of the gap can be increased by increasing the pressure; this may eliminate the need for amplification and thus permit the use of the normal impulse oscilloscope.

It is recommended that the experimental procedure be carried out for several lengths of the high-voltage lead covering the range which is likely to be used in practice.

It is also recommended that the response oscillograms be made with several sweep speeds (see Sub-clause 20.1).

20. Determination of the response parameters from step response oscillograms

Typical response oscillograms obtained by the unit step method are shown in Figure 3, page 67. In many, the initial part is either rounded as in Figure 3c or shows bumps, or oscillations as in Figures 3f to 3h. This initial region is referred to as the 'toe' region and its shape is important when analysing front-chopped oscillograms.

In order to establish the response parameters, a virtual zero point $0'$ has to be determined; a procedure for doing this is given in Sub-clause 20.1. This virtual zero $0'$ is considered to be the starting point of the step, the response, and also of the signal to be measured in a practical test.

20.1 Determination of the virtual starting point $0'$ and unit amplitude

The virtual starting point $0'$ of a step response oscillogram is defined as the intersection of the time axis and a straight line drawn as a tangent to the steepest portion of the front of the response.

In the case of a response with oscillations on the front, a mean curve is drawn through the oscillations and used to determine the straight line. In the case of significant initial distortion as shown in Figures 3f, 3g and 3h, this distorted part is neglected when drawing the tangent and the virtual zero point is determined as above. It is self-evident that the determination of $0'$ is to a certain extent arbitrary, particularly in the case of responses having large initial distortion. The level corresponding to unit amplitude must also be determined. In IEC Publication 60-3, this amplitude is defined with the help of the scale factor of the system (see Sub-clause 25.1). A simple but sufficiently accurate method for the determination is to take the level to which the response approaches or around which the response oscillates as unit amplitude. This may require the use of different sweep speeds. To clearly determine this reference line it may be desirable to eliminate oscillation in the step response. This can be done with capacitor dividers by inserting a resistor at the junction of the measuring system lead and the switch used for generating the step.

20.2 Determination of the response time T

To determine the response time T , the areas T_α , T_β , etc. are determined as the areas enclosed between the step and unit step response, both of which are assumed to start at $0'$. In the case where there is an initial deviation between the response oscillogram and the straight line used to determine $0'$, such as shown in Figures 3c to 3h, this initial deviation is neglected and the straight line is considered to represent the response for that part.

In the experimental circuit for determining the response parameters, a vertical lead has to be used to connect the horizontal divider lead to the step generator. An approximate step response T_n called the "experimental unit step response" is obtained and equals:

$$T_n = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - \dots$$

On obtient le temps de réponse T à partir de T_n en le corrigeant de l'effet de la connexion verticale. Le temps de réponse T est donné par:

$$T = T_n + \tau_v \left(1 - \frac{Z}{R}\right) \quad \text{Equation 20a}$$

où:

τ_v = temps de propagation le long du conducteur vertical; $\tau_v = h/c$ où h est la longueur du conducteur vertical et c la vitesse de la propagation d'une onde électromagnétique (300 m/μs)

R = résistance entre le sommet du diviseur et la terre. R est infinie pour les diviseurs capacitifs et les diviseurs mixtes avec résistance en série

Z = impédance caractéristique du conducteur vertical. En pratique, il est suffisant d'utiliser l'impédance du conducteur horizontal à une hauteur au-dessus du sol égale à la longueur du conducteur vertical donnée par:

$$Z \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \ln \frac{4h}{d} \approx 60 \ln \frac{4h}{d} \Omega$$

où:

d = diamètre du conducteur

μ_0 = perméabilité du vide = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ϵ_0 = constante diélectrique du vide = $8,85 \times 10^{-12}$ F/m

Le terme $\tau_v \left(1 - \frac{Z}{R}\right)$ représente la correction de l'effet du conducteur vertical.

20.3 Détermination du temps de distorsion initial T_0

Le temps de distorsion initial T_0 est défini comme la surface entre la réponse à l'échelon unité et la ligne droite servant à déterminer $0'$; il est pris à partir du moment où la réponse commence à dévier de zéro jusqu'au moment où elle rencontre la ligne droite (voir figures 3f, 3g et 3h).

20.4 Détermination du temps de réponse T_i du circuit sans conducteur haute tension

Le temps de réponse T_i du circuit sans conducteur haute tension est déterminé comme:

$$T_i = T + \tau_\ell \left(1 - \frac{Z}{R}\right)$$

$$= T + T_\ell$$

Equation 20b

$$\tau_\ell = \ell/c$$

Equation 20c

où:

τ_ℓ = temps de propagation le long du conducteur horizontal

ℓ = longueur du conducteur horizontal

T_ℓ = temps de réponse du conducteur (voir paragraphe 20.2 pour la signification des autres symboles)

Note. - On donne à l'annexe A une méthode pour estimer la valeur T_i pour un simple diviseur résistant.

The response time T is determined from T_n by correcting for the effect of the vertical lead. The response time T is given by:

$$T = T_n + \tau_v \left(1 - \frac{Z}{R}\right) \quad \text{Equation 20a}$$

where:

τ_v = propagation time along the vertical lead: $\tau_v = h/c$ where h is the length of the vertical lead and c is the velocity of propagation of an electromagnetic wave (300 m/ μ s)

R = resistance between the top of the divider and ground. R is infinite for capacitor dividers and for mixed dividers with series resistance

Z = characteristic impedance of the vertical lead. For practical purposes, it is sufficiently accurate to use the impedance of the horizontal lead at a height above ground equal to the length of the vertical lead, given by:

$$Z \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \ln \frac{4h}{d} \approx 60 \ln \frac{4h}{d} \Omega$$

where:

d = diameter of the lead

μ_0 = permeability of vacuum = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

ϵ_0 = permittivity of vacuum = 8.85×10^{-12} F/m

The term $\tau_v \left(1 - \frac{Z}{R}\right)$ represents the correction for the effect of the vertical lead.

20.3 Determination of the initial distortion time T_0

The initial distortion time T_0 is defined as the area between the unit step response and the straight line used to determine θ , and is taken from the moment the response first deviates from zero up to the moment when it meets the straight line (see figures 3f, 3g and 3h).

20.4 Determination of the response time T_1 of the system without high-voltage lead

The response time T_1 of the system without high-voltage lead is determined from:

$$T_1 = T + \tau_\ell \left(1 - \frac{Z}{R}\right)$$

$$= T + T_\ell$$

Equation 20b

$$\tau_\ell = \ell/c$$

Equation 20c

where:

τ_ℓ = propagation time along the horizontal lead

ℓ = length of the horizontal lead

T_ℓ = lead response time (for the significance of the other symbols, see Sub-clause 20.2)

Note. – In Appendix A, a method is given for estimating a value for T_1 for a simple resistor divider.

20.5 Détermination de la zone de résonance

La zone de résonance est définie comme étant la gamme de fréquences comprises entre la fréquence de résonance visible lorsqu'on détermine la réponse à l'échelon avec la plus longue connexion qu'on utilisera en pratique, et environ 1,5 fois la fréquence visible avec la connexion la plus courte. On ne tient pas compte des oscillations sur le front de l'oscillogramme de réponse, comme représenté sur la figure 3e, page 67, dans cette détermination.

Note. – Pour déterminer la zone de résonance, il peut être souhaitable d'enregistrer une réponse supplémentaire à l'échelon après avoir court-circuité toutes les résistances série servant à l'amortissement du diviseur, de façon à augmenter l'amplitude et la durée des oscillations.

20.6 Détermination du temps de réponse partiel T_a

Le temps de réponse partiel T_a est donné par la surface comprise entre l'échelon unité décalé au point 0' et la courbe de réponse à l'échelon unité jusqu'à l'instant où la réponse atteint pour la première fois l'amplitude unité (voir figure 3).

Cette quantité est liée à la raideur effective de la réponse à l'échelon et indique l'aptitude du système de mesure à reproduire les oscillations superposées à la tension de choc. Dans des cas particuliers, on utilise un paramètre différent T_a' (voir paragraphe 23.2 et figure 8, page 71).

21. Détermination des paramètres de réponse par la méthode de l'éclateur à sphères

L'éclateur à sphères à utiliser dans cette méthode est un éclateur vertical ayant des sphères de 250 mm de diamètre. Il doit remplir les prescriptions établies dans la Publication 52 de la CEI et doit être correctement irradié. L'éclateur à sphères est utilisé de deux façons différentes pour la détermination des paramètres de la réponse à l'échelon. Pour la détermination de T et T_i , la caractéristique tension-durée de l'éclateur est utilisée, alors que pour déterminer T_a l'éclateur est utilisé comme un générateur d'échelon. On notera cependant que l'emploi d'un éclateur en générateur d'échelon n'est pas satisfaisant pour déterminer T et T_i car le claquage de l'éclateur est trop lent.

21.1 Détermination du temps de réponse T

L'éclateur à sphères ci-dessus, quand il est réglé à une distance de 60 mm, a une courbe tension-durée connue avec précision pour des tensions de polarité négative à croissance linéaire. La courbe est reproduite à la figure 4, page 68, sous une forme qui permet de l'utiliser pour déterminer le temps de réponse T d'un circuit de mesure.

