

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Computation of waveform parameter uncertainties

Calcul des incertitudes des paramètres des formes d'onde



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 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 l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
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.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) 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 IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Computation of waveform parameter uncertainties

Calcul des incertitudes des paramètres des formes d'onde

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-8322-4345-9

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Waveform measurement.....	16
4.1 General.....	16
4.2 Waveform parameters.....	17
4.3 Waveform measurement process	17
4.3.1 General	17
4.3.2 General description of the measurement system.....	18
5 Waveform and waveform parameter corrections	19
5.1 General.....	19
5.2 Waveform parameter corrections	19
5.3 Waveform corrections and waveform reconstruction.....	20
5.3.1 General	20
5.3.2 Sample-by-sample correction	20
5.3.3 Entire waveform correction	20
6 Uncertainties	22
6.1 General.....	22
6.2 Propagation of uncertainties	22
6.2.1 General	22
6.2.2 Uncorrelated input quantities	23
6.2.3 Correlated input quantities.....	23
6.3 Pooled data and its standard deviation.....	23
6.4 Expanded uncertainty and coverage factor.....	25
6.4.1 General	25
6.4.2 Effective degrees of freedom	27
6.5 Entire waveform uncertainties	28
7 Waveform parameter uncertainties	29
7.1 General.....	29
7.2 Amplitude parameters	30
7.2.1 State levels.....	30
7.2.2 State boundaries	35
7.2.3 Waveform amplitude (state levels).....	36
7.2.4 Impulse amplitude (state levels)	37
7.2.5 Percent reference levels (state levels, waveform amplitude).....	37
7.2.6 Transition settling error (state levels, waveform amplitude).....	38
7.2.7 Overshoot aberration (state levels, waveform amplitude).....	38
7.2.8 Undershoot aberration (state levels, waveform amplitude).....	39
7.3 Temporal parameters.....	39
7.3.1 Initial instant.....	39
7.3.2 Waveform epoch.....	40
7.3.3 Reference level instants (percent reference levels, waveform epoch, initial instant).....	41
7.3.4 Impulse centre instant (impulse amplitude, reference level instants).....	42
7.3.5 Transition duration (reference level instants)	42

7.3.6	Transition settling duration (reference level instants)	43
7.3.7	Pulse duration (reference level instants)	43
7.3.8	Pulse separation (reference level instants)	43
7.3.9	Waveform delay (advance) (reference level instants)	44
8	Monte Carlo method for waveform parameter uncertainty estimates	44
8.1	General guidance and considerations	44
8.2	Example: state level	44
Annex A (informative) Demonstration example for the calculation of the uncertainty of state levels using the histogram mode according to 7.2.1.2		46
A.1	Waveform measurement	46
A.2	Splitting the bimodal histogram and determining the state levels	46
A.3	Uncertainty of state levels	47
Annex B (informative) Computation of Σ_L and Σ_Y for estimating the uncertainty of state levels using the shorth method according to 7.2.1.3		49
Bibliography		52
Figure 1 – Reference levels, reference level instants, waveform amplitude, and transition duration for a single positive-going transition		7
Figure 2 – Overshoot, undershoot, state levels, and state boundaries for a single positive-going transition		11
Figure 3 – Creation of measured, corrected, and reconstructed waveforms and the final estimate of the input signal		17
Figure 4 – Example of waveform bounds focusing on the trajectories that impact pulse parameter measurements		28
Figure 5 – Relationship between selected waveform parameters		30
Figure A.1 – Waveform obtained from the measurement of a step-like signal from which the state levels and uncertainties are calculated		46
Figure A.2 – Histograms of state s1 (a) and state s2 (b) of the step-like waveform plotted in Figure A.1		47
Figure B.1 – Diagram showing location of waveform elements, $y_{(\beta)}^{(\alpha)}$, in Y_1 and Y_2 , and the construction of Y from Y_1 and Y_2		49
Table 1 – Value of the coverage factor k_p that encompasses the fraction p of the t - distribution for different degrees of freedom (from ISO/IEC Guide 98-3)		26
Table 2 – Different methods for determining state levels, as given in IEC 60469, and their uncertainty type and method of computation		31
Table 3 – Different methods for determining state boundaries and their uncertainty type and method of computation		36
Table 4 – Variables contributing to the uncertainty in overshoot		39
Table 5 – Variables contributing to the uncertainty in the reference level instant		42
Table A.1 – Uncertainty contributions and total uncertainty for $level(s_i)$ determined from histogram modes		48

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMPUTATION OF WAVEFORM PARAMETER UNCERTAINTIES**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 62754 has been prepared by IEC technical committee 85: Measuring equipment for electrical and electromagnetic quantities.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
85/585/FDIS	85/X588/RVD

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

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

The terms used throughout this document which have been defined in Clause 3 are in *italic type*.

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

COMPUTATION OF WAVEFORM PARAMETER UNCERTAINTIES

1 Scope

This document specifies methods for the computation of the temporal and amplitude parameters and their associated uncertainty for step-like and impulse-like waveforms. This document is applicable to any and all industries that generate, transmit, detect, receive, measure, and/or analyse these types of pulses.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60469:2013, *Transitions, pulses and related waveforms – Terms, definitions and algorithms*

3 Terms and definitions

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

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

aberration region

3.1.1

post-transition aberration region

interval between a user-specified *instant* and a fixed *instant*, where the fixed *instant* is the first sampling *instant* succeeding the 50 % *reference level instant* for which the corresponding *waveform* value is within the *state boundaries* of the *state* succeeding the 50 % *reference level instant*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.1.1, modified – the note 1 to entry has been deleted.]

3.1.2

pre-transition aberration region

interval between a user-specified *instant* and a fixed *instant*, where the fixed *instant* is the first sampling *instant* preceding the 50 % *reference level instant* for which the corresponding *waveform* value is within the *state boundaries* of the *state* preceding the 50 % *reference level instant*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.1.2, modified – the note 1 to entry has been deleted.]

3.2 amplitude

3.2.1 impulse amplitude

difference between the specified *level* corresponding to the *maximum peak* (*minimum peak*) of the positive (negative) *impulse-like waveform* and the *level* of the *state* preceding the first *transition* of that *impulse-like waveform*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.3.1]

3.2.2 waveform amplitude

difference between the *levels* of two different *states* of a *waveform*

SEE Figure 1.

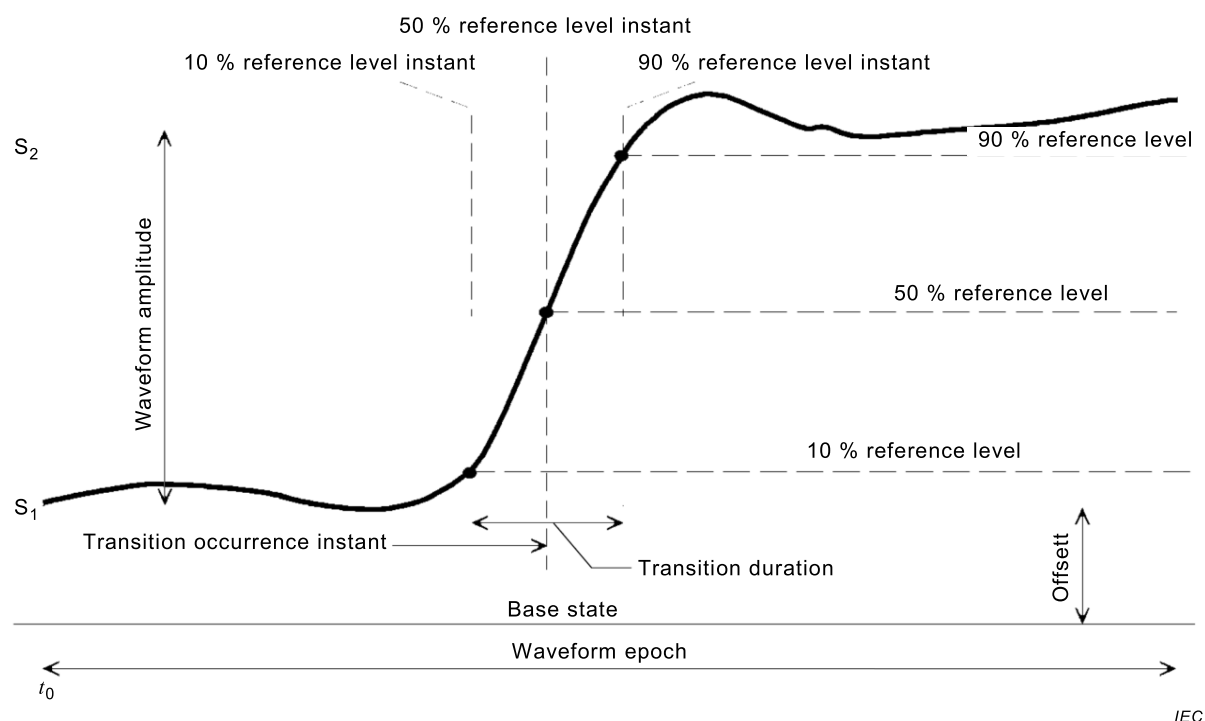


Figure 1 – Reference levels, reference level instants, waveform amplitude, and transition duration for a single positive-going transition

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.3.2, modified – the Note 1 to entry has been deleted and the reference to Figure 1 has been added.]

3.3 correction

operation that combines the results of the conversion operation with the transfer function information to yield a *waveform* that is a more accurate representation of the *signal*

Note 1 to entry Correction may be effected by a manual process by an operator, a computational process, or a compensating device or apparatus. Correction shall be performed to an accuracy that is consistent with the overall accuracy desired in the *waveform measurement process*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.4]

3.4

coverage factor

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

Note 1 to entry: A coverage factor, k , is typically in the range 2 to 3.

Note 2 to entry: Coverage factor is also defined as a “number larger than or equal to one by which a *combined standard measurement uncertainty* is multiplied to obtain an *expanded measurement uncertainty*,” (See ISO/IEC Guide 99:2007, 2.38).

[SOURCE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.6, modified – the Note 2 to entry has been added.]

3.5

degrees of freedom

in general, the number of terms in a sum minus the number of constraints on the terms of the sum

[SOURCE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, C.2.31]

3.6

impulse response

output *signal* from an instrument, device, or system that is the result of an input *signal*, where this input *signal* can be described by a unit impulse function, $\delta(t)$:

$$\begin{aligned}\delta(t=0) &= 1 \\ \delta(t \neq 0) &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

3.7

instant

particular time value within a *waveform epoch* that, unless otherwise specified, is referenced relative to the *initial instant* of that *waveform epoch*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13]

3.7.1

initial instant

first sample *instant* in the *waveform*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.3]

3.7.2

impulse center instant

instant at which a user-specified approximation to the *maximum peak (minimum peak)* of the positive (negative) *impulse-like waveform* occurs

[SOURCE: IEC 60496:2013, 3.2.13.2]

3.7.3

reference level instant

instant at which the *waveform* intersects a specified *reference level*

SEE Figure 1.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.5, modified – the reference to Figure 1 has been added.]

3.8 interval

set of all values of time between a first *instant* and a second *instant*, where the second *instant* is later in time than the first

Note 1 to entry: These first and second *instants* are called the endpoints of the *interval*. The endpoints, unless otherwise specified, are assumed to be part of the *interval*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.15]

3.9 level

constant value having the same units as y

SEE Figure 1.

Note 1 to entry: y is the *signal*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.17, modified – the reference to Figure 1 has been added as well as the note 1 to entry.]

3.9.1 percent reference level

reference level specified by:

$$y_{x\%} = y_{0\%} + \frac{x}{100\%}(y_{100\%} - y_{0\%}) \quad (2)$$

where

$$0\% < x < 100\%$$

$y_{0\%}$ = level of low state

$y_{100\%}$ = level of high state

$y_{0\%}$, $y_{100\%}$, and $y_{x\%}$ are all in the same unit of measurement

SEE Figure 1.

Note 1 to entry: Commonly used *reference levels* are: 0 %, 10 %, 50 %, 90 %, and 100 %.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.17.3, modified – the reference to Figure 1 has been added.]

3.10 measurand

quantity intended to be measured

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.3, modified – the notes have been deleted.]

3.11 measurement model model of measurement model

mathematical relation among all quantities known to be involved in a measurement

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.48, modified – the notes have been deleted.]

3.12

measurement uncertainty **uncertainty of measurement** **uncertainty**

non-negative parameter characterizing the dispersion of the quantity values being attributed to a *measurand*, based on the information used

Note 1 to entry: Measurement uncertainty is also defined as a “parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the *measurand*,” (See ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.2.3).

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.26, modified – the notes have been deleted and the note 1 to entry has been added.]

3.12.1

standard measurement uncertainty **standard uncertainty of measurement** **standard uncertainty**

measurement uncertainty expressed as a standard deviation

Note 1 to entry: *Standard measurement uncertainty* is also defined as an “*uncertainty* of the results of measurement expressed as a standard deviation,” (See ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.1).

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.30, modified – the note 1 to entry has been added.]

3.12.2

combined standard measurement uncertainty **combined standard uncertainty**

standard *measurement uncertainty* that is obtained using the individual standard measurement uncertainties associated with the input quantities in a measurement model

Note 1 to entry: Combined standard uncertainty is also defined as a “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,” (See ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.4).

[ISO/IEC Guide 99:2007, 2.31, modified – the note has been deleted and the note 1 to entry has been added.]

3.12.3

expanded measurement uncertainty **expanded uncertainty**

product of a *combined standard measurement uncertainty* and a factor larger than the number one

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.35]

Note 1 to entry: Expanded uncertainty is also defined as a “quantity defining an interval about the result of a measurement that may be expected to encompass a large fraction of the distribution values that could reasonably be attributed to the *measurand*,” (See ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.5).

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.35, modified – the notes have been deleted and the note 1 to entry has been added.]

3.12.4

instrumental measurement uncertainty **instrumental uncertainty**

component of *measurement uncertainty* arising from a measuring instrument or measuring system in use

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 4.24, modified – the term "instrumental uncertainty" has been added as a synonym and the notes have been deleted.]

3.12.4.1

intrinsic (instrumental) uncertainty

uncertainty of a measuring instrument when used under reference conditions

[SOURCE: IEC 60359:2001, 3.2.10]

3.12.4.2

operating instrumental uncertainty

instrumental uncertainty under the rated operating conditions

[SOURCE: IEC 60359:2001, 3.2.11]

3.13

overshoot

waveform aberration within a post-transition aberration region or pre-transition aberration region that is greater than the upper state boundary for the associated state level

SEE Figure 2.

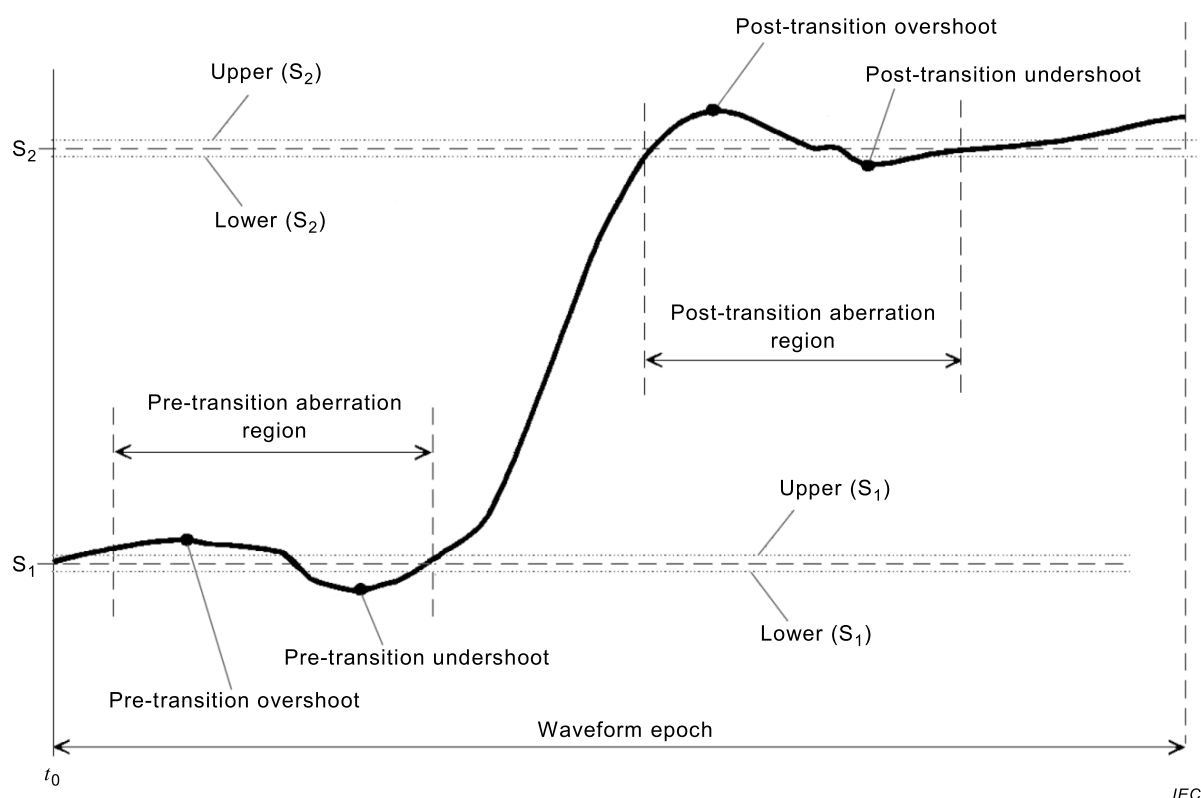


Figure 2 – Overshoot, undershoot, state levels, and state boundaries for a single positive-going transition

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.19, modified – the reference to Figures 5 and 6 in the source definition has been replaced by the reference to Figure 2.]

3.14

parameter

any value (number multiplied by a unit of measure) that can be calculated from a *waveform*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.20]

3.15

maximum peak

pertaining to the greatest value of the *waveform*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.21]

3.16

minimum peak

pertaining to the least value of the *waveform*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.22]

3.17

pulse duration

difference between the first and second *transition occurrence instants*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.27, modified – the note has been deleted.]

3.18

pulse separation

duration between the 50 % *reference level instant*, unless otherwise specified, of the second *transition* of one *pulse* in a *pulse train* and that of the first *transition* of the immediately following *pulse* in the same *pulse train*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.28]

3.19

waveform reconstruction

deconvolution

process of removing the effect of the measurement instrument, connectors, cables, and jitter on the measured *waveform*

Note 1 to entry: This process deconvolves the impulse response of the measurement instrument from the measured *waveform*.

3.20

sample

element of a *sampled waveform*, given in units of the amplitude of the *signal* at a given time

3.21

signal

physical phenomenon, one or more of whose characteristics may vary to represent information

Note 1 to entry: This phenomenon is a function of time.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.38]

3.22

state

particular *level* or, when applicable, a particular *level* and upper and lower limits (the upper and lower *state boundaries*) that are referenced to or associated with that *level*

Note 1 to entry Unless otherwise specified, multiple *states* are ordered from the most negative *level* to the most positive *level*, and the *state levels* are not allowed to overlap. The most negative *state* is called *state 1*. The most positive *state* is called *state n*. The *states* are denoted by $s_1, s_2, \dots, s_n$; the *state levels* are denoted by $level(s_1)$,

$level(s_2), \dots, level(s_n)$; the upper *state boundaries* are denoted by $upper(s_1), upper(s_2), \dots, upper(s_n)$; and the lower *state boundaries* are denoted by $lower(s_1), lower(s_2), \dots, lower(s_n)$.

SEE Figure 2.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.40, modified – the reference to Figure 2 has been added and note 2 of the original definition has been deleted.]

3.23

state boundaries

upper and lower limits of the states of a *waveform*

SEE Figure 2.

Note 1 to entry: All values of a *waveform* that are within the boundaries of a given *state* are said to be in that *state*. The *state boundaries* are defined by the user.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.41, modified – the reference to Figure 2 has been added.]

3.24

state occurrence

contiguous region of a *waveform* that is bounded by the upper and lower *state boundaries* of a *state*, and whose *duration* equals or exceeds the specified minimum *duration* for *state* attainment. The state occurrence consists of the entire portion of the waveform that remains within the state boundaries of that state.

Note 1 to entry *State occurrences* are numbered as ordered pairs (s_i, n) , where s_i refers to the i^{th} state, and n is the number of the occurrence of that particular *state* within the *waveform epoch*. In a given *waveform epoch*, when the *waveform* first enters a *state* s_1 , that state occurrence is $(s_1, 1)$. If and when the *waveform* exits that *state*, that *state occurrence* is over. If and when the *waveform* next enters and remains in state s_1 , that *state occurrence* would be labelled $(s_1, 2)$; and so on.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.42, modified – the note has been shortened so that it does not discuss figures that are not contained in this document]

3.25

timebase

that component of a measurement instrument that provides the unique *instant* for each sample in a *sampled waveform*

Note 1 to entry: The *timebase* provides a vector of sampling instants where each *instant* corresponds to a unique sample in the *waveform*. Often the interval between sample *instants* is not uniform and exhibits both systematic and random errors.

3.26

transition

contiguous region of a *waveform* that connects, either directly or via intervening *transients*, two *state occurrences* that are consecutive in time but are occurrences of different *states*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.47]

3.26.1

negative-going transition

transition whose terminating *state* is more negative than its originating *state*

Note 1 to entry: The endpoints of the *negative-going transition* are the last exit of the *waveform* from the higher *state boundary* and the first entry of the *waveform* into the lower *state boundary*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.47.1, modified – note 2 has been deleted.]

3.26.2

positive-going transition

transition whose terminating *state* is more positive than its originating *state*

Note 1 to entry: The endpoints of the *positive-going transition* are the last exit of the *waveform* from the lower *state boundary* and the first entry of the *waveform* into the higher *state boundary*.

[SOURCE: IEC 60469, 3.2.47.3, modified – note 2 has been deleted.]

3.27

transition duration

difference between the two *reference level instants* of the same *transition*

Note 1 to entry: Unless otherwise specified, the two *reference levels* are the 10 % and 90 % reference levels.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.48, modified – note 2 has been deleted.]

3.28

transition occurrence instant

first 50 % *reference level instant*, unless otherwise specified, on the *transition* of a *step-like waveform*

SEE Figure 1.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.6, modified – only the reference to Figure 1 has been kept.]

3.29

transition settling duration

time *interval* between the 50 % *reference level instant*, unless otherwise specified, and the final *instant* the *waveform* crosses the *state boundary* of a specified *state* in its approach to that *state*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.49, modified – the note has been deleted.]

3.30

transition settling error

maximum error between the *waveform* value and a specified *reference level* within a user-specified *interval* of the *waveform epoch*. The *interval* starts at a user-specified *instant* relative to the 50 % *reference level instant*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.50]

3.31

undershoot

waveform aberration within a *post-transition aberration region* or *pre-transition aberration region* that is less than the lower *state boundary* for the associated *state level*. If more than one such *waveform aberration* exists, the one with the largest magnitude is the undershoot unless otherwise specified

SEE Figure 2.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.53, modified – the reference to Figures 5 and 6 has been replaced by the reference to Figure 2.]

3.32

waveform

representation of a *signal* (for example, a graph, plot, oscilloscope presentation, discrete time series, equations, or table of values)

Note 1 to entry: Note that the term *waveform* refers to a measured or otherwise-defined estimate of the physical phenomenon or *signal*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.54]

3.32.1

corrected waveform

sampled waveform that is the result of applying corrections to the measured *waveform*

3.32.2

impulse-like waveform

waveform that, when convolved with an ideal step, yields a *step-like waveform*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.54.2]

3.32.3

measured waveform

sampled waveform that is the output of a measurement system before any *corrections* or *reconstructions* are applied

3.32.4

reconstructed waveform

sampled waveform that is the result of applying *waveform reconstruction* methods to the *corrected waveform*

3.32.5

reference waveform

waveform against which other *waveforms* are compared

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.54.3]

3.32.6

sampled waveform representation

waveform which is a series of sampled numerical values taken sequentially or nonsequentially as a function of time

Note 1 to entry: This will also be called a *sampled waveform* and the process is called sampling.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.61.2, modified – the original note 1 has been replaced by a new note 1.]

3.33

waveform aberration

algebraic difference in *waveform* values between all corresponding *instants* in time of a *waveform* and a *reference waveform* in a specified *waveform epoch*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.55]

3.34

waveform delay (advance)

duration between the first transition occurrence instant of two waveforms

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.56]

3.35

waveform epoch

interval to which consideration of a *waveform* is restricted for a particular calculation, procedure, or discussion. Except when otherwise specified, the waveform epoch is assumed to be the span over which the waveform is measured or defined

[SOURCE: IEC 60469:2013 3.2.57]

3.36

waveform measurement process

realization of a method of *waveform* measurement in terms of specific devices, apparatus, instruments, auxiliary equipment, conditions, operators, and observers

Note 1 to entry: In this process, a value (a number multiplied by a unit) of measurement is assigned to the elements of the *waveform*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.59]

3.37

waveform recorder

instrument or device for acquiring and subsequently storing a sequence of data corresponding to the signal being measured

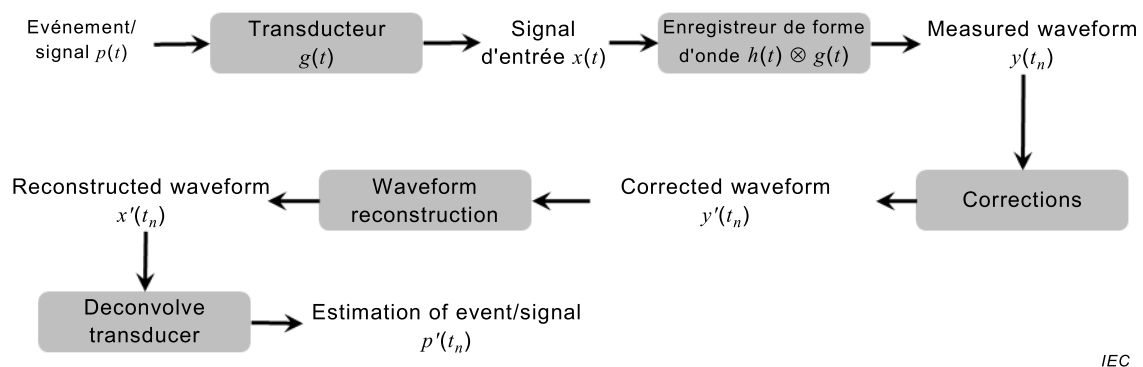
4 Waveform measurement

4.1 General

A *signal* is the physical event under scrutiny and is to be measured. A *waveform* is a representation of that *signal* and is, for the purposes of this document, the result of a *waveform measurement process*. Although a *waveform* can be presented in different ways, only a *sampled waveform representation* of the measured or otherwise estimated *signal* is considered. A *sampled waveform* is discretized in both *amplitude* and time because of the digitization performed by the *waveform recorder*. Time digitization results in presenting the *waveform* as a series of discrete *waveform samples*. Amplitude digitization results in each *waveform sample* having a discrete value. The *waveform* can be of any *signal*, from an ultrafast optical pulse to an ultraslow geologic event. The *sampled waveform*, $y[t_n]$, can be represented mathematically as:

$$y[t_n] = \sum_{n=0}^{N-1} y(t) \delta(t - n\Delta t) \quad (3)$$

where $y(t)$ is the *signal* input into the *waveform recorder*, t is the time, n is the discrete time index, N is the number of samples in the *waveform*, Δt is the discrete time increment, and δ is the unit impulse function ($\delta(t=0)=1$, $\delta(t \neq 0)=0$). This formula describes an idealized situation in which the measurement system response is a unit impulse function, the sampling intervals are equally spaced, and there is no noise introduced by the measurement system.



IEC

Figure 3 – Creation of measured, corrected, and reconstructed waveforms and the final estimate of the input signal

The *waveform measurement process* is shown diagrammatically in Figure 3 and results in the *measured waveform*, which has a *sampled waveform representation*. Subsequent corrections result in increasingly more accurate estimations of the input *signal*. This version of the document, due to the complexity of computing *waveform parameter* uncertainties, will apply only to the *measured waveform*. *Corrected waveforms* and *reconstructed waveforms* will be treated in a subsequent edition, but are discussed briefly in Clause 5.

4.2 Waveform parameters

Waveform parameters are values representing important characteristics of a *waveform*. Typically, *waveform parameters* depict noticeable characteristics of a *waveform* that facilitate the discussion, analysis, and comparison of *waveforms*. These *parameters*, along with their definitions, are provided in IEC 60469.

The analysis for computing *measurement uncertainties* for a given set of *waveform parameters* extracted from a *measured waveform* will be developed. Consequently, information on the performance requirements relative to a measurement application is discussed. *Measurement uncertainties* of *corrected waveform parameters* will be briefly discussed in 5.2 and sample-by-sample uncertainties of *corrected waveforms* in 5.3.2. *Measurement uncertainties* of *reconstructed waveforms* will not be developed at this time, but this subject is briefly described in 5.3.3. These *measurement uncertainties* will be considered in a subsequent edition of this document. The effect that the transducer has had on the input *signal* will not be considered.

4.3 Waveform measurement process

4.3.1 General

This process is defined in 4.1. The process includes hardware, software, procedures, and the environment. The hardware and software comprise the measurement system (see 4.3.2). The *waveform recorder* is one component of the measurement system and it provides the acquisition, recording, and sometimes processing of the *waveform*. The hardware includes test instruments (including the *waveform recorder*), connectors, adapters, cables, and any other auxiliary components required to perform the measurement.

The environment includes temperature, humidity, and electromagnetic background and these have an effect on the *waveform measurement process*. For example, temperature and humidity may affect the performance of transducers and test instrumentation. Therefore, the *waveform measurement process* shall prescriptively define the range of allowable temperature and humidity conditions for waveform measurement. Similarly, the electromagnetic environment can affect the *waveform measurement process*. Some instruments may be very sensitive to the presence of background or unintended electromagnetic energy, and may give erroneous readings if exposure limits are exceeded. Consequently, the electromagnetic compatibility, in terms of susceptibility to and generation of electromagnetic interference by

test instruments in the measurement space shall be known and considered in developing the *waveform measurement process*. The susceptibility and generation can be either radiated or conducted through power and signal lines. Electrostatic discharge (ESD) may also be a concern for the *waveform measurement process* as it may damage or otherwise adversely affect the performance of electronics. Accordingly, ESD protection will contribute to the *waveform measurement process*.

The objective of any *waveform measurement process* is to allow the determination of an accuracy defined by the user of the document, either expressed or implied, of the value of one or more parameters of a *waveform*. Figure 3 shows the constituent steps of any *waveform measurement process*. The subsequent *waveform analysis process*, which yields values for the *waveform parameters*, involves three distinct sequential processes:

- a) the waveform measurement process, which results in the waveform,
- b) analysis of the waveform to determine the value of one or more parameters,
- c) an estimate of the uncertainty of the value of the waveform parameter thus determined relative to the value of the parameter of the signal.

The certainty to which the *waveform parameter* and *signal parameter* are similar is dependent on the combined quality, accuracy, and validity of the first two steps. The quality, accuracy, and validity of the first step is dependent on the measurement system and is described in 4.3.2.

4.3.2 General description of the measurement system

The vast array of devices, apparatus, instruments, and techniques which may be configured in virtually limitless combinations to provide *signal-to-waveform* conversion renders the discussion of specific implementations beyond the scope of this document. Such discussion is deferred to other standards, documents, or specifications that describe or define the characteristics or methods of specific devices, apparatus, instruments, or techniques. Subclause 4.3.2 describes only some of the general common characteristics of *signal* measurement systems that need to be considered. Instrument manuals and application notes provided by the manufacturer may provide guidance specific for use of their instruments in a measurement system.

There are two distinct methods for *waveform* acquisition: continuous and sampled. Continuous acquisition is a real-time process and refers to the recording of a signal by some form of continual measurement that begins at some time prior to the arrival of the *signal* into the *waveform recorder* and ends at some time after this arrival. This enables capture of non-repetitive or unexpected transient signals. Most, if not all, real-time *waveform* acquisition is performed using a sampling acquisition process. Sampling acquisition results in a discretization of the time record that produces a *sampled waveform*. This means that the *sampled waveform* is a series of discrete values (the *samples*) occurring at known *instants*, where the values of each of these *samples* is proportional to the input *signal* at those *instants*. This proportionality is the results of the interaction of the *waveform recorder* with the input *signal* (see Figure 3). A sampled process can be either real-time or equivalent-time. Real-time sampling may be used with either single-shot *signals* or repetitive *signals*. The signal is sampled as described above and these samples are assembled to create the *waveform*. Equivalent-time sampling requires a repetitive and cyclo-stationary *signal* and some method to accurately synchronize successive *waveforms* before assembling them together to create the acquired *waveform*. Equivalent-time is distinguished from real-time in that each cycle of the input *signal* may yield a sub-waveform containing one or more *samples*, where each of these *samples* will correspond to different instants in the *waveform epoch*, and that the sub-waveforms are concatenated to yield the final *waveform*. Equivalent-time sampling enables capture of a *waveform* when real-time acquisition would collect an insufficient amount of information due to noise or a limited frequency response of the real-time *waveform recorder*. If the signal is repetitive, either real-time or equivalent time sampling may be used to average multiple cycles of the signal to increase the signal-to-noise ratio of the acquired waveform.

The complete measurement system used to perform the conversion of a *signal* to a *waveform* may be approximately divided into three parts: a collection device, a transducer, and a *waveform recorder*. The collection device gathers or collects the physical process that underlies the *signal* and passes it to the transducer. Examples of collection devices include, but are not limited to, coaxial input connectors, optical lenses, antennas, chemical concentrators. The transducer (often called a detector) converts the event/signal present at its input into a signal that can be more efficiently acquired by the *waveform recorder*. Examples of transducers include, but are not limited to, optical detectors, microwave detectors, particle detectors, chemical sensors, acoustic and seismic sensors. The *waveform recorder* acquires the *waveform* which is a record of the signal. Examples of *waveform recorders* include, but are not limited to, oscilloscopes, data acquisition computer systems, high speed digital multimeters, and chart recorders. The *waveform* will often be in digital format, although other formats (for example, paper from a chart recorder, or a photograph of a cathode oscilloscope display) may exist.

The possible errors and uncertainties that can be introduced by each stage shall be considered to determine the quality, accuracy, and validity of the conclusions drawn from analysis of the waveform. For instance, the collector may distort the signal, the transducer may lose high frequency information due to insufficient response, and the *waveform recorder* may introduce digitization errors.

