

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
60-2**

1994

**AMENDEMENT 1
AMENDMENT 1**

1996-03

Amendement 1

Techniques des essais à haute tension

**Partie 2:
Systèmes de Mesure**

Amendment 1

High-voltage test techniques

**Part 2:
Measuring Systems**

© CEI 1996 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

**CODE PRIX
PRICE CODE**

N

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

AVANT-PROPOS

Le présent amendement a été établi par le comité d'études 42 de la CEI: Technique des essais à haute tension.

Le texte de cet amendement est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
42/121/FDIS	42/125/RVD

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

Page 6

SOMMAIRE

Ajouter le titre de l'annexe H suivant:

H Procédure pour l'estimation de l'incertitude lors de la mesure des hautes tensions

Page 132

Ajouter, après l'annexe G, la nouvelle annexe H suivante:

Annexe H (informative)

Procédure pour l'estimation de l'incertitude lors de la mesure des hautes tensions

H.1 Introduction

La présente partie de la CEI 60 donne les exigences auxquelles doit répondre un Système de Mesure Approuvé pour mesurer les hautes tensions dans les limites d'incertitude fixées par la présente partie de la CEI 60 et pour consigner les résultats appropriés dans le Recueil de Caractéristiques.

La présente annexe donne une procédure pour estimer l'incertitude globale à un niveau de confiance donné. Les règles d'arrondissement des valeurs mesurées et des incertitudes estimées sont fournies.

H.2 Principes généraux

L'incertitude est une déclaration :

- des limites ($\pm U$) de la plage de valeurs dans laquelle on s'attend à trouver la valeur vraie d'une mesure par rapport au résultat enregistré, et
- de la probabilité pour que la valeur vraie soit à l'intérieur de ces limites; cette probabilité est exprimée comme un niveau de confiance.

FOREWORD

This amendment has been prepared by IEC technical committee 42: High-voltage testing techniques.

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

FDIS	Report on voting
42/121/FDIS	42/125/RVD

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

Page 7

CONTENTS

Add the title of annex H as follows:

H Procedure for estimating uncertainty in high-voltage measurements

Page 133

Add, after annex G, the following annex H:

Annex H
(informative)

**Procedure for estimating uncertainty
in high-voltage measurements**

H.1 Introduction

This part of IEC 60 gives the requirements for an Approved Measuring System to be used for high-voltage measurements within the limits of uncertainty given in this part of IEC 60 and for the relevant statements to be entered in the Record of Performance.

This annex gives a procedure for estimating the overall uncertainty at a given confidence level. Rules for rounding measured values and estimated uncertainties are given.

H.2 General principles

Uncertainty is a statement of:

- the limits ($\pm U$) of the range of values within which the true value of a measurement is expected to lie in relation to the recorded result and
- the probability of the true value lying within these limits; this probability is expressed as a confidence level.

Un exemple de mesure avec son incertitude est:

1 040 kV $\pm$ 20 kV (estimé avec un niveau de confiance d'au moins 95 %)

Toutes les mesures sont à un certain point imparfaites. Un Système de Mesure peut être influencé par différentes grandeurs (par exemple la température, la proximité de structures à la terre ou sous tension, les interférences, etc.). Généralement on observe que, lorsqu'une mesure est répétée plusieurs fois, il y a une dispersion des résultats (quand les exigences de la CEI 60 sont satisfaites, cette dispersion tend à s'affaiblir). Quand une mesure est répétée un grand nombre de fois, la plupart des résultats sont proches d'une valeur centrale et cette valeur centrale tend vers une valeur constante au fur et à mesure que le nombre de mesures est augmenté.

Un grand nombre d'essais à haute tension ne permettent d'effectuer qu'une seule mesure. D'autres exigent plusieurs mesures, par exemple 10, comme dans l'article 6 de la présente partie de la CEI 60. Une mesure unique peut prendre n'importe quelle valeur de la distribution vraisemblable. Les différences possibles entre une valeur unique (ou la moyenne d'un petit nombre de mesures) et la moyenne de la distribution des valeurs possibles fournissent une contribution aléatoire de l'incertitude.

