

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

**High-voltage test techniques –  
Part 2: Measuring systems**

**Techniques des essais à haute tension –  
Partie 2: Systèmes de mesure**



**THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED**  
**Copyright © 2010 IEC, Geneva, Switzerland**

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland  
Email: [inmail@iec.ch](mailto:inmail@iec.ch)  
Web: [www.iec.ch](http://www.iec.ch)

## About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

## About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: [www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: [www.iec.ch/webstore/custserv](http://www.iec.ch/webstore/custserv)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch)

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

---

## A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

## A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

- Catalogue des publications de la CEI: [www.iec.ch/searchpub/cur\\_fut-f.htm](http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm)

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: [www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: [www.iec.ch/webstore/custserv/custserv\\_entry-f.htm](http://www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch)

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60060-2

Edition 3.0 2010-11

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

**High-voltage test techniques –  
Part 2: Measuring systems**

**Techniques des essais à haute tension –  
Partie 2: Systèmes de mesure**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE **XB**  
CODE PRIX

---

ICS 17.220.20; 19.080

ISBN 978-2-88912-267-7

## CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references.....	8
3 Terms and definitions.....	8
3.1 Measuring systems .....	9
3.2 Components of a measuring system.....	9
3.3 Scale factors .....	10
3.4 Rated values .....	11
3.5 Definitions related to dynamic behaviour .....	11
3.6 Definitions related to uncertainty.....	13
3.7 Definitions related to tests on measuring systems .....	14
4 Procedures for qualification and use of measuring systems.....	15
4.1 General principles.....	15
4.2 Schedule of performance tests .....	16
4.3 Schedule of performance checks .....	16
4.4 Requirements for the record of performance .....	16
4.4.1 Contents of the record of performance .....	16
4.4.2 Exceptions .....	17
4.5 Operating conditions .....	17
4.6 Uncertainty.....	17
5 Tests and test requirements for an approved measuring system and its components.....	18
5.1 General requirements.....	18
5.2 Calibration – Determination of the scale factor .....	19
5.2.1 Calibration of measuring systems by comparison with a reference measuring system (preferred method).....	19
5.2.2 Determination of the scale factor of a measuring system from the scale factors of its components (alternative method).....	22
5.3 Linearity test.....	23
5.3.1 Application .....	23
5.3.2 Alternative methods in order of suitability .....	24
5.4 Dynamic behaviour.....	25
5.4.1 General.....	25
5.4.2 Determination of the amplitude/frequency response.....	25
5.4.3 Reference method for impulse voltage measuring systems .....	26
5.5 Short-term stability.....	26
5.6 Long-term stability.....	26
5.7 Ambient temperature effect .....	27
5.8 Proximity effect.....	27
5.9 Software effect .....	27
5.10 Uncertainty calculation of the scale factor.....	27
5.10.1 General.....	27
5.10.2 Uncertainty of the calibration.....	28
5.10.3 Uncertainty of measurement using an approved measuring system .....	29
5.11 Uncertainty calculation of time parameter measurement (impulse voltages only).....	30
5.11.1 General.....	30

5.11.2	Uncertainty of the time parameter calibration .....	30
5.11.3	Uncertainty of time parameter measurement using an approved measuring system .....	31
5.12	Interference test (transmission system and instrument for impulse voltage measurements) .....	32
5.13	Withstand tests of converting device .....	32
6	Measurement of direct voltage .....	33
6.1	Requirements for an approved measuring system .....	33
6.1.1	General .....	33
6.1.2	Uncertainty contributions .....	33
6.1.3	Requirement on converting device .....	33
6.1.4	Dynamic behaviour for measuring voltage changes .....	33
6.2	Tests on an approved measuring system .....	33
6.3	Performance check .....	34
6.3.1	General .....	34
6.3.2	Comparison with an approved measuring system .....	34
6.3.3	Check of the scale factors of the components .....	35
6.4	Measurement of ripple amplitude .....	35
6.4.1	Requirements .....	35
6.4.2	Uncertainty contributions .....	35
6.4.3	Calibrations and tests on an approved ripple voltage measuring system .....	35
6.4.4	Measurement of the scale factor at the ripple frequency .....	35
6.4.5	Dynamic behaviour by amplitude/frequency response .....	35
6.4.6	Performance check for ripple measuring system .....	36
7	Measurement of alternating voltage .....	36
7.1	Requirements for an approved measuring system .....	36
7.1.1	General .....	36
7.1.2	Uncertainty contributions .....	36
7.1.3	Dynamic behaviour .....	36
7.2	Tests on an approved measuring system .....	38
7.3	Dynamic behaviour test .....	38
7.4	Performance check .....	38
7.4.1	General .....	38
7.4.2	Comparison with an approved measuring system .....	38
7.4.3	Check of the scale factors of the components .....	39
8	Measurement of lightning impulse voltage .....	40
8.1	Requirements for an approved measuring system .....	40
8.1.1	General .....	40
8.1.2	Uncertainty contributions .....	40
8.1.3	Requirement on measuring instrument .....	40
8.1.4	Dynamic behaviour .....	40
8.1.5	Connection to the test object .....	40
8.2	Tests on an approved measuring system .....	41
8.3	Performance test on measuring systems .....	42
8.3.1	Reference method (preferred) .....	42
8.3.2	Alternative method supplemented by a measurement of the step response according to Annex C .....	42
8.4	Dynamic behaviour test .....	43

8.4.1	Comparison with a reference measuring system (preferred).....	43
8.4.2	Alternative method based on step response parameters (Annex C) .....	43
8.5	Performance check .....	43
8.5.1	Comparison with an approved measuring system .....	43
8.5.2	Check of the scale factors of the components .....	43
8.5.3	Dynamic behaviour check by reference record .....	43
9	Measurement of switching impulse voltage.....	43
9.1	Requirements for an approved measuring system.....	43
9.1.1	General.....	43
9.1.2	Uncertainty contribution .....	44
9.1.3	Requirements for the measuring instrument .....	44
9.1.4	Dynamic behaviour.....	44
9.1.5	Connection to the test object .....	44
9.2	Tests on an approved measuring system .....	44
9.3	Performance test on measuring systems .....	44
9.3.1	Reference method (preferred) .....	44
9.3.2	Alternative methods supplemented by a step response measurement .....	45
9.4	Dynamic behaviour test by comparison.....	45
9.5	Performance check .....	45
9.5.1	Scale factor check by comparison with an approved measuring system .....	45
9.5.2	Check of the scale factors of the components .....	45
9.5.3	Dynamic behaviour check by reference record .....	45
10	Reference measuring systems .....	47
10.1	Requirements for reference measuring systems .....	47
10.1.1	Direct voltage .....	47
10.1.2	Alternating voltage .....	47
10.1.3	Full and chopped lightning and switching impulse voltages.....	47
10.2	Calibration of a reference measuring system.....	47
10.2.1	General.....	47
10.2.2	Reference method: Comparative measurement .....	47
10.2.3	Alternative method for impulse voltages: Measurement of scale factor and evaluation of step response parameters .....	47
10.3	Interval between successive calibrations of reference measuring systems .....	47
10.4	Use of reference measuring systems.....	48
Annex A (informative)	Uncertainty of measurement .....	49
Annex B (informative)	Examples for the calculation of measuring uncertainties in high-voltage measurements .....	57
Annex C (informative)	Step response measurements .....	65
Annex D (informative)	Convolution method for the determination of dynamic behaviour from step response measurements.....	70
Bibliography	.....	73
Figure 1	– Amplitude-frequency response with examples for limit frequencies ( $f_1$ ; $f_2$ ).....	12
Figure 2	– Calibration by comparison over the full voltage range .....	20
Figure 3	– Uncertainty contributions of the calibration (example with minimum of 5 voltage levels).....	21
Figure 4	– Calibration by comparison over a limited voltage range, with an additional linearity test.....	22

Figure 5 – Linearity test of the measuring system with a linear device in the extended voltage range.....	24
Figure 6 – Shaded area for acceptable normalised amplitude-frequency responses of measuring systems intended for single fundamental frequencies $f_{nom}$ (to be tested in the range $(1...7)f_{nom}$ ) .....	37
Figure 7 – Shaded area for acceptable normalised amplitude-frequency responses of measuring systems intended for a range of fundamental frequencies $f_{nom1}$ to $f_{nom2}$ (to be tested in the range $f_{nom1}$ to $7f_{nom2}$ ) .....	38
Figure A.1 – Normal probability distribution $p(x)$ .....	55
Figure A.2 – Rectangular probability distribution $p(x)$ .....	56
Figure B.1 – Comparison between the system under test, X, and the reference system, N ...	64
Figure B.2 – Front time deviation $\Delta T_{1,j}$ of system X, related to the reference system N, and their mean $\Delta T_{1,m}$ in the range of $T_1 = 0,8 \mu s \dots 1,6 \mu s$ .....	64
Figure C.1 – Definitions of response parameters.....	68
Figure C.2 – A unit-step response $g(t)$ showing an initial distortion of initial distortion time $T_0$ .....	69
Figure C.3 – Suitable circuits for step response measurement .....	69
Table 1 – Tests required for an approved direct voltage measuring system .....	34
Table 2 – Required tests for uncertainty contributions in ripple measurement .....	36
Table 3 – Tests required for an approved alternating voltage measuring system .....	39
Table 4 – Tests required for an approved lightning impulse voltage measuring system .....	41
Table 5 – Tests required for a switching impulse voltage measuring system .....	46
Table 6 – Recommended response parameters for impulse voltage reference measuring systems.....	48
Table A.1 – Coverage factor $k$ for effective degrees of freedom $\nu_{eff}$ ( $p = 95,45 \%$ ) .....	54
Table A.2 – Schematic of an uncertainty budget .....	55
Table B.1 – Result of the comparison measurement at a single voltage level .....	58
Table B.2 – Summary of results for $h = 5$ voltage levels ( $V_{Xmax} = 500 \text{ kV}$ ) .....	59
Table B.3 – Uncertainty budget of the assigned scale factor $F_X$ .....	60
Table B.4 – Uncertainty budget of the assigned scale factor $F$ .....	61
Table B.5 – Calibration result for front time $T_1$ and deviations .....	63
Table B.6 – Uncertainty budget of the front time deviation $\Delta T_{1cal}$ .....	63

# INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

---

## HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES –

### Part 2: Measuring systems

#### FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60060-2 has been prepared by IEC technical committee 42: High-voltage test techniques.

This third edition of IEC 60060-2 cancels and replaces the second edition, published in 1994, and constitutes a technical revision.

The significant technical changes with respect to the previous edition are as follows:

- a) The general layout and text was updated and improved to make the standard easier to use.
- b) The standard was revised to align it with IEC 60060-1.
- c) The treatment of measurement uncertainty estimation has been expanded.

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

FDIS	Report on voting
42/281/FDIS	42/287/RVD

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

A list of all parts of IEC 60060 series, under the general title *High-voltage test techniques*, can be found on the IEC website.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part-2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to this specific publication. At this date, the publication will be:

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

# HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES –

## Part 2: Measuring systems

### 1 Scope

This part of IEC 60060 is applicable to complete measuring systems, and to their components, used for the measurement of high voltages during laboratory and factory tests with direct voltage, alternating voltage and lightning and switching impulse voltages as specified in IEC 60060-1. For measurements during on-site tests see IEC 60060-3.

The limits on uncertainties of measurements stated in this standard apply to test levels stated in IEC 60071-1:2006. The principles of this standard apply also to higher levels but the uncertainty may be greater.

This standard:

- defines the terms used;
- describes methods to estimate the uncertainties of high-voltage measurements;
- states the requirements which the measuring systems shall meet;
- describes the methods for approving a measuring system and checking its components;
- describes the procedures by which the user shall show that a measuring system meets the requirements of this standard, including the limits set for the uncertainty of measurement.

### 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this standard. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60052, *Voltage measurement by means of standard air gaps*

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 61083-1, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*

IEC 61083-2, *Digital recorders for measurement in high-voltage impulse tests – Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurements (GUM)*

NOTE Further related standards, guides, etc. on subjects included in this International Standard are given in the bibliography.

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

### **3.1 Measuring systems**

#### **3.1.1**

##### **measuring system**

complete set of devices suitable for performing a high-voltage measurement; software, used to obtain or calculate measuring results, also forms a part of the measuring system

NOTE 1 A measuring system usually comprises the following components:

- a converting device with the leads required for connecting this device to the test object or into the circuit and the connections to earth;
- a transmission system connecting the output terminals of the converting device to the measuring instruments with its attenuating, terminating and adapting impedances or networks;
- a measuring instrument together with any connection to the power supply. Measuring systems which comprise only some of the above components or which are based on non-conventional principles are acceptable if they meet the uncertainty requirements specified in this document.

NOTE 2 The environment in which a measuring system functions, its clearances to live and earthed structures and the presence of electric or magnetic fields may significantly affect the measurement result and its uncertainty.

#### **3.1.2**

##### **record of performance**

detailed record, established and maintained by the user, describing the measuring system and containing evidence that the requirements given in this standard have been met

NOTE This evidence includes the results of the initial performance test and the schedule and results of each subsequent performance test and performance check.

#### **3.1.3**

##### **approved measuring system**

measuring system that is shown to comply with one or more of the sets of requirements set out in this document

#### **3.1.4**

##### **reference measuring system**

measuring system with its calibration traceable to relevant national and/or international standards, and having sufficient accuracy and stability for use in the approval of other systems by making simultaneous comparative measurements with specific types of waveform and ranges of voltage

NOTE A reference measuring system (maintained according to the requirements of this standard) may be used as an approved measuring system but the converse is not true.

### **3.2 Components of a measuring system**

#### **3.2.1**

##### **converting device**

device for converting the quantity to be measured (measurand) into a quantity, compatible with the measuring instrument

#### **3.2.2**

##### **voltage divider**

converting device consisting of a high-voltage and a low-voltage arm such that the input voltage is applied across the complete device and the output voltage is taken from the low-voltage arm

NOTE The elements of the two arms are usually resistors or capacitors or combinations of these. The device is designated by the type and arrangement of its elements (for example, resistive, capacitive or resistive-capacitive).

### **3.2.3**

#### **voltage transformer**

converting device consisting of a transformer in which the secondary voltage, in normal conditions of use, is substantially proportional to the primary voltage and differs in phase from it by an angle which is approximately zero for an appropriate direction of the connections

[IEC 60050-321: 1986, 321-03-01]

### **3.2.4**

#### **voltage converting impedance**

converting device which carries a current proportional to the applied voltage to be measured with a current measuring instrument

### **3.2.5**

#### **electric-field probe**

converting device for the measurement of the amplitude and waveform of an electric field

NOTE An electric-field probe may be used to measure the waveform of the voltage producing the field provided that the measurement is not affected by corona or space charges.

### **3.2.6**

#### **transmission system**

set of devices that transfers the output signal of a converting device to a measuring instrument

NOTE 1 A transmission system usually consists of a coaxial cable with its terminating impedance, but it may include attenuators, amplifiers, or other devices connected between the converting device and the measuring instrument. For example, an optical link includes a transmitter, an optical cable and a receiver as well as related amplifiers.

NOTE 2 A transmission system may be partially or completely included in the converting device or in the measuring instrument.

### **3.2.7**

#### **measuring instrument**

device intended to make measurements, alone or in conjunction with supplementary devices

[IEC 60050-300: 2001, 311-03-01]

## **3.3 Scale factors**

### **3.3.1**

#### **scale factor of a measuring system**

factor by which the value of the measuring-instrument reading is multiplied to obtain the value of the input quantity of the complete measuring system

NOTE 1 A measuring system may have multiple scale factors for different assigned measurement ranges, frequency ranges or waveforms.

NOTE 2 For measuring systems that display the value of the input quantity directly, the nominal scale factor of the measuring system is unity.

### **3.3.2**

#### **scale factor of a converting device**

factor by which the output of the converting device is multiplied to obtain its input quantity

NOTE The scale factor of a converting device may be dimensionless (for example, the ratio of a divider) or may have dimensions (for example, the impedance of a voltage converting impedance).

### **3.3.3**

#### **scale factor of a transmission system**

factor by which the output of a transmission system is multiplied to obtain its input quantity

**3.3.4****scale factor of a measuring instrument**

factor by which the instrument reading is multiplied to obtain its input quantity

**3.3.5****assigned scale factor***F*

scale factor of a measuring system determined at the most recent performance test

NOTE A measuring system may have more than one assigned scale factor; for example, it may have several ranges and/or nominal epochs, each with a different scale factor.

**3.4 Rated values****3.4.1****operating conditions**

specified ranges of conditions under which a measuring system will operate within the specified uncertainty limits

**3.4.2****rated operating voltage**

maximum level of voltage of specified frequency or waveform at which a measuring system is designed to be used

NOTE The rated operating voltage may be higher than the upper limit of the assigned measurement range.

**3.4.3****assigned measurement range**

range of voltage of specified frequency or waveform, characterized by a single scale factor, in which a measuring system may be used

NOTE 1 The limits of the assigned measurement range are chosen by the user and verified by the performance tests specified in this standard.

NOTE 2 A measuring system can have more than one assigned measurement range with different scale factors.

**3.4.4****assigned operating time**

longest time during which a measuring system for direct or alternating voltages can operate at the upper limit of the assigned measurement range

**3.4.5****assigned rate of application**

highest rate of specified voltage impulses for a specified time interval, at which the measuring system can operate at its upper limit of the assigned measurement range

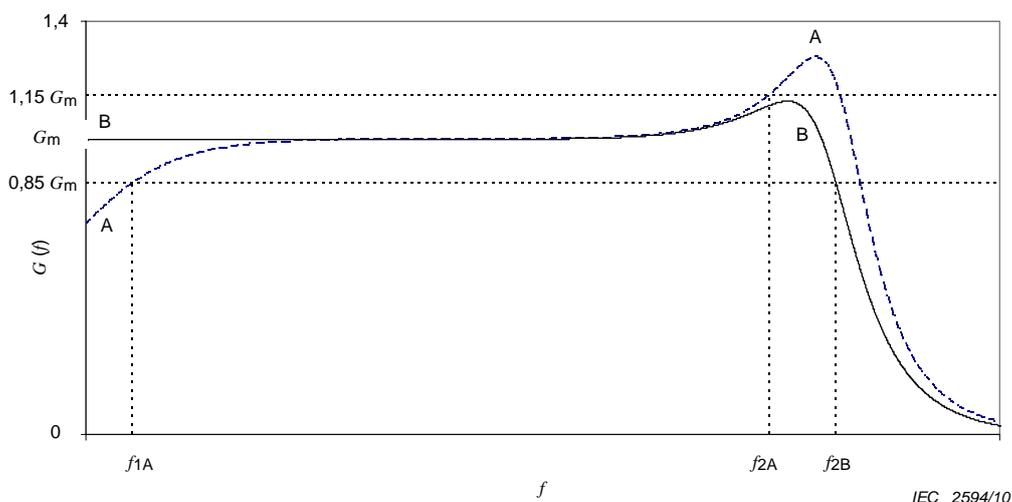
NOTE The rate is usually given as applications per minute and the time interval in minutes or hours.

**3.5 Definitions related to dynamic behaviour****3.5.1****response of a measuring system,***G*

output, as a function of time or frequency, when a specified voltage is applied to the input of the system

**3.5.2****amplitude-frequency response,***G(f)*

ratio of the output to the input of a measuring system as a function of frequency *f*, when the input is sinusoidal (see Figure 1)



NOTE Lower and upper limit frequencies are shown on curve A.

Curve B shows a constant response down to direct voltage.

**Figure 1 – Amplitude-frequency response with examples for limit frequencies ( $f_1; f_2$ )**

**3.5.3  
step response,  
 $G(t)$**

output of a measuring system as a function of time when the input is a step function

NOTE For more information on step response and step-response parameters see Annex C.

**3.5.4  
nominal epoch (impulse voltage only),**

$\tau_{N1}$   
range of values between the minimum ( $t_{min}$ ) and the maximum ( $t_{max}$ ) of the relevant time parameter of impulse voltage for which the measuring system is to be approved

NOTE 1 The relevant time parameter is:

- the front time  $T_1$  for full and tail-chopped lightning impulses
- the time to chopping  $T_c$  for front-chopped impulses
- the time to peak  $T_p$  for switching impulses

NOTE 2 A measuring system may have one, two or more nominal epochs for different waveforms. For example, a particular measuring system might be approved:

- for full and tail-chopped lightning impulses with an assigned scale factor  $F_1$  over a nominal epoch  $\tau_{N1}$  from  $T_1 = 0,8 \mu\text{s}$  to  $T_1 = 1,8 \mu\text{s}$ , even though the tolerance is  $0,84 \mu\text{s}$  to  $1,56 \mu\text{s}$ ;
- or front-chopped lightning impulses with an assigned scale factor  $F_2$  over a nominal epoch  $\tau_{N2}$  from  $T_c = 0,5 \mu\text{s}$  to  $T_c = 0,9 \mu\text{s}$ ;
- for switching impulses with an assigned scale factor  $F_3$  over a nominal epoch  $\tau_{N3}$  from  $T_p = 150 \mu\text{s}$  to  $T_p = 500 \mu\text{s}$ .

NOTE 3 "Front-chopped impulse" is used to designate a chopped impulse with a time to chopping that falls in the range  $0,5 \mu\text{s}$  to the time of the extreme value. This is to be distinguished from a "tail-chopped impulse" which has a time to chopping greater than the time of the extreme value.

### **3.5.5 limit frequencies, $f_1$ and $f_2$**

lower and upper limits of the range within which the amplitude-frequency response is nearly constant (Figure1)

NOTE These limits are where the response first deviates by a certain amount (e.g. plus/minus 15 %) from the constant value. The permissible deviation should be related to acceptable uncertainties of a measuring system.

## **3.6 Definitions related to uncertainty**

### **3.6.1 tolerance**

permitted difference between the measured value and the specified value

NOTE 1 This difference should be distinguished from the uncertainty of measurement.

NOTE 2 The measured test voltage is required to lie within the stated tolerance of the specified test level.

### **3.6.2 error**

measured quantity value minus a reference quantity value

[ISO/IEC Guide 99 (VIM 2.16)]

### **3.6.3 uncertainty (of measurement)**

parameter, associated with the result of a measurement, that characterises the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand

[IEC 60050-300: 2001, 311-01-02]

NOTE 1 Uncertainty is positive and given without sign.

NOTE 2 Uncertainty of voltage measurement should not be confused with the tolerance of a specified test voltage.

NOTE 3 For more information see Annexes A and B.

### **3.6.4 standard uncertainty, $u$**

uncertainty of the result of a measurement expressed as a standard deviation

[ISO/IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.1)]

NOTE 1 The standard uncertainty associated with an estimate of a measurand has the same dimension as the measurand.

NOTE 2 In some cases, the relative standard uncertainty of a measurement may be appropriate. The relative standard uncertainty of measurement is the standard uncertainty divided by the measurand, and is therefore dimensionless.

### **3.6.5 combined standard uncertainty, $u_c$**

standard uncertainty of the result of a measurement when that result is obtained from the values of a number of other quantities, equal to the positive square root of a sum of terms, the terms being the variances or covariances of these other quantities weighted according to how the measurement result varies with changes in these quantities

[ISO/IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.4)]

**3.6.6**  
**expanded uncertainty,**  
*U*

quantity defining an interval about the result of a measurement that may be expected to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measurand

[ISO/IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.5)]

NOTE 1 Expanded uncertainty is the closest match to the term “overall uncertainty” used in earlier editions of this standard.

NOTE 2 The true, but unknown test-voltage value may lie outside the limits given by the uncertainty because the coverage probability is < 100 % (see 3.6.7).

**3.6.7**  
**coverage factor,**  
*k*

numerical factor used as multiplier of the combined standard uncertainty in order to obtain an expanded uncertainty

[ISO/IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.6)]

NOTE For 95 % coverage probability and normal (Gaussian) probability distribution the coverage factor is approximately  $k = 2$ .

**3.6.8**  
**type A evaluation**

method of evaluation of a standard uncertainty by statistical analysis of a series of observations

**3.6.9**  
**type B evaluation**

method of evaluation of a standard uncertainty by means other than statistical analysis of a series of observations

**3.6.10**  
**traceability**

property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons, all having stated uncertainties

[IEC 60050-300: 2001, 311-01-15]

**3.6.11**  
**National Metrology Institute**

institute designated by national decision to develop and maintain national measurement standards for one or more quantities

**3.7 Definitions related to tests on measuring systems**

**3.7.1**  
**calibration**

set of operations that establishes, by reference to standards, the relationship which exists, under specified conditions, between an indication and a result of a measurement

[IEC 60050-300: 2001, 311-01-09]

NOTE The determination of the scale factor is included in the calibration.

**3.7.2****type test**

conformity test made on one or more items representative of the production

[IEC 60050-151: 2001, 151-16-16]

NOTE For a measuring system, this is understood as a test performed on a component or on a complete measuring system of the same design to characterize it under operating conditions.

**3.7.3****routine test**

conformity test made on each individual item during or after manufacture

[IEC 60050-151: 2001, 151-16-17]

NOTE This is understood as a test performed on each component or on each complete measuring system to characterize it under operating conditions.

**3.7.4****performance test**

test performed on a complete measuring system to characterize it under operating conditions

**3.7.5****performance check**

simple procedure to ensure that the result of the most recent performance test is still valid

**3.7.6****reference record (impulse measurements only)**

record taken under specified conditions in a performance test and retained for comparison with records to be taken in future tests or checks under the same conditions

NOTE Reference records are often called “fingerprints” and used as characteristics of dynamic behaviour. In impulse voltage measurements they are usually taken from step response measurements (Annex C).

**4 Procedures for qualification and use of measuring systems****4.1 General principles**

Every approved measuring system shall undergo initial testing, followed by performance tests (periodic, see 4.2) and performance checks (periodic, see 4.3) throughout its service life. The initial tests consist of type tests (performed on a component or system of the same design) and routine tests (performed on every component or system).

The performance tests and checks shall prove that the measuring systems can measure the intended test voltages within the uncertainties given in this standard, and that the measurements are traceable to national and/or international standards of measurement. The system is approved only for the arrangements and operating conditions included in its record of performance.

A major requirement for a converting device, a transmission system, and a measuring instrument used in a measuring system is stability within the specified range of operating conditions so that the scale factor of the measuring system remains constant over long periods.

The assigned scale factor is determined in the performance test by calibration. The user shall apply tests given in this standard to qualify their measuring system(s). Alternatively, any user may choose to have the performance tests made by a National Metrology Institute or by a Calibration Laboratory accredited for the quantity to be calibrated. In all cases, the user shall include the test data into the record of performance.

Any calibration shall be traceable to national and/or international standards. The user shall ensure that any self-made calibration is performed by competent personnel using reference measuring systems and suitable procedures.

NOTE Calibrations performed by a National Metrology Institute, or by a laboratory accredited for the quantities calibrated and reported under the accreditation, are considered traceable to national and/or international standards.

#### **4.2 Schedule of performance tests**

To maintain the quality of a measuring system, its assigned scale factor(s) shall be determined by periodic performance tests. The interval between performance tests shall be based on evaluation of past stability of the measuring system. It is recommended that the performance test should be repeated annually, but the maximum interval shall not be longer than five years.

NOTE Long intervals between performance tests can increase the risk of an undetected change in the measurement system.

Performance test shall be made after major repairs to the measuring system and whenever a circuit arrangement that is beyond the limits given in the record of performance is to be used.

When a performance test is required because a performance check shows that the assigned scale factor is no longer valid, the cause of this change shall be investigated before the performance test is made.

#### **4.3 Schedule of performance checks**

Performance checks shall be made at intervals based on the recorded stability of the measuring system as shown in the record of performance. The interval from the last performance test or the last performance check shall not be longer than one year.

For a new or repaired measuring system, performance checks shall be made at short intervals to demonstrate its stability.

No reference method is identified for the performance checks because the required accuracy is less than that required for performance tests.

#### **4.4 Requirements for the record of performance**

##### **4.4.1 Contents of the record of performance**

The results of all tests and checks, including the conditions under which the results were obtained, shall be kept in the record of performance (stored in paper format or electronically if permitted by quality systems and local laws) established and maintained by the user. The record of performance shall uniquely identify the components of the measuring system and shall be structured so that performance of the measuring system can be traced over time.

The record of performance shall comprise at least the following information:

- General description of the measuring system.
- Results of type and routine tests on the converting device, transmission system(s) and measuring instrument(s) and, if performed, on the measuring system.
- Results of subsequent performance tests on the measuring system.
- Results of subsequent performance checks on the measuring system.

NOTE The general description of the measuring system usually comprises main data and capabilities of the measuring system, such as the rated operating voltage, waveform(s), range(s) of clearances, operating time, or maximum rate of voltage applications. For many measuring systems, information on the transmission system as well as high-voltage and ground-return arrangements are important. If required, a description is also given of the

components of the measuring system, including for example the type and identification of the measuring instrument.

#### 4.4.2 Exceptions

For measuring systems or components manufactured before the date of issue of the second edition of IEC60060-2, i.e. 1994, the required evidence may not be available for some part(s) of the type and routine test. Then performance tests and checks made in accordance with earlier versions of this standard are deemed adequate provided they show the scale factor is stable. The results of these previous checks shall also be entered in the record of performance.

Approved measuring systems comprising several pieces of equipment used inter-changeably may be covered by a single record of performance including all the combinations possible with the least amount of duplication possible. Specifically, each converting device shall be covered individually, but transmission systems and measuring instruments may be covered generically.

#### 4.5 Operating conditions

A measuring system shall be connected directly to the terminals of the test object, or in such a way that the voltage difference between test object terminals and the measuring system is negligible. The parasitic coupling between the test and measuring circuit should be minimized.

NOTE 1 Parasitic coupling may need to be investigated.

An approved measuring system shall have an uncertainty within the specifications of this standard throughout the ranges of operating and environmental conditions given in the record of performance.

The assigned operating time for measuring systems for direct and alternating voltage shall be specified.

NOTE 2 The recommended minimum value for the assigned operating time is 1 h.

The maximum rate of application for impulse voltages shall be specified.

NOTE 3 The recommended minimum value for the maximum rate of application is one or two impulses/min and to be specified depending on the size of the converting device.

The range of environmental conditions, under which the components of the measuring system fulfil the requirements of this standard, shall be stated.

#### 4.6 Uncertainty

The uncertainty of all measurements made under this International Standard shall be evaluated according to ISO/IEC Guide 98-3.

Procedures for evaluating uncertainties have been selected from ISO/IEC Guide 98-3 and presented in this standard. These simplified procedures of clause 5 are considered sufficient for the instrumentation and measurement arrangements commonly used in high-voltage testing; however, users may select other appropriate procedures from ISO/IEC Guide 98-3, some of which are outlined in Annex A and Annex B.

In general, the measurand to be considered is the scale factor of the measuring system, but in some cases other quantities, such as the time parameters of an impulse voltage and their associated errors, should also be considered.

NOTE 1 Other measurands for specific converting devices are in common use. For example, a voltage divider is characterized by the voltage ratio and its uncertainty in the assigned measurement ranges used. A voltage transformer is characterized by the ratio error, the phase displacement and the corresponding uncertainties.

According to the ISO/IEC Guide 98-3, the uncertainty of a measurement is determined by combining the uncertainty contributions of Type A and Type B (see 5.10, 5.11 and Annex A). The contributions are obtained from measurement results, from manufacturers' handbooks, calibration certificates and from estimating reasonable values of the influence quantities during the measurement. For example influence quantities mentioned in clause 5 include temperature and proximity effects. Others, like limited resolution of the measuring instrument, may be added if necessary.

NOTE 2 The resolution of a measuring instrument, e.g. one with few significant digits, may be a significant source of uncertainty.

During the actual voltage test, it is usually necessary to consider additional influencing quantities, apart from the calibration uncertainty of the scale factor stated in the calibration certificate, in order to obtain the uncertainty of measurement of the test voltage value.

Some guidance on determining uncertainty contributions, that need to be considered, and on their combination is given in Clause 5 and Annexes A and B. The uncertainty shall be given as the expanded uncertainty for a coverage probability of approximately 95 % corresponding to a coverage factor  $k=2$  under the assumption of a normal distribution.

NOTE 3 In this International Standard, the uncertainties of the scale factor and of voltage measurement (5.2 to 5.10) are expressed by the relative uncertainties instead of the absolute uncertainty normally considered in the ISO/IEC Guide 98-3. The direct application of the ISO/IEC Guide 98-3 and consideration of the absolute uncertainties are shown in 5.11 for time parameters as well as in Annexes A and B.

## **5 Tests and test requirements for an approved measuring system and its components**

### **5.1 General requirements**

The assigned scale factor of the measuring system shall be determined by calibration according to the specified performance tests. The assigned scale factor is a single value for the assigned measurement range. If necessary, several assigned measurement ranges with different scale factors may be defined.

For an impulse measuring system, the performance tests also show that its dynamic performance is adequate for the specified measurements and that the level of any interference is less than the specified limits.

Due to the large size of the equipment and the real environmental conditions, the calibration should preferably be performed on site by comparison with a reference measuring system.

Smaller size measuring systems or their components may be transported to another laboratory for calibration in an arrangement that simulates the operating conditions, provided that the interference test, when specified, is performed in the test facility of the user.

If a converting device is sensitive to proximity effects, the range of clearances where the assigned scale factor is valid shall be determined and entered in the record of performance. One or more ranges of clearances and respective scale factors may be assigned.

The scale factor of a measuring system shall be determined in the assigned measurement range, preferably by comparison with a reference measuring system. However, as reference measuring systems are not always available at higher voltages, the comparison may be made at voltages as low as 20 % of the assigned measurement range, provided that linearity has been determined from this point up to the limit of the assigned measurement range. One of the methods given in 5.3 shall be used for this extension.

All equipment used in establishing the scale factors of measuring systems shall have calibrations traceable to national and/or international standards.

NOTE Calibrations performed by a National Metrology Institute, or by a laboratory accredited for the quantities calibrated and reported under the accreditation, are considered traceable to national and/or international standards.

Conditions significant for the result of the calibration of the approved measuring system shall be included in the record of performance.

## 5.2 Calibration – Determination of the scale factor

### 5.2.1 Calibration of measuring systems by comparison with a reference measuring system (preferred method)

#### 5.2.1.1 Comparison measurement

Scale factor(s) is (are) determined for a complete measuring system by comparison with a reference measuring system.

The input voltage used for calibration should be of the same type, frequency or waveform as voltages to be measured. If this condition is not fulfilled, the related uncertainty contributions shall be estimated.

For the comparison, a reference measuring system, traceable to a National Metrology Institute, shall be connected in parallel with the measuring system to be calibrated. Care shall be taken to avoid ground loops between the converting device(s) and measuring instrument(s). Simultaneous readings shall be taken on both systems. The value of the input quantity obtained for each measurement by the reference measuring system is divided by the corresponding reading of the instrument in the system under test to obtain a value  $F_i$  of its scale factor. The procedure is repeated  $n$  times to obtain the mean value  $F_g$  of the scale factor of the system under test at one voltage level  $U_g$ . The mean value is given by:

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,g}$$

The relative standard deviation  $s_g$  of  $F_g$  is given by:

$$s_g = \frac{1}{F_g} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{i,g} - F_g)^2}$$

and the Type A relative standard uncertainty  $u_g$  of the mean value  $F_g$  is given by (Annex A):

$$u_g = \frac{s_g}{\sqrt{n}}$$

NOTE 1 Usually no more than  $n = 10$  independent readings are necessary.

NOTE 2 For measurement of direct and alternating voltages, independent readings should be obtained either by applying the test voltage and taking  $n$  readings or by applying the test voltage  $n$  times and taking a reading each time. For impulses,  $n$  impulses are applied.

A measuring system with several assigned measuring ranges (for example a voltage divider with several low-voltage arms) or different transmission systems shall be calibrated for each range or transmission system. Measuring systems with secondary attenuators may be calibrated on one setting only, provided that the load on the output of the converting device can be shown to be constant for all settings by other tests. For such cases the full range of secondary attenuators shall be calibrated separately.

The scale factor shall be determined over the assigned measurement range by one of the following methods described in 5.2.1.2 (preferred), 5.2.1.3 and 5.2.2.

**5.2.1.2 Comparison over the full assigned measurement range**

This test includes both the determination of the assigned scale factor and the determination of linearity. The scale factor determination shall be made by direct comparison with a reference measuring system at the minimum and maximum levels of the assigned measurement range and on at least three approximately equally spaced intermediate levels (Figure 2). The assigned scale factor  $F$  is taken as the mean value of all scale factors  $F_g$  recorded at  $h$  voltage levels:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g \text{ for } h \geq 5$$

The standard uncertainty of the determination of the assigned scale factor  $F$  is obtained as the largest of the single standard uncertainties of type A (Figure 3):

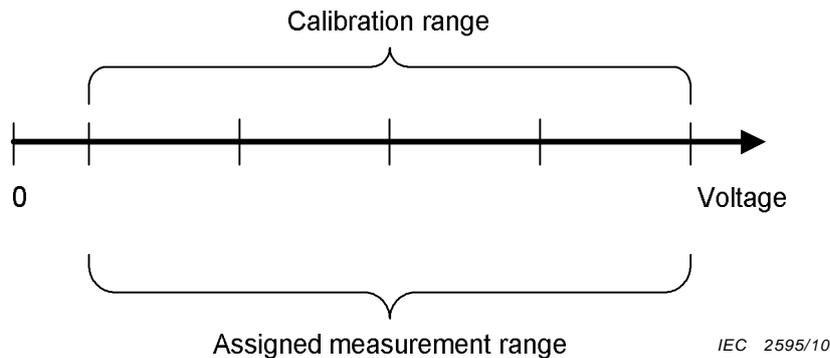
$$u_A = \max_{g=1}^h u_g.$$

The effect of a non-linearity in  $F$  is estimated as a Type B standard uncertainty expressed by

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^h \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|.$$

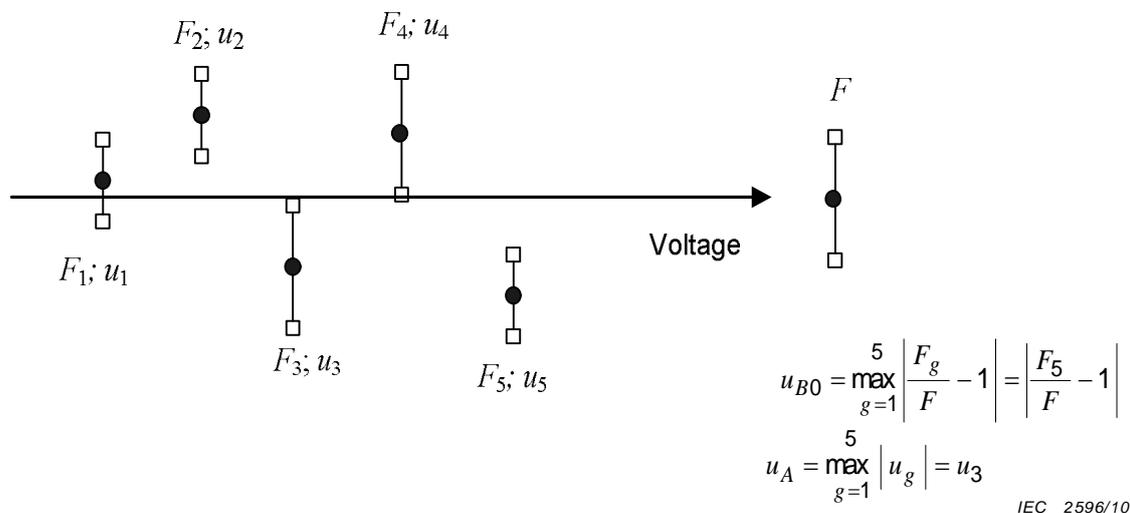
NOTE 1 A rounded value  $F_o$  may be taken as the assigned scale factor if the difference between  $F_o$  and  $F$  is introduced as an uncertainty contribution of Type B in the estimate of the expanded uncertainty of the scale factor  $F_o$ .

NOTE 2 The individual scale factors and their uncertainties at the  $h$  voltage levels should be given in the calibration certificate.



IEC 2595/10

**Figure 2 – Calibration by comparison over the full voltage range**



**Figure 3 – Uncertainty contributions of the calibration  
(example with minimum of 5 voltage levels)**

### 5.2.1.3 Comparison over limited voltage range

In cases where the assigned measurement range exceeds the capability of the reference measuring system, the scale factor shall be determined by comparison up to the maximum voltage of the reference measuring system. The comparison shall always be carried out at a voltage that is not lower than 20 % of the upper limit of the assigned measurement range (Figure 4).

The comparison shall be complemented by a linearity test in accordance with 5.3. The uncertainty contribution related to linearity shall be considered in the calculation of measurement uncertainty when using the measuring system, see 5.10.3.

The comparison with the reference measuring system is carried out at  $a \geq 2$  voltage levels, where the highest voltage level is equal to the maximum voltage of the reference measuring system. The necessary linearity test is carried out at  $b \geq 2$  voltage levels, with one level equal to the maximum level of comparison (see 5.3). The voltage levels shall further be chosen such that they comprise at least the minimum and the maximum levels of the assigned measurement range, and that

$$a + b \geq 6$$

The assigned scale factor  $F$  is taken as the mean value of the scale factors recorded with the reference measuring system:

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^a F_g$$

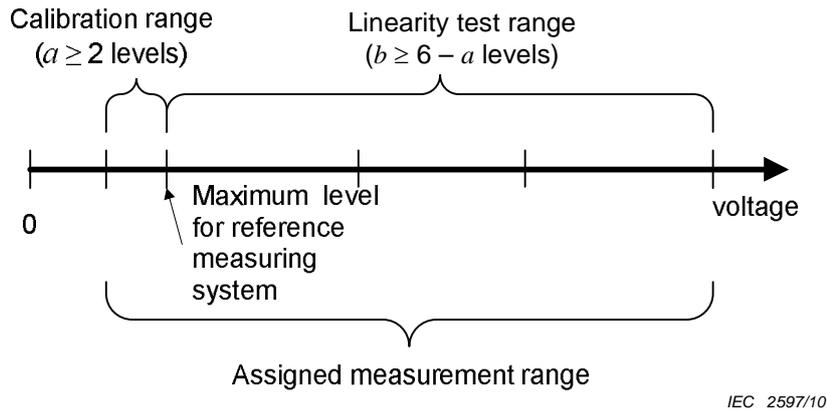
The standard uncertainty Type A of the scale factor  $F_m$  is obtained as the largest of the single standard uncertainties  $u_g$

$$u_A = \max_{g=1}^a u_g$$

and a non-linearity contribution for the calibration values

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^a \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|.$$

NOTE A rounded value  $F_0$  may be taken as the assigned scale factor if the difference between  $F_0$  and  $F$  is introduced as an uncertainty contribution of Type B in the estimate of the expanded uncertainty of the scale factor  $F_0$ .



**Figure 4 – Calibration by comparison over a limited voltage range, with an additional linearity test**

**5.2.2 Determination of the scale factor of a measuring system from the scale factors of its components (alternative method)**

The assigned scale factor of the measuring system shall be determined as the product of the scale factors of its converting device, its transmission system, any secondary attenuator, and its measuring instrument.

For the converting device and the transmission system or their combination, the scale factor shall be measured by one of the methods given below. Separate tests are not required for transmission systems that consist only of cables. The scale factor of a measuring instrument is determined according to the relevant standard (see e.g. IEC 61083-1 and IEC 61083-2) or by performing a calibration and testing according to this Clause 5.

The determination of the scale factor of a component may be made by one of the following methods:

- comparison with a reference component (e.g. a voltage divider compared with a reference voltage divider) or the application of a precise low-voltage calibrator;
- simultaneous measurements of its input and output quantities;
- a bridge method or precise low-voltage ratio measurement;
- calculation based on measured impedances.

NOTE 1 Care should be taken to ensure that the appropriate "stray" capacitance or coupling and the mutual influence of the components are included in the measurement.

For each component of the measuring system the Type A and Type B contributions to uncertainty shall be estimated (5.2 to 5.9) and the combined uncertainty for each component

shall be determined (5.10) taking into account the uncertainty contributions of the measuring devices used for the calibrations.

NOTE 2 Estimation of contributions to uncertainty in the component calibration method requires analysis of each component over the full range of conditions, - voltage, temperature, proximity effect, etc. – that may influence the result. This analysis is complex and requires deep understanding of the measurement process.

The expanded uncertainty of voltage measurement is obtained by combining these combined uncertainties of the components according to the provisions of the ISO/IEC Guide 98-3 (see also Annexes A and B, especially Example B.2).

Estimation of uncertainty of time parameter measurement shall be made applying the provisions of 5.11 and the same principles as for voltage measurement.

### 5.3 Linearity test

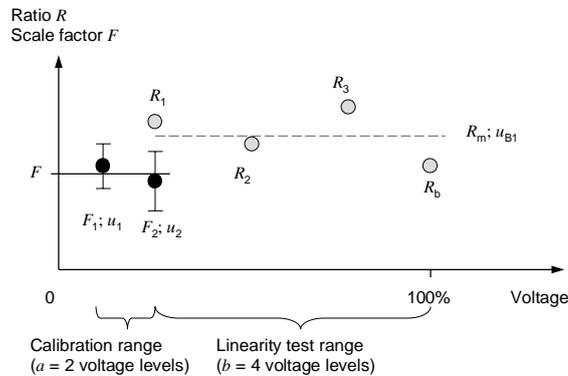
#### 5.3.1 Application

The test is only intended to provide an extension of the validity of the scale factor from the maximum voltage at which a calibration according to 5.2.1.3 has been carried out, up to the upper limit of the assigned measurement range (Fig. 4).

The output of the measuring system shall be compared with a device or system that has proven its linearity or can be presumed to be linear over the full voltage range (see 5.3.2). Failure to prove the linearity using such a method does not necessarily mean the measuring system is non-linear. In this case another method suitable for the linearity test shall be chosen. The ratio of the reading between the measuring system and the comparison device or system, shall be established as described in 5.2.1.1 for  $b$  different voltages ranging from the upper limit of the assigned measurement range down to a voltage at which the scale factor has been determined (Figure 4).

Evaluation of linearity is based on the maximum deviation of the ratios  $R_g$  from the mean  $R_m$  of the  $b$  ratios of the measured voltage to the corresponding voltage of the comparison device. The maximum deviation is taken as a type B estimate of the standard uncertainty related to non-linearity of the scale factor in the extended voltage range (Figure 5):

$$u_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max_{g=1}^b \left| \frac{R_g}{R_m} - 1 \right|$$



IEC 2598/10

**Key**

- $F_1, F_2$  scale factors determined by calibration with the reference divider in the calibration range
- $u_1, u_2$  standard uncertainties of the scale factors  $F_1$  and  $F_2$
- $F$  mean of  $F_1$  and  $F_2$
- $R_1 \dots R_b$  ratios determined in the extended voltage range for linearity test only
- $R_m$  mean of the ratios determined with a linear device in the extended voltage range
- $u_{B1}$  Type B standard uncertainty caused by non-linearity of the scale factor in the extended voltage range

**Figure 5 – Linearity test of the measuring system with a linear device in the extended voltage range**

**5.3.2 Alternative methods in order of suitability**

**5.3.2.1 Comparison with an approved measuring system**

The output of the measuring system shall be checked against the output of an approved measuring system according to the procedures described in 5.3.1. The linearity of the approved measuring system shall preferably have been established with the reference method during calibration given in 5.2.

**5.3.2.2 Comparison with input voltage of a linear high voltage generator**

The output of the measuring system shall be checked against the input voltage of the high voltage generator considering the voltage levels described in 5.3.1.

NOTE 1 The method is especially applicable for the charging voltage of multi-stage impulse generators or the alternating voltage input of a multi-stage direct voltage generator.

NOTE 2 Attention should be paid to the equal charging of all stages of a voltage generator. Sufficient time should be allowed for all stages to charge before triggering the generator.

**5.3.2.3 Comparison with the output of an electric-field measuring instrument (field probe)**

The measuring system can be checked against an electric-field responding measuring system which is so located in such a way that it measures a field proportional to the voltage being measured. The electric-field measuring system shall provide a response suitable for the type of voltage being measured.

NOTE 1 The method is expected to work up to the inception voltage for corona (see IEC 60270).

NOTE 2 This method is applicable to alternating voltage and to impulse voltages.

#### 5.3.2.4 Comparison with a standard air gap according to IEC 60052

The measuring system for alternating or lightning/switching impulse voltage may be checked against a sphere gap. For a measuring system for direct voltage a rod/rod gap shall be applied. In both cases the comparison shall be made in accordance with the provisions of IEC 60052.

The complete linearity test shall be made within sufficiently short time that atmospheric conditions do not change and hence corrections need not be used. Otherwise corrections according to IEC 60060-1 shall be applied based on recorded atmospheric conditions.

#### 5.3.2.5 Method for multi-section converting devices (voltage dividers)

For a converting device consisting of several identical high-voltage units the following tests shall be performed:

- a type test on an equivalent complete converting device (equipped with its electrodes) as specified in Clauses 6 to 9 shall be carried out;
- a measurement of the capacitance and/or resistance of each high-voltage unit at five equally spaced voltages (similar to that specified in 5.2.1.2) shall be effected. The scale factor shall be calculated for each voltage from the values of capacitance and/or resistance and that of the low-voltage arm;
- a check that the assembled converting device is not significantly affected by corona and other influences at the upper limit of the assigned measurement range.