Lors de la détermination du temps de réponse, le circuit de mesure est utilisé pour mesurer un ou plusieurs points de la courbe de la figure 4. La différence entre la valeur donnée par la courbe et celle mesurée de la tension de claquage, corrigée pour les conditions atmosphériques normalisées (voir Publication 52 de la CEI), est introduite dans la formule suivante pour obtenir le temps de réponse du circuit.

$$T = \frac{\Delta U}{S} \text{ (ns)} \quad \text{Equation 21a}$$

où:

ΔU = différence, en kilovolts, entre la tension de claquage U donnée à la figure 4 et la valeur mesurée et corrigée pour les conditions atmosphériques normalisées

S = vitesse de croissance de la tension mesurée, en kilovolts par nanoseconde

Si la tension de claquage mesurée est plus basse que celle donnée par la figure 4, le temps de réponse est positif; si elle est plus élevée, le temps de réponse est négatif.

20.5 Determination of the resonant frequency range

The resonant frequency range is defined as the range extending from the resonant frequency visible on the step response taken with the longest practicable lead to about 1.5 times the frequency which is visible when the shortest lead is used. Oscillations on the front of the response oscillogram as shown in Figure 3e, page 67, are neglected in this determination.

Note. – When determining the resonant frequency range, it may be found desirable to take an additional step response with all series damping resistors in the divider short-circuited in order to increase the amplitude and duration of the oscillations.

20.6 Determination of partial response time T_a

The partial response time T_a is given by the area between the unit step shifted to the point 0' and the unit step response curve up to the instant when the response first reaches unit amplitude (see Figure 3).

This is the quantity which is related to the effective steepness of the step response and is indicative of the ability of the measuring system to reproduce oscillations superimposed on an impulse voltage. In particular cases, a different parameter T_a is used (see Sub-clause 23.2 and Figure 8, page 71).

21. Determination of the response parameters by the sphere-gap method

The sphere-gap to be used in this method is a vertical one having 250 mm diameter spheres. It must meet the requirements laid down in IEC Publication 52 and shall be adequately irradiated. The sphere-gap is used in two different ways for the determination of the step response parameters. For the determination of T and T_r , the voltage/time characteristic of the gap is used, whereas for determining T_a , the gap is used as a step generator. Note, however, that using the gap as a step generator is not satisfactory for determining T and T_r because the gap sparkover is too slow.

21.1 Determination of the response time T

The above sphere-gap, when set to a spacing of 60 mm, has an accurately known voltage/time curve for linearly rising voltages of negative polarity. The curve is reproduced in Figure 4, page 68, in a form which enables it to be used for determining the response time T of a measuring system.

To determine the response time, the measuring system is used to measure one or more points on the curve of Figure 4. The difference between the value given by the curve and the measured value of sparkover voltage, corrected to standard atmospheric conditions (see IEC Publication 52) is inserted in the following formula to obtain the response time of the system.

$$T = \frac{\Delta U}{S} \text{ (ns)} \quad \text{Equation 21a}$$

where:

ΔU = difference, in kilovolts, between the sparkover voltage U given by Figure 4 and the measured value corrected to standard atmospheric conditions

S = measured rate of rise of voltage, in kilovolts per nanosecond

If the measured sparkover voltage is lower than that given by Figure 4 the response time is positive; if it is higher, the response time is negative.

Pour obtenir de cette méthode la plus grande précision, il est recommandé de procéder de la façon suivante:

- a) L'éclateur à sphères doit être réglé initialement à un écartement de 70 mm à 75 mm et le générateur de choc ajusté de façon à produire sur celui-ci des ondes de choc négatives à croissance aussi linéaire que possible. La partie critique de la croissance de tension enregistrée est représentée par les derniers 40% avant le claquage de l'éclateur, comme indiqué sur la figure 5a, page 69, à moins que cette portion ne soit tout entière au-dessus de 160 kV. Dans ce dernier cas, la partie critique part de 160 kV comme à la figure 5b (valeur approximative de la tension de claquage 50% de l'éclateur quand il est réglé à un écartement de 60 mm).
- b) Trois chocs doivent être enregistrés avec l'éclateur réglé à ce plus grand écartement sans aucun changement des réglages du générateur. La vitesse de croissance est déterminée pour chacun des oscillogrammes et la moyenne des trois vitesses constitue le terme S de l'équation 21a. La vitesse de croissance est la pente de la droite la mieux adaptée pour la partie critique de la croissance de la tension décrite au point a) ci-dessus.
- c) On règle alors l'éclateur à la valeur de 60 mm. On enregistre encore trois oscillogrammes sans rien changer aux réglages du générateur. La moyenne des trois tensions de claquage enregistrées est corrigée pour les conditions atmosphériques normalisées et on détermine ΔU en se servant de la figure 4, page 68, et de la valeur de S déterminée précédemment. Le temps de réponse est alors calculé au moyen de l'équation 21a.
- d) On répète l'opération avec deux autres vitesses de croissance de la tension, nettement différentes, de façon à fournir trois déterminations de T .
- e) La moyenne des trois temps de réponse obtenus est le temps de réponse du circuit, et la dispersion des trois valeurs donne l'indication de la précision de la détermination.

Note. – Lorsqu'on utilise la méthode décrite ci-dessus, il est important de respecter les règles suivantes:

- a) L'écartement des sphères, l'irradiation de l'intervalle et les corrections atmosphériques doivent être réalisés avec soin.
- b) Le coefficient de conversion du système de mesure doit être connu avec précision. L'erreur sur le temps de réponse sera égale à l'erreur relative sur le coefficient de conversion, multiplié par la durée jusqu'à l'amorçage.
- c) Il doit être possible de déterminer, à partir de la tension de sortie du système de mesure, la raideur de la tension appliquée, c'est-à-dire que celle-ci doit être linéairement croissante pendant un temps suffisamment long pour permettre à la tension de sortie de suivre la tension d'entrée.
En pratique, la méthode de l'éclateur à sphères n'est généralement pas utilisable pour les circuits de mesure de grandes dimensions car les règles énoncées au point c) ne sont pas respectées.

21.2 Détermination du temps de réponse partiel T_a ou T'_a

Afin de déterminer le temps de réponse partiel T_a ou T'_a le même éclateur que ci-dessus est utilisé, mais son réglage n'est plus critique. Pour obtenir la chute de tension la plus raide et pour réduire l'influence du générateur de choc, il est recommandé d'insérer une résistance de l'ordre de 10 k Ω dans le conducteur allant du générateur de choc à l'éclateur à sphères, à l'extrémité du conducteur côté éclateur. De même, il est souhaitable que la tension sur l'éclateur ait essentiellement un taux de croissance nul à l'instant où l'éclateur amorce. Cela peut s'obtenir en coupant un choc sur ou au voisinage de la crête. L'enregistrement de la chute de tension peut être traité comme une réponse à l'échelon pour la détermination de T_a ou T'_a . La valeur obtenue sera un peu plus grande que celle qui est obtenue par la méthode de l'échelon unité, mais elle sera suffisamment précise pour la plupart des applications.

21.3 Détermination du temps de réponse T_l du circuit de mesure sans conducteur haute tension

Le temps de réponse T_l est calculé à partir de la valeur de T déterminée ci-dessus de la même manière que celle décrite au paragraphe 20.4.

In order to achieve the greatest accuracy with this method, the following procedure is recommended:

- a) The sphere-gap should initially be set to a spacing of 70 to 75 mm and the impulse generator adjusted to produce across it negative impulses which rise as linearly as possible. The critical part of the recorded voltage rise is the last 40% before the sparkover of the gap (as in Figure 5a, page 69) unless this portion is all above 160 kV. In this latter case, the critical part extends down to 160 kV as in Figure 5b (the approximate value of the 50% sparkover voltage of the gap when set to a spacing of 60 mm).
- b) Three impulses should be recorded with the gap set at this larger spacing without any change in the generator settings or controls. The rate of rise is determined for each of the oscillograms and the mean of the three rates is used as S in equation 21a. The rate of rise is the slope of the best fit straight line for the critical part of the voltage rise described in item a) above.
- c) The gap is then set to the 60 mm value. Three more oscillograms are recorded without any change in the generator settings or controls. The mean of the three recorded sparkover voltages is corrected to standard atmospheric conditions and ΔU determined using Figure 4, page 68, in conjunction with the previously determined value of S . The response time is then calculated using the equation 21a.
- d) The procedure is repeated with two other appreciably different rates of rise of voltage to provide three determinations of T .
- e) The average of the three response times obtained is the response time of the system and the spread of the three values is indicative of the accuracy of the determination.

Note. – For the use of the method described above it is important that the following requirements are fulfilled:

- a) The gap setting, the irradiation of the gap, and the correction for the atmospheric conditions must be properly done.
- b) The scale factor applicable to the measuring system must be accurately known. The error in the response time determination will be equal to the percentage error in the scale factor multiplied by the time to sparkover.
- c) It must be possible to determine the steepness of the applied voltage from the output of the measuring system, i.e. the applied voltage must be linearly rising for a sufficiently long time to enable the output voltage to follow the input voltage.
In practice, the sphere-gap method is not usually applicable to large measuring systems since they do not comply with Item c) above.

21.2 Determination of the partial response time T_a or T'_a

To determine the partial response time T_a or T'_a the same gap as above is used but the setting is no longer critical. To obtain the steepest voltage collapse and to reduce the influence of the impulse generator, it is recommended that a resistor of the order of 10 k Ω be inserted in the lead from the impulse generator to the sphere-gap, at the gap end of the lead. Also, it is desirable that the voltage across the gap has essentially zero rate of rise at the time that the gap sparks over. This can be achieved by chopping an impulse at or near the peak. The resulting record of the voltage collapse can be treated as a step response for the determination of T_a or T'_a . The value obtained will be somewhat larger than that obtained by the unit step method, but it is sufficiently accurate for most purposes.