Cette annexe fournit les procédures pour traiter un nombre quelconque de répétitions d'une mesure.

Dans la plupart des mesures, l'incertitude globale résultera d'une combinaison de plusieurs contributions qui sont classées en deux catégories, selon la méthode utilisée pour évaluer leurs valeurs numériques [1]*.

H.2.1 Contributions systématiques (Type B [1])

Les contributions systématiques sont celles qui ne sont pas évaluées statistiquement mais sont estimées par d'autres moyens. Quelques exemples sont:

- l'incertitude d'étalonnage du Système de Mesure (ou de ses constituants), inscrite dans le certificat d'étalonnage;
- la dérive de la valeur du coefficient de conversion du Système de Mesure (par exemple, le vieillissement);
- l'utilisation en permanence d'un Système de Mesure dans des conditions différentes de celles de l'étalonnage (par exemple une température différente);
- la résolution de chaque instrument.

Dès lors qu'un Système de Mesure (ou un constituant) a été étalonné et qu'il est alors utilisé dans un essai, l'incertitude de l'étalonnage est traitée comme l'une des contributions systématiques dans l'estimation de l'incertitude du résultat d'essai.

H.2.1.1 Contributions systématiques (rectangulaires)

On considère que ces contributions systématiques ont une distribution rectangulaire, c'est-à-dire que n'importe quelle valeur mesurée entre les limites estimées ($\pm a$ où a est la valeur de la demi-plage) est supposée être équiprobable.

* Les chiffres entre crochets renvoient à H.7 Documents de référence.

An example of a measurement with its uncertainty is:

1 040 kV $\pm$ 20 kV (estimated confidence level not less than 95 %)

All measurements are to some degree imperfect. A Measuring System will be influenced by various quantities (e.g. temperature, proximity of earthed or energised structures, interference etc.). It will generally be found that when a measurement is repeated several times there will be a spread in the results (when the requirements of this part of IEC 60 are met this spread will be small). When a measurement is repeated a large number of times, most of the results will be close to a central value and this central value will tend to a constant value as the number of measurements is increased.

Many high-voltage tests permit only a single measurement. Others require several measurements, e.g. 10 as in clause 6 of this part of IEC 60. A single measurement may give any value in the likely distribution. The possible differences between a single value (or the mean of a small number of measurements) and the mean of the distribution of all possible values gives a random contribution of uncertainty.

This annex provides procedures to deal with any number of repetitions of a measurement.

In most measurements, the overall uncertainty will result from a combination of several contributions which are classified into two categories according to the method used to evaluate their numerical values [1]*.

H.2.1 *Systematic contributions (Type B [1])*

Systematic contributions are those which are not evaluated statistically but are estimated by other means. Some examples are:

- the uncertainty of the calibration of the Measuring System (or its components), stated in the calibration certificate;
- the drift in the value of the scale factor of the Measuring System (e.g. ageing);
- the use of a Measuring System under constant conditions which are different from those of the calibration (e.g. different temperature);
- the resolution of each instrument.

Once a Measuring System (or a component) has been calibrated and is then used in a test, the uncertainty of the calibration is treated as one of the systematic contributions in the estimation of the uncertainty of the test result.

H.2.1.1 *Systematic contributions (rectangular)*

It is assumed that these systematic contributions have a rectangular distribution, that is, any measured value between the estimated limits ($\pm a$, where a is the semi-range value) is assumed to be equally probable.

* The figures in square brackets refer to H.7 Reference documents.

L'écart type d'une distribution rectangulaire est:

$$s_{sa} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{H.1})$$

Quand un nombre (n) de contributions systématiques (rectangulaires) non corrélées sont combinées [2], alors:

a) l'écart type est:

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}} \quad (\text{H.2})$$

où a_1 à a_n sont les valeurs des demi-plages des contributions individuelles d'incertitude;

b) pour autant qu'il y ait un nombre suffisant de contributions significatives, la distribution est approximativement gaussienne.