5 Waveform and waveform parameter corrections

5.1 General

Waveforms and/or *waveform parameters* may be *corrected*, and their *correction* processes may be different. *Waveform correction* refers to altering the value of each *sample* of the *waveform* based on information collected on the performance of the measurement system whereas *waveform parameter correction* refers to altering only those specific *waveform parameter* values for which a measurement system calibration has shown to be incorrect (gain error, offset error, etc.). *Corrections* shall only be applied when the process for correcting the *waveform* and/or its *parameter* values has been identified and the process for measuring the necessary *correction* functions and coefficients has been developed, which includes an uncertainty analysis for those functions and coefficients. The *corrected waveform* may exhibit compensations for the effects of errors in amplitude gain (linear and nonlinear), amplitude offset, analog-to-digital conversion, and *timebase* gain, and of nonuniform sampling intervals (also known as non-equispaced sampling intervals). Note that Formula (3) does not reflect any of these effects.

All *parameters* are the result of some algorithm, which may include numerical computations, numerical approximations, and user-defined values. User-defined values, for example, may be used for state levels (7.2.1.6). Uncertainty in a user-defined value is described by a Type B uncertainty (see Clause 6). Because the values are user-defined, the *degrees of freedom* may be infinite. Most *waveform parameter* values are the result of numerical computations, and all of the associated numerical processes are subject to uncertainty. Numerical approximation (interpolation) is used to compute percent reference levels (7.2.5) and reference level instants (7.3.3) as well as values for other *waveform parameters*. Uncertainties in numerical computations and approximations are a Type A uncertainty if statistical processes are used and Type B otherwise.

5.2 Waveform parameter corrections

Because the parameters described in this document are scalar values, *waveform parameter correction* results in multiplication or addition corrections to the parameter values. Accordingly, calibration measurements should be made of the measurement system to acquire these multiplicative correction factors and additive correction terms. An example of *waveform parameter correction* is to change the value of the temporal *parameters* (*transition duration*, *pulse duration*, *delay*, etc.) for a known *timebase* gain error that had resulted in an erroneous expansion or contraction of the *waveform epoch*. Another example would be to correct *level parameters* for a known measurement system amplitude gain or offset error.

The method of correcting errors in the *waveform parameter* values shall be described by the user of the document, and this description shall include the error measurement method, uncertainties in this measurement method, the method for correcting the *waveform parameter* values, and uncertainties in this *correction* method. The value of the resultant *corrected waveform parameter* shall be provided as nominal values with expanded uncertainties.

5.3 Waveform corrections and waveform reconstruction

5.3.1 General

Waveform correction may result in a change in the value of each *sample* of a *waveform*. An example of a *waveform correction* is to alter *waveform* values through the deconvolution of the effective impulse response of the measurement system jitter. Another example is to correct the *waveform* values because of nonuniform sampling intervals. Waveform corrections can be further divided into two general categories, incremental or sample-by-sample *correction* and entire *waveform correction*. Sample-by-sample *corrections* are often implemented by interpolation methods and entire *waveform corrections* by *waveform reconstruction*.

5.3.2 Sample-by-sample correction

5.3.2.1 General

The waveform is a discrete amplitude-vs-discrete time record. Sample-by-sample corrections may be applied when there are errors in this discretization process. For example, the discrete-time sampling intervals due to the digital electronics used in the timebase circuit are probably not uniform over the entire waveform epoch. Similarly, the discretized amplitude values acquired by the analog-to-digital converter (ADC) of the waveform recorder are not equally incremented over the range of the signal's amplitude.

5.3.2.2 Timebase errors

Methods for measuring the time discretization errors of the *timebase* of *waveform recorder* are described in IEEE Std. 1057-2007, 4.6 and 12.1. A measure of the *timebase* errors results in a time-error versus time vector. Using this vector, the *amplitude* values of the *waveform* can be corrected, for example by interpolation. The method of correcting errors in the *waveform* values caused by *timebase* errors shall be described by the user of the document, and this description shall include the *timebase* error measurement method, *uncertainties* in this measurement method, the method for correcting the *waveform* values, and *uncertainties* in this *correction* method. The *amplitude* of the resultant *corrected waveform* shall be provided as nominal values with *expanded uncertainties*, where each sample may have a different *expanded uncertainty*. The sampling *instants*, after correction, shall be defined as uniform. However, there will be uncertainty associated with the value of each sample instant, and the corresponding *expanded uncertainty* for each sample *instant* shall be provided.

5.3.2.3 ADC errors

Methods for measuring the ADC errors of the waveform recorder are described in IEEE Std. 1057-2007, 4.7. A measure of the ADC errors results in an amplitude-error as a function of amplitude vector. Using this vector, the *amplitude* values of the *waveform* can be corrected, for example by interpolation. The method of correcting errors in the *waveform* values caused by ADC errors shall be described by the user of the standard, and this description shall include the ADC error measurement method, uncertainties in this measurement method, the method for correcting the *waveform* values, and uncertainties in this *correction* method. The amplitude of the resultant *corrected waveform* shall be provided as nominal values with expanded uncertainties, where each sample may have a different expanded uncertainty.

5.3.3 Entire waveform correction

In general, the *waveform* will not identically represent the input *signal*, $x(t)$, due to the interaction of the measurement system with the *signal*. This interaction can be mathematically

described as 1) a convolution of $x(t)$ with the impulse response of the instrument (or measurement system), given by $h(t)$, to yield a convolution *signal*, $y(t)$, and 2) a subsequent correlation of $y(t)$ with the sampling aperture, $w(t)$, to yield a continuous-time representation, $f(t)$, of $x(t)$. The convolution, $y(t)$, of two continuous-time functions, $x(t)$ and $h(t)$, is defined as

$$y(\tau) = \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t)h(\tau - t)dt \equiv x(t) * h(t) \quad (4)$$

where τ is the *delay* between $x(t)$ and $h(t)$, dt is the differential of the variable t and the symbol “*” indicates a convolution. The correlation of $y(t)$ with $w(t)$ is described by:

$$f(\tau) = \int_{t=-\infty}^{\infty} y(t)w(\tau + t)dt \equiv y(t) \otimes w(t) \quad (5)$$

where the symbol “ $\otimes$ ” indicates a correlation. The $w(t)$ may be included in $h(t)$ if it is done correctly (note the sign difference in the integrals). Convolution is commutative, so that $x(t) * h(t) = h(t) * x(t)$, whereas correlation is not commutative (the order will change the phase of the result). Both mathematical operations can be extended over multiple variables. In the frequency domain, the convolution of two functions is proportional to the product of their individual transforms, that is:

$$FT \left\{ \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t)h(\tau - t)dt \right\} = X(\omega)H(\omega) = F(\omega) \quad (6)$$

where ω is the angular frequency, FT indicates frequency transform, $F(\omega)$ and $H(\omega)$ are the complex spectra of $f(t)$ and $h(t)$, and here, $w(t)$ is implicitly included in $h(t)$. The Fourier transform is the most commonly used frequency transform.

The $h(t)$ may be described as the convolution of multiple responses, such as the impulse response of the instrument convolved with a Gaussian function representing the statistical distribution of the jitter, and may include the correlation of the sampling aperture, $w(t)$. This $h(t)$ can be considered as the response of the measurement system to an ideal input signal that is described by the unit impulse function, $\delta(t)$ (where $\delta(t = 0) = 1$, $\delta(t \neq 0) = 0$), that is:

$$h(t) = \delta(t) * h(t) \quad (7)$$

To obtain a more accurate representation of $x(t)$ than $f(t)$ can provide, either a measurement system shall be used that has $h(t)$ which approaches $\delta(t)$ as compared to $x(t)$, that is $f(t) = h(t) \otimes x(t) \approx x(t)$, or the effect of the $h(t)$ on $f(t)$ should be removed.

The process of removing $h(t)$ from $f(t)$ to obtain a more accurate representation of $x(t)$ is called *waveform reconstruction* (often referred to as *deconvolution*). Most *waveform reconstruction* methods use the frequency domain representation because the process is simply a division of spectra:

$$X(\omega) \approx X'(\omega) = \frac{F(\omega)}{H(\omega)}. \quad (8)$$

The symbol “ $\approx$ ” is used because, for a real measurement system there will be amplitude noise, trigger jitter, and *uncertainties* in $h(t)$ that will not allow equality between $X(\omega)$ and $X'(\omega)$ and

thus cause the problem to be ill-posed, that is, there are two unknowns, $h(t)$ and $x(t)$, and only one formula. This problem is often solved using regularized *waveform reconstructions* to yield the *reconstructed waveform*. *Uncertainties* associated with *waveform reconstruction* are not considered in this edition of the document.

6 Uncertainties

6.1 General

A *measurement uncertainty* analysis provides two distinct functions; one is metrological and the other measurement system design. The metrological aspect of the uncertainty analysis provides information on the possible range of values that a *parameter* could exhibit in a waveform with a given probability. This is useful to have confidence in the value of the *measurand*, for inter-laboratory comparisons, and for verification and validation of the performance of a measurement system. In a measurement system design framework, part of an uncertainty analysis includes what is called a sensitivity analysis. The benefit of the sensitivity analysis is that it aids in the design and development of measurement systems. For example, if there is more than one way to perform a measurement, a rigorous sensitivity analysis will demonstrate which provides the least *measurement uncertainty*.

In general, *measurement uncertainty* comprises many contributing elements. Following ISO/IEC Guide 98-3 and ISO/IEC Guide 99, each *measurement uncertainty* element can be classified into a Type A or Type B uncertainty. The Type A *measurement uncertainty* element is evaluated by the statistical analysis of series of measurements and characterized by an experimental standard deviation, thus resulting in a *standard measurement uncertainty*. Usually this standard deviation can be decreased by increasing the number of measurements. The Type B *measurement uncertainty* element is evaluated by means other than the statistical analysis of series of measurements, for example, based on experience or other information. Type B *measurement uncertainties* are typically associated with measurement instruments, are called *instrumental measurement uncertainties*, and typically provided by the manufacturer or calibrator of the instrument. The *standard measurement uncertainty* for each of the various input quantities for a given *measurement model* are subsequently combined to provide the *combined standard uncertainty* for the *measurand*. The desired uncertainty is the *expanded measurement uncertainty* for the *measurand* and is obtained by multiplying the *combined standard uncertainty* by a *coverage factor* to obtain the desired *confidence interval*.

6.2 Propagation of uncertainties

6.2.1 General

To propagate the *standard measurement uncertainties* of the input estimates $x_1, x_2, \dots, x_n$ to the *combined standard uncertainty* of the output estimate y requires the knowledge of the *measurement model*, f , which can be used to calculate the output estimate, y , from the input estimates

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

In general, f can be any linear or non-linear function. For the uncertainty propagation through f , two different approaches exist (see JCGM 101). One can either use Monte-Carlo simulations or expand f with a Taylor series and use, depending on the nonlinearity of f , a certain number of terms of the Taylor series expansion for uncertainty propagation. This document focuses on uncertainty propagation using a linearization of f , and thus considers the first-order Taylor series approximation of the measurement model $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Moreover, a scalar notation will be used since the parameters $y, x_1, x_2, \dots, x_n$, as discussed in this document, are univariate quantities. It should be noted that a similar notation based on vectors and matrices can be employed for uncertainty propagation of multivariate quantities (see JCGM 102), which will be necessary for the treatment of sample-by-sample uncertainties.

Monte Carlo methods for estimating measurement uncertainty in waveform parameters are discussed in Clause 8.

6.2.2 Uncorrelated input quantities

If the input estimates $x_1, x_2, \dots, x_n$ are uncorrelated or independent of each other, the *combined standard uncertainty* $u_c(y)$ is obtained from the *standard measurement uncertainties* of the input estimates $u(x_i); i = 1, 2, \dots, n$ using

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (10)$$

The partial derivatives $\frac{df}{dx_i} = c_i$ are also called sensitivity coefficients and describe how the output estimate y changes with a variation of the x_i .

6.2.3 Correlated input quantities

When the input estimates are correlated or depend on each other, correlations shall be taken into account for the calculation of the *combined standard uncertainty*

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} \right) u(x_i, x_j) \quad (11)$$

with $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ being the estimated covariance associated with the estimates x_i and x_j . Usually the covariance between two estimates x_i and x_j is calculated from m independent pairs of simultaneous observations of the corresponding *measurands* X_i and X_j .

$$u(x_i, x_j) = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m (X_{i,k} - x_i)(X_{j,k} - x_j) \quad (12)$$

In Formula (12), it is assumed that the *measurand* has a normal distribution and Type A *measurement uncertainty*. If the corresponding *measurands* have a Type B (systematic) *measurement uncertainty*, the covariance shall be evaluated and combined (added) accordingly. The Type B evaluation of the covariance shall be done based on experience and technical knowledge (expert judgment), for example, from pooled data.

6.3 Pooled data and its standard deviation

Pooled data and the pooled standard deviation (see ISO/IEC Guide 98-3) provide a means by which the uncertainty of a measurand, which has been measured at previous instances and for which a mean value was obtained at each instance, can be estimated with more confidence. Herein, the pooled data will be that for parameter values describing a calibration artifact or values of intermediate factors used in the computation of the value of the measurand. If a *parameter* value monotonically decreases or increases with time, using an uncorrected mean and standard deviation of the pooled data for this *parameter* may introduce errors into the value of the *measurand* and its *uncertainty*. One common method of collecting pooled data and of obtaining a pooled standard deviation is through a control chart. Control charts are statistical tools that are used to display the change in a selected *parameter* with

time (see ISO 7870-1). As an example of how a pooled standard deviation can be used, consider the case where the measurement of a calibration artifact is performed during each and every measurement of a customer's device. The measurement of the calibration artifact provides a parameter, g , that is used in the process of computing a performance metric for the customer's device. For each measurement instance of a customer's device, g is also measured, and for each of these instances, the mean value of g can be computed:

$$\bar{g} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g_i, \quad (13)$$

where $\bar{g}$ is the mean value of the g_i ($i = 1, \dots, M$), which are the values of g computed from each of the i^{th} measurements of the calibration artifact, and M is the number of these measurements. The $\bar{g}$ would be used in the computation of the value of the *parameter* describing the customer's device. The *standard measurement uncertainty*, σ_g^- , associated with $\bar{g}$ (also referred to as the uncertainty of the mean) is computed using:

$$\sigma_g^- = \frac{s_g}{\sqrt{M}}, \quad (14)$$

where s_g is the sample standard deviation given by:

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (g_i - \bar{g})^2} \quad (15)$$

The corresponding *expanded uncertainty*, U_g^- , is equal to σ_g^- multiplied by a *coverage factor*, which is a percentile of the *t*-distribution with *degrees of freedom*, ν (in this case, $\nu = M - 1$). If, on the other hand, the value of g used to compute the *parameter* for the customer's device is based on the pooled data, the mean of $\bar{g}$ can be used and is described by:

$$\bar{g} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{g}_j \quad (16)$$

where $\bar{g}_j$, ($j = 1, \dots, N$), is the mean of the j^{th} measurement data set, each of which contains M_j measurements of $g_{i,j}$ ($i = 1, \dots, M_j$), that is,

$$\bar{g}_j = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} g_{i,j} \quad (17)$$

and so is based on all available values of g , and N is the number of independent measurements of $\bar{g}_j$. In this case, the *standard measurement uncertainty* associated with $\bar{g}$ can be calculated as:

$$\sigma_g^- = \frac{1}{\sqrt{N}} s_g \quad (18)$$

where

$$\bar{s}_g = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N s_{g_j}^2 (M_j - 1)}{\sum_{j=1}^N M_j - N}} \quad (19)$$

and s_{g_j} is the sample standard deviation based on the j^{th} measurement data, that is,

$$s_{g_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M_j} (g_{i,j} - \bar{g}_j)^2}{M_j - 1}} \quad (20)$$

The corresponding *expanded uncertainty*, U_g , is equal to σ_g multiplied by a *coverage factor* that is a percentile of the *t*-distribution with *degrees of freedom*, ν , and in this case, $\nu = \sum_{j=1}^N M_j - N$.

In particular, when $M_j = M$, then

$$\bar{s}_g = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (g_{i,j} - \bar{g}_j)^2}{N(M - 1)}} \quad (21)$$

$$\sigma_g = \frac{\bar{s}_g}{\sqrt{N}}, \quad (22)$$

and

$$\nu = N(M - 1) \quad (23)$$

6.4 Expanded uncertainty and coverage factor

6.4.1 General

To obtain the *expanded measurement uncertainty* U_p , the *combined standard uncertainty* is multiplied by a *coverage factor* k_p : $U_p = k_p u_c(y)$. The value of this *coverage factor* is dependent on the *degrees of freedom* and the probability distribution of the measurement result for each of the given input quantities. The users of this document choose the value of k_p depending on the level of confidence they wish to provide with their measurement results. Table 1 shows the value of k_p that encompasses the fraction p of the *t*-distribution for different *degrees of freedom*.

The measurement uncertainty of a measurand often comprises the contributions from uncertainties of more than one parameter. In this case, the ISO/IEC Guide 98-3 recommends

use of the Welch-Satterthwaite formula (see 6.4.2) and then use of the effective *degrees of freedom* computed from it to obtain one *coverage factor*. This *coverage factor* will be the multiplier for the *combined standard uncertainty* to yield the *expanded measurement uncertainty*. If the user of this document opts not to use the Welch-Satterthwaite formula, the user shall provide a rationale for and description of the process used.

Table 1 – Value of the coverage factor k_p that encompasses the fraction p of the t -distribution for different degrees of freedom (from ISO/IEC Guide 98-3)

Degrees of freedom ν	Fraction p in percent					
	68,27 ^a	90	95	95,45 ^a	99	99,73 ^a
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33

Degrees of freedom ν	Fraction p in percent					
	68,27 ^a	90	95	95,45 ^a	99	99,73 ^a
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000
^a For a quantity z described by a normal distribution with expectation μ_z and standard deviation σ , the interval $\mu_z \pm k_p \sigma$ encompasses $p = 68,27 \%$, $95,45 \%$, and $99,73 \%$ of the distribution for $k_p = 1, 2$, and 3 , respectively.						

In certain cases, the Central Limit Theorem can be employed for the calculation of the *expanded measurement uncertainty*. The Central Limit Theorem states that the distribution of Y with $Y = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n$ will be approximately normal if the X_i are independent and $\sigma^2(Y)$ is much larger than any single component $c_i^2 \sigma^2(X_i)$. This implies that the probability distribution of Y approaches the normal distribution as the number of input quantities contributing to the standard deviation of Y increases. As an important consequence, a reasonable first approximation for the calculation of an *expanded measurement uncertainty* $U_p = k_p u_c(y)$ is to use for k_p a value from the normal distribution.

This document provides information on how to compute the *expanded measurement uncertainty* for a given *waveform parameter*. Furthermore, this document provides information on the *degrees of freedom* for the given *waveform parameter*, which are necessary to compute the *expanded measurement uncertainty* for other *waveform parameters* that are dependent on it.

6.4.2 Effective degrees of freedom

The effective *degrees of freedom* are used to approximate the *degrees of freedom* for a set of different values, each obtained with an independent measurement, that are used to compute the value of a *measurand*. The Welch-Satterthwaite formula should be used to compute the effective *degrees of freedom* from which the *coverage factor* can be determined. The Welch-Satterthwaite formula is:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\nu_i}}, \quad (24)$$

Where $c_i \equiv \partial y / \partial x_i$ are the sensitivity coefficients and ν_i the degrees of freedom associated with the input estimate x_i .

6.5 Entire waveform uncertainties

A sample-by-sample *uncertainty* analysis, that is, where the *uncertainties* are computed for each *waveform sample*, will also be the subject of a subsequent edition. In a sample-by-sample *uncertainty*, each *waveform sample* will have *uncertainties* due to both *amplitude* and *timebase* contributions, both of which can be stochastic (for example, noise and jitter) and/or deterministic (for example, gain and discretization). Examples of deterministic *amplitude* and *timebase* processes that may introduce *uncertainties* include, but are not limited to, digitizing errors, offset errors, gain errors, and nonuniform *sampling instants*. It is the responsibility of the user of this document to identify the processes that contribute to a sample-by-sample *measurement uncertainty* and then quantify these contributions (the subject of a subsequent edition). These processes result in an elliptical *uncertainty* region around each *waveform sample*. This region may be different for each *waveform sample*.

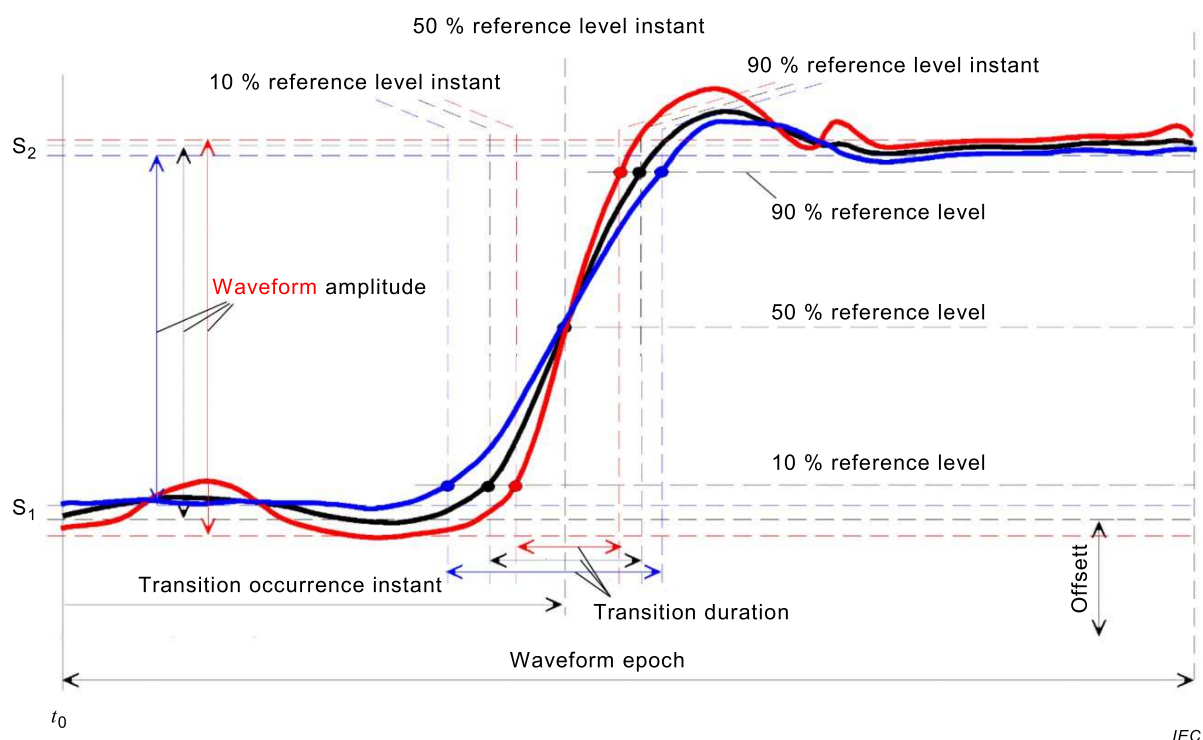


Figure 4 – Example of waveform bounds focusing on the trajectories that impact pulse parameter measurements

A sample-by-sample uncertainty, when completed for the entire waveform, provides upper and lower uncertainty limits for the waveform. If correlations between each waveform sample are neglected, these limits will allow for all possible signal trajectories, and any trajectory that lies within these limits or bounds is allowed unless other constraints are applied. Consequently, these limits or bounds may not be useful for computing the uncertainties in waveform parameters. For a better estimation of waveform bounds, it would be necessary to parameterize the signal that could have been input into the waveform recorder and the impulse response of the set of instruments used to obtain the measured waveform. This parameterization procedure requires a measurement model that accounts for processes affecting the waveform, which would include processes that are a function of time as well as those that are not. The uncertainties of these parameters would then provide information on the possible trajectories of the measured waveform. Limits of these waveform trajectories should bound the possible waveforms that could have been acquired of a specific signal by a specific set of user-defined instruments. A nominal waveform and its bounds are shown, for an example of where the response of the measurement instrument is parameterized by its amplitude gain and frequency bandwidth, in Figure 4.

Errors at different *instants* in the *waveform* resulting from the effects described above may also be correlated. Complete treatment of such correlations requires Monte Carlo techniques or covariance matrix-based techniques, as described in JCGM 101 and JCGM 102, respectively.

7 Waveform parameter uncertainties

7.1 General

Clause 7 contains parameters for which *uncertainties* will be computed. Following is a list of parameters that are defined and/or for which computation algorithms are presented in IEC 60469. The parameters are grouped into *amplitude* and temporal parameters. *Amplitude* parameters are described first because they are used in the subsequent calculation of most of the temporal parameters.

The user of this document shall provide detailed information on the method and instrumentation used to acquire a *waveform*. This information shall include a description of the measurement system, with a detailed schematic showing connections and types of connection (connector type, cable type and length, etc.) and details on instrument performance specifications. The user shall provide a description of the computation methods, if different from those given in IEC 60469, used in obtaining *waveform parameter* values. The user shall report a value for the *waveform parameter*, including a *measurement uncertainty* for each *parameter*, the uncertainty type, and the degrees of freedom.

The computation of *waveform parameter* values and their *measurement uncertainties* is based on the analysis of these *waveforms*. The fidelity of the *measured waveforms* relative to that provided by the device under test (output *signal* from a pulse generator or impulse/step response of a measurement instrument to a known input *signal*) is dependent on the characteristics of the measurement system, which may include pulse generators and *waveform recorders*. To improve the accuracy of the estimate of the *waveform parameters* that describes the performance of the device under test, the *measured waveforms* are often corrected for static and digitizing gain and timebase errors. These *corrected waveforms* will provide a higher fidelity representation of the performance of the device under test than do the *measured waveforms*. The *measurement uncertainties* for the *corrected waveform* and its *parameters* should be smaller, if the uncertainty analysis is performed properly and the measurement system is appropriately designed, than that for a *measured waveform* and its *parameters* because of the additional information used to improve the estimate. However, the uncertainty analysis for the *corrected waveform* will contain more variables than for the *measured waveform*. Analogously, a *reconstructed waveform* will provide a more accurate representation of the performance of the device under test than does a *corrected waveform*, and this improvement will be at the cost of greater complexity in processing the *waveform* and an increase in the number of variables to consider in its uncertainty analysis.

Many of the *waveform parameters* are computed from the fundamental *waveform parameters*, as depicted in Figure 5. The fundamental *waveform parameters* are *state level*, *initial instant*, and *waveform epoch*. The *initial instant* can be assumed to any value except in those cases when two or more *waveforms* are used to compute a temporal *waveform parameter*. The *measurement uncertainty* in *waveform epoch* is equivalent to a *measurement uncertainty* in the sampling *interval* through:

$$D_E = N\Delta t, \quad (25)$$

where D_E is the *waveform epoch*, Δt is the sampling *interval*, and N is the number of *samples*. The Δt in Formula (25) assumes that the sampling *interval* is the same for each of the N *samples* in the *waveform*. This is usually not the case. Consequently, the user of this document has two options to compute the *measurement uncertainty* in D_E . One option is to base this *measurement uncertainty* on the variations of a single value of Δt and the other

option is to base this *measurement uncertainty* on the variations of possibly N different values of Δt , one unique value of Δt for each of the unique N samples in the *waveform*.

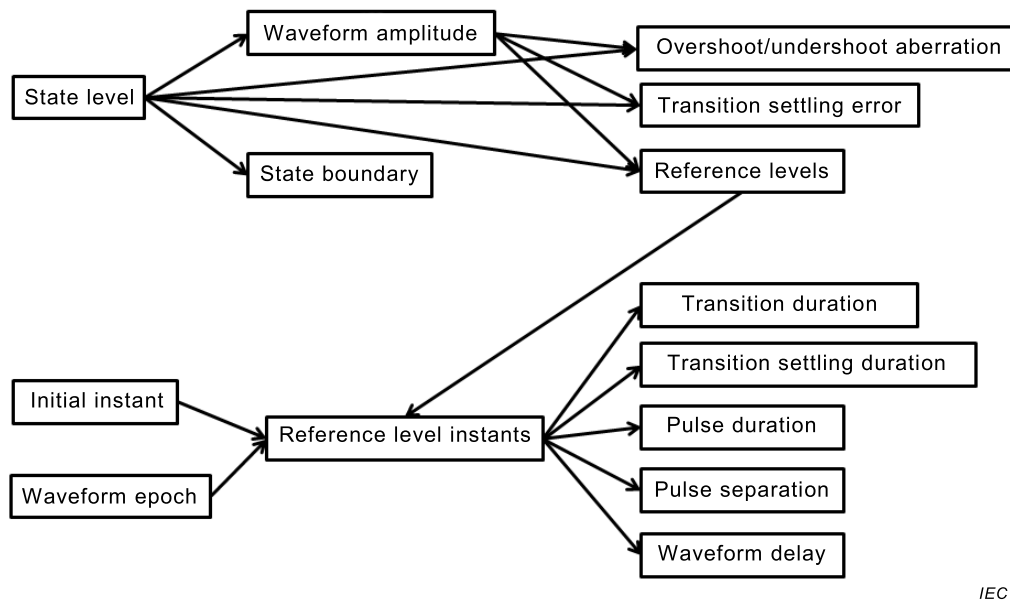


Figure 5 – Relationship between selected waveform parameters

The *signals* presented to a *waveform recorder* may be non-repetitive (also known as transient or “single-shot” *signals*) or repetitive periodic *signals*. If the *signal* is non-repetitive, the *measured waveform* will be unaveraged, (also called a single-sweep *waveform*). If the *signal* is repetitive, the *measured waveform* will be averaged (also called an averaged *waveform*). In either case, the user of the document has different options for acquiring a *waveform* or set of *waveforms*, averaging the set of *waveforms*, and computing the *waveform parameters* for an averaged *waveform* or an unaveraged *waveform*. In general, these options are:

- Calculate the average of a set of *waveforms*, then calculate the *waveform parameters* of this averaged *waveform*, and finally calculate the *measurement uncertainty* of the *waveform parameters*,
- Repeat the calculation of the *waveform parameters* for either a set of averaged or unaveraged *waveforms*, which provides a set of *waveform parameters*, then calculate the mean value of this set of *waveform parameters*. Finally, calculate the *measurement uncertainty* of the *waveform parameters*.

7.2 Amplitude parameters

7.2.1 State levels

7.2.1.1 General

The *state level*, the value of which is designated $level(s_i)$, where “ s_i ” is the i^{th} *state*, is the most fundamental of the waveform parameters. It is the basis for the computation, either directly or indirectly, of all amplitude parameters and most temporal parameters. The *state level* has a variety of methods for either computing or assuming its value (see IEC 60469:2013, 5.2). Each of these methods will manifest a different *measurement uncertainty*, which is described here and briefly summarized in Table 2.

Table 2 – Different methods for determining state levels, as given in IEC 60469, and their uncertainty type and method of computation

Method	IEC 60469:2013 subclause	Uncertainty type	Computation method	Degrees of freedom
Histogram	5.2.2	A	See 7.2.1.2.	∞
Shorth estimator	5.2.3	A	See 7.2.1.3.	Not applicable
Peak magnitude	5.2.4.1	A	Signal noise (r.m.s.), see 7.2.1.4	Dependent on the number of <i>peak</i> magnitude values used to compute $level(s_i)$
<i>Initial (final) instant</i>	5.2.4.2	A	Signal noise (r.m.s.), see 7.2.1.5	Dependent on the number of <i>initial (final) instant</i> values used to compute $level(s_i)$
User defined values	5.2.4.3	B	User defined, see 7.2.1.6	Dependent on the number of user-defined values used to compute $level(s_i)$
Other <i>epochs</i>	5.2.4.4	Dependent on the method used to find the <i>state level</i> in the other <i>epochs</i>	Dependent on the method used to find the <i>state level</i> in the other <i>epochs</i>	Dependent on the method used to find the <i>state level</i> in the other <i>epochs</i>
Static <i>levels</i>	5.2.4.5	A	See 7.2.1.7	Dependent on the number of static <i>level</i> values used to compute $level(s_i)$
NOTE The uncertainty type shown in the table is the typical uncertainty but may be either Type A or Type B depending on the typical measurement process used by the user of this document.				

7.2.1.2 Uncertainty in state level, histogram method using the mode

The *measurement uncertainty*, u_{s_i} , in the *state levels* using the histogram method is dependent on the parameters used by the user of this document to create the histogram. Subclause 7.2.1.2 considers only the mode of the histogram and not the mean, as the mean may be more accurately computed directly from the *waveform* values associated with each *state level*.

The $level(s_i)$ is given by:

$$level(s_i) = A_{low,i} + \frac{A_{bin}}{2} \quad (26)$$

where

A_{bin} is the bin width and

$A_{low,i}$ is the lower limit of the i^{th} bin and is used as a reference value for that bin, which is the mode bin corresponding to $level(s_i)$.

It should be noted that histograms are a representation of data that groups the data into discrete bins, where the reference to a bin is typically given as an integer index. This index is a simplifying representation of the actual amplitude range of a given bin. In Formula (26), the lower limit of that range is being used as the bin reference. The upper limit or a mid-level value of the i^{th} bin could also be used as a reference for the i^{th} bin instead of $A_{low,i}$, in which case Formula (26) would be adjusted accordingly. The bin ranges can be set automatically, which is the usual case, or defined by the user of this document. In typical applications, the width of the histogram bins are the same for all bins and the bins contiguously span the range of all possible values between A_{max} and A_{min} ; however, neither of these conditions is mandatory. The formula for $level(s_i)$ given in Formula (26) is the most general as it allows

$A_{\text{low},i}$, to be defined independently for each i^{th} bin. Although not shown in Formula (26), A_{bin} can also be defined independently for each i^{th} bin with the addition of the subscript “ i .”

The measurement uncertainty in $\text{level}(s_i)$ is given by:

$$u_{s_i} = \sqrt{u_{A_{\text{low},i}}^2 + u_{A_{\text{bin}}}^2} \quad (27)$$

where $u_{A_{\text{low},i}}$ is the *uncertainty* in $A_{\text{low},i}$, which comprises contributions from σ_n , (noise) and other sources as defined by the user of this document. These other sources may include but are not limited to amplitude offset errors and uncertainties, linear and nonlinear amplitude gain errors and uncertainties, and amplitude discretization errors and uncertainties.

$$u_{A_{\text{bin}}} = \sqrt{\left(\frac{A_{\text{bin}}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + u_o^2} \quad (28)$$

where $\frac{A_{\text{bin}}}{2\sqrt{3}}$ is the normal approximation to a rectangular distribution of *waveform* values contained within a bin and u_o refers to other contributions to $u_{A_{\text{bin}}}$ that the user of this document deems appropriate for their particular implementation of the histogram method. The user of this document shall report the value of u_o and provide documentation to support this value.

An example of the computation of u_{s_i} for the histogram mode method is given in Annex A.