NOTE Significant effects can be caused by visible and audible corona or leakage current.

### 5.4 Dynamic behaviour

#### 5.4.1 General

The response of a component or a measuring system shall be determined in conditions representative of its use, particularly clearances to earthed and energized structures. The preferred methods of measurement are the amplitude/frequency response for direct or alternating voltages, and determination of the scale factors and time parameters at the upper and lower limit of the nominal epoch for impulse voltages (5.4.3). Additional information on unit step-response measurements is given in Annex C.

A type B estimate of the relative standard uncertainty related to the dynamic behaviour is given by:

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right|,$$

where  $k$  is the number of scale factor determinations within a frequency range, or within a range of impulse time parameters defining the nominal epoch,  $F_i$  are the individual scale factors and  $F$  is the mean scale factor within the nominal epoch.

#### 5.4.2 Determination of the amplitude/frequency response

The system or component is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for an appropriate range of frequencies. The deviations of the scale factor are evaluated according to the above formula (5.4.1).

### 5.4.3 Reference method for impulse voltage measuring systems

Records of the impulse voltage taken for calibration of the scale factor described in (5.2) are used for the limits of the nominal epoch, and the uncertainty contribution of voltage and time-parameter measurements shall be evaluated according to the above formula (5.4.1).

NOTE For additional information by unit step response measurement and evaluation see Annex C.

### 5.5 Short-term stability

The maximum voltage of the assigned measurement range shall be applied to the measuring system continuously (or at the assigned rate for impulses) for a period appropriate to the anticipated use. The scale factor shall be measured as soon as the maximum voltage has been reached and again immediately before the voltage is reduced.

NOTE 1 The short term stability test is intended to cover the effects of self-heating on the converting device.

NOTE 2 The period of voltage application should not be longer than the assigned operating time, but can be limited to a time sufficient to reach equilibrium.

The result of the test is an estimate of the change of scale factor within the voltage application time from which the standard uncertainty contribution is obtained as a type B estimate:

$$u_{B3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right|,$$

where  $F_{before}$  and  $F_{after}$  are the scale factors before and after the short-term stability test.

### 5.6 Long-term stability

The stability of the scale factor shall be considered and evaluated over a long time-span and is usually estimated as an uncertainty contribution valid for a projected time of use (usually until the next calibration),  $T_{use}$ . The evaluation can be based on manufacturer's data or on results of a series of performance tests. The result of the evaluation is an estimate of a change of the scale factor. The evaluation delivers a standard uncertainty contribution, which is a type B estimate:

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \cdot \frac{T_{use}}{T_2 - T_1},$$

where  $F_1$  and  $F_2$  are the scale factors of two consecutive performance tests made at times  $T_1$  and  $T_2$ .

In cases where a number of performance test results are available, the long-term stability can be characterised by the type A contribution:

$$u_{B4} = \frac{T_{use}}{T_{mean}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{F_i}{F_m} - 1 \right)^2}{n-1}},$$

where the results of repeated performance tests are the scale factors  $F_i$ , with a mean value  $F_m$  and repeated with a mean time interval  $T_{mean}$ .

NOTE Long-term stability is usually stated for a period of one year.

## 5.7 Ambient temperature effect

The scale factor of a measuring system can be affected by ambient temperature. This can be quantified by determination of the scale factor at different ambient temperatures or by computations based on properties of components. Details of test or calculations shall be included in the record of performance.

The result of a test or calculation is an estimate of a change of the scale factor due to ambient temperature. The related standard uncertainty is the following type B estimate:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_T}{F} - 1 \right|,$$

where  $F_T$  is the scale factor at the considered temperature and  $F$  is that at the calibration temperature.

NOTE 1 If the deviation  $F_T$  from  $F$  is greater than 1 %, a correction of the scale factor is recommended.

NOTE 2 Self-heating effect is covered by the short-term stability test.

NOTE 3 A temperature correction factor for the scale factor may be used in cases where the ambient temperature varies over a wide range. Any temperature corrections to be used should be listed in the record of performance. For cases where temperature correction has been applied, the uncertainty  $u_{B5}$  of the temperature correction factor may be taken as the uncertainty contribution.

## 5.8 Proximity effect

Variations of the scale factor or of a parameter of a device, due to proximity effects, can be determined by measurements performed for different distances of the device from earthed walls or energized structures.

The result of the test is the change of scale factor from which the standard uncertainty contribution of type B is estimated:

$$u_{B6} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_{\max}}{F_{\min}} - 1 \right|,$$

where  $F_{\max}$  and  $F_{\min}$  are the scale factors for minimum and maximum distances to other objects.

NOTE 1 Different values for  $u_{B6}$  may be given for different ranges of distances.

NOTE 2 Some test facilities may choose to approve their measuring systems for only a single set of distances, or for a few sets or ranges of distances.

## 5.9 Software effect

The way that the software handles evaluation of measured data may introduce an uncertainty that shall be estimated. This can be done by evaluation of a set of test data with established reference values. For impulse voltages see IEC 61083-2.

The result of the evaluation is an estimate of the influence of data processing, from which the relative standard uncertainty contribution  $u_{B7}$  is obtained as a type B estimate.

## 5.10 Uncertainty calculation of the scale factor

### 5.10.1 General

A simplified procedure to determine the expanded uncertainty of the assigned scale factor  $F$  of a measuring system is given here. It is based on several assumptions, which in many

cases may be true, but should be verified in each individual case. The main assumptions are as follows:

- a) There is no correlation between the measurement quantities;
- b) Standard uncertainties evaluated by the method of Type B are assumed to have a rectangular distribution.
- c) The largest three uncertainty contributions to uncertainty have approximately equal magnitude.

These assumptions lead to a procedure of evaluation of the expanded uncertainty of the scale factor  $F$ , both for the calibration situation and for the use of an approved measuring system in measurements.

The expanded uncertainty of calibration  $U_{\text{cal}}$  is estimated from the uncertainty of the calibration of the reference system and from influence of other quantities explained in this subclause, such as the stability of the reference measuring system and ambient parameters during the calibration.

The expanded uncertainty of a measurement  $U_M$  of the test quantity is evaluated from the uncertainty of the calibration of the scale factor of the approved measuring system and from the influence of other quantities discussed in 5.10.3, such as the stability of the measuring system and ambient parameters during the measurement as they are not considered in the calibration certificate.

Further methods for estimating uncertainty are given in the ISO/IEC Guide 98-3 and are also described in Annex A and Annex B.

### 5.10.2 Uncertainty of the calibration

The relative expanded uncertainty of a calibration of the scale factor  $U_{\text{cal}}$  is calculated from the uncertainty of the reference measuring system and the Type A and Type B uncertainties explained in this subclause:

$$U_{\text{cal}} = k \cdot u_{\text{cal}} = 2 \sqrt{u_{\text{ref}}^2 + u_A^2 + \sum_{i=0}^N u_{B_i}^2},$$

where:

- $k = 2$  is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- $u_{\text{ref}}$  is the combined standard uncertainty of the scale factor of the reference measuring system at its calibration;
- $u_A$  is the statistical Type-A uncertainty in the determination of the scale factor.
- $u_{B0}$  is the non-linearity contribution to standard uncertainty determined during calibration of the scale factor (see 5.2);
- $u_{B_i}$  are the contributions to the combined standard uncertainty of the scale factor caused by the  $i^{\text{th}}$  influence quantity and evaluated as a Type B contribution (Annex A). These contributions are related to the reference measuring system, and arise from non-linearity, short- and long-term instabilities, etc. and are determined either by additional measurements or estimated from other data sources according to 5.3 to 5.9. Influences related to the approved measuring systems, such as its short-term stability, and resolution of the measurement shall also be taken into account if they are significant during the calibration.

NOTE If the calibration is performed over the full assigned measurement range (5.2.1.2), no separate linearity test (5.3) is required.

In cases where the assumptions mentioned above are not valid, the procedures given in Annex A or, if necessary, in the ISO/IEC Guide 98-3:2008 shall be applied.

The number  $N$  of Type B uncertainty contributions may differ for the different types of test voltages (Clauses 6 to 9). More information on the Type B contributions is given in the relevant clauses.

If the assigned scale factor of the measuring system is calculated from those of its components (5.2.2), the standard uncertainties of the calibration of the components shall be combined with those describing additional conditions of the measuring system and its environment (see Annex A).

### 5.10.3 Uncertainty of measurement using an approved measuring system

Estimation of the expanded uncertainty of measurement of the test voltage value is the responsibility of the user. However, this estimation may be given for a defined range of measurement conditions in conjunction with the calibration certificate.

The relative expanded uncertainty of measurement of the test voltage value  $U_M$  is calculated from the combined standard uncertainty of the assigned scale factor as determined in the calibration of the approved measuring system and additional Type B uncertainty contributions explained in this subclause:

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + \sum_{i=0}^N u_{\text{Bi}}^2}$$

where:

- $k = 2$  is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- $u_M$  is the combined standard uncertainty of the measurement using the approved measuring system, valid for a projected time of use, e.g. a calibration interval;
- $u_{\text{cal}}$  is the combined standard uncertainty of the scale factor of the approved measuring system determined at the calibration (see 5.10.2);
- $u_{\text{Bi}}$  is the contribution to the combined standard uncertainty of the scale factor of the approved measuring system and caused by the  $i^{\text{th}}$  influence quantity, evaluated as a Type B contribution. These contributions are related to normal use of the approved measuring system, and arise from non-linearity, short- and long-term instabilities, etc. and are determined according to 5.3 to 5.9 based either on additional measurements or estimated from other data sources. Other significant influences shall also be taken into account, e.g. resolution of instrument display of the approved measuring system.

NOTE The calibration certificate may include information on both the uncertainty of the calibration,  $U_{\text{cal}}$ , and the relative expanded uncertainty of measurement of the test voltage value,  $U_M$ , when using the approved measuring system under stated, predefined conditions.

In cases where the assumptions mentioned above in 5.10.1 are not valid, the procedures given in Annex A or, if necessary in the ISO/IEC Guide 98-3, shall be applied.

The number  $N$  of Type B uncertainty contributions may differ for the different types of test quantities (Clauses 6 to 9, voltages and time parameters).

## 5.11 Uncertainty calculation of time parameter measurement (impulse voltages only)

### 5.11.1 General

An approved measuring system for impulse voltages shall be able to measure the time parameters ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ) within the specified uncertainty limits when the parameter lies within its specified range. For front time this is usually the nominal epoch. The experimental proof can be given either by the comparison method or by the component method. The proof may also be given by calculation, using the convolution method on the basis of the experimental step response (Annex C and D).

The general procedure for evaluating the time parameters and their uncertainties is described for the front time  $T_1$ , determined by the comparison method (see example in Clause B.3). It is applicable for other time parameters in the same way.

NOTE It should be remembered that the estimation of the uncertainty of time parameters results in an absolute uncertainty value

### 5.11.2 Uncertainty of the time parameter calibration

The front times  $T_1$  of  $n$  impulse voltages shall be evaluated simultaneously with the measuring system under test, denoted by X, and the reference system, denoted by N. The error of the reference measuring system is assumed to be negligible. The mean error of the front times is

$$\Delta T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i})$$

and the experimental standard deviation is

$$s(\Delta T_1) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2}$$

where  $\Delta T_{1,i}$  is the  $i^{\text{th}}$  difference of the front times measured by the systems X and N.

NOTE 1 Usually no more than  $n = 10$  independent readings are necessary.

NOTE 2 In general, the front times are evaluated from the same records of N and X, used to evaluate the peak values for determining the scale factor (5.2.2.1).

From  $s(\Delta T_1)$ , the Type A standard uncertainty is calculated:

$$u_A = \frac{s(\Delta T_1)}{\sqrt{n}}$$

The comparison is performed at a suitable voltage level using at least two front times, including the minimum and maximum  $T_1$  values of the nominal epoch, for which the measuring system is to be approved. An additional  $T_1$  value in the middle of the nominal epoch can be added. The standard uncertainty Type A of the time parameter measurement is obtained as the largest of the single standard uncertainties determined for the different  $T_1$  values. For each of the different  $T_1$  values, the mean error  $\Delta T_{1,j}$  is calculated as described above. The overall mean of the  $m \geq 2$  mean errors is:

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta T_{1,j}$$

The maximum difference between the individual values  $\Delta T_{1,j}$  and their mean value  $\Delta T_{1m}$  is taken to determine the Type B uncertainty  $u_B$  by:

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^m \left| \Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m} \right|.$$

NOTE More generally, the reference measuring system N may be characterised in the same manner by its mean error of the front time, denoted by  $\Delta T_{1ref}$ , as stated in its calibration certificate for the nominal epoch. The resultant error of the calibrated system X itself for front time measurements is

$$\Delta T_{1cal} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1ref}.$$

The expanded uncertainty of the time parameter calibration, equal to that of the resultant mean error,  $\Delta T_{1cal}$ , is determined by:

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + u_B^2},$$

where:

- $u_{cal}$  is the combined standard uncertainty of the mean front time error,  $\Delta T_{1cal}$ , of the calibrated measuring system;
- $k = 2$  is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;
- $u_{ref}$  is the combined standard uncertainty of the mean front time error,  $\Delta T_{1ref}$ , of the reference measuring system;
- $u_A$  is the type A standard uncertainty of the mean front time error,  $\Delta T_{1m}$ , of the calibrated measuring system;
- $u_B$  is the type B standard uncertainty of the mean front time error  $\Delta T_{1m}$  of the calibrated measuring system.

Additional contributions to the expanded uncertainty  $U_{cal}$  may be important in special cases and shall be considered.

### 5.11.3 Uncertainty of time parameter measurement using an approved measuring system

Estimation of the expanded uncertainty of a time parameter measurement is the responsibility of the user. However, this estimation may be given for defined range of measuring conditions in conjunction with the calibration certificate.

NOTE If the expanded uncertainty of the time parameter calibration is less than 70 % of the expanded uncertainty specified for time parameter measurement in this standard, it can in general be assumed that the uncertainty of using the approved measuring system for time parameter measurement  $U_M$  is equal to  $U_{cal}$ .

The expanded uncertainty of the time parameter measurement  $U_M$  shall be calculated according to

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2},$$

where:

- $u_{cal}$  is the combined standard uncertainty of the mean front time error,  $\Delta T_{1cal}$ , of the calibrated measuring system;
- $k = 2$  is the coverage factor for a coverage probability of approximately 95 % and normal distribution;

- $u_{Bi}$  is the contribution to the combined standard uncertainty of the time parameter of an impulse using the approved measuring system and caused by the  $i^{\text{th}}$  influence quantity and evaluated as a Type B contribution. These contributions are related to normal use of the approved measuring system, and arise for example from long-term instabilities, software influence, etc., but also from the influence of having non-perfect impulse shapes. They are determined according to 5.3 to 5.9, based either on additional measurements or estimated from other data sources. In some situations further influences shall also be taken into account, e.g. resolution of instrument displays.
- $u_M$  is the combined standard uncertainty of the time parameter of an impulse voltage measured with the approved measuring system, valid for an projected period of use;

Additional contributions to the expanded uncertainty may be important in special cases and shall be considered when calculating  $U_M$ , e.g. when the impulse voltage is superimposed by front oscillations.

NOTE When the approved measuring system is used to measure impulse voltages without oscillations, the measured time parameter  $T_{1\text{meas}}$  can be corrected by the resultant error  $\Delta T_{1\text{cal}}$  of the relevant time parameter determined in the calibration:

$$T_{1\text{corr}} = T_{1\text{meas}} - \Delta T_{1\text{cal}}$$

The same procedures can be applied to other time parameters. The expanded uncertainty of a corrected time parameter,  $T_{1\text{corr}}$ , should be given according to Annex B, Example B.3.

### 5.12 Interference test (transmission system and instrument for impulse voltage measurements)

The test shall be made on the measuring system, with its cable or transmission system disconnected, located in its usual position and short-circuited at its input terminals without changing the earth connections of the cable or transmission system. An interfering condition shall be produced at the input of the measuring system by a disruptive discharge with an impulse voltage representative of voltage, shape and instant of a possible discharge to be applied during the HV tests, and the instrument shall record the output.

NOTE To protect the converting device (voltage divider) output from over-voltages, it may be advisable to short-circuit the divider output terminal.

The interference ratio shall be determined as the maximum amplitude of the measured interference divided by the output of the measuring system when measuring the test voltage.

To pass the interference test, the maximum amplitude of the measured interference should be less than 1 % of the output of the measuring system when measuring the test voltage. Interference greater than 1 % is permitted provided it is shown that it does not affect the measurement.

### 5.13 Withstand tests of converting device

A converting device shall pass a dry withstand test performed with a voltage of the required frequency or shape at a specified voltage.

NOTE 1 The recommended withstand test level is 110 % of the rated operating voltage. For the procedures of withstand tests see IEC 60060-1.

The withstand tests shall be performed at the polarity (or polarities) for which the system is intended.

Wet tests and pollution tests, when specified, are performed as type tests.

NOTE 2 Design and construction of any component of an approved measuring system should be such that it can withstand a disruptive discharge at the test object without any change in its characteristics.

## 6 Measurement of direct voltage

### 6.1 Requirements for an approved measuring system

#### 6.1.1 General

The general requirement is to measure the test voltage value according to IEC 60060-1 (arithmetic mean value) with an expanded uncertainty  $U_M \leq 3\%$ .

The uncertainty limits shall not be exceeded in the presence of ripple, the magnitude of which is within the limits given in IEC 60060-1.

NOTE Attention is drawn to the possible presence of alternating voltages coupled to the measuring system and affecting the reading of the measuring instrument.

#### 6.1.2 Uncertainty contributions

For a direct voltage measuring system, the expanded uncertainty of measurement  $U_M$  shall be evaluated with a coverage probability of 95 %, according to 5.10.3 and – if necessary - Annexes A and B. Tests for assessing contributions to uncertainty which are usually considered are summarized in Table 1. Other contributions can be important in some cases and so shall be considered in addition.

#### 6.1.3 Requirement on converting device

A converting device for direct voltage, usually a resistive voltage divider or a voltage measuring impedance (high-voltage resistor), shall be constructed so as to ensure that leakage current on its external insulating surfaces has a negligible influence on the measuring uncertainty.

NOTE To ensure that the influence of leakage current is negligible, a measuring current as high as 0,5 mA at the rated voltage may be necessary.

#### 6.1.4 Dynamic behaviour for measuring voltage changes

The time constant of the high-voltage measuring system shall not be greater than 0,25 s for the measurement of direct voltages that rise or fall with rates in the order of 1 % of the test voltage value per second.

NOTE In general, the instruments used for the measurement of the test voltage value (i.e. the arithmetic mean), are not affected by the ripple present. However, if instruments with fast response are used, it may become necessary to ensure that the measurement is not adversely affected by the ripple.

When the transient voltage drop during pollution testing is measured, the time constant of the measuring system shall be less than one third of the rise time of the transient.

### 6.2 Tests on an approved measuring system

The tests according to Clause 5, summarized in Table 1, are necessary for the qualification of measuring systems and their components as well as for the estimation of the expanded uncertainty of measurement, for exceptions see 4.4.2.

The results of the type and routine tests can be taken from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each component.

**Table 1 – Tests required for an approved direct voltage measuring system**

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor at calibration			5.2	
Scale factor check				6.3
Linearity, see NOTE 2		5.3	5.3 (if applicable)	
Dynamic behaviour	5.4			
Short-term stability		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Proximity effect, see NOTE 3	5.8 (if applicable)		5.8 (if applicable)	
Software effect	5.9 (if applicable)			
Dry withstand test on converting device	5.13	5.13 (if applicable)		
Wet or polluted withstand test on converting device	5.13 (if applicable)			
Scale factor of converting device	5.2.2	5.2.2		
Scale factor of transmission system other than a cable	5.2.2	5.2.2		
Scale factor of measuring instrument	5.2.2	5.2.2		
Responsibility	on components, by manufacturer		on the system by user, see NOTE 1	
Recommended repetition rate	only once (type and routine test)		proposed annually, but at least every 5 years	according to stability, but at least annually
<p>NOTE 1 The above listed tests should also be applied to single components if performance tests are made according to the alternative method (see 5.2.2). To obtain the uncertainty of measurement of the approved measuring system those of the components should be combined as demonstrated in Annex B.</p> <p>NOTE 2 A linearity test according to 5.3 is only required if the calibration cannot be performed by comparison over the full assigned measurement range (5.2.1.2).</p> <p>NOTE 3 Proximity effects can be caused by corona and related space charge effects. Investigation of the proximity effect in the performance test is only necessary if the type test data are not sufficient.</p>				

### 6.3 Performance check

#### 6.3.1 General

The scale factor(s) of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

#### 6.3.2 Comparison with an approved measuring system

A comparison shall be made with another approved measuring system using the procedure of 5.2 or with a rod-rod gap according to IEC 60052. If the difference between the two measured values is within  $\pm 3\%$ , the assigned scale factor is taken as valid. If the difference is larger,

then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (calibration) as described in 5.2.

### 6.3.3 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component shall be checked, using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty of no more than 1 %. If the difference of the scale factor of each component from its previous value is not larger than  $\pm 1$  %, the assigned scale factor is taken as still valid. If any difference exceeds 1 %, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (calibration) as described in 5.2.

## 6.4 Measurement of ripple amplitude

### 6.4.1 Requirements

The ripple amplitude shall be measured with an expanded uncertainty of no more than 10 % of the ripple amplitude or 1 % of the arithmetic mean value of the direct voltage, whichever is larger.

Separate ripple measuring systems may be used to measure the mean value of the voltage and the ripple amplitude, or the same converting device may be used with two separate instruments.

The upper  $-15$  % limit frequency of the amplitude/frequency response of the ripple measuring system shall be greater than 5 times, and the lower  $-15$  % limit frequency less than 0,5 times that of the fundamental frequency  $f$  of the ripple.

NOTE The requirement on the lower limit frequency can be verified at the frequency of its supply voltage in many cases.

### 6.4.2 Uncertainty contributions

For a ripple voltage measuring system the uncertainty shall be estimated according to Annex A and in addition uncertainty contributions mentioned in 5.3 to 5.9 shall be considered. For details see also the related clauses for measurement of alternating voltages (Clause 7). Other contributions can be important in individual cases and the information given here is for guidance only.

### 6.4.3 Calibrations and tests on an approved ripple voltage measuring system

The tests specified in Table 2 shall be applied only to systems used to measure the ripple amplitude.

The compliance with type test requirements can be proved by tests on a device of the same design or sometimes be derived from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each component. See 4.4.2 for exceptions.

Other uncertainty contributions can be important in individual cases and the information given here is for guidance only.

### 6.4.4 Measurement of the scale factor at the ripple frequency

The scale factor of the ripple measuring system shall be determined at the fundamental frequency  $f$  of the ripple, with an expanded uncertainty of no more than 3 %. This scale factor may also be determined as the product of the scale factors of the components.

### 6.4.5 Dynamic behaviour by amplitude/frequency response

The measuring system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for a range of frequencies

approximately between 0,5 times and 7 times the fundamental frequency of the ripple. The difference of the measured voltages shall be within 3 dB.

#### 6.4.6 Performance check for ripple measuring system

The scale factor of an approved measuring system can be checked by one of the methods described for alternating voltage measuring systems in 7.4.

**Table 2 – Required tests for uncertainty contributions in ripple measurement**

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor of measuring system at the calibration			5.2	
Scale factor check				6.4.6/7.4
Dynamic behaviour for ripple		6.4.5	6.4.5	
Long-term stability	5.6			
Ambient temperature effect	5.7			
Responsibility	on components, by manufacturer		on the system by user	
Recommended repetition rate	only once (type and routine test)		proposed annually, but at least every 5 years	according to stability, but at least annually

## 7 Measurement of alternating voltage

### 7.1 Requirements for an approved measuring system

#### 7.1.1 General

The general requirement is to measure the test voltage value according to IEC 60060-1 (peak/ $\sqrt{2}$  or r.m.s. value) at its rated frequency with an expanded uncertainty  $U_M \leq 3\%$ .

#### 7.1.2 Uncertainty contributions

For an alternating voltage measuring system the expanded uncertainty  $U_M$  shall be evaluated with a coverage probability of 95 % according to 5.10.3 and - if necessary - Annexes A and B. Tests for assessing contributions to uncertainty which are usually considered are summarized in Table 3. Other contributions can be important in some cases and so shall be considered in addition.

#### 7.1.3 Dynamic behaviour

The amplitude-frequency response of a measuring system, intended for operation at one single fundamental frequency  $f_{nom}$ , shall be within the marked area of Figure 6, derived from the uncertainty requirements. Number pairs in the diagram show the normalised frequency (logarithmic scale) and the corresponding deviation at the corner points of the limit lines. Performance shall be proven from  $f_{nom}$  to  $7 f_{nom}$  by tests or circuit analysis. The amplitude-frequency response outside this range is given for information only.

A measuring system can also be approved for a range of fundamental frequencies (e.g. 45 Hz to 65 Hz according to IEC 60060-1). The scale factor shall in such cases be constant within 1 % from the lowest fundamental frequency  $f_{nom1}$  up to the highest fundamental frequency  $f_{nom2}$ . The amplitude-frequency response inside the interval  $f_{nom1}$  to  $7 f_{nom2}$ , shall be within

the marked area of Figure 7. Number pairs in the diagram show the normalised frequency and the corresponding permitted deviation from the ideal response at the corner points of the limit lines. Performance shall be proven from  $f_{nom1}$  to  $7f_{nom2}$  by tests or circuit analysis. The amplitude-frequency response outside this range is given for information only.

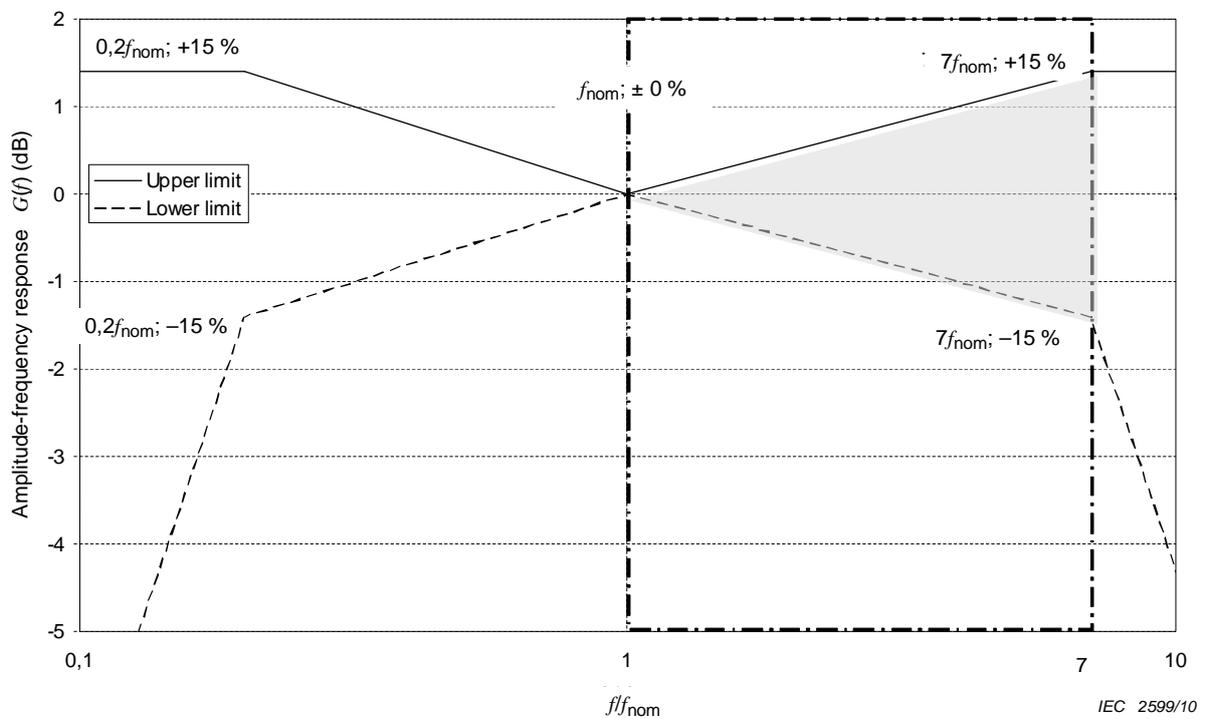
Special requirements on dynamic behaviour may be specified by the relevant technical committee.

NOTE 1 Measuring systems complying with these requirements are considered to have a frequency response suitable for measurement of the total harmonic distortion (THD) on the test voltage.

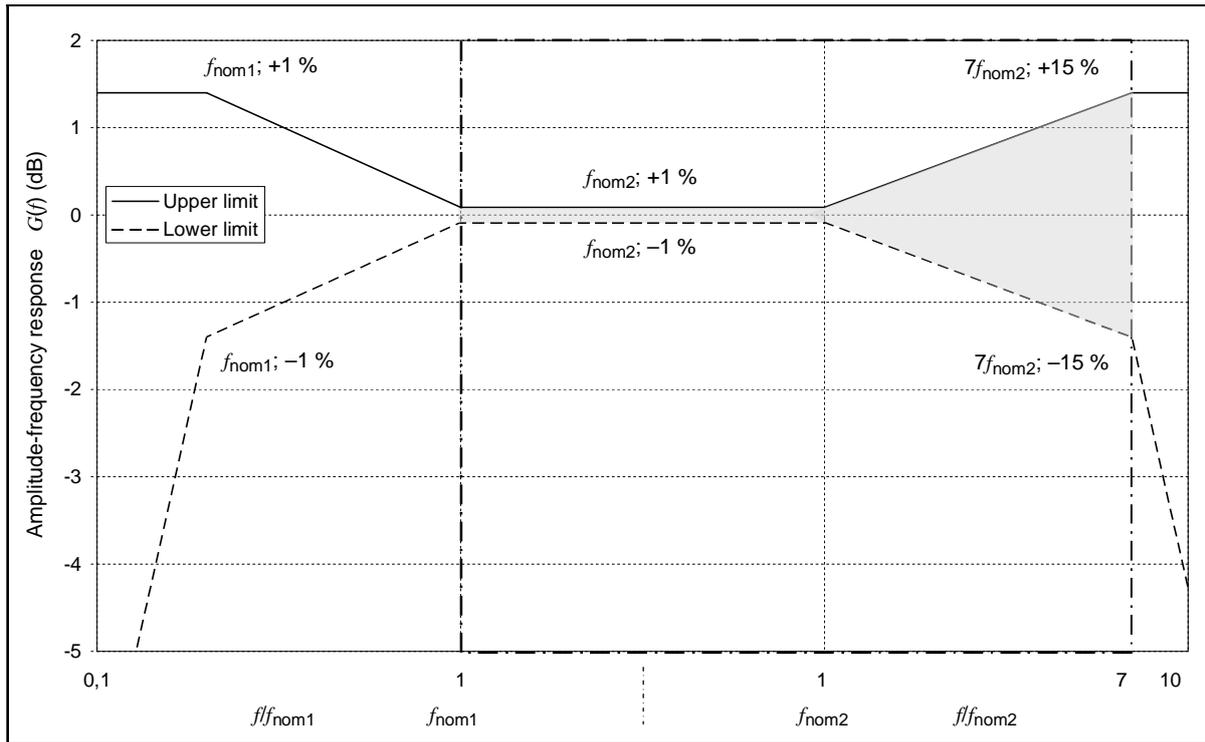
NOTE 2 The frequency response outside the marked area, although not required, represents good practice.

NOTE 3 Amplitude-frequency response measurements can be waived for measuring systems used on alternating voltage sources (e.g. series resonant systems) if it can be demonstrated that the peak-to-r.m.s. ratio of the test voltage equals  $\sqrt{2}$  within  $\pm 1\%$  for all expected operation conditions.

NOTE 4 In certain cases, it may be necessary to measure transient voltages superimposed on an alternating voltage. No requirements for this are given here, but some guidance may be obtained from Clause 8.



**Figure 6 – Shaded area for acceptable normalised amplitude-frequency responses of measuring systems intended for single fundamental frequencies  $f_{nom}$  (to be tested in the range  $(1 \dots 7) f_{nom}$ )**



IEC 2600/10

**Figure 7 – Shaded area for acceptable normalised amplitude-frequency responses of measuring systems intended for a range of fundamental frequencies  $f_{nom1}$  to  $f_{nom2}$  (to be tested in the range  $f_{nom1}$  to  $7 f_{nom2}$ )**

## 7.2 Tests on an approved measuring system

The tests according to Clause 5, summarized in Table 3, are necessary for the qualification of an alternating voltage measuring system and its components as well as for the estimation of the expanded uncertainty of measurement. For exceptions see 4.4.2.

The results of the type and routine tests can be taken from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit.

## 7.3 Dynamic behaviour test

To determine the dynamic behaviour, the system is subjected to a sinusoidal input of known amplitude, usually at low level, and the output is measured. This measurement is repeated for the range of frequencies between 1 time and 7 times the test frequency. The result shall be in accordance with clause 7.1.3.

## 7.4 Performance check

### 7.4.1 General

The scale factor(s) of an approved measuring system can be checked by one of the following methods.

### 7.4.2 Comparison with an approved measuring system

A comparison shall be made with another approved measuring system using the procedure of 5.2 or with a sphere gap according to IEC 60052. If the difference between the two measured values is within  $\pm 3\%$ , the assigned scale factor is taken as still valid. If the difference is

larger, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test (calibration) (see 5.2).

### 7.4.3 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component can be checked using an internal or an external calibrator having an expanded uncertainty of no more than 1 %. If the difference of each scale factor from its previous value is not more than  $\pm 1$  %, the assigned scale factor is taken as still valid. If any difference exceeds 1 % then a new value of the assigned scale factor shall be determined (see 5.2).

**Table 3 – Tests required for an approved alternating voltage measuring system**

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor at the calibration			5.2	
Scale factor check				7.4
Linearity, see NOTE 2		5.3	5.3 (if applicable)	
Dynamic behaviour	5.4/7.3		5.4	
Short-term stability		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Proximity effect, see NOTE 3	5.8 (if applicable)		5.8 (if applicable)	
Software effect	5.9 (if applicable)			
Dry withstand test on converting device	5.13	5.13 (if applicable)		
Wet or polluted withstand test on converting device	5.13 (if applicable)			
Scale factor of converting device	5.2.2	5.2.2		
Scale factor of transmission system other than a cable	5.2.2	5.2.2		
Scale factor of measuring instrument	5.2.2	5.2.2		
Responsibility	on components, by manufacturer		on the system, by user, see NOTE 1	
Recommended repetition rate	only once (type and routine test)		proposed annually but at least every 5 years	according to stability but at least annually

NOTE 1 The above listed tests should also be applied to the single components if performance tests are made according to the alternative method (see 5.2.2). To obtain the uncertainty of measurement of the approved measuring system, those of the components must be combined as demonstrated in Annex B.

NOTE 2 A linearity test according to 5.3 is only required if the calibration cannot be performed by comparison over the full measurement range (5.2.1.2).

NOTE 3 Investigation of the proximity effect in the performance test is only necessary if the type test data are not sufficient.

## 8 Measurement of lightning impulse voltage

### 8.1 Requirements for an approved measuring system

#### 8.1.1 General

The general requirements are:

- to measure the test voltage value according to IEC 60060-1 for full and tail-chopped impulses with an expanded uncertainty  $U_{M1} \leq 3 \%$ ;
- to measure the peak value of front chopped impulses with an expanded uncertainty  $U_{M2} \leq 5 \%$  ( $0,5 \mu\text{s} < T_c < 2 \mu\text{s}$ );
- to measure the time parameters which define the waveform according to IEC 60060-1 with an expanded uncertainty  $U_{M3} \leq 10 \%$ ;
- to measure oscillations which may be superimposed on an impulse to ensure that they do not exceed the permitted levels given in IEC 60060-1.

NOTE No recommendations are given for the measurement of voltage collapse since no IEC apparatus committee has yet specified a requirement.

#### 8.1.2 Uncertainty contributions

For a lightning impulse voltage measuring system, the expanded uncertainty of measurement  $U_M$  shall be evaluated with a coverage probability of 95 %; according to 5.10.3, 5.11.3 and – if necessary - Annexes A and B. Tests for assessing contributions to uncertainty which are usually considered are summarized in Table 4. Other contributions can be important in some cases and so shall be considered in addition.

#### 8.1.3 Requirement on measuring instrument

The measuring instrument shall comply with IEC 61083-1 and IEC 61083-2.

#### 8.1.4 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of a measuring system is adequate for the measurement of peak voltage and time parameters over the nominal epoch for waveforms specified in the record of performance when:

- the scale factor is constant within the following limits:
  - within  $\pm 1 \%$  for full and tail-chopped impulses
  - within  $\pm 3 \%$  for front-chopped impulses
- the expanded uncertainty of the time parameters measurement is not greater than 10 %.

NOTE 1 In order to reproduce, in the recorded curve, oscillations that may be superimposed on an impulse, the relevant upper limit frequency may be several MHz.. A measuring system with a response parameter  $T_\alpha$  equal or less than several tens of nanoseconds can be considered suitable (see Annex C). These limits are under consideration.

NOTE 2 Preferably one measuring system is used to measure all of the required quantities, i.e. the peak value, the time parameters, and oscillations. However, many systems which could be approved for measurements of peak value and time parameters cannot be approved for measurements of oscillations. In this case a measuring system may be approved for measurements of peak voltage and time parameters while an auxiliary system is approved for measurements of oscillations.

#### 8.1.5 Connection to the test object

The converting device shall be connected directly to the terminals of the test object. The converting device shall not be connected between the voltage source and the test object. The lead to the converting device shall carry only the current to the measuring system. The converting device should be placed so that coupling between the test and measuring circuits is negligible.

NOTE Exceptions are possible, e.g. for testing with combined voltages (see IEC 60060-1).

## 8.2 Tests on an approved measuring system

The tests according to Clause 5, summarized in Table 4, are necessary for the qualification of a lightning impulse voltage measuring system and its components as well as for the estimation of the expanded uncertainty. For exceptions see 4.4.2.

The results of the type and routine tests can be taken from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit.

**Table 4 – Tests required for an approved lightning impulse voltage measuring system**

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor/time parameter at the calibration			5.2 5.11/8.3	
Scale factor check				8.5
Linearity, see NOTE 2		5.3	5.3 (if applicable)	
Dynamic behaviour	5.4/8.4		5.4/8.4	8.5
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Proximity effect, see NOTE 3	5.8 (if applicable)		5.8 (if applicable)	
Software effect (IEC 61083-2)	5.9 (if applicable)			
Interference test			5.12	5.12
Dry withstand test	5.13	5.13 (if applicable)		
Wet or polluted withstand test	5.13 (if applicable)			
Scale factor/time parameters of converting device	5.2.2	5.2.2		
Scale factor/time parameters of transmission system other than a cable	5.2.2	5.2.2		
Scale factor/time parameters of measuring instrument	5.2.2 IEC 61083	5.2.2 IEC 61083		
Responsibility	on components, by manufacturer		on the system, by user, see NOTE 1	
Recommended repetition rate:	only once (type and routine test)		Proposed annually, but at least every 5 years	according to stability, but at least annually

NOTE 1 The above listed tests should also be applied to the single components if performance tests are made according to the alternative method (see 5.2.2). To obtain the uncertainty of measurement of the approved measuring system, those of the components should be combined as demonstrated in Annex B.

NOTE 2 A linearity test according to 5.3 is only required if the calibration cannot be performed by comparison over the full measurement range (5.2.1.2).

NOTE 3 Investigation of the proximity effect in the performance test is only necessary if the type test data are not sufficient.

### 8.3 Performance test on measuring systems

#### 8.3.1 Reference method (preferred)

The assigned scale factor and the dynamic behaviour of the measuring system shall be determined by comparison with a reference measuring system, using the procedure given in 5.2. It is recommended to apply a substitute test object between the two measuring systems.

The performance over the nominal epoch  $t_{\min}$  to  $t_{\max}$  shall be proven by using impulses with two different waveforms such that:

For full and tail-chopped impulses:

- $t_{\min}$  is equal to the shortest front time  $T_{1\min}$
- $t_{\max}$  is equal to the longest front time  $T_{1\max}$
- both these waveforms should approximately have the longest time to half-value  $T_{2\max}$  for which the measuring system is to be approved.

For front-chopped impulses:

- $t_{\min}$  is equal to the shortest time to chopping  $T_{c\min}$
- $t_{\max}$  is equal to the longest time to chopping  $T_{c\max}$

#### 8.3.2 Alternative method supplemented by a measurement of the step response according to Annex C

The assigned scale factor is determined by a comparative measurement against a reference measuring system according to 5.2 using full impulses with one front time  $T_{1\text{cal}}$  within the range  $T_{1\min}$  to  $T_{1\max}$  and a time to half-value approximately equal to the longest time to half-value  $T_{2\max}$  for which the measuring system is to be approved. Alternatively it can be determined from the scale factors of the components (5.2.2).

For measuring systems intended to measure front-chopped impulses, the calibration impulses should be of a time to chopping  $T_{c\text{cal}}$  within the range  $T_{c\min}$  to  $T_{c\max}$ .

In addition the step response of the measuring system shall be measured according to Annex C. The reference level within the reference level epoch(s) for which the system is to be approved shall not differ from the value of the step response at the time:

- $T_{1\text{cal}}$  by more than  $\pm 1$  % for full and tail-chopped impulses, and also
- $T_{c\text{cal}}$  by more than  $\pm 1$  % for front-chopped impulses.

The step response shall not deviate by more than 2 % from the reference level in the reference level epoch  $0,5T_{1\min}$  to  $2T_{1\max}$  (Annex C). The step response shall further not deviate by more than 5 % in the range  $2T_{1\max}$  to  $2T_{2\max}$  where  $T_{2\max}$  is the longest time to half-value for which the system is to be approved.

## 8.4 Dynamic behaviour test

### 8.4.1 Comparison with a reference measuring system (preferred)

The same records as taken in the test of 8.3.1 can be used and the relevant time parameters of the measured impulses evaluated for each system and the uncertainty of time parameters measured by the system under test shall be evaluated (5.11).

NOTE  $t_{\min}$  may be chosen from one impulse type and  $t_{\max}$  from another, for cases where approval is required for a group of impulse types. In such cases, the longest time to half-value of all the impulse types should be used.

### 8.4.2 Alternative method based on step response parameters (Annex C)

The system is subjected to a voltage step and the output is recorded. For the evaluation see Annex C.

NOTE Performance can be investigated using convolution techniques. The scale factor of the measuring system is established by any suitable method. The wave shape used to determine the scale factor should be within the range covered by the convolution method described in Annex D.

The dynamic behaviour is determined from the step response of the measuring system (recorded according to Annex C) and from convolution of the recorded step response with the nominal waveforms for which approval is sought. From the convolution, the errors introduced by the measuring system for different wave shapes can be estimated (Annex D). The change in scale factor over the reference level epoch shall be within  $\pm 1\%$ .

## 8.5 Performance check

### 8.5.1 Comparison with an approved measuring system

A comparison is made with another approved measuring system (or reference measuring system) using the procedure of 5.2. For the comparison of peak values a sphere gap according to IEC 60052 may be used.

When the difference between the two measured peak values is not greater than 3 %, the assigned scale factor is taken as still valid. If it is greater, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test.

The value of each time parameter shall be within  $\pm 10\%$  of the corresponding value measured by the other measuring system. When any difference is larger than 10 % then the nominal epoch shall be determined in a performance test.

### 8.5.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component shall be checked using internal or external calibrators having expanded uncertainties of no more than 1 %. If the scale factors differ from their previous values by not more than  $\pm 1\%$  the assigned scale factor is taken as still valid. If any difference exceeds  $\pm 1\%$  a new value of the assigned scale factor shall be determined.

### 8.5.3 Dynamic behaviour check by reference record

When wanted for use in performance checks, the step response of the measuring system shall be recorded using the method of Annex C. This shall be included in the record of performance for use as a reference record ("fingerprint") to permit detection of changes in the dynamic behaviour at subsequent performance checks.

## 9 Measurement of switching impulse voltage

### 9.1 Requirements for an approved measuring system

#### 9.1.1 General

The general requirements are:

- to measure the test voltage value according to IEC 60060-1 (peak value) of switching impulses with an expanded uncertainty  $U_{M1} \leq 3 \%$ .
- to measure the time parameters which define the waveform with an expanded uncertainty  $U_{M3} \leq 10 \%$ .

### 9.1.2 Uncertainty contribution

For a switching impulse voltage measuring system, the expanded uncertainty of measurement  $U_M$  shall be evaluated with a coverage probability of 95 %; according to 5.10.3, 5.11.3 and – if necessary - Annexes A and B. Tests for assessing contributions to uncertainty which are usually considered are summarized in Table 5. Other contributions can be important in some cases and shall be considered in addition.

### 9.1.3 Requirements for the measuring instrument

The measuring instrument shall comply with IEC 61083-1 and IEC 61083-2.

### 9.1.4 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of a measuring system is adequate when:

- the scale factor is constant within  $\pm 1 \%$  over the range of impulse waveforms specified in the record of performance,
- the expanded uncertainty of the measured time parameters is not greater than 10 % over the range of waveforms.

### 9.1.5 Connection to the test object

The approved measuring system shall be connected directly to the terminals of the test object. In contrast to measurements of lightning impulse voltage (see 8.1.5), the measuring system may be interposed between the voltage source and the test object. The coupling between the test and measuring circuits should be negligible.

## 9.2 Tests on an approved measuring system

The tests according to Clause 5, summarized in Table 5, are necessary for the qualification of a switching impulse voltage measuring system and its components as well as for the estimation of the expanded uncertainty. For exceptions see 4.4.2

The results of the type and routine tests can be taken from manufacturer's data. Routine tests shall be performed on each unit.

## 9.3 Performance test on measuring systems

### 9.3.1 Reference method (preferred)

The assigned scale factor and the dynamic behaviour of the measuring system shall be determined by comparison with a reference measuring system using the procedure in 5.2. The performance over the nominal epoch  $t_{\min}$  to  $t_{\max}$  is proven by using impulses with two different waveforms such that:

- $t_{\min}$  is equal to the shortest time-to-peak  $T_{p\min}$
- $t_{\max}$  is equal to the longest time-to-peak  $T_{p\max}$
- both these waveforms should approximately have the longest time to half-value  $T_{2\max}$  (or time above 90 % or time to zero) for which the measuring system is to be approved.

### 9.3.2 Alternative methods supplemented by a step response measurement

The assigned scale factor is determined by a comparative measurement waveform against a reference measuring system according to 5.2 using full impulses with one time to peak value  $T_{p\text{cal}}$  within the range  $T_{p\text{min}}$  to  $T_{p\text{max}}$  and a time to half-value (or time above 90 % or time to zero) approximately equal to the longest time to half-value (or time above 90 % or time to zero) for which the measuring system is to be approved. Alternatively it can be determined from the scale factors of the components (5.2.2).

In addition the step response of the measuring system shall be recorded according to Annex C. The reference level(s) of the reference level epoch(s) for which the measuring system is to be approved shall not differ from the value of the step response at  $T_{p\text{cal}}$  by more than  $\pm 1$  %.

The step response shall not change by more than 5 % in the range from  $T_{p\text{min}}$  to  $T_{2\text{max}}$  (or time above 90 % or time to zero) for which the measuring system is to be approved.

### 9.4 Dynamic behaviour test by comparison

The same records as taken in the test of 9.3.1 can be used and the relevant time parameters of the measured impulses evaluated for each system and the uncertainty of time parameters measured by the system under test shall be evaluated according to 5.4 (Table 5).

NOTE  $t_{\text{min}}$  may be chosen from one impulse type and  $t_{\text{max}}$  from another, for cases where approval is required for a group of impulse types. In such cases, the longest time to half-value of all the impulse types should be used.

### 9.5 Performance check

#### 9.5.1 Scale factor check by comparison with an approved measuring system

A comparison is made with another approved measuring system (or reference measuring system) using the procedure of 5.2. For the comparison of peak values a sphere gap according to IEC 60052 may be used.

When the difference between the two measured peak values is not larger than 3 %, the assigned scale factor is taken as still valid. If it is larger, then a new value of the assigned scale factor shall be determined in a performance test.

The value of each time parameter shall be within  $\pm 10$  % of the corresponding value measured by the other measuring system. When any difference is larger than 10 % then the nominal epoch shall be determined in a performance test.

#### 9.5.2 Check of the scale factors of the components

The scale factor(s) of each component shall be checked using internal or external calibrators having expanded uncertainties of no more than 1 %. If the scale factors differ from their previous values by not more than  $\pm 1$  % the assigned scale factor is taken as still valid. If any difference exceeds  $\pm 1$  % a new value of the assigned scale factor shall be determined.

#### 9.5.3 Dynamic behaviour check by reference record

When required for use in performance checks, the step response of the measuring system shall be recorded using the method of Annex C. This shall be included in the record of performance for use as a reference record ("fingerprint") to permit detection of changes in the dynamic behaviour at subsequent performance checks.