H.2.1.2 Contributions systématiques (gaussiennes)

On considère que ces contributions systématiques ont une distribution gaussienne. Quand un certain nombre de contributions systématiques (gaussiennes) non corrélées sont combinées, la racine carrée de la somme des carrés des écarts types appropriés est évaluée (s_{sg}).

H.2.2 Combinaison des contributions systématiques

L'écart type pour toutes les contributions systématiques est:

$$s_s = \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (\text{H.3})$$

H.2.3 Contributions aléatoires (Type A [1])

Les contributions aléatoires sont celles qui sont déduites statistiquement à partir de mesures répétitives et qui, étant aléatoires, tendent habituellement lors d'une mesure vers une distribution gaussienne. Chaque contribution aléatoire est caractérisée par l'écart-type expérimental (s_r) de l'échantillon des valeurs mesurées (voir équation (H.11) en H.3.3.1).

H.2.4 Corrélation entre les contributions d'incertitude

Il convient de ne pas ignorer la corrélation entre les quantités mesurées si elle est présente et significative. Si possible, il convient d'évaluer cette corrélation expérimentalement en faisant varier les quantités corrélées. Dans de nombreux cas, les quantités mesurées sont suffisamment indépendantes pour que l'on puisse considérer que les quantités affectées sont non corrélées. S'il a été décidé que la corrélation entre les quantités mesurées ne peut pas être ignorée, et ne peut pas être déterminée expérimentalement, alors il conviendra d'utiliser les méthodes de l'ISO TAG 4, section 5.1 [1].

H.3 Incertitude globale

H.3.1 Combinaison des contributions d'incertitudes

L'incertitude pour une distribution gaussienne est donnée par:

$$U = ks \text{ (estimée à un niveau de confiance de } P \%) \quad (\text{H.4})$$

The standard deviation of a rectangular distribution is:

$$s_{sa} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{H.1})$$

When a number (n) of uncorrelated systematic contributions (rectangular) are combined [2], then:

a) the standard deviation is:

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}} \quad (\text{H.2})$$

where a_1 to a_n are the semi-range values of the individual contributions;

b) provided there is a sufficient number of significant contributions, the distribution is approximately Gaussian.

H.2.1.2 Systematic contributions (Gaussian)

It is assumed that these systematic contributions have a Gaussian distribution. When a number of uncorrelated systematic contributions (Gaussian) are combined the square root of the sum of the squares of the appropriate standard deviations is evaluated (s_{sg}).

H.2.2 Combination of systematic contributions

The standard deviation for all systematic contributions is:

$$s_s = \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (\text{H.3})$$

H.2.3 Random contributions (Type A [1])

Random contributions are those which are derived statistically from repetitive measurement and, being random, will usually be found by measurement to tend to a Gaussian distribution. Each random contribution is characterised by the experimental standard deviation (s_r) of the sample of measured values (see equation (H.11) in H.3.3.1).

H.2.4 Correlation between uncertainty contributions

Correlation between measured quantities should not be ignored if present and significant. If possible, this correlation should be evaluated experimentally by varying the correlated quantities. In many cases the measured quantities are sufficiently independent that the affected quantities can be assumed to be uncorrelated. If it has been decided that the correlation between measured quantities cannot be ignored, and cannot be determined experimentally, then the procedures in ISO TAG 4, section 5.1, should be used [1].

H.3 Overall uncertainty

H.3.1 Combination of uncertainty contributions

The uncertainty for a Gaussian distribution is given by:

$$U = ks \text{ (estimated confidence level of } P \% \text{)} \quad (\text{H.4})$$

où

k est le facteur de la distribution normale (facteur de risque [1]) et est donné, pour $n \rightarrow \infty$, à la dernière ligne du tableau H.1;

P est donné à la première ligne du tableau H.1.