7.2.1.3 Uncertainty in state level – Shorth estimator

The method for computing the *measurement uncertainty* presented here requires the use of more than one *waveform*. It is from the average of these waveforms that the shorth estimator for $\text{level}(s_i)$ and its uncertainty are computed. However, the users of this document may opt not to use more than one *waveform*, in which case the users of this document shall use Type B *uncertainty* for $\text{level}(s_i)$ and the users shall provide their rationale for using Type B. The shorth of a given number, N_k , of *waveform samples* is the shortest interval that comprises the fraction, f_s , ($f_s = 0,50$) of the N_k *waveform samples* that demonstrates the amplitude requirements (see IEC 60469:2013, 5.2.3) that are defined by the user of this document, and k is the index for the states in the *waveform* ($k = 1$ or 2 for *step-like* or *two-state waveforms*). The *waveform* is separated into two independent sets of *waveform samples*, one with N_1 *samples* representing s_1 and the other with N_2 *samples*, representing s_2 . The uniqueness of the shorth estimator for computing the *state levels* is in determining the shorth, which contains N_{s_k} *waveform samples*, where

$$N_{s_k} = \lfloor f_s N_k \rfloor + 1 \quad (29)$$

and $\lfloor \cdot \rfloor$ returns the greatest integer less than or equal to its argument. Once the shorth has been determined, the value of $\text{level}(s_k)$ can be computed using:

$$level(s_k) = \frac{1}{N_{s_k}} \sum_{j=1}^{N_{s_k}} y_j \quad (30)$$

Note that the j subscript in Formula (30) is not the index for a time sequence of the *waveform samples*; it is the index for reordering of the N_{s_k} *waveform samples* into a non-decreasing sequence (see IEC 60469:2013, 5.2.3).

The following procedure may be used to compute the *measurement uncertainty*. For a two-state *waveform*, which is considered here, this procedure yields a 2×2 matrix that comprises the two variance and the two covariance terms for the *uncertainties* associated with $level(s_1)$ and $level(s_2)$. Let Y be a vector containing only those *waveform* values that will be used to determine the *state levels*. The length of Y is $N_{s_1} + N_{s_2}$. Let Y_1 be a non-decreasing subset of Y that contains the N_{s_1} *waveform samples* defining $level(s_1)$ and let Y_2 be a non-decreasing subset of Y that contains the N_{s_2} *waveform samples* defining $level(s_2)$. It will be necessary to obtain the statistics of the *waveform samples* that will be used in the shorth, therefore, the user of the document should have a method of associating the indices of the elements of Y to the indices of the averaged *waveform* from which Y is derived. The vector $L = (level(s_1), level(s_2))^T$, representing the *state levels*, is given by

$$L = H_L Y, \quad (31)$$

where H_L is a $2 \times (N_{s_1} + N_{s_2})$ matrix containing one of three values: 0, $1/N_{s_1}$, or $1/N_{s_2}$ as now described. The j^{th} element of the first row of H_L is

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_{s_1}} \quad \text{if } y_j \in Y_1 \\ & 0 \quad \text{if } y_j \notin Y_1 \end{aligned} \quad (32)$$

Similarly, the j^{th} element of the second row of H_L is

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_{s_2}} \quad \text{if } y_j \in Y_2 \\ & 0 \quad \text{if } y_j \notin Y_2 \end{aligned} \quad (33)$$

The covariance matrix Σ_L of L is then given by

$$\Sigma_L = H_L \Sigma_Y H_L^T \quad (34)$$

where Σ_Y is the covariance matrix of Y . The diagonal elements of Σ_Y , denoted by $u_{s_1}^2$ and $u_{s_2}^2$, represent the variance of the two *state levels* of the *waveform*, while the off-diagonal elements, denoted by u_{s_1, s_2} and u_{s_2, s_1} , represent the covariance of the *state levels*. Annex B provides more detail for the computation of Σ_L and Σ_Y . However, Σ_L does not take into

account the variation of the process of finding the shorth estimate, which is nonlinear and non-differentiable, and can underestimate the true variation of the *state levels* and needs to be adjusted when uncorrelated errors are the main source of error. The adjusted Σ_L is given by

$$\begin{pmatrix} u_{s_1}^2 N_{s_1}^{1/3} & u_{s_1, s_2} (N_{s_1} N_{s_2})^{1/6} \\ u_{s_2, s_1} (N_{s_1} N_{s_2})^{1/6} & u_{s_2}^2 N_{s_2}^{1/3} \end{pmatrix} \quad (35)$$

A simple test can be used to determine whether the adjustment should be applied. This test is equivalent to testing whether $level(s_1)$ and $level(s_2)$ are correlated. To this end, the correlation of $level(s_1)$ and $level(s_2)$ can be calculated as

$$r = \frac{u_{s_1, s_2}}{u_{s_1} u_{s_2}} \quad (36)$$

If

$$\sqrt{p-3} |z| \leq 1,96 \quad (37)$$

where z (Fisher's z transformation) is given by

$$z = \frac{1}{2} \log \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (38)$$

and

$$p = \min (N_{s_1} , N_{s_2}) \quad (39)$$

then $level(s_1)$ and $level(s_2)$ are deemed to be uncorrelated, and the Σ_L should be adjusted, otherwise, the Σ_L is used without modification.

7.2.1.4 Uncertainty in state level, peak magnitude

The *measurement uncertainty* in the *state levels* using peak magnitude is dependent on the number of values of peak magnitude used in the determination of $level(s_i)$ and their variation. This *measurement uncertainty* in state level can be described using:

$$u_{level, pm} = \sqrt{\sigma_{pm}^2 + \sigma_n^2} \quad (40)$$

where σ_{pm} is the standard deviation of the set of peak magnitude values used to compute $level(s_i)$ excluding signal noise and σ_n is the calculated r.m.s. noise value of the *waveform*. The calculated r.m.s. noise value can be obtained using *waveforms* measured by a repeated measurement at the time of the measurement or from the past data or experience.

7.2.1.5 Uncertainty in state level, initial (final) instant

The *measurement uncertainty* in the *state levels* using either *initial instants* or *final instants* is dependent on the number of *initial instants* or *final instants* used in the determination of

$level(s_i)$ and their variation. This *measurement uncertainty* in state level can be described using:

$$u_{level,i(f)i} = \sqrt{\sigma_{i(f)i}^2 + \sigma_n^2} \quad (41)$$

where $\sigma_{i(f)i}$ is standard deviation of the set of waveform values at the *initial (final) instants* that are used to compute $level(s_i)$ and σ_n is the calculated r.m.s. noise value of the *waveform*.

7.2.1.6 Uncertainty in state level, user defined values

For Type A uncertainties, the *measurement uncertainty* in the *state levels* using user-defined values is dependent on the number of user-defined values used in the determination of $level(s_i)$ and their variation. In this case, the *measurement uncertainty*, $u_{level,ud,A}$, in state level can be described using:

$$u_{level,ud,A} = \sqrt{\sigma_{ud}^2 + \sigma_n^2} \quad (42)$$

where σ_{ud} is the standard deviation of the set of user-defined values used to compute $level(s_i)$, excluding signal noise, and σ_n is the calculated r.m.s. noise value of the *waveform*.

For Type B uncertainties, where this uncertainty is based on manufacturer's specifications, experience with the device, or other information, the *measurement uncertainty*, $u_{level,ud,B}$, in the *state levels* using user-defined values is defined by the user of this document.

7.2.1.7 Uncertainty in state level, static levels

The *measurement uncertainty* in the *state levels* using the static *level* method can be computed using:

$$u_{level,sl} = \sqrt{\sigma_{n,sl}^2 + u_{st.out}^2} \quad (43)$$

where $\sigma_{n,sl}$ is the calculated r.m.s. noise value of the static *level* output by the pulse generator and is subsequently measured by the waveform recorder and, $u_{st.out}$ is the *measurement uncertainty* with the static output of the pulse generator actually being equal to the high (low) *level* of the pulse output from the generator. The $u_{st.out}$ may be either a Type A or B uncertainty depending on whether it is calculated using statistical analysis based on comparative measurements with references or is based on prior experience or knowledge of the user of this document.

7.2.2 State boundaries

The *state boundaries* are based on the *state levels* of the *waveform* and are user-specified values, typically presented as a pair, i.e. an upper state boundary and a lower state boundary, that contain the *state level*. These two *state boundaries* contain all amplitude values that the user wants associated with the *state level*. The *state boundaries* may or may not be symmetric about the *state level*. Many pulse parameters are determined at the instant the waveform values enter or exit the *level* range encompassed by the *state boundaries*.

State boundaries may be specified by the user as a fixed level increment, as a percentage of the state level, or as a percentage of the pulse amplitude centered on the state level. Each of these methods has different associated uncertainties, which are shown in Table 3.

Table 3 – Different methods for determining state boundaries and their uncertainty type and method of computation

Method	Uncertainty type	Computation method	Degrees of freedom
User specified values	B	Past experience or similar user-defined method	∞
Percent of <i>state level</i>	Dependent on the method used to find the <i>state level</i>	Dependent on the method used to find the <i>state level</i>	Dependent on the method used to find the <i>state level</i>
Percent of <i>pulse amplitude</i>	A	Same as that for <i>amplitude</i> , see IEC 60469:2013, 5.3.2	Same as that for the computation of <i>amplitude</i>

7.2.3 Waveform amplitude (state levels)

The value of *waveform amplitude* is calculated using the *state levels* of the *waveform*. *Amplitude* is one of the most commonly referenced *waveform parameter* for pulse generators and other *signal-generating* devices and events. The value of *waveform amplitude*, along with *state levels*, is used to compute *percent reference levels* that are necessary for the computation of many temporal *parameters*.

The formula for computation of *waveform amplitude*, A , is (see IEC 60469:2013, 5.3.2):

$$A = \text{level}(s_2) - \text{level}(s_1) \quad (44)$$

The uncertainty, u_A , in A is:

$$u_A = \sqrt{u_{s_1}^2 + u_{s_2}^2}, \quad (45)$$

where u_s is the *measurement uncertainty* in *state level*(s). In Formula (45), it is assumed the uncertainties are not correlated. The average, $\bar{A}$, of set of values of A is:

$$\bar{A} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A_i, \quad (46)$$

where M is the number of values of A and i is an index. The *measurement uncertainty*, $u_{\bar{A}}$, in $\bar{A}$ is:

$$\begin{aligned}
 u_{\bar{A}} &= \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{M} + \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial A_i} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial A_i}{\partial \text{level}(s_{2,i})} u_{s_{2,i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_i}{\partial \text{level}(s_{1,i})} u_{s_{1,i}} \right)^2 \right]} \\
 &= \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{M} + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M (u_{s_{1,i}}^2 + u_{s_{2,i}}^2)} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{M} \left(\sigma_A^2 + (u_{s_1}^2 + u_{s_2}^2) \right)} \\
 \text{or } &= \sqrt{\sigma_A^2 / M + (u_{s_1}^2 + u_{s_2}^2)}
 \end{aligned} \quad (47)$$

where σ_A is the standard deviation of the mean of M observations of A . The second line is possible because the magnitude of the partial derivatives all equal to one. The third line is based on the assumption that the *measurement uncertainties* for each *state level* determination are equal and independent of each other. If the *measurement uncertainties* are fully correlated, the 4th line shall be used. The *measurement uncertainty* in *state level* is described in 7.2.1.

The user of this document shall report $u_{\bar{A}}$, the *combined uncertainty*, M , and the effective *degrees of freedom*. If the user of this document uses a different method for computing the *measurement uncertainty* of $\bar{A}$ than is shown here, the user shall provide a description of the method used along with a detailed (line-by-line) computational process.

7.2.4 Impulse amplitude (state levels)

The impulse amplitude, A_{imp} , is the amplitude of an impulse-like *waveform* and may be computed using:

$$A_{\text{imp}} = A_{\text{peak}} - \text{level}(s_1), \quad (48)$$

where A_{peak} is the value of the *maximum (minimum) peak* of the *impulse-like waveform*. The method for determining the value of A_{peak} is given in IEC 60469:2013, 5.6.1. The *measurement uncertainty*, $u_{A_{\text{imp}}}$, in the *impulse amplitude* is determined similarly to the *measurement uncertainty* in the *amplitude* of a *step-like waveform* (see 7.2.3). The only difference between the *measurement uncertainty* for the *waveform amplitude* and $u_{A_{\text{imp}}}$ is that u_{s_2} in Formula (45) is replaced with u_{peak} , which is the *measurement uncertainty* of A_{peak} .

The u_{peak} includes the standard deviation, σ_{fit} , of the residuals of a parabola (or function specified by the user) fitted to the data according to 5.6.1 of IEC 60469:2013. The σ_{fit} is a Type A *measurement uncertainty* and the *degrees of freedom* (that is, the number of data points used to fit the function minus the number of fit parameters). Another contribution to u_{peak} is the *instrumental measurement uncertainty* of the gain of the input of the *waveform recorder*. Since the *waveform recorder* should have a valid calibration that includes the gain, the *instrumental measurement uncertainty* due to the gain may be obtained from the gain calibration record. This is a Type B *measurement uncertainty*. The gain of the *waveform recorder* may be temperature dependent. Other factors that may affect A_{imp} include the *signal noise*, the *impulse response* of the *waveform recorder*, and the *interval* between *sample instants*. For all factors affecting A_{imp} , the user of the document shall implement appropriate methods for measuring this effect, shall perform an applicable uncertainty analysis to compute $u_{A_{\text{imp}}}$, and shall provide information on how that uncertainty analysis was performed.

7.2.5 Percent reference levels (state levels, waveform amplitude)

Percent reference levels are required to determine *percent reference level instants*, which are subsequently used to compute the values of all durations and delays. The *percent reference level*, $y_{x\%}$, is based on the amplitude of the pulse and is computed using:

$$y_{x\%} = \text{level}(s_1) + \frac{A}{100\%} x\%, \quad (49)$$

where $x\%$ is the percent of amplitude, as defined by the user of this document. The *measurement uncertainty*, $u_{y_{x\%}}$, in the *percent reference level* can be described by (IEC 60469:2013, 5.3.3):

$$u_{y_{x\%}} = \sqrt{u_{s_i}^2 + \left(\frac{x\%}{100\%}\right)^2 u_A^2} \quad (50)$$

The *measurement uncertainties*, u_{s_i} and u_A , are described in 7.2.1 and 7.2.3.

7.2.6 Transition settling error (state levels, waveform amplitude)

The *transition settling error* describes how well a pulse, after a transition, returns to its steady state condition as exemplified by a *state level*. It is described using (IEC 60469:2013, 5.3.9):

$$E_{\text{settling}} = \max \left\{ \left| \frac{y_i - \text{level}(s_k)}{A} \right| \right\}, i_s \leq i \leq i_f, \quad (51)$$

where i_s is the *waveform index* for the instant, t_s , which occurs after $t_{50\%}$, that the user has defined as the start of the *interval* over which the *transition settling error* will be determined, i_f is the *waveform index* for the final instant, t_f , and $\max\{\cdot\}$ returns the maximum value of its argument. The *measurement uncertainty*, u_E , in the *transition settling error* can be described by:

$$u_E = \sqrt{\left(\max \left\{ \left| \frac{y_i - \text{level}(s_k)}{A^2} \right| \right\} \right)^2 u_A^2 + \left(\frac{1}{A} \right)^2 (u_{s_k}^2 + \sigma_n^2)}, \quad (52)$$

where $k = 1$ or 2 depending on whether the *state* selected was s_2 or s_1 . The *measurement uncertainties*, u_{s_k} and u_A , are described in 7.2.1 and 7.2.3, and σ_n is the calculated r.m.s. noise value of the *waveform* as defined by the user of this document.

7.2.7 Overshoot aberration (state levels, waveform amplitude)

Unintended *signal* content occurring before or after a *transition*, that has a value greater than the upper *state boundary* of s_2 or s_1 , and that is within a specified *interval* around the *transition* is a common *aberration* referred to as *overshoot*.

An algorithm for calculating the *overshoot* of step-like waveforms is provided in IEC 60469:2013, 5.3.6. *Overshoot* is based on the maximum value of the *waveform* within the appropriate *aberration region*. The value of *overshoot* is not affected by the *aberration regions* themselves unless the maximum *waveform* value occurs at the first or last *instant* of the *aberration region*. The overshoot is computed differently in the *pre-transition aberration region* than it is for the *post-transition aberration region*. In the *pre-transition aberration region*, the overshoot, O_{pre} , is computed using (IEC 60469:2013, 5.3.6):

$$O_{\text{pre}} = \frac{y_{\text{max,pre}} - \text{level}(s_k)}{A}, \quad (53)$$

where A is the *waveform amplitude*, $y_{\text{max,pre}}$ is the maximum *waveform* value in the *pre-transition aberration region*, and $s_k = s_1$ for a *positive-going transition* or s_2 for a *negative-going transition*. The *measurement uncertainty*, $u_{O_{\text{pre}}}$, in the *overshoot aberration* can be described by:

$$u_{O_{\text{pre}}} = \sqrt{\frac{1}{A^2} \sigma_n^2 + \frac{1}{A^2} u_{\text{level}}^2 + \left(\frac{y_{\text{max,pre}} - \text{level}(s_k)}{A^2} \right)^2 u_A^2} \quad (54)$$

Table 4 lists variables affecting the uncertainty, $u_{O_{\text{pre}}}$, in O_{pre} .

Table 4 – Variables contributing to the uncertainty in overshoot

i	Variable, p_i	Uncertainty, u_{p_i}	Sensitivity coefficient, $\left \partial O_{\text{pre}} / \partial p_i \right $	Type	Degree of freedom (DOF), ν_i
1	$y_{\text{max,pre}}$	$u_{y_{\text{max,pre}}}$	$1/A$	A	$M_1 - 1$
2	$\text{level}(s_k)$	u_{s_k}	$1/A$	A	$M_2 - 1$
3	A	u_A	$(y_{\text{max,pre}} - \text{level}(s_k)) / A^2$	A	$M_3 - 1$

The $u_{y_{\text{max,pre}}}$ is the measurement uncertainty of the M_1 values of $y_{\text{max,pre}}$ and may include waveform noise, σ_n , as well as the standard deviation of the M_1 values of $y_{\text{max,pre}}$. The measurement uncertainties, u_{s_k} and u_A , are described in 7.2.1 and 7.2.3. The M_i (with $i = 1, 2, 3$) are the number of repeated measurements performed for the given variable.

7.2.8 Undershoot aberration (state levels, waveform amplitude)

Unintended *signal* content occurring before or after a *transition*, that has a value less than the lower *state boundary* of s_2 or s_1 , and that is within a specified interval around the *transition* is a common *aberration* referred to as undershoot. The undershoot is computed differently in the *pre-transition aberration region* than it is for the *post-transition aberration region*. In the *pre-transition aberration region* for a *positive-going transition*, the undershoot, U_{pre} , is computed using (IEC 60469:2013, 5.3.6):

$$U_{\text{pre}} = \frac{\text{level}(s_k) - y_{\text{min,pre}}}{A} \quad (55)$$

where $y_{\text{min,pre}}$ is the minimum *waveform* value in the *pre-transition aberration region*. The *measurement uncertainty* for *undershoot* is computed identically to that done for *overshoot*.

7.3 Temporal parameters

7.3.1 Initial instant

The *initial instant* of a *waveform* establishes the time reference for all features or other level-changing occurrences within that waveform. All the temporal *parameters* for a *waveform* are computed relative to the *initial instant*, that is, the value of the *initial instant* is subtracted from the value of subsequent *instants*. The *initial instant* is often defined by the user as 0 s because, in most cases, a single *waveform* is used and the value of the *initial instant* does not affect the computation of values of other temporal parameters. However, in the case when different *waveforms* are compared, such as computing the *delay* between *transitions* in two different *pulse waveforms* (where the *pulse waveforms* represent separate data records), the value of the *initial instant* cannot be set to 0 s for the *waveforms*.

In the case where the *initial instant* can be set to 0 s or any other arbitrary value as defined by the user of this document because the value of the *initial instant* has no effect on the value of temporal parameters, there is no *measurement uncertainty* in the value for the *initial instant*. In the case where the *initial instant* cannot be set to 0 s because its value affects the value of other temporal parameters, *measurement uncertainties* in the determination of the *initial instant* will have contributions from several sources, all of which are the result of the method

used to synchronize the two (or more) *pulse waveforms* and measure *reference instants* on these *pulse waveforms*. Different methods may be used to measure delay of two separate *pulse waveforms* depending on the measurement scenario. Methods to synchronize the acquisition of two or more *pulse waveforms* will include a common clock (or common trigger source). Instrument manuals and application notes provided by the manufacturer may provide guidance specific for use of their instruments in a measurement system. The following are possible scenarios:

- 1) one *signal* source providing pulses that will be acquired by separate channels on one *waveform recorder*,
- 2) one *signal* source providing pulses that will be acquired by one channel on each of several *waveform recorders*,
- 3) more than one *signal* source providing pulses that will be acquired by separate channels on one *waveform recorder*,
- 4) more than one *signal* source providing pulses that will be acquired by one channel on each of several *waveform recorders*.

All of these scenarios can support the *signal* source(s) providing a series of pulses (a repetitive train of pulse *signals*) or a single pulse *signal*.

The user of this document shall provide detailed information on the method and instrumentation used to obtain a value for the *initial instant*. This information shall include a description of the measurement system, with a detailed schematic showing connections and types of connection (connector type, cable type and length, etc.) and details on instrument performance specifications. The user shall provide a description of the computation methods used in obtaining a value for the initial instant for each *waveform*. The user shall report a value for the *initial instant* for each *waveform*, including a *measurement uncertainty* for each, the uncertainty type, and the degrees of freedom.

The uncertainty in the initial instant, t_0 , is given by:

$$u_{t_0} = \sqrt{u_{t,\text{ref}}^2 + u_{\text{jit}}^2} \quad (56)$$

where $u_{t,\text{ref}}$ is the uncertainty in the timing reference used for synchronizing different waveforms and u_{jit} is the uncertainty due to the different sources of jitter. Both these uncertainties will include Type A uncertainties and may include Type B uncertainties. However, if the jitter is normally distributed with zero mean then, for a large number (> 100) of measurements, this uncertainty term approaches zero. If the jitter is not zero mean or if a small number of measurements are used, this uncertainty term should be included.

7.3.2 Waveform epoch

The *waveform epoch* describes the time span or extent over which the *signal* is measured. Its value is important for computation of temporal parameters. Errors in the value of *waveform epoch* represent timebase gain (expansion or contraction) errors and a small contribution due to any nonlinearity in the sampling instants.

The user of this document shall provide detailed information on the method and instrumentation used to acquire the value of the *waveform epoch*. This information shall include a description of the measurement system, with a detailed schematic showing connections and types of connection (connector type, cable type and length, etc.) and details on instrument performance specifications. The user shall provide a description of the computation methods used in obtaining the value of *waveform epoch*. The user shall report a value for the *waveform epoch*, including a *measurement uncertainty* for it, the uncertainty type, and the degrees of freedom.

7.3.3 Reference level instants (percent reference levels, waveform epoch, initial instant)

7.3.3.1 General

A *reference level instant* is the specific time at which the *waveform* intersects a specified *reference level*. Commonly used reference levels are 10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 80 %, and 90 % of the *waveform amplitude*.

The algorithm for calculating *reference level instants* is found in IEC 60469:2013, 5.3.4.3. The algorithm is reproduced here to aid in describing the uncertainty analysis.

7.3.3.2 Algorithm for calculating percent reference level instants

If there is more than one *percent reference level instant*, $t_{x\%}$, the first one is the $t_{x\%}$ that will be used in waveform parameter calculations, unless otherwise specified. Determine the $t_{x\%}$ using the following steps:

- Calculate the *percent reference level* as described in 5.3.3 of IEC 60469:2013.
- Calculate the $t_{x\%}$ for $y_{x\%}$ using linear interpolation between consecutive data points as described in 5.3.4.3 of IEC 60469:2013:

$$t_{x\%} = t_{x\%-} + \left(\frac{t_{x\%+} - t_{x\%-}}{y_{x\%+} - y_{x\%-}} \right) (y_{x\%} - y_{x\%-}) \quad (57)$$

where

$y_{x\%}$ is the *percent reference level*,

$y_{x\%-}$ and $y_{x\%+}$ are two consecutive sampling values such that $y_{x\%-} \leq y_{x\%} \leq y_{x\%+}$.

$t_{x\%}$ is the *percent reference level instant*,

$t_{x\%-}$ and $t_{x\%+}$ are two consecutive sampling *instants* corresponding to data nearest in value to $y_{x\%}$ such that $y_{x\%-} \leq y_{x\%} \leq y_{x\%+}$.

Reference level instants at other percent values are found similarly by replacing $x\%$ in the above example with the desired percent value.

7.3.3.3 Measurement uncertainty for reference level instant

The *measurement uncertainty*, $u_{t_{x\%}}$, for the *percent reference level instant* includes contributions from the uncertainty in the value of the *percent reference level*. In most cases the *waveform* will cross the *percent reference level* at an *instant* for which there is no *sample*. Consequently, the mathematical process, such as the linear interpolation shown in Formula (57), used to compute the *instant* the *waveform* crossed the *percent reference level* shall be included in computation of $u_{t_{x\%}}$. The *measurement uncertainty* in the *reference level instant*, $t_{x\%}$, may be described by:

$$u_{t_{x\%}} = \left[\sigma_{\delta t}^2 + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial t_{x\%}}{\partial p_i} \right)^2 u_{p_i}^2 \right]^{1/2} \quad (58)$$

where $\sigma_{\delta t}$ is the *uncertainty* in the sampling interval.

Table 5 – Variables contributing to the uncertainty in the reference level instant

<i>i</i>	Variable, p_i	Uncertainty, u_{p_i}	Sensitivity coefficient, $ \partial t_{x\%}/\partial p_i $	Type	Degree of freedom (DOF), ν_i
1	$t_{x\%+}$	$\sigma_{t_{x\%+}}$	$(y_{x\%} - y_{x\%-})/(y_{x\%+} - y_{x\%-})$	A	$M_x - 1$
2	$t_{x\%-}$	$\sigma_{t_{x\%-}}$	$(y_{x\%+} - y_{x\%})/(y_{x\%+} - y_{x\%-})$	A	$M_x - 1$
3	$y_{x\%+}$	$\sigma_{y_{x\%+}}$	$(t_{x\%+} - t_{x\%-})(y_{x\%} - y_{x\%-})/(y_{x\%+} - y_{x\%-})^2$	A	$M_y - 1$
4	$y_{x\%-}$	$\sigma_{y_{x\%-}}$	$(t_{x\%+} - t_{x\%})(y_{x\%} - y_{x\%+})/(y_{x\%+} - y_{x\%-})^2$	A	$M_y - 1$
5	$y_{x\%}$	$\sigma_{y_{x\%}}$	$(t_{x\%+} - t_{x\%-})/(y_{x\%+} - y_{x\%-})$	See 7.2.5	See 7.2.5

The $\sigma_{t_{x\%+}}$ and $\sigma_{t_{x\%-}}$ are the standard deviations of $t_{x\%+}$ and $t_{x\%-}$ and are obtained from independent measurements of the *timebase* error of the *waveform recorder*. The *timebase* error describes the difference between the measured or actual *sample instants* and the ideal or expected *sample instants*. If only one *waveform* is acquired, then $\sigma_{t_{x\%+}}$ and $\sigma_{t_{x\%-}}$ can be estimated by a Type B estimate determined from past practice or other user-specified means. The *measurement uncertainties*, $\sigma_{y_{x\%+}}$ and $\sigma_{y_{x\%-}}$, for $y_{x\%+}$ and $y_{x\%-}$ are the calculated r.m.s. noise values, σ_n , of the *waveform*. For $t_{x\%+}$ and $t_{x\%-}$, the degrees of freedom are equal to the one less than the number, M_x , of *acquired waveforms* used to measure the *timebase* error. For $\sigma_{y_{x\%+}}$ and $\sigma_{y_{x\%-}}$, the degrees of freedom are one less than the number, M_y , of *samples* used to compute the *waveform* noise. Table 5 provides an overview of the variables contributing to $u_{t_{x\%}}$.

7.3.4 Impulse centre instant (impulse amplitude, reference level instants)

The impulse centre instant is the instant at which a user-specified approximation to the *maximum peak* (*minimum peak*) of the positive (negative) *impulse-like waveform* occurs. It is determined by first determining the impulse amplitude as described, for example, in IEC 60469:2013, 5.6.1. The *instant*, t_p , at which the A_{peak} occurs can be described by:

$$t_p = f^{-1}(A_{\text{peak}}), \quad (59)$$

where $f^{-1}()$ is the inverse function of that used in the fitting process to determine A_{peak} . The *measurement uncertainty*, u_{t_p} , in t_p can be determined using:

$$u_{t_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial f^{-1}(A_{\text{peak}})}{\partial A_{\text{peak}}} u_{\text{peak}}\right)^2 + u_{t_0}^2} \quad (60)$$

7.3.5 Transition duration (reference level instants)

The *transition duration* is one of the most commonly cited performance characteristics for *transition* and *pulse waveforms*. It describes how rapidly the *waveform* changes from one *state level* to another *state level*. *Transition duration*, $t_{x1\%-x2\%}$, between two *reference level instants*, $t_{x1\%}$ and $t_{x2\%}$, is computed using (IEC 60469:2013, 5.3.5):

$$t_{x1\%-x2\%} = |t_{x1\%} - t_{x2\%}| \quad (61)$$

The *measurement uncertainty*, $u_{t_{x1\%-x2\%}}$, of the *transition duration* can be computed using:

$$u_{t_{x1\%-x2\%}} = \sqrt{u_{t_{x1\%}}^2 + u_{t_{x2\%}}^2} \quad (62)$$

where the *measurement uncertainty*, $u_{t_{x\%}}$, of the *reference level instants* is described in 7.3.3.3.

7.3.6 Transition settling duration (reference level instants)

The *transition settling duration* is the interval between the 50 % *reference level instant* and the final *instant* the *waveform* crosses the *state boundary* in its approach to that state. The *state boundary* may be either the *upper state boundary* or *lower state boundary*. The pulse generator and/or the waveform recorder may exhibit this non-ideal transition settling behaviour.

The *transition settling duration* may be calculated using the algorithm described in IEC 60469:2013, 5.3.8. The uncertainty in the *transition settling duration* estimate is found using the same procedure as that used to find $u_{t_{x1\%-x2\%}}$ where the *reference level instants* are the 50 % *reference level instant* and the last *instant* the *waveform* enters within the *state boundaries* of the given *state*.

7.3.7 Pulse duration (reference level instants)

The *pulse duration* is the difference between the two *reference level instants*, $t_{2,x\%}$ and $t_{1,x\%}$, one on the negative-going *transition* and one on the positive-going *transition* of the *waveform*, that are based on *percent reference level*, $y_{x\%}$, selected by the user of this document. The *pulse duration*, T_p , is calculated using (IEC 60469:2013, 5.4.2):

$$T_p = |t_{2,x\%} - t_{1,x\%}| \quad (63)$$

The *measurement uncertainty*, u_{T_p} , of the *pulse duration* can be computed using:

$$u_{T_p} = \sqrt{u_{t_{2,x\%}}^2 + u_{t_{1,x\%}}^2}, \quad (64)$$

where the *measurement uncertainty*, $u_{t_{x\%}}$, of the *reference level instants* is described in 7.3.3.3.

7.3.8 Pulse separation (reference level instants)

The *pulse separation* describes the delay between two pulses in a user-specified *waveform epoch* for a user-defined *percent reference level*, $y_{x\%}$, and is given by the difference between the corresponding *reference level instant*, $t_{1,x\%}$, on the second *transition* of the first pulse and the *reference level instant*, $t_{2,x\%}$, on the first *transition* of the second pulse. The *pulse separation*, T_s , is calculated using (IEC 60469:2013, 5.4.4):

$$T_s = |t_{2,x\%} - t_{1,x\%}| \quad (65)$$

The *measurement uncertainty*, u_{T_s} , of the *pulse separation* can be computed using:

$$u_{T_s} = \sqrt{u_{t_{2,x\%}}^2 + u_{t_{1,x\%}}^2}, \quad (66)$$

where the *measurement uncertainty*, $u_{t_{x\%}}$, of the *reference level instants* is described in 7.3.3.3.

7.3.9 Waveform delay (advance) (reference level instants)

The *waveform delay* describes the timing difference between two different *waveforms*. This timing difference is based on the difference between the 50 % *reference level instant*, $t_{50\%,W1}$, for the first (second) *transition* of the first *waveform* and the 50 % *reference level instant*, $t_{50\%,W2}$, for the first (second) *transition* of the second *waveform*. The *waveform delay*, T_D , is calculated using (IEC 60469:2013, 5.7.2):

$$T_D = t_{50\%,W1} - t_{50\%,W2} \quad (67)$$

The *measurement uncertainty*, u_{T_D} , of the *waveform delay* can be computed using:

$$u_{T_D} = \sqrt{u_{t_{50\%,W1}}^2 + u_{t_{50\%,W2}}^2} \quad (68)$$

where the *measurement uncertainty*, $u_{t_{50\%,W_i}}$, of the *reference level instants* is described in 7.3.3.3.

8 Monte Carlo method for waveform parameter uncertainty estimates

8.1 General guidance and considerations

An alternate method to the propagation of *measurement uncertainties* is the Monte Carlo method, which is appropriate to use when the *measurement model* of interest is nonlinear, with respect to one of the input quantities giving major uncertainty contributions, or if one of the major *measurement uncertainty* contributions is described by non-normal probability distributions. The Monte Carlo method is described in JCGM 101. With the Monte Carlo method, the probability distribution functions (PDFs) for the input quantities are required, and thus this method may be thought of as a propagation of distributions. Once the PDF for the output quantity is determined, that quantity can be summarized by its expectation and standard deviation. The appropriate quantiles of the output PDF can then be used to determine the *measurement uncertainty* confidence interval.

8.2 Example: state level

To determine the *measurement uncertainty* in the *state level* of a *waveform* using the Monte Carlo method, the following steps should be taken:

- Begin with a *waveform* that represents a *waveform* that is nominally acquired by the measurement system.
- Develop the *measurement model* for the *waveform measurement process*.
- Assign PDFs to all known sources of *measurement uncertainty*, such as additive spectrally-uniform normally-distributed (white Gaussian) noise.
- Generate a large number, N , of random *waveforms* using all sources of measurement uncertainty.