**Table 5 – Tests required for a switching impulse voltage measuring system**

Type of test	Type test	Routine test	Performance test	Performance check
Scale factor/time parameters at calibration			5.2 5.11/9.3	
Scale factor check				9.5
Linearity, see NOTE 2		5.3	5.3 (if applicable)	
Dynamic behaviour	5.4 9.4		5.4 9.4	9.5
Short-term stability		5.5		
Long-term stability	5.6		5.6 (if applicable)	
Ambient temperature effect	5.7			
Proximity effect, see NOTE 3	5.8 (if applicable)		5.8 (if applicable)	
Software effect (IEC 61083-2)	5.9 (if applicable)			
Interference test			5.12	5.12
Dry withstand test	5.13	5.13 (if required)		
Wet or polluted withstand test	5.13 (if required)			
Scale factor/time parameters of converting device	5.2.2	5.2.2		
Scale factor/time parameters of transmission system other than a cable	5.2.2	5.2.2		
Scale factor/time parameters of measuring instrument	5.2.2 IEC 61083	5.2.2 IEC 61083		
Responsibilities:	on components, by manufacturer		on the system, by user, see NOTE 1	
Recommended repetition rate:	only once (type and routine test)		Proposed annually, but at least every 5 years	according to stability, but at least annually
<p>NOTE 1 The above listed tests should also be applied to the single components if performance tests are made according to the alternative method (see 5.2.2). To obtain the measuring uncertainty of the approved measuring system, those of the components should be combined as demonstrated in Annex B.</p> <p>NOTE 2 A linearity test according to 5.3 is only required if the calibration cannot be performed by comparison over the full measurement range (5.2.1.2).</p> <p>NOTE 3 Investigation of the proximity effect in the performance test is only necessary if the type test data are not sufficient</p>				

## 10 Reference measuring systems

### 10.1 Requirements for reference measuring systems

#### 10.1.1 Direct voltage

The reference measuring system shall enable direct voltage measurement with an expanded uncertainty  $U_M \leq 1\%$  in its range of use. The uncertainty shall not be influenced by a ripple factor up to 3 %.

#### 10.1.2 Alternating voltage

The reference measuring system shall enable alternating voltage measurement with an expanded uncertainty  $U_M \leq 1\%$  in its range of use.

#### 10.1.3 Full and chopped lightning and switching impulse voltages

The reference measuring system shall enable full and tail-chopped impulse voltage measurement with an expanded uncertainty  $U_{M1} \leq 1\%$  for the peak values of full and tail-chopped impulses,  $U_{M2} \leq 3\%$  for the peak of front-chopped lightning impulses and  $U_{M3} \leq 5\%$  for the time parameters in its range of use.

NOTE Oscillations and/or overshoot should be recorded adequately (compare with 8.1.4).

### 10.2 Calibration of a reference measuring system

#### 10.2.1 General

The compliance of a reference measuring system with the relevant requirements given in 10.1 shall be shown by the test of 10.2.2. Alternatively the test of 10.2.3 may be used.

#### 10.2.2 Reference method: Comparative measurement

The satisfactory performance of a reference measuring system shall be shown by calibration by comparison measurements at the relevant test voltage against a low-uncertainty reference measuring system, which is itself traceable to the standards of a National Metrological Institute.

In case of impulse voltages, waveforms of two or more different front times covering the range of the nominal epoch shall be applied.

NOTE The requirements for a low-uncertainty reference measuring system should be expanded uncertainties  $U_M \leq 0,5\%$  for voltage measurement and – for impulse voltages only -  $U_{M3} \leq 3\%$  for time parameter measurement.

#### 10.2.3 Alternative method for impulse voltages: Measurement of scale factor and evaluation of step response parameters

The scale factor of a reference measuring system shall be established for one impulse voltage shape e.g. by means of a higher class reference measuring system at the relevant test voltage. Additionally step response parameters evaluated according to Annex C shall satisfy the recommendations of Table 6. Additionally the reference level(s) of the reference level epoch(s) for which the reference measuring system is to be approved shall not differ from the value of the step response at the time of the relevant parameter of the used impulse voltage by more than  $\pm 0,5\%$ .

### 10.3 Interval between successive calibrations of reference measuring systems

The interval between calibrations shall be determined according to national regulations. If there is no regulation it is recommended that the calibrations shall be repeated at least once

every five years, provided that regular performance checks demonstrate the stability of the reference measuring system.

#### 10.4 Use of reference measuring systems

It is recommended that reference measuring systems should be used only for comparative measurements in performance tests. However, reference measuring systems may be used for other measurements, including routine daily use, if it is shown that such use does not affect their performance (The performance checks specified in this standard are sufficient to verify this). In addition, the substitution of an equivalent measuring instrument, which satisfies the relevant IEC standard, shall be accepted.

**Table 6 – Recommended response parameters for impulse voltage reference measuring systems**

Voltage	Recommendations for		
	Full and tail-chopped lightning impulses	Front-chopped lightning impulses	Switching impulses
Experimental response time $T_N$	≤ 15 ns	≤ 10 ns	-
Settling time $t_s$	≤ 200 ns	≤ 150 ns	≤ 10 μs
Partial response time $T_\alpha$	≤ 30 ns	≤ 20 ns	-

## **Annex A** (informative)

### **Uncertainty of measurement**

#### **A.1 General**

Clause 5 describes a simplified procedure to evaluate the uncertainty of measurement under conditions usually applicable and fully sufficient in high-voltage measurement. In some cases it may, however, be necessary or desirable to evaluate uncertainties in a more complex manner. Annex A gives a survey on how to proceed in these cases, and Annex B describes three application examples.

Each measurement of a quantity is to some degree imperfect, and the result of a measurement is only an approximation (“estimate”) of the “true” value of the measurand. The uncertainty of measurement makes a clear statement on the quality of a measurement. It enables the user to compare and weight the measurement results, e.g. obtained from different laboratories, and it provides information as to whether or not a measurement result is within the limits specified by a standard. A Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM) originally published in 1993 by the International Organization for Standardization (ISO) now exists as ISO/IEC 98-3: 2008 is the internationally accepted standard for the estimation of measurement uncertainty.

ISO/IEC Guide 98-3 as a guide provides general rules for evaluating and expressing uncertainty in a broad spectrum of measurements at various levels of uncertainty. It is therefore necessary to extract from the ISO/IEC Guide 98-3 a set of specific rules that deals with the specific field of high-voltage measurement and its level of accuracy and complexity. Corresponding to the basic principles of the ISO/IEC Guide 98-3, uncertainties are grouped into two categories according to their methods of evaluation. Both methods are based on probability distributions of the quantities influencing the measurement and on standard uncertainties quantified by variances or standard deviations. This allows a uniform treatment of both categories of uncertainties and an evaluation of a combined standard uncertainty of the measurand. Within the scope of this standard, an expanded uncertainty corresponding to a coverage probability of approximately 95 % is required.

The basic principles of the ISO/IEC Guide 98-3 and examples of how to determine uncertainties in high voltage measurements are presented in the following clauses. The equations and examples given here are valid for uncorrelated input quantities, which is often the case in high-voltage measurements.

#### **A.2 Definitions in addition to Clause 3**

##### **A.2.1**

##### **measurable quantity**

attribute of a phenomenon, body or substance that may be distinguished qualitatively and determined quantitatively

##### **A.2.2**

##### **value of a quantity**

magnitude of a particular quantity generally expressed as unit of measurement multiplied by a number

##### **A.2.3**

##### **measurand**

specific quantity subjected to measurement

#### A.2.4

##### variance

expectation of the square of the deviation of a random variable in terms of its expectation

#### A.2.5

##### correlation

relationship between two or several random variables within a distribution of two or more random variables

#### A.2.6

##### coverage probability

fraction, usually large, of the distribution of values that as a result of a measurement could reasonably be attributed to the measurand

### A.3 Model function

Each measurement can be described by a functional relationship  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N) \quad (\text{A.1})$$

where  $Y$  is the measurand and  $X_i$  are the different input quantities numbered from 1 to  $N$ . In the meaning of the ISO/IEC GUIDE 98-3 the model function  $f$  comprises all measurement values, influencing quantities, corrections, correction factors, physical constants, and any other data that can contribute a significant amount to the value of  $Y$  and its uncertainty. It may exist as a single or manifold analytical or numerical expression, or a combination of both. In general the input quantities  $X_i$  are random variables and described by observations  $x_i$  ("input estimates") having specific probability distributions and being associated with standard uncertainties  $u(x_i)$  of Type A or Type B. The combination of both types of uncertainty according to the rules of the ISO/IEC GUIDE 98-3 yields the standard uncertainty  $u(y)$  of the output estimate  $y$ .

NOTE 1 The model function  $f$  in Equation (A.1) is also valid for the input and output estimates  $x_i$  and  $y$ , respectively.

NOTE 2 In a series of observations, the  $k^{\text{th}}$  observed value of the quantity  $X_i$  is denoted  $x_{ik}$ .

### A.4 Type A evaluation of standard uncertainty

The evaluation method of Type A is applied to quantities that vary randomly and for which  $n$  independent observations have been obtained under the same conditions of measurement. In general, a normal (Gaussian) probability distribution of the  $n$  observations  $x_{ik}$  can be assumed (Figure A.1).

NOTE 1  $X_i$  might be a scale factor, a test voltage value or a time parameter with the observations  $x_{ik}$ .

The arithmetic mean value  $\bar{x}_i$  of the observations  $x_{ik}$  is defined by

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik}, \quad (\text{A.2})$$

which is considered to be the best estimate of  $X_i$ . Its Type A standard uncertainty is equal to the experimental standard deviation of the mean:

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

where  $s(x)$  is the experimental standard deviation (of the individual values):

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \quad (\text{A.4})$$

The quadratic values of  $s^2(x_i)$  and  $s^2(\bar{x}_i)$  are called sample variances and variances of the mean, respectively. The number of observations should be  $n \geq 10$ , otherwise the reliability of a Type A evaluation of standard uncertainty has to be checked by means of the effective degrees of freedom (see Clause A.8).

NOTE 2 In some cases a pooled estimate of variance  $s_p^2$  may be available from a large number of previous observations under well-defined conditions. Then the standard uncertainty of a comparable measurement with a small number  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) is better estimated by  $u(\bar{x}_i) = s_p / \sqrt{n}$  than by Equation (A.3).

## A.5 Type B evaluation of standard uncertainty

The evaluation method of Type B applies to all cases other than the statistical analysis of a series of observations. The standard uncertainty of Type B is evaluated by scientific judgment based on all available information on the possible variability of an input quantity  $X_i$  with observations  $x_i$ , such as:

- method of evaluating quantities,
- uncertainty of calibration of the measuring system and its components,
- non-linearity of dividers and measuring instruments,
- dynamic behavior, e. g. scale factor variation with frequency or impulse shape,
- short-term stability, self-heating,
- long-term stability, drift,
- ambient conditions during measurement,
- proximity effect of nearby objects,
- effects caused by software used in instruments or in evaluation of results,
- limited resolution of digital instruments, reading of analogue instruments,

Information on input quantities and uncertainties can be obtained from actual and previous measurements, calibration certificates, data in handbooks and standards, manufacturer's specifications or knowledge of the characteristics of relevant materials or instruments. The following cases of a Type B evaluation of uncertainties can be identified:

- a) Often only a single input value  $x_i$  and its standard uncertainty  $u(x_i)$  is known, e.g. a single measured value, a correction value or a reference value from literature. This value and its uncertainty will be adopted in the model function Equation (A.1). In case  $u(x_i)$  is unknown, it shall be calculated from other relevant uncertainty data or be estimated on the basis of experience.
- b) The uncertainty of a device is quoted as a standard uncertainty multiplied by the coverage factor  $k$ , e.g. the expanded standard uncertainty  $U$  of a digital voltmeter in a calibration certificate (Clause A.7). When the voltmeter is used in a complex measuring system it contributes to uncertainty by:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (\text{A.5})$$

where  $k$  is the coverage factor. Instead of expressing the expanded uncertainty and coverage factor, one may find a statement on the confidence level, e.g. 68,3 %, 95,45 % or 99,7 %. In general, a normal distribution according to Figure A.1 can be assumed and the statement on the confidence level is equivalent to the coverage factor  $k = 1, 2$  or  $3$ , respectively.

- c) The value  $x_i$  of an input quantity  $X_i$  is estimated to lie within the interval  $a_-$  to  $a_+$  with a certain probability distribution  $p(x_i)$ . Often there is no specific knowledge of  $p(x_i)$  and a rectangular distribution of the probable values is then assumed (Figure A.2). Then the expected value of  $X_i$  is the midpoint  $\bar{x}_i$  of the interval:

$$\bar{x}_i = \frac{(a_- + a_+)}{2} \quad (\text{A.6})$$

and the associated standard uncertainty:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.7})$$

where  $a = (a_+ - a_-)/2$ .

In some cases other probability distributions may be more appropriate, such as trapezoidal, triangular or normal distributions.

NOTE 1 The standard uncertainty is  $u(x_i) = a/\sqrt{6}$  for the triangular distribution and  $u(x_i) = \sigma$  for the normal distribution. This means that the rectangular distribution yields a larger standard uncertainty than the other distributions.

The ISO/IEC Guide 98-3 states that a Type B uncertainty should not be double-counted if the particular effect has already contributed to a Type A uncertainty. Furthermore, the evaluation of uncertainty should be realistic and based on standard uncertainties, avoiding the use of personal or any other factors of safety to obtain larger uncertainties than those evaluated according to the ISO/IEC GUIDE 98-3. Often an input quantity  $X_i$  has to be adjusted or corrected to eliminate systematic effects of significant magnitude, e.g. on the basis of a temperature or voltage dependence. However, the uncertainty  $u(x_i)$  associated with this correction shall still be taken into account.

NOTE 2 Double-counting of uncertainty contributions may occur when a digital recorder is used for repetitive impulse measurements, e.g. when calibrating the scale factor. The dispersion of the  $n$  measurement values producing a Type A standard uncertainty may be partially caused by a limited resolution of the recorder and its internal noise. The resolution does not need to be considered again, in full, but rather only in a small portion as a residual Type B uncertainty. However, if the digital recorder is then used during an impulse voltage test to obtain a single measurement value, the limited resolution needs to be considered in a Type B uncertainty.

NOTE 3 The evaluation of Type B uncertainties requires extensive knowledge and experience of the relevant physical relationships, influence quantities and measurement techniques. As the evaluation itself is not an exact science leading to one single solution, it is not uncommon that experienced test engineers may judge the measurement process in a different manner and obtain different Type B uncertainty values.

## A.6 Combined standard uncertainty

Each standard uncertainty  $u(x_i)$  of the estimate  $x_i$  each input quantity  $X_i$  evaluated by method Type A or Type B contributes to the standard uncertainty of the output quantity by:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (\text{A.8})$$

where  $c_i$  is the sensitivity coefficient. It describes how the output estimate  $y$  is influenced by small variations of the input estimate  $x_i$ . It can be evaluated directly as the partial derivative of the model function  $f$ :

$$c_i = \left. \frac{\partial f}{\partial X_i} \right|_{X_i=x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad (\text{A.9})$$

or by using equivalent numerical and experimental methods. The sign of  $c_i$  may be positive or negative. In cases where input quantities are uncorrelated, the sign need not be considered further since only the quadratic value of standard uncertainties is used in the next steps.

The  $N$  standard uncertainties  $u_i(y)$  defined by Equation (A.8) contribute to a combined standard uncertainty  $u_c(y)$  of the output quantity according to the “law of propagation of uncertainty”:

$$u_c^2(y) = u_1^2(y) + u_2^2(y) + \dots + u_N^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (\text{A.10})$$

from which  $u_c(y)$  is evaluated as the positive square root:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (\text{A.11})$$

If the output quantity  $Y$  is a product or quotient of the input quantities  $X_i$  a similar relationship as shown in Equations (A.10) and (A.11) can be obtained for the relative uncertainties  $u_c(y)/|y|$  and  $u(x_i)/|x_i|$ . The law of propagation of uncertainty thus applies to both types of the model function for uncorrelated input quantities.

NOTE In a case where correlation exists, linear terms will be present in the law of propagation of uncertainty, and the sign of the sensitivity coefficients becomes relevant. Correlation occurs when, for example, the same instrument is used for measuring two or more input quantities. To avoid complicated calculation, the correlation can be removed by adding additional input quantities in the model function  $f$  with appropriate corrections and uncertainties. In some cases, the presence of correlated input quantities may even reduce the combined uncertainty. Taking correlation into account is thus mainly essential for sophisticated uncertainty analysis to achieve a very accurate estimation of uncertainty. Correlation will not be discussed further in this standard.

## A.7 Expanded uncertainty

In the field of high-voltage and high-current measurements, as in most other industrial applications, a statement of uncertainty corresponding to a coverage probability of approximately  $p = 95\%$  is required. This is achieved by multiplying the combined standard uncertainty  $u_c(y)$  in (A.11) by a coverage factor  $k$ :

$$U = k u_c(y), \quad (\text{A.12})$$

where  $U$  is the expanded uncertainty. The coverage factor  $k = 2$  is used in cases where a normal distribution can be attributed to  $y$  and  $u_c(y)$  has sufficient reliability, i.e. the effective degrees of freedom of  $u_c(y)$  is sufficiently large (see Clause A.8). Otherwise a value  $k > 2$  has to be determined to obtain  $p = 95\%$ .

NOTE 1 In some older standards the term “overall uncertainty” is used. In the majority of cases this term is interpreted as an expanded uncertainty  $U$  with the coverage factor being equal to 2.

NOTE 2 Since uncertainties are defined as positive numbers, the sign of  $U$  is always positive. Of course, in cases where  $U$  is used in the meaning of an uncertainty interval, it is quoted  $k$  as  $\pm U$ .

## A.8 Effective degrees of freedom

The assumption of a normal distribution of the expanded uncertainty is, in general, fulfilled in cases where several (i.e.  $N \geq 3$ ) uncertainty components of comparable value and well-

defined probability distribution (Gaussian, rectangular, etc.) contribute to the combined standard uncertainty and where the Type A uncertainty is based on  $n \geq 10$  repeated observations. These conditions are fulfilled in many calibrations of voltage measuring systems. When the assumption of a normal distribution is not justified, a value of  $k > 2$  shall be evaluated to obtain a coverage probability of approximately 95 %. The appropriate coverage factor can be evaluated on the basis of the effective degrees of freedom  $\nu_{\text{eff}}$  of the standard uncertainty  $u_c(y)$ :

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}, \tag{A.13}$$

where  $u_i(y)$  is given by Equation (A.8) for  $i = 1, 2, \dots, N$  and  $\nu_i$  is the corresponding degrees of freedom. Reliable values of  $\nu_i$  are as follows:

- $\nu_i = n - 1$  for a Type A uncertainty based on  $n$  independent observations,
- $\nu_i \geq 10$  for a Type B uncertainty taken from a calibration certificate, and when the coverage probability is stated to be not less than 95 %,
- $\nu_i = \infty$  for a Type B uncertainty assuming a rectangular distribution within  $a_-$  and  $a_+$ .

The effective degrees of freedom can then be calculated by Equation (A.13) and the coverage factor be taken from Table A.1 which is based on a  $t$ -distribution evaluated for a coverage probability of  $p = 95,45$  %. If  $\nu_{\text{eff}}$  is not an integer interpolate or truncate  $\nu_{\text{eff}}$  to the next lower integer.

**Table A.1 – Coverage factor  $k$  for effective degrees of freedom  $\nu_{\text{eff}}$  ( $p = 95,45$  %)**

$\nu_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

The following formula can also be used to calculate  $k$  from  $\nu_{\text{eff}}$ :

$$k = 1,96 + \frac{2,374}{\nu_{\text{eff}}} + \frac{2,818}{\nu_{\text{eff}}^2} + \frac{2,547}{\nu_{\text{eff}}^3} \tag{A.14}$$

### A.9 Uncertainty budget

The uncertainty budget of a measurement is a detailed analysis of all sources and values of uncertainty according to the model function  $f$ . The relevant data should be kept for inspection in the form of a table equal or comparable to Table A.2. The last line indicates the values of the measurement result  $y$ , the combined uncertainty  $u_c(y)$  and the effective degrees of freedom  $\nu_{\text{eff}}$ .

**Table A.2 – Schematic of an uncertainty budget**

Quantity $X_i$	Value $x_i$	Standard uncertainty contribution $u(x_i)$	Degrees of freedom $\nu_i / \nu_{\text{eff}}$	Sensitivity coefficient $c_i$	Contribution to combined standard uncertainty $u_i(y)$
$X_1$	$x_1$	$u(x_1)$	$\nu_1$	$c_1$	$u_1(y)$
$X_2$	$x_2$	$u(x_2)$	$\nu_2$	$c_2$	$u_2(y)$
:	:	:	:	:	:
$X_N$	$x_N$	$u(x_N)$	$\nu_N$	$c_N$	$u_N(y)$
$Y$	$y$		$\nu_{\text{eff}}$		$u_c(y)$

NOTE Validated software is commercially available or may be developed by the user from general software that enables automated calculation of the quantities in Table A.2 from the model equation  $f$ .

### A.10 Statement of the measurement result

In calibration and test certificates the measurand  $Y$  shall be expressed as  $y \pm U$  for a coverage probability (or: level of confidence) of approximately  $p = 95\%$ . The numerical value of the expanded uncertainty  $U$  shall be rounded to give not more than two significant figures. If rounding down reduces the value by more than  $0,05 U$ , the rounded-up value shall be used. The numerical value of  $y$  shall be rounded to the least significant figure that could be affected by the expanded uncertainty.

NOTE 1 As an example, the result of a voltage measurement is stated in one of the following ways:

$$(227,2 \pm 2,4) \text{ kV,}$$

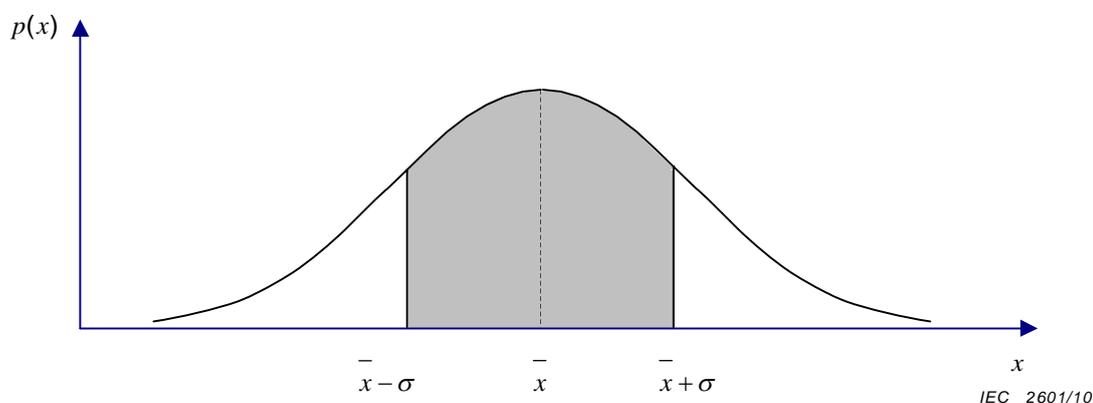
$$227,2 \times (1 \pm 0,011) \text{ kV, or}$$

$$227,2 \times (1 \pm 1,1 \cdot 10^{-2}) \text{ kV.}$$

An explanatory note should be added informing of the coverage probability  $p$  and the coverage factor  $k$ .

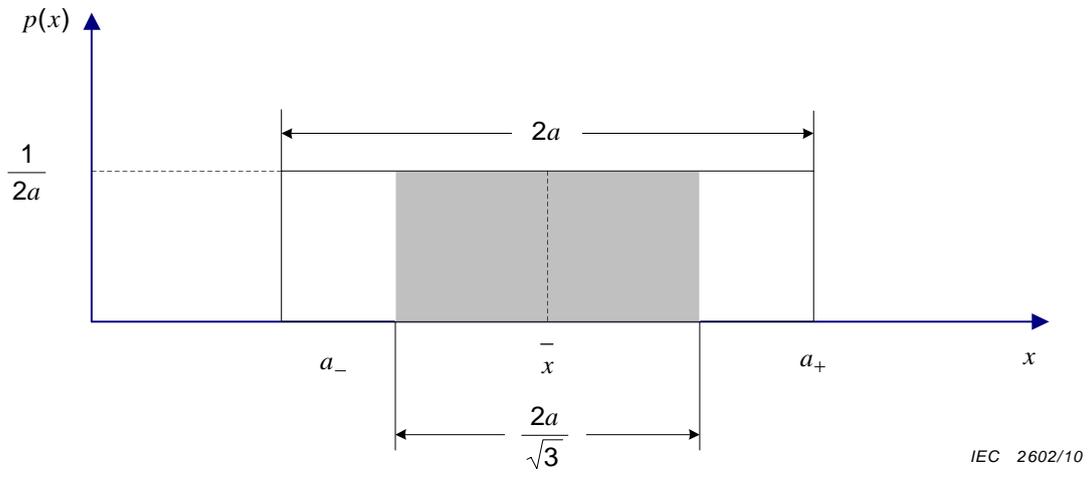
NOTE 2 As an example, the following complete wording is recommended (the terms in brackets apply to the cases where  $\nu_{\text{eff}} < 50$ , i.e.  $k > 2,05$  according to Table A.1):

“The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k = 2$  ( $k = XX$ ), which for a normal distribution (t-distribution with  $\nu_{\text{eff}} = YY$  effective degrees of freedom) corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with IEC 60060-2.”



NOTE Shaded area indicates the standard uncertainty above and below  $\bar{x}_i$ .

**Figure A.1 – Normal probability distribution  $p(x)$**



NOTE Shaded area indicates the standard uncertainty above and below  $\bar{x}_{ij}$ .

**Figure A.2 – Rectangular probability distribution  $p(x)$**

## Annex B (informative)

### Examples for the calculation of measuring uncertainties in high-voltage measurements

#### B.1 Example 1: Scale factor of an AC measuring system (comparison method)

An AC measuring system of rated voltage 500 kV, denoted by X, is calibrated by an accredited calibration laboratory in the test laboratory of the customer. The calibration is performed up to  $V_{X\max} = 500$  kV by comparison with a reference measuring system, denoted by N (Figure B.1). Both systems consist of a divider and a digital voltmeter, indicating the voltage values  $V_N$  and  $V_X$ , respectively, at the divider outputs. The scale factor and the relative expanded uncertainty of the reference system N at 20 °C is  $F_N = 1,025$  and  $U_N = 0,8$  % ( $k=2$ ), including an uncertainty contribution estimated for the long-term instability.

During the calibration, ambient temperature is  $(15 \pm 2)$  °C. Since the scale factor of N was calibrated at 20 °C, it is corrected by -0,3 % according to its temperature coefficient, yielding the actual value  $F_N = 1,022$  at 15 °C. This correction, however, is not very accurate and, furthermore, due to the temperature variation within  $\pm 2$  °C during the calibration, the probable values of  $F_N$  are assumed to lie within an interval of  $\pm 0,001$  around  $F_N$  with rectangular distribution. The comparison measurements are performed at  $h = 5$  voltage levels of about 20 %, 40 %, ... 100 % of  $V_{X\max}$ . At each voltage level, simultaneous readings of the voltages  $V_N$  and  $V_X$  are taken for  $n = 10$  voltage applications. Further investigations on the dynamic behaviour, short-term stability, temperature interval, and interference show an influence on the scale factor of the test object,  $F_X$ , within  $\pm 0,2$  % each. Its long-term stability is estimated on the basis of the manufacturer's data to lie within  $\pm 0,3$  % until the next calibration.

The model equation for calculating the value of  $F_X$  and its combined standard uncertainty can be developed as follows. In the ideal case, both measuring systems indicate the same value of the AC test voltage  $V$  (Figure B.1):

$$V = F_N V_N = F_X V_X \quad (\text{B.1})$$

This leads to the basis equation for calculating the scale factor of the system under test:

$$F_X = \frac{V_N}{V_X} F_N \quad (\text{B.2})$$

As described above, the scale factors of both systems are subject to several influence quantities such as drift, temperature, etc. They contribute to the scale factor values and their uncertainties as well. These contributions are denoted here by  $\Delta F_{N,1}$ ,  $\Delta F_{N,2}$ , ... for the reference system, and by  $\Delta F_{X,1}$ ,  $\Delta F_{X,2}$ , ... for the system under test. In general, each contribution to the scale factor  $F_N$  or  $F_X$  consists of an error and a standard uncertainty. The error is taken to correct the scale factor, the correction being of opposite sign. The uncertainty contribution is related to the relevant scale factor  $F_N$  or  $F_X$  and evaluated in a similar way as described in Clause A.5, i.e., either by assuming a rectangular probability distribution within an interval  $\pm a_i$ , leading to a standard uncertainty  $u_i = a_i/\sqrt{3}$ , or, in the case of a calibrated component, by dividing its expanded uncertainty  $U$  by the coverage factor  $k$ . The contribution  $\Delta F_{N,m}$  or  $\Delta F_{X,i}$  need not always have an error (or the error is assumed to be negligibly small), and then it consists only of the uncertainty contribution  $u_i$ .

The basis equation (B.2) is supplemented by the contributions  $\Delta F_{N,m}$  and  $\Delta F_{X,i}$  to obtain the complete model function for determining the scale factor  $F_X$  and its combined standard uncertainty. Since correlation between the influence quantities is neglected, Equation (B.2) can then be written in the general version:

$$F_X - \sum_i \Delta F_{X,i} = \frac{V_N}{V_X} \left( F_N - \sum_m \Delta F_{N,m} \right). \tag{B.3}$$

NOTE 1 As per definition, the errors inserted on both sides of the equation have a negative sign. They are defined as  $\Delta F = (\text{indicated value}) - (\text{correct value})$ .

For the relevant case, the scale factor  $F_X$  of the AC measuring system can be expressed by:

$$F_X = \frac{V_N}{V_X} (F_N - \Delta F_N) + \sum_{i=1}^5 \Delta F_{X,i}, \tag{B.4}$$

where:

- $\Delta F_N$  is the contribution caused by the lower temperature of the reference system,
- $\Delta F_{X,1}$  is the contribution caused by the nonlinearity of the quotient,
- $\Delta F_{X,2}$  is the contribution caused by the short-term instability of the system under test,
- $\Delta F_{X,3}$  is the contribution caused by the long-term instability of the system under test,
- $\Delta F_{X,4}$  is the contribution caused by the dynamic behaviour of the system under test,
- $\Delta F_{X,5}$  is the contribution caused by the temperature variation of the system under test.

NOTE 2 In this example,  $\Delta F_N$  consists both of a correction and an uncertainty contribution to the scale factor  $F_N$ , whereas the terms  $\Delta F_{X,1}$  to  $\Delta F_{X,5}$  contribute only to the uncertainty of the scale factor  $F_X$ . For convenience, the uncertainty contributions  $\Delta F_{X,1}$  to  $\Delta F_{X,5}$  are directly related to  $F_X$ , i.e. the sensitivity coefficients of these input quantities have already been taken into consideration.

The comparison measurement at a single voltage level between the measuring system X and the reference system N yields  $n = 10$  pairs of measured values  $V_N$  and  $V_X$ , from which the quotients  $V_N/V_X$ , their mean and the experimental standard deviation  $s(V_N/V_X)$  are calculated. An example for the values measured at a voltage level of about 40 %  $V_{Xmax}$  is given in Table B.1. In the same manner, the quotients  $V_N/V_X$  and standard deviations  $s(V_N/V_X)$  are obtained for a total of  $h = 5$  voltage levels up to 500 kV (Table B.2).

**Table B.1 – Result of the comparison measurement at a single voltage level**

Number of measurement	Reference System	System under test	Quotient $V_N/V_X$
	$V_N$ kV	$V_X$ V	
1	191,4	190,8	1003,1
2	191,6	190,9	1003,7
3	190,7	189,9	1004,2
4	189,9	189,0	1004,8
5	190,9	189,9	1005,3
6	191,2	190,3	1004,7
7	191,3	190,4	1004,7
8	191,2	190,4	1004,2
9	190,6	189,9	1003,7
10	191,3	190,7	1003,1
<b>Mean of <math>V_N/V_X</math> at about 40 % <math>V_{Xmax}</math></b>			<b>1004,2</b>
<b>Experimental standard deviation <math>s(V_N/V_X)</math>:</b>			<b>0,73</b>

**Table B.2 – Summary of results for  $h = 5$  voltage levels ( $V_{Xmax} = 500$  kV)**

<i>g</i> No.	Voltage level % of $V_{Xmax}$	$V_N/V_X$	$s(V_N/V_X)$
1	18	1003,2	0,71
2	38	1004,2	0,73
3	63	1004,5	0,81
4	83	1006,5	0,68
5	100	1010,1	<b>0,85</b> (= $s_{max}$ )
<b>Mean</b>		<b>1005,7</b>	

The mean of the five quotients  $V_N/V_X$  in Table B.2 is 1005,7. To be on the safe side of the uncertainty estimation, the Type A standard uncertainty of  $V_N/V_X$  is evaluated from the maximum standard deviation  $s_{max} = 0,85$  according to Equation (A.3):

$$u_A = \frac{s_{max}}{\sqrt{n}} = \frac{0,85}{\sqrt{10}} = 0,27$$

The deviation of the quotients  $V_N/V_X$  from their mean characterises the nonlinearity of system X. The maximum deviation is  $a_1 = 4,4$  at 100 % of  $V_{Xmax}$  (Table B.2). The Type B standard uncertainty of  $V_N/V_X$ , originating from nonlinearity, is thus  $a_1/\sqrt{3} = 2,54$  according to Equation (A.7). This value is multiplied by the relevant sensitivity coefficient  $c_1 = \partial F_X/\partial(V_N/V_X) = F_N - \Delta F_N = 1,022$  to obtain the Type B uncertainty contribution:

$$u_{B1} = \frac{a_1}{\sqrt{3}} (F_N - \Delta F_N) = \frac{4,4}{\sqrt{3}} 1,022 = 2,6$$

The values and standard uncertainties of all input quantities are entered on the right side of the model equation (B.4). The model equation can be evaluated manually, using the equations given in Annex A, or with the aid of special software which should be validated for calculating uncertainties. The result of the evaluation is summarized in Table B.3. In the last line, the assigned scale factor  $F_X$ , its combined standard uncertainty, and the effective degrees of freedom are given. The large value  $\nu_{eff} = 180$  indicates normal distribution of the probable values of  $F_X$ , and thus  $k = 2$  is valid (see Annex A, Table A.1).

NOTE 3 The estimate of uncertainty is not very precise and high numerical precision is not required.

Finally, the complete result of the calibration of the approved measuring system is expressed by the assigned scale factor and its expanded uncertainty:

$$F_X = 1028 \pm 11 = 1028(1 \pm 0,011) \text{ for a coverage probability of not less than 95 \% } (k = 2).$$

The relative expanded uncertainty of the assigned scale factor is  $U = 1,1$  %. Since it contains an uncertainty contribution of the long-term stability, it can be applied as the expanded uncertainty of the test voltage until the next calibration of the approved measuring system, provided the stability of the scale factor is checked by intermediate performance checks (see 4.3).

NOTE 4 The simplified method of Clause 5 delivers an identical relative expanded uncertainty of the assigned scale factor.

**Table B.3 – Uncertainty budget of the assigned scale factor  $F_X$**

Quantity	Value	Standard uncertainty contribution	Degrees of freedom	Sensitivity coefficient	Contribution to combined standard uncertainty
$F_N$	1,025	0,004 <sup>1)</sup>	50	1005,7	4,0
$\Delta F_N$	0,003	0,000577 <sup>2)</sup>	$\infty$	-1005,7	-0,58
$V_N/V_X$	1005,7	0,27 <sup>1)</sup>	9	1,022	0,28
$\Delta F_{X,1}$	0	2,60 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	2,6
$\Delta F_{X,2}$	0	1,19 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,2
$\Delta F_{X,3}$	0	1,78 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,8
$\Delta F_{X,4}$	0	1,19 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,2
$\Delta F_{X,5}$	0	1,19 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,2
<b><math>F_X</math></b>	<b>1027,8</b>		<b>180</b>		<b>5,54</b>
<sup>1)</sup> Normal distribution. <sup>2)</sup> Rectangular distribution.					

## B.2 Example 2: Scale factor of an impulse voltage measuring system (component method)

The system for measuring lightning impulse voltages consists of an impulse divider of rated voltage 1,2 MV, a 10 bit digital recorder, and a 20 m coaxial cable. The scale factors of the impulse divider (index “div”) and the digital recorder (index “rec”) and their expanded uncertainties are stated by the manufacturers as:

$$F_{\text{div}} = 2015 \quad (U_{\text{div}} = 1,2 \%, p \geq 95 \%, k = 2), \text{ and}$$

$$F_{\text{rec}} = 1,050 \quad (U_{\text{rec}} = 0,8 \%, p \geq 95 \%, k = 2).$$

The uncertainty of the divider comprises the contributions of the linearity test up to 1,2 MV, the dynamic behaviour and short-term stability. Additional information on the proximity effect and long-term stability is given by the manufacturer. The calibration of the digital recorder was made in all ranges between 60 % and 100 % of full scale deflection by applying smooth calibration impulses according to IEC 61083-1. The recorder’s step response is rather flat, and it can be concluded that the scale factor does not depend on the time parameters within the tolerances specified for lightning impulse voltages.

In order to obtain the uncertainty of the complete measuring system, the user has to consider additional uncertainty contributions, either taken from the records of performance of the divider and recorder, or determined by additional tests. The following influencing quantities are assumed to have a rectangular distribution, the half-width being  $a_i$ , from which the uncertainty contributions are calculated as  $a_i/\sqrt{3}$ . The yearly long-term instability is specified by the manufacturer to be within  $\pm 0,3 \%$  for the divider and  $\pm 0,2 \%$  for the recorder. The short-term instability of the recorder is within  $\pm 0,3 \%$ . The proximity effect need not be investigated as the divider is located outside the minimum clearance specified by the manufacturer. As the lightning impulses, generated in the user’s test hall, are superimposed by oscillations of about 2 %, a residual deviation within  $\pm 0,3 \%$  is attributed to the software of the recorder, used to calculate the peak value of the base curve according to the frequency dependent  $k$  factor (see IEC 60060-1, Clause 8).

The basis model equation to determine the assigned scale factor  $F$  of the complete measuring system is:

$$F = F_{\text{div}} \cdot F_{\text{rec}} \quad (\text{B.5})$$

The model equation is supplemented - similar to Example B.1 - by additional terms  $\Delta F_{\text{div},i}$  and  $\Delta F_{\text{rec},i}$  caused by the influence quantities mentioned above. These terms generally consist of an error and a standard uncertainty  $a_i/\sqrt{3}$  calculated from the half-width  $a_i$  of the probable values under the assumption of a rectangular probability distribution. The complete model function for the scale factor  $F_m$  of the complete measuring system reads:

$$F = (F_{\text{div}} - \Delta F_{\text{div}}) \cdot \left( F_{\text{rec}} - \sum_{i=1}^3 \Delta F_{\text{rec},i} \right) \quad (\text{B.6})$$

where:

$\Delta F_{\text{div}}$  is the contribution caused by the long-term instability of the divider;

$\Delta F_{\text{rec},1}$  is the contribution caused by the long-term instability of the recorder;

$\Delta F_{\text{rec},2}$  is the contribution caused by the short-term instability of the recorder;

$\Delta F_{\text{rec},3}$  is the contribution caused by the recorder's software (implementation of  $k$  factor).

NOTE 1 By definition, the errors  $\Delta F_{\text{div}}$  and  $\Delta F_{\text{rec},i}$  have a negative sign. They are defined as  $\Delta F = (\text{indicated value}) - (\text{correct value})$ .

NOTE 2 In this example,  $\Delta F_{\text{div}}$  and the terms  $\Delta F_{\text{rec},1}$  to  $\Delta F_{\text{rec},3}$  contribute only to the uncertainty of scale factor  $F$ .

The values and standard uncertainties of all input quantities are entered on the right side of the model equation (B.6). The model equation can be evaluated manually, using the equations given in Annex A, or with the aid of special software which should be validated for calculating uncertainties. The result of the evaluation is summarised in Table B.4. In the last line, the assigned scale factor  $F$  of the complete measuring system, its combined standard uncertainty and the effective degrees of freedom are given.

NOTE 3 The estimate of uncertainty is not very precise and high numerical precision is not required.

**Table B.4 – Uncertainty budget of the assigned scale factor  $F$**

Quantity	Value	Standard uncertainty contribution	Degrees of freedom	Sensitivity coefficient	Contribution to combined standard uncertainty
$F_{\text{div}}$	2015	12,1 <sup>1)</sup>	50	1,05	13
$\Delta F_{\text{div}}$	0	3,49 <sup>2)</sup>	$\infty$	-1,05	-3,7
$F_{\text{rec}}$	1,050	0,0042 <sup>1)</sup>	50	2015	8,5
$\Delta F_{\text{rec},1}$	0	0,00121 <sup>2)</sup>	$\infty$	-2015	-2,4
$\Delta F_{\text{rec},2}$	0	0,00182 <sup>2)</sup>	$\infty$	-2015	-3,7
$\Delta F_{\text{rec},3}$	0	0,00182 <sup>2)</sup>	$\infty$	-2015	-3,7
<b><math>F</math></b>	<b>2115,8</b>		<b>130</b>		<b>16,7</b>
<sup>1)</sup> Normal distribution. <sup>2)</sup> Rectangular distribution					

The complete result for the assigned scale factor of the impulse measuring system is expressed by:

$$F = 2116 \pm 33 = 2116(1 \pm 0,016) \text{ for a coverage probability of not less than 95 \% } (k = 2).$$

The relative expanded uncertainty of the assigned scale factor is  $U = 1,6 \%$ . Since it contains uncertainty contributions of the long-term stability for one year, it can be applied as the expanded uncertainty of the test voltage until the next calibration of the divider and recorder within 1 year.

### B.3 Example 3: Front time of lightning impulse voltages

The front time of a 2 MV impulse voltage measuring system X, consisting of a divider and a digital recorder (10 bit, 100 MS/s), is calibrated by comparison with a reference measuring system N at lightning impulses of about 500 kV (Figure B.1). The systematic mean error of N for measuring front times is  $\Delta T_{1N} = 0,01 \mu\text{s}$  in the nominal epoch, the expanded uncertainty being  $U_N = 0,02 \mu\text{s}$  ( $k = 2$ ).

By the comparison,  $n = 10$  lightning impulse voltages, having a specified front time, are recorded simultaneously with both systems. The actual front time of the  $i^{\text{th}}$  impulse voltage, recorded with system N, is determined by:

$$T_{1N,i} = (t_{90} - t_{30})/0,6, \quad (\text{B.7})$$

where  $t_{30}$  and  $t_{90}$  denote the times at 30 % and 90 %, respectively, of the peak value evaluated with system N. The front time  $T_{1X,i}$  of the same impulse voltage, recorded with system X, is calculated in the same manner.

From the  $n = 10$  differences of the front times, measured with X and N each, the mean front time deviation,  $\Delta T_1$ , is evaluated by:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i}) \quad (\text{B.8})$$

The comparison is performed for three different front times: the maximum, minimum and medial values of the nominal epoch, i.e. for  $T_1 \approx 0,8 \mu\text{s}$ ,  $\approx 1,2 \mu\text{s}$  and  $\approx 1,6 \mu\text{s}$ . For each of the three  $T_1$  values, the mean deviation  $\Delta T_{1,j}$  is calculated. The overall mean of the three  $\Delta T_{1,j}$  values is:

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \Delta T_{1,j} \quad (\text{B.9})$$

In other words,  $\Delta T_{1m}$  denotes the mean front time error of system X, related to the reference system N, in the range  $T_1 = 0,8 \mu\text{s} \dots 1,6 \mu\text{s}$ .

The model function for the error of system X, corrected by the error  $\Delta T_{1N}$  of the reference system N, is:

$$\Delta T_{\text{cal}} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1N} \quad (\text{B.10})$$

The individual values, errors and deviations, obtained by the calibration, are listed in Table B.5 and additionally shown in Figure B.2.

**Table B.5 – Calibration result for front time  $T_1$  and deviations**

		Value		
$T_{1N,j}$	$\mu\text{s}$	0,80	1,20	1,60
$T_{1X,j}$	$\mu\text{s}$	0,73	1,17	1,61
$s_j(T_{1X,j})$	$\mu\text{s}$	0,015	0,01	0,01
$\Delta T_{1,j}$	$\mu\text{s}$	-0,07	-0,03	0,01
$\Delta T_{1m}$	$\mu\text{s}$	<b>-0,03</b>		

From the maximum standard deviation of the three  $T_{1X,j}$  values, the Type A standard uncertainty is calculated by:

$$u_A(T_{1X}) = \frac{1}{\sqrt{10}} \max_{j=1}^3 s_j = \frac{0,015 \mu\text{s}}{\sqrt{10}} = 0,00474 \mu\text{s} \quad (\text{B.11})$$

Since  $T_{1X}$  is not mentioned directly in the model function,  $u_A(T_{1X})$  is entered as a separate quantity in the uncertainty budget (Table B.6).

The maximum deviation of the three individual  $T_{1X,j}$  values from their mean  $\Delta T_{1m}$  gives the Type B standard uncertainty:

$$u_B(T_{1m}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^3 |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}| = \frac{0,04 \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 0,0231 \mu\text{s} \quad (\text{B.12})$$

The values and standard uncertainties of all input quantities are entered on the right side of the model equation (B.8 with B.7). The model equation can be evaluated manually, using the equations given in Annex A, or with the aid of special software which should be validated for calculating uncertainties. The result of the evaluation is summarised in Table B.6. In the last line, the mean error  $\Delta T_{1cal}$ , its combined standard uncertainty and the effective degrees of freedom are given. The large value  $\nu_{\text{eff}} = 1700$  indicates normal distribution of the probable values of  $\Delta T_{1cal}$ , and thus  $k = 2$  is valid (see Annex A, Table A.1).

**Table B.6 – Uncertainty budget of the front time deviation  $\Delta T_{1cal}$** 

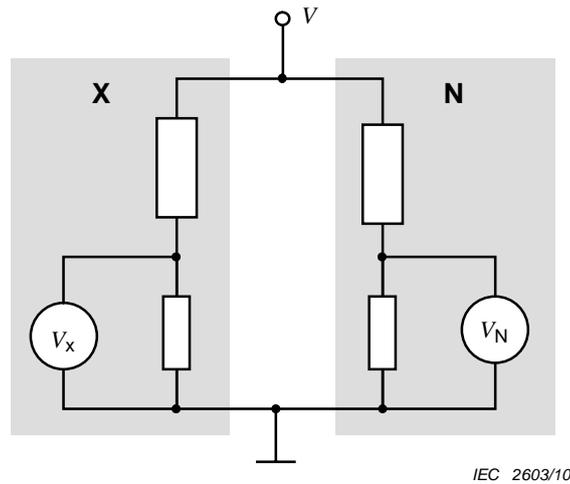
Quantity	Value $\mu\text{s}$	Standard uncertainty contribution $\mu\text{s}$	Degrees of freedom	Sensitivity coefficient	Contribution to combined standard uncertainty $\mu\text{s}$
$\Delta T_{1N}$	0,01	0,01 <sup>1)</sup>	50	1	0,01
$\Delta T_{1m}$	-0,03	0,0231 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	0,023
$u_A(T_{1X})$	0,0	0,00474 <sup>1)</sup>	9	1	0,0047
$\Delta T_{1cal}$	<b>-0,020 <math>\mu\text{s}</math></b>		<b>1 700</b>		<b>0,0256 <math>\mu\text{s}</math></b>
1) Normal distribution.					
2) Rectangular distribution.					

Finally, the complete result of the calibration is expressed as follows:

$$\Delta T_{1cal} = -0,020 \mu\text{s} \pm 0,051 \mu\text{s} \text{ for a coverage probability of not less than } 95 \% (k = 2).$$

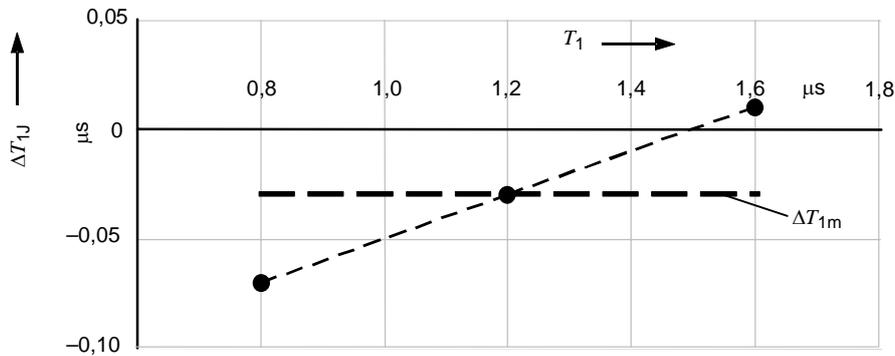
In other words: The front times measured with system X in the nominal époque are too small by  $-0,02 \mu\text{s}$ . When system X is used for impulse voltage measurements, the corrected front time  $T_{1\text{cor}}$  is obtained by adding  $0,02 \mu\text{s}$  to the measured value  $T_{1\text{meas}}$ . If no further contributions to the front time need to be considered, the expanded uncertainty of  $T_{1\text{cor}}$  is  $0,051 \mu\text{s}$  ( $k = 2$ ).