Sauf spécification contraire il est habituel d'évaluer l'incertitude à un niveau de confiance de 95 % et d'utiliser pour k une valeur arrondie égale à 2 [1].

La méthode de cette annexe pour la combinaison des contributions d'incertitude exige que les contributions d'incertitude systématique et aléatoire d'un Système de Mesure soient évaluées séparément. La déduction de l'incertitude globale U est basée sur la racine carrée de la somme des carrés des contributions d'incertitude systématique et aléatoire:

$$U = \sqrt{U_s^2 + U_r^2} \quad (\text{H.5})$$

et U_s et U_r sont calculées au même niveau de confiance et sont obtenues en accord avec H.3.2 et H.3.3.

H.3.2 Estimation de l'incertitude systématique

L'équation de base de l'incertitude systématique, U_s , est:

$$U_s = k s_s = k \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (\text{H.6})$$

(tiré de l'équation (H.3) et de l'équation (H.4)).

Si une incertitude d'étalonnage est donnée sans aucune indication du niveau de confiance, il convient de la traiter comme ayant une distribution rectangulaire avec une valeur de demi-plage égale à l'incertitude et incluse comme l'un des termes de l'équation (H.2).

Quand l'incertitude est donnée avec un niveau de confiance, il convient de considérer qu'elle a une distribution gaussienne. Donc, si l'incertitude d'étalonnage est donnée avec un niveau de confiance de 95 % comme il est maintenant généralement recommandé, la valeur sera une valeur à 2 s (c'est-à-dire, $k = 2$) et:

$$s_{sg} = \frac{U_{95}}{2} \quad (\text{H.7})$$

Dans le cas particulier, où l'on ne fait qu'un seul étalonnage pour le Système de Mesure complet, l'équation (H.6) devient:

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2} \quad (\text{H.8})$$

où a_1 à a_n sont les valeurs des demi-plages.

La formulation générale de l'équation (H.6) est:

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2} \quad (\text{H.9})$$

where

k is the normal distribution factor (coverage factor [1]) and is given, for $n \rightarrow \infty$, in the last line of table H.1;

P is given in the first line of table H.1.

Unless otherwise specified it is usual to evaluate uncertainty at a 95 % confidence level and a rounded value of $k = 2$ is used [1].

The procedure in this annex for the combination of uncertainty contributions requires that the systematic and random uncertainty contributions of a Measuring System are evaluated separately. The derivation of the overall uncertainty U is based on the square root of the sum of the squares of the systematic and random uncertainty contributions:

$$U = \sqrt{U_s^2 + U_r^2} \quad (\text{H.5})$$

and U_s and U_r are calculated at the same confidence level and are derived in accordance with H.3.2 and H.3.3.

H.3.2 Estimation of systematic uncertainty

The basic equation for systematic uncertainty U_s is:

$$U_s = ks_s = k\sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (\text{H.6})$$

(from equation (H.3) and equation (H.4)).

If a calibration uncertainty is given without any indication of confidence level it should be treated as having a rectangular distribution with a semi-range value equal to the uncertainty and included as one of the terms in equation (H.2).

When the uncertainty is given with a confidence level it should be assumed to have a Gaussian distribution. Therefore, if the calibration uncertainty is given at a level of confidence of 95 % as is now being generally recommended, the value is a 2 s value (i.e. $k = 2$), and:

$$s_{sg} = \frac{U_{95}}{2} \quad (\text{H.7})$$

In particular, where there is a single calibration for the complete Measuring System, equation (H.6) becomes:

$$U_s = k\sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2} \quad (\text{H.8})$$

where a_1 to a_n are the semi-range values.

The general form of equation (H.6) is:

$$U_s = k\sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2} \quad (\text{H.9})$$

où

U_1 à U_m sont les contributions d'incertitude d'étalonnage données aux niveaux de confiance spécifiés;

k_1 à k_m sont les facteurs des distributions normales correspondants.