21.3 Determination of the response time T_t of the measuring system without high-voltage lead

The response time T_t is calculated from the value of T determined above in the same manner as described in Sub-clause 20.4.

21.4 Détermination de la zone de fréquence de résonance

La zone de fréquence de résonance est déterminée de la même manière que celle décrite au paragraphe 20.5 en utilisant l'éclateur comme générateur d'échelon, comme décrit au paragraphe 21.2.

22. Relation entre les paramètres de réponse et les erreurs de mesure

Il y a essentiellement trois paramètres de réponse: le temps de réponse T , le temps de réponse partiel T_a et le temps de distorsion initial T_o , qui peuvent causer des erreurs dans les mesures de l'amplitude et des paramètres de temps des tensions de choc.

22.1 Erreurs causées par le temps de réponse T

Le temps de réponse T affecte la mesure des paramètres de temps et l'amplitude des chocs coupés sur le front.

Conformément à la définition du temps de réponse donné dans la Publication 60-3 de la CEI, la réponse d'un dispositif à une rampe peut, après un certain temps, être considérée comme suivant la rampe avec un retard T égal au temps de réponse. Au moment de la coupure, la différence δ entre la tension appliquée et mesurée devient:

$$\delta = S \cdot T \quad \text{Equation 22a}$$

où:

S = raideur de la rampe

On peut aussi montrer, comme expliqué dans l'annexe B, que la même relation peut être obtenue à partir du temps de réponse déterminé par la réponse à l'échelon unité:

L'équation 22a est approximativement valable dans les conditions suivantes:

- la forme de la tension de sortie est linéaire et parallèle à la forme de la tension d'entrée divisée par le coefficient de conversion;
- un point virtuel zéro de la réponse est défini conformément au paragraphe 20.1; ce point est aussi considéré comme le point de départ de toute tension à mesurer;
- une mesure du temps de réponse est utilisée comme défini au paragraphe 20.2;
- le temps de distorsion initial T_o , comme défini au paragraphe 20.3, est suffisamment petit.

Des influences dans les cas plus généraux sont illustrées à la figure 6a, page 70, pour un choc à front linéaire, à la figure 6b pour un choc à front non linéaire coupé et à la figure 6c pour un choc plein. La figure 6d illustre un cas où une distorsion apparaît avant que la valeur de crête ne soit atteinte; ce phénomène peut être le résultat d'une distorsion initiale de la réponse. Elle montre aussi que l'instant mesuré de la valeur de crête ne coïncide pas avec le moment de la coupure; ce qui peut donner une erreur différente de celle déterminée par l'équation 22a. Cependant, en général, on peut négliger ce phénomène et, dans le cas des chocs coupés sur le front, l'erreur δ , définie comme la différence entre la valeur de crête des tensions mesurée et appliquée, devient approximativement:

$$\delta \approx S_L \cdot T \quad \text{Equation 22b}$$

où:

S_L = raideur de la tension appliquée avant coupure

De même, l'erreur δ_t sur le temps de coupure mesuré pour une tension appliquée à front linéaire devient:

$$\delta_t \approx T \quad \text{Equation 22c}$$

21.4 Determination of the resonant frequency range

The resonant frequency range is determined in the same manner as described in Sub-clause 20.5 using the gap as a step generator as in Sub-clause 21.2.

22. Relation of response parameters to measuring errors

There are three response parameters: response time T , partial response time T_a and initial distortion time T_o , which can cause errors in the measurement of amplitude and time parameters of impulse voltages.

22.1 Errors caused by response time T

The response time T affects the measurement of the time parameters and the amplitude of front-chopped impulses.

According to the definition of the response time given in IEC Publication 60-3, the response of the system to a ramp, after a certain time, can be regarded as following the ramp with a delay T , equal to the response time. At the moment of chopping, the difference δ between the applied and measured voltage then becomes:

$$\delta = S \cdot T \quad \text{Equation 22a}$$

where:

S = steepness of ramp

It can also be shown, as explained in Appendix B, that the same relation can be derived considering the response time determined from the unit step response.

Equation 22a is approximately valid under the following conditions:

- the output voltage form is linear and is parallel to the input voltage form divided by the scale factor;
- a virtual zero point of the response is defined according to Sub-clause 20.1; this point also is considered as the starting point for any voltage to be measured;
- a measure of the response time is used as defined in Sub-clause 20.2;
- the initial distortion time T_o , as defined in Sub-clause 20.3, is sufficiently small.

More general relationships are illustrated in Figure 6a, page 70, for a linearly rising front chopped impulse, in Figure 6b for a non-linearly rising front chopped impulse and in Figure 6c for a full impulse. Figure 6d illustrates a case where a distortion occurs before the peak value is reached. This may be an effect of the initial distortion of the response. It also illustrates how the instant of the measured peak value does not coincide with the moment the chopping occurred which may result in a different error from one given by equation 22a. However, this phenomenon usually can be neglected and, for front chopped impulses, the measuring error δ , defined as the difference between the peak value of the applied voltage and the measured one, becomes approximately:

$$\delta \approx S_L \cdot T \quad \text{Equation 22b}$$

where:

S_L = steepness of the applied voltage prior to chopping

Similarly, the error δ_t in the measured time to chopping for a linearly rising applied voltage becomes:

$$\delta_t \approx T \quad \text{Equation 22c}$$

Pour d'autres types de tension appliquée, on ne peut pas donner de règle simple.

L'erreur de mesure de la valeur de crête des chocs pleins ne peut pas être déterminée de la même façon parce que la raideur est de zéro à la crête du choc. En fait, il y a une erreur, mais elle est très inférieure à celle correspondant à un choc coupé sur le front.

Le retard donne aussi une erreur sur la mesure des paramètres de temps d'un choc plein, comme le montre la figure 6c, page 70. La plus grande erreur concerne généralement la mesure du temps de front.

Les erreurs sur la valeur de crête et sur les paramètres de temps peuvent être évaluées en appliquant le théorème de Duhamel à l'oscillogramme de réponse et à la tension qui est supposée être appliquée.

22.2 Erreurs causées par le temps de réponse partiel T_a

Le choc à mesurer peut avoir des oscillations superposées. La précision avec laquelle elles sont enregistrées dépend de la raideur de la réponse à l'échelon du dispositif de mesure.

La Publication 60-2 de la CEI: Techniques des essais à haute tension, Deuxième partie: Modalités d'essais, spécifie que l'amplitude de ces oscillations ne doit pas dépasser 5% de la valeur de crête du choc mesuré. Pour satisfaire à cette spécification, il est nécessaire d'être sûr que le dispositif reproduit ces oscillations correctement.

Le rapport α entre l'amplitude réelle et l'amplitude mesurée de ces oscillations est donnée approximativement par:

$$\alpha = \sqrt{1 + (2\pi f T_a)^2} \quad \text{Equation 22d}$$

où:

f = fréquence d'oscillation

22.3 Erreurs causées par le temps de distorsion initial T_0

Le temps de distorsion initial T_0 peut être une cause d'erreurs supplémentaires dans la mesure des chocs coupés sur le front. On ne donne pas de méthodes de corrections de ces erreurs, mais elles peuvent être rendues négligeables en limitant la valeur de T_0 (voir paragraphe 23.1). Si T_0 ne respecte pas les spécifications du paragraphe 23.1, il est préférable de modifier le dispositif de mesure.

23. Critères relatifs aux corrections

Les mesures de la forme d'un choc et de la valeur de crête peuvent être suffisamment précises à condition de respecter les conditions précisées au paragraphe 23.1.

Dans certains cas, des corrections peuvent être faites conformément au paragraphe 23.2. Des procédures applicables lorsque les oscillations mesurées excèdent le niveau permis sont précisées au paragraphe 23.3 et, en plus, dans l'annexe C.

23.1 Conditions pour que les mesures soient suffisamment précises sans correction

- Le temps de réponse T doit être dans les limites spécifiées au paragraphe 8.2.2 de la Publication 60-3 de la CEI.
- Le temps de réponse partiel T_a et la fréquence maximale enregistrée f devraient respecter les conditions suivantes:

$$T_a \leq \frac{2}{\pi f_{\max}} \quad \text{Equation 23a}$$

$$f \leq \frac{1}{4\pi T_a} \quad \text{Equation 23b}$$

où:

f_{\max} = fréquence maximale qui peut raisonnablement apparaître dans le circuit (voir Publication 60-3 de la CEI)

For other types of applied voltage, no simple rules can be given.

The error in the measurement of the peak value of full impulses cannot be determined according to the formula since the steepness is zero at the peak. In fact, an amplitude error occurs but the error becomes much less than the one when the impulse is chopped on the front.

The delay, as indicated in Figure 6c, page 70, also gives an error in the measurement of the time parameters of the full impulse. The greater error usually occurs in the measurement of the front time.

The errors in peak value and in time parameters can be evaluated by applying Duhamel's theorem to the response oscillogram and the assumed form of the applied voltage.

22.2 Errors caused by partial response time T_a

The impulse to be measured may have superimposed oscillations. The accuracy with which these are recorded is governed by the steepness of the step response of the measuring system.

IEC Publication 60-2, High-voltage Test Techniques, Part 2: Test Procedures, requires that the amplitude of these oscillations does not exceed 5% of the measured impulse peak value. To comply with this requirement it is necessary to ensure that the system reproduces these oscillations correctly.