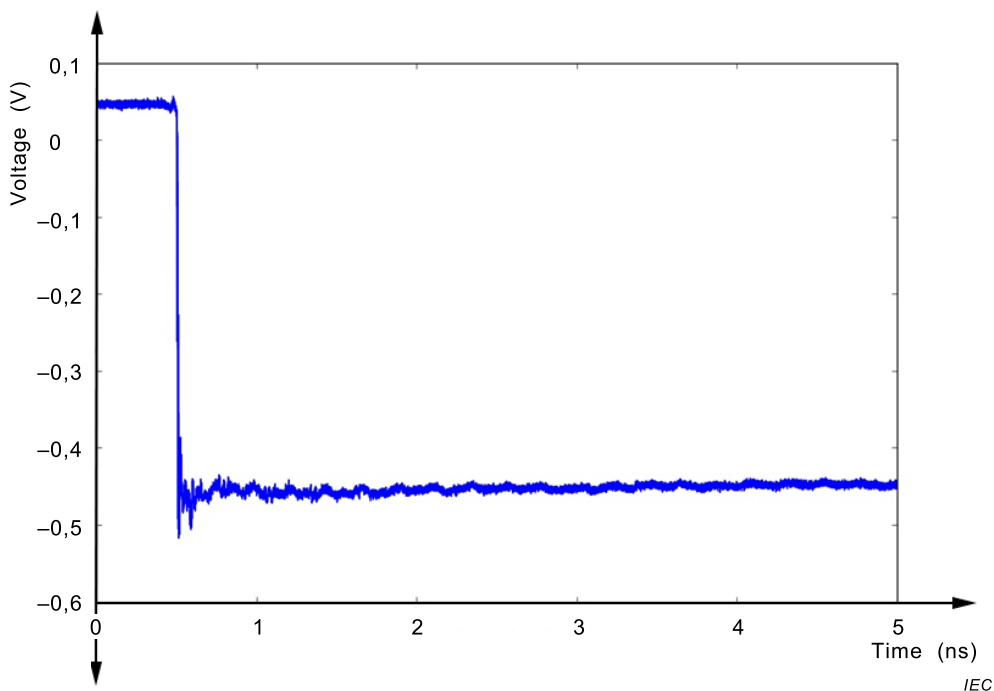
- e) Determine the *state level* for each of the N *waveforms* using the histogram algorithm (see IEC 60469:2013, 5.2.2) or the shorth algorithm (see IEC 60469:2013, 5.2.3).
- f) Calculate the upper and lower quantiles of the *state level* to determine the user specified confidence interval. For example, if the user specified confidence interval is 95 %, then the upper and lower quantiles are 0,025 and 0,975.

Annex A (informative)

Demonstration example for the calculation of the uncertainty of state levels using the histogram mode according to 7.2.1.2

A.1 Waveform measurement

The output of a step generator was measured using a sampling oscilloscope. The measurement was performed with a *waveform epoch* of approximately 5 ns and a sampling *interval* of approximately 200 fs to provide the *waveform* displayed in Figure A.1, which consists of 25 000 *samples*. The measurement has been repeated to obtain 502 *waveforms*.



**Figure A.1 – Waveform obtained from the measurement of a step-like signal
from which the state levels and uncertainties are calculated**

A.2 Splitting the bimodal histogram and determining the state levels

For the analysis of *state levels*, the bimodal histogram of one of the *waveforms* is first constructed using $N_{\text{bin}} = 1\,000$ and $A_{\text{bin}} = 0,57\text{ mV}$. The bimodal histogram is then split into two histograms using the method described in IEC 60469:2013, 5.2.2 and with $(f_1; f_2) = (0,2; 0,9)$. These values are chosen such that the *transition* region has negligible influence on the individual histograms. The histogram corresponding to the lower *state*, s_1 , is displayed in Figure A.2 a), whereas the histogram of the upper *state*, s_2 , is shown in Figure A.2 b). Both histograms have the same bin width as the bimodal histogram and the bin numbers are determined by the parameters (f_1, f_2) resulting in $N_{\text{bin}}f_1$ bins for s_1 and $N_{\text{bin}}(1-f_2)$ bins for s_2 . Using Formula (26) to define the values of the modes of the two histograms, we obtain $\text{level}(s_1) = -450,69\text{ mV}$ and $\text{level}(s_2) = 47,22\text{ mV}$.

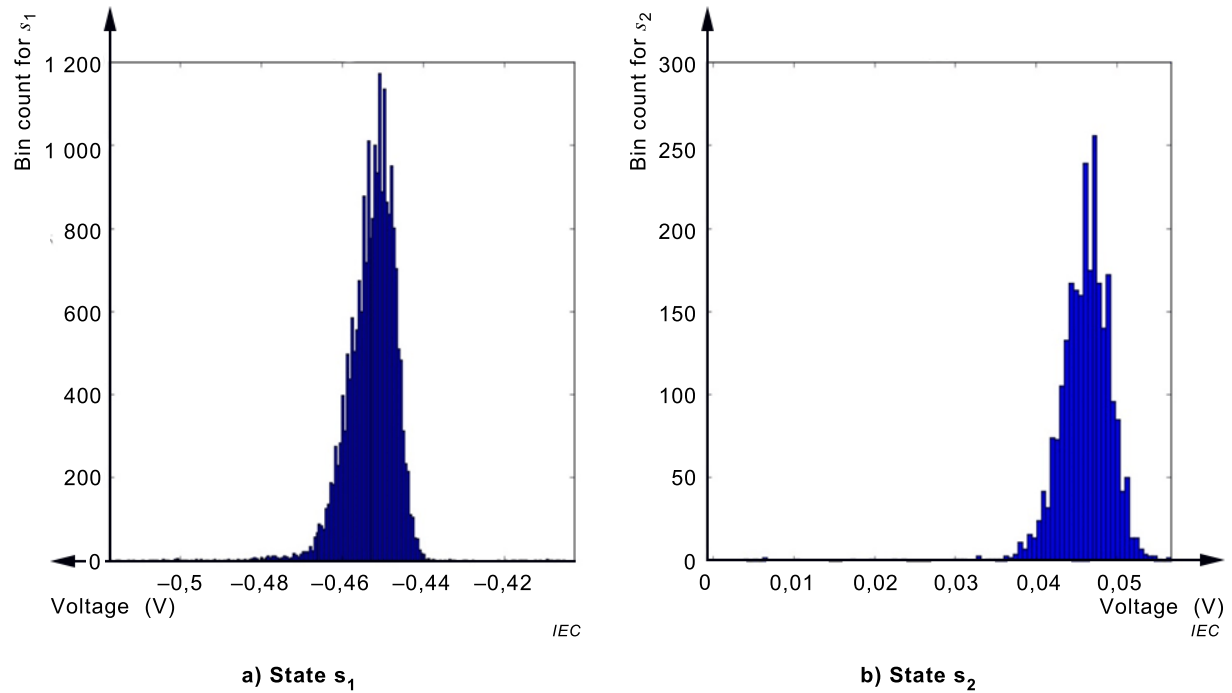


Figure A.2 – Histograms of state s_1 (a) and state s_2 (b) of the step-like waveform plotted in Figure A.1

A.3 Uncertainty of state levels

Following Formulae (27) and (28), u_{s_i} ($i = 1$ for s_1 and $i = 2$ for s_2), is

$$u_{s_i} = \sqrt{u_{A_{\text{low},i}}^2 + \frac{A_{\text{bin},i}^2}{12} + u_{0,i}^2} \quad (\text{A.1})$$

where $u_{A_{\text{low},i}} = \sigma_i$. In this example, different noise sources will not be distinguished from each other but their collective contribution will be directly extracted from the *waveforms* using two different techniques (one technique using a single *waveform measurement* and another using multiple *waveform measurements*). The second uncertainty contribution accounts for the finite bin width. The third uncertainty contribution, u_0 , considers the variation of A_{low} for different bin numbers. The different *uncertainty* contributions for this example are given in Table A.1.

If a single *waveform* is used, then $u_{A_{\text{low},i}}$ can be extracted from a subset of that *waveform* which contributes to s_1 or s_2 . This subset should be of short enough duration such that no *waveform* features influence the calculation but should be of long enough duration to allow for statistical analysis. In this example, 100 samples ($n = 100$) are used. The standard deviation σ_{s_2} is obtained from the first 100 *waveform samples*, the standard deviation σ_{s_1} is obtained from the last 100 *waveform samples*, and these standard deviations are set equal to $u_{A_{\text{low},i}}$.

While this method is very simple, it yields an upper limit for the *uncertainty* contribution arising from noise. Other more complicated methods, such as resampling of the waveform data with varying sampling frequency, may provide more accurate results for certain *waveforms*. When multiple *waveform* measurements are available, $u_{A_{\text{low},i}}$ can directly be extracted from the variation of the *level*(s_i). This procedure is very different from the noise calculation presented for the single *waveform* measurement, but it allows for more precise

uncertainty estimation. An estimate of $level(s_i)$ that includes information from all the *waveforms* can be obtained by calculating $level(s_i)$ from each *waveform* and then finding the mean of each set of $level(s_i)$. For this example, one obtains $level(s_1) = -450,19$ mV and $level(s_2) = 46,28$ mV. For the calculation of $u_{A_{low,i}}$, it is to be considered that the best estimate of $level(s_i)$ is obtained from the mean of individual $level(s_i)$ measurements. Consequently, the standard deviation of these individual $level(s_i)$ measurements is taken and divided by $\sqrt{502}$ (because in this example 502 independent and unique *waveforms* were used) to obtain $u_{A_{low,i}}$ (the standard deviation of the mean). This procedure ensures that the *uncertainty* contribution will decrease with an increased number of measurements.

The last *uncertainty* contribution, u_o , is obtained in this example from the observed variation between $level(s_i)$ and N_{bin} . For this purpose, N_{bin} should be varied over a wide range, for example, $\frac{1}{2}N_{bin} \leq N_{bin,j} \leq \frac{3}{2}N_{bin}$, where $N_{bin,j}$ is the j^{th} iteration of the number of bins. For this example, the number of bins has been varied between $500 \leq N_{bin,j} \leq 1500$ and the *uncertainty*, u_o , equals the corresponding standard deviation of the $level(s_i)$.

The individual *uncertainty* contributions to the resulting total *uncertainty*, u_{s_i} , for the state levels s_1 and s_2 are listed in Table A.1. While the contribution $u_{A_{low,i}}$ can be significantly reduced when performing multiple measurements, $u_{A_{bin,i}}$ and u_o are the same for single and multiple measurements. In this example, the noise provides the largest *uncertainty* contribution for the analysis of a single *waveform*, whereas the dependence of the mode on the number of bins provides the largest *uncertainty* contribution for multiple *waveform* measurements.

In conclusion, the *uncertainty* analysis presented above describes a possible method for estimating the *uncertainty* in $level(s_i)$ when the histogram mode is used to find the state levels. It should be emphasized that, depending on the *measured waveform* and experimental conditions, other equally accurate or even more accurate options may exist for computing the *uncertainty* of $level(s_i)$.

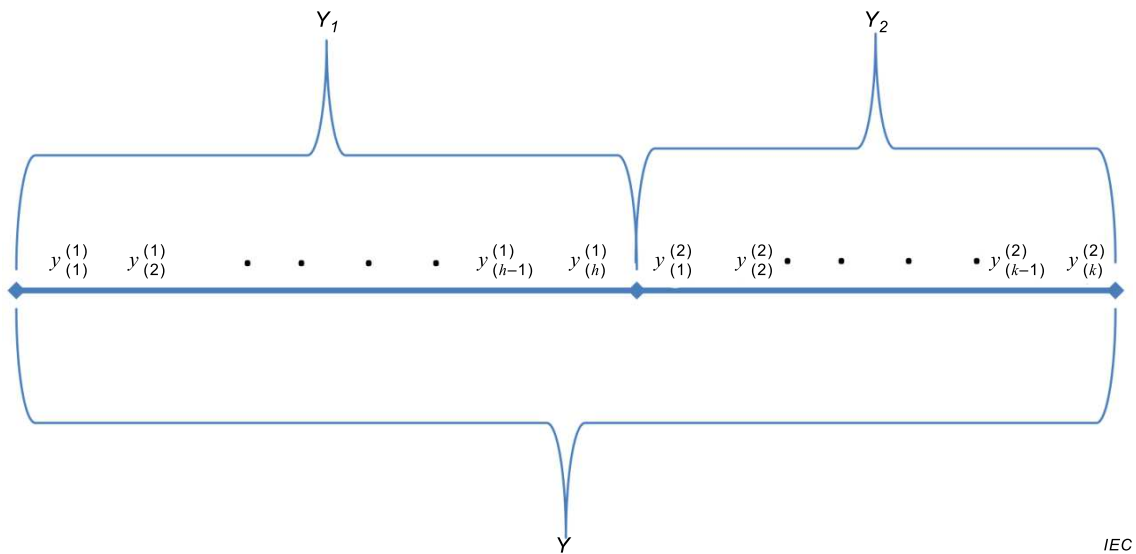
Table A.1 – Uncertainty contributions and total uncertainty for $level(s_i)$ determined from histogram modes

State level	$u_{A_{low,i}}$ (mV)	$u_{A_{bin,i}}$ (mV)	u_o (mV)	u_{s_i} (mV)
s_1 (single measurement)	6,26	0,16	0,95	6,33
s_1 (multiple measurements)	0,03	0,16	0,95	0,96
s_2 (single measurement)	3,58	0,16	0,50	3,62
s_2 (multiple measurements)	0,03	0,16	0,50	0,53
NOTE The uncertainty in histogram modes is $u_{A_{bin,i}} = \sqrt{A_{bin,i}^2 / 12}$.				

Annex B (informative)

Computation of Σ_L and Σ_Y for estimating the uncertainty of state levels using the shorth method according to 7.2.1.3

The computation of Σ_L and Σ_Y requires more than one waveform, as stated in 7.2.1.3. As also stated in 7.2.1.3, “Let Y be a vector containing only those *waveform* values that will be used to determine the *state levels*.” This means that Y comprises only those values contained in the shorth intervals for s_1 and s_2 . The shorth interval for s_1 is Y_1 and for s_2 is Y_2 , as defined in 7.2.1.3. Therefore, Y is a non-decreasing vector containing those *waveform* values that are used to compute $level(s_i)$. The vector Y is graphically depicted in Figure B.1.



NOTE $y_{(i)}^{(1)} \leq y_{(i+1)}^{(1)}$, $y_{(i)}^{(2)} \leq y_{(i+1)}^{(2)}$, and $y_{(h)}^{(1)} \leq y_{(1)}^{(2)}$.

**Figure B.1 – Diagram showing location of waveform elements, $y_{(\beta)}^{(\alpha)}$, in Y_1 and Y_2 ,
and the construction of Y from Y_1 and Y_2**

The *state levels*, $level(s_1)$ and $level(s_2)$, are computed using (see 7.2.1.3):

$$L = \mathbf{H}_L Y, \quad (\text{B.1})$$

which can be expanded for clarity as:

$$\begin{pmatrix} level(s_1) \\ level(s_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{N_{s_1}}, & \frac{1}{N_{s_1}}, & \dots, & \frac{1}{N_{s_1}}, & 0, & 0, & \dots, & 0 \\ 0, & 0, & \dots, & 0, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \dots, & \frac{1}{N_{s_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{(1)}^{(1)} \\ y_{(1)}^{(2)} \\ \vdots \\ y_{(h)}^{(1)} \\ y_{(h)}^{(2)} \\ y_{(1)}^{(2)} \\ y_{(2)}^{(2)} \\ \vdots \\ y_{(k)}^{(2)} \end{pmatrix} \quad (B.2)$$

where $y_{(\beta)}^{(\alpha)}$ are the elements of Y , $\alpha = 1$ for s_1 and $\alpha = 2$ for s_2 (as described in IEC 60469), and β is the index of Y for which the shorth values are computed (as described in IEC 60469).

The *uncertainty* in $level(s_i)$ is determined from the covariance matrix (see 7.2.1.3):

$$\Sigma_L = H_L \Sigma_Y H_L^T \quad (B.3)$$

where Σ_Y is the covariance matrix, which is a $(N_{s_1} + N_{s_2}) \times (N_{s_1} + N_{s_2})$. Expanding Formula (B.3) for clarification gives:

$$\Sigma_L = \begin{pmatrix} u_{s_1}^2 & u_{s_1, s_2} \\ u_{s_2, s_1} & u_{s_2}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{N_{s_1}}, & \frac{1}{N_{s_1}}, & \dots & \frac{1}{N_{s_1}}, & 0, & \dots & 0, & 0 \\ 0, & 0, & \dots & 0, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \dots & \frac{1}{N_{s_2}}, & \frac{1}{N_{s_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{N_{s_1}}, & 0 \\ \frac{1}{N_{s_1}}, & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{1}{N_{s_1}}, & 0 \\ 0, & \frac{1}{N_{s_2}} \\ \vdots & \vdots \\ 0, & \frac{1}{N_{s_2}} \\ 0, & \frac{1}{N_{s_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1,1}, & E_{1,2}, & \dots, & E_{1,N_T-1}, & E_{1,N_T} \\ E_{2,1}, & E_{2,2}, & \dots, & E_{2,N_T-1}, & E_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \dots, & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots, & \vdots & \vdots \\ E_{N_T-1,1}, & E_{N_T-1,2}, & \dots, & E_{N_T-1,N_T-1}, & E_{N_T-1,N_T} \\ E_{N_T,1}, & E_{N_T,2}, & \dots, & E_{N_T,N_T-1}, & E_{N_T,N_T} \end{pmatrix} \quad (B.4)$$

where

$$N_T = N_{s_1} + N_{s_2} \quad (B.5)$$

$$E_{i,j} = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (y_{k,i} - \mu_{y_i})(y_{k,j} - \mu_{y_j}) \quad (\text{B.6})$$

where M is the number of waveforms used and the μ_y are the average values of y for the indicated indices, i and j . Σ_y can be expanded to show more explicitly its construction, as shown in Formula (B.7). In Formula (B.7), it is assumed that there is no correlation between s_1 and s_2 .

$$\left(\begin{array}{ccccc} E_{1,1}, & E_{1,2}, & \dots, & E_{1,N_{s_1}-1}, & E_{1,N_{s_1}} \\ E_{2,1}, & E_{2,2}, & \dots, & E_{2,N_{s_1}-1}, & E_{2,N_{s_1}} \\ \cdot & \cdot & \dots, & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots, & \cdot & \cdot \\ E_{N_{s_1}-1,1}, & E_{N_{s_1}-1,2}, & \dots, & E_{N_{s_1}-1,N_{s_1}-1}, & E_{N_{s_1}-1,N_{s_1}} \\ E_{N_{s_1},1}, & E_{N_{s_1},2}, & \dots, & E_{N_{s_1},N_{s_1}-1}, & E_{N_{s_1},N_{s_1}} \\ & & & & 0 \\ & & & & E_{1,1}, & E_{1,2}, & \dots, & E_{1,N_{s_2}-1}, & E_{1,N_{s_2}} \\ & & & & E_{2,1}, & E_{2,2}, & \dots, & E_{2,N_{s_2}-1}, & E_{2,N_{s_2}} \\ & & & & \cdot & \cdot & \dots, & \cdot & \cdot \\ & & & & \cdot & \cdot & \dots, & \cdot & \cdot \\ & & & & E_{N_{s_2}-1,1}, & E_{N_{s_2}-1,2}, & \dots, & E_{N_{s_2}-1,N_{s_2}-1}, & E_{N_{s_2}-1,N_{s_2}} \\ & & & & E_{N_{s_2},1}, & E_{N_{s_2},2}, & \dots, & E_{N_{s_2},N_{s_2}-1}, & E_{N_{s_2},N_{s_2}} \end{array} \right) \quad ((\text{B.7}))$$

Bibliography

IEC 60359:2001, *Electrical and electronic measurement equipment – Expression of performance*

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

ISO 7870-1, *Control charts – Part 1: General guidelines*

JCGM¹ 101:2008, *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*

JCGM 102:2011, *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities*

IEEE² Std. 1057-2007, *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders*

¹ JCGM is the Joint Committee for Guides in Metrology.

² IEEE is the Institute of Electrical and Electronics Engineers.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	56
1 Domaine d'application	58
2 Références normatives	58
3 Termes et définitions	58
4 Mesure de forme d'onde	68
4.1 Généralités	68
4.2 Paramètres de forme d'onde	69
4.3 Procédé de mesure de forme d'onde	69
4.3.1 Généralités	69
4.3.2 Description générale du système de mesure	70
5 Forme d'onde et corrections de paramètre de forme d'onde	71
5.1 Généralités	71
5.2 Corrections des paramètres des formes d'onde	72
5.3 Corrections de forme d'onde et reconstitution de forme d'onde	72
5.3.1 Généralités	72
5.3.2 Correction échantillon par échantillon	72
5.3.3 Correction de l'ensemble de la forme d'onde	73
6 Incertitudes	74
6.1 Généralités	74
6.2 Propagation des incertitudes	75
6.2.1 Généralités	75
6.2.2 Grandeurs d'entrée non corrélées	75
6.2.3 Grandeurs d'entrée corrélées	75
6.3 Données totalisées et ses écarts-types	76
6.4 Incertitude élargie et facteur d'élargissement	78
6.4.1 Généralités	78
6.4.2 Degrés de liberté efficaces	80
6.5 Incertitudes de l'ensemble de la forme d'onde	80
7 Incertitudes des paramètres des formes d'onde	82
7.1 Généralités	82
7.2 Paramètres d'amplitude	83
7.2.1 Niveaux d'état	83
7.2.2 Limites d'état	88
7.2.3 Amplitude de forme d'onde (niveaux d'état)	89
7.2.4 Amplitude d'impulsion (niveaux d'état)	90
7.2.5 Niveaux de référence en pourcentage (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)	91
7.2.6 Erreur d'établissement de transition (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)	91
7.2.7 Aberration de dépassement (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)	91
7.2.8 Aberration de dépassement négatif (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)	92
7.3 Paramètres temporels	93
7.3.1 Instant initial	93
7.3.2 Époque de forme d'onde	94
7.3.3 Instants de niveau de référence (niveaux de référence en pourcentage, époque de forme d'onde, instant initial)	94

7.3.4	Instant du centre de choc (amplitude d'impulsion, instants de niveau de référence).....	96
7.3.5	Durée de transition (instants de niveau de référence).....	96
7.3.6	Durée d'établissement de transition (instants de niveau de référence).....	96
7.3.7	Durée d'impulsion (instants de niveau de référence).....	97
7.3.8	Intervalle entre impulsions (instants de niveau de référence).....	97
7.3.9	Retard (avance) de forme d'onde (instants de niveau de référence).....	97
8	Méthode de Monte-Carlo pour les estimations de l'incertitude de paramètre des formes d'onde.....	98
8.1	Lignes directrices et considérations générales.....	98
8.2	Exemple: niveau d'état.....	98
Annexe A (informative) Exemple de calcul de l'incertitude des niveaux d'état à l'aide du mode d'histogramme conformément au 7.2.1.2		99
A.1	Mesure de forme d'onde	99
A.2	Division de l'histogramme bimodal et détermination des niveaux d'état	99
A.3	Incertaince des niveaux d'état	100
Annexe B (informative) Calcul de Σ_L et de Σ_Y pour estimer l'incertitude des niveaux d'état à l'aide de la méthode shorth conformément au 7.2.1.3		102
Bibliographie.....		105
Figure 1 – Niveaux de référence, instants de niveau de référence, amplitude de forme d'onde et durée de transition d'une seule transition positive.....		59
Figure 2 – Dépassement, dépassement négatif, niveaux d'état et limites d'état d'une seule transition positive		63
Figure 3 – Création de formes d'onde mesurées, corrigées et reconstituées et estimation finale du signal d'entrée		69
Figure 4 – Exemple de frontières de forme d'onde se concentrant sur les trajectoires ayant un impact sur les mesures de paramètre d'impulsion.....		81
Figure 5 – Relations entre les paramètres des formes d'onde choisis		83
Figure A.1 – Forme d'onde obtenue à la suite de la mesure d'un signal échelonné à partir duquel les niveaux d'état et les incertitudes sont calculés.....		99
Figure A.2 – Histogrammes de l'état s_1 (a) et de l'état s_2 (b) de la forme d'onde échelonnée tracée à la Figure A.1		100
Figure B.1 – Schéma présentant l'emplacement des éléments de forme d'onde, $y_{(\beta)}^{(\alpha)}$, dans Y_1 et Y_2 , et la construction de Y à partir de Y_1 et Y_2		102
Tableau 1 – Valeur du facteur d'élargissement k_p qui englobe la fraction p de la loi de t pour différents degrés de liberté (du Guide ISO/IEC 98-3)		79
Tableau 2 – Différentes méthodes de détermination des niveaux d'état donnés dans l'IEC 60469, et de leur type d'incertitude et méthode de calcul.....		84
Tableau 3 – Différentes méthodes de détermination des limites d'état et de leur type d'incertitude et méthode de calcul.....		89
Tableau 4 – Variables contribuant à l'incertitude dans le dépassement		92
Tableau 5 – Variables contribuant à l'incertitude dans l'instant de niveau de référence		95
Tableau A.1 – Contributions à l'incertitude et incertitude totale pour $niveau(s_i)$ déterminées à partir des modes d'histogramme. $niveau(s_i)$		101

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CALCUL DES INCERTITUDES DES PARAMÈTRES DES FORMES D'ONDE

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC 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 l'IEC. L'IEC 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62754 a été établie par le comité d'études 85 de l'IEC: Equipement de mesure des grandeurs électriques et électromagnétiques.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
85/585/FDIS	85/588/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.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Les termes utilisés dans le présent document et qui sont définis à l'Article 3 sont écrits en italique.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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.

CALCUL DES INCERTITUDES DES PARAMÈTRES DES FORMES D'ONDE

1 Domaine d'application

Le présent document spécifie les méthodes de calcul des paramètres temporels et d'amplitude des formes d'onde échelonnées et de type impulsion, ainsi que leurs incertitudes associées. Le présent document concerne tous les secteurs industriels qui génèrent, transmettent, détectent, reçoivent, mesurent et/ou analysent ces types d'impulsions.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60469:2013, *Transitions, impulsions et formes d'ondes associées – Termes, définitions et algorithmes*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

zone d'aberration

3.1.1

zone d'aberration post-transition

intervalle entre un *instant* spécifié par l'utilisateur et un *instant* fixe, l'*instant* fixe étant le premier *instant* d'échantillonnage après l'*instant de niveau de référence* 50 % pour lequel la valeur de *forme d'onde* correspondante se trouve dans les *limites d'état* de l'état suivant l'*instant de niveau de référence* 50 %

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.1.1, modifiée – la note 1 à l'article a été supprimée.]

3.1.2

zone d'aberration prétransition

intervalle entre un *instant* spécifié par l'utilisateur et un *instant* fixe, l'*instant* fixe étant le premier *instant* d'échantillonnage avant l'*instant de niveau de référence* 50 % pour lequel la valeur de *forme d'onde* correspondante se trouve dans les *limites d'état* de l'état précédant l'*instant de niveau de référence* 50 %

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.1.2, modifiée – la note 1 à l'article a été supprimée.]

3.2 amplitude

3.2.1

amplitude d'impulsion

différence entre le *niveau* spécifié, correspondant à la *crête maximale* (*crête minimale*) de la *forme d'onde de type impulsion* positive (négative) et le *niveau* de l'état qui précède la première *transition* de cette *forme d'onde de type impulsion*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.3.1]

3.2.2

amplitude de forme d'onde

différence entre les *niveaux* de deux états différents d'une *forme d'onde*

VOIR Figure 1.

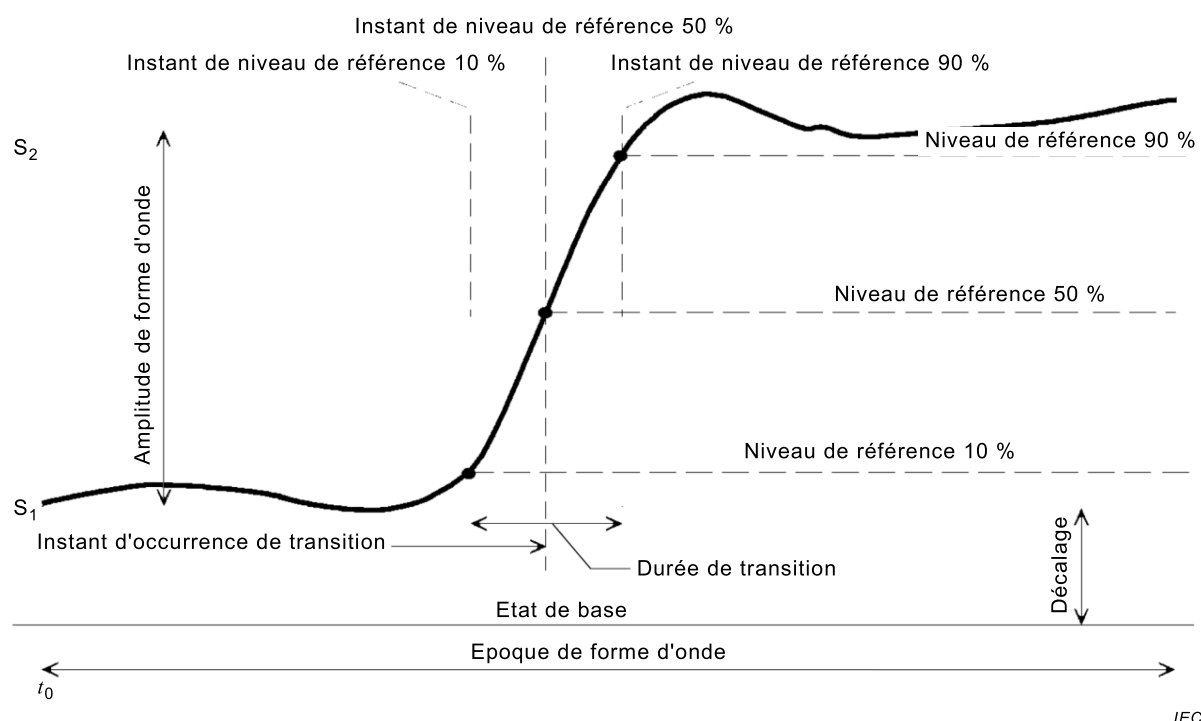


Figure 1 – Niveaux de référence, instants de niveau de référence, amplitude de forme d'onde et durée de transition d'une seule transition positive

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.3.2, modifiée – la Note 1 à l'article a été supprimée et la référence à la Figure 1 a été ajoutée.]

3.3

correction

opération qui combine les résultats de l'opération de conversion avec les informations de la fonction de transfert afin de produire une *forme d'onde* qui représente le *signal* avec plus d'exactitude

Note 1 à l'article: La correction peut être effectuée manuellement par un opérateur, par un procédé de calcul ou par un dispositif ou un appareil compensateur. La correction doit être effectuée avec une exactitude en rapport avec l'exactitude globale souhaitée dans le *procédé de mesure de forme d'onde*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.4]

3.4

facteur d'élargissement

facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude type composée pour obtenir l'incertitude élargie

Note 1 à l'article Un facteur d'élargissement, k , a sa valeur typiquement comprise entre 2 et 3.

Note 2 à l'article: Le facteur d'élargissement est aussi défini comme le "nombre supérieur ou égal à celui par lequel une *incertitude-type composée* est multipliée pour obtenir une *incertitude élargie*" (Voir Guide ISO/IEC 99:2007, 2.38).

[SOURCE: Guide ISO/IEC 98-3:2008, 2.3.6, modifiée – la note 2 à l'article a été ajoutée]

3.5

degrés de liberté

en général, le nombre de termes de la somme moins le nombre de contraintes sur les termes de la somme

[SOURCE: Guide ISO/IEC 98-3:2008, C.2.31]

3.6

réponse impulsionnelle

signal de sortie provenant d'un instrument, d'un dispositif ou d'un système qui est le résultat d'un *signal* d'entrée, ce dernier pouvant être décrit par une impulsion de Dirac, $\delta(t)$:

$$\begin{aligned}\delta(t=0) &= 1 \\ \delta(t \neq 0) &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

3.7

instant

valeur de temps particulière située dans une *époque de forme d'onde* et, sauf spécification contraire, référencée par rapport à l'*instant initial* de cette *époque de forme d'onde*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13]

3.7.1

instant initial

premier échantillon d'*instant* de la *forme d'onde*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.3]

3.7.2

instant du centre de choc

instant auquel survient une approximation, spécifiée par l'utilisateur, de la *crête maximale* (*crête minimale*) de la *forme d'onde de type impulsion* positive (négative)

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.2]

3.7.3

instant du niveau de référence

instant auquel la *forme d'onde* croise un *niveau de référence* spécifié

VOIR Figure 1.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.5, modifiée – la référence à la Figure 1 a été ajoutée.]

3.8**intervalle**

ensemble de valeurs de temps comprises entre un premier *instant* et un deuxième *instant*, le deuxième *instant* étant ultérieur au premier

Note 1 à l'article: Les premier et deuxième instants sont appelés points limites de l'intervalle. Sauf spécification contraire, l'hypothèse retenue est que les points limites font partie de l'intervalle.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.15]

3.9**niveau**

constante exprimée dans la même unité que y

VOIR Figure 1.

Note 1 à l'article: y est le *signal*.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.17, modifiée – la référence à la Figure 1 a été ajoutée ainsi que la note 1 à l'article.]

3.9.1**niveau de référence en pourcentage**

niveau de référence spécifié par:

$$y_{x\%} = y_{0\%} + \frac{x}{100\%}(y_{100\%} - y_{0\%}) \quad (2)$$

où

$0\% < x < 100\%$

$y_{0\%}$ = *niveau d'état bas*

$y_{100\%}$ = *niveau d'état haut*

$y_{0\%}$, $y_{100\%}$ et $y_{x\%}$ sont tous exprimés dans la même unité de mesure

VOIR Figure 1.

Note 1 à l'article: Les *niveaux de référence* couramment utilisés sont: 0 %, 10 %, 50 %, 90 % et 100 %.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.17.3, modifiée – la référence à la Figure 1 a été ajoutée.]

3.10**mesurande**

grandeur que l'on veut mesurer

[SOURCE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.3, modifiée – les notes ont été supprimées.]

3.11**modèle de mesure****modèle**

relation mathématique entre toutes les grandeurs qui interviennent dans un mesurage

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007, 2.48, modifiée – les notes ont été supprimées.]

3.12

incertitude de mesure

incertitude

paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un *mesurande*, à partir des informations utilisées

Note 1 à l'article L'incertitude de mesure est aussi définie comme "paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au *mesurande*" (Voir Guide ISO/IEC 98-3:2008; 2.2.3).

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007, 2.26, modifiée – les notes ont été supprimées et la note 1 à l'article a été ajoutée.]

3.12.1

incertitude-type

incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type

Note 1 à l'article L'incertitude-type est aussi définie comme "incertitude des résultats d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart-type" (Voir Guide ISO/IEC 98-3:2008; 2.3.1).