NOTE – Si toute autre contribution a été donnée ou estimée sur la base d'une distribution supposée gaussienne, alors il conviendra de l'inclure comme l'un des termes $(U_m/k_m)^2$ dans l'équation (H.9).

H.3.3 Estimation de l'incertitude aléatoire

Toute mesure, répétée plusieurs fois dans les mêmes conditions, montre une dispersion des valeurs mesurées (pour autant que la résolution soit suffisante) et il en découle une incertitude sur l'estimation de la prochaine valeur probable. La valeur moyenne de ces mesures répétées aura aussi une incertitude qui diminuera (comme la racine carrée de n) au fur et à mesure que le nombre (n) de mesures augmentera.

H.3.3.1 U_r tiré d'un petit nombre de mesures (par exemple, 10 comme exigé dans l'article 6 de la présente partie de la CEI 60)

Quand U_r se réfère à l'incertitude de la moyenne, x_m , d'un petit nombre de valeurs (n), alors U_r est donné par:

$$U_r = \frac{t s_r}{\sqrt{n}} \quad (\text{H.10})$$

où

t est le facteur t de Student, obtenu à partir du tableau H.1 en fonction du nombre (n) d'échantillons,

P est le niveau de confiance requis et:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (\text{H.11})$$

où

n est le nombre de mesures;

x_i sont les valeurs mesurées pour $i = 1$ à n ;

x_m est la moyenne des valeurs mesurées.

where

U_1 to U_m are the calibration contributions given at stated confidence levels;

k_1 to k_m are the corresponding normal distribution factors.

NOTE – If any other contribution has been provided or estimated on the basis of an assumed Gaussian distribution, then this should be included as one of the terms $(U_m/k_m)^2$ in equation (H.9).

H.3.3 Estimation of random uncertainty

Any measurement, repeated several times under the same conditions, shows a spread in the measured values (provided the resolution is sufficient) and hence there is an uncertainty in the estimation of the probable next value. The mean value of these repeated measurements will also have an uncertainty which will decrease (by the square root of n) as the number (n) of measurements increases.

H.3.3.1 U_r from a small number of measurements (e.g. 10 as required in clause 6 of this part of IEC 60)

When U_r refers to the uncertainty of the mean, x_m , of a small number of values (n), then U_r is given by:

$$U_r = \frac{t s_r}{\sqrt{n}} \quad (\text{H.10})$$

where

t is the Student's t factor, obtained from table H.1 in terms of the number of samples (n),

P is the required confidence level and:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (\text{H.11})$$

where

n is the number of measurements;

x_i are the measured values for $i = 1$ to n ;

x_m is the mean of the measured values.

Tableau H.1 – Distribution du «t» Student
Valeurs de «t» pour un niveau de confiance spécifié «P» %
en fonction du nombre de mesures, «n»

<i>P</i> % \ <i>n</i>	68,3	90,0	95,0	99,7
2	1,84	6,31	12,7	–
3	1,32	2,92	4,30	–
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
∞ ¹⁾	1,00	1,65	1,96 ²⁾	3,00
1) Quand $n \rightarrow \infty$, $t \rightarrow k$				
2) Pour $P = 95 \%$ k est arrondi à 2 [1]				

NOTE – En statistiques, $n-1$ est appelé le nombre de degrés de liberté de la distribution.

H.3.3.2 U_r tiré d'un grand nombre de mesures ($n \gg 10$)

Au niveau de confiance préférentiel de 95 % pour un échantillon $n \gg 10$ de mesures, t dans l'équation (H.10) peut être remplacé par k . L'incertitude de la moyenne, x_m , des échantillons, devient alors:

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n}} \quad (\text{H.12})$$

H.3.3.3 U_r tiré d'un grand échantillon de mesures préalablement établies

Si une valeur de s_r a été établie à partir d'un grand nombre de mesures (par exemple, $n_1 \geq 20$ à un niveau de confiance de 95 %) pour un Système de Mesure n'ayant pas subi de modifications significatives, alors l'incertitude sur une mesure ultérieure unique (ou répétée) est:

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n_2}} \quad (\text{H.13})$$

où $n_2 = 1$ (ou 2, etc.) et $n_2 \ll n_1$.