The ratio α of the actual to the measured amplitude of these oscillations is given approximately by:

$$\alpha = \sqrt{1 + (2\pi f T_a)^2} \quad \text{Equation 22d}$$

where:

f = frequency of oscillation

22.3 Errors caused by initial distortion time T_o

The initial distortion time T_o can cause additional errors in the measurement of front chopped impulses. No guidance is given concerning corrections for these errors but they can be made negligible by restricting the magnitude of T_o (see Sub-clause 23.1). If T_o does not meet the requirements of Sub-clause 23.1, the measuring system preferably should be modified.

23. Criteria relating to corrections

Measurements of the basic impulse shape and peak value can be sufficiently accurate providing they meet the conditions outlined in Sub-clause 23.1.

In certain cases corrections may be made as described in Sub-clause 23.2. Procedures applicable when oscillations exceed permitted levels are mentioned in Sub-clause 23.3 and further described in Appendix C.

23.1 Conditions for measurements to be sufficiently accurate without corrections

a) The response time T must be within the limits specified in Sub-clause 8.2.2 of IEC Publication 60-3.

b) The partial response time T_a and the highest recorded frequency f should meet the following requirements:

$$T_a \leq \frac{2}{\pi f_{\max}} \quad \text{Equation 23a}$$

$$f \leq \frac{1}{4\pi T_a} \quad \text{Equation 23b}$$

where:

f_{\max} = maximum frequency of oscillations which may reasonably occur in the circuit (see IEC Publication 60-3)

Ces conditions sont expliquées comme suit. Dans la publication 60-2 de la CEI, l'amplitude des oscillations sur la crête de la tension de choc est limitée à 5%. L'obligation de pouvoir discerner ces oscillations signifie que leur amplitude sur l'oscillogramme ne doit pas être inférieure à 1% environ. Cela s'applique aussi à la fréquence maximale f_{max} . Par conséquent, il faut que $\alpha \leq 5$ où α est défini selon l'équation 22d. Cela donne les conditions précisées par l'équation 23a.

Si aucune correction ne devait être nécessaire, la valeur de α , à la fréquence enregistrée, ne devrait pas trop dévier de l'unité. Cela donne la condition précisée par l'équation 23b. Il faut noter que, dans les équations 23a et 23b, seule la valeur de T_a devrait être utilisée et pas T'_a .

- c) Le temps de distorsion initial T_o devrait respecter les conditions suivantes:

$$T_o \leq 0,005 T_c \quad \text{Equation 23c}$$

où:

T_c = durée jusqu'à la coupure précisée dans la Publication 60-2 de la CEI

Si $T_o > 0,005 T_c$, il est préférable de modifier le dispositif de mesure. Cela est expliqué comme suit. Pour la détermination du temps de réponse du circuit de mesure, on néglige la partie initiale de la réponse à l'échelon et on admet que son origine se situe au point 0' de la figure 7a, page 71. Cette hypothèse signifie que l'intervalle de temps 0-0' est considéré comme un retard pur, hypothèse acceptable lorsqu'on s'intéresse aux chocs pleins.

La situation est différente lorsqu'on s'intéresse aux chocs coupés sur le front. Si une telle impulsion est coupée rapidement, la coupure peut être considérée comme addition à l'impulsion non coupée d'un échelon négatif et d'une rampe négative, la première ayant la même amplitude et la dernière la même raideur que l'impulsion non coupée à l'instant de la coupure. La rampe négative annule la raideur originale et l'échelon négatif produit la tombée brusque de la tension. Le comportement du système de mesure au moment de la coupure et suivant celle-ci est, par conséquent, déterminé par la partie initiale de ces deux impulsions et particulièrement par sa réponse initiale à un échelon négatif.

Si la réponse à l'échelon a l'allure qu'indique la figure 7a, une déformation importante peut apparaître au voisinage de la crête, comme montré sur la figure 7b. La forme de la distorsion dépend de la pente à l'origine de la chute de tension et de la forme de la réponse à l'échelon dans l'intervalle 0-0'. L'interprétation de tels oscillogrammes doit être faite avec beaucoup de soin. Si l'on doit effectuer une correction en utilisant le temps de réponse comme défini dans ce guide d'application, la crête la plus élevée doit être considérée comme la valeur mesurée.

23.2 Conditions de corrections des mesures et limites d'application des corrections

- a) La correction de la valeur de crête d'un choc coupé sur le front se fait à partir du temps de réponse T . Dans le cas de chocs coupés sur le front après un temps relativement court, il se peut que le dispositif de mesure ne suive pas les règles données dans la Publication 60-3 de la CEI. Dans ce cas, et avec le consentement des partis impliqués, une correction approximative de la valeur de crête mesurée peut être faite conformément à:

$$U_{corr} = U_{mes} + S_L \cdot T \quad \text{Equation 23d}$$

où:

U_{mes} = valeur de crête mesurée

U_{corr} = valeur de crête corrigée

S_L = pente du choc mesurée avant coupure

Lorsque des corrections doivent être faites pour tenir compte du temps de réponse, on doit effectuer la mesure avec deux longueurs différentes pour le conducteur à haute tension. La plus petite des longueurs est celle prévue pour la mesure, et la plus longue doit, de préférence, être assez longue pour ramener le temps de réponse dans les limites spécifiées ou tout

These conditions are explained as follows. In IEC Publication 60-2, the amplitude of oscillations on the peak of an impulse voltage is restricted to 5%. To be discernible, the amplitude on the oscillogram should not be less than about 1%. This applies also to the highest possible frequency, f_{\max} . Consequently, it must be required that $\alpha \leq 5$ where α is defined according to equation 22d. This leads to the conditions expressed by equation 23a.

If no correction should be necessary, the value of α , at the recorded frequency, should not deviate too much from unity. This gives the condition expressed by equation 23b. Note that in the above equations 23a and 23b, only the value of T_a should be used and not T'_a .

- c) The initial distortion time T_o should meet the condition:

$$T_o \leq 0.005 T_c \quad \text{Equation 23c}$$

where:

T_c = time to chopping defined in IEC Publication 60-2

If $T_o > 0.005 T_c$, the measuring system should preferably be modified. This is explained as follows. For the determination of the response time of a measuring system, the initial part of the step response is ignored and the response is assumed to start at the point $0'$ of Figure 7 a, page 71. This assumption means that the time interval $0-0'$ is regarded as a non-distorting delay, an assumption which is acceptable when dealing with full impulses.

The situation is different however, when dealing with front chopped impulses. If such an impulse is sharply chopped, the chopping can be considered as the addition to the unchopped impulse of a negative step and a negative ramp the former having the same amplitude and the latter the same rate of rise as the unchopped impulse at the moment of chopping. The negative ramp cancels the original rate of rise and the negative step produces the sharp drop in voltage. The behaviour of the measuring system at and following the instant of chopping is therefore determined by the initial portion of the response to these two impulses and primarily by its initial response to a negative step.

If the step response has the shape shown in Figure 7a, a considerable distortion may take place around the peak of the impulse voltage as shown in Figure 7b. The type of distortion depends on the original rate of voltage collapse and of the shape of the step response during the interval $0-0'$. Caution should be exercised in the evaluation of such oscillograms. If a correction has to be applied using the response time as defined in this application guide, the highest peak should be considered as the measured value.

23.2 Conditions for correcting measurements and limits of application of the corrections

- a) Correction of the peak value of a front-chopped impulse is based on the response time T . In the case of impulses chopped on the front after relatively short times, the measuring system may not fulfil the requirements of IEC Publication 60-3. For such cases, and with agreement between the parties involved, an approximate correction of the measured peak value may be made according to:

$$U_{\text{corr}} = U_{\text{meas}} + S_L \cdot T \quad \text{Equation 23d}$$

where:

U_{meas} = measured peak value

U_{corr} = corrected peak value

S_L = slope of the measured impulse prior to the chopping

When corrections for response time are to be made, a test measurement should be made using two different lead lengths for the measuring system. The shorter one should be the length which it is desired to use for the measurement and the longer one should preferably be long enough to bring the response time to within the required limits, or at least long

au moins assez longue pour que les deux versions du circuit de mesure aient des temps de réponse nettement différents. Chacune des mesures doit alors être corrigée en tenant compte du temps de réponse correspondant, et on peut généralement admettre que la correction est valable si les deux valeurs corrigées diffèrent de moins de 2% ou 3% et que la correction ne dépasse pas 20%.

Les seules mesures du paramètre de temps qui peuvent normalement être corrigées sont celles dans lesquelles les deux points définissant le paramètre sont localisés sur une portion du choc qui a une pente constante. Cela implique, généralement, que seules les mesures de T_r peuvent être corrigées en toute sécurité. T_r est le temps de montée d'un choc linéairement croissant coupé sur le front (voir la Publication 60-2 de la CEI). La correction est faite en ajoutant algébriquement le temps de réponse du circuit à la valeur mesurée du paramètre de temps. Lorsque de telles corrections sont effectuées, leur validité doit être vérifiée de la même manière que pour les corrections relatives aux mesures d'amplitude.

Dans tous les cas où des valeurs mesurées sont corrigées, il est important que toutes précautions soient prises pour s'assurer que la correction est précise et justifiée. Même dans ce cas, les résultats non corrigés doivent être mentionnés en même temps que ceux qui sont corrigés.

- b) Si les critères donnés dans les équations 23a et 23b ne sont pas respectés, l'amplitude vraie des oscillations est obtenue en multipliant l'amplitude mesurée de l'oscillation par α , où α est donné par l'équation 23e sauf dans les cas b)1) et b)2) ci-dessous.

$$\alpha = \sqrt{1 + (2\pi f T_a)^2} \quad \text{Equation 23e}$$

où:

f = fréquence des oscillations

- 1) Quand la portion initiale raide ne monte qu'à un niveau $k < 1$ et qu'à partir de ce niveau la réponse monte nettement plus lentement (voir figure 8, page 71), on détermine un temps de réponse partiel T_a . C'est la surface comprise entre l'échelon unité et la partie raide de la réponse à l'échelon, prolongée jusqu'à l'amplitude unité.