Additional uncertainty contributions may originate when the digital recorder of system X is used in ranges different from those during the comparison. The effect on  $t_{30}$  and  $t_{90}$  shall be estimated and a reasonable deviation of  $T_1$  be calculated according to Equation (B.7) from which the corresponding Type B standard uncertainty is introduced in the uncertainty budget.



IEC 2603/10

Figure B.1 – Comparison between the system under test, X, and the reference system, N



IEC 2604/10

Figure B.2 – Front time deviation  $\Delta T_{1,j}$  of system X, related to the reference system N, and their mean  $\Delta T_{1m}$  in the range of  $T_1 = 0,8 \mu\text{s} \dots 1,6 \mu\text{s}$

## Annex C (informative)

### Step response measurements

#### C.1 General

Step response measurement is a traditional method to characterize an impulse voltage divider, an impulse oscilloscope or a digital recorder. Because there is no direct correlation between unit step response parameters and correct measurement of impulse voltages, it lost its role for the requirements of this standard, but remains important for characterizing the dynamic behaviour in connection with comparison measurements (8.4.2, 9.3.2) and especially for the development of dividers and instruments. Furthermore it is applied for performance checks of the dynamic behaviour (see 8.5.3 and 9.5.3).

For the estimation of errors in time parameter measurement by convolution (Annex D), the precise knowledge of the unit step response is necessary.

#### C.2 Definitions in addition to Clause 3

##### C.2.1 reference level (impulse measurements only),

$I_R$   
mean value of the step response taken over the reference level epoch (see C.2.10 and Figure C.1a), i.e., over the range of  $0,5t_{\min}$  to  $2t_{\max}$

NOTE A measuring system may have more than one reference level, for example, it may have different scale factors for different waveforms due to the variation of the response level (see 3.5.4 and Figure C.1a).

##### C.2.2 origin of a step response,

$O_1$   
instant when the response curve firstly starts a monotonic rise above the amplitude of the noise at the zero level of the (unit) step response (see Figure C.1a).

NOTE 1 In some cases the unit step response starts with an initial distortion (Figure C.2). Then the origin  $O_1$  should be determined at the crossing of the downward extension from the point of monotonic increase of the unit step response with the zero line. The initial distortion may be characterized by a parameter  $T_0$  (initial distortion time) which corresponds to the partial area(s) between the zero line and the unit step response up to  $O_1$ .

NOTE 2 All the time values (except  $T_0$ ) are measured from the origin  $O_1$ .

##### C.2.3 unit step response,

$g(t)$   
step response normalized such that a reference level becomes unity and the zero level remains zero (Figure C.1a).

NOTE A measuring system has a unit step response for each reference level. The origin  $O_1$  of the step response is identical with that of the unit step response.

##### C.2.4 step response integral,

$T(t)$   
integral from  $O_1$  to  $t$  of one minus the unit step response  $g(t)$  (see Figure C.1b):

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau . \quad (C.1)$$

**C.2.5**  
**experimental response time,**

$T_N$   
value of the step response integral at  $2 \cdot t_{\max}$  :

$$T_N = T(2 \cdot t_{\max}) . \quad (C.2)$$

**C.2.6**  
**partial response time,**

$T_\alpha$   
maximum value of the step response integral for  $t \leq 2 \cdot t_{\max}$  (see Figure C.1b) equal to the shaded area in Figure C.1a

NOTE Usually  $T_\alpha = T(t_1)$  where  $t_1$  is the time when  $g(t)$  first reaches the unit amplitude (see Figure C.1a).

**C.2.7**  
**residual response time,**

$T_R(t_i)$   
experimental response time  $T_N$  minus the value of the step response integral at some specific time  $t_i$  where  $t_i < 2 \cdot t_{\max}$  :

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) . \quad (C.3)$$

**C.2.8**  
**overshoot of the unit step response,**

$\beta_{ts}$   
difference between the maximum  $g_{\max}(t)$  and unity as a percentage of unity (Figure C.1a):

$$\beta_{ts} = 100 \% (g_{\max}(t) - 1) . \quad (C.4)$$

**C.2.9**  
**settling time,**

$t_s$   
shortest time for which the residual response time  $T_R(t)$  becomes and remains less than 2 % of  $t$  :

$$|T_N - T(t)| < 0,02t \quad (C.5)$$

for all values of  $t$  in the epoch from  $O_1$  to the longest time-to-half value  $T_{2\max}$  of the impulse voltage to be measured (see Figure C.1b)).

**C.2.10**  
**reference level epoch** (impulse voltage only)

time interval in which the reference level of the step response is determined with its lower limit being equal to 0,5 times of the lower limit of the nominal epoch ( $0,5t_{\min}$ ) and its upper limit being equal to 2 times the upper limit of the nominal epoch ( $2t_{\max}$ )

**C.3 Circuit for step response measurements**

The circuit arrangement used for determining the step response should be described in the record of performance and should be as near as possible to the operating conditions.

Suitable circuits are shown in Figure C.3. The preferred circuit is shown in Figure C.3a where the step generator is placed at a metallic wall or at a metallic strip conductor at least 1 m wide, which serves as the earth return.

To generate the step the measuring system is supplied by either a slowly rising impulse or a direct voltage which is chopped by a relay or a gap (see Figure C.3d). The following methods of chopping have been found acceptable:

- by a relay with mercury-wetted contacts: this gives steps up to some hundreds of volts,
- by a uniform field gap in air at atmospheric pressure with a spacing up to some millimetres: this gives steps up to several kilovolts,
- by a uniform gap with a spacing up to some millimetres under increased gas pressure: this gives steps up to some tens of kilovolts.

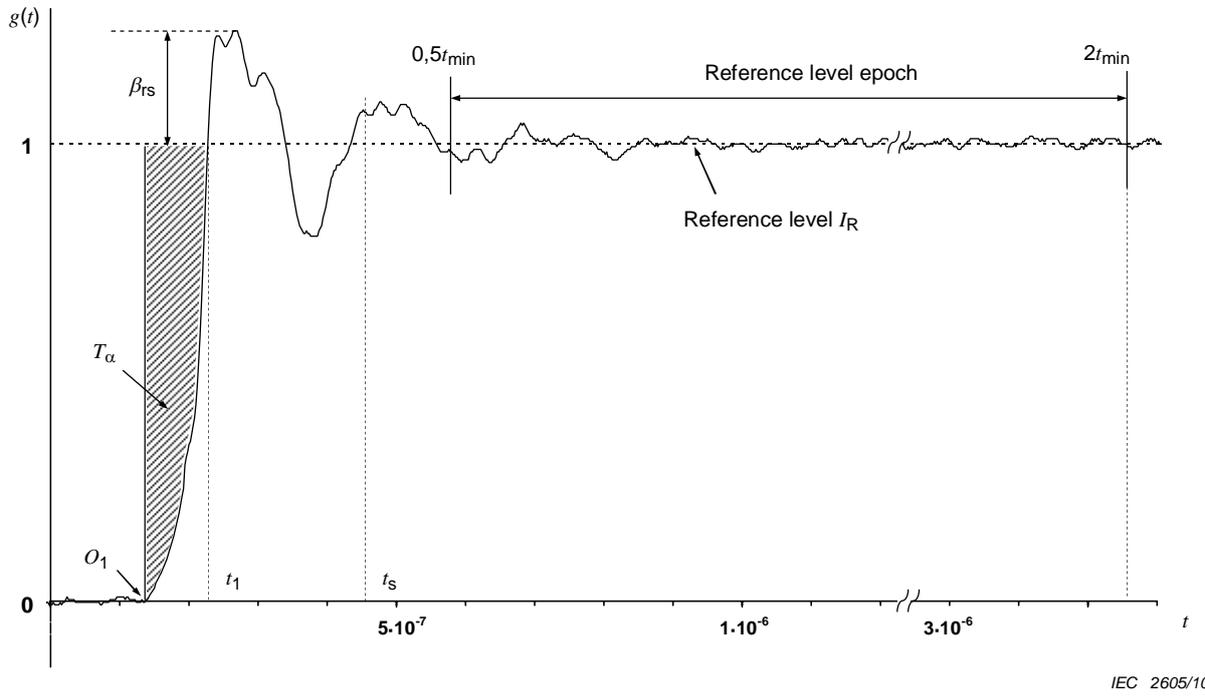
When the step is generated using a repetitive generator, the duration of the step, and of the interval between steps shall be chosen such that no additional errors are introduced with respect to a single pulse.

#### **C.4 Requirements for the step response of a component**

The component, normally a converting device or a recording measuring instrument, is subjected to a voltage step and its output is measured. The rise time of the applied step should be less than 1/5 of the partial response time  $T_{\infty}$ . Slight smoothing of the recorded data of the step response is recommended to reduce the influence of small oscillations and noise superimposed on the step response.

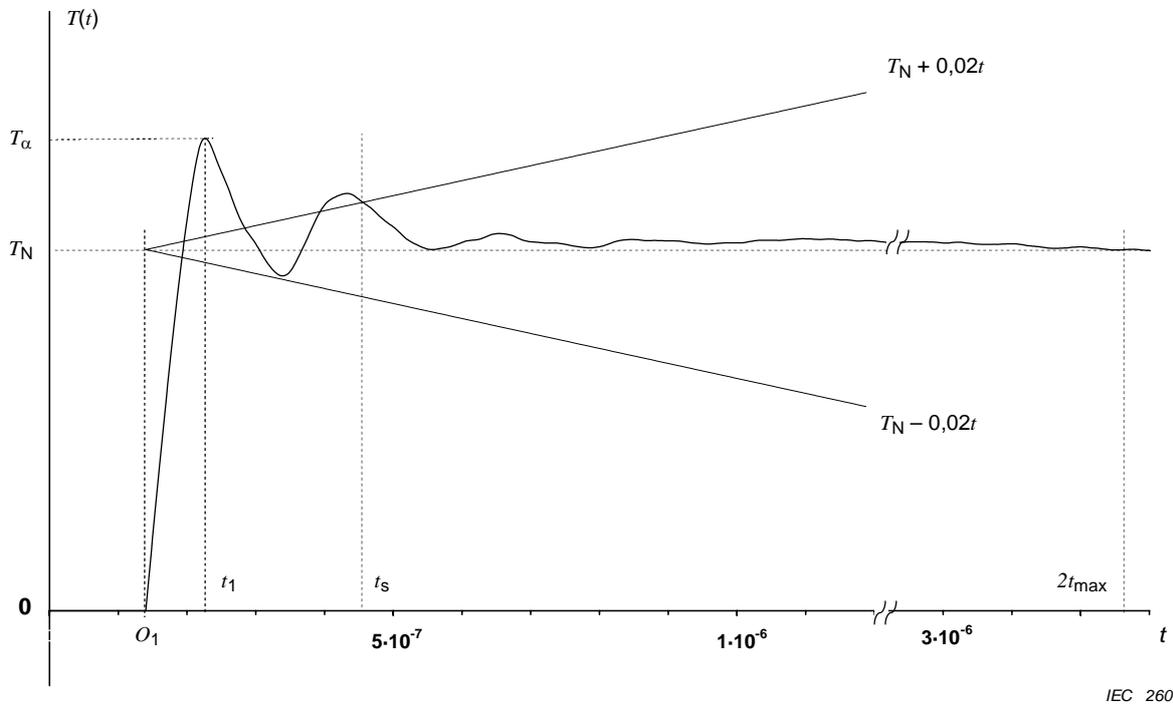
The unit step response within the selected reference level epoch should not deviate from unity by more than  $\pm 2$  %. The unit step response, at the time of the corresponding voltage waveform,  $t_f$ , used for the measurement of the assigned scale factor, should not deviate from the reference level by more than  $\pm 1$  % if  $t_f$  used falls outside the range of the nominal level epoch. When a full lightning impulse voltage is used in determination of the assigned scale factor,  $t_f$  is equal to  $2T_1$ , which is 2 times of the front time of the impulse. When a front chopped lightning impulse voltage is used,  $t_f$  is equal to  $2T_C$ , which is 2 times of the time to chopping of the impulse. When a switching impulse is used,  $t_f$  is equal to  $T_p$ , which is the time to peak of the impulse. When a direct voltage is used,  $t_f$  is equal to 100 ms. When and alternating voltage is used,  $t_f$  is equal to one quarter of the period of the voltage.

For step response requirements of impulse voltage reference measuring systems, see 10.2.3.



IEC 2605/10

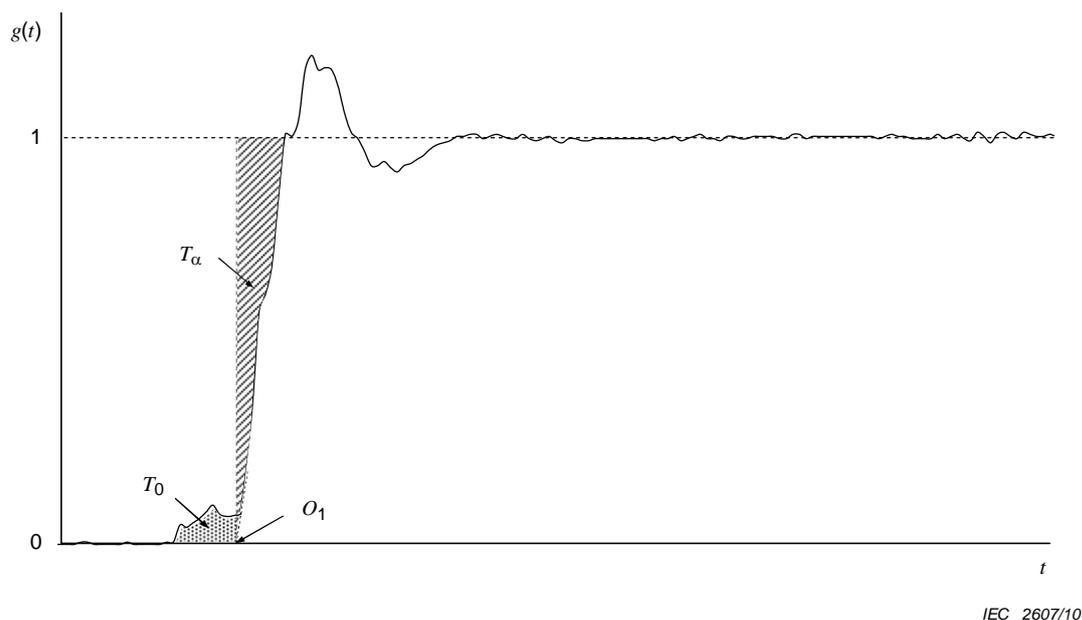
Figure C.1a – Definitions from the unit-step response  $g(t)$



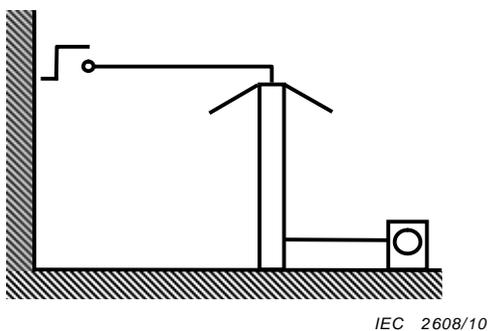
IEC 2606/10

Figure C.1b – Definitions from the step-response integral  $T(t)$

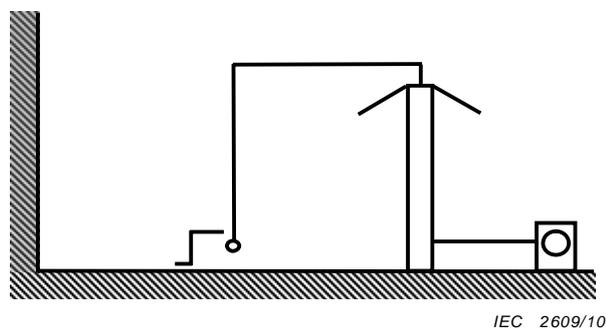
Figure C.1 – Definitions of response parameters



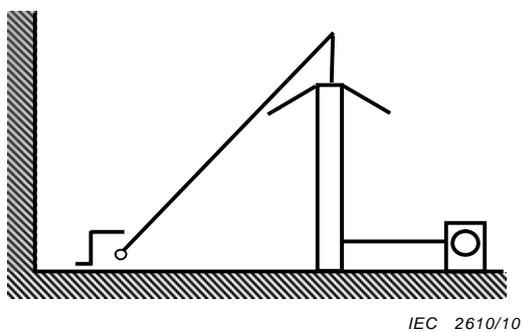
**Figure C.2 – A unit-step response  $g(t)$  showing an initial distortion of initial distortion time  $T_0$**



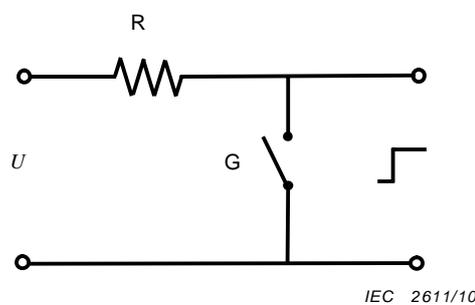
**Figure C.3a – Preferred arrangement**



**Figure C.3b – Preferred for large dividers**



**Figure C.3c – Alternative for large dividers**



**Figure C.3d – A typical step generator circuit**

NOTE G is the chopping device to generate the step.

**Figure C.3 – Suitable circuits for step response measurement**

## Annex D (informative)

### Convolution method for the determination of dynamic behaviour from step response measurements

#### D.1 General

The convolution method is used to evaluate the dynamic performance of an impulse voltage divider, a digital recorder, or a complete impulse voltage measuring system from their step responses (Annex C).

The convolution method uses the step response of the measuring system to calculate its output impulse waveform from the input impulse waveform. The errors of the impulse parameters of the output waveform relative to the input waveform may be used to evaluate the performance of the measuring system for a particular waveform to be measured.

The convolution method assumes that the step response of the measuring system is correctly measured and the input waveform used in the calculation is representative of the real impulse waveforms to be measured.

#### D.2 The convolution method

If the input impulse waveform and the unit (normalized) step response (Annex C) of an impulse measuring system are  $V_{in}(t)$  and  $g(t)$  respectively, the output,  $V_{out}(t)$ , may be expressed by the following convolution integral:

$$V_{out}(t) = \int_0^t V_{in}'(\tau) \cdot g(t - \tau) \cdot d\tau \quad (D.1)$$

where  $t$  is time and  $V_{in}'(t)$  is the first derivative of the input impulse voltage waveform  $V_{in}(t)$ .

If  $g(t)$  and  $V_{in}(t)$  are sampled with the same sampling interval and the number of samples of  $g(t)$  is the same as that of  $V_{in}(t)$ , the continuous convolution integral (D.1) reduces to the causal form of the discrete convolution sum:

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^i V_{in}'(k) \cdot g(i - k) \cdot \Delta t \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (D.2)$$

where:

$V_{out}(i)$  is the discrete output array;

$V_{in}'(i)$  is the first derivative of input array;

$g(i)$  is the unit step-response array;

$n$  is the number of samples of the input array; and

$\Delta t$  is the sampling interval of the input and output arrays, and the step-response array.

### D.3 Procedure for performing the convolution calculation

This procedure is based on the discrete convolution sum described by equation (D.2). It is used for computer-aided calculation using digital impulse waveforms. The procedure is used to estimate the errors of the impulse parameters of the output relative to the input waveforms of an impulse measuring system. The procedure given here describes the major steps of calculation. These steps are:

- a) Obtain the input impulse-waveform array  $V_{in}(i)$  for  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , and calculate its impulse parameters.
- b) The sampling rate of the input impulse waveform should be identical to that of the unit step response, with the number of its samples equal to that of the unit step response (see step c). The input waveform should be a smooth waveform with the highest frequency of the noise having been reduced well below the Nyquist frequency (half of the sampling frequency of the impulse array). A smooth input waveform array and its impulse parameters may be derived either:
  - 1) from an analytical expression of the impulse, e.g., a superposition of two ideal exponential functions. The impulse parameters of this waveform may either be obtained from the analytical expression or from the impulse calculation software of the impulse measuring system being examined.
  - 2) or from a recorded real waveform, smoothed by a precision low-pass digital filter or a piecewise cubic spline fitting algorithm. The impulse parameters of this waveform may be obtained from the impulse calculation software of the impulse measuring system being examined.
- c) Obtain the first derivative  $V'_{in}(i)$  for  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , of the input impulse waveform  $V_{in}(i)$  by numerical derivation.
- d) Obtain the unit step response array  $g(i)$  for  $i = 1, 2, \dots, m-1$  and  $m = n+j$ , where  $j$  is the number of data points before the origin of the recorded step response  $O_1$ .
  - 1) Obtain the unit step response by normalizing the measured step response (Annex C). To obtain a low-noise unit step response for convolution purposes, averaging several step-response records may be used. The smoothness of the unit step response array  $g(i)$  is less critical if equation (D.2) is used for the convolution calculation and the impulse array  $V_{in}(i)$  is already smooth.
  - 2) Obtain the zero level,  $l_0$ , of the step response by averaging the samples of the recorded step-response array  $s(i)$  before the starting edge of the step.
  - 3) Obtain the reference level,  $l_R$ , of the step response by averaging the samples of the recorded step-response array  $s(i)$  within a time range including the shortest front time for which the measuring system is to be used, and up to the time reflecting the frequency at which the scale factor of the converting device has been determined.
  - 4) Normalize the step-response array  $s(i)$  into a temporary unit-step-response array,  $g_0(i)$ , by using the following formula:

$$g_0(i) = \frac{s(i) - l_0}{l_R - l_0} \quad (\text{D.3})$$

- 5) Find the noise amplitude at the zero level by finding the standard deviation,  $d_0$ , of the samples of the  $g_0(i)$  array before the start of the step. Searching backwards from the end of  $g_0(i)$ , find the sample with its value being higher than three times of the standard deviation  $d_0$ . The time of this sample is assigned as the origin,  $O_1$ , of  $g_0(i)$ . Assign the index of this sample to  $j$ .
- 6) Construct the unit step response  $g(t)$  from the origin by removing the samples of  $g_0(i)$  before the origin, i.e.:

$$g(i-j) = g_0(i), \quad i = j, \dots, m+j-1 \quad (\text{D.4})$$

NOTE Recorded  $g_0(i)$  has  $m+j$  points. Unit step response  $g(i-j)$  has  $n=m$  points after removing  $j$  points before the origin  $0_1$ .

e) Obtain the output array and its impulse parameters array:

- 1) Obtain the output impulse waveform array  $V_{\text{out}}(i)$  by calculation using equation (D.2) either in the time domain or in the frequency domain.
- 2) Calculate the impulse parameters of  $V_{\text{out}}(i)$  using the impulse calculation software of the impulse measuring system.
- 3) Calculate the errors of  $V_{\text{out}}(i)$  as the difference between the impulse parameters of  $V_{\text{out}}(i)$  and  $V_{\text{in}}(i)$ .

#### D.4 Uncertainty contributions

In principle, the errors calculated by the convolution may be used for correcting the parameters calculated. Such correction does however require à priori knowledge of the wave-shape, i.e. unless the impulse is of known regular shape, the correction is not reliable. The errors and their scatter for different wave-shapes, can be used as an uncertainty contribution to the combined uncertainty of measurement of the parameter concerned. Uncertainty calculation should be performed in accordance with the ISO/IEC Guide 98-3, see also Annex A, with examples given in Annex B.

#### D.5 Discussion of the calculated errors of impulse parameters

##### D.5.1 Error in the peak amplitude

The unit level of the unit step response is usually not constant. Therefore, the calculated error of the peak amplitude is often significant in comparison with the numerical error of the convolution calculation, although it may be small in comparison with the required measurement uncertainty of the peak amplitude. The calculated relative error of the peak amplitude should be equal to the relative difference between unity and the value of  $g(i)$  at a time approximately equal to 2 times the front time  $T_1$  of the input impulse  $V_{\text{in}}(i)$ . The calculated error in the peak amplitude can be compared to the unit step response to verify if the convolution calculation has been performed correctly.

##### D.5.2 Error in the front time

The convolution calculation can reveal a change in the wave shape of the impulse caused by the performance of the measuring system, and therefore the magnitude of the error of the front time, which cannot be revealed by the step response itself. As the consequence of a slower step response, the front time of the output impulse becomes larger. However, the front time is also influenced by the overshoot/undershoot of the step response. Depending on the time-positions of the overshoot and undershoot on the step response, the front part of the impulse waveform may be changed into different shapes, leading to either an increased or decreased front-time value.

##### D.5.3 Error in the time to half-value

The time to half-value is mainly affected by the difference between the  $g(i)$  value at a time approximately equal to 2 times the front time  $T_1$  and the  $g(i)$  value at the time equal to  $T_2$  of the impulse being evaluated. The convolution calculation can be used to estimate the magnitude of the error of  $T_2$ , which cannot be directly estimated from the step response itself.

## Bibliography

IEC 60050 (300):2001, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Electrical and electronic measurements and measuring instruments – Part 311: General terms relating to measurements – Part 312: General terms relating to electrical measurements – Part 313: Types of electrical measuring instruments – Part 314: Specific terms according to the type of instrument*

IEC 60050 (321):1986, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 321; Instrument transformers*

IEC 60051, *Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories*

IEC 60060-3:2004, *High-voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for on-site testing*

IEC 60071-1:2006, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60270: *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 62475: *High-current test techniques: Definitions and requirements for test currents and measuring systems<sup>1</sup>*

ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Metrology in short: Euromet ISBN 87-988154-1-2)*

JCGM 200:2008, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, <http://www.bipm.org/en/publications/guides>

J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Introduction to Digital Signal Processing*. Macmillan Publishing Company, New York, 1988.

Y. Li, J. Rungis and A. Pfeffer, *The Voltage and Time Parameter Measurement Uncertainties of a Large Damped Capacitor Divider due to its Non-ideal Step Response*. Proceedings of 15 International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, 2007.

---

<sup>1</sup> To be published.

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS .....	78
1 Domaine d'application .....	80
2 Références normatives.....	80
3 Termes et définitions .....	81
3.1 Systèmes de mesure .....	81
3.2 Constituants d'un système de mesure .....	81
3.3 Coefficients de conversion .....	82
3.4 Caractéristiques assignées .....	83
3.5 Définitions relatives au comportement dynamique .....	84
3.6 Définitions relatives à l'incertitude.....	85
3.7 Définitions relatives aux essais sur des systèmes de mesure.....	87
4 Procédures de qualification et d'utilisation des systèmes de mesure .....	88
4.1 Principes généraux .....	88
4.2 Calendrier des essais de détermination des caractéristiques .....	88
4.3 Calendrier des contrôles de caractéristiques.....	89
4.4 Exigences pour le recueil de caractéristiques.....	89
4.4.1 Contenu du recueil de caractéristiques.....	89
4.4.2 Exceptions .....	89
4.5 Conditions de fonctionnement .....	90
4.6 Incertitude.....	90
5 Essais et exigences d'essai pour un système de mesure approuvé et ses constituants .....	91
5.1 Exigences générales .....	91
5.2 Étalonnage – Détermination du coefficient de conversion.....	92
5.2.1 Étalonnage des systèmes de mesure par comparaison à un système de mesure de référence (méthode préférentielle).....	92
5.2.2 Détermination du coefficient de conversion d'un système de mesure à partir des coefficients de conversion de ses constituants (méthode alternative) .....	95
5.3 Essais de linéarité.....	96
5.3.1 Application .....	96
5.3.2 Autres méthodes dans l'ordre de pertinence.....	97
5.4 Comportement dynamique .....	98
5.4.1 Généralités.....	98
5.4.2 Détermination de la réponse amplitude/fréquence .....	99
5.4.3 Méthode de référence pour les systèmes de mesure des tensions de chocs.....	99
5.5 Stabilité à court terme .....	99
5.6 Stabilité à long terme.....	99
5.7 Effet de la température ambiante .....	100
5.8 Effet de proximité.....	100
5.9 Effet de logiciel.....	101
5.10 Calcul d'incertitude du coefficient de conversion.....	101
5.10.1 Généralités.....	101
5.10.2 Incertitude de l'étalonnage .....	101
5.10.3 Incertitude de mesure en utilisant un système de mesure approuvé.....	102

5.11	Calcul d'incertitude de la mesure des paramètres de temps (tensions de chocs uniquement) .....	103
5.11.1	Généralités.....	103
5.11.2	Incertitude de l'étalonnage des paramètres de temps.....	103
5.11.3	Incertitude de mesure des paramètres de temps en utilisant un système de mesure approuvé.....	105
5.12	Essai de perturbations (système de transmission et instrument pour les mesures de tension de choc).....	106
5.13	Essais de tenue du dispositif de conversion.....	106
6	Mesure de tension continue.....	106
6.1	Exigences pour un système de mesure approuvé .....	106
6.1.1	Généralités.....	106
6.1.2	Contributions d'incertitude.....	106
6.1.3	Exigence relative au dispositif de conversion .....	107
6.1.4	Comportement dynamique pour mesurer les variations de tension.....	107
6.2	Essais sur un système de mesure approuvé .....	107
6.3	Contrôle des caractéristiques .....	108
6.3.1	Généralités.....	108
6.3.2	Comparaison avec un système de mesure approuvé.....	108
6.3.3	Contrôle des coefficients de conversion des constituants .....	108
6.4	Mesure de l'amplitude de l'ondulation.....	109
6.4.1	Exigences .....	109
6.4.2	Contributions d'incertitude.....	109
6.4.3	Étalonnages et essais sur un système de mesure de tension d'ondulation approuvé .....	109
6.4.4	Mesure du coefficient de conversion à la fréquence d'ondulation.....	109
6.4.5	Comportement dynamique par la réponse amplitude/fréquence.....	109
6.4.6	Contrôle des caractéristiques pour le système de mesure d'ondulation.....	110
7	Mesure de tension alternative .....	110
7.1	Exigences pour un système de mesure approuvé .....	110
7.1.1	Généralités.....	110
7.1.2	Contributions d'incertitude.....	110
7.1.3	Comportement dynamique .....	110
7.2	Essais sur un système de mesure approuvé .....	112
7.3	Essai de comportement dynamique.....	112
7.4	Contrôle des caractéristiques .....	112
7.4.1	Généralités.....	112
7.4.2	Comparaison avec un système de mesure approuvé.....	112
7.4.3	Contrôle des coefficients de conversion des constituants .....	113
8	Mesure de tension de choc de foudre .....	114
8.1	Exigences pour un système de mesure approuvé .....	114
8.1.1	Généralités.....	114
8.1.2	Contributions d'incertitude.....	114
8.1.3	Exigence relative à l'instrument de mesure .....	114
8.1.4	Comportement dynamique .....	114
8.1.5	Connexion à l'objet en essai.....	114
8.2	Essais sur un système de mesure approuvé .....	115
8.3	Essais de détermination des caractéristiques sur des systèmes de mesure.....	116
8.3.1	Méthode de référence (préférentielle).....	116

8.3.2	Autres méthodes complétées par une mesure de la réponse indicielle conformément à l'Annexe C.....	116
8.4	Essai de comportement dynamique.....	117
8.4.1	Comparaison avec un système de mesure de référence (méthode préférentielle) .....	117
8.4.2	Autre méthode basée sur les paramètres de réponse indicielle (Annexe C) .....	117
8.5	Contrôle des caractéristiques .....	117
8.5.1	Comparaison avec un système de mesure approuvé.....	117
8.5.2	Contrôle des coefficients de conversion des constituants .....	117
8.5.3	Contrôle du comportement dynamique par enregistrement de référence.....	118
9	Mesure de tension de choc de manœuvre .....	118
9.1	Exigences pour un système de mesure approuvé .....	118
9.1.1	Généralités.....	118
9.1.2	Contribution d'incertitude .....	118
9.1.3	Exigences relatives à l'instrument de mesure .....	118
9.1.4	Comportement dynamique .....	118
9.1.5	Connexion à l'objet en essai.....	118
9.2	Essais sur un système de mesure approuvé .....	118
9.3	Essais de détermination des caractéristiques sur des systèmes de mesure.....	119
9.3.1	Méthode de référence (préférentielle).....	119
9.3.2	Autre méthode complétée par une mesure de réponse indicielle .....	119
9.4	Essai du comportement dynamique par comparaison.....	119
9.5	Contrôle des caractéristiques .....	119
9.5.1	Contrôle du coefficient de conversion par comparaison avec un système de mesure approuvé.....	119
9.5.2	Contrôle des coefficients de conversion des constituants .....	120
9.5.3	Contrôle du comportement dynamique par enregistrement de référence.....	120
10	Systèmes de mesure de référence .....	121
10.1	Exigences pour les systèmes de mesure de référence .....	121
10.1.1	Tension continue.....	121
10.1.2	Tension alternative.....	121
10.1.3	Tensions de chocs de foudre pleins et coupés et de chocs de manœuvre.....	121
10.2	Étalonnage d'un système de mesure de référence.....	121
10.2.1	Généralités.....	121
10.2.2	Méthode de référence: Mesure comparative.....	121
10.2.3	Autre méthode pour les tensions de chocs: Mesure du coefficient de conversion et évaluation des paramètres de réponse indicielle .....	122
10.3	Intervalle entre les étalonnages successifs des systèmes de mesure de référence .....	122
10.4	Utilisation des systèmes de mesure de référence .....	122
	Annexe A (informative) Incertitude de mesure .....	123
	Annexe B (informative) Exemples de calcul d'incertitudes de mesure dans des mesures de haute tension .....	131
	Annexe C (informative) Mesures de réponse indicielle.....	140
	Annexe D (informative) Méthode de convolution pour déterminer le comportement dynamique à partir des mesures de réponse indicielle.....	145

Bibliographie.....	149
Figure 1 – Réponse amplitude-fréquence pour les fréquences limites ( $f_1$ ; $f_2$ ) .....	84
Figure 2 – Étalonnage par comparaison sur toute la gamme de tension .....	93
Figure 3 – Contributions d'incertitude de l'étalonnage (exemple avec un minimum de 5 niveaux de tension) .....	94
Figure 4 – Étalonnage par comparaison sur une gamme limitée de tension, avec un essai de linéarité supplémentaire .....	95
Figure 5 – Essai de linéarité du système de mesure avec un dispositif linéaire dans la gamme de tension étendue.....	97
Figure 6 – Zone ombrée de réponses amplitude-fréquence normalisées acceptables de systèmes de mesure prévus pour des fréquences fondamentales uniques $f_{nom}$ (à essayer dans la plage (1...7) $f_{nom}$ ) .....	111
Figure 7 – Zone ombrée de réponses amplitude-fréquence normalisées acceptables de systèmes de mesure prévus pour une plage de fréquences fondamentales $f_{nom1}$ à $f_{nom2}$ (à essayer dans la plage $f_{nom1}$ à 7 $f_{nom2}$ ).....	112
Figure A.1 – Distribution normale des probabilités $p(x)$ .....	130
Figure A.2 – Distribution rectangulaire des probabilités $p(x)$ .....	130
Figure B.1 – Comparaison entre le système en essai, X, et le système de référence, N.....	138
Figure B.2 – Écarts de temps de montée $\Delta T_{1,j}$ du système X, rapportés au système de référence N, et leur moyenne $\Delta T_{1,m}$ dans la plage de $T_1 = 0,8 \mu s \dots 1,6 \mu s$ .....	139
Figure C.1 – Définition des paramètres de réponse.....	143
Figure C.2 – A Réponse indicielle unitaire $g(t)$ montrant une distorsion initiale du temps de distorsion initiale $T_0$ .....	144
Figure C.3 – Circuits appropriés à la mesure de la réponse indicielle.....	144
Tableau 1 – Essais requis pour un système de mesure de tension continue approuvé .....	107
Tableau 2 – Essais requis pour les contributions d'incertitude dans la mesure d'ondulation .....	110
Tableau 3 – Essais requis pour un système de mesure de tension alternative approuvé ....	113
Tableau 4 – Essais requis pour un système de mesure approuvé de tension de choc de foudre.....	115
Tableau 5 – Essais requis pour un système de mesure de tension de choc de manœuvre .....	120
Tableau 6 – Paramètres de réponse recommandés pour les systèmes de mesure de référence de tension de choc.....	122
Tableau A.1 – Facteur d'élargissement $k$ pour les degrés de liberté réels $\nu_{eff}$ ( $p = 95,45 \%$ ) .....	128
Tableau A.2 – Schéma d'un bilan d'incertitude.....	129
Tableau B.1 – Résultat de la mesure de comparaison à un seul niveau de tension.....	132
Tableau B.2 – Résumé des résultats pour $h = 5$ niveaux de tension ( $V_{Xmax} = 500 \text{ kV}$ ).....	133
Tableau B.3 – Bilan d'incertitude du coefficient de conversion affecté $F_X$ .....	134
Tableau B.4 – Bilan d'incertitude du coefficient de conversion affecté $F$ .....	136
Tableau B.5 – Résultat d'étalonnage pour le temps de montée $T_1$ et les écarts.....	137
Tableau B.6 – Bilan d'incertitude de l'écart de temps de montée $\Delta T_{1cal}$ .....	138

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## TECHNIQUES DES ESSAIS À HAUTE TENSION –

### Partie 2: Systèmes de mesure

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60060-2 a été établie par le comité d'études 42 de la CEI: Techniques des essais à haute tension.

Cette troisième édition de la CEI 60060-2 annule et remplace la deuxième édition, parue en 1994. Elle constitue une révision technique.

Par rapport à l'édition précédente, les modifications techniques majeures sont les suivantes:

- a) La disposition générale et le texte ont été mis à jour et améliorés pour rendre la norme plus facile à utiliser.
- b) La norme a été révisée afin de l'aligner sur la CEI 60060-1.
- c) Le traitement de l'estimation de l'incertitude de mesure a été élargi.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
42/281/FDIS	42/287/RVD

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60060, présentées sous le titre général *Techniques des essais à haute tension*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

# TECHNIQUES DES ESSAIS À HAUTE TENSION –

## Partie 2: Systèmes de mesure

### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60060 est applicable aux systèmes de mesure complets et à leurs constituants lorsqu'ils sont utilisés pour la mesure de hautes tensions réalisée lors d'essais en laboratoire et en usine en tension continue, tension alternative, tensions de chocs de foudre et de manœuvre tels qu'ils sont définis dans la CEI 60060-1. Pour les mesures réalisées lors d'essais in situ, voir la CEI 60060-3.

Les domaines d'incertitudes de mesure dont il est fait état dans la présente norme s'appliquent aux niveaux d'essais définis dans la CEI 60071-1:2006. Les principes développés dans la présente norme s'appliquent aussi à des niveaux de tension d'essais plus élevés, mais l'incertitude peut en être alors plus élevée.

La présente norme:

- définit les termes utilisés,
- décrit des méthodes pour estimer les incertitudes des mesures des hautes tensions,
- détermine les exigences auxquelles doivent satisfaire les systèmes de mesure,
- décrit les méthodes à utiliser pour qualifier un système de mesure et pour en contrôler les différents constituants,
- décrit la procédure par laquelle l'utilisateur doit montrer qu'un système de mesure satisfait aux exigences de la présente norme, y compris le domaine fixé pour l'incertitude de mesure.

### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application de la présente norme. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence (y compris les éventuels amendements) s'applique.

CEI 60052, *Mesure de tension au moyen des éclateurs à sphères normalisés*

CEI 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

CEI 61083-1, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de chocs à haute tension – Partie 1: Prescriptions pour les appareils*

CEI 61083-2, *Enregistreurs numériques pour les mesures pendant les essais de chocs à haute tension – Partie 2: Évaluation du logiciel utilisé pour obtenir les paramètres des formes d'onde de chocs*

Guide ISO/CEI 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*

NOTE D'autres normes, guides, etc. connexes sur les sujets inclus dans la présente Norme internationale sont donnés dans la bibliographie.

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

#### 3.1 Systèmes de mesure

##### 3.1.1

##### **système de mesure**

ensemble complet de dispositifs appropriés pour effectuer une mesure de haute tension; un logiciel utilisé pour obtenir ou calculer des résultats de mesure fait également partie du système de mesure

NOTE 1 Un système de mesure comprend généralement les constituants suivants:

- un dispositif de conversion avec les conducteurs requis pour connecter ce dispositif à l'objet en essai ou dans le circuit et les connexions à la terre;
- un système de transmission connectant les bornes de sortie du dispositif de conversion à l'instrument de mesure avec les impédances ou réseaux d'atténuation, de terminaison et d'adaptation; et
- un instrument de mesure avec toute connexion à la source d'alimentation. Les systèmes de mesure qui ne comprennent que certains des constituants mentionnés ci-dessus ou qui sont basés sur des principes de mesure non classiques sont acceptables s'ils satisfont aux exigences relatives à l'incertitude telles qu'elles sont spécifiées dans le présent document.

NOTE 2 L'environnement dans lequel fonctionne un système de mesure, ses distances de garde à des structures sous tension et à la terre et la présence de champs électriques ou magnétiques peuvent avoir un effet significatif sur le résultat de mesure et son incertitude.

##### 3.1.2

##### **recueil de caractéristiques**

enregistrement détaillé, élaboré et tenu à jour par l'utilisateur, décrivant le système de mesure et contenant la preuve que les exigences mentionnées dans le présent document ont été satisfaites

NOTE Cette preuve comporte les résultats de l'essai initial de détermination des caractéristiques et le calendrier et les résultats de chaque essai suivant de détermination des caractéristiques et de contrôle de performance.

##### 3.1.3

##### **système de mesure approuvé**

système de mesure dont la conformité à un ou plusieurs des ensembles d'exigences présentées dans la présente norme a été prouvée

##### 3.1.4

##### **système de mesure de référence**

système de mesure avec son étalonnage traçable par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux pertinents et ayant une exactitude et une stabilité suffisantes pour être utilisé pour l'approbation d'autres systèmes par l'exécution de mesures comparatives simultanées avec des types de forme d'onde et des plages de tensions spécifiques

NOTE Un système de mesure de référence (tenu à jour selon les exigences de la présente norme) peut être utilisé en tant que système de mesure approuvé, mais l'inverse n'est pas vrai.

#### 3.2 Constituants d'un système de mesure

##### 3.2.1

##### **dispositif de conversion**

dispositif destiné à convertir la grandeur à mesurer (mesurande) en une grandeur, compatible avec l'instrument de mesure

### 3.2.2

#### **diviseur de tension**

dispositif de conversion consistant en une partie haute tension et une partie basse tension, tel que la tension d'entrée est appliquée à tout le dispositif et la tension de sortie est prélevée au niveau de la partie basse tension

NOTE Les éléments de ces deux parties sont généralement des résistances ou des condensateurs ou une de leurs combinaisons. Le dispositif est désigné par le type et la disposition de ses éléments (par exemple résistif, capacitif ou résistif-capacitif).

### 3.2.3

#### **transformateur de tension**

dispositif de conversion consistant en un transformateur dans lequel la tension secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle approximativement nul pour un sens approprié des connexions

[IEC 60050-321: 1986, 321-03-01]

### 3.2.4

#### **impédance de conversion de tension**

dispositif de conversion qui transporte un courant proportionnel à la tension appliquée devant être mesurée avec un instrument de mesure de courant

### 3.2.5

#### **sonde de champ électrique**

dispositif de conversion pour la mesure de l'amplitude et de la forme d'onde d'un champ électrique

NOTE Une sonde de champ électrique peut être utilisée pour mesurer la forme d'onde de la tension produisant le champ à condition que la mesure ne soit pas modifiée par un effet de couronne ou des charges d'espace.

### 3.2.6

#### **système de transmission**

ensemble de dispositifs transférant le signal de sortie d'un dispositif de conversion à un instrument de mesure

NOTE 1 Un système de transmission consiste en général en un câble coaxial avec ses impédances terminales, mais il peut aussi comporter des atténuateurs, des amplificateurs ou d'autres dispositifs connectés entre le dispositif de conversion et l'instrument de mesure. Par exemple, une liaison optique comporte un émetteur, un câble optique et un récepteur ainsi que des amplificateurs associés.

NOTE 2 Un système de transmission peut être inclus, partiellement ou en totalité, dans le dispositif de conversion ou dans l'instrument de mesure.

### 3.2.7

#### **appareil de mesure, instrument de mesure**

dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesures, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes

[IEC 60050-300: 2001, 311-03-01]

## 3.3 Coefficients de conversion

### 3.3.1

#### **coefficient de conversion d'un système de mesure**

coefficient par lequel est multipliée la valeur lue sur l'instrument de mesure pour obtenir la valeur de la grandeur d'entrée du système de mesure complet

NOTE 1 Un système de mesure peut avoir plusieurs coefficients de conversion pour différentes gammes de mesure, plages de fréquence ou formes d'onde, affectées.

NOTE 2 Pour les systèmes de mesure qui affichent directement la valeur de la grandeur d'entrée, le coefficient de conversion nominal du système de mesure est égal à l'unité.

### 3.3.2

#### **coefficient de conversion d'un dispositif de conversion**

coefficient par lequel est multipliée la grandeur de sortie du dispositif de conversion pour obtenir sa grandeur d'entrée

NOTE Le coefficient de conversion d'un dispositif de conversion peut être sans dimension (par exemple le rapport d'un diviseur) ou peut avoir des dimensions (par exemple la valeur d'une impédance de conversion de tension).

### 3.3.3

#### **coefficient de conversion d'un système de transmission**

coefficient par lequel est multipliée la grandeur de sortie d'un système de transmission pour obtenir sa grandeur d'entrée

### 3.3.4

#### **coefficient de conversion d'un instrument de mesure**

coefficient par lequel est multipliée la lecture sur l'instrument pour obtenir sa grandeur d'entrée

### 3.3.5

#### **coefficient de conversion affecté**

*F*

coefficient de conversion d'un système de mesure qui est déterminé lors de l'essai de détermination des caractéristiques le plus récent

NOTE Un système de mesure peut avoir plusieurs coefficients de conversion affectés; il peut avoir par exemple plusieurs plages et/ou époques nominales, chacune avec un coefficient de conversion différent.

## 3.4 Caractéristiques assignées

### 3.4.1

#### **conditions de fonctionnement**

plages spécifiées de conditions dans lesquelles un système de mesure fonctionnera dans les limites d'incertitude spécifiées

### 3.4.2

#### **tension de fonctionnement assignée**

niveau maximum de tension de fréquence ou de forme d'onde spécifiée auquel un système de mesure est conçu pour être utilisé

NOTE La tension de fonctionnement assignée peut être plus grande que la limite supérieure de la gamme de mesures affectée.

### 3.4.3

#### **gamme de mesures affectée**

gamme de tensions de fréquence ou de formes d'onde spécifiée, caractérisée par un coefficient de conversion unique, dans laquelle un système de mesure peut être utilisé

NOTE 1 Les limites de la gamme de mesures attribuée sont choisies par l'utilisateur et vérifiées par les essais de détermination des caractéristiques spécifiés dans la présente norme.

NOTE 2 Un système de mesure peut avoir plus d'une gamme de mesure attribuée avec des coefficients de conversion différents.

### 3.4.4

#### **durée de fonctionnement affectée**

plus longue durée pendant laquelle un système de mesure peut fonctionner à la limite supérieure de la gamme de mesures attribuée pour des tensions continues ou alternatives

**3.4.5**  
**fréquence d'application affectée**

fréquence maximale de tensions de chocs spécifiées pendant un intervalle de temps spécifié auquel le système de mesure peut fonctionner à sa limite supérieure de la gamme de mesures affectée

NOTE La fréquence est habituellement donnée en applications par minute et l'intervalle de temps en minutes ou en heures.

**3.5 Définitions relatives au comportement dynamique**

**3.5.1**  
**réponse d'un système de mesure**

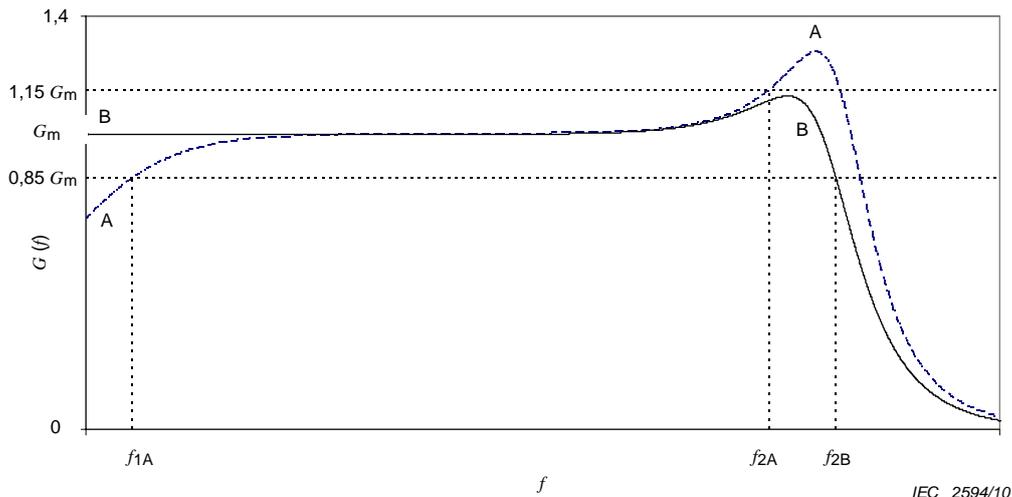
*G*

sortie en fonction du temps ou de la fréquence lorsqu'une tension spécifiée est appliquée à l'entrée du système

**3.5.2**  
**réponse amplitude-fréquence**

*G(f)*

rapport entre la grandeur de sortie et la grandeur d'entrée d'un système de mesure en fonction de la fréquence, *f*, lorsque l'entrée est sinusoïdale (Figure 1)



NOTE Les fréquences limites haute et basse sont illustrées par la courbe A.