H.4 Programme pour les évaluations de l'incertitude globale

Un bilan de l'incertitude est la compilation des valeurs assignées à chaque contribution significative. Ce bilan est utilisé avec la procédure donnée dans cette annexe pour estimer l'incertitude globale. Il est suggéré que le programme de ces évaluations soit le même que celui utilisé pour les Essais de Détermination des Caractéristiques.

Table H.1 – Students 't' distribution
Values of 't' for specified confidence level 'P' %
as a function of the number of measurements, 'n'

$P\%$ n	68,3	90,0	95,0	99,7
2	1,84	6,31	12,7	–
3	1,32	2,92	4,30	–
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
$\infty^1)$	1,00	1,65	1,96 ²⁾	3,00
¹⁾ When $n \rightarrow \infty$, $t \rightarrow k$ ²⁾ For $P = 95\%$ k is rounded to 2 [1]				

NOTE – In statistics, $n-1$ is called the number of degrees of freedom of the distribution.

H.3.3.2 U_r from a large number of measurements ($n \gg 10$)

At the preferred confidence level of 95 % for a sample $n \gg 10$ measurements, t in equation (H.10) can be replaced by k . The uncertainty of the mean, x_m , of the samples, then becomes:

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n}} \quad (\text{H.12})$$

H.3.3.3 U_r from a previously established large number of measurements

If a value of s_r has been established from a large number of measurements (e.g. $n_1 \geq 20$ for a confidence level of 95 %) for a Measuring System to which no significant change is made, then the uncertainty in a subsequent single (or repeated) measurement is:

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n_2}} \quad (\text{H.13})$$

where

$n_2 = 1$ (or 2, etc.) and $n_2 \ll n_1$.

H.4 Schedule for evaluations of overall uncertainty

An uncertainty budget is the compilation of the values assigned to each significant contribution. This budget is used with the procedure given in this annex to estimate the overall uncertainty. It is suggested that the schedule for these evaluations should be the same as that used for Performance Tests.

H.5 Arrondissement des valeurs mesurées et des incertitudes estimées

Des erreurs additionnelles dans les mesures peuvent être limitées en effectuant tous les calculs avec plus de chiffres significatifs que ceux qui seront retenus dans le rapport final et, en général, deux chiffres additionnels seront suffisants.

Il convient que la valeur de l'incertitude soit composée de seulement un ou deux chiffres significatifs et que la valeur rapportée de l'incertitude soit toujours arrondie au chiffre supérieur afin d'éviter de donner un chiffre trop optimiste, par exemple une incertitude calculée de $\pm 0,82$ % devrait être arrondie à $\pm 0,9$ % ou ± 1 %.

Il convient que la valeur mesurée soit rapportée avec une résolution non supérieure à 10 % de l'incertitude rapportée et soit arrondie à l'unité pour le dernier chiffre significatif retenu. Ainsi pour une tension mesurée avec une résolution de 0,01 % et avec une incertitude de mesure de ± 1 %, il convient d'arrondir la valeur mesurée rapportée à 0,1 %.

Cependant, dans certains cas, il peut être utile de donner un chiffre additionnel pour détecter une dérive dans une série de mesures due, par exemple, à des changements dans les conditions de mesure.

H.6 Exemples d'évaluation de l'incertitude pour un Essai de Détermination des Caractéristiques par la méthode de référence

H.6.1 Généralités

NOTE – Les mesures suivantes ont été effectuées par un laboratoire utilisant son propre Système de Mesure de Référence.

Dans chacun des exemples le Système de Mesure était étalonné dans ses conditions normales d'utilisation. Un Système de Mesure de Référence était aussi connecté à l'objet en essai et des mesures simultanées de 10 applications de tension étaient faites avec les deux systèmes de mesure.