Si $k > 0,4$

$$\alpha = \frac{1}{k} \sqrt{1 + (2\pi f T_a)^2} \quad \text{Equation 23f}$$

Si $k \leq 0,4$, on utilise l'équation 23e avec T_a .

- 2) Dans le cas de dispositifs de mesure avec des résonances significatives α est pris égal à l'unité pour les fréquences inférieures à la zone de résonance et comprises dans cette zone. Pour les fréquences supérieures à cette zone, on utilise l'équation 23e.

Note. - La résonance augmente l'amplitude des oscillations. Donc, une application de la règle b)2), ci-dessus, donnera des valeurs allant dans le sens de la sécurité.

Les amplitudes corrigées sont comparées aux limites données dans la Publication 60-2 de la CEI dans lesquelles on néglige les oscillations dont les fréquences sont supérieures à f_{\max} .

La procédure relative aux oscillations décrites aux paragraphes 23.1b) et 23.2b) est illustrée par l'organigramme de la figure 9, page 72, pour des réponses non oscillatoires ou comportant un dépassement, tandis que la figure 10, page 74, s'applique aux réponses avec une zone de résonance.

- c) On ne recommande pas de corrections relatives au temps de distorsion initial T_o . Si les conditions données par l'équation 23c ne peuvent pas être remplies, il est préférable de modifier le dispositif de mesure.

enough to ensure that the two versions of the measuring system have appreciably different response times. Each of the measurements should then be corrected for the appropriate response time and if the corrected values agree within say 2% or 3% and the correction does not exceed 20%, it can generally be assumed that the method of making the correction is valid.

The only time parameter measurements which can normally be corrected are those in which the two points defining the parameter are located on a portion of the impulse which has a constant slope. This generally means that only measurements of T_r can safely be corrected. T_r is the rise time for a linearly rising front chopped impulse (see IEC Publication 60-2). The correction is made by adding the response time of the system algebraically to the measured value of the time parameter. When such corrections are made, their validity should be checked in the same manner as for corrections to amplitude measurements.

In all cases where measured values are corrected, it is important that every precaution be taken to ensure that the correction is accurate and justified. Even then, the uncorrected results should be reported together with the corrected ones.

- b) If the criteria given in equations 23a and 23b are not met, the true amplitude of the oscillations is then obtained by multiplying the recorded amplitude of the oscillation by α , where α is given by equation 23e, except in cases b)1) and b)2) below.

$$\alpha = \sqrt{1 + (2\pi f T_a)^2} \quad \text{Equation 23e}$$

where:

f = frequency of the oscillations

- 1) When the response has a steep initial portion which only extends to a level $k < 1$, and from this level on, the response rises much more slowly (see Figure 8, page 71), a partial response time T'_a is determined. This is the area enclosed by the unit step and the steep portion of the step response extended to unit amplitude.

If $k > 0.4$

$$\alpha = \frac{1}{k} \sqrt{1 + (2\pi f T'_a)^2} \quad \text{Equation 23f}$$

If $k \leq 0.4$, equation 23e is used with T_a .

- 2) In the case of measuring systems with significant resonance, α is taken as unity for frequencies below and within the resonant frequency range. For frequencies above that range, equation 23e should be used.

Note. – Resonance increases the amplitude of the oscillations. Thus, an application of rule b)2) above will give values on the safe side.

The corrected amplitudes are compared with the limits given in IEC Publication 60-2, in which oscillations with frequencies above f_{\max} are neglected.

The procedure related to oscillations described in Sub-clauses 23.1b) and 23.2b) is illustrated in the flow diagram of Figure 9, page 73, for non-oscillatory responses and responses with an overshoot, while Figure 10, page 75, applies to responses with a resonant frequency range.

- c) There is no recommended correction for the initial distortion time T_0 . If the conditions given by equation 23c cannot be met then the measuring system preferably should be modified.

23.3 Procédures lorsque les oscillations mesurées excèdent le niveau permis

Alors que les oscillations dépassant les niveaux permis devraient normalement exclure l'acceptation de la tension d'essai, il y a des conditions dans lesquelles cette dernière est acceptable. C'est le cas lorsque le circuit de mesure a une zone de résonance à l'intérieur de laquelle il peut amplifier fortement les oscillations présentes sur la tension d'essai, surtout celles qui apparaissent sur la partie inférieure du front. S'il peut être démontré par des essais appropriés que l'amplitude des oscillations sur l'objet à l'essai est négligeable, l'oscillogramme peut être considéré comme acceptable à condition que la présence des oscillations n'empêche pas l'évaluation précise de la forme et de l'amplitude du choc.

Par exemple, si le choc est coupé, sur ou au voisinage de la crête, les oscillations enregistrées devront disparaître avant que ce point ne soit atteint.

Une procédure pour déterminer si les oscillations enregistrées sur l'oscillogramme de la tension d'essai sont présentes dans la tension en travers de l'objet à l'essai est décrite à l'Annexe C.

24. Evaluation d'un circuit de mesure par la méthode de comparaison

Au lieu de déterminer les performances d'un circuit de mesure par une mesure des caractéristiques de réponse, on peut déterminer sa validité pour un type de choc particulier en comparant les résultats obtenus avec ceux provenant d'un circuit de mesure approuvé, indépendant. Si la comparaison est faite avec différentes formes de chocs, des conclusions peuvent être tirées concernant la gamme de formes pour laquelle le circuit est valable, mais en général, il est souhaitable que la comparaison soit faite avec la forme de choc particulière qui est à mesurer. Quand un tel essai est exécuté, les deux circuits doivent être connectés simultanément pour être sûr que le même choc est mesuré par les deux. Ce contrôle peut être fait à un niveau de tension relativement bas, de sorte qu'un circuit approuvé, de niveau nominal beaucoup plus bas que le circuit en essai, puisse être utilisé. A noter qu'il existe une possibilité de couplage entre les deux circuits; des précautions doivent être prises pour s'assurer que cela ne se produise pas.

25. Sources d'erreurs diverses, précautions

25.1 Rapport du diviseur pour des chocs de longue durée

La détermination de la durée de l'impulsion pour laquelle le coefficient de conversion du circuit de mesure est valable est particulièrement importante dans le cas des diviseurs de tension capacitifs. Pour ces diviseurs, une résistance shuntant la capacité basse tension du diviseur peut provoquer un changement du coefficient de conversion avec la durée de la tension appliquée; donc, il faut s'assurer que la constante du temps du bras basse tension du diviseur soit suffisamment grande par rapport à la plus longue durée de l'impulsion de la tension à mesurer.

La variation apparente du rapport du diviseur peut aussi être source d'erreur dans la détermination du temps de réponse du système, puisque la ligne de référence ne peut pas être déterminée avec précision.

Pour les diviseurs à résistance, il faut vérifier que l'augmentation de température des résistances est assez faible pour empêcher toute variation appréciable de la valeur ohmique pendant la durée du choc.

23.3 *Procedures for cases when recorded oscillations exceed permitted level*

While normally oscillations exceeding permitted levels would rule out acceptance of the test voltage, there are conditions under which the test voltage is acceptable. This is the case where the measuring system has a resonant frequency range and within this range it may drastically amplify oscillations present on the test voltage, especially those appearing on the lower portion of the front. If it can be shown by suitable tests that the amplitudes of the oscillations on the test object are negligible, the oscillogram can be considered acceptable provided the presence of the oscillations does not prevent an accurate evaluation of the shape and amplitude of the impulse.

For example, if the impulse is chopped at or near the peak, the recorded oscillations must have died out before this point is reached.

A procedure to determine if the oscillations recorded on the test voltage oscillogram are present on the voltage across the test object is described in Appendix C.

24. **Evaluation of a measuring system by comparison method**

Instead of determining the performance of a measuring system by analysing its response characteristic, its suitability for the measurement of a particular type of impulse may be determined by comparing the results obtained with those from an independent approved measuring system. If the comparison is made with impulses of different shapes, conclusions can be drawn concerning the range of shapes for which the system is suitable, but in general it is desirable that the comparison be made with the particular impulse shape to be measured. When making such a test, both systems should be connected simultaneously to ensure that the same impulse is being measured by both. This test may be performed at a relatively low voltage level so that an approved system of much lower rating than that being tested may be used. Note that there is a possibility that there may be coupling between the two systems and precautions should be taken to ensure that this does not occur.

25. **Various sources of errors, precautions**

25.1 *Divider ratio for long impulse duration*

The determination of the impulse voltage duration for which the scale factor of the measuring system is valid is particularly important in the case of capacitor voltage dividers. For such dividers a shunting resistance across the low voltage capacitor of the divider can cause a change in scale factor with duration of the applied voltage; therefore it has to be ensured that the time constant of the low voltage arm of the divider is sufficiently large compared with the longest duration of impulse voltage to be measured.

The apparent variation of ratio can also produce an error in the determination of the response time of the system, as the reference line cannot be determined accurately.

For resistor dividers, it is necessary to ensure that the temperature rise of the resistors is low enough to prevent any appreciable change in the resistance value during the duration of the impulse.

25.2 Effets de proximité

Le rapport de tension et le temps de réponse d'un diviseur de tension peuvent être affectés tous deux par des modifications dans la capacité à la terre. Il est important que les déterminations des temps de réponse et des rapports du diviseur soient faits avec l'appareil dans une position de fonctionnement type par rapport aux autres objets.