La courbe B montre une fonction de transfert s'étendant jusqu'au continu.

**Figure 1 – Réponse amplitude-fréquence pour les fréquences limites (*f*<sub>1</sub>; *f*<sub>2</sub>)**

**3.5.3**  
**réponse indicielle,**

*G(t)*

sortie d'un système de mesure en fonction du temps lorsque la grandeur d'entrée est une fonction en échelon

NOTE Pour plus d'informations sur la réponse indicielle et les paramètres de la réponse indicielle, voir Annexe C.

### 3.5.4 époque nominale (tension de choc uniquement)

$\tau_{N1}$

plage de valeurs comprise entre le minimum ( $t_{\min}$ ) et le maximum ( $t_{\max}$ ) des paramètres de temps relatifs à la tension de choc pour laquelle le système de mesure doit être approuvé

NOTE 1 Les paramètres de temps concernés sont:

- le temps de montée  $T_1$  pour les chocs de foudre pleins et ceux coupés sur la queue
- la durée jusqu'à la coupure  $T_c$  pour les chocs coupés sur le front
- la durée jusqu'à la crête  $T_p$  pour les chocs de manœuvre.

NOTE 2 Un système de mesure peut avoir une ou deux époques nominales ou plus pour différentes formes d'onde. Par exemple, un système de mesure particulier peut être approuvé:

- pour les chocs de foudre pleins et coupés sur la queue avec un coefficient de conversion affecté  $F_1$  pour une époque nominale  $\tau_{N1}$  s'étendant de  $T_1 = 0,8 \mu\text{s}$  à  $T_1 = 1,8 \mu\text{s}$ , même si la tolérance est de  $0,84 \mu\text{s}$  à  $1,56 \mu\text{s}$ ,
- ou pour les chocs de foudre coupés sur le front avec un coefficient de conversion affecté  $F_2$  pour une époque nominale  $\tau_{N2}$  s'étendant de  $T_c = 0,5 \mu\text{s}$  à  $T_c = 0,9 \mu\text{s}$ ,
- pour les chocs de manœuvre, avec un coefficient de conversion affecté  $F_3$  pour une époque nominale  $\tau_{N3}$  s'étendant de  $T_p = 150 \mu\text{s}$  à  $T_p = 500 \mu\text{s}$ .

NOTE 3 Le terme « choc coupé sur le front » est utilisé pour désigner un choc coupé avec une durée jusqu'à la coupure qui s'inscrit dans la plage de  $0,5 \mu\text{s}$  jusqu'au temps de la valeur extrême. Cela sert à le distinguer d'un « choc coupé sur la queue » qui a une durée jusqu'à la coupure supérieure au temps de la valeur extrême.

### 3.5.5 fréquences limites

$f_1$  et  $f_2$

limites inférieure et supérieure de la plage dans laquelle la réponse amplitude-fréquence est pratiquement constante (Figure 1)

NOTE Ces limites correspondent au premier écart de la réponse d'une certaine valeur (par exemple, de plus ou moins 15 %) par rapport à la valeur constante. Il convient que l'écart admissible soit lié à des incertitudes acceptables d'un système de mesure.

## 3.6 Définitions relatives à l'incertitude

### 3.6.1

#### tolérance

différence autorisée entre la valeur mesurée et la valeur spécifiée

NOTE 1 Il convient de distinguer cette différence de l'incertitude de mesure.

NOTE 2 La tension d'essai mesurée doit s'inscrire dans les limites de la tolérance déclarée du niveau d'essai spécifié.

### 3.6.2

#### erreur

valeur mesurée d'une grandeur moins une valeur de référence de la grandeur

[ISO/CEI Guide 99 (VIM 2.16)]

### 3.6.3

#### incertitude (de mesure)

paramètre, associé à un résultat de mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande

[IEC 60050-300: 2001, 311-01-02]

NOTE 1 L'incertitude est positive et donnée sans signe.

NOTE 2 Il convient de ne pas confondre l'incertitude de mesure d'une tension avec la tolérance d'une tension d'essai spécifiée.

NOTE 3 Pour plus d'informations, voir les Annexes A et B.

### **3.6.4 incertitude-type**

*u*

incertitude d'un résultat de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type

[ISO/CEI Guide 98-3 (GUM 2.3.1)]

NOTE 1 L'incertitude-type associée à une estimation d'un mesurande a la même dimension que le mesurande.

NOTE 2 Dans certains cas, l'incertitude-type relative d'une mesure peut être appropriée. L'incertitude-type relative d'une mesure est l'incertitude-type divisée par le mesurande et elle est donc sans dimension.

### **3.6.5 incertitude-type composée**

*u<sub>C</sub>*,

incertitude type du résultat d'une mesure obtenu à partir des valeurs d'un certain nombre d'incertitudes d'autres grandeurs, égale à la racine carrée positive de la somme des différents termes, ces termes étant les variances ou covariances des autres grandeurs pondérées intervenant dans le résultat de mesure

[ISO/IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.4)]

### **3.6.6 Incertitude élargie**

*U*,

grandeur définissant un intervalle autour du résultat d'une mesure et dont on peut s'attendre à ce qu'elle comprenne une fraction importante de la distribution des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande

[ISO/IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.5)]

NOTE 1 Incertitude élargie est l'expression correspondant le plus étroitement au terme « incertitude globale » utilisé dans des éditions antérieures de la présente norme.

NOTE 2 La valeur vraie mais inconnue de la tension d'essai peut se trouver en dehors des limites données par l'incertitude car la probabilité de couverture est < 100 % (voir 3.6.7).

### **3.6.7 facteur d'élargissement**

*k*,

facteur numérique à multiplier avec l'incertitude type composée pour obtenir une incertitude élargie

[ISO/ IEC Guide 98-3 (GUM 2.3.6)]

NOTE Pour une probabilité de couverture de 95 % et une distribution de probabilité normale (gaussienne), le facteur d'élargissement est approximativement  $k = 2$ .

### **3.6.8 évaluation de Type A**

méthode d'évaluation d'une incertitude-type par analyse statistique d'une série d'observations

### **3.6.9 évaluation de Type B**

méthode d'évaluation d'une incertitude-type par un moyen autre qu'une analyse statistique d'une série d'observations

### 3.6.10

#### **traçabilité**

propriété du résultat d'une mesure ou de la valeur d'un étalon telle qu'elle puisse être reliée à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées

[IEC 60050-300: 2001, 311-01-15]

### 3.6.11

#### **Laboratoire national de métrologie**

institution désignée par une décision nationale, ayant pour objet d'élaborer et de tenir à jour des étalons de mesure nationaux pour une ou plusieurs grandeurs

## 3.7 Définitions relatives aux essais sur des systèmes de mesure

### 3.7.1

#### **étalonnage**

ensemble des opérations établissant, en référence à des étalons, la relation qui existe, dans les conditions spécifiées, entre une indication et un résultat de mesure

[IEC 60050-300: 2001, 311-01-09]

NOTE La détermination du coefficient de conversion est incluse dans l'étalonnage.

### 3.7.2

#### **essai de type**

essai de conformité effectué sur une ou plusieurs entités représentatives de la production

[IEC 60050-151: 2001, 151-16-16]

NOTE Pour un système de mesure, il s'agit d'un essai effectué sur un constituant ou sur un système de mesure complet de la même conception pour en déterminer les caractéristiques dans les conditions d'utilisation.

### 3.7.3

#### **essai individuel de série**

essai de conformité effectué sur chaque entité en cours ou en fin de fabrication

[IEC 60050-151: 2001, 151-16-17]

NOTE Il s'agit d'un essai effectué sur chaque constituant ou sur chaque système de mesure complet pour en déterminer les caractéristiques dans les conditions d'utilisation.

### 3.7.4

#### **essai de détermination des caractéristiques**

essai effectué sur un système de mesure complet pour en déterminer les caractéristiques dans les conditions de fonctionnement

### 3.7.5

#### **contrôle des caractéristiques**

procédure simplifiée pour s'assurer que le résultat de l'essai de détermination des caractéristiques le plus récent est toujours valide

### 3.7.6

#### **enregistrement de référence (mesures de chocs uniquement)**

enregistrement réalisé dans des conditions spécifiées lors d'un essai de détermination des caractéristiques et retenu pour comparaison avec des enregistrements réalisés lors de contrôles ou d'essais postérieurs dans des conditions identiques

NOTE Les enregistrements de référence sont souvent appelés « signatures » et sont utilisés comme caractéristiques du comportement dynamique. Dans les mesures de tension de choc, ils sont généralement extraits des mesures de réponse indicelle (Annexe C).

## **4 Procédures de qualification et d'utilisation des systèmes de mesure**

### **4.1 Principes généraux**

Chaque système de mesure approuvé doit être soumis à des essais initiaux, suivis d'essais de détermination des caractéristiques (périodiques, voir 4.2) et de contrôles des caractéristiques (périodiques, voir 4.3) pendant toute sa durée de vie. Les essais initiaux consistent en des essais de type (effectués sur un constituant ou système de même conception) et des essais individuels de série (effectués sur chaque constituant ou système).

Les essais de détermination des caractéristiques et contrôles des caractéristiques doivent prouver que le système de mesure peut mesurer les tensions d'essai prévues dans le domaine d'incertitudes donné dans la présente norme et que les mesures sont traçables par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux de mesure. Le système est approuvé uniquement pour les agencements et les conditions d'utilisation décrites dans son recueil de caractéristiques.

Une exigence essentielle pour un dispositif de conversion, un système de transmission et un appareil de mesure utilisé dans un système de mesure est la stabilité dans la plage donnée pour leurs conditions d'utilisation, de telle sorte que le coefficient de conversion du système de mesure reste constant durant de longues périodes.

Le coefficient de conversion affecté est déterminé par étalonnage lors de l'essai de détermination des caractéristiques. L'utilisateur doit appliquer les essais mentionnés dans la présente norme pour qualifier son ou ses systèmes de mesure. Un utilisateur peut également opter pour la réalisation des essais de détermination des caractéristiques par un Institut national de métrologie ou par un Laboratoire d'étalonnage accrédité pour la grandeur à étalonner. Dans tous les cas, l'utilisateur doit inclure les données d'essai dans le recueil de caractéristiques.

Tout étalonnage doit être traçable par rapport à des normes nationales et/ou internationales. L'utilisateur doit s'assurer que tout étalonnage effectué en autonome est réalisé par du personnel compétent utilisant des systèmes de mesure de référence et des procédures adaptées.

**NOTE** Les étalonnages réalisés par un Laboratoire national de métrologie, ou par un laboratoire accrédité pour les grandeurs étalonnées et consignées dans le cadre de l'accréditation, sont considérés comme traçables par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux.

### **4.2 Calendrier des essais de détermination des caractéristiques**

Pour conserver la qualité d'un système de mesure, son ou ses coefficients de conversion affectés doivent être déterminés par des essais de détermination des caractéristiques périodiques. L'intervalle entre les essais de détermination des caractéristiques doit être basé sur l'évaluation de la stabilité antérieure du système de mesure. Il est recommandé de répéter annuellement l'essai de détermination des caractéristiques mais l'intervalle maximum ne doit pas dépasser cinq ans.

**NOTE** Les intervalles de longue durée entre les essais de détermination des caractéristiques peuvent augmenter le risque d'une modification non détectée apportée au système de mesure.

Un essai de détermination des caractéristiques doit être effectué après chaque réparation importante effectuée sur le système de mesure et à chaque fois que l'on doit utiliser une configuration de circuit se trouvant en dehors des limites mentionnées dans le recueil de caractéristiques.

Lorsqu'un essai de détermination des caractéristiques est requis parce qu'un contrôle des caractéristiques montre que le coefficient de conversion affecté n'est plus valide, la raison de cette modification doit être recherchée avant d'effectuer les essais de détermination des caractéristiques.

### 4.3 Calendrier des contrôles de caractéristiques

Les contrôles de caractéristiques doivent être réalisés à des intervalles de temps basés sur la stabilité du système de mesure telle qu'elle apparaît dans le recueil de caractéristiques. L'intervalle à partir du dernier essai de détermination des caractéristiques ou dernier contrôle des caractéristiques ne doit pas être supérieur à un an.

Pour un système de mesure neuf ou réparé, les contrôles des caractéristiques doivent être effectués à de courts intervalles pour démontrer sa stabilité.

Aucune méthode de référence n'est identifiée pour les contrôles de caractéristiques car l'exactitude requise est moindre que pour les essais de détermination de caractéristiques.

### 4.4 Exigences pour le recueil de caractéristiques

#### 4.4.1 Contenu du recueil de caractéristiques

Les résultats de tous les essais et contrôles, incluant les conditions dans lesquelles les résultats ont été obtenus, doivent être consignés dans le recueil de caractéristiques (stocké en format papier ou électronique si les systèmes qualité et les lois locales l'autorisent) établi et tenu à jour par l'utilisateur. Le recueil de caractéristiques doit identifier de façon unique les constituants du système de mesure et doit avoir une structure permettant de rendre traçables les caractéristiques du système de mesure au fil du temps.

Le recueil de caractéristiques doit au moins comporter les informations suivantes:

- description générale du système de mesure;
- résultats des essais de type et des essais individuels de série effectués sur le dispositif de conversion, le ou les systèmes de transmission et le ou les instruments de mesure et, s'ils sont réalisés, sur le système de mesure;
- résultats des essais de détermination des caractéristiques effectués ultérieurement sur le système de mesure;
- résultats des contrôles de caractéristiques effectués ultérieurement sur le système de mesure.

NOTE La description générale du système de mesure comprend habituellement les principales données et fonctionnalités du système de mesure, telles que la tension de fonctionnement assignée, la ou les formes d'onde, la ou les plages de distances de garde, la durée de fonctionnement ou fréquence maximale d'applications de tension. Pour de nombreux systèmes de mesure, les informations sur le système de transmission ainsi que les configurations à haute tension et de mise à la terre sont importantes. Si elle est requise, une description est également fournie des constituants du système de mesure, y compris par exemple le type et l'identification de l'instrument de mesure.

#### 4.4.2 Exceptions

Pour les systèmes de mesure ou les constituants construits avant la date de publication de la deuxième édition de la CEI 60060-2, c'est-à-dire 1994, les éléments renseignés requis peuvent ne pas être disponibles pour un certain nombre de parties des essais de type et essais individuels de série. Dans ce cas, les essais de détermination des caractéristiques et les contrôles des caractéristiques effectués conformément à des versions antérieures de la présente norme sont réputés adéquats à condition qu'ils montrent que le coefficient de conversion est stable. Les résultats de ces contrôles précédents doivent être intégrés au recueil de caractéristiques.

Des systèmes de mesures approuvés comprenant plusieurs constituants interchangeables peuvent ne faire l'objet que d'un seul recueil de caractéristiques incluant toutes les combinaisons possibles avec le minimum de redites possible. De façon spécifique, chaque dispositif de conversion doit être couvert individuellement, mais les systèmes de transmission et les instruments de mesure peuvent être couverts de manière générique.

#### 4.5 Conditions de fonctionnement

Un système de mesure doit être directement connecté aux bornes de l'objet en essai ou d'une manière telle que la différence de tension entre les bornes de l'objet en essai et le système de mesure soit négligeable. Il convient de réduire au maximum le couplage parasite entre les circuits d'essai et de mesure.

NOTE 1 Il peut être nécessaire d'étudier le couplage parasite.

Un système de mesure approuvé doit avoir une incertitude dans les spécifications de la présente norme dans toutes les plages de conditions de fonctionnement et d'environnement consignées dans le recueil de caractéristiques.

La durée de fonctionnement affectée pour les systèmes de mesure pour tension continue et alternative doit être spécifiée.

NOTE 2 La valeur minimale recommandée pour la durée de fonctionnement affectée est 1 h.

La fréquence maximale d'application pour les tensions de chocs doit être spécifiée.

NOTE 3 La valeur minimale recommandée de la fréquence maximale d'application est d'un ou deux chocs par minute et elle doit être spécifiée en fonction de la taille du dispositif de conversion.

La gamme de conditions environnementales dans lesquelles les constituants du système de mesure satisfont aux exigences de la présente norme doit être déclarée.

#### 4.6 Incertitude

L'incertitude de toutes les mesures effectuées selon la présente Norme internationale doit être évaluée selon le Guide ISO/CEI 98-3.

Les procédures d'évaluation des incertitudes ont été choisies dans le Guide ISO/CEI 98-3 et elles sont présentées dans la présente norme. On considère que ces procédures simplifiées selon l'Article 5 sont suffisantes pour le matériel de mesure et les agencements de mesure couramment utilisés dans un essai à haute tension: toutefois, les utilisateurs peuvent choisir d'autres procédures appropriées dans le Guide ISO/CEI 98-3, dont certaines sont données à l'Annexe A et à l'Annexe B.

En général, le mesurande à prendre en considération est le coefficient de conversion du système de mesure mais il convient dans certains cas aussi de prendre également en compte d'autres grandeurs, telles que les paramètres de temps d'une tension de choc et les erreurs qui y sont associées.

NOTE 1 D'autres mesurandes sont couramment utilisés pour des dispositifs de conversion spécifiques. Par exemple, un diviseur de tension est caractérisé par le rapport de tension et son incertitude dans la gamme de mesures affectées utilisée. Un transformateur de tension est caractérisé par l'erreur de rapport, le déphasage et les incertitudes correspondantes.

Selon le Guide ISO/CEI 98-3, l'incertitude d'une mesure est déterminée en combinant les contributions d'incertitude de Type A et de Type B (voir 5.10, 5.11 et Annexe A). Les contributions sont obtenues à partir des résultats de mesure, des manuels des constructeurs, des certificats d'étalonnage et à partir de l'estimation de valeurs raisonnables des grandeurs d'influence au cours de la mesure. Par exemple, les grandeurs d'influence mentionnées à l'Article 5 comprennent les effets de la température et du voisinage immédiat. On peut en ajouter d'autres si nécessaire, telles que la résolution limitée de l'instrument de mesure.

NOTE 2 La résolution d'un instrument de mesure, par exemple avec peu de chiffres significatifs, peut constituer une source significative d'incertitude.

Au cours de l'essai réel de tension, il est en général nécessaire de tenir compte des grandeurs d'influence supplémentaires, hormis l'incertitude d'étalonnage du coefficient de

conversion déclarée dans le certificat d'étalonnage, afin d'obtenir l'incertitude de mesure de la valeur de la tension d'essai.

L'Article 5 et les Annexes A et B donnent des lignes directrices sur la détermination des contributions d'incertitude qu'il est nécessaire de prendre en compte et sur leur combinaison, comme indiqué à l'Article 5 et dans les Annexes A et B. L'incertitude doit être donnée comme étant l'incertitude élargie pour une probabilité de couverture d'environ 95 % correspondant dans la plupart des cas à un facteur d'élargissement  $k = 2$  dans l'hypothèse d'une distribution normale.

NOTE 3 Dans la présente Norme internationale, les incertitudes du coefficient de conversion et de la mesure de tension (5.2 à 5.10) sont exprimées par les incertitudes relatives au lieu de l'incertitude absolue qui est normalement considérée dans le Guide ISO/CEI 98-3. L'application directe du Guide ISO/CEI 98-3:2008 et la prise en compte des incertitudes absolues sont montrées en 5.11 pour les paramètres de temps ainsi que dans les Annexes A et B.

## **5 Essais et exigences d'essai pour un système de mesure approuvé et ses constituants**

### **5.1 Exigences générales**

Le coefficient de conversion affecté du système de mesure doit être déterminé par étalonnage conformément aux essais de détermination des caractéristiques spécifiés. Le coefficient de conversion affecté est une valeur unique pour la gamme de mesures affectée. Si cela s'avère nécessaire, plusieurs gammes de mesure affectées avec des coefficients de conversion différents peuvent être définies.

Pour un système de mesure de chocs, les essais de détermination des caractéristiques montrent également que sa réponse dynamique est adaptée aux mesures prescrites, et que le niveau d'une perturbation quelle qu'elle soit reste inférieur aux limites spécifiées.

En raison des grandes dimensions de l'appareillage et des conditions environnementales réelles, il convient de réaliser préférentiellement l'étalonnage sur site par comparaison à un système de mesure de référence.

Les systèmes de mesure de plus petites dimensions, ou leurs constituants peuvent être transportés à un autre laboratoire pour un étalonnage dans une configuration qui simule les conditions de fonctionnement, à condition que l'essai de perturbation, lorsqu'il est spécifié, soit réalisé dans l'installation d'essai de l'utilisateur.

Si un dispositif de conversion est sensible aux effets de proximité, la plage de distances de garde dans laquelle le coefficient de conversion est valide doit être déterminée et intégrée au recueil de caractéristiques. Une ou plusieurs plages de distances de garde et les coefficients de conversion respectifs peuvent être affectés.

Le coefficient de conversion d'un système de mesure doit être déterminé dans la gamme de mesures attribuée, de préférence par comparaison à un système de mesure de référence. Cependant, les systèmes de mesure de référence n'étant pas toujours disponibles à des tensions plus élevées, la comparaison à des tensions aussi basses que 20 % de la gamme de mesure affectée peut être effectuée à condition qu'une linéarité ait été déterminée en montant de ce point jusqu'à la limite de la gamme de mesure affectée. Une des méthodes données en 5.3 doit être utilisée pour cette extension.

Tous les équipements utilisés pour déterminer les coefficients de conversion des systèmes de mesure doivent avoir des étalonnages traçables par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux.

NOTE Les étalonnages réalisés par un Laboratoire national de métrologie, ou par un laboratoire accrédité pour les grandeurs étalonnées et consignées dans le cadre de l'accréditation, sont considérés comme traçables par rapport à des étalons nationaux et/ou internationaux.

Les conditions significatives pour le résultat de l'étalonnage du système de mesure approuvé doivent être incluses dans le recueil de caractéristiques.

## 5.2 Étalonnage – Détermination du coefficient de conversion

### 5.2.1 Étalonnage des systèmes de mesure par comparaison à un système de mesure de référence (méthode préférentielle)

#### 5.2.1.1 Mesure par comparaison

Le ou les coefficients de conversion sont déterminés pour un système de mesure complet par comparaison à un système de mesure de référence.

Il convient que la tension d'entrée utilisée pour l'étalonnage soit de mêmes nature, fréquence et forme d'onde que les tensions devant être mesurées. Si cette condition n'est pas remplie, les contributions d'incertitude concernées doivent être estimées.

Pour la comparaison, un système de mesure de référence, traçable par rapport à un Laboratoire national de métrologie, doit être connecté en parallèle avec le système de mesure devant être étalonné. Des précautions doivent être prises pour éviter les boucles de masse entre le ou les dispositifs de conversion et le ou les instruments de mesure. Des relevés de lecture simultanés doivent être effectués sur les deux systèmes. La valeur de la grandeur d'entrée obtenue pour chaque mesure par le système de mesure de référence est divisée par le relevé de lecture correspondant de l'instrument dans le système en essai pour obtenir une valeur  $F_i$  de son coefficient de conversion. La procédure est répétée  $n$  fois pour obtenir la valeur moyenne  $F_g$  du coefficient de conversion du système en essai à un niveau de tension  $U_g$ . La valeur moyenne est donnée par:

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,g}$$

L'écart-type relatif  $s_g$  de  $F_g$  est donné par:

$$s_g = \frac{1}{F_g} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{i,g} - F_g)^2}$$

et l'incertitude-type relative de Type A  $u_g$  de la valeur moyenne  $F_g$  est donnée par (Annexe A):

$$u_g = \frac{s_g}{\sqrt{n}}$$

NOTE 1 En général, un maximum de  $n = 10$  relevés indépendants sont nécessaires.

NOTE 2 Pour les mesures en tension continue et alternative, il convient d'obtenir des relevés indépendants, soit en appliquant la tension d'essai et en effectuant  $n$  relevés, soit en appliquant  $n$  fois la tension d'essai et en effectuant un relevé à chaque fois. Pour les chocs,  $n$  chocs sont appliqués.

Un système de mesure avec plusieurs gammes de mesures affectées (par exemple, un diviseur de tension avec plusieurs parties basse tension) ou différents systèmes de transmission doit être étalonné pour chaque gamme ou système de transmission. Des systèmes de mesure avec des atténuateurs secondaires peuvent être étalonnés pour un seul calibre, si on peut montrer par d'autres essais que la charge de sortie du dispositif de conversion est constante pour tous les calibres. Dans ce cas, toute la plage d'atténuateurs secondaires doit être étalonnée séparément.

Le coefficient de conversion doit être déterminé sur la gamme de mesures affectée par l'une des méthodes suivantes décrites en 5.2.1.2 (préférentielle), 5.2.1.3 et 5.2.2.

### 5.2.1.2 Comparaison sur toute la gamme de mesures affectée

Cet essai comporte à la fois la détermination du coefficient de conversion affecté et la détermination de la linéarité. La détermination du coefficient de conversion doit être effectuée par comparaison directe avec un système de mesure de référence aux niveaux minimum et maximum de la gamme de mesures affectée et sur au moins trois niveaux intermédiaires à peu près également répartis (Figure 2). Le coefficient de conversion affecté  $F$  est pris égal à la valeur moyenne de tous les coefficients de conversion  $F_g$  enregistrés à  $h$  niveaux de tension:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g \text{ pour } h \geq 5$$

L'incertitude-type de la détermination du coefficient de conversion affecté  $F$  est obtenue comme étant la plus élevée des incertitudes-types individuelles de type A (Figure 3):

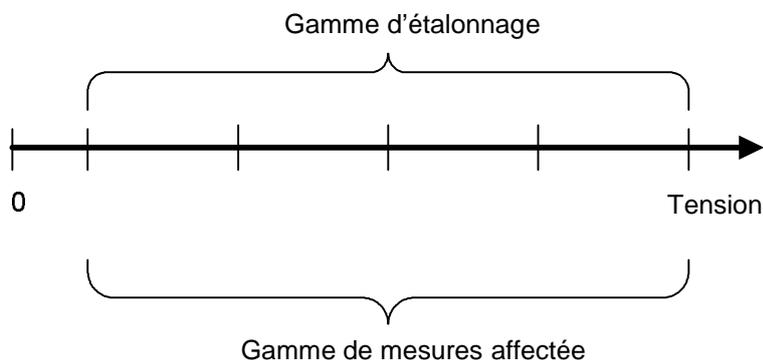
$$u_A = \max_{g=1}^h u_g .$$

L'effet d'une non-linéarité dans  $F$  est estimé comme étant l'incertitude-type de Type B exprimée par

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^h \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| .$$

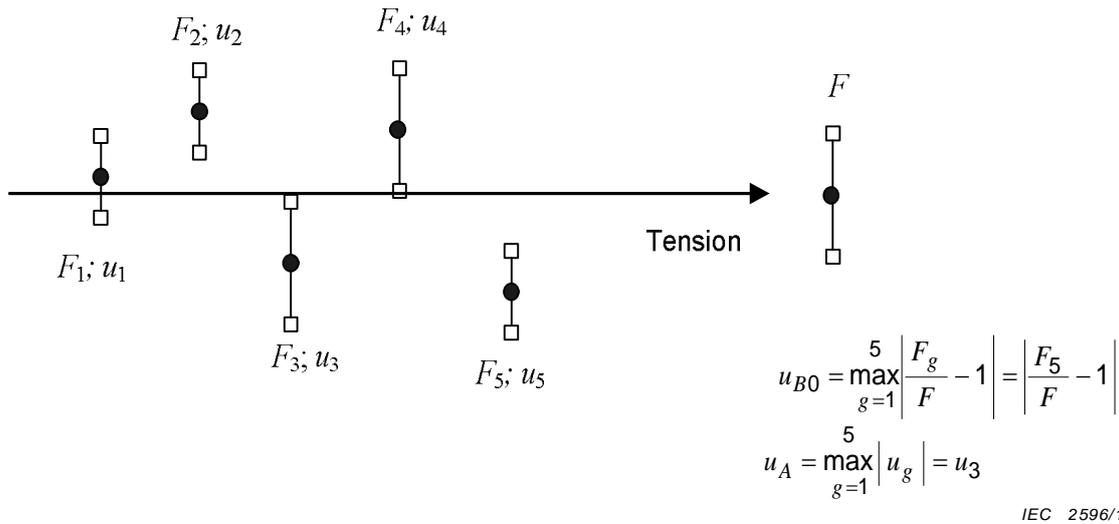
NOTE 1 Une valeur arrondie  $F_o$  peut être retenue comme coefficient de conversion affecté si la différence entre  $F_o$  et  $F$  est introduite comme une contribution d'incertitude de Type B dans l'estimation de l'incertitude élargie du coefficient de conversion  $F_o$ .

NOTE 2 Il convient de mentionner dans le certificat d'étalonnage les coefficients de conversion individuels et leurs incertitudes aux  $h$  niveaux de tension.



IEC 2595/10

Figure 2 – Étalonnage par comparaison sur toute la gamme de tensions



**Figure 3 – Contributions d'incertitude de l'étalonnage (exemple avec un minimum de 5 niveaux de tension)**

**5.2.1.3 Comparaison sur une gamme limitée de tensions**

Lorsque la gamme de mesures affectée dépasse la capacité du système de mesure de référence, le coefficient de conversion doit être déterminé par comparaison jusqu'à la tension maximale du système de mesure de référence. La comparaison doit toujours être effectuée à une tension qui n'est pas inférieure à 20 % de la limite supérieure de la gamme de mesure affectée (Figure 4).

La comparaison doit être complétée par un essai de linéarité selon 5.3. La contribution d'incertitude liée à la linéarité doit être prise en compte dans le calcul de l'incertitude de mesure lors de l'utilisation du système de mesure, voir 5. 10. 3.

La comparaison au système de mesure de référence est effectuée à  $a \geq 2$  niveaux de tension, où le niveau de tension le plus élevé est égal à la tension maximale du système de mesure de référence. L'essai de linéarité nécessaire est effectué à  $b \geq 2$  niveaux de tension, l'un des niveaux étant égal au niveau maximum de comparaison (voir 5.3). Les niveaux de tension doivent en outre être choisis de sorte qu'ils contiennent au moins les niveaux minimum et maximum de la gamme de mesures affectée, et que

$$a + b \geq 6$$

Le coefficient de conversion affecté  $F$  est retenu comme étant la valeur moyenne des coefficients de conversion enregistrés avec le système de mesure de référence:

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^a F_g$$

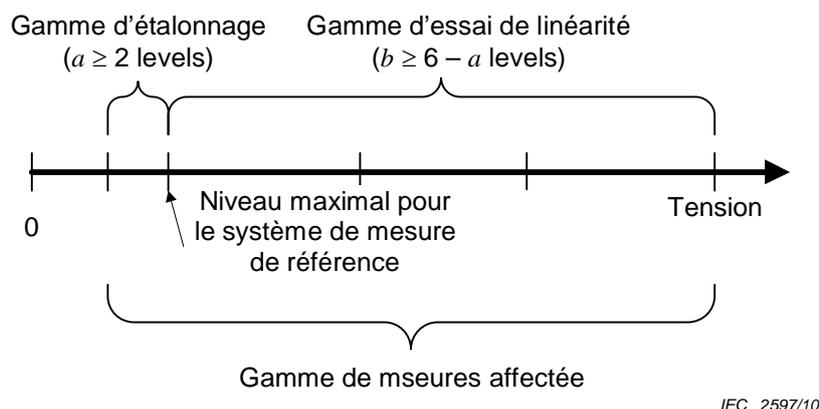
Le Type A d'incertitude-type du coefficient de conversion  $F_m$  est obtenu comme la plus élevée des incertitudes-types  $u_g$  individuelles

$$u_A = \max_{g=1}^a u_g$$

et une contribution de non-linéarité pour les valeurs d'étalonnage

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^a \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|.$$

NOTE Une valeur arrondie  $F_0$  peut être retenue comme coefficient de conversion affecté si la différence entre  $F_0$  et  $F$  est introduite comme une contribution d'incertitude de Type B dans l'estimation de l'incertitude élargie du coefficient de conversion  $F_0$ .



IEC 2597/10

**Figure 4 – Étalonnage par comparaison sur une gamme limitée de tensions, avec un essai de linéarité supplémentaire**

### 5.2.2 Détermination du coefficient de conversion d'un système de mesure à partir des coefficients de conversion de ses constituants (méthode alternative)

Le coefficient de conversion affecté du système de mesure doit être déterminé comme étant le produit des coefficients de conversion de son dispositif de conversion, de son système de transmission, de tout atténuateur secondaire et de son instrument de mesure.

Pour le dispositif de conversion et le système de transmission ou leur combinaison, le coefficient de conversion doit être mesuré par l'une des méthodes données ci-dessous. Des essais séparés ne sont pas requis pour les systèmes de transmission qui sont constitués uniquement de câbles. Le coefficient de conversion d'un instrument de mesure est déterminé conformément à la norme concernée (voir par exemple la CEI 61083-1 et la CEI 61083-2) ou en effectuant un étalonnage et des essais conformes à cet Article 5).

La détermination du coefficient de conversion d'un constituant peut être effectuée par l'une des méthodes suivantes:

- comparaison à un constituant de référence (par exemple, un diviseur de tension comparé à un diviseur de tension de référence) ou application d'un appareil d'étalonnage précis à basse tension;
- mesures simultanées de ses grandeurs d'entrée et de sortie;
- une méthode en pont ou une mesure précise de rapport à basse tension;
- calcul basé sur la mesure des impédances.

NOTE 1 Il convient de veiller à s'assurer que les capacités « parasites » ou les couplages appropriés ainsi que l'influence mutuelle entre les constituants soient compris dans la mesure.

Pour chaque constituant du système de mesure, les contributions d'incertitude de Type A et de Type B doivent être estimées (5.2 à 5.9) et l'incertitude composée de chaque constituant doit être déterminée (5.10) en tenant compte des contributions d'incertitude des dispositifs de mesure utilisés pour les étalonnages.

NOTE 2 L'estimation des contributions d'incertitude dans la méthode d'étalonnage des constituants requiert une analyse de chaque constituant sur toute la gamme de conditions – tension, température, effet de proximité, etc. – pouvant avoir une influence sur le résultat. Cette analyse est complexe et requiert une compréhension approfondie du processus de mesure.

L'incertitude élargie de la mesure de tension est obtenue en combinant ces incertitudes composées des constituants conformément aux dispositions du Guide ISO/CEI 98-3 (voir aussi les Annexes A et B, en particulier l'Exemple B.2).

L'estimation de l'incertitude de mesure du paramètre de temps doit être effectuée en appliquant les dispositions de 5.11 et les mêmes principes que pour la mesure de tension.

### 5.3 Essais de linéarité

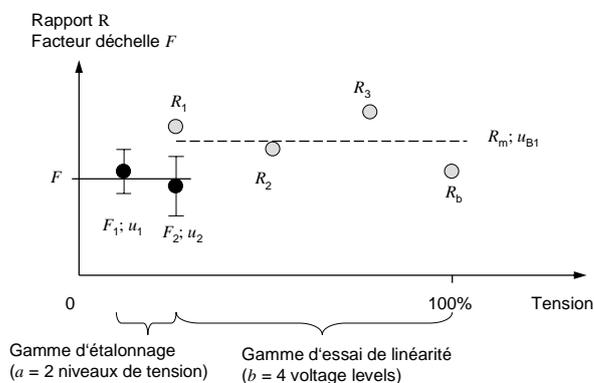
#### 5.3.1 Application

L'essai vise seulement à fournir une extension de la validité du coefficient de conversion à partir de la tension maximale à laquelle un étalonnage selon 5.2.1.3 a été effectué jusqu'à la limite supérieure de la gamme de mesures attribuée (Figure 4).

La grandeur de sortie du système de mesure doit être comparée à celle d'un dispositif ou système qui a prouvé sa linéarité ou qui peut être présumé linéaire sur toute la gamme de tensions (voir 5.3.2). Le fait de ne pas prouver la linéarité par une telle méthode ne signifie pas nécessairement que le système de mesure est non linéaire. Dans ce cas, une autre méthode convenant à l'essai de linéarité doit être choisie. Le rapport du relevé de lecture entre le système de mesure et le dispositif ou système de comparaison doit être établi comme décrit en 5.2.1.1 pour  $b$  différentes tensions en descendant de la limite supérieure de la gamme de mesures attribuée jusqu'à la tension à laquelle le coefficient de conversion a été déterminé (Figure 4).

L'évaluation de la linéarité est basée sur l'écart maximal des rapports  $R_g$  par rapport à la moyenne  $R_m$  des  $b$  rapports de la tension mesurée à la tension correspondante du dispositif de comparaison. L'écart maximal est retenu comme étant une estimation de Type B de l'incertitude-type liée à non-linéarité du coefficient de conversion dans la gamme de tensions étendue (Figure 5):

$$u_{B1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \max_{g=1}^b \left| \frac{R_g}{R_m} - 1 \right|$$



IEC 2598/10

### Légende

$F_1, F_2$  Coefficients de conversion déterminés par étalonnage avec un diviseur de référence dans la gamme d'étalonnage

$u_1, u_2$  incertitudes-types des coefficients de conversion  $F_1$  et  $F_2$

$F$  moyenne de  $F_1$  et  $F_2$

$R_1 \dots R_b$  rapports déterminés dans la gamme de tensions étendue, pour l'essai de linéarité seulement.

$R_m$  moyenne des rapports déterminés avec un dispositif linéaire dans la gamme de tensions étendue

$u_{B1}$  incertitude-type de type B due à la non-linéarité du coefficient de conversion dans la gamme de tensions étendue

**Figure 5 – Essai de linéarité du système de mesure avec un dispositif linéaire dans la gamme de tensions étendue**

### 5.3.2 Autres méthodes dans l'ordre de pertinence

#### 5.3.2.1 Comparaison avec un système de mesure approuvé

La grandeur de sortie du système de mesure doit être comparée à la grandeur de sortie d'un système de mesure approuvé selon les procédures décrites en 5.3.1. La linéarité du système de mesure approuvé doit avoir été établie de préférence avec la méthode de référence pendant l'étalonnage donnée en 5.2.

#### 5.3.2.2 Comparaison avec une tension d'entrée d'un générateur haute tension linéaire

La grandeur de sortie du système de mesure doit être comparée à la tension d'entrée du générateur haute tension linéaire en tenant compte des niveaux de tension décrits en 5.3.1.

NOTE 1 La méthode s'applique particulièrement à la tension de charge des générateurs de chocs à plusieurs étages ou à la tension alternative d'entrée d'un générateur de tension continue à plusieurs étages.

NOTE 2 Il convient de prêter attention à la charge égale de tous les étages d'un générateur de tension. Il convient de laisser à tous les étages un temps suffisant pour se charger avant de déclencher le générateur.

### 5.3.2.3 Comparaison avec la tension de sortie d'un mesureur de champ électrique (sonde de champ)

Le système de mesure peut être comparé à un système de mesure réagissant au champ électrique placé de façon à mesurer un champ proportionnel à la tension mesurée. Le mesureur de champ électrique doit avoir une réponse adaptée au type de tension à mesurer.

NOTE 1 On s'attend à ce que la méthode fonctionne jusqu'à la tension d'apparition de l'effet de couronne (voir CEI 60270).

NOTE 2 Cette méthode est applicable à la tension alternative et aux tensions de chocs.

### 5.3.2.4 Comparaison avec un éclateur étalon selon la CEI 60052

Le système de mesure pour tension alternative ou tension de choc de foudre/de manœuvre peut être vérifié par rapport à un éclateur à sphères. Pour un système de mesure pour tension continue, un éclateur pointe/pointe doit être appliqué. Dans les deux cas, la comparaison doit être effectuée conformément aux dispositions de la CEI 60052.

L'essai complet de linéarité doit être effectué en un temps suffisamment court pour que les conditions atmosphériques ne varient pas et que des corrections climatiques ne soient ainsi pas nécessaires. Dans le cas contraire, on doit appliquer des corrections selon la CEI 60060-1 en se basant sur les conditions atmosphériques enregistrées.

### 5.3.2.5 Méthode pour les dispositifs de conversion constitués de plusieurs éléments (diviseurs de tension)

Pour un dispositif de conversion constitué de plusieurs unités à haute tension identiques, l'essai suivant doit être réalisé:

- un essai de type sur un dispositif de conversion complet équivalent (équipé de ses électrodes) comme spécifié dans les Articles 6 à 9;
- une mesure de la capacité et/ou de la résistance de chaque unité à haute tension à cinq niveaux de tension également répartis (similaire à celui spécifié en 5.2.1.2). Le coefficient de conversion doit être calculé pour chaque tension à partir des valeurs de capacité et/ou de résistance et de celle de la partie basse tension.
- une vérification du fait que le dispositif de conversion assemblé n'est pas significativement affecté par l'effet de couronne et par d'autres influences à la limite supérieure de la gamme de mesure affectée.

NOTE Des effets significatifs peuvent être provoqués par un effet de couronne visible et audible ou par un courant de fuite.

## 5.4 Comportement dynamique

### 5.4.1 Généralités

La réponse d'un constituant ou d'un système de mesure doit être déterminée dans des conditions représentatives de son utilisation, en particulier de ses distances de garde aux structures sous tension ou à la terre. Les méthodes de mesure préférentielles sont la réponse amplitude/fréquence pour les tensions continues ou alternatives et la détermination des coefficients de conversion et des paramètres de temps aux limites supérieure et inférieure de l'époque nominale pour les tensions de chocs (5.4.3). Des informations complémentaires sur les mesures de réponse indicielle unitaire sont données dans l'Annexe C.

Une estimation de Type B de l'incertitude-type relative liée au comportement dynamique est donnée par:

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right|,$$

où  $k$  est le nombre de déterminations de coefficient de conversion dans une plage de fréquences ou dans une plage de paramètres de temps de chocs définissant l'époque nominale, les  $F_i$  sont les coefficients de conversion individuels et  $F$  est le coefficient de conversion moyen dans l'époque nominale.

#### 5.4.2 Détermination de la réponse amplitude/fréquence

Le système ou constituant est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement à bas niveau, et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est répétée pour une plage appropriée de fréquences. Les écarts du coefficient de conversion sont évalués selon la formule (5.4.1) ci-dessus.

#### 5.4.3 Méthode de référence pour les systèmes de mesure des tensions de chocs

Des enregistrements de la tension de choc utilisés pour l'étalonnage du coefficient de conversion décrit en (5.2) sont utilisés pour les limites de l'époque nominale, et la contribution d'incertitude des mesures de tension et des paramètres de temps doit être évaluée selon la formule (5.4.1) ci-dessus.

NOTE Pour plus d'informations sur la mesure et l'évaluation de la réponse indicielle unitaire, voir Annexe C.

### 5.5 Stabilité à court terme

La tension maximale de la gamme de mesures affectée doit être appliquée en permanence au système de mesure (ou à la fréquence affectée dans le cas de chocs) pendant une durée en rapport avec l'utilisation présumée. Le coefficient de conversion doit être mesuré dès que le niveau de tension maximal a été atteint et de nouveau immédiatement avant que la tension ne soit réduite.

NOTE 1 L'essai de stabilité à court terme vise à couvrir les effets de l'auto-échauffement sur le dispositif de conversion.

NOTE 2 Il convient que la période d'application de la tension ne soit pas plus longue que la durée de fonctionnement affectée mais elle peut être limitée à une durée suffisante pour atteindre l'équilibre.

Le résultat de l'essai est une estimation de la variation du coefficient de conversion pendant la durée d'application de la tension à partir de laquelle la contribution d'incertitude-type est obtenue comme étant une estimation de Type B:

$$u_{B3} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right|,$$

où  $F_{before}$  et  $F_{after}$  sont les coefficients de conversion avant et après l'essai de stabilité à court terme.

### 5.6 Stabilité à long terme

La stabilité du coefficient de conversion doit être prise en considération et évaluée sur une longue durée; elle est en général estimée comme une contribution d'incertitude valide pendant une durée d'utilisation projetée (en général jusqu'au prochain étalonnage),  $T_{use}$ . L'évaluation peut être basée sur des données du constructeur ou sur les résultats d'une série d'essais de détermination des caractéristiques. Le résultat de l'évaluation est une estimation d'une variation du coefficient de conversion. L'évaluation fournit une contribution d'incertitude-type, qui est une estimation de Type B:

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \cdot \frac{T_{use}}{T_2 - T_1},$$

où  $F_1$  et  $F_2$  sont les coefficients de conversion de deux essais de détermination des caractéristiques consécutifs effectués aux temps  $T_1$  et  $T_2$ .

Lorsque plusieurs résultats d'essai de détermination des caractéristiques sont disponibles, la stabilité à long terme peut être caractérisée par la contribution de Type A:

$$u_{B4} = \frac{T_{use}}{T_{mean}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{F_i}{F_m} - 1 \right)^2}{n-1}},$$

où les résultats des essais de détermination des caractéristiques répétés sont les coefficients de conversion  $F_i$  avec une valeur moyenne  $F_m$  et répétés avec une durée moyenne  $T_{mean}$ .

NOTE La stabilité à long terme est en général déclarée pour une période d'une année.

### 5.7 Effet de la température ambiante

Le coefficient de conversion d'un système de mesure peut être altéré par la température ambiante. Cela peut être quantifié par la détermination du coefficient de conversion à différentes températures ambiantes ou par des calculs basés sur les caractéristiques des constituants. Les détails de l'essai ou des calculs doivent être consignés dans le recueil de caractéristiques.

Le résultat d'un essai ou d'un calcul est une estimation d'une variation du coefficient de conversion due à la température ambiante. L'incertitude-type liée est l'estimation de Type B suivante:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_T}{F} - 1 \right|,$$

où  $F_T$  est le coefficient de conversion à la température considérée et  $F$  est celui qui correspond à la température d'étalonnage.

NOTE 1 Si l'écart  $F_T$  par rapport à  $F$  est supérieur à 1 %, une correction du coefficient de conversion est recommandée.

NOTE 2 L'effet de l'auto-échauffement est couvert par l'essai de stabilité à court terme.

NOTE 3 Un coefficient de correction de température pour le coefficient de conversion peut être utilisé lorsque la température ambiante varie sur une large plage. Il convient que toute correction de température à appliquer soit indiquée dans le recueil de caractéristiques. Lorsqu'une correction de température a été appliquée, l'incertitude  $u_{B5}$  du coefficient de correction de température peut être retenue comme étant la contribution d'incertitude.

### 5.8 Effet de proximité

Les variations du coefficient de conversion ou d'un paramètre d'un dispositif, dues à des effets de proximité, peuvent être déterminées par des mesures réalisées à différentes distances du dispositif au mur mis à la terre ou aux structures au potentiel

Le résultat de l'essai est la variation du coefficient de conversion ayant servi à l'estimation de la contribution d'incertitude-type de Type B.

$$u_{B6} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{F_{max}}{F_{min}} - 1 \right|,$$

où  $F_{\max}$  et  $F_{\min}$  sont les coefficients de conversion pour les distances minimales et maximales aux autres objets.

NOTE 1 Des valeurs différentes pour  $u_{B6}$  peuvent être données pour des plages de distances différentes.

NOTE 2 Certaines installations d'essai peuvent choisir d'approuver leurs systèmes de mesure pour un seul ensemble de distances ou pour quelques ensembles ou plages de distances.

## 5.9 Effet de logiciel

La façon dont le logiciel gère l'évaluation des données mesurées peut introduire une incertitude qui doit être estimée. Cela peut se faire par l'évaluation d'un ensemble de données d'essai par rapport à des valeurs de référence déterminées. Pour les tensions de chocs, voir la CEI 61083-2.

Le résultat de l'évaluation est une estimation de l'influence du traitement des données, à partir de laquelle la contribution d'incertitude-type relative  $u_{B7}$  est obtenue comme une estimation de Type B.

## 5.10 Calcul d'incertitude du coefficient de conversion

### 5.10.1 Généralités

Une procédure simplifiée de détermination de l'incertitude élargie du coefficient de conversion affecté  $F$  d'un système de mesure est donnée ici. Elle est basée sur plusieurs hypothèses, qui peuvent être vraies dans de nombreux cas, mais qu'il convient de vérifier dans chaque cas individuel. Les principales hypothèses sont les suivantes:

- a) il n'y a pas de corrélation entre les grandeurs de mesure;
- b) les incertitudes-types évaluées par la méthode de Type B sont supposées avoir une répartition rectangulaire;
- c) Les trois contributions d'incertitude les plus grandes ont des amplitudes approximativement égales.

Ces hypothèses fournissent une procédure d'évaluation de l'incertitude élargie du coefficient de conversion  $F$ , tant pour la situation d'étalonnage que pour l'utilisation d'un système de mesure approuvé dans les mesures.

L'incertitude élargie d'un étalonnage  $U_{\text{cal}}$  est estimée à partir de l'incertitude de l'étalonnage du système de référence et à partir de l'influence d'autres grandeurs expliquées dans ce paragraphe, telles que la stabilité du système de mesure de référence et les paramètres ambiants pendant l'étalonnage.