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007, 2.30, modifiée – la note 1 à l'article a été ajoutée.]

3.12.2

incertitude-type composée

incertitude-type obtenue en utilisant les incertitudes types individuelles associées aux grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure

Note 1 à l'article L'*incertitude-type composée* est aussi définie comme "incertitude-type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de termes, ces termes étant les variances ou covariances de ces autres grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs" (Voir Guide ISO/IEC 98-3:2008, 2.3.4).

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007; 2.31, modifiée – la note a été supprimée et la note 1 à l'article a été ajoutée.]

3.12.3

incertitude élargie

produit d'une *incertitude-type composée* et d'un facteur supérieur à un

Note 1 à l'article L'incertitude-type composée est aussi définie comme "grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au *mesurande*" (Voir Guide ISO/IEC 98-3:2008, 2.3.5).

[SOURCE: Guide ISO/IEC 99:2007, 2.35, modifiée – les notes ont été supprimées et la note 1 à l'article a été ajoutée.]

3.12.4

incertitude instrumentale

composante de l'incertitude de mesure qui provient de l'instrument de mesure ou du système de mesure utilisé

[Guide ISO/IEC 99:2007, 4.24, modifiée – la première modification ne concerne que la version anglaise, les notes ont été supprimées.]

3.12.4.1

incertitude (instrumentale) intrinsèque

incertitude d'un appareil de mesure lorsqu'on l'utilise dans les conditions de référence

[SOURCE: IEC 60359:2001, 3.2.10]

3.12.4.2**incertitude instrumentale de fonctionnement**

incertitude instrumentale dans les conditions nominales de fonctionnement

[SOURCE: IEC 60359:2001, 3.2.11]

3.13**dépassement**

aberration de forme d'onde située dans une zone d'aberration post-transition ou dans une zone d'aberration prétransition et supérieure à la limite d'état supérieure du niveau d'état associé

VOIR Figure 2.

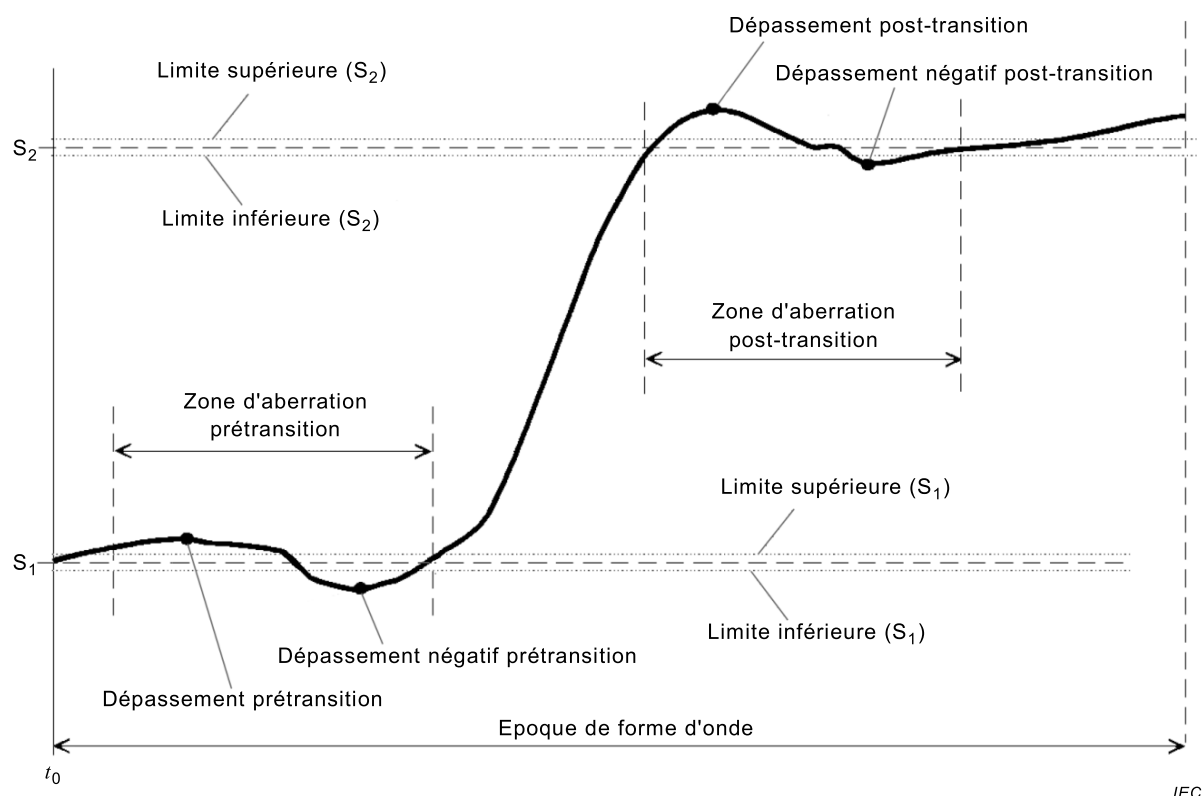


Figure 2 – Dépassement, dépassement négatif, niveaux d'état et limites d'état d'une seule transition positive

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.19, modifiée – la référence aux Figures 5 et 6 dans la définition source a été remplacée par la référence à la Figure 2.]

3.14**paramètre**

toute valeur (nombre multiplié par une unité de mesure) pouvant être calculée à partir d'une *forme d'onde*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.20]

3.15**crête maximale**

plus haute valeur de la *forme d'onde*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.21]

3.16

crête minimale

plus basse valeur de la *forme d'onde*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.22]

3.17

durée d'impulsion

différence entre le premier et le deuxième *instant d'occurrence de transition*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.27, modifiée – la note a été supprimée.]

3.18

intervalle entre impulsions

durée entre l'*instant de niveau de référence* 50 %, sauf spécification contraire, de la deuxième *transition* d'une *impulsion* d'un *train d'impulsions* et celui de la première *transition* de l'*impulsion* immédiatement suivante du même *train d'impulsions*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.28]

3.19

reconstitution de forme d'onde

déconvolution

processus consistant à supprimer l'effet de l'instrument de mesure, des connecteurs, des câbles et de la gigue sur la *forme d'onde* mesurée

Note 1 à l'article: Ce processus déconvolue la réponse impulsionnelle de l'instrument de mesure à partir de la *forme d'onde* mesurée.

3.20

échantillon

élément d'une *forme d'onde à échantillonnage*, exprimé dans les unités de l'amplitude du *signal* à un instant donné

3.21

signal

phénomène physique dont une ou plusieurs caractéristiques sont susceptibles de varier en représentant des informations

Note 1 à l'article: Ce phénomène est une fonction de temps.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.38]

3.22

état

niveau particulier ou, le cas échéant, *niveau* particulier et limites supérieure et inférieure (*limites d'état* supérieure et inférieure) faisant référence ou associées à ce *niveau*

Note 1 à l'article: Sauf spécification contraire, les *états*, lorsqu'il y en a plusieurs, sont classés du *niveau* le plus négatif au *niveau* le plus positif et les chevauchements de *niveaux d'état* ne sont pas admis. L'*état* le plus négatif est appelé *état* 1. L'*état* le plus positif est appelé *état* n . Les *états* sont notés $s_1, s_2, \dots, s_n$; les *niveaux d'état* sont notés *niveau*(s_1), *niveau*(s_2), ..., *niveau*(s_n); les *limites d'état* supérieures sont notées $\sup(s_1), \sup(s_2), \dots, \sup(s_n)$; et les *limites d'état* inférieures sont notées $\inf(s_1), \inf(s_2), \dots, \inf(s_n)$.

VOIR Figure 2.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.40, modifiée – la référence à la Figure 2 a été ajoutée et la note 2 de la définition de base a été supprimée.]

3.23

limites d'état

limites supérieures et inférieures des états d'une *forme d'onde*

VOIR Figure 2.

Note 1 à l'article: Toutes les valeurs d'une *forme d'onde* qui se trouvent entre les limites d'un état donné sont décrites comme étant dans cet état. Les *limites d'état* sont définies par l'utilisateur.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.41, modifiée – la référence à la Figure 2 a été ajoutée.]

3.24

occurrence d'état

zone contiguë d'une *forme d'onde* qui est délimitée par les *limites d'état* supérieure et inférieure d'un état, et dont la *durée* est supérieure ou égale à la *durée* minimale spécifiée pour l'obtention de l'état. L'occurrence d'état est constituée de toute la partie de forme d'onde qui reste dans les limites de l'état

Note 1 à l'article: Les *occurrences d'état* sont numérotées à l'aide de couples (s, n) , où s_i désigne le i^{e} état et n est le numéro de l'occurrence de l'état en question dans l'époque de forme d'onde. Dans une époque de forme d'onde donnée, lorsque la *forme d'onde* passe pour la première fois à l'état s_1 , l'occurrence d'état correspondante est notée $(s_1, 1)$. Lorsque la *forme d'onde* quitte cet état, le cas échéant, l'occurrence d'état prend fin. Lorsque la *forme d'onde* repasse et reste à l'état s_1 , le cas échéant, la nouvelle occurrence d'état est désignée $(s_1, 2)$, et ainsi de suite.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.42, modifiée – la note a été écourtée afin de ne pas traiter des figures qui ne sont pas contenues dans le présent document]

3.25

base de temps

composant d'un instrument de mesure qui fournit l'instant unique de chaque échantillon dans une *forme d'onde à échantillonnage*

Note 1 à l'article: La *base de temps* fournit un vecteur d'instants d'échantillonnage dans lequel chaque instant correspond à un échantillon unique dans la forme d'onde. Il est fréquent que l'intervalle entre les instants d'échantillon ne soit pas uniforme et présente des erreurs systématiques et aléatoires.

3.26

transition

zone contiguë d'une *forme d'onde* qui relie, soit directement, soit par le biais de *transitoires* intermédiaires, deux *occurrences d'état* qui se suivent dans le temps, mais correspondent à des états différents

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.47]

3.26.1

transition négative

transition dont l'état de fin est plus négatif que son état de départ

Note 1 à l'article: Les points limites de la *transition négative* sont celui où la *forme d'onde* passe pour la dernière fois la limite d'état supérieure et celui où la *forme d'onde* passe pour la première fois la limite d'état inférieure.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.47.1, modifiée – la note 2 a été supprimée.]

3.26.2

transition positive

transition dont l'état de fin est plus positif que son état de départ

Note 1 à l'article: Les points limites de la *transition positive* sont celui où la *forme d'onde* passe pour la dernière fois la limite d'état inférieure et celui où la *forme d'onde* passe pour la première fois la limite d'état supérieure.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.47.3, modifiée – la note 2 a été supprimée.]

3.27

durée de transition

différence entre les deux *instants de niveau de référence* de la même *transition*

Note 1 à l'article : Sauf spécification contraire, les deux *niveaux de référence* pris en compte sont les niveaux de référence 10 % et 90 %.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.48, modifiée – la note 2 a été supprimée.]

3.28

instant d'occurrence de transition

premier *instant de niveau de référence* 50 %, sauf spécification contraire, dans la *transition* d'une *forme d'onde* échelonnée

VOIR Figure 1.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.13.6, modifiée – seule la référence à la Figure 1 a été gardée.]

3.29

durée d'établissement de transition

intervalle de temps entre l'*instant de niveau de référence* 50 %, sauf spécification contraire, et l'*instant* final où la *forme d'onde* coupe la *limite d'état* d'un *état* spécifié, tandis qu'elle approche de cet *état*

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.49 modifiée – la note a été supprimée.]

3.30

erreur d'établissement de transition

erreur maximale entre la valeur de la *forme d'onde* et un *niveau de référence* spécifié dans un *intervalle* de l'*époque de forme d'onde* spécifié par l'utilisateur. L'*intervalle* commence à un *instant* spécifié par l'utilisateur, par rapport à l'*instant de niveau de référence* 50 %.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.50]

3.31

dépassement négatif

aberration de forme d'onde située dans une *zone d'aberration post-transition* ou une *zone d'aberration prétransition* et inférieure à la *limite d'état* inférieure du niveau d'état associé. S'il existe plus d'une telle *aberration de forme d'onde*, celle ayant la plus grande magnitude est le dépassement négatif, sauf indication contraire

VOIR Figure 2.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.53, modifiée – la référence aux Figures 5 et 6 a été remplacée par la référence à la Figure 2.]

3.32

forme d'onde

représentation d'un *signal* (par exemple, graphique, tracé, représentation oscilloscopique, série chronologique à temps discret, équations ou tableau de valeurs)

Note 1 à l'article: Il est à noter que le terme *forme d'onde* désigne une estimation, mesurée ou définie par une autre méthode, du phénomène ou *signal* physique.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.54]

3.32.1**forme d'onde corrigée**

forme d'onde à échantillonnage résultant de l'application de corrections à la *forme d'onde* mesurée

3.32.2**forme d'onde de type impulsion**

forme d'onde qui, convoluée avec une fonction unité idéale, donne une *forme d'onde* échelonnée

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.54.2]

3.32.3**forme d'onde mesurée**

forme d'onde à échantillonnage émanant d'un système de mesure avant que des *corrections* ou *reconstitutions* ne soient appliquées

3.32.4**forme d'onde reconstituée**

forme d'onde à échantillonnage résultant de l'application de méthodes de *reconstitution* au niveau de la *forme d'onde corrigée*

3.32.5**forme d'onde de référence**

forme d'onde à laquelle d'autres *formes d'onde* sont comparées

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.54.3]

3.32.6**représentation graphique de forme d'onde à échantillonnage**

forme d'onde constituée d'une série de valeurs numériques d'échantillons prélevés de manière séquentielle ou non séquentielle en fonction du temps

Note 1 à l'article: On parle également de *forme d'onde* à échantillonnage, et le processus est appelé échantillonnage.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.61.2, modifiée – la note 1 d'origine a été remplacée par une nouvelle note 1.]

3.33**aberration de forme d'onde**

différence algébrique des valeurs de *forme d'onde* entre tous les *instants*, correspondants dans le temps, d'une *forme d'onde* et d'une *forme d'onde de référence* au sein d'une *époque* de *forme d'onde* spécifiée

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.55]

3.34**retard (avance) de forme d'onde**

durée séparant les deux premiers instants d'occurrence de transition de deux formes d'onde

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.56]

3.35**époque de forme d'onde**

intervalle auquel la prise en considération d'une *forme d'onde* est limitée pour les besoins d'un calcul, d'une étude ou d'un procédé particuliers. Sauf spécification contraire, l'hypothèse

retenue est que l'époque de forme d'onde est la plage dans laquelle la forme d'onde est mesurée ou définie.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.57]

3.36

procédé de mesure de forme d'onde

réalisation d'une méthode de mesure de *forme d'onde* en termes de dispositifs, d'appareils, d'instruments, d'équipement auxiliaire, de conditions, d'opérateurs et d'observateurs spécifiques

Note 1 à l'article: Dans ce procédé, une valeur (nombre multiplié par une unité de mesure) est attribuée aux éléments de la forme d'onde.

[SOURCE: IEC 60469:2013, 3.2.59]

3.37

enregistreur de forme d'onde

instrument ou dispositif permettant d'acquérir, puis de stocker, une séquence de données correspondant au signal en cours de mesure

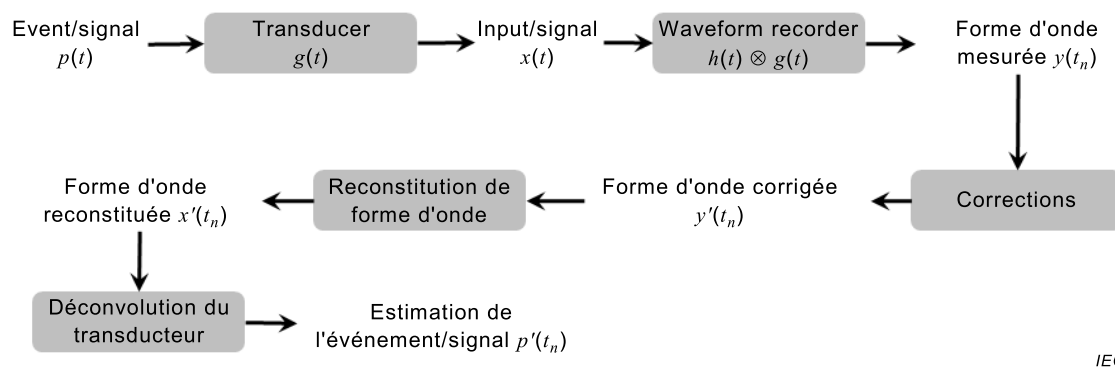
4 Mesure de forme d'onde

4.1 Généralités

Un *signal* est l'événement physique examiné et qui doit être mesuré. Une *forme d'onde* est une représentation de ce *signal* et, pour les besoins du présent document, résulte d'un *procédé de mesure de forme d'onde*. Même si une *forme d'onde* peut être présentée de différentes manières, seule la *représentation graphique de forme d'onde à échantillonnage* du *signal* mesuré ou estimé est prise en compte. Une *forme d'onde à échantillonnage* est discrétisée en *amplitude* et en temps à cause de la numérisation réalisée par l'*enregistreur de forme d'onde*. La numérisation temporelle présente la *forme d'onde* comme une série d'*échantillons de forme d'onde* discrets. La numérisation de l'amplitude donne des *échantillons de forme d'onde* comportant chacun une valeur discrète. La *forme d'onde* peut correspondre à tout *signal*, de l'impulsion optique extrêmement rapide à l'événement géologique extrêmement lent. La *forme d'onde à échantillonnage*, $y[t_n]$, peut être représentée mathématiquement sous la forme:

$$y[t_n] = \sum_{n=0}^{N-1} y(t) \delta(t - n\Delta t) \quad (3)$$

où $y(t)$ est l'entrée du *signal* dans l'*enregistreur de forme d'onde*, t est le temps, n est l'indice temporel discret, N est le nombre d'échantillons dans la *forme d'onde*, Δt est l'incrément de temps discret et δ est l'impulsion de Dirac ($\delta(t=0)=1$, $\delta(t \neq 0)=0$). Cette formule décrit une situation idéale dans laquelle la réponse du système de mesure est une impulsion de Dirac, les intervalles d'échantillonnage sont équidistants et aucun bruit n'est introduit par le système de mesure.



IEC

Figure 3 – Création de formes d'onde mesurées, corrigées et reconstituées et estimation finale du signal d'entrée

Le *procédé de mesure de forme d'onde* est présenté dans le schéma de la Figure 3 et donne la *forme d'onde mesurée*, qui a une *représentation graphique de forme d'onde à échantillonnage*. Les corrections suivantes donnent des estimations encore plus précises du *signal d'entrée*. La présente version de ce document, compte tenu de la complexité du calcul des *incertitudes des paramètres des formes d'onde*, s'applique uniquement à la *forme d'onde mesurée*. Les *formes d'onde corrigées* et les *formes d'onde reconstituées* seront traitées dans une édition ultérieure, mais elles sont présentées brièvement à l'Article 5.

4.2 Paramètres de forme d'onde

Les *paramètres de forme d'onde* sont des valeurs représentant les caractéristiques importantes d'une *forme d'onde*. En règle générale, les *paramètres de forme d'onde* décrivent les caractéristiques remarquables d'une *forme d'onde* qui facilitent la discussion, l'analyse et la comparaison des *formes d'onde*. Ces *paramètres*, ainsi que leurs définitions, sont indiqués dans l'IEC 60469.

Une analyse concernant le calcul des *incertitudes de mesure* pour un ensemble de *paramètres de forme d'onde* extraits d'une *forme d'onde mesurée* sera développée. Par conséquent, des informations sur les exigences de performances relatives à l'application d'une mesure sont données. Les *incertitudes de mesure des paramètres de forme d'onde corrigée* et les incertitudes par échantillon des *formes d'onde corrigées* seront brièvement présentées en 5.2 et 5.3.2, respectivement. Les *incertitudes de mesure des formes d'onde reconstituées* ne seront pas développées, mais ce sujet est brièvement abordé en 5.3.3. Ces *incertitudes de mesure* seront abordées dans une édition ultérieure du présent document. Les effets du transducteur sur le *signal d'entrée* ne sont pas pris en compte.

4.3 Procédé de mesure de forme d'onde

4.3.1 Généralités

Ce procédé est défini en 4.1. Le procédé inclut le matériel, les logiciels, les procédures et l'environnement. Le matériel et les logiciels composent le système de mesure (voir 4.3.2). L'*enregistreur de forme d'onde* est un composant du système de mesure. Il assure l'acquisition, l'enregistrement et, parfois, le traitement de la *forme d'onde*. Le matériel inclut les instruments d'essai (y compris l'*enregistreur de forme d'onde*), les connecteurs, les adaptateurs, les câbles et les autres composants auxiliaires exigés pour procéder aux mesurages.

L'environnement inclut la température, l'humidité et l'environnement électromagnétique, qui ont un impact sur le *procédé de mesure de forme d'onde*. Par exemple, la température et l'humidité peuvent avoir un impact sur les performances des transducteurs et de l'instrumentation d'essai. Par conséquent, le *procédé de mesure de forme d'onde* doit définir de manière normative la plage de conditions de température et d'humidité pour la mesure de forme d'onde. De la même manière, l'environnement électromagnétique peut avoir un impact

sur le *procédé de mesure de forme d'onde*. Certains instruments peuvent être très sensibles à la présence d'énergie électromagnétique de fond ou imprévue, et peuvent donner des relevés erronés si les limites d'exposition sont dépassées. Par conséquent, la compatibilité électromagnétique, en termes de sensibilité au brouillage électromagnétique et de génération du brouillage électromagnétique par les instruments d'essai dans l'espace de mesure, doit être connue et prise en compte dans le développement du *procédé de mesure de forme d'onde*. La susceptibilité et la génération peuvent être rayonnées ou conduites à travers des lignes d'alimentation ou de signaux. La décharge électrostatique (DES) peut également être un problème pour le *procédé de mesure de forme d'onde*, car elle peut endommager ou avoir un impact négatif sur les performances des éléments électroniques. En conséquence, la protection contre les décharges électrostatiques participe au *procédé de mesure de forme d'onde*.

Un *procédé de mesure de forme d'onde* a pour objectif de déterminer l'exactitude définie par l'utilisateur du document, expresse ou implicite, de la valeur d'un ou de plusieurs paramètres d'une *forme d'onde*. La Figure 3 présente les étapes constitutives d'un *procédé de mesure de forme d'onde*. Le processus d'analyse de *forme d'onde* qui s'ensuit, et qui donne les valeurs des *paramètres de forme d'onde*, implique trois processus séquentiels distincts:

- a) le *procédé de mesure de forme d'onde*, qui donne la *forme d'onde*;
- b) l'analyse de la *forme d'onde* pour déterminer la valeur d'un ou de plusieurs paramètres;
- c) une estimation de l'incertitude de la valeur du paramètre de *forme d'onde* ainsi déterminé, par rapport à la valeur du paramètre du signal.

La certitude de similarité entre le *paramètre de forme d'onde* et le *paramètre du signal* dépend de la combinaison qualité/exactitude/validité des deux premières étapes. La qualité, l'exactitude et la validité de la première étape dépendent du système de mesure (voir 4.3.2).

4.3.2 Description générale du système de mesure

Compte tenu du large éventail de dispositifs, d'appareils, d'instruments et de techniques qui peuvent être combinés pratiquement sans limite pour assurer la conversion *signal/forme d'onde*, la présentation de mises en œuvre spécifiques va au-delà du domaine d'application du présent document. Cette présentation relève d'autres normes, documents ou spécifications, qui décrivent ou définissent les caractéristiques ou méthodes de dispositifs, d'appareils, d'instruments ou de techniques spécifiques. Le paragraphe 4.3.2 décrit uniquement certaines de ces caractéristiques communes générales des systèmes de mesure du *signal* qui doivent être prises en compte. Les manuels et notes d'application de l'instrument, fournis par le fabricant, peuvent donner des lignes directrices spécifiques pour l'utilisation dudit instrument dans un système de mesure.

Il existe deux méthodes distinctes d'acquisition de *forme d'onde*: la méthode continue et la méthode par échantillonnage. L'acquisition continue est un processus en temps réel. Il consiste à enregistrer un signal à l'aide d'une certaine forme de mesure continue, qui commence à un certain moment avant l'arrivée du *signal* dans l'*enregistreur de forme d'onde* et se termine à un certain moment après son arrivée. Cela permet de capturer des signaux transitoires non répétitifs et imprévus. La majeure partie, si ce n'est la totalité de l'acquisition de *forme d'onde* en temps réel est assurée dans le cadre d'un processus d'acquisition par échantillonnage. L'acquisition par échantillonnage donne lieu à une discrétisation de l'enregistrement de temps qui génère une *forme d'onde à échantillonnage*. Cela signifie que la *forme d'onde à échantillonnage* est une série de valeurs discrètes (les *échantillons*) se produisant à des *instants* connus, les valeurs de chacun de ces *échantillons* étant proportionnelles au *signal* d'entrée à ces *instants*. Cette proportionnalité est le résultat de l'interaction de l'*enregistreur de forme d'onde* avec le *signal* d'entrée (voir Figure 3). Un processus échantillonné peut être en temps réel ou en temps équivalent. L'échantillonnage en temps réel peut être utilisé avec des *signaux* uniques ou des *signaux* répétitifs. Le signal est échantillonné (voir ci-dessus) et les échantillons assemblés pour créer la *forme d'onde*. L'échantillonnage en temps équivalent exige un *signal* répétitif et cyclo-stationnaire, et une méthode de synchronisation exacte des *formes d'onde* successives avant leur assemblage pour créer la *forme d'onde* acquise. Le temps équivalent se distingue du temps réel en ce

sens que chaque cycle du *signal* d'entrée peut donner une sous-forme d'onde contenant un ou plusieurs *échantillons* (chacun d'eux correspondant à différents instants dans l'*époque de forme d'onde*), les sous-formes d'onde étant concaténées pour donner la *forme d'onde* finale. L'échantillonnage en temps équivalent permet de capturer une *forme d'onde*, alors que l'acquisition en temps réel collecte une quantité insuffisante d'informations en raison du bruit ou d'une réponse en fréquence limitée de l'*enregistreur de forme d'onde* en temps réel. Si le signal est répétitif, en temps réel ou en temps équivalent, l'échantillonnage peut être utilisé pour moyenner plusieurs cycles du signal afin d'améliorer le rapport signal/bruit de la forme d'onde acquise.

L'ensemble du système de mesure utilisé pour procéder à la conversion d'un *signal* en *forme d'onde* peut être approximativement divisé en trois parties: un dispositif de collecte, un transducteur et un *enregistreur de forme d'onde*. Le dispositif de collecte rassemble ou collecte le processus physique qui sous-tend le *signal* et le transmet au transducteur. Il s'agit par exemple, mais sans s'y limiter, de connecteurs d'entrée coaxiaux, de lentilles optiques, d'antennes, de concentrateurs chimiques. Le transducteur (souvent appelé détecteur) convertit l'événement/le signal présent à son entrée en signal qui peut être acquis de manière plus efficace par l'*enregistreur de forme d'onde*. Des exemples de transducteurs sont, mais sans s'y limiter, les détecteurs optiques, les détecteurs de micro-ondes, les détecteurs de particules, les capteurs chimiques, les capteurs acoustiques et sismiques. L'*enregistreur de forme d'onde* acquiert la *forme d'onde* qui est un enregistrement du signal. Des exemples d'*enregistreurs de forme d'onde* sont, mais sans s'y limiter, les oscilloscopes, les systèmes informatiques d'acquisition de données, les multimètres numériques à grande vitesse et les enregistreurs à bande de papier. La *forme d'onde* sera souvent présentée au format numérique, même si d'autres formats (papier pour un enregistreur à bande de papier ou une photographie de l'écran de l'oscilloscope cathodique, par exemple) peuvent exister.

Les éventuelles erreurs et incertitudes qui peuvent apparaître à tous les stades doivent être prises en compte pour déterminer la qualité, l'exactitude et la validité des conclusions tirées à la suite de l'analyse de la forme d'onde. Par exemple, le collecteur peut déformer le signal, le transducteur peut perdre des informations haute fréquence en raison d'une réponse insuffisante, et l'*enregistreur de forme d'onde* peut introduire des erreurs de numérisation.

5 Forme d'onde et corrections de paramètre de forme d'onde

5.1 Généralités

Les *formes d'onde* et/ou les *paramètres des formes d'onde* peuvent être corrigé(e)s, et leurs processus de *correction* peuvent être différents. La *correction de forme d'onde* fait référence à la modification de la valeur de chaque échantillon de la *forme d'onde* en fonction des informations collectées relatives aux performances du système de mesure, alors que la *correction des paramètres des formes d'onde* fait exclusivement référence à la modification des valeurs de *paramètres de forme d'onde* pour lesquelles un étalonnage du système de mesure s'est révélé incorrect (erreur de gain, erreur de décalage, etc.). Les *corrections* doivent uniquement être appliquées lorsque le processus de correction de la *forme d'onde* et/ou de ses valeurs de *paramètres* a été identifié et que le processus de mesure des fonctions de *correction* nécessaires a été développé, ce qui inclut une analyse d'incertitude de ces fonctions et coefficients. La *forme d'onde corrigée* peut révéler des compensations des effets d'erreurs de gain d'amplitude (linéaire et non linéaire), de décalage d'amplitude, de conversion analogique/numérique et de gain de *base de temps*, ainsi que des intervalles d'échantillonnage non uniformes (également appelé intervalles d'échantillonnage non équidistants). Il est à noter que la Formule (3) ne reflète aucun de ces effets.

Tous les *paramètres* sont le résultat d'un algorithme qui peut inclure des calculs numériques, des approximations numériques et des valeurs définies par l'utilisateur. Les valeurs définies par l'utilisateur, par exemple, peuvent être utilisées pour les niveaux d'état (7.2.1.6). L'incertitude d'une valeur définie par l'utilisateur est décrite par l'incertitude de Type B (voir Article 6). Les valeurs étant définies par l'utilisateur, les *degrés de liberté* peuvent être infinis. La plupart des valeurs de *paramètres des formes d'onde* sont le résultat de calculs numériques, et tous les processus numériques associés sont sujets à l'incertitude.

L'approximation numérique (interpolation) est utilisée pour calculer les niveaux de référence en pourcentage (7.2.5), les instants de niveau de référence (7.3.3) et les valeurs d'autres *paramètres des formes d'onde*. Les incertitudes des calculs et approximations numériques sont de Type A si des processus statistiques sont utilisés, et de Type B dans les autres cas.

5.2 Corrections des paramètres des formes d'onde

Les paramètres décrits dans le présent document étant des valeurs scalaires, la *correction des paramètres des formes d'onde* est le résultat de la multiplication ou de l'ajout des corrections apportées aux valeurs de paramètres. En conséquence, des mesures d'étalonnage doivent être réalisées avec le système de mesure afin d'acquérir ces facteurs de correction multiplicatifs et termes de correction additifs. La *correction des paramètres des formes d'onde* consiste, par exemple, à modifier la valeur des *paramètres temporels* (*durée de transition, durée d'impulsion, retard*, etc.) pour une erreur de gain de *base de temps* connue ayant donné lieu à une expansion ou une contraction erronée de l'*époque de forme d'onde*. Un autre exemple consisterait à corriger les *paramètres de niveau* du gain d'amplitude ou de l'erreur de décalage d'un système de mesure connu.

La méthode de correction des erreurs des valeurs de *paramètre des formes d'onde* doit être décrite par l'utilisateur du document, cette description devant inclure la méthode de mesure de l'erreur, la méthode de correction des valeurs de *paramètres des formes d'onde* et les incertitudes de ces deux méthodes. La valeur du *paramètre de forme d'onde corrigée* doit être fournie en valeur nominale avec incertitudes élargies.

5.3 Corrections de forme d'onde et reconstitution de forme d'onde

5.3.1 Généralités

La *correction de forme d'onde* peut donner lieu à une modification de la valeur de chaque *échantillon* d'une *forme d'onde*. Un exemple de *correction de forme d'onde* consiste à modifier les valeurs de *forme d'onde* par déconvolution de la réponse impulsionnelle effective de la gigue du système de mesure. Un autre exemple consiste à corriger les valeurs de *forme d'onde* en raison d'intervalles d'échantillonnage non uniformes. Les corrections de forme d'onde peuvent être en outre divisées en deux catégories générales, à savoir la *correction* incrémentielle ou échantillon par échantillon et la *correction* de l'ensemble de la *forme d'onde*. Les *corrections* échantillon par échantillon sont souvent mises en œuvre par des méthodes d'interpolation, les *corrections* de l'ensemble de la *forme d'onde* l'étant par *reconstitution de forme d'onde*.

5.3.2 Correction échantillon par échantillon

5.3.2.1 Généralités

La forme d'onde est un enregistrement à amplitude discrète/à temps discret. Les corrections échantillon par échantillon peuvent être appliquées en cas d'erreurs dans ce processus de discrétisation. Par exemple, en raison des équipements électroniques numériques utilisés dans le circuit de base de temps, les intervalles d'échantillonnage à temps discret ne sont probablement pas uniformes sur l'ensemble de l'époque de forme d'onde. De la même manière, les valeurs de l'amplitude discrétisée acquises par le convertisseur analogique/numérique (CAN) de l'enregistreur de forme d'onde ne sont pas équitablement incrémentées sur la plage de l'amplitude du signal.

5.3.2.2 Erreurs de base de temps

Les méthodes de mesure des erreurs de discrétisation temporelle de la *base de temps* de l'*enregistreur de forme d'onde* sont décrites dans l'IEEE Std. 1057-2007, 4.6 et 12.1. Une mesure des erreurs de *base de temps* donne un vecteur erreur temporelle/temps. Les valeurs d'*amplitude* de la *forme d'onde* peuvent être corrigées à l'aide de ce vecteur (par interpolation, par exemple). La méthode de correction des erreurs des valeurs de *forme d'onde* faisant suite à des erreurs de *base de temps* doit être décrite par l'utilisateur du document, cette

description devant inclure la méthode de mesure d'erreur de *base de temps*, la méthode de *correction* des valeurs de *forme d'onde* et les *incertitudes* de ces deux méthodes. L'*amplitude* de la *forme d'onde corrigée* obtenue doit être présentée sous la forme de valeurs nominales avec *incertitudes élargies*, chaque échantillon pouvant avoir une *incertitude élargie* différente. Les *instants* d'échantillonnage, après correction, doivent être définis comme étant uniformes. Toutefois, il existe une incertitude liée à la valeur de chaque instant d'échantillon, et l'*incertitude élargie* correspondante de chaque *instant* d'échantillon doit être indiquée.