On doit déterminer la distance à conserver entre un circuit de mesure et d'autres objets qui sont soit au potentiel de la terre, soit à la haute tension (voir Publication 60-3 de la CEI). Un moyen pour ce faire est d'étudier les modifications de la réponse à l'échelon quand, par exemple, un plan vertical au potentiel du sol est placé à différentes distances du diviseur de tension. Dans le cas de diviseurs à résistance, si le plan à la terre est trop près, la forme de la réponse à l'échelon sera modifiée parce que les capacités parasites à la terre sont augmentées. Le changement de forme peut ne pas apparaître immédiatement à l'examen visuel de la réponse de sorte que l'effet sur T_a et T_i doit être utilisé pour indiquer le point où la distance minimale a été atteinte.

Cette méthode n'est pas trop sûre pour les diviseurs comprenant des capacités, parce que les capacités parasites au sol peuvent affecter le coefficient de conversion plutôt que les caractéristiques de réponse. Pour de tels diviseurs, il vaut mieux, lorsqu'on étudie l'effet de proximité, mesurer le coefficient de conversion ou le comparer avec celui d'un autre circuit. Cela peut se faire au moyen de mesures simultanées avec les deux circuits pendant que le plan à la terre est déplacé vers le diviseur du circuit en cours d'étude.

Avec une légère modification, la méthode ci-dessus peut aussi être utilisée pour vérifier l'effet de proximité d'objets à haute tension. Dans ce cas, le plan mobile n'est pas relié au sol, mais est soumis à la tension. Une méthode pour effectuer cette vérification est illustrée à la figure 11, page 76. Une tension transitoire est appliquée au plan mobile pendant l'enregistrement de la réponse à l'échelon du circuit de mesure et le temps auquel cette tension est appliquée peut être ajusté en modifiant la longueur de la connexion entre le plan mobile et le générateur d'échelon. En faisant varier la longueur de cette connexion, on peut parfois augmenter la sensibilité de la détection des effets de proximité.

Une autre variante de cette technique peut être utilisée pour déterminer l'effet de différents angles entre l'axe du diviseur et le conducteur à haute tension. Dans ce cas, on supprime le plan mobile du circuit et on mesure la réponse à l'échelon pour différents angles entre le conducteur haute tension et l'axe du diviseur.

25.3 L'effet de couronne, précautions

L'effet de couronne sur le conducteur haute tension peut modifier le temps de réponse d'un circuit de mesure et celui provenant de structures métalliques à des points intermédiaires sur un diviseur de tension peut être la cause d'erreurs de mesure. Dans la plupart des cas, l'emploi de connexions de grand diamètre et d'anneaux de blindage appropriés réduira ces effets, à condition qu'ils soient exempts d'effet de couronne. S'ils ne le sont pas, ils peuvent avoir un effet sur le temps de réponse et les erreurs de mesure.

25.4 Contrôle du niveau de perturbations

Des indications erronées sur les appareils ou oscillographes peuvent être dues à de forts courants circulant dans le circuit de terre (surtout dans les gaines des câbles de mesure), ou à l'influence de champs parasites sur le circuit de mesure ou sur l'appareil de mesure lui-même.

Une méthode d'étude du niveau de perturbations provoquées par des courants dans la gaine d'un câble de mesure consiste à court-circuiter l'extrémité d'entrée du câble, en laissant la gaine connectée à la borne de terre du diviseur de tension comme dans un essai réel et sans changer aucune autre connexion dans le circuit. Si l'on applique au circuit d'essai un choc d'un niveau

25.2 Proximity effects

Both the voltage ratio and the response time of a voltage divider may be affected by changes in the capacitance to earth. It is important that the determinations of response times and divider ratios be made with the apparatus in a typical working position relative to other objects.

The minimum clearance which must be maintained between a measuring system and other objects which are at either earth or high potential should be determined (see IEC Publication 60-3). One method of doing this is to investigate the effects on the step response when a vertical earth plane for instance, is placed at different distances from the voltage divider. In the case of resistor dividers, when the earth plane is too close, the shape of the step response will be affected because the stray capacitances to earth are augmented. The change in shape might not be readily apparent from a visual inspection of the response so the effect on T_a and T_r should be used as an indication of when the minimum clearance has been reached.

This method is not too reliable for dividers involving capacitors because the stray capacitances to earth may affect the scale factor rather than the response characteristics. For such dividers, the scale factor should be measured or compared with that of some other system while the proximity effect is being investigated. This can be done by making simultaneous measurements with both systems as the earth plane is being moved in towards the divider of the system being investigated.

With a slight variation, the above method can also be used to check the proximity effect of objects at high voltage. In this case, the moveable plane is live instead of being earthed. A method for carrying out this check is illustrated in Figure 11, page 76. Here a transient voltage is applied to the moveable plane during the recording of the step response of the measuring system and the time at which this voltage is applied can be adjusted by changing the length of the lead between the moveable plane and the step generator. Varying the length of this lead can sometimes increase the sensitivity of the detection of proximity effects.

Another variation of the technique may be used to check the effect of having the high voltage lead at different angles relative to the axis of the divider. In this case the moveable plane is removed from the circuit and the step response is measured for different angles of the high voltage lead relative to the axis of the divider.

25.3 Corona effects, precautions

Corona on the high-voltage lead may change the response time of a measuring system and corona from metalwork at intermediate points on a voltage divider may be responsible for measuring errors. In most cases, the use of connections of large diameter and of suitable screening rings will reduce these effects, providing they are corona-free. If not corona-free, they may affect the response time and the measuring errors.

25.4 Disturbance level check

Spurious indications on instruments or oscilloscopes may occur due to large currents circulating in the earthing system (especially in the sheaths of measuring cables), or to the influence of stray fields on either the measuring circuit or the instrument itself.

One method for investigating the disturbance level caused by currents in the sheath of a measuring cable is to short-circuit the input end of the cable, leaving the sheath connected to the earth terminal of the voltage divider as in an actual test and without changing any other connections in the circuit. If an impulse of about 60–100% of the normal test value is generated in the

compris entre 60% et 100% du niveau normal d'essai, la déviation sur l'appareil doit être négligeable, par exemple 1% à 2%, pour que le circuit puisse être considéré comme exempt de parasites. Si une déviation appréciable est obtenue, l'essai peut être répété avec le câble adapté à son extrémité d'entrée au lieu d'être court-circuité. Si la déviation est ainsi éliminée, le circuit peut être considéré généralement comme satisfaisant. Il doit être souligné qu'aucune de ces vérifications ne donne une indication vraie du niveau de perturbation et que la perturbation enregistrée peut être exagérée. Cependant, si la perturbation décelée par ces essais est importante, on doit s'efforcer de l'éliminer.

Pour réduire le niveau des perturbations, les boucles du circuit de terre doivent être éliminées ou réduites aux dimensions les plus petites possibles. Il est également possible, dans certains cas, d'obtenir une amélioration par un double blindage du câble de mesure et en améliorant le blindage et l'isolement de l'appareil de mesure.

Pour réduire les couplages magnétiques, les câbles de mesure doivent, autant que possible, être placés loin de conducteurs transportant des courants élevés.

Les phénomènes de claquage peuvent provoquer des erreurs de mesure ou des oscillations.

Dans un système de mesure pour lequel la réponse aux fréquences élevées est nettement supérieure à celle aux fréquences basses, deux phénomènes peuvent apparaître:

- a) une décharge disruptive de l'objet à l'essai peut conduire à une contrainte excessive de l'équipement de mesure;
- b) des décharges partielles importantes peuvent provoquer des erreurs de mesure.

Ces phénomènes sont habituellement associés à la présence d'inductances parasites dans des circuits capacitifs sous-amortis. Un dépassement important sur la réponse expérimentale à l'échelon en est souvent l'indice.

Des chutes de tension excessives peuvent se produire, même sur de courtes longueurs du conducteur de sol. Elles peuvent donner naissance à des erreurs de mesure ou provoquer des oscillations aberrantes dues aux amorçages.

Dans l'analyse des réponses expérimentales à l'échelon, l'imprécision de la détermination du niveau de l'échelon unité peut être une source importante d'erreurs pour déterminer les divers temps de réponse.

SECTION CINQ – MESURE DES COURANTS DE CHOC

26. Généralités

Les circuits de mesure pour courants de choc doivent pouvoir supporter des courants très élevés – de l'ordre de dizaines ou même de centaines de milliers d'ampères. Par suite des vitesses très rapides de variation de courant qui interviennent, l'inductance du circuit de courant de choc doit être faible, et, pour y parvenir, beaucoup de soin devra être apporté à la conception des constituants. Il est également important que l'insertion du circuit de mesure dans le circuit d'essai n'introduise pas d'impédances autres que celles qui sont nécessaires.

27. Dispositifs de mesure couramment utilisés

Les dispositifs couramment utilisés pour mesurer les courants de choc sont les suivants:

- a) shunt avec oscillographe ou appareil de lecture de crête;
- b) transformateur de courant avec oscillographe ou appareil de lecture de crête.

test circuit, the deflection on the instrument should be negligible, say 1–2%, for the system to be considered free of disturbance. If an appreciable deflection is obtained, the test can be repeated with the cable matched at its input end instead of being shorted. If this eliminates the deflection then the system can generally be considered satisfactory. It should be pointed out that neither of these approaches gives a true indication of the disturbance level and the disturbance recorded may be exaggerated. However, if the disturbance is significant as shown by these tests, efforts should be made to eliminate it.