L'incertitude élargie d'une mesure  $U_M$  de la grandeur d'essai est évaluée à partir de l'incertitude de l'étalonnage du coefficient de conversion du système de mesure approuvé et à partir de l'influence d'autres grandeurs présentées en 5.10.3, telles que la stabilité du système de mesure et les paramètres ambiants pendant la mesure, car elles ne sont pas prises en compte dans le certificat d'étalonnage.

D'autres méthodes d'estimation de l'incertitude sont mentionnées dans le Guide ISO/CEI 98-3 et sont également décrites dans l'Annexe A et l'Annexe B.

### 5.10.2 Incertitude de l'étalonnage

L'incertitude élargie relative d'un étalonnage du coefficient de conversion  $U_{\text{cal}}$  est calculée à partir de l'incertitude du système de mesure de référence et des incertitudes de Type A et de Type B expliquées dans le présent paragraphe:

$$U_{\text{cal}} = k \cdot u_{\text{cal}} = 2 \sqrt{u_{\text{ref}}^2 + u_A^2 + \sum_{i=0}^N u_{B_i}^2},$$

où:

- $k = 2$  est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture de 95 % environ et une distribution normale;
- $u_{\text{ref}}$  est l'incertitude-type composée du coefficient de conversion du système de mesure de référence à son étalonnage;
- $u_A$  est l'incertitude statistique de Type A dans la détermination du coefficient de conversion.
- $u_{B_0}$  est la contribution de non-linéarité à l'incertitude-type déterminée pendant l'étalonnage du coefficient de conversion (5.2);
- $u_{B_i}$  sont les contributions d'incertitude-type composée du coefficient de conversion dues à la  $i^{\text{ème}}$  grandeur d'influence et évaluées comme contribution de Type B (Annexe A). Ces contributions sont liées au système de mesure de référence et sont dues à la non-linéarité, aux instabilités à court et long terme, etc. et elles sont soit déterminées par des mesures supplémentaires, soit estimées à partir d'autres sources de données conformément aux 5.3 à 5.9. On doit également tenir compte des influences liées aux systèmes de mesure approuvés, par exemple leur stabilité à court terme et la résolution de la mesure si elles sont significatives pendant l'étalonnage.

NOTE Si l'étalonnage est réalisé sur toute la gamme de mesures affectée (5.2.1.2), aucun essai de linéarité séparé (5.3) n'est requis.

Lorsque les hypothèses susmentionnées ne sont pas valables, les procédures données dans l'Annexe A ou, le cas échéant, dans le Guide ISO/CEI 98-3 doivent être appliquées.

Le nombre  $N$  de contributions d'incertitude de Type B peut différer pour les différents types de tensions d'essai (Articles 6 à 9). Plus d'informations sur les contributions de Type B sont données dans les articles correspondants.

Si le coefficient de conversion affecté du système de mesure est calculé à partir de ceux de ses constituants (5.2.2), les incertitudes-types de l'étalonnage des constituants doivent être combinées avec celles décrivant des états supplémentaires du système de mesure et de son environnement (voir Annexe A).

### 5.10.3 Incertitude de mesure en utilisant un système de mesure approuvé

L'estimation de l'incertitude élargie de mesure de la valeur de la tension d'essai relève de la responsabilité de l'utilisateur. Cependant, cette estimation peut être donnée pour une plage définie de conditions de mesure conjointement au certificat d'étalonnage.

L'incertitude élargie de mesure relative de la valeur de la tension d'essai  $U_M$  est calculée à partir de l'incertitude-type composée du coefficient de conversion affecté telle que déterminée dans l'étalonnage du système de mesure approuvé et des contributions d'incertitude supplémentaires de Type B expliquées dans le présent paragraphe.

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + \sum_{i=0}^N u_{B_i}^2},$$

où:

- $k = 2$  est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture de 95 % environ et une distribution normale;

- $u_M$  est l'incertitude-type composée de la mesure en utilisant le système de mesure approuvé, valable pour une durée d'utilisation projetée, par exemple un intervalle d'étalonnage;
- $u_{cal}$  est l'incertitude-type composée du coefficient de conversion du système de mesure approuvé déterminée à l'étalonnage (voir 5.10.2);
- $u_{Bi}$  sont les contributions d'incertitude-type composée du coefficient de conversion du système de mesure approuvé et dues à la  $i^{ème}$  grandeur d'influence, évaluées comme contribution de Type B. Ces contributions sont liées à l'utilisation normale du système de mesure approuvé et sont dues à la non-linéarité, aux instabilités à court et long terme, etc. et elles sont soit déterminées conformément aux 5.3 à 5.9 sur la base de mesures supplémentaires, soit estimées à partir d'autres sources de données. D'autres influences significatives doivent aussi être prises en compte, par exemple la résolution de l'affichage de l'instrument du système de mesure approuvé.

NOTE Le certificat d'étalonnage peut contenir des informations concernant à la fois l'incertitude de l'étalonnage,  $U_{cal}$ , et l'incertitude élargie relative de mesure de la valeur de la tension d'essai,  $U_M$ , lorsque le système de mesure approuvé est utilisé dans des conditions prédéfinies déclarées.

Lorsque les hypothèses susmentionnées en 5.10.1 ne sont pas valides, les procédures données dans l'Annexe A ou, le cas échéant, dans le Guide ISO/CEI 98-3 doivent être appliquées.

Le nombre  $N$  de contributions d'incertitude de type B peut différer pour les différents types de grandeurs d'essai (Articles 6 à 9, tensions et paramètres de temps).

## 5.11 Calcul d'incertitude de la mesure des paramètres de temps (tensions de chocs uniquement)

### 5.11.1 Généralités

Un système de mesure approuvé pour les tensions de chocs doit être capable de mesurer les paramètres de temps ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ ) dans le domaine d'incertitude spécifié lorsque le paramètre s'inscrit dans sa plage spécifiée. Pour le temps de montée, il s'agit généralement de l'époque nominale. La preuve expérimentale peut être apportée soit par la méthode de comparaison, soit par la méthode des constituants. La preuve peut aussi être apportée par le calcul, en utilisant la méthode de convolution sur la base de la réponse indicielle expérimentale (Annexes C et D).

La procédure générale d'évaluation des paramètres de temps et de leurs incertitudes est décrite pour le temps de montée  $T_1$ , déterminé par la méthode de comparaison (voir exemple dans l'Article B.3). Elle est applicable de la même manière aux autres paramètres de temps.

NOTE L'estimation de l'incertitude des paramètres de temps produit une valeur d'incertitude absolue.

### 5.11.2 Incertitude de l'étalonnage des paramètres de temps

Les temps de montée  $T_1$  des  $n$  tensions de chocs doivent être évalués simultanément avec le système de mesure en essai, désigné par X, et le système de référence, désigné par N. On suppose que l'erreur du système de mesure de référence est négligeable. L'erreur moyenne des temps de montée est:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i})$$

et l'écart-type expérimental est:

$$s(\Delta T_1) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_{1,i} - \Delta T_1)^2}$$

où  $\Delta T_{1,i}$  est la  $i^{\text{ème}}$  différence des temps de montée mesurée par les systèmes X et N.

NOTE 1 En général, le nombre maximum de relevés indépendants nécessaires est  $n = 10$ .

NOTE 2 En général, les temps de montée sont évalués à partir des mêmes enregistrements de N et X, utilisés pour évaluer les valeurs de crête pour déterminer le coefficient de conversion (5.2.2.1).

L'incertitude-type de type A est calculée à partir de  $s(\Delta T_1)$ :

$$u_A = \frac{s(\Delta T_1)}{\sqrt{n}}$$

La comparaison est réalisée à un niveau de tension approprié en utilisant au moins deux temps de montée, y compris les valeurs minimale et maximale  $T_1$  de l'époque nominale, pour laquelle le système de mesure doit être approuvé. Une valeur supplémentaire  $T_1$  située au milieu de l'époque nominale peut être ajoutée. Le Type A d'incertitude-type de la mesure des paramètres de temps est obtenu comme étant la plus grande des incertitudes-types individuelles déterminées pour les différentes valeurs de  $T_1$ . Pour chacune des différentes valeurs de  $T_1$ , l'erreur moyenne  $\Delta T_{1,j}$  est calculée comme décrit ci-dessus. La moyenne globale des  $m \geq 2$  erreurs moyennes est:

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta T_{1,j}$$

La différence maximale entre les valeurs individuelles  $\Delta T_{1,j}$  et leur valeur moyenne  $\Delta T_{1m}$  est retenue pour déterminer l'incertitude de Type B  $u_B$  par:

$$u_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^m |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}|$$

NOTE Plus généralement, le système de mesure de référence N peut être caractérisé de la même manière par son erreur moyenne du temps de montée, désignée par  $\Delta T_{1ref}$ , comme déclaré dans son certificat d'étalonnage pour l'époque nominale. L'erreur résultante du système étalonné X lui-même pour les mesures de temps de montée est

$$\Delta T_{1cal} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1ref}$$

L'incertitude élargie de l'étalonnage de paramètre de temps, égale à celle de l'erreur moyenne résultante,  $\Delta T_{1cal}$ , est déterminée par:

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + u_B^2}$$

où:

- $u_{cal}$  est l'incertitude-type composée de l'erreur de temps de montée moyenne,  $\Delta T_{1cal}$ , du système de mesure étalonné;
- $k = 2$  est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture de 95 % environ et une distribution normale;
- $u_{ref}$  est l'incertitude-type composée de l'erreur de temps de montée moyenne,  $\Delta T_{1ref}$ , du système de mesure de référence;

$u_A$  est l'incertitude-type de Type A de l'erreur de temps de montée moyenne,  $\Delta T_{1m}$ , du système de mesure étalonné;

$u_B$  est l'incertitude-type de Type B de l'erreur de temps de montée moyenne,  $\Delta T_{1m}$  du système de mesure étalonné;

Dans certains cas particuliers, les contributions d'incertitude élargie supplémentaires  $U_{cal}$  peuvent être importantes et doivent être prises en considération.

### 5.11.3 Incertitude de mesure des paramètres de temps en utilisant un système de mesure approuvé

L'estimation de l'incertitude élargie d'une mesure de paramètre de temps relève de la responsabilité de l'utilisateur. Cependant, cette estimation peut être donnée pour une plage définie de conditions de mesure conjointement au certificat d'étalonnage.

NOTE Si l'incertitude élargie de l'étalonnage du paramètre de temps est inférieure à 70 % de l'incertitude élargie spécifiée pour la mesure du paramètre de temps dans la présente norme, on peut généralement supposer que l'incertitude d'utilisation ou du système de mesure approuvé pour la mesure du paramètre de temps  $U_M$  est égale à  $U_{cal}$ .

L'incertitude élargie de la mesure des paramètres de temps  $U_M$  doit être calculée par

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2},$$

où:

$u_{cal}$  est l'incertitude-type composée de l'erreur de temps de montée moyen,  $\Delta T_{1cal}$ , du système de mesure étalonné;

$k = 2$  est le facteur d'élargissement pour une probabilité de couverture de 95 % environ et une distribution normale;

$u_{Bi}$  est la contribution de l'incertitude-type composée du paramètre de temps d'un choc en utilisant le système de mesure approuvé et due à la  $i^{\text{ème}}$  grandeur d'influence et évaluée comme une contribution de Type B. Ces contributions sont liées à l'utilisation normale du système de mesure approuvé, et sont dues par exemple à des instabilités à long terme, à l'influence du logiciel, etc., mais aussi à l'influence de l'imperfection de leurs formes d'impulsion. Elles sont déterminées selon les 5.3 à 5.9, soit basées sur des mesures supplémentaires, soit estimées à partir d'autres sources de données. Dans certaines situations, d'autres influences doivent aussi être prises en compte, par exemple la résolution des affichages des instruments;

$u_M$  est l'incertitude-type composée du paramètre de temps d'une tension de choc mesurée avec le système de mesure approuvé, valable pendant une durée d'utilisation projetée.

Des contributions d'incertitude élargie supplémentaires peuvent être importantes dans des cas particuliers et doivent être prises en compte pour calculer  $U_M$ , par exemple lorsque des oscillations de front sont superposées à la tension de choc.

NOTE Lorsque le système de mesure approuvé est utilisé pour mesurer des tensions de chocs sans oscillations, le paramètre de temps mesuré  $T_{1meas}$  peut être corrigé par l'erreur résultante  $\Delta T_{1cal}$  du paramètre de temps concerné déterminée à l'étalonnage:

$$T_{1corr} = T_{1meas} - \Delta T_{1cal}.$$

Les mêmes procédures peuvent être appliquées à d'autres paramètres de temps. Il convient de donner l'incertitude élargie d'un paramètre de temps corrigé,  $T_{1corr}$ , conformément à l'Exemple B.3 de l'Annexe B.

### 5.12 Essai de perturbations (système de transmission et instrument pour les mesures de tension de choc)

L'essai doit être réalisé sur le système de mesure avec son câble ou son système de transmission déconnecté, placé dans sa position habituelle et court-circuité à ses bornes d'entrée, sans changement des connexions de terre du câble ou du système de transmission. Une perturbation doit être créée à l'entrée du système de mesure à l'aide d'une décharge disruptive avec une tension de choc représentative de la tension, de la forme et de l'instant d'une décharge possible à appliquer au cours des essais HT et l'instrument doit enregistrer la grandeur de sortie.

NOTE Pour protéger la tension de sortie du dispositif de conversion (diviseur de tension) contre les surtensions, il peut être conseillé de court-circuiter la borne de sortie du diviseur.

Le rapport de perturbation doit être déterminé comme étant l'amplitude maximale de la perturbation mesurée divisée par la grandeur de sortie du système de mesure lors de la mesure de la tension d'essai.

Pour réussir l'essai de perturbation, il convient que l'amplitude maximale de la perturbation mesurée soit inférieure à 1 % de la grandeur de sortie du système de mesure lors de la mesure de la tension d'essai. Un niveau de perturbation supérieur à 1 % est autorisé à condition de montrer qu'il n'affecte pas la mesure.

### 5.13 Essais de tenue du dispositif de conversion

Un dispositif de conversion doit réussir un essai de tenue à sec exécuté avec une tension de fréquence ou forme requise à un niveau de tension spécifié.

NOTE 1 Le niveau de tension d'essai de tenue recommandé est de 110 % de la tension de fonctionnement assignée. Pour les procédures des essais de tenue, voir la CEI 60060-1.

Les essais de tenue doivent être réalisés dans la ou les polarités pour lesquelles le système doit être utilisé.

Lorsqu'ils sont spécifiés, des essais sous pluie ou sous pollution sont réalisés comme essais de type.

NOTE 2 Il convient que la conception et la construction de n'importe lequel des constituants d'un système de mesure approuvé soit telle qu'il puisse résister à une décharge disruptive de l'objet en essai, sans aucune modification de ses caractéristiques.

## 6 Mesure de tension continue

### 6.1 Exigences pour un système de mesure approuvé

#### 6.1.1 Généralités

L'exigence générale est de mesurer la valeur de la tension d'essai conformément à la CEI 60060-1 (valeur arithmétique moyenne) avec une incertitude élargie  $U_M \leq 3\%$ .

Les limites d'incertitude ne doivent pas être dépassées en présence d'une ondulation dont l'amplitude est à l'intérieur des limites données dans la CEI 60060-1.

NOTE L'attention est attirée sur la présence possible de tensions alternatives couplées au système de mesure et affectant le relevé de l'instrument de mesure.

#### 6.1.2 Contributions d'incertitude

Pour un système de mesure de tension continue, l'incertitude élargie de mesure  $U_M$  doit être évaluée avec une probabilité de couverture de 95 %, conformément à 5.10.3 et si nécessaire aux Annexes A et B. Les essais visant à l'évaluation des contributions d'incertitude qui sont

habituellement envisagées sont résumés dans le Tableau 1. D'autres contributions peuvent être importantes dans certains cas et doivent donc également être prises en compte.

### 6.1.3 Exigence relative au dispositif de conversion

Un dispositif de conversion pour tension continue, habituellement un diviseur de tension résistif ou une impédance de mesure de tension (résistance haute tension), doit, par sa construction, assurer que le courant de fuite sur ses faces isolantes externes a une influence négligeable sur l'incertitude de mesure.

NOTE Pour assurer que l'influence du courant de fuite est négligeable, un courant de mesure allant jusqu'à 0,5 mA à la tension assignée peut être nécessaire.

### 6.1.4 Comportement dynamique pour mesurer les variations de tension

La constante de temps du système de mesure de haute tension ne doit pas être supérieure à 0,25 s pour la mesure des tensions continues qui croissent ou décroissent à des vitesses de l'ordre de 1 % de la valeur de la tension d'essai par seconde.

NOTE En général, les instruments utilisés pour la mesure de la valeur de la tension d'essai (c'est-à-dire, la moyenne arithmétique) ne sont pas affectés par l'ondulation présente. Toutefois, si des instruments à réponse rapide sont utilisés, il peut devenir nécessaire de s'assurer que la mesure n'est pas affectée défavorablement par l'ondulation.

Lorsque la chute de tension transitoire au cours des essais de pollution est mesurée, la constante de temps du système de mesure doit être inférieure au tiers du temps de montée de la tension transitoire.

## 6.2 Essais sur un système de mesure approuvé

Les essais selon l'Article 5, résumés dans le Tableau 1, sont nécessaires pour la qualification des systèmes de mesure et de leurs constituants ainsi que pour l'estimation de l'incertitude élargie de mesure, pour les exceptions, voir 4.4.2.

Les résultats des essais individuels de série et de type peuvent être pris dans les données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque constituant.

**Tableau 1 – Essais requis pour un système de mesure de tension continue approuvé**

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion à l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				6.3
Linéarité, voir NOTE 2		5.3	5.3 (if applicable)	
Comportement dynamique	5.4			
Stabilité à court terme		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (si applicable)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet de proximité; voir NOTE 3	5.8 (si applicable)		5.8 (si applicable)	
Effet de logiciel	5.9 (si applicable)			

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Essai de tenue à sec sur dispositif de conversion	5.13	5.13 (si applicable)		
Essai de tenue sous pluie ou sous pollution sur dispositif de conversion	5.13 (si applicable)			
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure	5.2.2	5.2.2		
Responsabilité	sur les constituants par le fabricant		sur le système par l'utilisateur, voir NOTE 1	
Taux de répétition recommandé	une seule fois (essai individuel de série et de type)		proposé annuellement mais au moins tous les 5 ans	selon la stabilité, mais au moins annuellement

NOTE 1 Il convient d'appliquer également les essais énumérés ci-dessus aux constituants individuels si des essais de détermination des caractéristiques sont réalisés conformément à la méthode alternative (voir 5.2.2). Pour obtenir l'incertitude de mesure du système de mesure approuvé, il convient que celles des constituants soient combinées comme démontré dans l'Annexe B.

NOTE 2 Un essai de linéarité selon 5.3 n'est requis que si l'étalonnage ne peut pas être réalisé par comparaison sur toute la gamme de mesures affectée (5.2.1.2).

NOTE 3 Des effets de proximité peuvent être dus à l'effet de couronne et à des effets de charges d'espace associés. Une étude de l'effet de proximité sur l'essai de détermination des caractéristiques est nécessaire uniquement si les données d'essai de type ne sont pas suffisantes.

## 6.3 Contrôle des caractéristiques

### 6.3.1 Généralités

Le ou les coefficients de conversion d'un système de mesure approuvé peuvent être contrôlés par l'une des méthodes suivantes.

### 6.3.2 Comparaison avec un système de mesure approuvé

Une comparaison doit être effectuée avec un autre système de mesure approuvé, en utilisant la procédure de 5.2, ou avec un éclateur pointe-pointe conformément à la CEI 60052. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à  $\pm 3\%$ , le coefficient de conversion affecté est considéré comme valide. Si la différence est supérieure, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit alors être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques (étalonnage) tel que décrit en 5.2.

### 6.3.3 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant doivent être contrôlés en utilisant un appareil d'étalonnage interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. Si la différence entre le coefficient de conversion de chaque constituant et sa valeur précédente n'est pas supérieure à  $\pm 1\%$ , le coefficient de conversion affecté est considéré comme toujours valide. Si une différence quelconque est supérieure à 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit alors être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques (étalonnage) tel que décrit en 5.2.

## **6.4 Mesure de l'amplitude de l'ondulation**

### **6.4.1 Exigences**

L'amplitude de l'ondulation doit être mesurée avec une incertitude élargie ne dépassant pas 10 % de l'amplitude de l'ondulation ou 1 % de la valeur arithmétique moyenne de la tension continue, la valeur la plus grande étant retenue.

Des systèmes de mesure d'ondulation séparés peuvent être utilisés pour mesurer d'une part, la valeur moyenne de la tension et d'autre part, l'amplitude de l'ondulation ou le même dispositif de conversion peut être utilisé avec deux instruments de mesure différents.

La réponse amplitude/fréquence du système de mesure d'ondulations doit avoir une fréquence limite supérieure à -15 % supérieure à 5 fois la fréquence fondamentale  $f$  de l'ondulation et une fréquence limite inférieure à -15 % qui soit inférieure à 0,5 fois la fréquence fondamentale  $f$  de l'ondulation.

NOTE Dans un grand nombre de cas, l'exigence relative à la fréquence limite inférieure peut être vérifiée à la fréquence de sa tension d'alimentation.

### **6.4.2 Contributions d'incertitude**

Pour un système de mesure de tension d'ondulation, l'incertitude doit être estimée conformément à l'Annexe A et de plus, les contributions d'incertitude mentionnées aux 5.3 à 5.9 doivent être prises en compte. Pour des détails, voir aussi les articles connexes pour la mesure des tensions alternatives (Article 7). D'autres contributions peuvent être importantes dans certains cas individuels et les informations données ici ne le sont qu'à titre de lignes directrices.

### **6.4.3 Étalonnages et essais sur un système de mesure de tension d'ondulation approuvé**

Les essais spécifiés dans le Tableau 2 doivent s'appliquer seulement aux systèmes utilisés pour mesurer l'amplitude de l'ondulation.

La conformité aux exigences d'essai de type peut être prouvée par des essais sur un dispositif de même conception ou parfois être déduite des données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque constituant. Voir 4.4.2 pour les exceptions.

D'autres contributions d'incertitude peuvent être importantes dans certains cas individuels et les informations données ici ne le sont qu'à titre de lignes directrices.

### **6.4.4 Mesure du coefficient de conversion à la fréquence d'ondulation**

Le coefficient de conversion du système de mesure d'ondulation doit être déterminé à la fréquence fondamentale  $f$  de l'ondulation, avec une incertitude élargie ne dépassant pas 3 %. Ce coefficient de conversion peut également être déterminé comme le produit des coefficients de conversion des constituants.

### **6.4.5 Comportement dynamique par la réponse amplitude/fréquence**

Le système de mesure est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement de bas niveau, et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est répétée pour une plage de fréquences approximativement entre 0,5 fois et 7 fois la fréquence fondamentale de l'ondulation. La différence des tensions mesurées ne doit pas être supérieure à 3 dB.

### 6.4.6 Contrôle des caractéristiques pour le système de mesure d'ondulation

Le coefficient de conversion d'un système de mesure approuvé peut être contrôlé par l'une des méthodes décrites pour les systèmes de mesure de tension alternative en 7.4.

**Tableau 2 – Essais requis pour les contributions d'incertitude dans la mesure d'ondulation**

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion du système de mesure à l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				6.4.6/7.4
Comportement dynamique pour l'ondulation		6.4.5	6.4.5	
Stabilité à long terme	5.6			
Effet de la température ambiante	5.7			
Responsabilité	sur les constituants par le fabricant		sur le système par l'utilisateur	
Taux de répétition recommandé	une seule fois (essai individuel de série et de type)		proposé annuellement, mais au moins tous les 5 ans	selon la stabilité, mais au moins annuellement

## 7 Mesure de tension alternative

### 7.1 Exigences pour un système de mesure approuvé

#### 7.1.1 Généralités

L'exigence générale est de mesurer la valeur de la tension d'essai selon la CEI 60060-1 (valeur crête/ $\sqrt{2}$  ou valeur efficace) à sa fréquence assignée avec une incertitude élargie  $U_M \leq 3\%$ .

#### 7.1.2 Contributions d'incertitude

Pour un système de mesure de tension alternative, l'incertitude élargie de mesure  $U_M$  doit être évaluée avec une probabilité de couverture de 95 %, conformément à 5.10.3 et si nécessaire aux Annexes A et B. Les essais visant à l'évaluation des contributions d'incertitude qui sont habituellement envisagées sont résumés dans le Tableau 3. D'autres contributions peuvent être importantes dans certains cas et doivent donc également être prises en compte.

#### 7.1.3 Comportement dynamique

La réponse amplitude-fréquence d'un système de mesure, destiné à fonctionner à une seule fréquence fondamentale  $f_{nom}$ , doit se situer à l'intérieur de la zone marquée de la Figure 6, déduites des exigences relatives à l'incertitude. Les paires de nombres dans le diagramme montrent la fréquence normalisée (échelle logarithmique) et l'écart correspondant aux coins des lignes limites. La performance doit être démontrée de  $f_{nom}$  à  $7 f_{nom}$  par des essais ou une analyse de circuit. La réponse amplitude-fréquence à l'extérieur de cette plage est donnée uniquement à titre d'information.

Un système de mesure peut également être approuvé pour une plage de fréquences fondamentales (par exemple 45 Hz à 65 Hz selon la CEI 60060-1). Le coefficient de conversion doit dans de tels cas être constant, à 1 % près, de la fréquence fondamentale la

plus basse  $f_{nom1}$  jusqu'à la fréquence fondamentale la plus haute  $f_{nom2}$ . La réponse amplitude-fréquence dans l'intervalle de  $f_{nom1}$  à  $7 f_{nom2}$ , doit se trouver dans la zone marquée de la Figure 7. Les paires de nombres sur le diagramme montrent la fréquence normalisée et l'écart correspondant autorisé par rapport à la réponse idéale aux coins des lignes limites. La performance doit être démontrée de  $f_{nom}$  à  $7 f_{nom}$  par des essais ou une analyse de circuit. La réponse amplitude-fréquence à l'extérieur de cette plage est donnée uniquement à titre d'information.

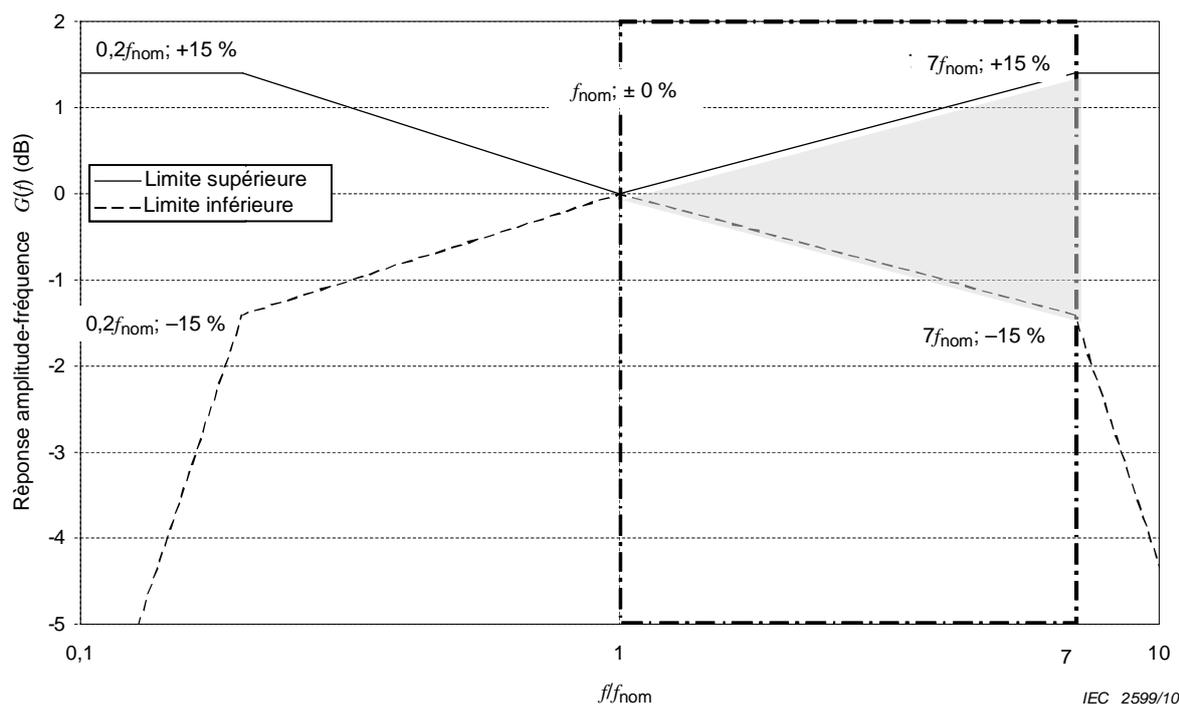
Des exigences spéciales sur le comportement dynamique peuvent être spécifiées par le Comité d'études compétent.

NOTE 1 Les systèmes de mesure conformes à ces exigences sont considérés avoir une réponse en fréquence adaptée à la mesure du taux de distorsion harmonique totale (THD) sur la tension d'essai.

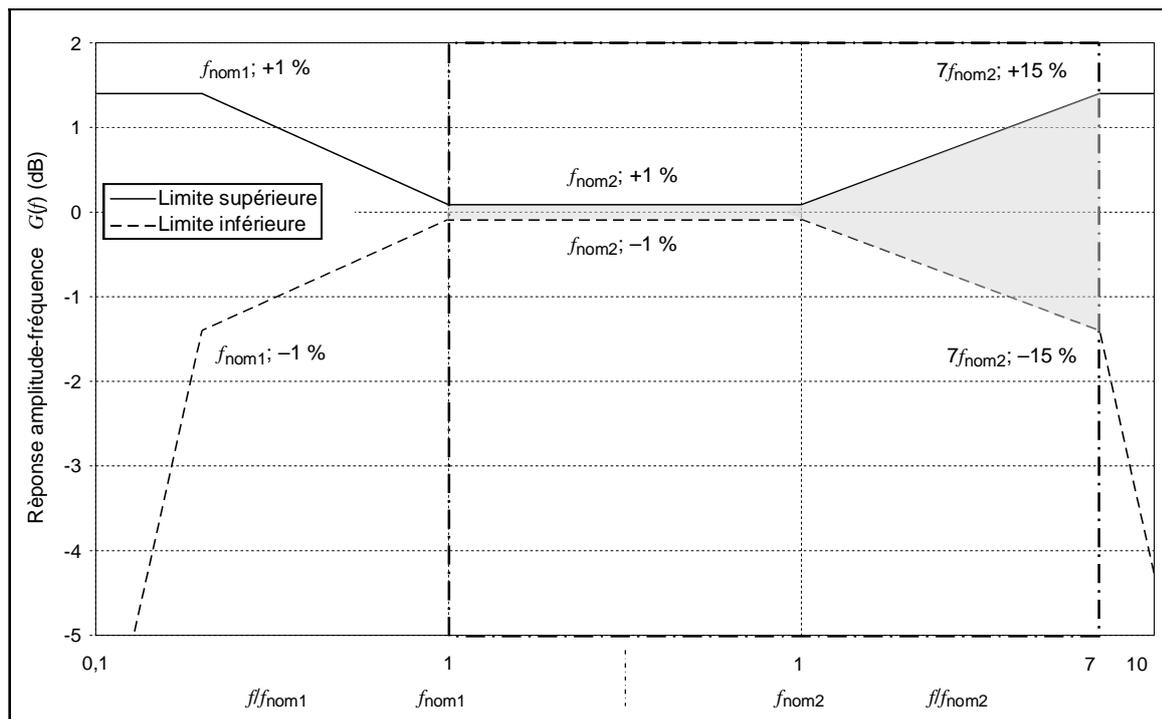
NOTE 2 La réponse en fréquence à l'extérieur de la zone marquée, bien qu'elle ne soit pas requise, représente une bonne pratique.

NOTE 3 On peut renoncer aux mesures de réponse amplitude-fréquence pour les systèmes de mesure utilisés sur des sources de tension alternative (par exemple, des systèmes résonant série) si l'on peut démontrer que le rapport entre les valeurs crête et efficace de la tension d'essai est égal à  $\sqrt{2}$  à  $\pm 1\%$  pour toutes les conditions de fonctionnement attendues.

NOTE 4 Dans certains cas, il peut être nécessaire de mesurer les tensions transitoires superposées à une tension alternative. Aucune exigence n'est donnée ici, mais on peut se reporter à l'Article 8 qui donne des éléments d'information.



**Figure 6 – Zone ombrée de réponses amplitude-fréquence normalisées acceptables de systèmes de mesure prévus pour des fréquences fondamentales uniques  $f_{nom}$  (à essayer dans la plage  $(1 \dots 7) f_{nom}$ )**



IEC 2600/10

**Figure 7 – Zone ombrée de réponses amplitude-fréquence normalisées acceptables de systèmes de mesure prévus pour une plage de fréquences fondamentales  $f_{nom1}$  à  $f_{nom2}$  (à essayer dans la plage  $f_{nom1}$  à  $7 f_{nom2}$ )**

### 7.2 Essais sur un système de mesure approuvé

Les essais selon l'Article 5, résumés dans le Tableau 3, sont nécessaires pour la qualification d'un système de mesure de tension alternative et de ses constituants ainsi que pour l'estimation de l'incertitude élargie de mesure. Voir 4.4.2 pour les exceptions.

Les résultats des essais individuels de série et de type peuvent être pris dans les données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque unité.

### 7.3 Essai de comportement dynamique

Pour déterminer le comportement dynamique, le système est soumis à une grandeur d'entrée sinusoïdale d'amplitude connue, habituellement à bas niveau, et la grandeur de sortie est mesurée. Cette mesure est répétée pour la plage de fréquences entre 1 fois et 7 fois la fréquence d'essai. Le résultat doit être conforme à 7.1.3.

### 7.4 Contrôle des caractéristiques

#### 7.4.1 Généralités

Le ou les coefficients de conversion d'un système de mesure approuvé peuvent être contrôlés par l'une des méthodes suivantes.

#### 7.4.2 Comparaison avec un système de mesure approuvé

Une comparaison doit être effectuée avec un autre système de mesure approuvé en utilisant la procédure de 5.2, ou avec un éclateur à sphères conforme à la CEI 60052. Si la différence entre les deux valeurs mesurées n'est pas supérieure à  $\pm 3 \%$ , le coefficient de conversion affecté est considéré comme toujours valide. Si la différence est supérieure, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit alors être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques (étalonnage) (voir 5.2).

### 7.4.3 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant peuvent être contrôlés en utilisant un appareil d'étalonnage interne ou externe dont l'incertitude élargie ne dépasse pas 1 %. Si la différence entre chaque coefficient de conversion et sa valeur précédente ne diffère pas de plus de  $\pm 1$  %, le coefficient de conversion affecté est considéré comme étant toujours valide. Si une différence quelconque est supérieure à 1 %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée (voir 5.2).

**Tableau 3 – Essais requis pour un système de mesure de tension alternative approuvé**

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion à l'étalonnage			5.2	
Contrôle du coefficient de conversion				7.4
Linéarité, voir NOTE 2		5.3	5.3 (si applicable)	
Comportement dynamique	5.4/7.3		5.4	
Stabilité à court terme		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (si applicable)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet de proximité; voir NOTE 3	5.8 (si applicable)		5.8 (si applicable)	
Effet de logiciel	5.9 (si applicable)			
Essai de tenue à sec sur dispositif de conversion	5.13	5.13 (si applicable)		
Essai de tenue sous pluie ou sous pollution sur dispositif de conversion	5.13 (si applicable)			
Coefficient de conversion d'un dispositif de conversion	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion d'un système de transmission autre qu'un câble	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion d'un instrument de mesure	5.2.2	5.2.2		
Responsabilité	sur les constituants par le fabricant		sur le système, par l'utilisateur, voir NOTE 1	
Taux de répétition recommandé	une seule fois (essai individuel de série et de type)		proposé annuellement mais au moins tous les 5 ans	selon la stabilité mais au moins annuellement
NOTE 1 Il convient d'appliquer également les essais énumérés ci-dessus aux constituants individuels si des essais de détermination des caractéristiques sont réalisés conformément à la méthode alternative (voir 5.2.2). Pour obtenir l'incertitude de mesure du système de mesure approuvé, il convient que celles des constituants soient combinées comme démontré dans l'Annexe B.				
NOTE 2 Un essai de linéarité selon 5.3 n'est requis que si l'étalonnage ne peut pas être réalisé par comparaison sur toute la gamme de mesures (5.2.1.2).				
NOTE 3 Une étude de l'effet de proximité sur l'essai de détermination des caractéristiques est nécessaire uniquement si les données d'essai de type ne sont pas suffisantes.				

## 8 Mesure de tension de choc de foudre

### 8.1 Exigences pour un système de mesure approuvé

#### 8.1.1 Généralités

Les exigences générales sont:

- mesurer la valeur de tension d'essai selon la CEI 60060-1 pour les chocs pleins et coupés sur la queue avec une incertitude élargie  $U_{M1} \leq 3 \%$ ;
- mesurer la valeur de crête des chocs coupés sur le front avec une incertitude élargie  $U_{M2} \leq 5 \%$  ( $0,5 \mu s < T_c < 2 \mu s$ );
- mesurer les paramètres de temps qui définissent la forme d'onde selon la CEI 60060-1 avec une incertitude élargie  $U_{M3} \leq 10 \%$ .
- mesurer les oscillations qui peuvent être superposées sur un choc pour s'assurer qu'elles ne dépassent pas les niveaux autorisés donnés dans la CEI 60060-1.

NOTE Aucune recommandation n'est donnée pour la mesure de l'effondrement de la tension car aucun comité CEI relatif à l'appareillage n'a, jusqu'à présent, spécifié d'exigence.

#### 8.1.2 Contributions d'incertitude

Pour un système de mesure de tension de choc de foudre, l'incertitude élargie de mesure  $U_M$  doit être évaluée avec une probabilité de couverture de 95 %, conformément à 5.10.3, 5.11.3 et si nécessaire aux Annexes A et B. Les essais visant à l'évaluation des contributions d'incertitude qui sont habituellement envisagées sont résumés dans le Tableau 4. D'autres contributions peuvent être importantes dans certains cas et doivent donc également être prises en compte.

#### 8.1.3 Exigence relative à l'instrument de mesure

L'instrument de mesure doit satisfaire aux exigences de la CEI 61083-1 et CEI 61083-2.

#### 8.1.4 Comportement dynamique

Le comportement dynamique d'un système de mesure permet la mesure de la tension crête et des paramètres de temps sur l'époque nominale de formes d'onde spécifiées dans le recueil de caractéristiques lorsque:

- le coefficient de conversion est constant à l'intérieur des limites suivantes:
  - $\pm 1 \%$  pour les chocs pleins et ceux coupés sur la queue
  - $\pm 3 \%$  pour les chocs coupés sur le front
- l'incertitude élargie de la mesure des paramètres de temps ne dépasse pas 10 %.

NOTE 1 Afin de reproduire, dans la courbe enregistrée, les oscillations qui peuvent être superposées à une impulsion, la fréquence limite supérieure appropriée peut être de plusieurs MHz. Un système de mesure avec un paramètre de réponse  $T_{\alpha}$  inférieur ou égal à plusieurs dizaines de nanosecondes peut être considéré comme approprié (voir Annexe C). Ces limites sont actuellement à l'étude.

NOTE 2 De préférence, un seul système de mesure est utilisé pour mesurer toutes les grandeurs requises, à savoir la valeur crête, les paramètres de temps et les oscillations. Cependant, de nombreux systèmes qui pourraient être approuvés pour des mesures de valeur de crête et de paramètres de temps ne peuvent pas être approuvés pour les mesures des oscillations. Dans ce cas, un système de mesure peut être approuvé pour les mesures de tension de crête et de paramètres de temps alors qu'un système auxiliaire est approuvé pour les mesures des oscillations.

#### 8.1.5 Connexion à l'objet en essai

Le dispositif de conversion doit être connecté directement aux bornes de l'objet en essai. Le dispositif de conversion ne doit pas être connecté entre la source de tension et l'objet en essai. La connexion au dispositif de conversion doit être telle que le système de mesure ne

soit parcouru que par son propre courant. Il convient que le dispositif de conversion soit placé de façon à rendre négligeables le couplage entre les circuits de mesure et d'essai.

NOTE Des exceptions sont possibles, par exemple pour un essai avec des tensions combinées (voir CEI 60060-1).

## 8.2 Essais sur un système de mesure approuvé

Les essais selon l'Article 5, résumés dans le Tableau 4, sont nécessaires pour la qualification d'un système de mesure de tension de choc de foudre et de ses constituants ainsi que pour l'estimation de l'incertitude élargie. Voir 4.4.2 pour les exceptions.

Les résultats des essais individuels de série et de type peuvent être pris dans les données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque unité.

**Tableau 4 – Essais requis pour un système de mesure approuvé de tension de choc de foudre**

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion/paramètre de temps à l'étalonnage			5.2 5.11/8.3	
Contrôle du coefficient de conversion				8.5
Linéarité, voir NOTE 2		5.3	5.3 (si applicable)	
Comportement dynamique	5.4/8.4		5.4/8.4	8.5
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (si applicable)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet de proximité; voir NOTE 3	5.8 (si applicable)		5.8 (si applicable)	
Effet de logiciel (CEI 61083-2)	5.9 (si applicable)			
Essai de perturbations			5.12	5.12
Essai de tenue à sec	5.13	5.13 (if applicable)		
Essai de tenue sous pluie ou sous pollution	5.13 (si applicable)			
Coefficient de conversion/paramètres de temps d'un dispositif de conversion	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion/paramètres de temps d'un système de transmission autre qu'un câble	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion/paramètres de temps d'un instrument de mesure	5.2.2 CEI 61083	5.2.2 CEI 61083		
Responsabilité	sur les constituants par le fabricant		sur le système, par l'utilisateur, voir NOTE 1	

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Taux de répétition recommandé	une seule fois (essai individuel de série et de type)		proposé annuellement, mais au moins tous les 5 ans	Selon la stabilité, mais au moins annuellement
<p>NOTE 1 Il convient d'appliquer également les essais énumérés ci-dessus aux constituants individuels si des essais de détermination des caractéristiques sont réalisés conformément à la méthode alternative (voir 5.2.2). Pour obtenir l'incertitude de mesure du système de mesure approuvé, il convient que celles des constituants soient combinées comme démontré dans l'Annexe B.</p> <p>NOTE 2 Un essai de linéarité selon 5.3 n'est requis que si l'étalonnage ne peut pas être réalisé par comparaison sur toute la gamme de mesures (5.2.1.2).</p> <p>NOTE 3 Une étude de l'effet de proximité sur l'essai de détermination des caractéristiques est nécessaire uniquement si les données d'essai de type ne sont pas suffisantes.</p>				

### 8.3 Essais de détermination des caractéristiques sur des systèmes de mesure

#### 8.3.1 Méthode de référence (préférentielle)

Le coefficient de conversion affecté et le comportement dynamique du système de mesure doivent être déterminés par comparaison à un système de mesure de référence, en utilisant la procédure donnée en 5.2. Il est recommandé d'appliquer un objet d'essai de remplacement entre les deux systèmes de mesure.

La caractéristique de fonctionnement sur l'époque nominale  $t_{\min}$  à  $t_{\max}$  doit être prouvée à l'aide de chocs avec deux formes d'onde différentes telles que:

pour les chocs pleins ou coupés sur la queue:

- $t_{\min}$  est égal au plus court temps de montée  $T_{1\min}$ ;
- $t_{\max}$  est égal au plus long temps de montée  $T_{1\max}$ ;
- il convient que ces formes d'ondes aient toutes deux approximativement la durée jusqu'à mi-valeur la plus longue  $T_{2\max}$  pour laquelle le système de mesure doit être approuvé.

pour les chocs coupés sur le front:

- $t_{\min}$  est égal à la plus courte durée jusqu'à la coupure  $T_{c\min}$ ;
- $t_{\max}$  est égal à la plus longue durée jusqu'à la coupure  $T_{c\max}$ .

#### 8.3.2 Autres méthodes complétées par une mesure de la réponse indicielle conformément à l'Annexe C

Le coefficient de conversion affecté est déterminé par une mesure comparative par rapport à un système de mesure de référence selon 5.2 à l'aide de chocs pleins avec un temps de montée  $T_{1cal}$  dans la plage de  $T_{1\min}$  à  $T_{1\max}$  et une durée jusqu'à mi-valeur approximativement égale à la plus longue durée jusqu'à mi-valeur  $T_{2\max}$  pour laquelle le système de mesure doit être approuvé. En variante, il peut être déterminé à partir des coefficients de conversion des constituants (5.2.2).

Pour les systèmes de mesure destinés à mesurer des chocs coupés sur le front, il convient que les chocs d'étalonnage aient une durée jusqu'à la coupure  $T_{ccal}$  dans la plage  $T_{c\min}$  à  $T_{c\max}$ .

De plus, la réponse indicielle du système de mesure doit être mesurée conformément à l'Annexe C. Le niveau de référence dans les époques de niveaux de référence pour lesquelles le système doit être approuvé ne doit pas différer de la valeur de la réponse indicielle au temps:

- $T_{1cal}$  de plus de  $\pm 1 \%$  pour les chocs pleins et coupés sur la queue, et aussi
- $T_{ccal}$  de plus de  $\pm 1 \%$  pour les chocs coupés sur le front.

La réponse indicielle ne doit pas s'écarter de plus de 2 % du niveau de référence dans l'époque du niveau de référence  $0,5T_{1min}$  à  $2T_{1max}$  (Annexe C). La réponse indicielle ne doit pas non plus s'écarter de plus de 5 % dans la plage  $2T_{1max}$  à  $2T_{2max}$  où  $T_{2max}$  est la plus longue durée jusqu'à mi-valeur pour laquelle le système doit être approuvé.

## 8.4 Essai de comportement dynamique

### 8.4.1 Comparaison avec un système de mesure de référence (méthode préférentielle)

Les mêmes enregistrements tels que pris dans l'essai de 8.3.1 peuvent être utilisés et les paramètres de temps pertinents des chocs mesurés évalués pour chaque système, et l'incertitude des paramètres de temps mesurés par le système en essai doivent être évalués (5.11).

NOTE  $t_{min}$  peut être choisi à partir d'un certain type de choc et  $t_{max}$  d'un autre, pour les cas où l'approbation est requise pour un groupe de types de chocs. Dans de tels cas, il convient d'utiliser la plus longue durée jusqu'à mi-valeur de tous les types de chocs.

### 8.4.2 Autre méthode basée sur les paramètres de réponse indicielle (Annexe C)

Le système est soumis à un échelon de tension et la grandeur de sortie est enregistrée. Pour l'évaluation, voir Annexe C.

NOTE La performance peut être étudiée en utilisant des techniques de convolution. Le coefficient de conversion du système de mesure est établi par n'importe quelle méthode convenable. Il convient que la forme d'onde utilisée pour déterminer le coefficient de conversion soit inscrite dans la plage couverte par la méthode de convolution décrite dans l'Annexe D.

Le comportement dynamique est déterminé à partir de la réponse indicielle du système de mesure (consignée conformément à l'Annexe C) et à partir de la convolution de la réponse indicielle consignée avec les formes d'onde nominales pour lesquelles l'approbation est recherchée. Les erreurs introduites par le système de mesure pour différentes formes d'onde peuvent être estimées à partir de la convolution (Annexe D). La variation du coefficient de conversion sur l'époque de niveaux de référence ne doit pas être supérieure à  $\pm 1 \%$ .

## 8.5 Contrôle des caractéristiques

### 8.5.1 Comparaison avec un système de mesure approuvé

Une comparaison est effectuée avec un autre système de mesure approuvé (ou un système de mesure de référence) en utilisant la procédure de 5.2. Pour la comparaison des valeurs de crête, un éclateur à sphères selon la CEI 60052 peut être utilisé.

Si la différence entre les deux valeurs de crête mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté est considéré comme étant toujours valide. Si elle est supérieure, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit alors être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques.

La valeur de chaque paramètre de temps ne doit pas différer de plus de  $\pm 10 \%$  de la valeur correspondante mesurée par l'autre système de mesure. Lorsqu'une différence quelconque est supérieure à 10 % l'époque nominale doit être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques.

### 8.5.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant doivent être contrôlés en utilisant des appareils d'étalonnage internes ou externes dont les incertitudes élargies ne dépassent pas 1 %. Si les coefficients de conversion ne diffèrent pas de leurs valeurs antérieures de plus de  $\pm 1 \%$ , le coefficient de conversion affecté est considéré comme étant toujours valide.

Si une différence quelconque est supérieure à  $\pm 1$  %, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée.

### 8.5.3 Contrôle du comportement dynamique par enregistrement de référence

Lorsqu'on souhaite l'utiliser dans des contrôles de caractéristiques, la réponse indicielle du système de mesure doit être consignée en utilisant la méthode de l'Annexe C. Cela doit être inclus dans le recueil de caractéristiques pour une utilisation comme enregistrement de référence (« signature ») afin de permettre la détection des changements du comportement dynamique aux contrôles ultérieurs des caractéristiques.