5.3.2.3 Erreurs du convertisseur CAN

Les méthodes de mesure des erreurs du convertisseur CAN de l'*enregistreur de forme d'onde* sont décrites dans l'IEEE Std. 1057-2007, 4.7. Une mesure des erreurs du convertisseur CAN donne une erreur d'amplitude en fonction du vecteur d'amplitude. Les valeurs d'*amplitude* de la *forme d'onde* peuvent être corrigées à l'aide de ce vecteur (par interpolation, par exemple). La méthode de correction des erreurs des valeurs de *forme d'onde* faisant suite à des erreurs du convertisseur CAN doit être décrite par l'utilisateur du document, cette description devant inclure la méthode de mesure d'erreur du convertisseur CAN, la méthode de *correction* des valeurs de *forme d'onde* et les incertitudes de ces deux méthodes. L'*amplitude* de la *forme d'onde corrigée* obtenue doit être présentée sous la forme de valeurs nominales avec incertitudes élargies, chaque échantillon pouvant avoir une incertitude élargie différente.

5.3.3 Correction de l'ensemble de la forme d'onde

En règle générale, la *forme d'onde* ne représente pas exactement le *signal* d'entrée, $x(t)$, en raison de l'interaction du système de mesure avec le *signal*. Cette interaction peut être décrite de manière mathématique comme 1) une convolution de $x(t)$ avec la réponse impulsionnelle de l'instrument (ou du système de mesure), donnée par $h(t)$, afin d'obtenir un *signal* de convolution $y(t)$, et 2) une corrélation subséquente de $y(t)$ avec l'ouverture d'échantillonnage, $w(t)$, afin de donner une représentation à temps continu, $f(t)$, de $x(t)$. La convolution, $y(t)$, de deux fonctions à temps continu, $x(t)$ et $h(t)$, est définie comme suit:

$$y(\tau) = \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t)h(\tau - t)dt \equiv x(t) * h(t) \quad (4)$$

où τ est le *retard* entre $x(t)$ et $h(t)$, dt est le différentiel de la variable t et où le symbole "*" indique une convolution. La corrélation de $y(t)$ avec $w(t)$ est décrite par:

$$f(\tau) = \int_{t=-\infty}^{\infty} y(t)w(\tau + t)dt \equiv y(t) \otimes w(t) \quad (5)$$

où le symbole " $\otimes$ " indique une corrélation. $w(t)$ peut être inclus dans $h(t)$ s'il est réalisé correctement (noter la différence de signe dans les intégrales). La convolution est commutative, et donc $x(t) * h(t) = h(t) * x(t)$, alors que la corrélation ne l'est pas (l'ordre change la phase du résultat). Les deux opérations mathématiques peuvent être étendues sur plusieurs variables. Dans le domaine de fréquence, la convolution de deux fonctions est proportionnelle au produit de leurs transformées individuelles, en d'autres termes:

$$FT \left\{ \int_{t=-\infty}^{\infty} x(t)h(\tau - t)dt \right\} = X(\omega)H(\omega) = F(\omega) \quad (6)$$

où ω est la fréquence angulaire, FT indique la transformée de fréquence, $F(\omega)$ et $H(\omega)$ sont les spectres complexes de $f(t)$ et $h(t)$, et $w(t)$ est ici implicitement inclus dans $h(t)$. La transformée de Fourier est la transformée de fréquence la plus souvent utilisée.

$h(t)$ peut être décrit comme étant la convolution de plusieurs réponses, comme la réponse impulsionnelle de l'instrument convolué avec une fonction gaussienne représentant la distribution statistique de la gigue, et peut inclure la corrélation de l'ouverture d'échantillonnage $w(t)$. Ce $h(t)$ peut être considéré comme étant la réponse du système de mesure à un signal d'entrée idéal décrit par l'impulsion de Dirac $\delta(t)$ (où $\delta(t=0) = 1$, $\delta(t \neq 0) = 0$), en d'autres termes:

$$h(t) = \delta(t) * h(t) \quad (7)$$

Pour obtenir une représentation plus précise de $x(t)$ que ne peut donner $f(t)$, soit un système de mesure dont $h(t)$ s'approche de $\delta(t)$ comparé à $x(t)$ (en d'autres termes $f(t) = h(t) \otimes x(t) \approx x(t)$) doit être utilisé, soit les effets de $h(t)$ sur $f(t)$ doivent être éliminés. Le processus d'élimination de $h(t)$ de $f(t)$ pour obtenir une représentation plus précise de $x(t)$ est appelé *reconstitution de forme d'onde* (souvent appelée *déconvolution*). La plupart des méthodes de *reconstitution de forme d'onde* utilisent la représentation du domaine de fréquence car le procédé consiste simplement à diviser le spectre:

$$X(\omega) \approx X'(\omega) = \frac{F(\omega)}{H(\omega)}. \quad (8)$$

Le symbole " $\approx$ " est utilisé car, dans un véritable système de mesure, le bruit d'amplitude, la gigue de déclencheur et les *incertitudes* dans $h(t)$ ne permettront pas d'égalité entre $X(\omega)$ et $X'(\omega)$, ce qui, de ce fait, soulèvera le problème de la présence de deux inconnues, $h(t)$ et $x(t)$ pour une seule équation. Ce problème est le plus souvent résolu par des *reconstructions de formes d'onde* régularisées donnant la *forme d'onde reconstituée*. Les *incertitudes* associées à la *reconstitution de forme d'onde* ne sont pas prises en compte dans la présente édition du document.

6 Incertitudes

6.1 Généralités

Une analyse d'*incertitude de mesure* offre deux fonctions distinctes: l'une est métrologique et l'autre liée à la conception du système de mesure. L'aspect métrologique de l'analyse d'incertitude donne des informations relatives à la plage de valeurs possibles qu'un *paramètre* pourrait afficher dans une forme d'onde, selon une probabilité donnée. Cela s'avère utile d'avoir confiance en la valeur du *mesurande*, pour des comparaisons entre laboratoires et pour vérification et validation des performances d'un système de mesure. Dans le cadre d'une conception du système de mesure, une partie de l'analyse d'incertitude inclut ce qu'il convient d'appeler une analyse de sensibilité. L'analyse de sensibilité présente l'avantage de faciliter la conception et le développement des systèmes de mesure. Par exemple, s'il existe plusieurs façons de procéder à une mesure, une analyse de sensibilité rigoureuse permet de déterminer laquelle offre l'*incertitude de mesure* la moins importante.

En règle générale, l'*incertitude de mesure* est composée de nombreux éléments essentiels. Conformément au Guide ISO/IEC 98-3 et au Guide ISO/IEC 99, chaque élément d'*incertitude de mesure* peut être classé en incertitude de Type A ou de Type B. L'élément d'*incertitude de mesure* de Type A est évalué par l'analyse statistique des séries de mesures, et se caractérise par un écart-type expérimental, donnant lieu à une *incertitude-type*. En règle générale, cet écart-type peut diminuer en augmentant le nombre de mesures. L'élément d'*incertitude de mesure* de Type B est évalué par d'autres moyens que l'analyse statistique des séries de mesures en s'appuyant, par exemple, sur l'expérience ou sur d'autres informations. Les *incertitudes de mesure* de Type B sont en général liées aux instruments de mesure (il s'agit alors d'*incertitudes de mesure instrumentales*) et sont souvent indiquées par le fabricant ou l'étalonneur de l'instrument. Les *incertitudes-type* de chacune des grandeurs d'entrée d'un *modèle de mesure* donné sont par la suite combinées pour donner l'*incertitude type composée* pour le *mesurande*. L'incertitude souhaitée est l'*incertitude élargie* du

mesurande. Elle est obtenue en multipliant l'*incertitude-type composée* par un *facteur d'élargissement* afin d'obtenir l'*intervalle de confiance* souhaité.

6.2 Propagation des incertitudes

6.2.1 Généralités

La propagation des *incertitudes-types* des estimations d'entrée $x_1, x_2, \dots, x_n$ par rapport à l'*incertitude-type composée* de l'estimation de sortie y exige de connaître le *modèle de mesure*, f , qui peut être utilisé pour calculer l'estimation de sortie y en partant des estimations d'entrée

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

En règle générale, f peut être une fonction linéaire ou non linéaire. Pour la propagation d'incertitude par f , il existe deux approches différentes (voir le JCGM 101). Il est possible d'utiliser des simulations de Monte-Carlo ou d'étendre f avec une série de Taylor et d'utiliser, en fonction de la non-linéarité de f , un certain nombre de termes de l'expansion en série de Taylor pour la propagation d'incertitude. Le présent document porte sur la propagation d'incertitude par linéarisation de f et, par conséquent, tient compte de l'approximation de la série de Taylor de premier ordre du modèle de mesure $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. De plus, une notation scalaire sera utilisée car, comme indiqué dans le présent document, les paramètres $y, x_1, x_2, \dots, x_n$ sont des grandeurs à une variable. Il convient de noter qu'une notation similaire reposant sur des vecteurs et des matrices peut être utilisée pour la propagation d'incertitude de grandeurs à plusieurs variables (voir le JCGM 102), qui sera nécessaire pour traiter les incertitudes par échantillon. Les méthodes de Monte-Carlo permettant d'estimer l'incertitude de mesure dans les paramètres des formes d'onde sont présentées à l'Article 8.

6.2.2 Grandeurs d'entrée non corrélées

Si les estimations d'entrée $x_1, x_2, \dots, x_n$ ne sont pas corrélées ou qu'elles sont indépendantes les unes des autres, l'*incertitude-type composée* $u_c(y)$ est obtenue à partir des *incertitudes-type* des estimations d'entrée $u(x_i); i = 1, 2, \dots, n$ à l'aide de

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (10)$$

Les dérivées partielles $\frac{df}{dx_i} = c_i$ sont également appelées coefficients de sensibilité. Elles décrivent la manière dont l'estimation de sortie y varie en fonction de la variation de x_i .

6.2.3 Grandeurs d'entrée corrélées

Si les estimations d'entrée sont corrélées ou si elles dépendent les unes des autres, les corrélations doivent être prises en compte pour le calcul de l'*incertitude type composée*

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} \right) u(x_i, x_j) \quad (11)$$

où $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ est la covariance estimée associée aux estimations x_i et x_j . En règle générale, la covariance entre deux estimations x_i et x_j est calculée à partir de m paires indépendantes d'observations simultanées des *mesurandes* correspondants X_i et X_j .

$$u(x_i, x_j) = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m (X_{i,k} - x_i)(X_{j,k} - x_j) \quad (12)$$

Dans la Formule (12), l'hypothèse retenue est que le *mesurande* présente une loi normale et une *incertitude de mesure* de Type A. Si les *mesurandes* correspondants présentent une incertitude de mesure (systématique) de Type B, la covariance doit être évaluée et combinée (ajoutée) en conséquence. La covariance doit faire l'objet d'une évaluation de Type B en fonction de l'expérience et des connaissances techniques (expertise), à partir de données totalisées, par exemple.

6.3 Données totalisées et ses écarts-types

Les données totalisées et l'écart-type cumulé (voir le Guide ISO/IEC 98-3) offrent un moyen de pouvoir estimer avec une plus grande confiance l'incertitude d'un *mesurande*, qui a été préalablement mesurée et pour laquelle une valeur moyenne a été obtenue à chaque instance. Ci-après, les données totalisées seront celles des valeurs de paramètres décrivant un artefact d'étalonnage ou des valeurs de facteurs intermédiaires utilisés dans le calcul de la valeur du *mesurande*. Si une valeur de *paramètre* diminue ou augmente de manière monotone avec le temps, l'utilisation d'une moyenne et d'un écart-type non corrigés des données totalisées pour ce *paramètre* peut introduire des erreurs dans la valeur du *mesurande* et de son *incertitude*. Une méthode commune de collecte de données totalisées et d'obtention d'un écart-type cumulé consiste à utiliser une carte de contrôle. Les cartes de contrôle sont des outils statistiques utilisés pour afficher la variation dans le temps du *paramètre* choisi (voir l'ISO 7870-1). Par exemple, un écart-type cumulé peut être utilisé lorsqu'un artefact d'étalonnage est mesuré pendant chaque mesure, et sur l'ensemble d'entre elles, du dispositif d'un client. La mesure de l'artefact d'étalonnage donne un paramètre, g , qui est utilisé dans le cadre du calcul des mesures de performances du dispositif du client. Pour chaque instance de mesure du dispositif d'un client, g est également mesuré, et pour chacune de ces instances, la valeur moyenne de g peut être calculée:

$$\bar{g} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M g_i, \quad (13)$$

où $\bar{g}$ est la valeur moyenne de g_i ($i = 1, \dots, M$), qui sont les valeurs de g calculées à partir de chacune des i^{e} mesures de l'artefact d'étalonnage, et où M est le nombre de ces mesures. $\bar{g}$ serait utilisé dans le calcul de la valeur du *paramètre* décrivant le dispositif du client. L'*incertitude-type*, σ_g^- , associée à $\bar{g}$ (également appelée incertitude de la moyenne) est calculée à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$\sigma_g^- = \frac{s_g}{\sqrt{M}}, \quad (14)$$

où s_g est l'écart-type de l'échantillon, donné par:

$$s_g = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (g_i - \bar{g})^2} \quad (15)$$

L'*incertitude élargie* correspondante, U_g^- , est égale à σ_g^- multiplié par un *facteur d'élargissement*, qui est un centile de la loi de t avec des *degrés de liberté*, ν (en l'occurrence, $\nu = M - 1$). D'autre part, si la valeur de g utilisée pour calculer le *paramètre* du dispositif du client repose sur les données totalisées, la moyenne de $\bar{g}$ peut être utilisée et décrite par:

$$\bar{g} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{g}_j \quad (16)$$

où $\bar{g}_j$, ($j = 1, \dots, N$), est la moyenne du j^{e} ensemble de données de mesure, contenant chacun M_j mesures de $g_{i,j}$ ($i = 1, \dots, M_j$), en d'autres termes,

$$\bar{g}_j = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} g_{i,j}, \quad (17)$$

et repose donc sur toutes les valeurs disponibles de g , et où N est le nombre de mesures indépendantes de $\bar{g}_j$. Dans ce cas, l'*incertitude-type* liée à $\bar{g}$ peut être calculée par:

$$\sigma_g^- = \frac{1}{\sqrt{N}} s_g, \quad (18)$$

où

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N s_{g_j}^2 (M_j - 1)}{\sum_{j=1}^N M_j - N}} \quad (19)$$

et s_{g_j} est l'écart-type de l'échantillon reposant sur la j^{e} donnée de mesure, en d'autres termes,

$$s_{g_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M_j} (g_{i,j} - \bar{g}_j)^2}{M_j - 1}} \quad (20)$$

L'*incertitude élargie* correspondante, $U_g^=$, est égale à $\sigma_g^=$ multiplié par un *facteur d'élargissement*, qui est un centile de la loi de t avec des *degrés de liberté*, ν , et dans ce cas $\nu = \sum_{j=1}^N M_j - N$.

En particulier, si $M_j = M$, alors

$$s_g = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (g_{i,j} - \bar{g}_j)^2}{N(M-1)}} \quad (21)$$

$$\sigma_g = \frac{s_g}{\sqrt{N}} \quad (22)$$

et

$$\nu = N(M-1) \quad (23)$$

6.4 Incertitude élargie et facteur d'élargissement

6.4.1 Généralités

Pour obtenir l'*incertitude élargie* U_p , l'*incertitude-type composée* est multipliée par un *facteur d'élargissement* k_p : $U_p = k_p u_c(y)$. La valeur de ce *facteur d'élargissement* dépend des *degrés de liberté* et de la loi de probabilité du résultat de mesure pour chacune des grandeurs d'entrée données. L'utilisateur du présent document choisit la valeur de k_p en fonction du niveau de confiance qu'il souhaite accorder aux résultats de mesure. Le Tableau 1 présente la valeur de k_p qui englobe la fraction p de la loi de t pour différents *degrés de liberté*.

L'incertitude de mesure d'un mesurande est souvent composée de contributions des incertitudes de plusieurs paramètres. Dans ce cas, le Guide ISO/IEC 98-3 recommande d'utiliser la formule de Welch-Satterthwaite (voir 6.4.2), puis d'utiliser les *degrés de liberté* efficaces calculés à partir de cette formule pour obtenir un *facteur d'élargissement*. Ce *facteur d'élargissement* sera multiplié pour l'*incertitude-type composée* afin de donner l'*incertitude élargie*. Si l'utilisateur du présent document choisit de ne pas utiliser la formule de Welch-Satterthwaite, il doit le justifier et décrire le processus utilisé.

Tableau 1 – Valeur du facteur d'élargissement k_p qui englobe la fraction p de la loi de t pour différents degrés de liberté (du Guide ISO/IEC 98-3)

Degrés de liberté ν	Fraction p en pourcentage					
	68,27 ^a	90	95	95,45 ^a	99	99,73 ^a
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20

Degrés de liberté ν	Fraction p en pourcentage					
	68,27 ^a	90	95	95,45 ^a	99	99,73 ^a
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

^a Pour une grandeur z décrite par la loi normale d'espérance mathématique μ_z et l'écart-type σ , l'intervalle $\mu_z \pm k_p \sigma$ comprend respectivement $p = 68,27 \%$, $95,45 \%$ et $99,73 \%$ de la distribution pour $k_p = 1, 2$ et 3 .

Dans certains cas, le théorème central limite peut être utilisé pour calculer l'*incertitude élargie*. Le théorème central limite énonce que la loi de Y avec $Y = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n$ sera approximativement normale si les X_i sont indépendants et si $\sigma^2(Y)$ est beaucoup plus grand qu'une composante simple $c_i^2 \sigma^2(X_i)$. Cela implique que la loi de probabilité de Y approche la loi normale au fur et à mesure que le nombre de grandeurs d'entrée contribuant à l'écart-type de Y augmente. En conséquence, une première approximation raisonnable pour le calcul d'une *incertitude élargie* $U_p = k_p u_c(y)$ consiste à utiliser une valeur issue de la loi normale pour k_p .

Le présent document donne des informations relatives au calcul de l'*incertitude élargie* pour un *paramètre des formes d'onde* donné. De plus, il donne des informations relatives aux *degrés de liberté* correspondant au *paramètre des formes d'onde* donné, qui sont nécessaires au calcul de l'*incertitude élargie* correspondant à d'autres *paramètres des formes d'onde* qui en dépendent.

6.4.2 Degrés de liberté efficaces

Les *degrés de liberté* efficaces sont utilisés pour obtenir une approximation des *degrés de liberté* d'un ensemble de valeurs différentes (chacune obtenue dans le cadre d'un mesurage indépendant) qui sont utilisées pour calculer la valeur d'un *mesurande*. Il convient d'utiliser la formule de Welch-Satterthwaite pour calculer les *degrés de liberté* efficaces à partir desquels le *facteur d'élargissement* peut être déterminé. La formule de Welch-Satterthwaite est la suivante:

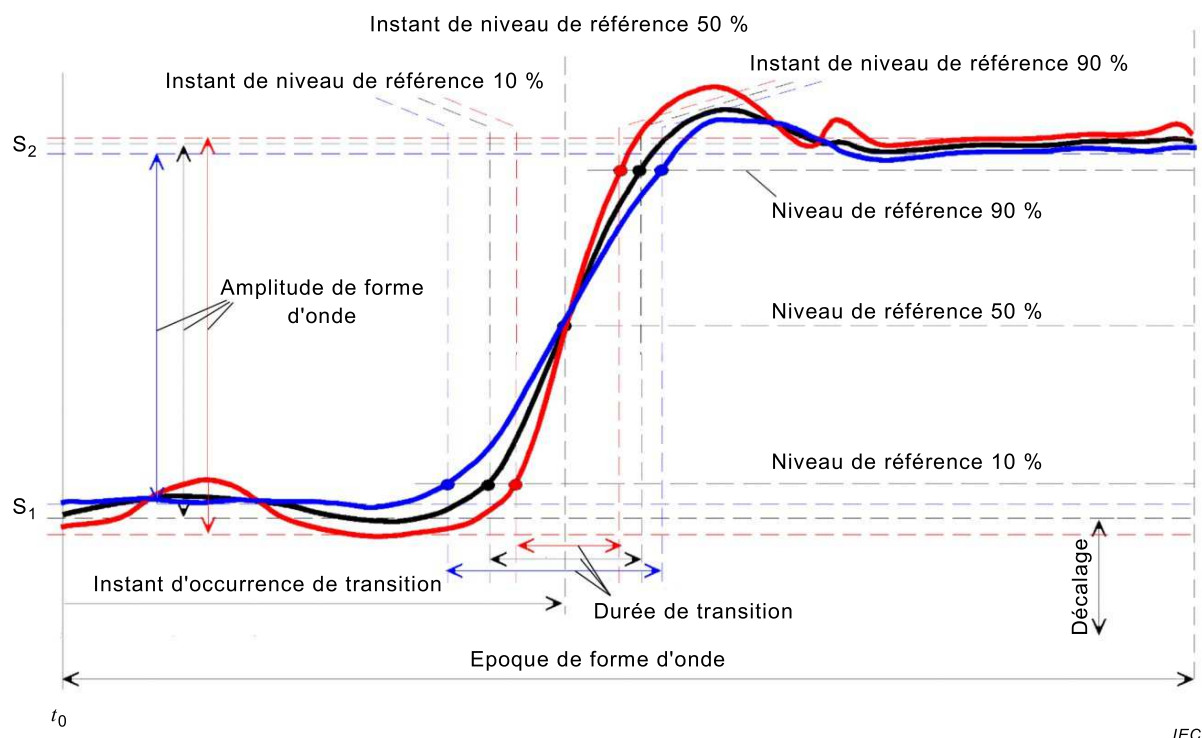
$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{v_i}}, \quad (24)$$

où $c_i \equiv \partial y / \partial x_i$ sont les coefficients de sensibilité et v_i les degrés de liberté associés à l'estimation d'entrée x_i .

6.5 Incertitudes de l'ensemble de la forme d'onde

Une analyse d'*incertitude* par échantillon, c'est-à-dire lorsque les *incertitudes* sont calculées pour chaque *échantillon de forme d'onde*, sera également le sujet d'une prochaine édition. Dans une *incertitude* par échantillon, chaque *échantillon de forme d'onde* fait l'objet d'*incertitudes* dues aux contributions de l'*amplitude* et de la *base de temps*, chacune d'elles

pouvant être stochastiques (le bruit et la gigue, par exemple) et/ou déterministes (le gain et la discrétisation, par exemple). Des exemples de processus d'*amplitude* et de *base de temps* qui peuvent introduire des *incertitudes* sont, mais sans s'y limiter, les erreurs de numérisation, les erreurs de décalage, les erreurs de gain et les *instants d'échantillonnage* non uniformes. Il revient à l'utilisateur du présent document d'identifier les processus qui contribuent à une *incertitude de mesure* par échantillon, puis de quantifier ces contributions (objet d'une prochaine édition). Ces processus donnent lieu à une région d'*incertitude* elliptique autour de chaque *échantillon de forme d'onde*. Cette région peut être différente pour chaque *échantillon de forme d'onde*.



NOTE La courbe noire représente la forme d'onde nominale ou prévue qui est obtenue à partir d'un signal spécifique mesuré à l'aide d'un ensemble particulier d'instruments qui peuvent être décrits en fonction de leurs bande passante et gain d'amplitude, ayant chacun une valeur nominale. La courbe rouge représente une forme d'onde obtenue avec le même ensemble particulier d'instruments, mais donnant une bande passante et un gain d'amplitude plus importants que ceux des instruments à exécution nominale, donnant par conséquent la forme d'onde au gain et à la bande passante les plus élevés. La courbe bleue représente une forme d'onde obtenue avec le même ensemble particulier d'instruments, mais donnant une bande passante et un gain d'amplitude plus bas que ceux des instruments à exécution nominale, donnant par conséquent la forme d'onde au gain et à la bande passante les plus bas.

Figure 4 – Exemple de frontières de forme d'onde se concentrant sur les trajectoires ayant un impact sur les mesures de paramètre d'impulsion

Une incertitude par échantillon, si elle est déterminée pour l'ensemble de la forme d'onde, fournit les limites supérieure et inférieure pour la forme d'onde. Si les corrélations entre chaque échantillon de forme d'onde sont négligées, ces limites permettront toutes les trajectoires de signal possibles, une trajectoire se trouvant dans ces limites ou frontières étant admise, sauf si d'autres contraintes sont appliquées. Par conséquent, ces limites ou frontières peuvent ne pas être utiles pour calculer les incertitudes des paramètres des formes d'onde. Pour une meilleure estimation des frontières de forme d'onde, il serait nécessaire de paramétrer le signal qui pourrait avoir été entré dans l'enregistreur de forme d'onde, ainsi que la réponse impulsionnelle de l'ensemble d'instruments utilisé pour obtenir la forme d'onde mesurée. Cette procédure de paramétrage exige un modèle de mesure tenant compte des processus ayant un impact sur la forme d'onde, et qui pourraient inclure les processus étant fonction du temps et ceux qui ne le sont pas. Les incertitudes de ces paramètres donneraient alors des informations relatives aux trajectoires possibles de la forme d'onde mesurée. Il convient que les limites de ces trajectoires de forme d'onde encadrent les formes d'onde possibles qui pourraient avoir été acquises d'un signal spécifique par un ensemble particulier

d'instruments définis par l'utilisateur. Une forme d'onde nominale et ses frontières sont présentées à la Figure 4 (lorsque la réponse de l'instrument de mesure est paramétrée selon son gain d'amplitude et sa largeur de bande de fréquences, par exemple).

Les erreurs à différents *instants* dans la *forme d'onde* résultant des effets décrits ci-dessus peuvent également être corrélées. Le traitement complet de ces corrélations exige d'utiliser les techniques de Monte-Carlo ou des techniques reposant sur une matrice de covariance (voir JCGM 101 et JCGM 102, respectivement).

7 Incertitudes des paramètres des formes d'onde

7.1 Généralités

L'Article 7 contient les paramètres dont les *incertitudes* seront calculées. Une liste de paramètres définis et/ou dont les algorithmes de calculs sont présentés dans l'IEC 60469 est présentée ci-après. Les paramètres sont regroupés en paramètres d'*amplitude* et paramètres temporels. Les paramètres d'*amplitude* sont décrits en premier car ils sont utilisés dans le calcul subséquent de la plupart des paramètres temporels.

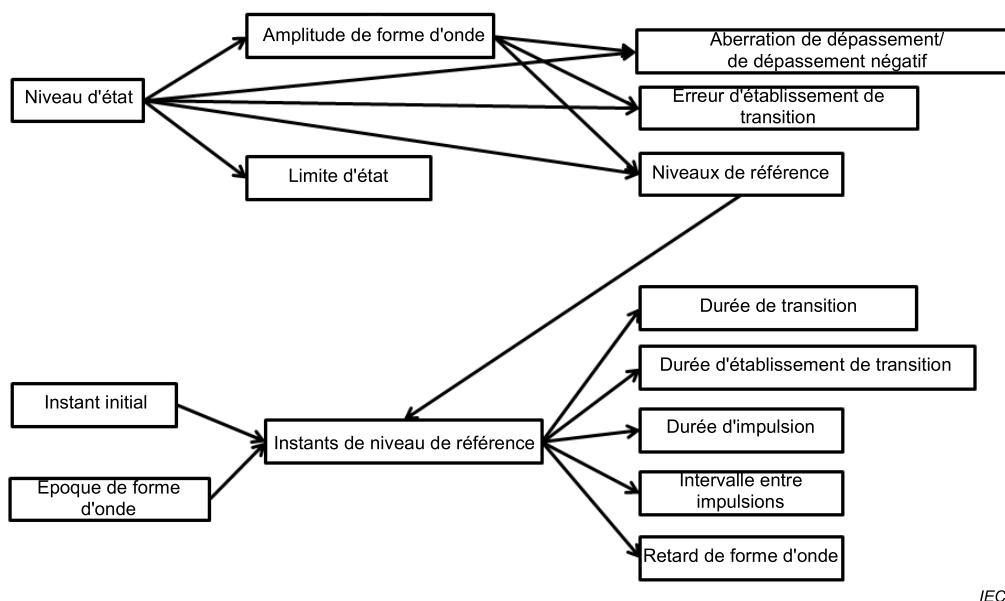
L'utilisateur du présent document doit donner les informations détaillées relatives à la méthode et l'instrumentation utilisées pour acquérir une *forme d'onde*. Ces informations doivent inclure une description du système de mesure, avec un schéma détaillé présentant les connexions et types de connexions (type de connecteur, type et longueur de câble, etc.), ainsi que les détails relatifs aux spécifications de performances de l'instrument. L'utilisateur doit fournir une description des méthodes de calcul utilisées pour obtenir les valeurs de *paramètres des formes d'onde*, si elles sont différentes de celles données dans l'IEC 60469. L'utilisateur doit consigner une valeur pour le *paramètre des formes d'onde*, y compris une *incertitude de mesure* pour chaque *paramètre*, le type d'incertitude et les degrés de liberté.

Le calcul des valeurs de *paramètres des formes d'onde* et de leurs *incertitudes de mesure* repose sur l'analyse de ces *formes d'onde*. La fidélité des *formes d'onde mesurées* par rapport à celles fournies par le dispositif en essai (*signal* de sortie d'un générateur d'impulsions ou réponse impulsionnelle/à un échelon de l'instrument de mesure faisant suite à un *signal* d'entrée connu) dépend des caractéristiques du système de mesure, qui peut inclure des générateurs d'impulsions et des *enregistreurs de forme d'onde*. Pour améliorer l'exactitude de l'estimation des *paramètres des formes d'onde* qui décrit les performances du dispositif en essai, les *formes d'onde mesurées* sont souvent corrigées pour les erreurs statiques et les erreurs de numérisation du gain et de la base de temps. Ces *formes d'onde corrigées* offrent une meilleure représentation de la fidélité des performances du dispositif en essai que les *formes d'onde mesurées*. Si l'analyse d'incertitude est correctement réalisée et si le système de mesure est correctement conçu, il convient que les *incertitudes de mesure* de la *forme d'onde corrigée* et ses *paramètres* soient inférieures à celles d'une *forme d'onde mesurée* et ses *paramètres*, compte tenu des informations supplémentaires utilisées pour améliorer l'estimation. Toutefois, l'analyse d'incertitude de la *forme d'onde corrigée* contiendra plus de variables que celle de la *forme d'onde mesurée*. De manière analogue, une *forme d'onde reconstituée* offrira une représentation plus exacte des performances du dispositif en essai que ne le ferait une *forme d'onde corrigée*, cette amélioration impliquant cependant une plus grande complexité dans le traitement de la *forme d'onde* et un nombre de variables moins important à prendre en compte dans cette analyse d'incertitude.

La plupart des *paramètres des formes d'onde* sont calculés à partir des *paramètres des formes d'onde* fondamentaux (voir Figure 5). Les *paramètres des formes d'onde* fondamentaux sont le *niveau d'état*, l'*instant initial* et l'*époque de forme d'onde*. L'hypothèse retenue est que n'importe quelle valeur est peut être attribuée à l'*instant initial*, sauf lorsqu'au moins deux *formes d'onde* sont utilisées pour calculer un *paramètre des formes d'onde* temporel. L'*incertitude de mesure* dans l'*époque de forme d'onde* équivaut à une *incertitude de mesure* dans l'*intervalle* d'échantillonnage, grâce à la formule ci-dessous:

$$D_E = N\Delta t, \quad (25)$$

où D_E est l'époque de forme d'onde, Δt est l'intervalle d'échantillonnage, et N le nombre d'échantillons. L'élément Δt de la Formule (25) implique que l'intervalle d'échantillonnage est le même pour chacun des N échantillons de la forme d'onde. En règle générale, ce n'est pas le cas. Par conséquent, l'utilisateur du présent document a deux possibilités de calcul de l'incertitude de mesure dans D_E . Une possibilité consiste à faire reposer cette incertitude de mesure sur les variations d'une seule valeur de Δt , l'autre possibilité consistant à la faire reposer sur les variations de N valeurs différentes possibles de Δt , une valeur unique de Δt pour chacun des N échantillons uniques dans la forme d'onde.



IEC

Figure 5 – Relations entre les paramètres des formes d'onde choisis

Les signaux présentés à un enregistreur de forme d'onde peuvent être des signaux périodiques non répétitifs (également appelés signaux transitoires ou "uniques") ou répétitifs. Si le signal n'est pas répétitif, la forme d'onde mesurée ne sera pas moyennée (forme d'onde en balayage unique). Si le signal est répétitif, la forme d'onde mesurée sera moyennée (forme d'onde moyennée). Dans tous les cas, plusieurs possibilités s'offrent à l'utilisateur du document pour acquérir une forme d'onde ou un ensemble de formes d'onde, en moyennant l'ensemble de formes d'onde, et en calculant les paramètres des formes d'onde pour une forme d'onde moyennée et une forme d'onde non moyennée. En règle générale, ces possibilités sont:

- Calculer la moyenne d'un ensemble de formes d'onde, puis les paramètres des formes d'onde de cette forme d'onde moyennée, et enfin l'incertitude de mesure des paramètres des formes d'onde,
- Répéter le calcul des paramètres des formes d'onde d'un ensemble de formes d'onde moyennées ou non moyennées, qui fournit un ensemble de paramètres des formes d'onde, puis calculer la valeur moyenne de cet ensemble de paramètres des formes d'onde. Enfin, calculer l'incertitude de mesure des paramètres des formes d'onde.

7.2 Paramètres d'amplitude

7.2.1 Niveaux d'état

7.2.1.1 Généralités

Le niveau d'état, dont la valeur est appelée $niveau(s_i)$, où " s_i " est le i^e état, est le paramètre des formes d'onde le plus fondamental. Il s'agit de la base de calcul, directe ou indirecte, de

tous les paramètres d'amplitude et de la plupart des paramètres temporels. Le *niveau d'état* dispose d'une variété de méthodes de calcul ou d'évaluation de sa valeur (voir IEC 60469:2013, 5.2). Chacune de ces méthodes manifeste une *incertitude de mesure* différente, décrite ici et que le Tableau 2 récapitule brièvement.