To reduce the disturbance level, loops in the layout of the earthing system should be eliminated or reduced to the smallest practicable dimensions. It is also possible in some cases to effect an improvement by using double shielding on the measuring cable and by improving the shielding and isolation of the measuring instrument.

To reduce magnetic coupling, measuring cables should whenever possible be located away from conductors carrying heavy currents.

Flashover phenomena can create measuring errors or oscillations.

In a system whose high frequency response appreciably exceeds its response in the low frequency range, two phenomena may occur:

- a) disruptive discharge of the test object may result in overstressing the measuring equipment;
- b) extensive partial discharges may produce measuring errors.

These phenomena are usually associated with the presence of stray inductances in under-damped capacitive circuits. Heavy overshoot on an experimental step response is often indicative of this condition.

Excessive voltage drops may occur even on short lengths of ground conductor. These may give rise to measuring errors or may cause spurious oscillations due to sparking.

In the analysis of experimental step response, inaccuracy in determining the level of the unit step can be a major source of error in determining the various response times.

SECTION FIVE – MEASUREMENT OF IMPULSE CURRENTS

26. General

Measuring systems for impulse currents must be capable of handling very high currents – of the order of tens or even hundreds of thousands of amperes. Because of the very rapid rates of change of current involved, the inductance of the impulse-current circuit must be kept low and careful attention paid to the design of the components to ensure this. It is also important that the insertion of the measuring system into the test circuit should not introduce unnecessary impedances.

27. Commonly used measuring systems

The following are typical systems used for measuring impulse currents:

- a) shunt with oscilloscope or peak reading instrument;
- b) current transformer with oscilloscope or peak reading instrument.

27.1 Constituants du circuit de mesure

Un grand nombre de constituants d'un circuit de mesure de courant de choc sont identiques à ceux qui sont utilisés dans les circuits de mesure de tension et ils doivent satisfaire aux mêmes conditions que celles qui sont exposées dans les parties appropriées de l'article 16. Les constituants ci-dessous sont spécifiques des circuits de mesure de courant.

a) *Shunt*

La forme de shunt la plus couramment utilisée est celle qui a une construction tubulaire. La figure 12, page 77, montre les particularités de construction de quelques exemples de ce type de shunt. La résistance tubulaire doit être non magnétique.

b) *Transformateurs de courant*

Des transformateurs de courant spéciaux à large bande peuvent être utilisés pour les mesures de courant de choc de faible durée. Leur avantage par rapport aux shunts est qu'ils permettent une isolation par rapport à la masse, et qu'ils peuvent donc être placés n'importe où dans le circuit. Aucune directive n'est donnée ici concernant les caractéristiques de construction de tels constituants.

27.2 Réponse à l'échelon des circuits de mesure de courant

Le temps de réponse d'un circuit de mesure de courant doit être déterminé expérimentalement, toutefois la méthode exposée ci-dessous pour le calcul du temps de réponse des shunts tubulaires peut se révéler utile lors des études.

a) *Temps de réponse des shunts tubulaires*

Les shunts à résistance tubulaire ont habituellement une réponse à l'échelon de type apériodique, et si l'on tient compte du zéro réel, le temps de réponse est donné approximativement par:

$$T = \frac{\mu_0}{6} \cdot \frac{d^2}{\rho}$$

où:

μ_0 = perméabilité du vide, $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

T = temps de réponse, en secondes

d = épaisseur de paroi de la matière du tube, en mètres

ρ = résistivité de la matière du tube, en ohms-mètres

Cependant, en utilisant le zéro virtuel $0'$, le temps de réponse est déterminé avec une meilleure précision par:

$$T = \frac{\mu_0}{8} \cdot \frac{d^2}{\rho}$$

Note. – La réponse des shunts tubulaires peut être améliorée en ajoutant un réseau de compensation dans la partie du shunt qui fournit le signal de sortie. Un tel réseau de compensation peut être couplé magnétiquement avec la partie du shunt parcourue par le courant.

b) *Détermination expérimentale de la réponse à l'échelon*

Pour déterminer le temps de réponse d'un circuit de mesure de courant, un échelon de courant est appliqué au circuit et la réponse obtenue est traitée de la même manière qu'à l'article 19 concernant les circuits de tension de choc. Cependant, le temps de réponse obtenu par intégration de la réponse expérimentale à l'échelon est le temps vrai du circuit et n'a pas besoin de correction car sa détermination n'est pas influencée par des conducteurs longs.

La différence fondamentale entre les méthodes fournissant la réponse à l'échelon des circuits de mesure de courant et des circuits de mesure de tension est que ces derniers comportent une

27.1 Measuring system components

Many of the components of an impulse current measuring system are the same as those used in voltage measuring systems and they should meet the same requirements as outlined in the appropriate parts of Clause 16. The following components are specifically for current measuring systems.

a) Shunt

The most commonly used form of shunt is that having a tubular construction. Figure 12, page 77, shows the construction features of some examples of this type of shunt. The resistance material used should be non-magnetic.

b) Current transformers

Specialised wide-band current transformers can be used for the measurement of short duration impulses. They are advantageous over shunts in so far as they permit isolation from earth and hence can be arbitrarily located in the current circuit. No guidance is given here on the design features of such components.

27.2 Step response of current measuring systems

The response time of a current measuring system must be determined experimentally; however, the method outlined below for calculating the response time of tubular shunts may prove useful in design.

a) Response time of tubular shunts

Tubular resistance shunts usually have an aperiodic type of step response and if the actual zero is used the response time is given approximately by:

$$T = \frac{\mu_0}{6} \cdot \frac{d^2}{\rho}$$

where:

μ_0 = permeability of free space, $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

T = response time, in seconds

d = wall thickness of resistance tube, in metres

ρ = resistivity of the tube material, in ohms-metres

However, due to the use of the virtual zero $0'$, the response time is determined more accurately from:

$$T = \frac{\mu_0}{8} \cdot \frac{d^2}{\rho}$$

Note. – The response of tubular shunts may be improved by including a compensating network in the part of the shunt which provides the output voltage signal. Such a compensating network may be magnetically coupled with the current carrying part of the shunt.

b) Experimental determination of the step response

To determine the response time of a current measuring system, a step of current is applied to the system and the resulting response is treated in the same manner as outlined in Clause 19 for impulse voltage systems. However, the response time obtained by integrating the experimental step response is the true response time of the system and needs no correction, since there are no long leads associated with its determination.

The basic difference between the methods of obtaining the step response for current measuring systems and for voltage measuring systems is that the latter are obtained using a zero impedance

source d'impédance nulle, tandis que les réponses en courant doivent être déterminées avec une source d'impédance infinie. Cela n'est pas réalisable pratiquement, mais il suffit en général que l'impédance du générateur d'échelon soit très grande par rapport à l'impédance du circuit de mesure de courant.

Une forme pratique de générateur d'échelon est un câble chargé ou une ligne de transmission qui est commutée sur le circuit de mesure comme représenté à la figure 13, page 77. Lorsque le commutateur est fermé, un échelon de courant d'amplitude égale au quotient de la tension de charge divisée par l'impédance caractéristique du câble est appliqué au circuit de mesure. Le câble doit être assez long pour assurer que la réponse du circuit de mesure a atteint sa valeur définitive avant qu'une réflexion venant de l'extrémité opposée du câble n'arrive au commutateur. Cette méthode est semblable à celle qui sert à obtenir la réponse à l'échelon d'un circuit de mesure de tension (voir l'article 19), la différence étant que, dans ce cas, le commutateur connecte une source de tension sur le circuit tandis que, dans l'autre cas, le commutateur produit l'échelon en court-circuitant l'entrée d'un circuit chargé. Par suite de la similitude des deux méthodes les mêmes types de commutateurs sont employés et les mêmes conditions concernant l'amplification s'appliquent.

28. Précautions

Dans les circuits où il existe de forts courants de choc, les chutes de tension peuvent être considérables, même sur des conducteurs de courte longueur. Des précautions sont nécessaires pour être sûr qu'il n'en résulte pas d'erreurs de mesure et que la mise à la terre des circuits est telle que l'isolation des appareils de mesure ou d'enregistrement n'est pas détériorée.

Les champs magnétiques parasites peuvent aussi provoquer des erreurs de mesure qui peuvent être détectées en modifiant la disposition des conducteurs.

De plus, des précautions particulières doivent être prises, suivant que l'on utilise des shunts ou des transformateurs de courant.

a) Shunts

On prendra soin de s'assurer que la résistance du shunt ne varie pas de façon appréciable avec l'échauffement provoqué par les impulsions à mesurer. La capacité thermique du shunt doit être suffisante pour éviter les dommages permanents en cas de défaillance d'une impédance en série telle que l'objet soumis à l'essai ou une résistance d'amortissement.

b) Transformateurs de courant

Ils ont généralement une bande passante plus faible que les shunts et ne peuvent transmettre les composantes continues.

L'amplitude de la réponse à l'échelon d'un transformateur de courant décroît avec le temps, et la vitesse de décroissance est déterminée par le rapport entre inductance mutuelle et résistance de charge.

L'utilisation des transformateurs de courant comportant un noyau magnétique est limitée par la saturation du noyau. Afin d'éviter cette saturation, la charge maximale qui circule dans chaque sens ne devrait pas excéder le produit nominal des ampères par les secondes du transformateur pour un fardeau résistif donné.