## 9 Mesure de tension de choc de manœuvre

### 9.1 Exigences pour un système de mesure approuvé

#### 9.1.1 Généralités

Les exigences générales sont:

- mesurer la valeur de tension d'essai selon la CEI 60060-1 (valeur de crête) pour les chocs de manœuvre avec une incertitude élargie  $U_{M1} \leq 3$  %.
- mesurer les paramètres de temps qui définissent la forme d'onde avec une incertitude élargie  $U_{M3} \leq 10$  %.

#### 9.1.2 Contribution d'incertitude

Pour un système de mesure de tension de choc de manœuvre, l'incertitude élargie de mesure  $U_M$  doit être évaluée avec une probabilité de couverture de 95 %, conformément à 5.10.3, 5.11.3 et si nécessaire aux Annexes A et B. Les essais visant à l'évaluation des contributions d'incertitude qui sont habituellement envisagées sont résumés dans le Tableau 5. D'autres contributions peuvent être importantes dans certains cas et doivent être prises en compte en plus.

#### 9.1.3 Exigences relatives à l'instrument de mesure

L'instrument de mesure doit satisfaire aux exigences de la CEI 61083-1 et la CEI 61083-2.

#### 9.1.4 Comportement dynamique

Le comportement dynamique d'un système de mesure est approprié si:

- le coefficient de conversion est constant à  $\pm 1$  % près sur la plage de formes d'ondes de chocs spécifiée dans le recueil de caractéristiques,
- l'incertitude élargie des paramètres de temps mesurés ne dépasse pas 10 % sur la plage de formes d'onde.

#### 9.1.5 Connexion à l'objet en essai

Le système de mesure approuvé doit être connecté directement aux bornes de l'objet en essai. Contrairement aux mesures des tensions de chocs de foudre (voir 8.1.5), le système de mesure peut être interposé entre la source de tension et l'objet en essai. Il convient que le couplage entre les circuits de mesure et d'essai soit réduit au minimum.

### 9.2 Essais sur un système de mesure approuvé

Les essais selon l'Article 5, résumés dans le Tableau 5, sont nécessaires pour la qualification d'un système de mesure de tension de choc de manœuvre et de ses constituants ainsi que pour l'estimation de l'incertitude élargie. Voir 4.4.2 pour les exceptions.

Les résultats des essais individuels de série et de type peuvent être pris dans les données du constructeur. Les essais individuels de série doivent être effectués sur chaque unité.

### 9.3 Essais de détermination des caractéristiques sur des systèmes de mesure

#### 9.3.1 Méthode de référence (préférentielle)

Le coefficient de conversion affecté et le comportement dynamique du système de mesure doivent être déterminés par comparaison à un système de mesure de référence, en utilisant la procédure donnée en 5.2. La caractéristique de fonctionnement sur l'époque nominale  $t_{\min}$  à  $t_{\max}$  est prouvée à l'aide de chocs avec deux formes d'onde différentes telles que:

- $t_{\min}$  est égal à la plus courte durée jusqu'à la crête  $T_{p\min}$ ;
- $t_{\max}$  est égal à la plus longue durée jusqu'à la crête  $T_{p\max}$ ;
- il convient que ces deux formes d'onde aient approximativement la plus longue durée jusqu'à mi-valeur  $T_{2\max}$  (ou durée au-dessus de 90 % ou durée jusqu'à zéro) pour laquelle le système doit être approuvé.

#### 9.3.2 Autre méthode complétée par une mesure de réponse indicielle

Le coefficient de conversion affecté est déterminé par une mesure comparative de forme d'onde par rapport à un système de mesure de référence selon 5.2 à l'aide de chocs pleins avec une durée jusqu'à la crête  $T_{p\text{cal}}$  dans la plage de  $T_{p\min}$  à  $T_{p\max}$  et une durée jusqu'à mi-valeur (ou durée au-dessus de 90 % ou durée jusqu'à zéro) approximativement égale à la plus longue durée jusqu'à mi-valeur (ou durée au-dessus de 90 % ou durée jusqu'à zéro) pour laquelle le système de mesure doit être approuvé. En variante, il peut être déterminé à partir des coefficients de conversion des constituants (5.2.2).

De plus, la réponse indicielle du système de mesure doit être consignée conformément à l'Annexe C. Le ou les niveaux de référence des époques de niveaux de référence pour lesquelles le système de mesure doit être approuvé ne doivent pas différer de la valeur de la réponse indicielle à  $T_{p\text{cal}}$  de plus de  $\pm 1$  %.

La réponse indicielle ne doit pas varier de plus de 5 % dans la plage de  $T_{p\min}$  à  $T_{2\max}$  (ou durée au-dessus de 90 % ou durée jusqu'à zéro) pour laquelle le système de mesure doit être approuvé.

### 9.4 Essai du comportement dynamique par comparaison

Les mêmes enregistrements tels que pris dans l'essai de 9.3.1 peuvent être utilisés et les paramètres de temps pertinents des chocs mesurés évalués pour chaque système, et l'incertitude des paramètres de temps mesurés par le système en essai doivent être évalués conformément à 5.4 (Tableau 5).

NOTE  $t_{\min}$  peut être choisi à partir d'un certain type de choc et  $t_{\max}$  d'un autre, pour les cas où l'approbation est requise pour un groupe de types de chocs. Dans de tels cas, il convient d'utiliser la plus longue durée jusqu'à mi-valeur de tous les types de chocs.

### 9.5 Contrôle des caractéristiques

#### 9.5.1 Contrôle du coefficient de conversion par comparaison avec un système de mesure approuvé

Une comparaison est effectuée avec un autre système de mesure approuvé (ou un système de mesure de référence) en utilisant la procédure du 5.2. Pour la comparaison des valeurs de crête, un éclateur à sphères selon la CEI 60052 peut être utilisé.

Lorsque la différence entre les deux valeurs de crête mesurées n'est pas supérieure à 3 %, le coefficient de conversion affecté est considéré comme étant toujours valide. Si elle est

supérieure, une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques.

La valeur de chaque paramètre de temps ne doit pas différer de plus de  $\pm 10\%$  de la valeur correspondante mesurée par l'autre système de mesure. Lorsqu'une différence quelconque est supérieure à  $10\%$  l'époque nominale doit alors être déterminée dans un essai de détermination des caractéristiques.

### 9.5.2 Contrôle des coefficients de conversion des constituants

Le ou les coefficients de conversion de chaque constituant doivent être contrôlés en utilisant des appareils d'étalonnage internes ou externes dont les incertitudes élargies ne dépassent pas  $1\%$ . Si les coefficients de conversion ne diffèrent pas de leurs valeurs antérieures de plus de  $\pm 1\%$ , le coefficient de conversion affecté est considéré comme étant toujours valide. Si une différence quelconque est supérieure à  $\pm 1\%$ , une nouvelle valeur du coefficient de conversion affecté doit être déterminée.

### 9.5.3 Contrôle du comportement dynamique par enregistrement de référence

Lorsqu'elle est requise pour être utilisée dans des contrôles de caractéristiques, la réponse indicielle du système de mesure doit être consignée en utilisant la méthode de l'Annexe C. Cela doit être inclus dans le recueil de caractéristiques pour une utilisation comme enregistrement de référence (« signature ») afin de permettre la détection des changements du comportement dynamique aux contrôles ultérieurs des caractéristiques.

**Tableau 5 – Essais requis pour un système de mesure de tension de choc de manœuvre**

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion/paramètres de temps à l'étalonnage			5.2 5.11/9.3	
Contrôle du coefficient de conversion				9.5
Linéarité, voir NOTE 2		5.3	5.3 (si applicable)	
Comportement dynamique	5.4 9.4		5.4 9.4	9.5
Stabilité à court terme		5.5		
Stabilité à long terme	5.6		5.6 (si applicable)	
Effet de la température ambiante	5.7			
Effet de proximité; voir NOTE 3	5.8 (si applicable)		5.8 (si applicable)	
Effet de logiciel (CEI 61083-2)	5.9 (si applicable)			
Essai de perturbations			5.12	5.12
Essai de tenue à sec	5.13	5.13 (si requis)		
Essai de tenue sous pluie ou sous pollution	5.13 (si requis)			
Coefficient de conversion/paramètres de temps d'un dispositif de conversion	5.2.2	5.2.2		
Coefficient de conversion/paramètres de temps d'un système de transmission autre qu'un câble	5.2.2	5.2.2		

Type d'essai	Essai de type	Essai individuel de série	Essai de détermination des caractéristiques	Contrôle des caractéristiques
Coefficient de conversion/paramètres de temps d'un instrument de mesure	5.2.2 CEI 61083	5.2.2 CEI 61083		
Responsabilités:	sur les constituants par le fabricant		sur le système par l'utilisateur voir NOTE 1	
Taux de répétition recommandé	une seule fois (essai individuel de série et de type)		proposé annuellement, mais au moins tous les 5 ans	Selon la stabilité, mais au moins annuellement
<p>NOTE 1 Il convient d'appliquer également les essais énumérés ci-dessus aux constituants individuels si des essais de détermination des caractéristiques sont réalisés conformément à la méthode alternative (voir 5.2.2). Pour obtenir l'incertitude de mesure du système de mesure approuvé, il convient que celles des constituants soient combinées comme démontré dans l'Annexe B.</p> <p>NOTE 2 Un essai de linéarité selon 5.3 n'est requis que si l'étalonnage ne peut pas être réalisé par comparaison sur toute la gamme de mesure (5.2.1.2).</p> <p>NOTE 3 Une étude de l'effet de proximité sur l'essai de détermination des caractéristiques est nécessaire uniquement si les données d'essai de type ne sont pas suffisantes.</p>				

## 10 Systèmes de mesure de référence

### 10.1 Exigences pour les systèmes de mesure de référence

#### 10.1.1 Tension continue

Le système de mesure de référence doit permettre la mesure de tensions continues avec une incertitude élargie  $U_M \leq 1\%$  dans sa plage d'utilisation. L'incertitude ne doit pas être influencée par un taux d'ondulation jusqu'à 3 %.

#### 10.1.2 Tension alternative

Le système de mesure de référence doit permettre la mesure de tension alternative avec une incertitude élargie  $U_M \leq 1\%$  dans sa plage d'utilisation.

#### 10.1.3 Tensions de chocs de foudre pleins et coupés et de chocs de manœuvre

Le système de mesure de référence doit permettre la mesure des tensions de chocs pleins et coupés sur la queue avec une incertitude élargie  $U_{M1} \leq 1\%$  pour les valeurs de crête des chocs pleins et coupés sur la queue,  $U_{M2} \leq 3\%$  pour la crête des chocs de foudre coupés sur le front et  $U_{M3} \leq 5\%$  pour les paramètres de temps dans sa plage d'utilisation

NOTE Il convient que les oscillations et/ou les dépassements soient consignés de manière appropriée (comparer 8.1.4).

### 10.2 Étalonnage d'un système de mesure de référence

#### 10.2.1 Généralités

La conformité d'un système de mesure de référence aux exigences correspondantes données en 10.1 doit être montrée par l'essai du 10.2.2. En variante, l'essai du 10.2.3 peut être utilisé.

#### 10.2.2 Méthode de référence: Mesure comparative

La caractéristique de fonctionnement satisfaisant d'un système de mesure de référence doit être montrée par étalonnage par des mesures comparatives à la tension d'essai concernée par rapport à un système de mesure de référence de tension d'essai appropriée de faible

incertitude, qui est lui-même traçable par rapport à des étalons d'un Laboratoire national de métrologie.

Dans le cas de tensions de chocs, des formes d'ondes de deux temps de montée différents ou plus couvrant la plage de l'époque nominale doivent être appliquées.

NOTE Il convient que les exigences pour un système de mesure de référence de faible incertitude soient des incertitudes étendues  $U_M \leq 0,5 \%$  pour la mesure de tension et pour les tensions de chocs seulement  $U_{M3} \leq 3 \%$  pour la mesure des paramètres de temps.

### 10.2.3 Autre méthode pour les tensions de chocs: Mesure du coefficient de conversion et évaluation des paramètres de réponse indicielle

Le coefficient de conversion d'un système de mesure de référence doit être établi pour une forme de tension de choc, par exemple à l'aide d'un système de mesure de référence de classe supérieure, à la tension d'essai correspondante. De plus, les paramètres de réponse indicielle évalués conformément à l'Annexe C doivent satisfaire aux recommandations du Tableau 6. De plus, le ou les niveaux de référence des époques de niveaux de référence pour lesquels le système de mesure de référence doit être approuvé ne doivent pas différer de plus de  $\pm 0,5 \%$  de la valeur de la réponse indicielle au moment du paramètre approprié de la tension de choc utilisée.

### 10.3 Intervalle entre les étalonnages successifs des systèmes de mesure de référence

L'intervalle entre les étalonnages doit être déterminé conformément aux réglementations nationales. En l'absence de réglementation, la recommandation est que les étalonnages doivent être répétés au moins une fois tous les cinq ans, à condition que des contrôles réguliers des caractéristiques démontrent la stabilité du système de mesure de référence.

### 10.4 Utilisation des systèmes de mesure de référence

Il est recommandé de n'utiliser les systèmes de mesure de référence que pour des mesures comparatives dans les essais de détermination des caractéristiques. Toutefois, des systèmes de mesure de référence peuvent être utilisés pour d'autres mesures, y compris un usage de routine quotidien, s'il est montré qu'un tel usage n'affecte pas leurs caractéristiques (Les contrôles de caractéristiques spécifiés dans le présente norme sont suffisants pour le vérifier). De plus, le remplacement d'un instrument de mesure équivalent, qui satisfait aux exigences de la norme CEI correspondante, doit être accepté.

**Tableau 6 – Paramètres de réponse recommandés pour les systèmes de mesure de référence de tension de choc**

Tension	Recommandations pour		
	Chocs de foudre pleins et coupés sur la queue	Chocs de foudre coupés sur le front	Chocs de manœuvre
Temps de réponse expérimental $T_N$	$\leq 15 \text{ ns}$	$\leq 10 \text{ ns}$	-
temps de stabilisation $t_s$	$\leq 200 \text{ ns}$	$\leq 150 \text{ ns}$	$\leq 10 \mu\text{s}$
Temps de réponse partiel $T_\alpha$	$\leq 30 \text{ ns}$	$\leq 20 \text{ ns}$	-

## **Annexe A** (informative)

### **Incertitude de mesure**

#### **A.1 Généralités**

L'Article 5 décrit une procédure simplifiée d'évaluation de l'incertitude de mesure dans des conditions généralement applicables et totalement suffisantes dans les mesures de haute tension. Toutefois dans certains cas, il peut être nécessaire ou souhaitable d'évaluer les incertitudes de façon plus complexe. L'Annexe A fournit une étude sur les modalités à suivre dans de tels cas et l'Annexe B décrit trois exemples d'application.

Chaque mesure d'une grandeur est à un certain degré imparfaite et le résultat d'une mesure n'est qu'une approximation (« estimation ») de la valeur « vraie » du mesurande. L'incertitude de mesure donne une indication claire sur la qualité d'une mesure. Elle permet à l'utilisateur de comparer et peser les résultats de mesure, par exemple obtenus de laboratoires différents, et elle donne des informations quant à savoir si un résultat de mesure s'inscrit dans les limites spécifiées par une norme. Un guide de l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) publié en 1993 par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) et connue maintenant sous le titre ISO/CEI 98-3:2008, est désormais la norme acceptée à l'échelle internationale pour l'estimation de l'incertitude de mesure.

L'ISO/CEI Guide 98-3, en tant que guide, fournit des règles générales pour évaluer et exprimer l'incertitude dans un large spectre de mesures à divers niveaux d'incertitude. Il est donc nécessaire d'extraire de l'ISO/CEI Guide 98-3 un ensemble de règles spécifiques qui traitent du champ spécifique de la mesure des hautes tensions et de son niveau d'exactitude et de complexité. Selon les principes fondamentaux de l'ISO/CEI Guide 98-3, les incertitudes sont groupées en deux catégories en fonction de leurs méthodes d'évaluation. Ces méthodes sont toutes deux basées sur des distributions de probabilités des grandeurs influençant la mesure et sur des incertitudes-types quantifiées par les variances ou écarts-types. Cela permet un traitement uniforme des deux catégories d'incertitudes et une évaluation d'une incertitude-type composée du mesurande. Dans le domaine d'application de la présente norme, une incertitude élargie correspondant à une probabilité de couverture de 95 % environ est requise.

Les principes fondamentaux de l'ISO/CEI Guide 98-3 et des exemples de la façon de déterminer les incertitudes dans les mesures des hautes tensions sont présentés dans une version simplifiée dans les articles suivants. Les équations et les exemples donnés ici sont valides pour des grandeurs d'entrée non corrélées, ce qui est souvent le cas dans les mesures à haute tension.

#### **A.2 Définitions en complément au l'Article 3**

##### **A.2.1** **grandeur mesurable**

attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance qui peut être distingué qualitativement et déterminé quantitativement

##### **A.2.2** **valeur d'une grandeur**

amplitude d'une grandeur particulière généralement exprimée sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre

##### **A.2.3** **mesurande**

grandeur spécifique soumise à la mesure

**A.2.4****variance**

espérance mathématique du carré de l'écart d'une variable aléatoire autour de son espérance mathématique

**A.2.5****corrélation**

relation entre deux variables aléatoires ou plus dans une distribution de deux variables aléatoires ou plus

**A.2.6****probabilité de couverture**

fraction, habituellement grande, d'une distribution de valeurs qui en tant que résultat d'une mesure pourrait être raisonnablement attribuée au mesurande

**A.3 Fonction-modèle**

Chaque mesure peut être décrite par une relation fonctionnelle  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N) \quad (\text{A.1})$$

où  $Y$  est le mesurande et les  $X_i$  sont les différentes grandeurs d'entrée numérotées de 1 à  $N$ . Au sens de l'ISO/CEI Guide 98-3; la fonction-modèle  $f$  comprend toutes les valeurs de mesure, toutes les grandeurs d'influence, toutes les corrections, tous les coefficients de correction, toutes les constantes physiques et toutes autres données qui peuvent contribuer avec une quantité significative à la valeur de  $Y$  et à son incertitude. Elle peut exister sous la forme d'une expression analytique ou numérique unique ou multiple, ou d'une combinaison des deux. En général, les grandeurs d'entrée  $X_i$  sont des variables aléatoires et sont décrites par des observations  $x_i$  (« estimations d'entrée ») ayant des distributions de probabilités spécifiques et étant associées à des incertitudes-types  $u(x_i)$  de Type A ou de Type B. La combinaison de ces deux types d'incertitude selon les règles de l'ISO/CEI Guide 98-3 donne l'incertitude-type  $u(y)$  de l'estimation de sortie  $y$ .

NOTE 1 La fonction-modèle  $f$  dans (A.1) est également valide respectivement pour les estimations d'entrée et de sortie  $x_i$  et  $y$ .

NOTE 2 Dans une série d'observations, la  $k^{\text{ème}}$  valeur observée de la grandeur  $X_i$  est désignée par  $x_{ik}$ .

**A.4 Évaluation de Type A de l'incertitude-type**

La méthode d'évaluation de Type A est appliquée à des grandeurs qui varient de façon aléatoire et pour lesquelles  $n$  observations indépendantes ont été obtenues dans les mêmes conditions de mesure. En général, on peut supposer une distribution normale (gaussienne) des probabilités des  $n$  observations  $x_{ik}$  (Figure A.1).

NOTE 1  $X_i$  peut être un coefficient de conversion, une valeur de tension d'essai ou un paramètre de temps avec les observations  $x_{ik}$ .

La valeur arithmétique moyenne  $\bar{x}_i$  des observations  $x_{ik}$  est définie par

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} \quad (\text{A.2})$$

qui est considérée comme étant la meilleure estimation de  $X_i$ . Son incertitude-type de type A est égale à l'écart-type expérimental de la moyenne:

$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.3})$$

où  $s(x)$  est l'écart-type expérimental (des valeurs individuelles):

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} . \quad (\text{A.4})$$

Les valeurs quadratiques de  $s^2(x_i)$  et  $s^2(\bar{x}_i)$  sont respectivement appelées variances d'échantillons et variances de la moyenne. Il convient que le nombre d'observations soit  $n \geq 10$ , sinon la fiabilité d'une évaluation de Type A de l'incertitude-type doit être vérifiée au moyen des degrés de liberté réels (voir l'Article A.8).

NOTE 2 Dans certains cas, une estimation cumulée de la variance  $s_p^2$  peut être obtenue à partir d'un grand nombre d'observations antérieures dans des conditions bien définies. L'incertitude-type d'une mesure comparable avec un petit nombre  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) est alors mieux estimée par  $u(\bar{x}_i) = s_p / \sqrt{n}$  que par par l'Equation (A.3).

## A.5 Évaluation de Type B de l'incertitude-type

La méthode d'évaluation de type B s'applique à tous les cas autres que l'analyse statistique d'une série d'observations. L'incertitude-type de Type B est évaluée par une estimation scientifique basée sur toutes les informations disponibles concernant la variabilité possible d'une grandeur d'entrée  $X_i$  avec les observations  $x_i$ , telle que:

- méthode d'évaluation des grandeurs,
- incertitude d'étalonnage du système de mesure et ses constituants,
- non-linéarité des diviseurs et instruments de mesure,
- comportement dynamique, par exemple variation du coefficient de conversion avec la fréquence ou avec la forme des impulsions,
- stabilité à court terme, auto-échauffement,
- stabilité à long terme, dérive,
- conditions ambiantes pendant la mesure,
- effet de proximité des objets limitrophes,
- effets dus au logiciel utilisé dans les instruments ou dans l'évaluation des résultats,
- résolution limitée des instruments numériques, relevé des instruments analogiques.

Les informations sur les grandeurs d'entrée et les incertitudes peuvent être obtenues à partir de mesures réelles et antérieures, de certificats d'étalonnage, de données contenues dans des manuels et des normes, de spécifications du constructeur ou de la connaissance des caractéristiques des matériaux ou instruments pertinents. On peut identifier les cas suivants d'évaluation de Type B des incertitudes:

- a) Souvent une seule grandeur d'entrée  $x_i$  et son incertitude-type  $u(x_i)$  sont connues, par exemple une seule valeur mesurée, une valeur de correction ou une valeur de référence extraite de la documentation technique. Cette valeur et son incertitude seront adoptées dans la fonction-modèle (A.1). Si l'incertitude-type  $u(x_i)$  est inconnue, elle doit être calculée à partir d'autres données d'incertitude pertinentes ou être estimée sur la base de l'expérience.
- b) L'incertitude d'un dispositif est indiquée comme une incertitude-type multipliée par le facteur d'élargissement  $k$ , par exemple l'incertitude-type élargie  $U$  d'un voltmètre numérique dans un certificat d'étalonnage (Article A.7). Lorsque le voltmètre est utilisé dans un système de mesure complexe, sa contribution d'incertitude est:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (\text{A.5})$$

où  $k$  est le facteur d'élargissement. Au lieu d'exprimer l'incertitude élargie et le facteur d'élargissement, on peut trouver une expression sur le niveau de confiance, par exemple 68,3 %, 95,45 % ou 99,7 %. En général, on peut supposer une distribution normale selon la Figure A.1 et l'expression sur le niveau de confiance équivaut respectivement au facteur d'élargissement  $k = 1, 2$  ou  $3$ .

- c) La valeur  $x_i$  d'une grandeur d'entrée  $X_i$  est estimée située dans l'intervalle  $a_-$  à  $a_+$  avec une certaine distribution de probabilités  $p(x_i)$ . Il n'y a souvent pas de connaissance spécifique de  $p(x_i)$  et on suppose alors une distribution rectangulaire des valeurs probables (Figure A.2). La valeur attendue de  $X_i$  est alors le point milieu  $\bar{x}_i$  de l'intervalle:

$$\bar{x}_i = \frac{(a_- + a_+)}{2} \quad (\text{A.6})$$

et l'incertitude-type associée:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.7})$$

où  $a = (a_+ - a_-)/2$ .

Dans certains cas, d'autres distributions de probabilité peuvent être mieux appropriées, par exemple des distributions trapézoïdales, triangulaires ou normales.

NOTE 1 L'incertitude-type est  $u(x_i) = a/\sqrt{6}$  pour la distribution triangulaire et  $u(x_i) = \sigma$  pour la distribution normale. Cela signifie que la distribution rectangulaire donne une plus grande incertitude-type que les autres distributions.

Dans le Guide ISO/CEI 98-3, il est déclaré qu'il convient de ne pas compter deux fois une incertitude de Type B si l'effet particulier a déjà contribué à une incertitude de Type A. En outre, il convient que l'évaluation d'incertitude soit réaliste et basée sur les incertitudes-types, en évitant d'utiliser des coefficients de sécurité personnels ou autres pour obtenir des incertitudes plus élevées que celles qui sont évaluées conformément au GUM. Une grandeur d'entrée  $X_i$  doit souvent être ajustée ou corrigée pour éliminer des effets systématiques d'amplitude significative, par exemple sur la base d'une dépendance de la température ou de la tension. Cependant, l'incertitude  $u(x_i)$  associée à cette correction doit toujours être prise en compte.

NOTE 2 Le double comptage de contributions d'incertitude peut se produire lorsqu'un enregistreur numérique est utilisé pour des mesures de chocs répétitives, par exemple lors de l'étalonnage du coefficient de conversion. La dispersion des  $n$  valeurs de mesure produisant une incertitude-type de Type A peut être due partiellement à la résolution limitée de l'enregistreur et à son bruit interne. Il est inutile de reprendre en compte la résolution dans sa totalité mais tenir compte seulement d'une petite partie de celle-ci comme incertitude de Type B résiduelle. Toutefois, si l'enregistreur numérique est utilisé ensuite au cours d'un essai de tension de choc pour obtenir une seule valeur de mesure, il convient que la résolution limitée soit prise en compte dans une incertitude de Type B.

NOTE 3 L'évaluation des incertitudes de Type B exige une connaissance approfondie et une vaste expérience des relations physiques, grandeurs d'influence et techniques de mesure concernées. L'évaluation proprement dite n'étant pas une science exacte qui conduit à une solution unique, il n'est pas rare que des techniciens d'essais expérimentés puissent estimer le processus de mesure d'une manière différente et obtenir des valeurs d'incertitudes de Type B différentes.

## A.6 Incertitude-type composée

Chaque incertitude-type  $u(x_i)$  de l'estimation  $x_i$  de chaque grandeur d'entrée  $X_i$  évaluée par la méthode de Type A ou de Type B contribue à l'incertitude-type de la grandeur de sortie par:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (\text{A.8})$$

où  $c_i$  est le coefficient de sensibilité. Il décrit comment l'estimation de sortie  $y$  est influencée par de faibles variations de l'estimation d'entrée  $x_i$ . Il peut être évalué directement comme la dérivée partielle de la fonction-modèle  $f$ :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_i=x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad (\text{A.9})$$

ou à l'aide de méthodes numériques et expérimentales équivalentes. Le signe de  $c_i$  peut être positif ou négatif. Lorsque les grandeurs d'entrée ne sont pas corrélées, il est inutile de tenir davantage compte du signe car seule la valeur quadratique des incertitudes-types est utilisée dans les étapes suivantes.

Les  $N$  incertitudes-types  $u_i(y)$  définies par l'Equation (A.8) contribuent à une incertitude-type composée  $u_c(y)$  de la grandeur de sortie conformément à la « loi de propagation de l'incertitude »:

$$u_c^2(y) = u_1^2(y) + u_2^2(y) + \dots + u_N^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (\text{A.10})$$

à partir de laquelle  $u_c(y)$  est évaluée comme la racine carrée positive:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (\text{A.11})$$

Si la grandeur de sortie  $Y$  est un produit ou un quotient des grandeurs d'entrée  $X_i$ , une relation similaire telle que montrée en dans les equations (A.10) et (A.11) peut être obtenue pour les incertitudes relatives  $u_c(y)/|y|$  et  $u(x_i)/|x_i|$ . La loi de propagation de l'incertitude s'applique ainsi aux deux types de la fonction-modèle pour des grandeurs d'entrée non corrélées.

NOTE S'il existe une corrélation, des termes linéaires seront présents dans la loi de propagation de l'incertitude et le signe des coefficients de sensibilité devient pertinent. Il y a corrélation lorsque, par exemple, le même instrument est utilisé pour mesurer deux grandeurs d'entrée ou plus. Pour éviter les calculs compliqués, la corrélation peut être éliminée en ajoutant des grandeurs d'entrée supplémentaires dans la fonction-modèle  $f$  avec les corrections et incertitudes appropriées. Dans certains cas, la présence de grandeurs d'entrée corrélées peut même réduire l'incertitude composée. La prise en compte de la corrélation est ainsi principalement essentielle pour une analyse élaborée des incertitudes pour obtenir une estimation très précise de l'incertitude. La corrélation ne sera pas davantage expliquée dans la présente norme.

## A.7 Incertitude élargie

Dans le domaine des mesures de haute tension et de courant élevé comme dans la plupart des autres applications industrielles, une déclaration d'incertitude correspondant à une probabilité de couverture de  $p = 95\%$  environ est requise. Cela s'obtient en multipliant l'incertitude-type composée  $u_c(y)$  dans (A.11) par un facteur d'élargissement  $k$ :

$$U = k u_c(y), \quad (\text{A.12})$$

où  $U$  est l'incertitude élargie. Le facteur d'élargissement  $k = 2$  est utilisé lorsqu'une distribution normale peut être attribuée à  $y$  et  $u_c(y)$  a une fiabilité satisfaisante, c'est-à-dire que les degrés de liberté réels de  $u_c(y)$  sont suffisamment élevés (voir Article A.8). Sinon, une valeur  $k > 2$  doit être déterminée pour obtenir  $p = 95\%$ .

NOTE 1 Certaines normes plus anciennes utilisent le terme « incertitude globale ». Dans la majorité des cas, ce terme est interprété comme une incertitude élargie  $U$  avec le facteur d'élargissement égal à 2.

NOTE 2 Les incertitudes étant définies comme des nombres positifs, le signe de  $U$  est toujours positif. Naturellement, si  $U$  est utilisé dans le sens d'intervalle d'incertitudes, on le désigne par  $k$  comme  $\pm U$ .

### A.8 Degrés de liberté réels

L'hypothèse d'une distribution normale de l'incertitude élargie est, en général, valide lorsque plusieurs (c'est-à-dire  $N \geq 3$ ) composantes d'incertitude de valeur comparable et de distribution de probabilités bien définie (gaussienne, rectangulaire, etc.) contribuent à l'incertitude-type composée et que l'incertitude de Type A est basée sur  $n \geq 10$  observations répétées. Ces conditions sont remplies dans de nombreux étalonnages de systèmes de mesure de tension. Lorsque l'hypothèse d'une distribution normale n'est pas justifiée, une valeur de  $k > 2$  doit être évaluée pour obtenir une probabilité de couverture d'environ 95 %. Le facteur d'élargissement approprié peut être évalué sur la base des degrés de liberté réels  $v_{\text{eff}}$  de l'incertitude-type  $u_c(y)$ :

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}, \tag{A.13}$$

où  $u_i(y)$  est donné par l'Equation (A.8) pour  $i = 1, 2, \dots, N$  et les  $v_i$  sont les degrés de liberté correspondants. Les valeurs fiables de  $v_i$  sont les suivantes:

- $v_i = n - 1$  pour une incertitude de type A basée sur  $n$  observations indépendantes,
- $v_i \geq 50$  pour une incertitude de type B prise dans un certificat d'étalonnage et lorsque la probabilité de couverture est déclarée ne pas être inférieure à 95 %,
- $v_i = \infty$  pour une incertitude de type B en supposant une distribution rectangulaire entre  $a_-$  et  $a_+$ .

Les degrés de liberté réels peuvent alors être calculés par l'Equation (A.13) et le facteur d'élargissement être pris dans le Tableau A.1 qui est basé sur une distribution de  $t$  évaluée pour une probabilité de couverture de  $p = 95,45$  %. Si  $v_{\text{eff}}$  n'est pas un nombre entier, interpolier ou tronquer la valeur de  $v_{\text{eff}}$  au nombre entier immédiatement inférieur.

**Tableau A.1 – Facteur d'élargissement  $k$  pour les degrés de liberté réels  $v_{\text{eff}}$  ( $p = 95,45$  %)**

$v_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

La formule suivante peut aussi être utilisée pour calculer  $k$  à partir de  $v_{\text{eff}}$ :

$$k = 1,96 + \frac{2,374}{v_{\text{eff}}} + \frac{2,818}{v_{\text{eff}}^2} + \frac{2,547}{v_{\text{eff}}^3} \tag{A.14}$$

### A.9 Bilan d'incertitude

Le bilan d'incertitude d'une mesure est une analyse détaillée de toutes les sources et valeurs d'incertitude selon la fonction-modèle  $f$ . Il convient de conserver les données pertinentes en vue d'un examen sous la forme d'un tableau identique ou comparable au Tableau A.2. La dernière ligne indique les valeurs du résultat de mesure  $y$ , l'incertitude composée  $u_c(y)$  et les degrés de liberté réels  $v_{\text{eff}}$ .

Tableau A.2 – Schéma d'un bilan d'incertitude

Grandeur	Valeur	Contribution d'incertitude-type	Degrés de liberté	Coefficient de sensibilité	Contribution d'incertitude-type composée
$X_i$	$x_i$	$u(x_i)$	$\nu_i / \nu_{\text{eff}}$	$c_i$	$u_i(y)$
$X_1$	$x_1$	$u(x_1)$	$\nu_1$	$c_1$	$u_1(y)$
$X_2$	$x_2$	$u(x_2)$	$\nu_2$	$c_2$	$u_2(y)$
:	:	:	:	:	:
$X_N$	$x_N$	$u(x_N)$	$\nu_N$	$c_N$	$u_N(y)$
$Y$	$y$		$\nu_{\text{eff}}$		$u_c(y)$

NOTE Des logiciels validés sont disponibles dans le commerce ou peuvent être développés par l'utilisateur à partir de logiciels généraux qui permettent le calcul automatisé des grandeurs du Tableau A.2 à partir de l'équation-modèle  $f$ .

### A.10 Expression du résultat de mesure

Dans les certificats d'étalonnage et d'essai, le mesurande  $Y$  doit être exprimé sous la forme  $y \pm U$  pour une probabilité de couverture (ou niveau de confiance) de  $p = 95$  % environ. La valeur numérique de l'incertitude élargie  $U$  doit être arrondie pour donner deux chiffres significatifs au maximum. Si l'arrondi par défaut réduit la valeur de plus de  $0,05 U$ , la valeur arrondie par excès doit être utilisée. La valeur numérique de  $y$  doit être arrondie au chiffre le moins significatif qui serait susceptible d'être affecté par l'incertitude élargie.

NOTE 1 À titre d'exemple, le résultat d'une mesure de tension est exprimé de l'une des façons suivantes:

$$(227,2 \pm 2,4) \text{ kV,}$$

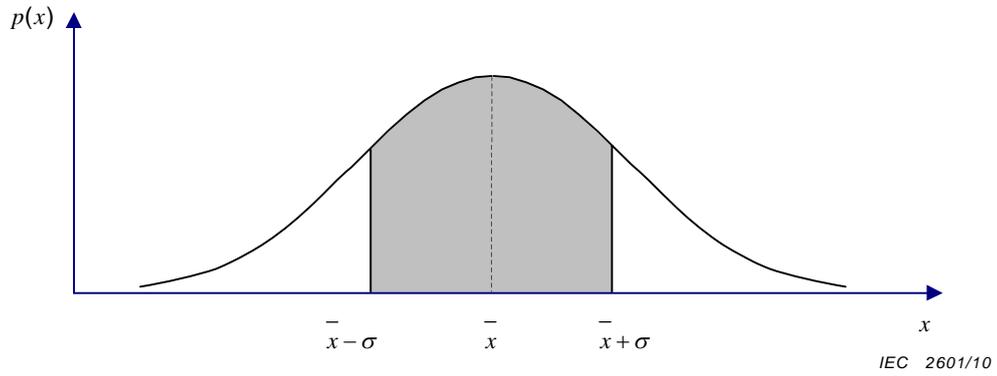
$$227,2 \times (1 \pm 0,011) \text{ kV, ou}$$

$$227,2 \times (1 \pm 1,1 \cdot 10^{-2}) \text{ kV.}$$

Il convient qu'une note explicative soit ajoutée pour informer de la probabilité de couverture  $p$  et du facteur d'élargissement  $k$ .

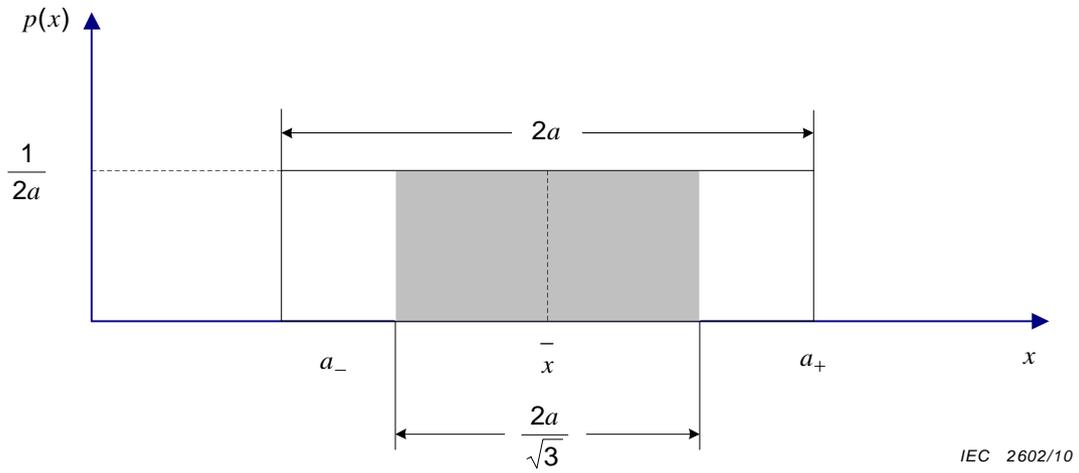
NOTE 2 À titre d'exemple, le libellé complet suivant est recommandé (les termes entre parenthèses s'appliquent lorsque  $\nu_{\text{eff}} < 50$ , c'est-à-dire  $\kappa > 2,05$  selon le Tableau A.1):

« L'incertitude élargie de mesure indiquée correspond à l'incertitude de mesure multipliée par le facteur d'élargissement  $k = 2$  ( $k = XX$ ), lequel, pour une distribution normale (une distribution de  $t$  présentant  $\nu_{\text{eff}} = YY$  degrés de liberté réels), correspond à une probabilité de couverture d'environ 95 %. L'incertitude-type de mesure a été déterminée conformément à la CEI 60060-2. »



NOTE La zone ombrée indique l'incertitude-type au-dessus et au-dessous de  $\bar{x}_{i_j}$ .

**Figure A.1 – Distribution normale des probabilités  $p(x)$**



NOTE La zone ombrée indique l'incertitude-type au-dessus et au-dessous de  $\bar{x}_{i_j}$ .

**Figure A.2 – Distribution rectangulaire des probabilités  $p(x)$**

## Annexe B (informative)

### Exemples de calcul d'incertitudes de mesure dans des mesures de haute tension

#### B.1 Exemple 1: Coefficient de conversion d'un système de mesure en courant alternatif (méthode de comparaison)

Un système de mesure en courant alternatif d'une tension assignée de 500 kV, désigné par X, est étalonné par un laboratoire d'étalonnage accrédité dans le laboratoire d'essais du client. L'étalonnage est réalisé jusqu'à  $V_{X_{\max}} = 500$  kV par comparaison avec un système de mesure de référence, désigné par N (Figure B.1). Les systèmes sont tous deux constitués d'un diviseur et d'un voltmètre numérique, indiquant respectivement les valeurs de tension  $V_N$  et  $V_X$ , aux sorties des diviseurs. Le coefficient de conversion et l'incertitude élargie relative du système de référence N à 20 °C sont  $F_N = 1,025$  et  $U_N = 0,8 \%$  ( $k = 2$ ), y compris une contribution d'incertitude pour l'instabilité à long terme.

Lors de l'étalonnage, la température ambiante est  $(15 \pm 2)$  °C. Le coefficient de conversion de N ayant été étalonné à 20 °C, il est corrigé de -0,3 % en fonction de son coefficient de température, ce qui donne une valeur réelle  $F_N = 1,022$  à 15 °C. Cette correction n'est toutefois pas très précise et, en outre, en raison de la variation de température à  $\pm 2$ °C près au cours de l'étalonnage, les valeurs probables de  $F_N$  sont supposées s'inscrire dans un intervalle de  $\pm 0,001$  autour de  $F_N$  avec une distribution rectangulaire. Les mesures de comparaison sont effectuées à  $h = 5$  niveaux de tension d'environ 20 %, 40 %, ... 100 % de  $V_{X_{\max}}$ . À chaque niveau de tension, des relevés de lecture simultanés des tensions  $V_N$  et  $V_X$  sont effectués pour  $n = 10$  applications de tension. Des études plus approfondies sur le comportement dynamique, la stabilité à court terme, l'intervalle de température et les perturbations montrent une influence sur le coefficient de conversion de l'objet en essai,  $F_X$ , ne dépassant  $\pm 0,2 \%$  chacune. Sa stabilité à long terme est estimée sur la base des données du constructeur comme ne variant pas de plus de  $\pm 0,3 \%$  jusqu'à l'étalonnage suivant.

L'équation-modèle pour calculer la valeur de  $F_X$  et son incertitude-type composée peut être développée comme suit. Dans le cas idéal, les deux systèmes de mesure indiquent la même valeur de la tension alternative d'essai  $V$  (Figure B.1):

$$V = F_N V_N = F_X V_X. \quad (\text{B.1})$$

Ce qui conduit à l'équation de base pour calculer le coefficient de conversion du système en essai:

$$F_X = \frac{V_N}{V_X} F_N. \quad (\text{B.2})$$

Comme décrit ci-dessus, les coefficients de conversion des deux systèmes sont soumis à plusieurs grandeurs d'influence telles que la dérive, la température, etc. Elles contribuent aux valeurs du coefficient de conversion et aussi à leurs incertitudes. Ces contributions sont désignées ici par  $\Delta F_{N,1}, \Delta F_{N,2}, \dots$  pour le système de référence et par  $\Delta F_{X,1}, \Delta F_{X,2}, \dots$  pour le système en essai. En général, chaque contribution au coefficient de conversion  $F_N$  ou  $F_X$  consiste en une erreur et une incertitude-type. L'erreur est prise pour corriger le coefficient de conversion, la correction étant de signe opposé. La contribution d'incertitude est liée au coefficient de conversion concerné  $F_N$  ou  $F_X$  et est évaluée d'une manière similaire à celle décrite à l'Article A.5, c'est-à-dire soit en supposant une distribution rectangulaire des probabilités dans un intervalle  $\pm a_i$ , ce qui conduit à une incertitude-type  $u_i = a_i/\sqrt{3}$ , soit, dans

le cas d'un constituant étalonné, en divisant son incertitude élargie  $U$  par le facteur d'élargissement  $k$ . Il n'est pas indispensable que la contribution  $\Delta F_{N,m}$  ou  $\Delta F_{X,i}$ , ait toujours une erreur (ou l'erreur est supposée assez faible pour être négligée) et elle est donc constituée uniquement de la contribution d'incertitude  $u_i$ .

L'équation de base (B.2) est complétée par les contributions  $\Delta F_{N,m}$  et  $\Delta F_{X,i}$  pour obtenir la fonction-modèle complète pour déterminer le coefficient de conversion  $F_X$  et son incertitude-type composée. La corrélation entre les grandeurs d'influence étant négligée, l'Equation (B.2) peut alors s'écrire dans la version générale:

$$F_X - \sum_i \Delta F_{X,i} = \frac{V_N}{V_X} \left( F_N - \sum_m \Delta F_{N,m} \right) \tag{B.3}$$

NOTE 1 Par définition, les erreurs insérées dans les deux membres de l'équation ont un signe négatif. Elles sont définies comme étant  $\Delta F = (\text{valeur indiquée}) - (\text{valeur correcte})$ .

Pour le cas d'espèce, le coefficient de conversion  $F_X$  du système de mesure en alternatif peut être exprimé par:

$$F_X = \frac{V_N}{V_X} (F_N - \Delta F_N) + \sum_{i=1}^5 \Delta F_{X,i}, \tag{B.4}$$

où:

- $\Delta F_N$  est la contribution due à la température plus basse du système de référence,
- $\Delta F_{X,1}$  est la contribution due à la non-linéarité du quotient,
- $\Delta F_{X,2}$  est la contribution due à l'instabilité à court terme du système en essai,
- $\Delta F_{X,3}$  est la contribution due à l'instabilité à long terme du système en essai,
- $\Delta F_{X,4}$  est la contribution due au comportement dynamique du système en essai,
- $\Delta F_{X,5}$  est la contribution due à la variation de température du système en essai.

NOTE 2 Dans cet exemple,  $\Delta F_N$  consiste à la fois en une correction et une contribution d'incertitude au coefficient de conversion  $F_N$ , tandis que les termes  $\Delta F_{X,1}$  à  $\Delta F_{X,5}$  contribuent uniquement à l'incertitude du coefficient de conversion  $F_X$ . Par commodité, les contributions d'incertitude  $\Delta F_{X,1}$  à  $\Delta F_{X,5}$  sont directement liées à  $F_X$ , c'est-à-dire que les coefficients de sensibilité de ces grandeurs d'entrée ont déjà été pris en compte.

La mesure de comparaison à un seul niveau de tension entre le système de mesure X et le système de référence N fournit  $n = 10$  paires de valeurs mesurées  $V_N$  et  $V_X$ , à partir desquelles les quotients  $V_N/V_X$ , leur moyenne et l'écart-type expérimental  $s(V_N/V_X)$  sont calculés. Un exemple pour les valeurs mesurées à un niveau de tension d'environ 40 %  $V_{Xmax}$  est donné dans le Tableau B.1. De même, les quotients  $V_N/V_X$  et les écarts-types  $s(V_N/V_X)$  sont obtenus pour un total de  $h = 5$  niveaux de tension jusqu'à 500 kV (Tableau B.2).

**Tableau B.1 – Résultat de la mesure de comparaison à un seul niveau de tension**

Nombre de mesures	Système de référence	Système en essai	Quotient
	$V_N$ kV	$V_X$ V	$V_N/V_X$
1	191,4	190,8	1003,1
2	191,6	190,9	1003,7
3	190,7	189,9	1004,2
4	189,9	189,0	1004,8

Nombre de mesures	Système de référence	Système en essai	Quotient $V_N/V_X$
	$V_N$ kV	$V_X$ V	
5	190,9	189,9	1005,3
6	191,2	190,3	1004,7
7	191,3	190,4	1004,7
8	191,2	190,4	1004,2
9	190,6	189,9	1003,7
10	191,3	190,7	1003,1
Moyenne de $V_N/V_X$ à environ 40 % $V_{Xmax}$			<b>1004,2</b>
Écart-type expérimental $s(V_N/V_X)$ :			<b>0,73</b>

**Tableau B.2 – Résumé des résultats pour  $h = 5$  niveaux de tension ( $V_{Xmax} = 500$  kV)**

$g$ No.	Niveau de tension % de $V_{Xmax}$	$V_N/V_X$	$s(V_N/V_X)$
1	18	1003,2	0,71
2	38	1004,2	0,73
3	63	1004,5	0,81
4	83	1006,5	0,68
5	100	1010,1	<b>0,85 (= <math>s_{max}</math>)</b>
<b>Moyenne</b>		<b>1005,7</b>	

La moyenne des cinq quotients  $V_N/V_X$  dans le Tableau B.2 est de 1005,7. Pour se placer du côté de la sécurité de l'estimation d'incertitude, l'incertitude-type de Type A de  $V_N/V_X$  est évaluée à partir de l'écart-type maximum  $s_{max} = 0,85$  selon l'Equation (A.3):

$$u_A = \frac{s_{max}}{\sqrt{n}} = \frac{0,85}{\sqrt{10}} = 0,27.$$

L'écart des quotients  $V_N/V_X$  par rapport à leur moyenne caractérise la non-linéarité du système X. L'écart maximum est  $a_1 = 4,4$  à 100 % de  $V_{Xmax}$  (Tableau B.2). L'incertitude-type de type B de  $V_N/V_X$ , due à la non-linéarité, est ainsi  $a_1/\sqrt{3} = 2,54$  selon, l'Equation (A.7). La valeur est multipliée par le coefficient de sensibilité concerné  $c_1 = \partial F_X / \partial (V_N/V_X) = F_N - \Delta F_N = 1,022$  pour obtenir la contribution d'incertitude de Type B:

$$u_{B1} = \frac{a_1}{\sqrt{3}} (F_N - \Delta F_N) = \frac{4,4}{\sqrt{3}} 1,022 = 2,6.$$

Les valeurs et les incertitudes-types de toutes les grandeurs d'entrée sont saisies dans le membre de droite de l'équation-modèle (B.4). L'équation-modèle peut être évaluée manuellement, à l'aide des équations données dans l'Annexe A, ou avec l'aide d'un logiciel spécial qu'il convient de valider pour le calcul d'incertitudes. Le résultat de l'évaluation est résumé dans le Tableau B.3. La dernière ligne indique le coefficient de conversion affecté  $F_X$ , son incertitude-type composée et les degrés de liberté réels. La valeur élevée  $\nu_{eff} = 180$  indique une distribution normale des valeurs probables de  $F_X$ , et donc  $k = 2$  est valide (voir le Tableau A.1).