Tableau 2 – Différentes méthodes de détermination des niveaux d'état donnés dans l'IEC 60469, et de leur type d'incertitude et méthode de calcul

Méthode	Paragraphe de l'IEC 60469:2013	Type d'incertitude	Méthode de calcul	Degrés de liberté
Histogramme	5.2.2	A	Voir 7.2.1.2.	∞
Estimateur shorth	5.2.3	A	Voir 7.2.1.3.	Non applicable
Niveau de crête	5.2.4.1	A	Bruit de signal (valeur efficace). Voir 7.2.1.4	Selon le nombre de valeurs de niveau de <i>crête</i> utilisées pour calculer <i>niveau(s_i)</i>
<i>Instant initial (final)</i>	5.2.4.2	A	Bruit de signal (valeur efficace). Voir 7.2.1.5	Selon le nombre de valeurs d' <i>instant initial (final)</i> utilisées pour calculer <i>niveau(s_i)</i>
Valeurs définies par l'utilisateur	5.2.4.3	B	Définie par l'utilisateur (voir 7.2.1.6)	Selon le nombre de valeurs définies par l'utilisateur utilisées pour calculer <i>niveau(s_i)</i>
Autres époques	5.2.4.4	Selon la méthode utilisée pour déterminer le <i>niveau d'état</i> dans d'autres époques	Selon la méthode utilisée pour déterminer le <i>niveau d'état</i> dans d'autres époques	Selon la méthode utilisée pour déterminer le <i>niveau d'état</i> dans d'autres époques
Niveaux statiques	5.2.4.5	A	Voir 7.2.1.7	Selon le nombre de valeurs de <i>niveau</i> statiques utilisées pour calculer <i>niveau(s_i)</i>
NOTE Le type d'incertitude présenté dans le tableau est classique, mais il peut être de Type A ou de Type B, selon le procédé de mesure classique choisi par l'utilisateur du présent document.				

7.2.1.2 Incertitude dans le niveau d'état, méthode de l'histogramme utilisant le mode

L'*incertitude de mesure*, u_{s_i} , dans les *niveaux d'état* utilisant la méthode de l'histogramme dépend des paramètres utilisés par l'utilisateur du présent document pour créer l'histogramme. Le Paragraphe 7.2.1.2 considère uniquement le mode de l'histogramme et pas la moyenne, cette dernière pouvant être plus précisément calculée à partir des valeurs de *forme d'onde* associées à chaque *niveau d'état*.

Le *niveau(s_i)* est donné par:

$$\text{niveau}(s_i) = A_{\text{low},i} + \frac{A_{\text{bin}}}{2} \quad (26)$$

où

A_{bin} est la largeur de l'intervalle

$A_{\text{low},i}$ est la limite inférieure de l'intervalle i^{e} et fait office de valeur de référence pour cet intervalle, qui est l'intervalle de mode correspondant à *niveau(s_i)*.

Il convient de noter que ces histogrammes sont une représentation des données regroupées en intervalles discrets, un intervalle étant en général référencé sous la forme d'un indice entier. Cet indice est une représentation simplifiée de la plage d'amplitudes réelle d'un intervalle donné. Dans la Formule (26), la limite inférieure de cette plage fait office de

référence de l'intervalle. La limite supérieure ou une valeur intermédiaire de l'intervalle i^e pourrait également être utilisée comme référence pour l'intervalle i^e à la place de $A_{low,i}$, auquel cas la Formule (26) serait ajustée en conséquence. Les plages d'intervalles peuvent être définies automatiquement, ce qui est souvent le cas, ou définies par l'utilisateur du présent document. Dans les applications classiques, les largeurs d'intervalles d'histogramme sont les mêmes pour tous les intervalles, lesquels s'étendent de façon contiguë sur toute la plage des valeurs possibles comprises entre A_{max} et A_{min} . Toutefois, aucune de ces conditions n'est obligatoire. L'équation de $niveau(s_i)$ donnée dans la Formule (26) est la plus générale étant donné qu'elle permet de définir $A_{low,i}$ indépendamment pour chaque intervalle i^e . Même si cela n'est pas précisé dans la Formule (26), A_{bin} peut également être défini indépendamment pour chaque intervalle i^e avec l'ajout de l'indice " i ".

L'incertitude de mesure dans $niveau(s_i)$ est donnée par:

$$u_{s_i} = \sqrt{u_{A_{low,i}}^2 + u_{A_{bin}}^2} \quad (27)$$

Où $u_{A_{low,i}}$ est l'incertitude dans $A_{low,i}$, qui comprend les contributions de σ_n , (bruit) et d'autres sources définies par l'utilisateur du présent document. Ces autres sources peuvent inclure, mais sans s'y limiter, les erreurs et incertitudes de décalage d'amplitude, les erreurs et incertitudes de gain d'amplitude linéaire et non linéaire, et les erreurs et incertitudes de discrétisation d'amplitude.

$$u_{A_{bin}} = \sqrt{\left(\frac{A_{bin}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + u_o^2} \quad (28)$$

où $\frac{A_{bin}}{2\sqrt{3}}$ est l'approximation normale en fonction d'une distribution rectangulaire des valeurs de *forme d'onde* contenues dans un intervalle, et où u_o fait référence aux autres contributions à $u_{A_{bin}}$ que l'utilisateur du présent document considère comme étant appropriées pour sa mise en œuvre particulière de la méthode de l'histogramme. L'utilisateur du présent document doit consigner la valeur de u_o et fournir la documentation venant à l'appui de cette valeur.

Un exemple de calcul de u_{s_i} pour la méthode du mode d'histogramme est donné à l'Annexe A.

7.2.1.3 Incertitude dans le niveau d'état – Estimateur shorth

La méthode de calcul de l'incertitude de mesure présentée ici exige d'utiliser plusieurs *formes d'onde*. L'estimateur shorth de $niveau(s_i)$ et son incertitude sont calculés à partir de la moyenne de ces formes d'onde. Toutefois, les utilisateurs du présent document peuvent choisir de ne pas utiliser plusieurs *formes d'onde*, auquel cas ils doivent utiliser l'incertitude de Type B pour $niveau(s_i)$ et la justifier pour le Type B. Le shorth d'un nombre donné, N_k , d'échantillons de forme d'onde est le plus court intervalle contenant la fraction, f_s , ($f_s = 0,50$) des N_k échantillons de forme d'onde qui satisfait aux exigences d'amplitude (voir l'IEC 60469:2013, 5.2.3) définies par l'utilisateur du présent document, k étant l'indice pour les états dans la forme d'onde ($k = 1$ ou 2 pour les formes d'onde échelonnées ou à deux états). La forme d'onde est divisée en deux ensembles indépendants d'échantillons de forme d'onde, l'un contenant N_1 échantillons représentant s_1 et l'autre contenant N_2 échantillons, représentant s_2 . Le caractère unique de l'estimateur shorth pour le calcul des niveaux d'état détermine le shorth, qui contient N_{s_k} échantillons de forme d'onde, où

$$N_{s_k} = \lfloor f_s N_k \rfloor + 1 \quad (29)$$

et $\lfloor \cdot \rfloor$ renvoie l'entier le plus élevé inférieur ou égal à son argument. Après la détermination du shorth, la valeur de $niveau(s_k)$ peut être calculée à l'aide de la formule suivante:

$$niveau(s_k) = \frac{1}{N_{s_k}} \sum_{j=1}^{N_{s_k}} y_j \quad (30)$$

Noter que l'indice j dans la Formule (30) n'est pas celui d'une séquence temporelle des *échantillons de forme d'onde*. Il s'agit de l'indice de réorganisation des N_{s_k} *échantillons de forme d'onde* en séquence non décroissante (voir l'IEC 60469:2013, 5.2.3).

La procédure suivante peut être utilisée pour calculer l'*incertitude de mesure*. Pour une *forme d'onde* à deux états, comme dans le cas examiné ici, cette procédure donne une matrice 2×2 comprenant les deux termes de variance et les deux termes de covariance pour les *incertitudes* associées à $niveau(s_1)$ et $niveau(s_2)$. Soit Y un vecteur ne contenant que les valeurs de *forme d'onde* qui seront utilisées pour déterminer les *niveaux d'état*. La longueur de Y est $N_{s_1} + N_{s_2}$. Soit Y_1 un sous-ensemble non décroissant de Y contenant les N_{s_1} *échantillons de forme d'onde* définissant $niveau(s_1)$, et Y_2 un sous-ensemble non décroissant de Y contenant les N_{s_2} *échantillons de forme d'onde* définissant $niveau(s_2)$. Il sera nécessaire d'obtenir les statistiques des *échantillons de forme d'onde* qui seront utilisés dans le shorth, l'utilisateur de la norme devant donc être en mesure d'associer les indices des éléments de Y aux indices de la *forme d'onde moyennée* de laquelle est déduit Y . Le vecteur $L = (niveau(s_1), niveau(s_2))^T$, représentant les *niveaux d'état*, est donné par

$$L = H_L Y, \quad (31)$$

où H_L est une matrice $2 \times (N_{s_1} + N_{s_2})$ contenant l'une des trois valeurs suivantes: 0, $1/N_{s_1}$ ou $1/N_{s_2}$ comme cela est actuellement décrit. Le j^{e} élément de la première ligne de H_L est:

$$\frac{1}{N_{s_1}} \quad \text{si } y_j \in Y_1 \quad (32)$$

$$0 \quad \text{si } y_j \notin Y_1$$

De la même manière, le j^{e} élément de la deuxième ligne de H_L est

$$\frac{1}{N_{s_2}} \quad \text{si } y_j \in Y_2 \quad (33)$$

$$0 \quad \text{si } y_j \notin Y_2$$

La matrice de covariance Σ_L de L est alors donnée par

$$\Sigma_L = H_L \Sigma_Y H_L^T \quad (34)$$

où Σ_Y est la matrice de covariance de Y . Les éléments diagonaux de Σ_Y , indiqués par $u_{s_1}^2$ et $u_{s_2}^2$, représentent la variance des deux *niveaux d'état* de la *forme d'onde*, alors que les éléments hors diagonaux, indiqués par u_{s_1,s_2} et u_{s_2,s_1} , représentent la covariance des *niveaux d'état*. L'Annexe B donne plus d'informations pour le calcul de Σ_L et Σ_Y . Toutefois, Σ_L ne tenant pas compte de la variation du processus de détermination de l'estimation shorth, qui est non linéaire et non différentiable, il peut sous-estimer la véritable variation des *niveaux d'état* et doit être ajusté lorsque des erreurs non corrélées sont la source principale d'erreur. Le Σ_L est donné par

$$\begin{pmatrix} u_{s_1}^2 N_{s_1}^{1/3} & u_{s_1,s_2} (N_{s_1} N_{s_2})^{1/6} \\ u_{s_2,s_1} (N_{s_1} N_{s_2})^{1/6} & u_{s_2}^2 N_{s_2}^{1/3} \end{pmatrix} \quad (35)$$

Un simple essai peut être utilisé pour déterminer s'il convient de procéder à l'ajustement. Cet essai consiste à déterminer si *niveau(s₁)* et *niveau(s₂)* sont corrélés. A cet effet, la corrélation de *niveau(s₁)* et de *niveau(s₂)* peut être calculée comme suit:

$$r = \frac{u_{s_1,s_2}}{u_{s_1} u_{s_2}} \quad (36)$$

Si

$$\sqrt{p-3} |z| \leq 1,96 \quad (37)$$

où z (transformée z de Fisher) est donné par

$$z = \frac{1}{2} \log \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \quad (38)$$

et

$$p = \min (N_{s_1}, N_{s_2}) \quad (39)$$

alors, *niveau(s₁)* et *niveau(s₂)* ne sont pas corrélés, et il convient d'ajuster Σ_L . Sinon, Σ_L est utilisé sans modification.

7.2.1.4 Incertitude dans le niveau d'état, niveau de crête

L'*incertitude de mesure* dans les *niveaux d'état* utilisant le niveau de crête dépend du nombre de valeurs de niveau de crête utilisées pour déterminer *niveau(s_i)* et de leur variation. Cette *incertitude de mesure* dans le niveau d'état peut être décrite par:

$$u_{\text{niveau,pm}} = \sqrt{\sigma_{\text{pm}}^2 + \sigma_n^2} \quad (40)$$

où σ_{pm} est l'écart-type de l'ensemble des valeurs de niveau de crête utilisées pour calculer *niveau(s_i)*, en excluant le bruit du signal, et où σ_n est la valeur efficace du bruit calculée de la *forme d'onde*. La valeur efficace du bruit calculée peut être obtenue à l'aide des *formes*

d'onde mesurées de manière répétée au moment de la mesure ou à partir de données ou de l'expérience passée(s).

7.2.1.5 Incertitude dans le niveau d'état, instant initial (final)

L'incertitude de mesure dans les niveaux d'état utilisant les instants initiaux ou les instants finaux dépend du nombre d'instants initiaux ou d'instants finaux utilisés pour déterminer $niveau(s_i)$ et de leur variation. Cette incertitude de mesure dans le niveau d'état peut être décrite par:

$$u_{niveau,i(f)i} = \sqrt{\sigma_{i(f)i}^2 + \sigma_n^2} \quad (41)$$

où $\sigma_{i(f)i}$ est l'écart-type de l'ensemble des valeurs de forme d'onde aux *instants initiaux (finaux)* utilisés pour calculer $niveau(s_i)$ et où σ_n est la valeur efficace du bruit calculée de la *forme d'onde*.

7.2.1.6 Incertitude dans le niveau d'état, valeurs définies par l'utilisateur

Pour les incertitudes de Type A, l'*incertitude de mesure* dans les *niveaux d'état* utilisant les valeurs définies par l'utilisateur dépend du nombre de valeurs définies par l'utilisateur utilisées pour déterminer $niveau(s_i)$ et de leur variation. Dans ce cas, l'*incertitude de mesure*, $u_{niveau,ud,A}$, dans le niveau d'état peut être décrite par:

$$u_{niveau,ud,A} = \sqrt{\sigma_{ud}^2 + \sigma_n^2} \quad (42)$$

où σ_{ud} est l'écart-type de l'ensemble des valeurs définies par l'utilisateur utilisées pour calculer $niveau(s_i)$, en excluant le bruit du signal, et où σ_n est la valeur efficace du bruit calculée de la *forme d'onde*.

Pour les incertitudes de Type B, qui reposent sur les spécifications du fabricant, sur l'expérience du dispositif ou sur d'autres informations, l'*incertitude de mesure*, $u_{niveau,ud,B}$, dans les *niveaux d'état* utilisant les valeurs définies par l'utilisateur est définie par l'utilisateur du présent document.

7.2.1.7 Incertitude dans le niveau d'état, niveaux statiques

L'*incertitude de mesure* dans les *niveaux d'état* utilisant la méthode du niveau statique peut être calculée comme suit:

$$u_{niveau,sl} = \sqrt{\sigma_{n,sl}^2 + u_{st,out}^2} \quad (43)$$

où $\sigma_{n,sl}$ est la valeur efficace du bruit calculée de la sortie de *niveau statique* par le générateur d'impulsions, puis mesurée par l'enregistreur de forme d'onde, et $u_{st,out}$ est l'*incertitude de mesure* avec la sortie statique du générateur d'impulsions égale au *niveau* élevé (bas) de la sortie d'impulsions du générateur. $u_{st,out}$ peut être une incertitude de Type A ou de Type B selon qu'elle est calculée dans le cadre d'une analyse statistique s'appuyant sur des mesures comparatives avec références ou qu'elle repose sur l'expérience ou sur les connaissances de l'utilisateur du présent document.

7.2.2 Limites d'état

Les *limites d'état* reposent sur les *niveaux d'état* de la *forme d'onde*. Il s'agit de valeurs spécifiées par l'utilisateur souvent présentées par paire, constituée d'une limite d'état supérieure et d'une limite d'état inférieure, qui contient le *niveau d'état*. Ces deux *limites*

d'état contiennent toutes les valeurs d'amplitude que l'utilisateur souhaite associer au *niveau d'état*. Les *limites d'état* peuvent ou peuvent ne pas être symétriques par rapport au *niveau d'état*. La plupart des paramètres d'impulsion sont déterminés à l'entrée ou la sortie des valeurs de *forme d'onde* de la plage de *niveaux* comprise dans les *limites d'état*.

Les limites d'état peuvent être spécifiées par l'utilisateur sous la forme d'un incrément de niveau fixe, d'un pourcentage du niveau d'état ou d'un pourcentage de l'amplitude d'impulsion centrée sur le niveau d'état. Chacune de ces méthodes présente des incertitudes associées (voir Tableau 3).

Tableau 3 – Différentes méthodes de détermination des limites d'état et de leur type d'incertitude et méthode de calcul.

Méthode	Type d'incertitude	Méthode de calcul	Degrés de liberté
Valeurs spécifiées par l'utilisateur	B	Expérience passée ou méthode similaire définie par l'utilisateur	∞
Pourcentage du <i>niveau d'état</i>	Selon la méthode utilisée pour déterminer le <i>niveau d'état</i>	Selon la méthode utilisée pour déterminer le <i>niveau d'état</i>	Selon la méthode utilisée pour déterminer le <i>niveau d'état</i>
Pourcentage de l' <i>amplitude d'impulsion</i>	A	Comme pour l' <i>amplitude</i> (voir l'IEC 60469:2013, 5.3.2)	Comme pour le calcul de l' <i>amplitude</i>

7.2.3 Amplitude de forme d'onde (niveaux d'état)

La valeur de l'*amplitude de forme d'onde* est calculée à l'aide des *niveaux d'état* de la *forme d'onde*. L'*amplitude* est l'un des paramètres de forme d'onde auquel les générateurs d'impulsions et autres dispositifs et événements de génération de *signal* font le plus souvent référence. La valeur de l'*amplitude de forme d'onde*, ainsi que les *niveaux d'état*, est utilisée pour calculer les *niveaux de référence en pourcentage* nécessaires au calcul de nombreux *paramètres temporels*.

La formule de calcul de l'*amplitude de forme d'onde*, A , est la suivante (voir l'IEC 60469:2013, 5.3.2):

$$A = \text{niveau}(s_2) - \text{niveau}(s_1) \quad (44)$$

L'incertitude, u_A , dans A est:

$$u_A = \sqrt{u_{s_1}^2 + u_{s_2}^2}, \quad (45)$$

où u_s est l'*incertitude de mesure* dans le/les *niveau(x) d'état*. Dans la Formule (45), l'hypothèse retenue est que les incertitudes ne sont pas corrélées. La moyenne, $\bar{A}$, de l'ensemble des valeurs de A est:

$$\bar{A} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A_i, \quad (46)$$

où M est le nombre de valeurs de A et i est un indice. L'*incertitude de mesure* $u_{\bar{A}}$ de $\bar{A}$ est:

$$\begin{aligned}
 u_A^- &= \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{M} + \sum_{i=1}^M \left(\frac{\partial A}{\partial A_i} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial A_i}{\partial \text{niveau}(s_{2,i})} u_{s_{2,i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_i}{\partial \text{niveau}(s_{1,i})} u_{s_{1,i}} \right)^2 \right]} \\
 &= \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{M} + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M (u_{s_{1,i}}^2 + u_{s_{2,i}}^2)} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{M} \left(\sigma_A^2 + (u_{s_1}^2 + u_{s_2}^2) \right)} \\
 \text{ou } &= \sqrt{\sigma_A^2 / M + (u_{s_1}^2 + u_{s_2}^2)}
 \end{aligned} \tag{47}$$

où σ_A est l'écart-type de la moyenne de M observations de A . La deuxième ligne est possible car la magnitude des dérivées partielles sont toutes égales à un. La troisième ligne repose sur l'hypothèse selon laquelle les *incertitudes de mesure* pour chaque détermination de *niveau d'état* sont égales et indépendantes les unes des autres. Si les *incertitudes de mesure* sont intégralement corrélées, la 4^e ligne doit être utilisée. L'*incertitude de mesure* dans le *niveau d'état* est décrite en 7.2.1.

L'utilisateur du présent document doit consigner u_A^- , l'*incertitude combinée*, M , et les *degrés de liberté* efficaces. Si l'utilisateur du présent document utilise une méthode différente de celle présentée ici pour calculer l'*incertitude de mesure* de $\bar{A}$, il doit la décrire et l'accompagner d'un processus de calcul détaillé (ligne par ligne).

7.2.4 Amplitude d'impulsion (niveaux d'état)

L'amplitude d'impulsion, A_{imp} , est l'amplitude d'une *forme d'onde* de type impulsion, qui peut être calculée comme suit:

$$A_{\text{imp}} = A_{\text{peak}} - \text{niveau}(s_1) \tag{48}$$

où A_{peak} est la valeur de la *crête maximale (minimale)* de la *forme d'onde* de type *impulsion*. La méthode de détermination de la valeur de A_{peak} est présentée dans l'IEC 60469:2013, 5.6.1. L'*incertitude de mesure*, $u_{A_{\text{imp}}}$, dans l'*amplitude d'impulsion* est déterminée de la même manière que l'*incertitude de mesure* dans l'*amplitude* d'une *forme d'onde* échelonnée (voir 7.2.3). La seule différence entre l'*incertitude de mesure* de l'*amplitude de forme d'onde* et $u_{A_{\text{imp}}}$ est que u_{s_2} de la Formule (45) est remplacé par u_{peak} , qui est l'*incertitude de mesure* de A_{peak} . u_{peak} inclut l'écart-type, σ_{fit} , des résidus d'une parabole (ou d'une fonction spécifiée par l'utilisateur) ajusté en fonction des données (voir 5.6.1 de l'IEC 60469:2013). σ_{fit} est une *incertitude de mesure* de Type A et les *degrés de liberté* (nombre de points de données utilisés pour ajuster la fonction moins le nombre de paramètres d'ajustement). Une autre contribution à u_{peak} est l'*incertitude instrumentale* du gain de l'entrée de l'*enregistreur de forme d'onde*. Étant donné qu'il convient que l'*enregistreur de forme d'onde* fasse l'objet d'un étalonnage correct incluant le gain, l'*incertitude instrumentale* due au gain peut être obtenue à partir de l'enregistrement d'étalonnage du gain. Il s'agit d'une *incertitude de mesure* de Type B. Le gain de l'*enregistreur de forme d'onde* peut dépendre de la température. Le bruit du *signal*, la réponse impulsionnelle de l'*enregistreur de forme d'onde* et l'*intervalle* entre les *instants d'échantillon* sont d'autres facteurs qui peuvent avoir un impact sur A_{imp} . Pour tous les facteurs qui ont un impact sur A_{imp} , l'utilisateur du document doit mettre en œuvre les méthodes appropriées de mesure de cet impact, doit procéder à une analyse d'incertitude applicable pour calculer $u_{A_{\text{imp}}}$ et doit donner des informations quant à la manière dont l'analyse d'incertitude a été réalisée.

7.2.5 Niveaux de référence en pourcentage (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)

Les *niveaux de référence en pourcentage* sont exigés pour déterminer les *instants de niveaux de référence en pourcentage*, qui sont ensuite utilisés pour calculer les valeurs de toutes les durées et de tous les retards. Le *niveau de référence en pourcentage*, $y_{x\%}$, repose sur l'amplitude de l'impulsion et est calculé comme suit:

$$y_{x\%} = \text{niveau}(s_1) + \frac{A}{100\%} x\% \quad (49)$$

où $x\%$ est le pourcentage de l'amplitude défini par l'utilisateur du présent document. L'*incertitude de mesure*, $u_{y_{x\%}}$, dans le *niveau de référence en pourcentage* peut être décrite par l'équation suivante (IEC 60469:2013, 5.3.3):

$$u_{y_{x\%}} = \sqrt{u_{s_i}^2 + \left(\frac{x\%}{100\%}\right)^2 u_A^2} \quad (50)$$

Les *incertitudes de mesure*, u_{s_i} et u_A , sont décrites en 7.2.1 et 7.2.3.

7.2.6 Erreur d'établissement de transition (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)

L'*erreur d'établissement de transition* décrit la manière dont une impulsion, faisant suite à une transition, retourne à son état de régime établi, représenté par un *niveau d'état*. Elle est décrite à l'aide de la formule suivante (IEC 60469:2013, 5.3.9):

$$E_{\text{settling}} = \max \left\{ \left| \frac{y_i - \text{level}(s_k)}{A} \right| \right\}, i_s \leq i \leq i_f \quad (51)$$

où i_s est l'indice de *forme d'onde* pour l'instant, t_s , qui se produit après $t_{50\%}$, que l'utilisateur a défini comme étant le début de l'*intervalle* sur lequel l'*erreur d'établissement de transition* sera déterminée, i_f est l'indice de *forme d'onde* pour l'instant final, t_f , et $\max\{\}$ renvoie la valeur maximale de son argument. L'*incertitude de mesure*, u_E , dans l'*erreur d'établissement de transition* peut être décrite par:

$$u_E = \sqrt{\left(\max \left\{ \left| \frac{y_i - \text{niveau}(s_k)}{A} \right| \right\} \right)^2 u_A^2 + \left(\frac{1}{A} \right)^2 (u_{s_k}^2 + \sigma_n^2)} \quad (52)$$

où $k = 1$ ou 2 selon que l'*état* choisi était s_1 ou s_2 . Les *incertitudes de mesure*, u_{s_k} et u_A , sont décrites en 7.2.1 et 7.2.3, et σ_n est la valeur efficace du bruit calculée de la *forme d'onde* définie par l'utilisateur du présent document.

7.2.7 Aberration de dépassement (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)

Le contenu du *signal* imprévu se produisant avant ou après une *transition*, dont la valeur est supérieure à la *limite d'état* supérieure de s_2 ou s_1 , et qui se trouve dans un *intervalle* spécifié autour de la *transition*, est une *aberration* commune appelée *dépassement*.

Un algorithme permettant de calculer le *dépassement* des formes d'onde échelonnées est donné dans l'IEC 60469:2013, 5.3.6. Le *dépassement* repose sur la valeur maximale de la *forme d'onde* dans la *zone d'aberration* appropriée. La valeur du *dépassement* n'est pas affectée par les zones d'aberration elles-mêmes, sauf si la valeur maximale de la *forme d'onde* se produit au premier ou au dernier *instant* de la *zone d'aberration*. Le *dépassement*

est calculé différemment dans la *zone d'aberration prétransition* qu'il ne l'est dans la *zone d'aberration post-transition*. Dans la *zone d'aberration prétransition*, le dépassement, O_{pre} , est calculé à l'aide de l'équation suivante (IEC 60469:2013, 5.3.6):

$$O_{\text{pre}} = \frac{y_{\text{max,pre}} - \text{niveau}(s_k)}{A} \quad (53)$$

où A est l'*amplitude de forme d'onde*, $y_{\text{max,pre}}$ la valeur maximale de la *forme d'onde* dans la *zone d'aberration prétransition*, et $s_k = s_1$ pour une transition positive ou s_2 pour une transition négative. L'*incertitude de mesure*, $u_{O_{\text{pre}}}$, dans l'*aberration de dépassement* peut être décrite par:

$$u_{O_{\text{pre}}} = \sqrt{\frac{1}{A^2} \sigma_n^2 + \frac{1}{A^2} u_{\text{niveau}}^2 + \left(\frac{y_{\text{max,pre}} - \text{niveau}(s_k)}{A^2} \right)^2 u_A^2} \quad (54)$$

Le Tableau 4 répertorie toutes les variables qui ont un impact sur l'incertitude, $u_{O_{\text{pre}}}$, dans O_{pre} .

Tableau 4 – Variables contribuant à l'incertitude dans le dépassement

i	Variable, p_i	Incertitude, u_{p_i}	Coefficient de sensibilité, $ \partial O_{\text{pre}} / \partial p_i $	Type	Degré de liberté, ν_i
1	$y_{\text{max,pre}}$	$u_{y_{\text{max,pre}}}$	$1/A$	A	$M_1 - 1$
2	$\text{niveau}(s_k)$	u_{s_k}	$1/A$	A	$M_2 - 1$
3	A	u_A	$(y_{\text{max,pre}} - \text{niveau}(s_k)) / A^2$	A	$M_3 - 1$

$u_{y_{\text{max,pre}}}$ est l'incertitude de mesure des M_1 valeurs de $y_{\text{max,pre}}$ et peut inclure le bruit de forme d'onde, σ_n , ainsi que l'écart-type des M_1 valeurs de $y_{\text{max,pre}}$. Les *incertitudes de mesure*, u_{s_k} et u_A , sont décrites en 7.2.1 et 7.2.3. M_i (avec $i = 1, 2, 3$) est le nombre de mesures répétées réalisées pour la variable donnée.

7.2.8 Aberration de dépassement négatif (niveaux d'état, amplitude de forme d'onde)

Le contenu du *signal* imprévu se produisant avant ou après une *transition*, dont la valeur est inférieure à la *limite d'état* inférieure de s_2 ou s_1 , et qui se trouve dans un *intervalle* spécifié autour de la *transition*, est une *aberration* commune appelée *dépassement négatif*. Le *dépassement négatif* est calculé différemment dans la *zone d'aberration prétransition* qu'il ne l'est dans la *zone d'aberration post-transition*. Dans la *zone d'aberration prétransition*, pour une *transition positive*, le *dépassement négatif*, U_{pre} , est calculé à l'aide de l'équation suivante (IEC 60469:2013, 5.3.6):

$$U_{\text{pre}} = \frac{\text{niveau}(s_k) - y_{\text{min,pre}}}{A} \quad (55)$$

où $y_{\text{min,pre}}$ est la valeur minimale de la *forme d'onde* dans la *zone d'aberration prétransition*. L'*incertitude de mesure* pour le *dépassement négatif* est calculée de la même manière que pour le *dépassement*.

7.3 Paramètres temporels

7.3.1 Instant initial

L'*instant initial* d'une *forme d'onde* établit la référence temporelle pour toutes les caractéristiques ou autres occurrences de changement de niveau dans ladite forme d'onde. Tous les *paramètres temporels* d'une *forme d'onde* sont calculés par rapport à l'*instant initial*, c'est-à-dire que la valeur de l'*instant initial* est soustraite de la valeur des *instants* qui suivent. L'*instant initial* est souvent défini par l'utilisateur sous la forme 0 s car, dans la plupart des cas, une seule *forme d'onde* est utilisée et la valeur de l'*instant initial* n'affecte pas le calcul des valeurs d'autres paramètres temporels. Toutefois, si différentes *formes d'onde* sont comparées, comme le calcul du *retard* entre les *transitions* dans deux *formes d'onde d'impulsion* différentes (les *formes d'onde d'impulsion* représentant les enregistrements de données séparés), la valeur de l'*instant initial* ne peut pas être défini sur 0 s pour les *formes d'onde*.

Si l'*instant initial* peut être défini sur 0 s ou sur une autre valeur arbitraire définie par l'utilisateur du présent document, la valeur de l'*instant initial* n'ayant aucun impact sur la valeur des paramètres temporels, l'*instant initial* ne fait l'objet d'aucune *incertitude de mesure*. Si l'*instant initial* ne peut pas être défini sur 0 s car sa valeur a un impact sur celle des autres paramètres temporels, plusieurs sources contribueront aux *incertitudes de mesure* dans la détermination de l'*instant initial*, toutes étant le résultat de la méthode utilisée pour synchroniser les deux (voire plus) *formes d'onde d'impulsion* et mesurer les *instants de référence* sur ces *formes d'onde d'impulsion*. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer le retard de deux *formes d'onde d'impulsion* séparées, en fonction du scénario de mesure. Les méthodes de synchronisation de l'acquisition d'au moins deux *formes d'onde d'impulsion* comprennent une horloge commune (ou une source de déclenchement commune). Les manuels et notes d'application de l'instrument fournis par le fabricant peuvent donner des lignes directrices spécifiques pour l'utilisation dudit instrument dans un système de mesure. Les scénarii possibles sont les suivants:

- 1) une source de *signal* donnant les impulsions qui seront acquises par les canaux séparés d'un *enregistreur de forme d'onde*,
- 2) une source de *signal* donnant les impulsions qui seront acquises par un canal de chacun des *enregistreurs de forme d'onde*,
- 3) plusieurs sources de *signal* donnant les impulsions qui seront acquises par les canaux séparés d'un *enregistreur de forme d'onde*,
- 4) plusieurs sources de *signal* donnant les impulsions qui seront acquises par un canal de chacun des *enregistreurs de forme d'onde*.

Tous ces scénarii peuvent prendre en charge la/les source(s) de *signal* en fournissant une série d'impulsions (un train répétitif de *signaux* impulsionnels) ou un seul *signal* impulsionnel.

L'utilisateur du présent document doit donner les informations détaillées relatives à la méthode et l'instrumentation utilisées pour obtenir une valeur pour l'*instant initial*. Ces informations doivent inclure une description du système de mesure, avec un schéma détaillé présentant les connexions et types de connexions (type de connecteur, type et longueur de câble, etc.), ainsi que les détails relatifs aux spécifications de performances de l'instrument. L'utilisateur doit décrire les méthodes de calcul utilisées pour obtenir une valeur pour l'*instant initial* de chaque *forme d'onde*. L'utilisateur doit consigner une valeur pour l'*instant initial* de chaque *forme d'onde*, y compris une *incertitude de mesure* pour chacune d'elles, le type d'incertitude et les degrés de liberté.

L'incertitude dans l'instant initial, t_0 , est donnée par:

$$u_{t_0} = \sqrt{u_{t,\text{ref}}^2 + u_{\text{jit}}^2} \quad (56)$$

où $u_{t,ref}$ est l'incertitude dans la référence temporelle utilisée pour synchroniser les différentes formes d'onde, et u_{jit} est l'incertitude due aux différentes sources de la gigue. Ces deux types d'incertitudes incluent les incertitudes de Type A et peuvent inclure les incertitudes de Type B. Toutefois, si la gigue fait l'objet d'une distribution normale avec une moyenne nulle, alors, pour un nombre élevé (> 100) de mesures, le terme de cette incertitude est proche de zéro. Si la gigue ne fait pas l'objet d'une moyenne nulle ou si peu de mesures sont utilisées, il convient d'inclure le terme de cette incertitude.

7.3.2 Epoque de forme d'onde

L'*époque de forme d'onde* décrit le laps de temps ou la durée sur laquelle le *signal* est mesuré. Sa valeur est importante pour le calcul des paramètres temporels. Les erreurs dans la valeur de l'*époque de forme d'onde* représentent les erreurs de gain de base de temps (expansion ou contraction) et une faible contribution due à la non-linéarité des instants d'échantillonnage.

L'utilisateur du présent document doit donner les informations détaillées relatives à la méthode et l'instrumentation utilisées pour acquérir la valeur pour l'*époque de forme d'onde*. Ces informations doivent inclure une description du système de mesure, avec un schéma détaillé présentant les connexions et types de connexions (type de connecteur, type et longueur de câble, etc.), ainsi que les détails relatifs aux spécifications de performances de l'instrument. L'utilisateur doit décrire les méthodes de calcul utilisées pour obtenir la valeur de l'*époque de forme d'onde*. L'utilisateur doit consigner une valeur pour l'*époque de forme d'onde*, y compris son *incertitude de mesure*, le type d'incertitude et les degrés de liberté.

7.3.3 Instants de niveau de référence (niveaux de référence en pourcentage, époque de forme d'onde, instant initial)

7.3.3.1 Généralités

Un *instant de niveau de référence* est le moment précis où la *forme d'onde* coupe un *niveau de référence*. Les niveaux de références les plus souvent utilisés sont 10 %, 20 %, 30 %, 50 %, 80 % et 90 % de l'*amplitude de forme d'onde*.