SECTION SIX – ERREURS DE MESURE

29. Evaluation statistique

Dans toute mesure, la valeur réelle obtenue diffère de la valeur vraie d'une certaine quantité. Cette différence peut provenir de deux causes principales:

- a) Le système de mesure n'est pas parfait, la valeur enregistrée étant différente de la valeur à mesurer divisée par le coefficient de conversion. Cela peut être dû, par exemple, à l'effet du temps de réponse, et une valeur corrigée doit être calculée si besoin est.

source whereas the current responses should be obtained with an infinite impedance source. This is not practical, but it is generally satisfactory if the impedance of the step generator is very large compared with the impedance of the current measuring system.

A practical form of step generator is a charged cable or transmission line which is switched onto the measuring system as illustrated in Figure 13, page 77. When the switch is closed, a current step with an amplitude equal to the quotient of the charging voltage divided by the cable characteristic impedance, will be applied to the measuring system. The cable must be long enough to ensure that the response of the measuring system has settled before a reflection from the opposite end of the cable arrives at the switch. This method is similar to that for obtaining the step response of a voltage measuring system (see Clause 19), the difference being that here the switch connects a voltage source to the system whereas in the other, the switch generates the step by short-circuiting the input of a charged system. Because of the similarity of the two methods, the same types of switches are used and the same conditions regarding amplification apply.

28. Precautions

In circuits where high current impulses occur, the voltage drops on even short lengths of conductor may be considerable. Precautions are necessary to ensure that these do not result in measuring errors and that the earthing of test circuits is such that damage to the insulation of measuring or recording instruments does not occur.

Stray magnetic fields may also cause measuring errors which can be detected by altering the arrangement of conductors.

In addition, some specific precautions should be taken depending on the use of either shunts or current transformers.

a) Shunts

Care should be taken to ensure that the resistance of the shunt does not change appreciably with heating caused by the impulses to be measured. The thermal capacity of the shunt should be sufficient to prevent permanent damage in case of failure of a series impedance such as the test object or a damping resistor.

b) Current transformers

They are generally of narrower bandwidth than shunts and are not capable of transferring d.c. components.

The amplitude of the step response of a current transformer decreases with time; and the rate of decrease is determined by the ratio of mutual inductance and burden resistance.

The operating range of current transformers having magnetic cores is limited by core saturation. In order to avoid saturation the maximum charge flowing in any given direction should not exceed the rated ampere-second product of the transformer for a given resistive burden.

SECTION SIX – MEASURING ERRORS

29. Statistical evaluation

In any measurement the actual value obtained differs by a certain amount from the true value. This difference may come from two main causes:

- a) The measuring system is not perfect, the recorded value being different from the value to be measured divided by the scale factor. That may be due for example to the effect of the response time, and a corrected value has to be calculated if needed.

- b) Les caractéristiques de système de mesure ne sont pas connues parfaitement. Des erreurs dues à l'observation ou à l'environnement peuvent survenir de façon aléatoire. Si ces erreurs sont appelées $e_1, e_2, e_3 \dots e_n$, et si toutes ces erreurs sont indépendantes, certaines sont probablement positives, d'autres négatives, et l'erreur statistique globale est égale à:

$$E_s = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2}$$

En conséquence, les erreurs peuvent être considérées comme suivant une loi de Gauss définie par un écart type σ et ayant une valeur moyenne égale à zéro. Avec cette hypothèse, l'erreur $E = \pm 2 \sigma$ a moins de 5 % de chance d'être dépassée, et, donc, est définie comme «l'erreur maximale».

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60060-4:1977

WithORM

- b) The characteristics of the measuring system are not known perfectly. Observational and environmental errors may occur at random. If these errors are called $e_1, e_2, e_3 \dots e_n$, and, if all these errors are independent, they are likely to be both positive and negative and the statistical overall error is equal to:

$$E_s = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2}$$

Consequently, the errors may be considered as following a Gaussian distribution defined by a standard deviation σ and with a mean value equal to zero. Under this assumption, the error $E = \pm 2 \sigma$ has less than 5% probability of being exceeded and, therefore, is referred to as “the maximum error”.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60060-4:1977
Without2M

ANNEXE A

DIVISEURS À RÉSISTANCE

En première estimation, en négligeant certains facteurs tels que l'inductance du diviseur et l'effet du bras basse tension et en admettant que la réponse a pour origine le zéro réel 0, le temps de réponse d'un diviseur à résistance vertical sans électrode de répartition haute tension, dont le bas est au niveau du sol, est donné approximativement par:

$$T_t \approx \frac{RC}{6}$$

où:

T_t = temps de réponse du diviseur, en secondes

R = résistance totale du diviseur, en ohms

C = capacité totale du diviseur à la terre, en farads (la capacité peut se mesurer avec un pont de mesure de capacité ordinaire)

Cependant, en raison de l'utilisation du zéro virtuel 0', le temps de réponse est donné avec une meilleure précision par:

$$T_t \approx \frac{RC}{8}$$

La capacité C d'un diviseur vertical peut être déterminée comme étant la capacité d'un conducteur vertical si le bas du diviseur est approximativement au niveau du sol:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{\ell}{\ln \frac{\ell}{r\sqrt{3}}}$$

où:

ϵ_0 = constante diélectrique du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

ℓ = longueur du diviseur, en mètres

r = rayon du diviseur, en mètres

APPENDIX A

RESISTOR DIVIDERS

As a first estimate, neglecting a number of factors such as the inductance of the divider and the effect of the low-voltage arm and noting that the real zero 0 is the origin for the response, the response time of a vertical resistive divider without a high-voltage shield electrode and with the bottom at ground level, is given approximately by:

$$T_1 \approx \frac{RC}{6}$$

where:

T_1 = divider response time in seconds

R = total divider resistance in ohms

C = total divider capacitance to earth in farads (the capacitance can be measured by a conventional capacitance measuring bridge)

However, due to the use of the virtual zero', the response time is determined more accurately from

$$T_1 \approx \frac{RC}{8}$$

The capacitance C of a vertical divider can be determined as the capacitance of a vertical conductor if the bottom of the divider is approximately at ground level:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{\ell}{\ln \frac{\ell}{r\sqrt{3}}}$$

where:

ϵ_0 = dielectric constant of vacuum = $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m

ℓ = length of the divider in metres

r = radius of the divider in metres

ANNEXE B

BASES MATHÉMATIQUES DU TEMPS DE RÉPONSE T

Le temps de réponse est défini en fonction de l'erreur de mesure instantanée dépendant de la pente de variation de la quantité mesurée (voir le paragraphe 4.6 de la Publication 60-3 de la CEI).

Le temps de réponse idéalisé est égal à la somme algébrique des surfaces comprises entre la réponse à l'échelon unité et l'amplitude unité (voir la figure 3, page 67):

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - \dots$$

Cette relation peut être déduite de l'analyse du comportement d'un système de mesure lorsqu'on l'utilise pour mesurer une tension linéairement croissante de la forme $U = S \cdot t$, S étant la raideur. Une telle tension peut aussi être considérée comme étant l'intégrale d'un échelon d'amplitude S :

$$U = S \cdot t = \int_0^t S dt = S \int_0^t dt$$

Si le système de mesure a une réponse normalisée à l'échelon $g(t)$, sa réponse normalisée U_0 à la tension ci-dessous sera alors:

$$U_0 = \int_0^t S g(t) dt = S \int_0^t g(t) dt$$

et la différence entre la tension d'entrée et la tension enregistrée à tout moment T_x sera:

$$\delta = S \int_0^{T_x} dt - S \int_0^{T_x} g(t) dt = S \int_0^{T_x} (1 - g(t)) dt$$

Dès qu'on atteint le temps T_x pour lequel les tensions d'entrée et de sortie croissent avec la même pente, l'erreur sur l'amplitude reste constante et par conséquent:

$$\int_0^{T_x} (1 - g(t)) dt \rightarrow \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt$$

Il en découle que la différence entre la tension d'entrée et la tension mesurée est donnée par:

$$\delta = S \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt$$

APPENDIX B

MATHEMATICAL BASIS FOR RESPONSE TIME T

The response time is defined in terms of the instantaneous measurement error relative to the rate of change of the quantity being measured (see Sub-clause 4.6 in IEC Publication 60-3).

The idealized response time is equal to the algebraic sum of the areas between the unit step response and unit amplitude (see Figure 3, page 67):

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - \dots$$

This relationship can be derived by analysing the behaviour of a measuring system when it is used to measure a linearly rising voltage of the form: $U = S \cdot t$, S being the steepness. Such a voltage can also be regarded as being the integral of a step of amplitude S :

$$U = S \cdot t = \int_0^t S dt = S \int_0^t dt$$

If the measuring system has a normalized step response $g(t)$, its normalized response U_o to the above voltage will then be:

$$U_o = \int_0^t S g(t) dt = S \int_0^t g(t) dt$$

and the difference between the input voltage and the recorded voltage at any instant T_x will be:

$$\delta = S \int_0^{T_x} dt - S \int_0^{T_x} g(t) dt = S \int_0^{T_x} (1 - g(t)) dt$$

Once the time T_x is reached when the input and the output voltages are changing at the same rate, the amplitude error remains constant and from then on:

$$\int_0^{T_x} (1 - g(t)) dt \rightarrow \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt$$

Thus the difference between the input and recorded voltages is given by:

$$\delta = S \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt$$

D'après la définition du temps de réponse T , la différence est:

$$\delta = S \cdot T$$

D'où:

$$T = \int_0^{\infty} (1 - g(t)) dt$$

En pratique, l'intégration est effectuée jusqu'au moment où la réponse à l'échelon atteint une valeur pratiquement constante.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60060-4:1977

Withdrawn