NOTE 3 L'estimation de l'incertitude n'est pas très précise et une précision numérique importante n'est pas requise.

Enfin, le résultat complet de l'étalonnage du système de mesure approuvé est exprimé par le coefficient de conversion affecté et son incertitude élargie:

$$F_X = 1028 \pm 11 = 1028(1 \pm 0,011) \text{ pour une probabilité de couverture supérieure ou égale à } 95 \% (k = 2).$$

L'incertitude élargie relative du coefficient de conversion affecté est  $U = 1,1 \%$ . Puisqu'elle contient une contribution d'incertitude de la stabilité à long terme, elle peut être appliquée comme incertitude élargie de la tension d'essai jusqu'à l'étalonnage suivant du système de mesure approuvé, à condition que la stabilité du coefficient de conversion soit contrôlée par des contrôles intermédiaires des caractéristiques (voir 4.3).

NOTE 4 La méthode simplifiée de l'Article 5 fournit une incertitude élargie relative identique du coefficient de conversion affecté.

**Tableau B.3 – Bilan d'incertitude du coefficient de conversion affecté  $F_X$**

Grandeur	Valeur	Contribution d'incertitude-type	Degrés de liberté	Coefficient de sensibilité	Contribution d'incertitude-type composée
$F_N$	1,025	0,004 <sup>1)</sup>	50	1005,7	4,0
$\Delta F_N$	0,003	0,000577 <sup>2)</sup>	$\infty$	-1005,7	-0,58
$V_N/V_X$	1005,7	0,27 <sup>1)</sup>	9	1,022	0,28
$\Delta F_{X,1}$	0	2,60 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	2,6
$\Delta F_{X,2}$	0	1,19 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,2
$\Delta F_{X,3}$	0	1,78 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,8
$\Delta F_{X,4}$	0	1,19 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,2
$\Delta F_{X,5}$	0	1,19 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	1,2
<b><math>F_X</math></b>	<b>1027,8</b>		<b>180</b>		<b>5,54</b>
<sup>1)</sup> Distribution normale. <sup>2)</sup> Distribution rectangulaire.					

## B.2 Exemple 2: Coefficient de conversion d'un système de mesure de tension de choc (méthode du constituant)

Le système de mesure des tensions de chocs de foudre consiste en un diviseur d'impulsions de tension assignée 1,2 MV, un enregistreur numérique 10 bits et un câble coaxial de 20 m. Les coefficients de conversion du diviseur d'impulsions (indice « div ») et de l'enregistreur numérique (indice « rec ») et leurs incertitudes élargies sont déclarés par les constructeurs comme

$$F_{\text{div}} = 2015 \quad (U_{\text{div}} = 1,2 \%, p \geq 95 \%, k = 2), \text{ et}$$

$$F_{\text{rec}} = 1,050 \quad (U_{\text{rec}} = 0,8 \%, p \geq 95 \%, k = 2).$$

L'incertitude du diviseur comprend les contributions de l'essai de linéarité jusqu'à 1,2 MV, le comportement dynamique et la stabilité à court terme. Des informations supplémentaires sur l'effet de proximité et la stabilité à long terme sont données par le constructeur. L'étalonnage de l'enregistreur numérique avait été effectué sur toutes les plages entre 60 % et 100 % de la déviation pleine échelle en appliquant des impulsions d'étalonnage régulières selon la CEI 61083-1. La réponse indicielle de l'enregistreur est plutôt plate et on peut conclure que le

coefficient de conversion ne dépend pas des paramètres de temps dans les limites des tolérances spécifiées pour les tensions de chocs de foudre.

Afin d'obtenir l'incertitude du système de mesure complet, l'utilisateur doit prendre en compte des contributions d'incertitude supplémentaires, soit prises dans les recueils de caractéristiques du diviseur et de l'enregistreur, soit déterminées par des essais supplémentaires. On suppose que les grandeurs d'influence suivantes ont une distribution rectangulaire, la mi-largeur étant  $a_i$ , à partir de laquelle les contributions d'incertitude sont calculées comme étant  $a_i/\sqrt{3}$ . L'instabilité à long terme annuelle est spécifiée par le constructeur comme n'étant pas supérieure à  $\pm 0,3\%$  pour le diviseur et à  $\pm 0,2\%$  pour l'enregistreur. L'instabilité à court terme de l'enregistreur n'est pas supérieure à  $\pm 0,3\%$ . Il n'est pas nécessaire d'étudier l'effet de proximité car le diviseur est situé à l'extérieur de la distance de garde minimale spécifiée par le constructeur. Comme les impulsions d'environ  $2\%$  se superposent aux chocs de foudre générées dans la salle d'essais de l'utilisateur, un écart résiduel ne dépassant pas  $\pm 0,3\%$  est attribué au logiciel de l'enregistreur utilisé pour calculer la valeur de crête de la courbe de base en fonction du facteur dépendant de la fréquence  $k$  (voir Article 8 de la CEI 60060-1).

L'équation-modèle de base pour déterminer le coefficient de conversion affecté  $F$  du système de mesure complet est:

$$F = F_{\text{div}} \cdot F_{\text{rec}} \quad (\text{B.5})$$

L'équation-modèle est complétée, comme dans l'Exemple B.1, par des termes supplémentaires  $\Delta F_{\text{div},i}$  et  $\Delta F_{\text{rec},i}$  dus aux grandeurs d'influence susmentionnées. Ces termes consistent généralement en une erreur et une incertitude-type  $a_i/\sqrt{3}$  calculée à partir de la mi-largeur  $a_i$  des valeurs probables dans l'hypothèse d'une distribution rectangulaire des probabilités. La fonction-modèle complète pour le coefficient de conversion  $F_m$  du système de mesure complet s'écrit:

$$F = (F_{\text{div}} - \Delta F_{\text{div}}) \cdot \left( F_{\text{rec}} - \sum_{i=1}^3 \Delta F_{\text{rec},i} \right) \quad (\text{B.6})$$

où:

$\Delta F_{\text{div}}$  est la contribution due à l'instabilité à long terme du diviseur;

$\Delta F_{\text{rec},1}$  est la contribution due à l'instabilité à long terme de l'enregistreur;

$\Delta F_{\text{rec},2}$  est la contribution due à l'instabilité à court terme de l'enregistreur;

$\Delta F_{\text{rec},3}$  est la contribution due au logiciel de l'enregistreur (mise en œuvre du facteur  $k$ ).

NOTE 1 Par définition, les erreurs  $\Delta F_{\text{div}}$  et  $\Delta F_{\text{rec},i}$  ont un signe négatif. Elles sont définies comme étant  $\Delta F = (\text{valeur indiquée}) - (\text{valeur correcte})$ .

NOTE 2 Dans cet exemple,  $\Delta F_{\text{div}}$  et les termes  $\Delta F_{\text{rec},1}$  à  $\Delta F_{\text{rec},3}$  contribuent uniquement à l'incertitude du coefficient de conversion  $F$ .

Les valeurs et les incertitudes-types de toutes les grandeurs d'entrée sont saisies dans le membre de droite de l'équation-modèle (B.6). L'équation-modèle peut être évaluée manuellement, à l'aide des équations données dans l'Annexe A, ou avec l'aide d'un logiciel spécial qu'il convient de valider pour le calcul d'incertitudes. Le résultat de l'évaluation est résumé dans le Tableau B.4. Dans la dernière ligne, le coefficient de conversion affecté  $F$  du système de mesure complet, son incertitude-type composée et les degrés de liberté réels sont donnés.

NOTE 3 L'estimation de l'incertitude n'est pas très précise et une précision numérique importante n'est pas requise.

**Tableau B.4 – Bilan d'incertitude du coefficient de conversion affecté  $F$**

Grandeur	Valeur	Contribution d'incertitude-type	Degrés de liberté	Coefficient de sensibilité	Contribution d'incertitude-type composée
$F_{div}$	2015	12,1 <sup>1)</sup>	50	1,05	13
$\Delta F_{div}$	0	3,49 <sup>2)</sup>	$\infty$	-1,05	-3,7
$F_{rec}$	1,050	0,0042 <sup>1)</sup>	50	2015	8,5
$\Delta F_{rec,1}$	0	0,00121 <sup>2)</sup>	$\infty$	-2015	-2,4
$\Delta F_{rec,2}$	0	0,00182 <sup>2)</sup>	$\infty$	-2015	-3,7
$\Delta F_{rec,3}$	0	0,00182 <sup>2)</sup>	$\infty$	-2015	-3,7
<b><math>F</math></b>	<b>2115,8</b>		<b>130</b>		<b>16,7</b>

1) Distribution normale.  
2) Distribution rectangulaire.

Le résultat complet pour le coefficient de conversion affecté du système de mesure de chocs s'exprime par:

$$F = 2116 \pm 33 = 2116(1 \pm 0,016) \text{ pour une probabilité de couverture supérieure ou égale à } 95 \% (k = 2).$$

L'incertitude élargie relative du coefficient de conversion affecté est  $U = 1,6 \%$ . Puisqu'elle contient les contributions d'incertitude de la stabilité à long terme pour une année, elle peut être appliquée comme incertitude élargie de la tension d'essai jusqu'au prochain étalonnage du diviseur et de l'enregistreur dans une année.

### B.3 Exemple 3: Temps de montée des tensions de chocs de foudre

Le temps de montée d'un système X de mesure de tension de choc de 2 MV, consistant en un diviseur et un enregistreur numérique (10 bits, 100 MS/s), est étalonné par comparaison avec un système de mesure de référence N à des chocs de foudre d'environ 500 kV (Figure B.1). L'erreur moyenne systématique de N pour la mesure des temps de montée est  $\Delta T_{1N} = 0,01 \mu\text{s}$  dans l'époque nominale, l'incertitude élargie étant  $U_N = 0,02 \mu\text{s} (k = 2)$ .

Par la comparaison,  $n = 10$  tensions de chocs de foudre, d'un temps de montée spécifié, sont enregistrées simultanément avec les deux systèmes. Le temps de montée réel de la  $i^{\text{ème}}$  tension de choc, enregistrée avec le système N, est déterminé par:

$$T_{1N,i} = (t_{90} - t_{30})/0,6, \tag{B.7}$$

où  $t_{30}$  et  $t_{90}$  désignent respectivement les durées à 30 % et à 90 % de la valeur de crête évaluée avec le système N. Le temps de montée  $T_{1X,i}$  de la même tension de choc, enregistrée avec le système X, se calcule de la même manière.

À partir des  $n = 10$  différences des temps de montée, mesurées chacune avec X et N, on évalue l'écart de temps de montée moyen,  $\Delta T_1$ , par:

$$\Delta T_1 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (T_{1X,i} - T_{1N,i}). \tag{B.8}$$

La comparaison est effectuée pour trois temps de montée différents: les valeurs maximale, minimale et moyenne de l'époque nominale, c'est-à-dire pour  $T_1 \approx 0,8 \mu\text{s}$ ,  $\approx 1,2 \mu\text{s}$  and

$\approx 1,6 \mu\text{s}$ . Pour chacune des trois valeurs  $T_1$ , on calcule l'écart moyen  $\Delta T_{1,j}$ . La moyenne globale des trois valeurs  $\Delta T_{1,j}$  est:

$$\Delta T_{1m} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \Delta T_{1,j}. \quad (\text{B.9})$$

En d'autres termes,  $\Delta T_{1m}$  désigne l'erreur de temps de montée moyenne du système X, rapportée au système de référence N, dans la plage  $T_1 = 0,8 \mu\text{s} \dots 1,6 \mu\text{s}$ .

La fonction-modèle pour l'erreur du système X, corrigée de l'erreur  $\Delta T_{1N}$  du système de référence N, est:

$$\Delta T_{1cal} = \Delta T_{1m} + \Delta T_{1N}. \quad (\text{B.10})$$

Les valeurs individuelles, les erreurs et les écarts, obtenus par l'étalonnage, sont énumérés dans le Tableau B.5 et sont également représentés à la Figure B.2.

**Tableau B.5 – Résultat d'étalonnage pour le temps de montée  $T_1$  et les écarts**

		Valeur		
$T_{1N,j}$	$\mu\text{s}$	0,80	1,20	1,60
$T_{1X,j}$	$\mu\text{s}$	0,73	1,17	1,61
$s_j(T_{1X,j})$	$\mu\text{s}$	0,015	0,01	0,01
$\Delta T_{1,j}$	$\mu\text{s}$	-0,07	-0,03	0,01
$\Delta T_{1m}$	$\mu\text{s}$	<b>-0,03</b>		

À partir de l'écart-type maximum des trois valeurs  $T_{1X,j}$ , l'incertitude-type de Type A se calcule par:

$$u_A(T_{1X}) = \frac{1}{\sqrt{10}} \max_{j=1}^3 s_j = \frac{0,015 \mu\text{s}}{\sqrt{10}} = 0,00474 \mu\text{s} \quad (\text{B.11})$$

Puisque  $T_{1X}$  n'est pas mentionné directement dans la fonction-modèle,  $u_A(T_{1X})$  est saisi comme une grandeur distincte dans le bilan d'incertitude (Tableau B.6).

L'écart maximum des trois valeurs individuelles  $T_{1X,j}$  par rapport à leur moyenne  $\Delta T_{1m}$  donne l'incertitude-type de Type B:

$$u_B(\Delta T_{1m}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{j=1}^3 |\Delta T_{1,j} - \Delta T_{1m}| = \frac{0,04 \mu\text{s}}{\sqrt{3}} = 0,0231 \mu\text{s} \quad (\text{B.12})$$

Les valeurs et les incertitudes-types de toutes les grandeurs d'entrée sont saisies dans le membre de droite de l'équation-modèle (B.8 avec B.7). L'équation-modèle peut être évaluée manuellement, à l'aide des équations données dans l'Annexe A, ou avec l'aide d'un logiciel spécial qu'il convient de valider pour le calcul d'incertitudes. Le résultat de l'évaluation est résumé dans le Tableau B.6. L'erreur moyenne  $\Delta T_{1cal}$ , son incertitude-type composée et les degrés de liberté effectifs sont donnés sur la dernière ligne. La valeur élevée  $\nu_{\text{eff}} = 1700$  indique une distribution normale des valeurs probables de  $\Delta T_{1cal}$ , et donc  $k = 2$  est valide (voir Tableau A.1 de l'Annexe A).

**Tableau B.6 – Bilan d'incertitude de l'écart de temps de montée  $\Delta T_{1cal}$**

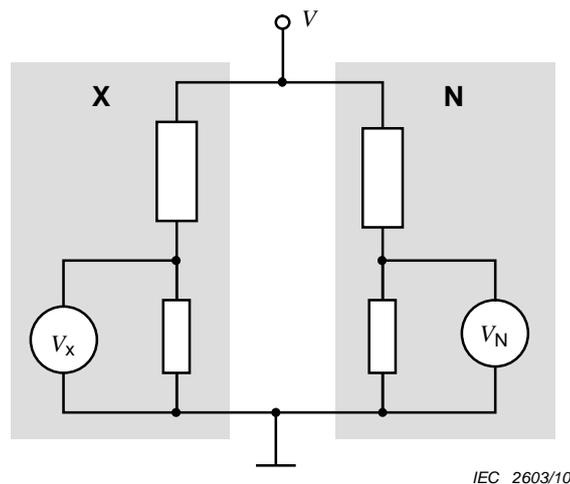
Grandeur	Valeur $\mu\text{s}$	Contribution d'incertitude-type $\mu\text{s}$	Degrés de liberté	Coefficient de sensibilité	Contribution d'incertitude- type composée $\mu\text{s}$
$\Delta T_{1N}$	0,01	0,01 <sup>1)</sup>	50	1	0,01
$\Delta T_{1m}$	-0,03	0,0231 <sup>2)</sup>	$\infty$	1	0,023
$u_A(T_{1X})$	0,0	0,00474 <sup>1)</sup>	9	1	0,0047
$\Delta T_{1cal}$	<b>-0,020 <math>\mu\text{s}</math></b>		<b>1 700</b>		<b>0,0256 <math>\mu\text{s}</math></b>
<sup>1)</sup> Distribution normale. <sup>2)</sup> Distribution rectangulaire.					

Enfin, le résultat complet de l'étalonnage s'exprime comme suit:

$$\Delta T_{1cal} = -0,020 \mu\text{s} \pm 0,051 \mu\text{s} \text{ pour une probabilité de couverture supérieure ou égale à } 95 \% \text{ (} k = 2 \text{)}.$$

En d'autres termes: Les temps de montée mesurés avec le système X dans l'époque nominale sont trop faibles de  $-0,02 \mu\text{s}$ . Lorsque le système X est utilisé pour les mesures de tension de choc, le temps de montée corrigé  $T_{1cor}$  s'obtient en ajoutant  $0,02 \mu\text{s}$  à la valeur mesurée  $T_{1meas}$ . S'il n'est nécessaire de prendre en compte aucune autre contribution au temps de montée, l'incertitude élargie de  $T_{1cor}$  est  $0,051 \mu\text{s}$  ( $k = 2$ ).

Des contributions d'incertitude supplémentaires peuvent apparaître lorsque l'enregistreur numérique du système X est utilisé dans des plages différentes de celles utilisées au cours de la comparaison. L'effet sur  $t_{30}$  et  $t_{90}$  doit être estimé et un écart raisonnable de  $T_1$  doit être calculé conformément à l'Equation (B.7) à partir duquel l'incertitude-type de Type B correspondante est introduite dans le bilan d'incertitude.



**Figure B.1 – Comparaison entre le système en essai, X, et le système de référence, N**

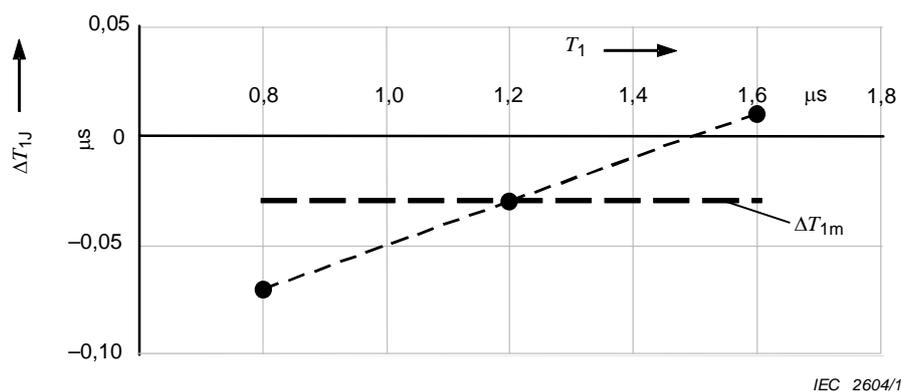


Figure B.2 – Écarts de temps de montée  $\Delta T_{1,j}$  du système X, rapportés au système de référence N, et leur moyenne  $\Delta T_{1,m}$  dans la plage de  $T_1 = 0,8 \mu\text{s} \dots 1,6 \mu\text{s}$

## Annexe C (informative)

### Mesures de réponse indicielle

#### C.1 Généralités

La mesure de réponse indicielle est une méthode classique pour caractériser un diviseur de tension de choc, un oscilloscope à impulsions ou un enregistreur numérique. Puisqu'il n'y a pas de corrélation directe entre les paramètres de réponse indicielle et la mesure correcte des tensions de chocs, elle a perdu son rôle pour les exigences de la présente norme mais elle reste importante pour caractériser le comportement dynamique en rapport avec des mesures de comparaison (8.4.2, 9.3.2) et notamment pour le développement de diviseurs et d'instruments. En outre, elle est appliquée pour les contrôles des caractéristiques du comportement dynamique (voir 8.5.3 et 9.5.3).

Pour l'estimation des erreurs dans la mesure des paramètres de temps par convolution (Annexe D), la connaissance précise de la réponse indicielle unitaire est nécessaire.

#### C.2 Définitions en complément à l'Article 3

##### C.2.1

##### niveau de référence (mesures de chocs uniquement)

$I_R$ ,

valeur moyenne de la réponse indicielle prise sur l'époque de niveaux de référence (voir C.2.10 et Figure C.1a), c'est-à-dire sur la plage de  $0,5 t_{\min}$  à  $2 t_{\max}$

NOTE Un système de mesure peut avoir plusieurs niveaux de référence, par exemple, il peut avoir des coefficients de conversion différents pour des formes d'onde différentes en raison de la variation du niveau de réponse (voir 3.5.4 et Figure C.1a).

##### C.2.2

##### origine d'une réponse indicielle,

$O_1$

instant auquel la courbe de réponse commence d'abord une croissance monotone au-dessus de l'amplitude du bruit au niveau zéro de la réponse indicielle (unitaire) (voir Figure C.1a).

NOTE 1 Dans certains cas, la réponse indicielle unitaire démarre avec une distorsion initiale (Figure C.2). Il convient alors de déterminer l'origine  $O_1$  à l'intersection entre l'extension vers le bas en partant du point de croissance monotone de la réponse indicielle unitaire et la ligne du zéro. La distorsion initiale peut être caractérisée par un paramètre  $T_0$  (temps de distorsion initiale) qui correspond à la ou aux zones partielles entre la ligne du zéro et la réponse indicielle unitaire jusqu'à  $O_1$ .

NOTE 2 Toutes les valeurs de temps (sauf  $T_0$ ) sont mesurées à partir de l'origine  $O_1$ .

##### C.2.3

##### réponse indicielle unitaire

$g(t)$

réponse indicielle normée telle qu'un niveau de référence soit égal à l'unité et le niveau zéro reste à zéro (Figure C.1a).

NOTE Un système de mesure a une réponse indicielle unitaire pour chaque niveau de référence. L'origine  $O_1$  de la réponse indicielle est identique à celle de la réponse indicielle unitaire.

##### C.2.4

##### intégrale de réponse indicielle

$T(t)$

intégrale de  $O_1$  à  $t$  de un moins la réponse indicielle unitaire  $g(t)$  (voir Figure C.1b):

$$T(t) = \int_{O_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau \quad (\text{C.1})$$

**C.2.5****temps de réponse expérimental** $T_N$ valeur de l'intégrale de la réponse indicielle à  $2 \cdot t_{\max}$ :

$$T_N = T(2 \cdot t_{\max}) \quad (\text{C.2})$$

**C.2.6****temps de réponse partiel** $T_\alpha$ valeur maximale de l'intégrale de la réponse indicielle pour  $t \leq 2 t_{\max}$  (voir Figure C.1b) égale à la zone ombrée sur la Figure C.1a)

NOTE Habituellement,  $T_\alpha = T(t_1)$  où  $t_1$  est l'instant auquel  $g(t)$  atteint pour la première fois l'amplitude unitaire (Figure C.1a).

**C.2.7****temps de réponse résiduel** $T_R(t_i)$ ,temps de réponse expérimental  $T_N$  moins la valeur de l'intégrale de la réponse indicielle pour un temps spécifique  $t_i$  tel que  $t_i < 2 t_{\max}$ :

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i). \quad (\text{C.3})$$

**C.2.8****dépassement de la réponse indicielle unitaire,** $\beta_{rs}$ différence entre le maximum  $g_{\max}(t)$  et l'unité exprimée en pourcentage de l'unité (Figure C.1a):

$$\beta_{rs} = 100 \% (g_{\max}(t) - 1). \quad (\text{C.4})$$

**C.2.9****temps de stabilisation** $t_s$ temps le plus court pour lequel le temps de réponse résiduel  $T_R(t)$  devient et reste inférieur à 2 % de  $t$ :

$$|T_N - T(t)| < 0,02t \quad (\text{C.5})$$

pour toutes les valeurs de  $t$  appartenant à l'époque allant de  $O_1$  jusqu'au temps à mi-valeur le plus long  $T_{2\max}$  de la tension de choc à mesurer (Figure C.1b).

**C.2.10****époque de niveau de référence (tension de choc uniquement)**

intervalle de temps dans lequel le niveau de référence de la réponse indicielle est déterminé sa limite inférieure étant égale à 0,5 fois la limite inférieure de l'époque nominale ( $0,5t_{\min}$ ) et sa limite supérieure égale à deux fois la limite supérieure de l'époque nominale ( $2t_{\max}$ )

### C.3 Circuit pour les mesures de réponse indicielle

Il convient que la disposition du circuit utilisée pour déterminer la réponse indicielle soit décrite dans le recueil de caractéristiques et il convient qu'elle soit aussi proche que possible des conditions d'utilisation.

Des circuits appropriés sont représentés à la Figure C.3. Le circuit préférentiel est représenté à la Figure C.3a où le générateur d'échelons est placé sur une paroi métallique ou sur un conducteur métallique en bande d'au moins 1 m de largeur, servant de retour de terre.

Pour générer l'échelon, le système de mesure est alimenté soit par une impulsion à croissance lente, soit par une tension continue, qui est coupée par un relais ou un éclateur (Figure C.3d). Les méthodes de coupure suivantes se sont révélées acceptables:

- par un relais à contacts mouillés au mercure: cette méthode donne des échelons allant jusqu'à quelques centaines de volts,
- par un intervalle d'air de champ uniforme à la pression atmosphérique avec un écartement de quelques millimètres: celui-ci donne des échelons allant jusqu'à plusieurs kilovolts,
- par un intervalle uniforme, avec un intervalle allant jusqu'à quelques millimètres sous une pression augmentée de gaz: celui-ci donne des échelons allant jusqu'à quelques dizaines de kilovolts.

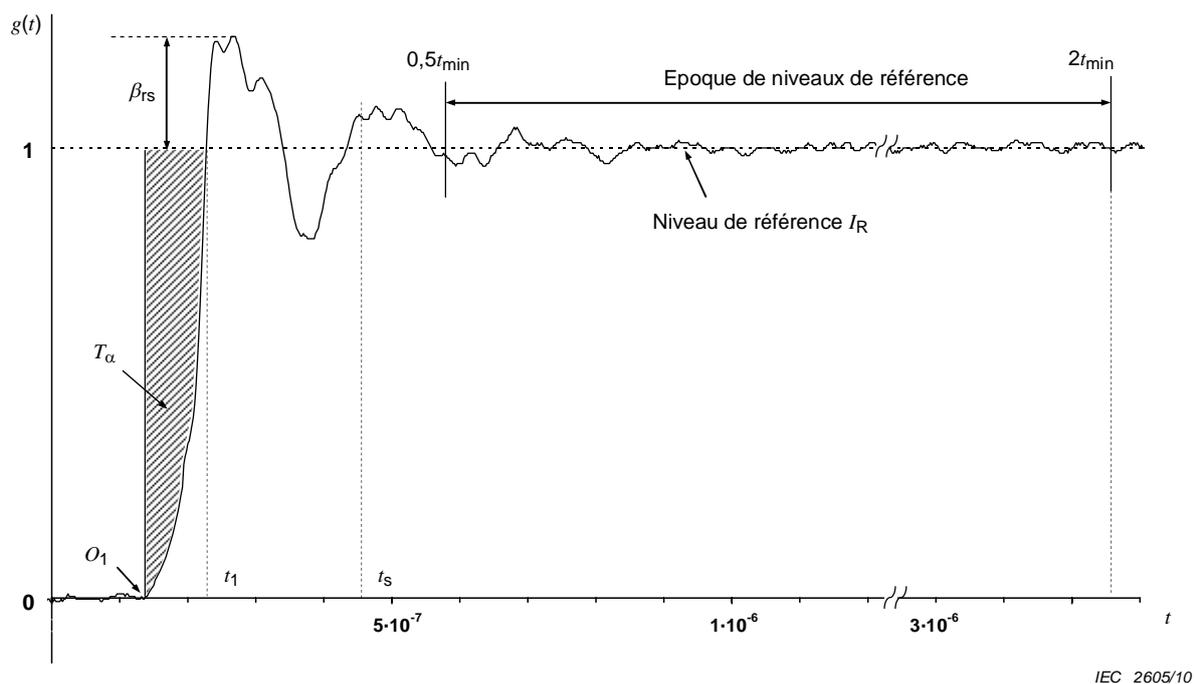
Lorsque l'échelon est produit par un générateur à répétition, la durée de l'échelon et de l'intervalle entre les échelons, doit être choisie de façon qu'aucune erreur supplémentaire ne soit introduite par rapport à une impulsion unique.

### C.4 Exigences pour la réponse indicielle d'un constituant

Le constituant, normalement un dispositif de conversion ou un instrument de mesure enregistreur, est soumis à un échelon de tension et sa sortie est mesurée. Il convient que le temps de montée de l'échelon appliqué soit inférieur à 1/5 du temps de réponse partiel  $T_\alpha$ . Un léger lissage des données enregistrées de la réponse indicielle est recommandé pour réduire l'influence des petites oscillations et du bruit superposés à la réponse indicielle.

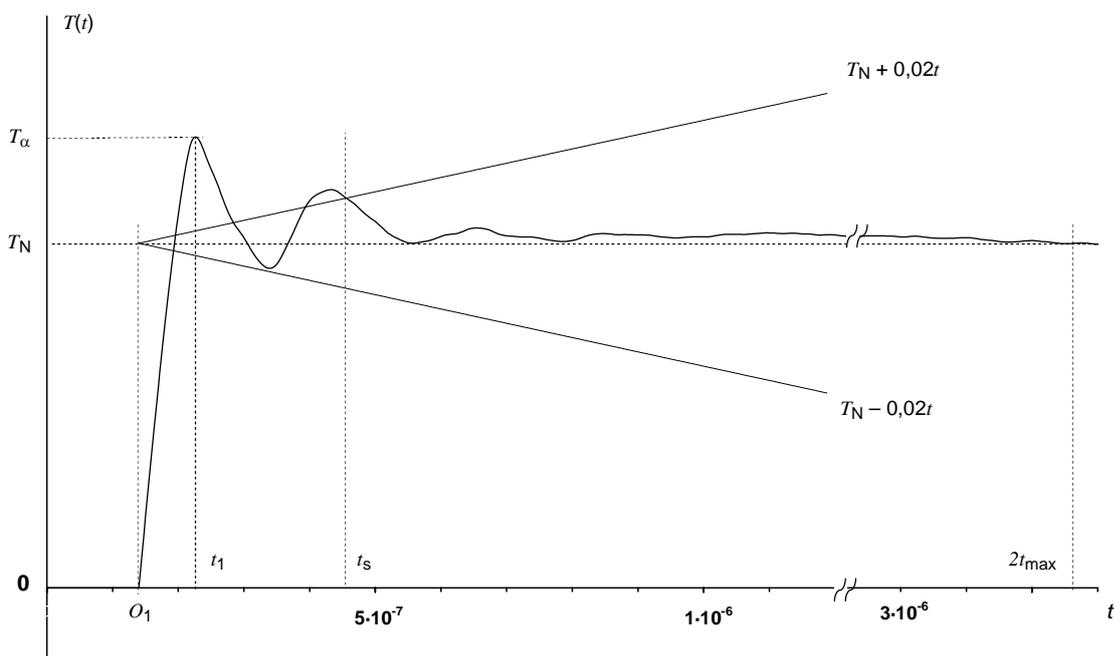
Il convient que la réponse indicielle dans l'époque de niveaux de référence sélectionnée ne s'écarte pas de l'unité de plus de  $\pm 2\%$ . Il convient que la réponse indicielle unitaire, au temps  $t_f$  de la forme d'onde de tension correspondante utilisée pour la mesure du coefficient de conversion affecté, ne s'écarte pas du niveau de référence de plus de  $\pm 1\%$  si le  $t_f$  utilisé se situe à l'extérieur de la plage de l'époque de niveau nominale. Lorsqu'une tension de choc de foudre plein est utilisée dans la détermination du coefficient de conversion affecté,  $t_f$  est égal à  $2T_1$ , ce qui représente deux fois le temps de montée du choc. Lorsqu'une tension de choc de foudre coupé sur le front est utilisée,  $t_f$  est égal à  $2T_C$ , ce qui représente deux fois la durée jusqu'à la coupure du choc. Lorsqu'un choc de manœuvre est utilisé,  $t_f$  est égal à  $T_p$ , ce qui représente la durée jusqu'à la crête du choc. Lorsque la tension continue est utilisée,  $t_f$  est égal à 100 ms. Lorsque la tension alternative est utilisée,  $t_f$  est égal au quart de la période de la tension.

Pour les exigences relatives à la réponse indicielle des systèmes de mesure de référence des tensions de chocs, voir 10.2.3.



IEC 2605/10

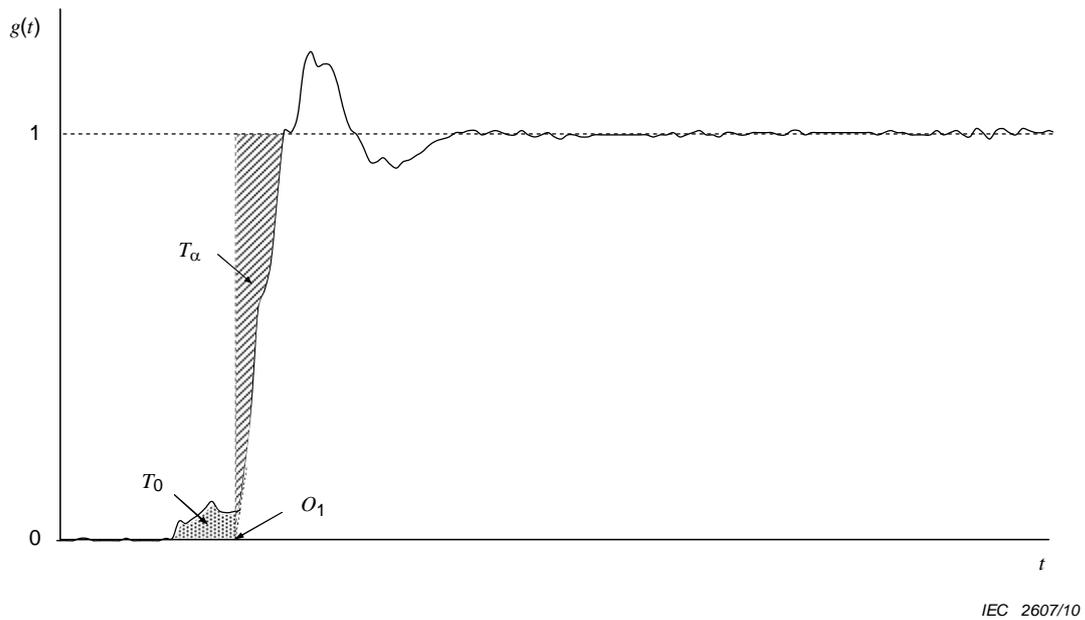
Figure C.1a – Définitions à partir de la réponse indicielle unitaire  $g(t)$



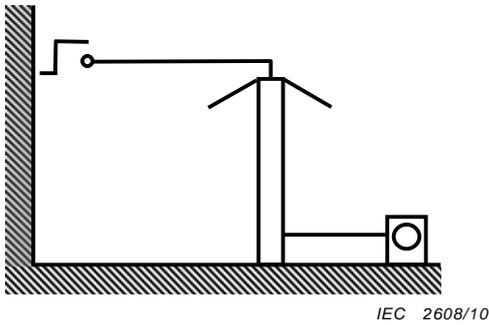
IEC 2606/10

Figure C.1b – Définitions à partir de l'intégrale de la réponse indicielle  $T(t)$

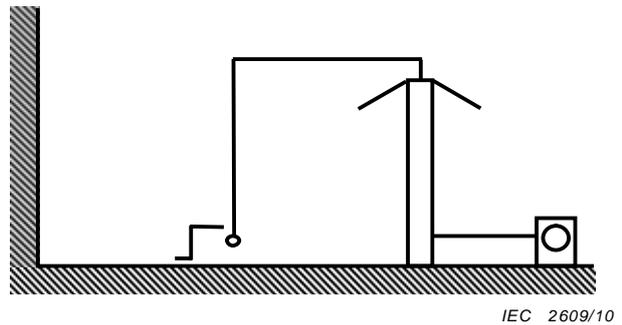
Figure C.1 – Définition des paramètres de réponse



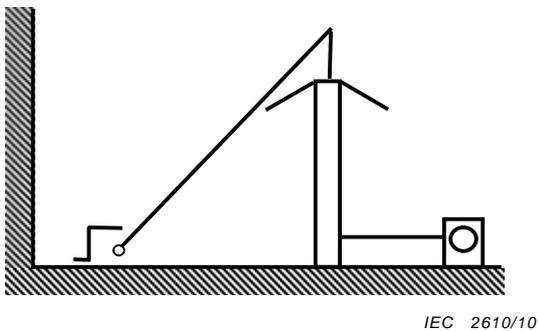
**Figure C.2 – Réponse indicielle unitaire  $g(t)$  montrant une distorsion initiale du temps de distorsion initiale  $T_0$**



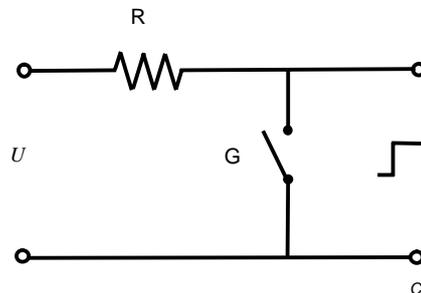
**Figure C.3a – Configuration préférentielle**



**Figure C.3b – Configuration pour grands diviseurs**



**Figure C.3c – Alternative pour grands diviseurs**



**Figure C.3d – Circuit générateur d'échelon type**

NOTE G est le dispositif de coupure destiné à générer l'échelon.

**Figure C.3 – Circuits appropriés à la mesure de la réponse indicielle**

## Annexe D (informative)

### Méthode de convolution pour déterminer le comportement dynamique à partir des mesures de réponse indicielle

#### D.1 Généralités

La méthode de convolution est utilisée pour évaluer les caractéristiques dynamiques d'un diviseur de tension de choc, d'un enregistreur numérique ou d'un système de mesure de tension de choc complet à partir de leurs réponses indicielles (Annexe C).

La méthode de convolution utilise la réponse indicielle du système de mesure pour calculer sa forme d'onde de choc de sortie à partir de la forme d'onde de choc d'entrée. Les erreurs des paramètres de chocs de la forme d'onde de sortie par rapport à la forme d'onde d'entrée peuvent être utilisées pour évaluer la caractéristique de fonctionnement du système de mesure pour une forme d'onde particulière à mesurer.

La méthode de convolution suppose que la réponse indicielle du système de mesure est mesurée correctement et que la forme d'onde d'entrée utilisée dans le calcul est représentative des formes d'onde de chocs réelles devant être mesurées.

#### D.2 Méthode de convolution

Si la forme d'onde de choc d'entrée et la réponse indicielle unitaire (normalisée) (Annexe C) d'un système de mesure de chocs sont respectivement  $V_{in}(t)$  et  $g(t)$ , la tension de sortie,  $V_{out}(t)$ , peut s'exprimer par l'intégrale de convolution suivante:

$$V_{out}(t) = \int_0^t V'_{in}(\tau) \cdot g(t-\tau) \cdot d\tau \quad (D.1)$$

où  $t$  est le temps et  $V'_{in}(t)$  est la dérivée première de la forme d'onde de tension de choc d'entrée  $V_{in}(t)$ .

Si  $g(t)$  et  $V_{in}(t)$  sont échantillonnés avec le même intervalle d'échantillonnage et si le nombre d'échantillons de  $g(t)$  est le même que celui de  $V_{in}(t)$ , l'intégrale de convolution continue (D.1) se réduit à la forme causale de la somme de convolution discrète:

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^i V'_{in}(k) \cdot g(i-k) \cdot \Delta t \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (D.2)$$

où

$V_{out}(i)$  est le tableau de sortie discret;

$V'_{in}(i)$  est la dérivée première du tableau d'entrée;

$g(i)$  est le tableau de réponse indicielle unitaire;

$n$  est le nombre d'échantillons du tableau d'entrée; et

$\Delta t$  est l'intervalle d'échantillonnage des tableaux d'entrée et de sortie et du tableau de réponse indicielle.

### D.3 Procédure pour effectuer le calcul de convolution

Cette procédure est basée sur la somme de convolution discrète décrite par l'Équation (D.2). Elle est utilisée pour le calcul assisté par ordinateur utilisant des formes d'onde de chocs numériques. La procédure est utilisée pour estimer les erreurs des paramètres de chocs de la grandeur de sortie par rapport aux formes d'ondes d'entrée d'un système de mesure de chocs. La procédure donnée ici décrit les principales étapes du calcul. Ces étapes sont les suivantes:

- a) Obtenir le tableau de formes d'onde de chocs  $V_{in}(i)$ , pour  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , et calculer ses paramètres de chocs.
- b) Il convient de rendre la fréquence d'échantillonnage de la forme d'onde de choc d'entrée identique à celle de la réponse indicielle unitaire, avec un nombre d'échantillons égal à celui de la réponse indicielle (voir étape c). Il convient que la forme d'onde d'entrée soit une forme d'onde régulière, la fréquence de bruit la plus élevée ayant été réduite bien en dessous de la fréquence de Nyquist (moitié de la fréquence d'échantillonnage du tableau de chocs). Un tableau de forme d'onde d'entrée régulière et ses paramètres de chocs peuvent être déterminés:
  - 1) à partir d'une expression analytique du choc, par exemple une superposition de deux fonctions exponentielles idéales. Les paramètres de chocs de cette forme d'onde peuvent être obtenus à partir de l'expression analytique ou par le logiciel de calcul de chocs du système de mesure de chocs examiné.
  - 2) ou à partir d'une forme d'onde réelle enregistrée, lissée par un filtre numérique passe-bas de précision ou par un algorithme d'ajustement de spline cubique par morceaux. Les paramètres de chocs de cette forme d'onde peuvent être obtenus à partir du logiciel de calcul de chocs du système de mesure de chocs examiné.
- c) Obtenir la dérivée première  $V'_{in}(i)$  pour  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , de la forme d'onde de choc d'entrée  $V_{in}(i)$  par dérivation numérique.
- d) Obtenir le tableau de réponse indicielle unitaire  $g(i)$  pour  $i = 1, 2, \dots, m-1$  et  $m = n + j$ , où  $j$  est le nombre de points de données avant l'origine de la réponse indicielle unitaire  $O_1$ .
  - 1) Obtenir la réponse indicielle unitaire par normalisation de la réponse indicielle mesurée (Annexe C). Pour obtenir une réponse indicielle unitaire à faible bruit pour les besoins de la convolution, on peut moyennner plusieurs enregistrements de la réponse indicielle. La régularité du tableau de réponse indicielle unitaire  $g(i)$  est moins critique si l'Équation (D.2) est utilisée pour le calcul de convolution et si le tableau de chocs  $V_{in}(i)$  est déjà régulier.
  - 2) Obtenir le niveau zéro,  $l_0$ , de la réponse indicielle en moyennant les échantillons du tableau de réponse indicielle enregistré  $s(i)$  avant le front de début de l'échelon.
  - 3) Obtenir le niveau de référence,  $l_R$ , de la réponse indicielle en moyennant les échantillons du tableau de réponse indicielle enregistré  $s(i)$  dans une plage de temps incluant le temps de montée le plus court pour lequel le système de mesure doit être utilisé et jusqu'au temps représentant la fréquence à laquelle le coefficient de conversion du dispositif de conversion a été déterminé.
  - 4) Normaliser le tableau de réponse indicielle  $s(i)$  en un tableau temporaire de réponse indicielle unitaire,  $g_0(i)$ , à l'aide de la formule suivante:

$$g_0(i) = \frac{s(i) - l_0}{l_R - l_0} \quad (D.3)$$

- 5) Rechercher l'amplitude du bruit au niveau zéro en recherchant l'écart-type,  $d_0$ , des échantillons du tableau  $g_0(i)$  avant le début de l'échelon. Effectuer une recherche inverse à partir de la fin de  $g_0(i)$  pour trouver l'échantillon dont la valeur est supérieure

à trois fois l'écart-type  $d_0$ . Le temps de cet échantillon est affecté comme étant l'origine,  $O_1$ , de  $g_0(i)$ . Affecter l'indice de cet échantillon à  $j$ .

- 6) Construire la réponse indicielle unitaire  $g(t)$  à partir de l'origine en éliminant les échantillons de  $g_0(i)$  avant l'origine, c'est-à-dire:

$$g(i-j) = g_0(i), \quad i = j, \dots, m + j - 1 \quad (\text{D.4})$$

NOTE Le  $g_0(i)$  enregistré comporte  $m + j$  points. La réponse indicielle unitaire  $g(i-j)$  comporte  $n = m$  points après suppression des  $j$  points avant l'origine  $O_1$ .

e) Obtenir le tableau de sortie et son tableau de paramètres de chocs:

- 1) Obtenir le tableau des formes d'onde de chocs de sortie  $V_{\text{out}}(i)$  par le calcul à l'aide de l'Équation (D.2) soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel;
- 2) Calculer les paramètres de chocs de  $V_{\text{out}}(i)$  à l'aide du logiciel de calcul de chocs du système de mesure de chocs.
- 3) Calculer les erreurs  $V_{\text{out}}(i)$  comme la différence entre les paramètres de chocs de  $V_{\text{out}}(i)$  et  $V_{\text{in}}(i)$ .

#### D.4 Contributions d'incertitude

En principe, les erreurs calculées par la convolution peuvent être utilisées pour corriger les paramètres calculés. Toutefois, cette correction ne nécessite pas de connaissance a priori de la forme d'onde, c'est-à-dire que sauf si le choc a une forme régulière connue, la correction n'est pas fiable. Les erreurs et leur dispersion pour différentes formes d'ondes peuvent être utilisées en tant que contribution d'incertitude à l'incertitude de mesure combinée du paramètre concerné. Il convient d'effectuer le calcul d'incertitude conformément au Guide ISO/CEI 98-3:2008, voir aussi l'Annexe A, avec les exemples donnés dans l'Annexe B.

#### D.5 Explication des erreurs calculées des paramètres de chocs

##### D.5.1 Erreurs sur l'amplitude de crête

Le niveau unitaire de la réponse indicielle unitaire n'est habituellement pas constant. Par conséquent, l'erreur calculée de l'amplitude de crête est souvent significative en comparaison à l'erreur numérique du calcul de convolution, bien qu'elle puisse être faible en comparaison à l'incertitude de mesure requise de l'amplitude de crête. Il convient que l'erreur relative calculée de l'amplitude de crête soit égale à la différence relative entre l'unité et la valeur de  $g(i)$  au temps approximativement égal au double du temps de montée  $T_1$  du choc d'entrée  $V_{\text{in}}(i)$ . L'erreur calculée de l'amplitude de crête peut être comparée à la réponse indicielle unitaire pour vérifier si le calcul de convolution a été exécuté correctement.

##### D.5.2 Erreur sur le temps de montée

Le calcul de convolution peut révéler une modification de la forme d'onde du choc provoquée par les caractéristiques du système de mesure et donc l'amplitude de l'erreur sur le temps de montée, qui ne peut pas être révélé par la réponse indicielle elle-même. En conséquence d'une réponse indicielle plus lente, le temps de montée du choc de sortie augmente. Cependant, le temps de montée est également influencé par le dépassement/sous-dépassement de la réponse indicielle. En fonction des positions dans le temps du dépassement et du sous-dépassement sur la réponse indicielle, la partie du front de la forme d'onde de choc peut être modifiée en différentes formes, conduisant à une valeur de temps de montée accrue ou diminuée.

##### D.5.3 Erreur sur la durée jusqu'à mi-valeur

La durée jusqu'à mi-valeur est principalement affectée par la différence entre la valeur de  $g(i)$  à un temps approximativement égal au double du temps de montée  $T_1$  et la valeur de  $g(i)$  au

temps égal à  $T_2$  du choc évalué. Le calcul de convolution peut être utilisé pour estimer l'amplitude de l'erreur sur  $T_2$ , qui ne peut pas être directement estimée à partir de la réponse indicielle elle-même.

## Bibliographie

CEI 60050 (300):2001, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Mesures et appareils de mesure électriques et électroniques – Partie 311: Termes généraux concernant les mesures – Partie 312: Termes généraux concernant les mesures électriques – Partie 313: Types d'appareils électriques de mesure – Partie 314: Termes spécifiques selon le type d'appareil*

CEI 60050 (321):1986, *Vocabulaire électrotechnique international (VEI) – Chapitre 321; Transformateurs de mesure*

CEI 60051, *Appareils mesureurs électriques indicateurs analogiques à action directe et leurs accessoires*

IEC 60060-3:2004, *High-voltage test techniques – Part 3: Definitions and requirements for on-site testing* (disponible en anglais seulement)

CEI 60071-1:2006, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60270, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

CEI 62475, *Techniques des essais à haute intensité: Définitions et exigences relatives aux courants d'essai et systèmes de mesure<sup>1</sup>*

ISO/CEI 17025:2005, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais (en abrégé: Euromet ISBN 87-988154-1-2)*

JCGM 200:2008, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), <http://www.bipm.org/en/publications/guides>*

J. G. Proakis and D. G. Manolakis: *Introduction to Digital Signal Processing*. Macmillan Publishing Company, New York, 1988

Y. Li, J. Rungis and A. Pfeffer: *The Voltage and Time Parameter Measurement Uncertainties of a Large Damped Capacitor Divider due to its Non-ideal Step Response*. Proceedings of 15 International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, 2007

---

<sup>1</sup> A publier.





INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

3, rue de Varembé  
PO Box 131  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11  
Fax: + 41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)