L'algorithme de calcul des *instants de niveau de référence* sont indiqués dans l'IEC 60469:2013, 5.3.4.3. L'algorithme est reproduit ici pour faciliter la description de l'analyse d'incertitude.

7.3.3.2 Algorithme de calcul des instants de niveau de référence en pourcentage

Sauf spécification contraire, en présence de plusieurs *instants de niveau de référence en pourcentage*, le premier est le $t_{x\%}$ à utiliser dans les calculs de paramètres de forme d'onde. Pour déterminer $t_{x\%}$, procéder comme suit:

- Calculer le *niveau de référence en pourcentage* conformément à 5.3.3 de l'IEC 60469:2013.
- Calculer le $t_{x\%}$ de $y_{x\%}$ en utilisant une interpolation linéaire entre des points de données consécutifs (voir 5.3.4.3 de l'IEC 60469:2013):

$$t_{x\%} = t_{x\%-} + \left(\frac{t_{x\%+} - t_{x\%-}}{y_{x\%+} - y_{x\%-}} \right) (y_{x\%} - y_{x\%-}) \quad (57)$$

où

$y_{x\%}$ est le *niveau de référence en pourcentage*,

$y_{x\%-}$ and $y_{x\%+}$ sont deux échantillons de valeurs telles que $y_{x\%-} \leq y_{x\%} \leq y_{x\%+}$.

$t_{x\%}$ est l'instant de *niveau de référence en pourcentage*,

$t_{x\% -}$ et $t_{x\% +}$ sont deux instants d'échantillonnage consécutifs correspondant aux données les plus proches en valeur de $y_{x\%}$, de telle sorte que $y_{x\% -} \leq y_{x\%} \leq y_{x\% +}$.

Les *instants de niveau de référence* à d'autres valeurs de pourcentage sont déterminés de manière similaire en remplaçant la valeur $x\%$ dans l'exemple ci-dessus par la valeur de pourcentage choisie.

7.3.3.3 Incertitude de mesure pour l'instant de niveau de référence

L'*incertitude de mesure*, $u_{t_{x\%}}$, pour l'*instant de niveau de référence en pourcentage* inclut les contributions de l'incertitude dans la valeur du *niveau de référence en pourcentage*. Dans la plupart des cas, la *forme d'onde* coupe le *niveau de référence en pourcentage* à un *instant* pour lequel il n'y a pas d'échantillon. Par conséquent, le procédé mathématique (l'interpolation linéaire indiquée dans la Formule (57), par exemple) utilisé pour calculer l'*instant* où la *forme d'onde* a coupé le *niveau de référence en pourcentage* doit être inclus dans le calcul de $u_{t_{x\%}}$. L'*incertitude de mesure* dans l'*instant de niveau de référence*, $t_{x\%}$, peut être décrite par:

$$u_{t_{x\%}} = \left[\sigma_{\delta t}^2 + \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial t_{x\%}}{\partial p_i} \right)^2 u_{p_i}^2 \right]^{1/2} \quad (58)$$

où $\sigma_{\delta t}$ est l'*incertitude* dans l'intervalle d'échantillonnage.

Tableau 5 – Variables contribuant à l'incertitude dans l'instant de niveau de référence

i	Variable, p_i	Incertainde, u_{p_i}	Coefficient de sensibilité, $ \partial t_{x\%} / \partial p_i $	Type	Degré de liberté, ν_i
1	$t_{x\% +}$	$\sigma_{t_{x\% +}}$	$(y_{x\%} - y_{x\% -}) / (y_{x\% +} - y_{x\% -})$	A	$M_x - 1$
2	$t_{x\% -}$	$\sigma_{t_{x\% -}}$	$(y_{x\% +} - y_{x\%}) / (y_{x\% +} - y_{x\% -})$	A	$M_x - 1$
3	$y_{x\% +}$	$\sigma_{y_{x\% +}}$	$(t_{x\% +} - t_{x\% -})(y_{x\%} - y_{x\% -}) / (y_{x\% +} - y_{x\% -})^2$	A	$M_y - 1$
4	$y_{x\% -}$	$\sigma_{y_{x\% -}}$	$(t_{x\% +} - t_{x\% -})(y_{x\%} - y_{x\% +}) / (y_{x\% +} - y_{x\% -})^2$	A	$M_y - 1$
5	$y_{x\%}$	$\sigma_{y_{x\%}}$	$(t_{x\% +} - t_{x\% -}) / (y_{x\% +} - y_{x\% -})$	Voir 7.2.5	Voir 7.2.5

$\sigma_{t_{x\% +}}$ et $\sigma_{t_{x\% -}}$ sont les écarts-types de $t_{x\% +}$ et $t_{x\% -}$, obtenus à partir de mesures indépendantes de l'erreur de *base de temps* de l'enregistreur de *forme d'onde*. L'erreur de *base de temps* décrit la différence entre les *instants d'échantillonnage* mesurés ou réels et les *instants d'échantillonnage* idéaux ou prévus. Si une seule *forme d'onde* est acquise, $\sigma_{t_{x\% +}}$ et $\sigma_{t_{x\% -}}$ peuvent être estimés par une estimation de Type B déterminée en s'appuyant sur l'expérience passée ou sur des moyens spécifiés par l'utilisateur. Les *incertitudes de mesure*, $\sigma_{y_{x\% +}}$ et $\sigma_{y_{x\% -}}$, pour $y_{x\% +}$ et $y_{x\% -}$ sont les valeurs efficaces du bruit calculées, σ_n , de la *forme d'onde*. Pour $t_{x\% +}$ et $t_{x\% -}$, les degrés de liberté sont inférieurs de 1 au nombre M_x de *formes d'onde acquises* utilisées pour mesurer l'erreur de *base de temps*. Pour $\sigma_{y_{x\% +}}$ et $\sigma_{y_{x\% -}}$, les degrés de liberté sont inférieurs de 1 au nombre M_y d'échantillons utilisés pour

calculer le bruit de *forme d'onde*. Le Tableau 5 donne un aperçu des variables contribuant à $u_{t_x\%}$.

7.3.4 Instant du centre de choc (amplitude d'impulsion, instants de niveau de référence)

L'instant du centre de choc est l'instant auquel survient une approximation, spécifiée par l'utilisateur, de la *crête maximale* (*crête minimale*) de la *forme d'onde de type impulsion* positive (négative). Il s'agit de déterminer en premier lieu l'amplitude d'impulsion comme indiqué, par exemple, dans l'IEC 60469:2013, 5.6.1. L'instant, t_p , auquel A_{peak} se produit peut être décrit par:

$$t_p = f^{-1}(A_{\text{peak}}) \quad (59)$$

où $f^{-1}()$ est la fonction inverse de celle utilisée dans le processus d'ajustage permettant de déterminer A_{peak} . L'incertitude de mesure, u_{t_p} , dans t_p peut être déterminée par:

$$u_{t_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial f^{-1}(A_{\text{peak}})}{\partial A_{\text{peak}}} u_{\text{peak}} \right)^2 + u_{t_0}^2} \quad (60)$$

7.3.5 Durée de transition (instants de niveau de référence)

La *durée de transition* est l'une des caractéristiques de performance les plus souvent citées pour la *transition* et les *formes d'onde* d'impulsion. Elle décrit la vitesse de passage de la *forme d'onde* d'un *niveau d'état* à un autre. La *durée de transition*, $t_{x1\%-x2\%}$, entre deux *instants de niveau de référence*, $t_{x1\%}$ et $t_{x2\%}$, est calculée à l'aide de la formule suivante (IEC 60469:2013, 5.3.5):

$$t_{x1\%-x2\%} = |t_{x1\%} - t_{x2\%}| \quad (61)$$

L'incertitude de mesure, $u_{t_{x1\%-x2\%}}$, de la *durée de transition* peut être calculée comme suit:

$$u_{t_{x1\%-x2\%}} = \sqrt{u_{t_{x1\%}}^2 + u_{t_{x2\%}}^2} \quad (62)$$

où l'incertitude de mesure, $u_{t_{x\%}}$, des *instants de niveau de référence* est décrite en 7.3.3.3.

7.3.6 Durée d'établissement de transition (instants de niveau de référence)

La *durée d'établissement de transition* est l'intervalle entre l'instant de niveau de référence 50 % et l'instant final où la *forme d'onde* coupe la *limite d'état* lorsqu'elle approche de cet état. La *limite d'état* peut être soit la *limite d'état supérieure* soit la *limite d'état inférieure*. Le générateur d'impulsions et/ou l'enregistreur de *forme d'onde* peuvent présenter ce comportement d'établissement de transition non idéal.

La *durée d'établissement de transition* peut être calculée à l'aide de l'algorithme décrit dans l'IEC 60469:2013, 5.3.8. L'incertitude dans l'estimation de la *durée d'établissement de transition* est déterminée à l'aide de la même procédure que celle utilisée pour déterminer $u_{t_{x1\%-x2\%}}$, où les *instants de niveau de référence* sont l'instant de niveau de référence 50 % et le dernier instant auquel la *forme d'onde* entre dans les limites de l'état donné.

7.3.7 Durée d'impulsion (instants de niveau de référence)

La *durée d'impulsion* est la différence entre les deux *instants de niveau de référence*, $t_{2,x\%}$ et $t_{1,x\%}$, l'un sur la *transition* négative et l'autre sur la *transition* positive de la *forme d'onde*, et qui repose sur le *niveau de référence en pourcentage*, $y_{x\%}$, choisi par l'utilisateur du présent document. La *durée d'impulsion*, T_p , est calculée à l'aide de l'équation suivante (IEC 60469:2013, 5.4.2):

$$T_p = |t_{2,x\%} - t_{1,x\%}| \quad (63)$$

L'*incertitude de mesure*, u_{T_p} , de la *durée d'impulsion* peut être calculée comme suit:

$$u_{T_p} = \sqrt{u_{t_{2,x\%}}^2 + u_{t_{1,x\%}}^2} \quad (64)$$

où l'*incertitude de mesure*, $u_{t_{x\%}}$, des *instants de niveau de référence* est décrite en 7.3.3.3.

7.3.8 Intervalle entre impulsions (instants de niveau de référence)

L'*intervalle entre impulsions* décrit le retard entre deux impulsions dans une *époque de forme d'onde* spécifiée par l'utilisateur pour un *niveau de référence en pourcentage* défini par l'utilisateur, $y_{x\%}$. Il est donné par la différence entre l'*instant de niveau de référence* correspondant, $t_{1,x\%}$, sur la deuxième *transition* de la première impulsion et l'*instant de niveau de référence*, $t_{2,x\%}$, sur la première *transition* de la deuxième impulsion. L'*intervalle entre impulsions*, T_s , est calculé à l'aide de l'équation suivante (IEC 60469:2013, 5.4.4):

$$T_s = |t_{2,x\%} - t_{1,x\%}| \quad (65)$$

L'*incertitude de mesure*, u_{T_s} , de l'*intervalle entre impulsions* peut être calculée comme suit:

$$u_{T_s} = \sqrt{u_{t_{2,x\%}}^2 + u_{t_{1,x\%}}^2} \quad (66)$$

où l'*incertitude de mesure*, $u_{t_{x\%}}$, des *instants de niveau de référence* est décrite en 7.3.3.3.

7.3.9 Retard (avance) de forme d'onde (instants de niveau de référence)

Le *retard de forme d'onde* décrit la différence temporelle entre deux *formes d'onde* différentes. Cette différence temporelle repose sur la différence entre l'*instant de niveau de référence 50 %*, $t_{50\%,W1}$, pour la première (deuxième) *transition* de la première *forme d'onde* et l'*instant de niveau de référence 50 %*, $t_{50\%,W2}$, pour la première (deuxième) *transition* de la deuxième *forme d'onde*. Le *retard de forme d'onde*, T_D , est calculé à l'aide de la formule suivante (IEC 60469:2013, 5.7.2):

$$T_D = t_{50\%,W1} - t_{50\%,W2} \quad (67)$$

L'*incertitude de mesure*, u_{T_D} , du *retard de forme d'onde* peut être calculée comme suit:

$$u_{TD} = \sqrt{u_{t50\%,W1}^2 + u_{t50\%,W2}^2} \quad (68)$$

où l'incertitude de mesure, $u_{t50\%,Wi}$, des instants de niveau de référence est décrite en 7.3.3.3.

8 Méthode de Monte-Carlo pour les estimations de l'incertitude de paramètre des formes d'onde

8.1 Lignes directrices et considérations générales

Une alternative à la propagation des *incertitudes de mesure* est la méthode de Monte-Carlo, qu'il est judicieux d'utiliser lorsque le *modèle de mesure* examiné est non linéaire, l'une des grandeurs d'entrée donnant d'importantes contributions d'incertitude, ou si l'une des principales contributions à l'*incertitude de mesure* est décrite par des lois de probabilité non normales. La méthode de Monte-Carlo est décrite dans le JCGM 101. Avec la méthode de Monte-Carlo, des fonctions de distribution (PDF¹) pour les grandeurs d'entrée sont exigées, cette méthode pouvant donc être considérée comme une propagation de distributions. Lorsque la fonction de distribution pour la grandeur de sortie est déterminée, ladite grandeur peut être résumée par son espérance mathématique et son écart-type. Les quantiles appropriés de la fonction de distribution de sortie peuvent alors être utilisés pour déterminer l'intervalle de confiance de l'*incertitude de mesure*.

8.2 Exemple: niveau d'état

Pour déterminer l'*incertitude de mesure* dans le *niveau d'état* d'une *forme d'onde* à l'aide de la méthode de Monte-Carlo, il convient de suivre la procédure ci-dessous:

- Commencer par une *forme d'onde* représentant une *forme d'onde* que le système de mesure a déjà normalement acquis.
- Développer le *modèle de mesure* pour le *procédé de mesure de forme d'onde*.
- Attribuer des fonctions de distribution à toutes les sources connues d'*incertitude de mesure*, comme le bruit supplémentaire uniforme d'un point de vue spectral et normalement distribué (blanc gaussien).
- Générer un grand nombre, N , de *formes d'onde* aléatoires en utilisant toutes les sources d'incertitude de mesure.
- Déterminer le *niveau d'état* pour chacune des N *formes d'onde* en utilisant l'algorithme d'histogramme (voir l'IEC 60469:2013, 5.2.2) ou l'algorithme shorth (voir l'IEC 60469:2013, 5.2.3).
- Calculer les quantiles supérieur et inférieur du *niveau d'état* pour déterminer l'intervalle de confiance spécifié par l'utilisateur. Par exemple, si l'intervalle de confiance spécifié par l'utilisateur est de 95 %, les quantiles supérieur et inférieur sont 0,025 et 0,975.

¹ PDF = probability distribution function.

Annexe A (informative)

Exemple de calcul de l'incertitude des niveaux d'état à l'aide du mode d'histogramme conformément au 7.2.1.2

A.1 Mesure de forme d'onde

La sortie d'un générateur d'échelon a été mesurée à l'aide d'un oscilloscope à échantillonnage. La mesure a été réalisée avec une *époque de forme d'onde* d'environ 5 ns et un *intervalle* d'échantillonnage d'environ 200 fs pour donner la *forme d'onde* présentée à la Figure A.1, composée de 25 000 *échantillons*. La mesure a été répétée de manière à obtenir 502 *formes d'onde*.

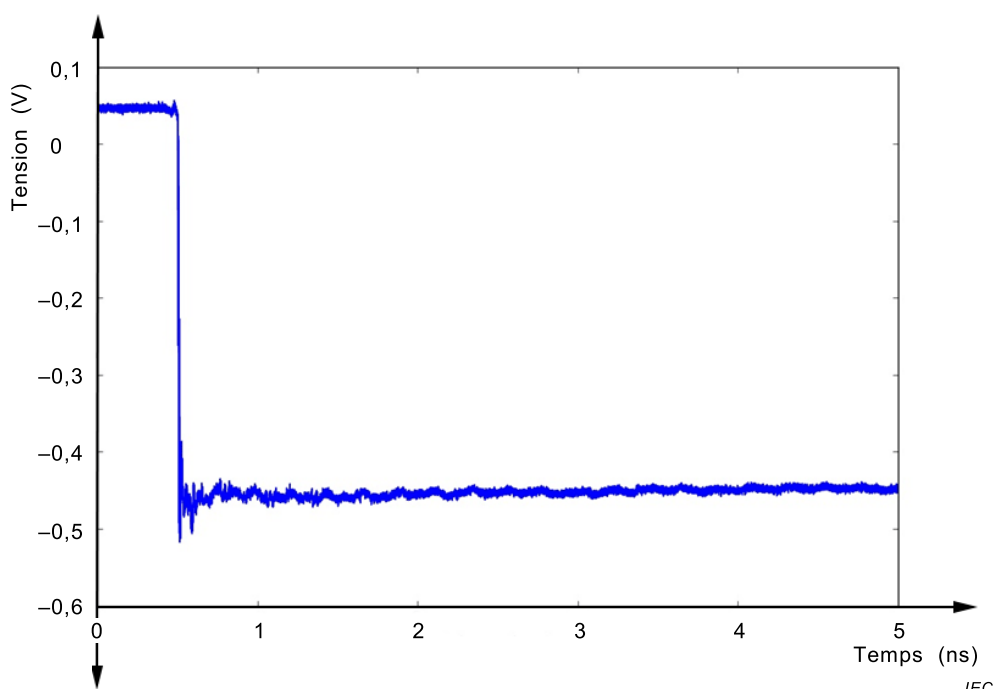


Figure A.1 – Forme d'onde obtenue à la suite de la mesure d'un signal échelonné à partir duquel les niveaux d'état et les incertitudes sont calculés

A.2 Division de l'histogramme bimodal et détermination des niveaux d'état

Pour analyser les *niveaux d'état*, l'histogramme bimodal de l'une des *formes d'onde* est en premier lieu construit avec $N_{\text{bin}} = 1\,000$ et $A_{\text{bin}} = 0,57$ mV. L'histogramme bimodal est ensuite divisé en deux histogrammes à l'aide de la méthode décrite dans l'IEC 60469:2013, 5.2.2, et avec $(f_1; f_2) = (0,2; 0,9)$. Ces valeurs sont choisies de telle sorte que la zone de transition ait une influence négligeable sur les histogrammes individuels. L'histogramme correspondant à l'état inférieur, s_1 , est présenté à la Figure A.2 a), alors que l'histogramme de l'état supérieur, s_2 , est présenté à la Figure A.2 b). Les deux histogrammes présentent la même largeur d'intervalle que l'histogramme bimodal, et les nombres d'intervalles sont déterminés par les paramètres (f_1, f_2) donnant $N_{\text{bin}} f_1$ intervalles pour s_1 et $N_{\text{bin}} (1 - f_2)$ intervalles pour s_2 . À l'aide de la Formule (26) permettant de définir les valeurs des modes des deux histogrammes, $\text{niveau}(s_1) = -450,69$ mV et $\text{niveau}(s_2) = 47,22$ mV.

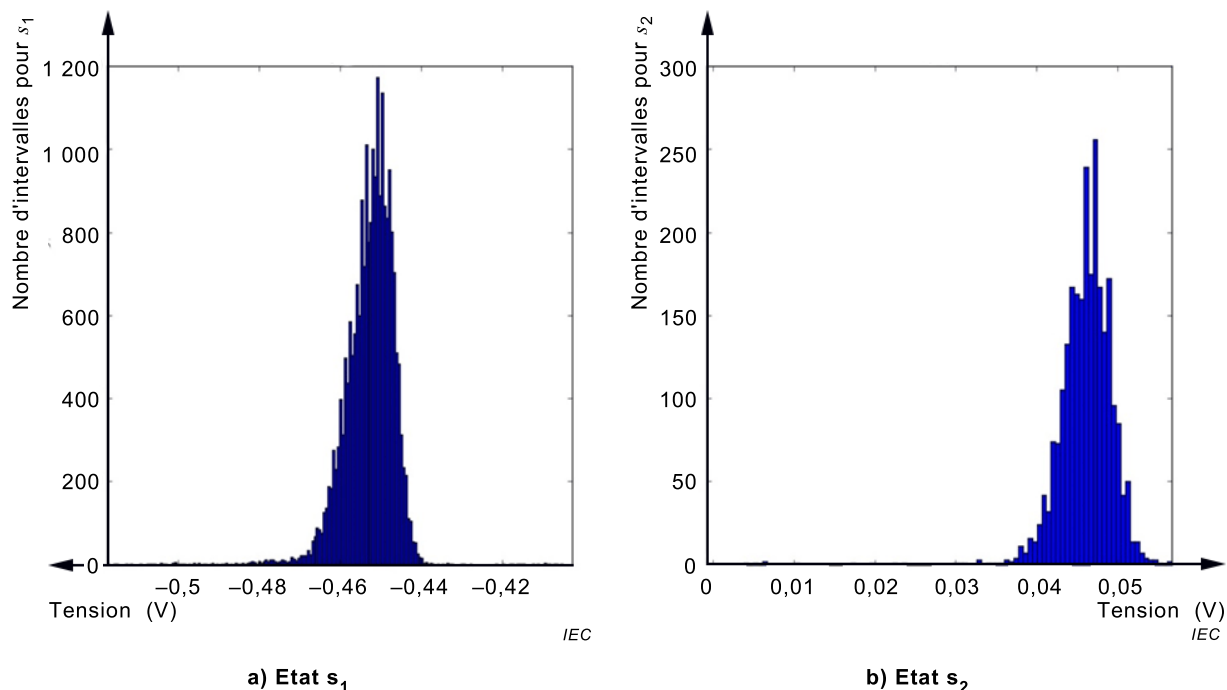


Figure A.2 – Histogrammes de l'état s_1 (a) et de l'état s_2 (b) de la forme d'onde échelonnée tracée à la Figure A.1

A.3 Incertitude des niveaux d'état

Conformément aux Formules (27) et (28), u_{s_i} ($i = 1$ pour s_1 et $i = 2$ pour s_2), est

$$u_{s_i} = \sqrt{u_{A_{\text{low},i}}^2 + \frac{A_{\text{bin},i}^2}{12} + u_{0,i}^2} \quad (\text{A.1})$$

où $u_{A_{\text{low},i}} = \sigma_i$. Dans cet exemple, différentes sources de bruit ne seront pas distinguées les unes des autres, mais leur contribution collective sera directement extraite des *formes d'onde* à l'aide de deux techniques différentes (l'une utilisant une seule *mesure de forme d'onde* et l'autre en utilisant plusieurs). La deuxième contribution à l'incertitude tient compte de la largeur d'intervalle finie. La troisième contribution à l'incertitude, u_0 , tient compte de la variation de A_{low} pour différents nombres d'intervalles. Les différentes contributions à l'incertitude pour cet exemple sont données au Tableau A.1.

Si une seule *forme d'onde* est utilisée, $u_{A_{\text{low},i}}$ peut être extrait d'un sous-ensemble de cette *forme d'onde* qui contribue à s_1 ou s_2 . Il convient que la durée de ce sous-ensemble soit suffisamment courte pour qu'aucune caractéristique de *forme d'onde* n'influence le calcul, mais il convient qu'elle soit tout de même suffisamment longue pour permettre de procéder à une analyse statistique. Dans cet exemple, 100 échantillons ($n = 100$) sont utilisés. Les écarts-types σ_{s_2} et σ_{s_1} sont respectivement obtenus à partir des 100 premiers et des 100 derniers *échantillons de forme d'onde*, ces écarts-types étant définis sur $u_{A_{\text{low},i}}$. Même si cette méthode est très simple, elle donne une limite supérieure pour la contribution à l'incertitude provenant du bruit. D'autres méthodes plus compliquées (le ré-échantillonnage des données de forme d'onde selon une fréquence d'échantillonnage variable, par exemple) peuvent donner des résultats plus précis pour certaines *formes d'onde*. Si plusieurs mesures de *forme d'onde* sont disponibles, $u_{A_{\text{low},i}}$ peut être directement extrait de la variation de

$niveau(s_i)$. Cette procédure est très différente du calcul du bruit présenté pour la seule mesure de *forme d'onde*, mais elle permet d'estimer plus précisément l'*incertitude*. Une estimation de $niveau(s_i)$ qui inclut des informations provenant de toutes les *formes d'onde* peut être obtenue en calculant $niveau(s_i)$ à partir de chaque *forme d'onde*, puis en déterminant la moyenne de chaque ensemble de $niveau(s_i)$. Pour cet exemple, $niveau(s_1) = -450,19$ mV et $niveau(s_2) = 46,28$ mV. Pour le calcul de $u_{A_{low,i}}$, il faut tenir compte du fait que la meilleure estimation de $niveau(s_i)$ est obtenue à partir de la moyenne des mesures individuelles de $niveau(s_i)$. Par conséquent, il faut prendre l'écart-type de ces mesures individuelles de $niveau(s_i)$ et le diviser par $\sqrt{502}$ (car dans cet exemple, 502 *formes d'onde* indépendantes et uniques ont été utilisées) pour obtenir $u_{A_{low,i}}$ (écart-type de la moyenne). Cette procédure permet de s'assurer que la contribution à l'*incertitude* diminue au fur et à mesure que le nombre de mesures augmente.

Dans cet exemple, la dernière contribution à l'*incertitude*, u_o est obtenue à partir de la variation observée entre $niveau(s_i)$ et N_{bin} . A cet effet, il convient que N_{bin} varie sur une large plage, par exemple, $\frac{1}{2}N_{bin} \leq N_{bin,j} \leq \frac{3}{2}N_{bin}$, où $N_{bin,j}$ est la j^e itération du nombre d'intervalles. Pour cet exemple, le nombre d'intervalles a varié entre $500 \leq N_{bin,j} \leq 1500$ et l'*incertitude*, u_o , est égale à l'écart-type correspondant de $niveau(s_i)$.

Les contributions individuelles à l'*incertitude* totale obtenue, u_{s_i} , pour les niveaux d'état s_1 et s_2 , figurent au Tableau A.1. Alors que la contribution $u_{A_{low,i}}$ peut être réduite de manière significative lors de l'exécution de plusieurs mesures, $u_{A_{bin,i}}$ et u_o sont identiques pour une seule ou plusieurs mesure(s). Dans cet exemple, le bruit offre la plus grande contribution à l'*incertitude* pour l'analyse d'une seule *forme d'onde*, alors que la dépendance du mode sur le nombre d'intervalles offre la plus grande contribution d'*incertitude* pour plusieurs mesures de *forme d'onde*.

En conclusion, l'analyse d'*incertitude* présentée ci-dessus décrit une méthode possible d'estimation de l'*incertitude* dans $niveau(s_i)$ lorsque le mode d'histogramme est utilisé pour déterminer les niveaux d'état. Il convient de souligner que, selon la *forme d'onde mesurée* et les conditions expérimentales, il peut exister d'autres options tout aussi précises, voire plus précises, pour calculer l'*incertitude* de $niveau(s_i)$.

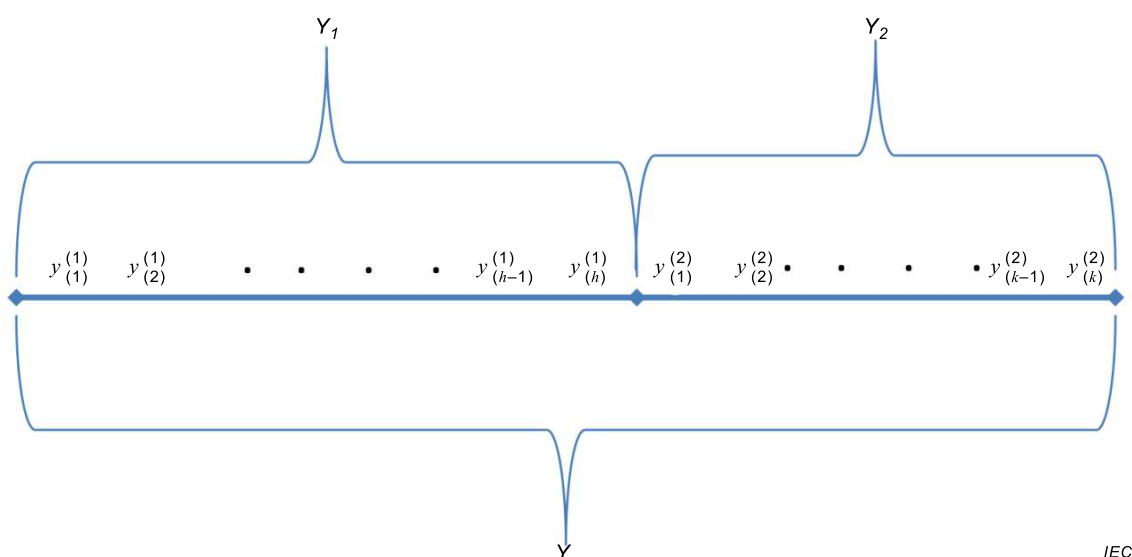
Tableau A.1 – Contributions à l'incertitude et incertitude totale pour $niveau(s_i)$ déterminées à partir des modes d'histogramme. $niveau(s_i)$

Niveau d'état	$u_{A_{low,i}}$ (mV)	$u_{A_{bin,i}}$ (mV)	u_o (mV)	u_{s_i} (mV)
s_1 (une seule mesure)	6,26	0,16	0,95	6,33
s_1 (plusieurs mesures)	0,03	0,16	0,95	0,96
s_2 (une seule mesure)	3,58	0,16	0,50	3,62
s_2 (plusieurs mesures)	0,03	0,16	0,50	0,53
NOTE L'incertitude dans les modes d'histogramme est $u_{A_{bin,i}} = \sqrt{A_{bin,i}^2 / 12}$.				

Annexe B (informative)

Calcul de Σ_L et de Σ_Y pour estimer l'incertitude des niveaux d'état à l'aide de la méthode shorth conformément au 7.2.1.3

Le calcul de Σ_L et Σ_Y exige plusieurs formes d'onde (voir 7.2.1.3). Il est également indiqué ce qui suit en 7.2.1.3: "Soit Y un vecteur ne contenant que les valeurs de *forme d'onde* qui seront utilisées pour déterminer les *niveaux d'état*." Cela signifie que Y n'est composé que des valeurs contenues dans les intervalles shorth pour s_1 et s_2 . L'intervalle shorth pour s_1 et s_2 est respectivement Y_1 et Y_2 (voir 7.2.1.3). Par conséquent, Y est un vecteur non décroissant contenant les valeurs de *forme d'onde* utilisées pour calculer $\text{niveau}(s_i)$. Le vecteur Y est décrit de manière graphique à la Figure B.1.



IEC

NOTE $y^{(1)}_{(i)} \leq y^{(1)}_{(i+1)}$, $y^{(2)}_{(i)} \leq y^{(2)}_{(i+1)}$ et $y^{(1)}_{(h)} \leq y^{(2)}_{(1)}$.

Figure B.1 – Schéma présentant l'emplacement des éléments de forme d'onde, $y^{(\alpha)}_{(\beta)}$, dans Y_1 et Y_2 , et la construction de Y à partir de Y_1 et Y_2

Les *niveaux d'état*, $\text{niveau}(s_1)$ et $\text{niveau}(s_2)$, sont calculés à l'aide de l'équation suivante (voir 7.2.1.3):

$$L = H_L Y, \quad (\text{B.1})$$

qui peut être élargie comme suit pour plus de clarté:

$$\begin{pmatrix} \text{niveau}(s_1) \\ \text{niveau}(s_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{N_{s_1}}, & \frac{1}{N_{s_1}}, & \dots, & \frac{1}{N_{s_1}}, & 0, & 0, & \dots, & 0 \\ 0, & 0, & \dots, & 0, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \dots, & \frac{1}{N_{s_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{(1)}^{(1)} \\ y_{(2)}^{(1)} \\ \vdots \\ y_{(h)}^{(1)} \\ y_{(1)}^{(2)} \\ y_{(2)}^{(2)} \\ \vdots \\ y_{(k)}^{(2)} \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

où $y_{(\beta)}^{(\alpha)}$ sont les éléments de Y , $\alpha = 1$ pour s_1 et $\alpha = 2$ pour s_2 (voir l'IEC 60469), et β est l'indice de Y dont les valeurs shorth sont calculées (voir l'IEC 60469).

L'incertitude dans $\text{niveau}(s_i)$ est déterminée à partir de la matrice de covariance (voir 7.2.1.3):

$$\Sigma_L = H_L \Sigma_Y H_L^T \quad (\text{B.3})$$

où Σ_Y est la matrice de covariance, qui est une fonction $(N_{s_1} + N_{s_2}) \times (N_{s_1} + N_{s_2})$.
L'élargissement de la Formule (B.3) pour plus de clarté donne:

$$\Sigma_L = \begin{pmatrix} u_{s_1}^2 & u_{s_1, s_2} \\ u_{s_2, s_1} & u_{s_2}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{N_{s_1}}, & \frac{1}{N_{s_1}}, & \dots, & \frac{1}{N_{s_1}}, & 0, & \dots, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & \dots, & 0, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \dots, & \frac{1}{N_{s_2}}, & \frac{1}{N_{s_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{N_{s_1}}, & 0 \\ \frac{1}{N_{s_1}}, & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{1}{N_{s_1}}, & 0 \\ 0, & \frac{1}{N_{s_2}} \\ \vdots & \vdots \\ 0, & \frac{1}{N_{s_2}} \\ 0, & \frac{1}{N_{s_2}} \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

$$\begin{pmatrix} E_{1,1}, & E_{1,2}, & \dots, & E_{1,N_T-1}, & E_{1,N_T} \\ E_{2,1}, & E_{2,2}, & \dots, & E_{2,N_T-1}, & E_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \dots, & \vdots & \vdots \\ E_{N_T-1,1}, & E_{N_T-1,2}, & \dots, & E_{N_T-1,N_T-1}, & E_{N_T-1,N_T} \\ E_{N_T,1}, & E_{N_T,2}, & \dots, & E_{N_T,N_T-1}, & E_{N_T,N_T} \end{pmatrix}$$

où

$$N_T = N_{s_1} + N_{s_2}, \quad (\text{B.5})$$

Bibliographie

IEC 60359:2001, *Appareils de mesure électriques et électroniques – Expression des performances*

Guide ISO/IEC 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM: 1995)*

Guide ISO/IEC 99:2007, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*

ISO 7870-1:2007, *Cartes de contrôle – Partie 1: Lignes directrices générales*

JCGM² 101:2008, *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method (disponible en anglais seulement)*

JCGM 102:2011, *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Extension to any number of output quantities (disponible en anglais seulement)*

IEEE³ Std. 1057-2007, *IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders (disponible en anglais seulement)*

² Le JCGM est le Joint Committee for Guides in Metrology (Comité commun pour les guides en métrologie).

³ L'IEEE est l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens).

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
www.iec.ch