Le Système de Mesure de Référence avait été étalonné par un laboratoire national de métrologie. Le certificat d'étalonnage comprenait un résultat à la tension de comparaison requise, un énoncé des conditions dans lesquelles le résultat était obtenu et une estimation de l'incertitude d'étalonnage à un niveau de confiance de 95 %.

Pour simplifier, on a supposé que le laboratoire d'essai est capable de réaliser les mêmes conditions d'essai que celles dans lesquelles le Système de Mesure de Référence était étalonné. Dans la pratique cela n'est pas toujours possible, des données de fonctionnement additionnelles sur le Système de Mesure de Référence seraient alors nécessaires afin d'estimer les corrections et/ou les contributions d'incertitude additionnelles. Ces dernières deviendraient des termes additionnels dans l'équation (H.9).

Il convient de noter que les contributions d'incertitude devraient toujours être déterminées en fonction de l'effet de la quantité perturbatrice sur le paramètre mesuré.

Dans la plupart des cas pratiques, la combinaison des incertitudes, comme prescrites dans cette annexe, tendra à donner un résultat pessimiste ou plus sûr. Dès lors, il est recommandé que la valeur estimée de l'incertitude soit spécifiée comme étant «à un niveau de confiance d'au moins P %».

H.5 Rounding of measured values and estimated uncertainties

Additional errors in measurement can be limited by making all calculations with more significant figures than will be retained in the final report and in general two additional digits will be sufficient.

The value for uncertainty should consist of only one or two significant figures and the reported value of the uncertainty should always be rounded up to avoid giving a too optimistic figure, e.g. an uncertainty calculated as $\pm 0,82$ % should be rounded up to $\pm 0,9$ % or ± 1 %.

The measured value should be reported to a resolution no better than 10 % of the reported uncertainty, and should be rounded to one unit in the last significant figure retained. Thus for a voltage measured to a resolution of 0,01 % and with a measurement uncertainty of ± 1 %, the reported measured value should be rounded to 0,1 %.

In some cases, however, one additional significant figure might be usefully given to detect drift in a series of measurements, e.g. due to changes in the measuring conditions.

H.6 Examples of the evaluation of the uncertainty for a Performance Test by the reference method

H.6.1 General

NOTE – The following measurements were carried out by a laboratory using its own Reference Measuring System.

In each of the examples, the Measuring System was calibrated in its normal conditions of use. A Reference Measuring System was also connected to the test object and simultaneous measurements of 10 applications of voltage were made with the two measuring systems.

The Reference Measuring System had been calibrated by a national standards laboratory. The calibration certificate included a result at the required comparison voltage, a statement of the conditions under which the result was obtained, and an estimate of the uncertainty of calibration at a confidence level of 95 %.

For simplicity it has been assumed that the test laboratory is able to realise the same conditions as those under which the Reference Measuring System was calibrated. In practice this may not always be possible, in which case additional performance data for the Reference Measuring System would be needed to estimate corrections and/or additional uncertainty contributions. The latter would become additional terms in equation (H.9).

It should be noted that uncertainty contributions should always be determined in terms of the effect on the measured parameter by the perturbing quantity.

In most practical cases the combination of uncertainties, as prescribed in this annex, will tend to give a pessimistic or safe result. Hence it is recommended that the estimated value of the uncertainty should be stated as being "for a confidence level not less than P %".

H.6.2 Exemple 1 – Etalonnage d'un Système de Mesure des tensions continues de 1 MV, par comparaison avec un Système de Mesure de Référence de 200 kV – Valeur moyenne de la tension continue

a) Contribution d'incertitude aléatoire (estimée à partir de 10 couples de mesures correspondantes)

Tableau H.2 – Valeurs mesurées

Système de Mesure de Référence V_A kV	Système de Mesure V_B kV	Coefficient de conversion du Système de Mesure V_A / V_B
191,4	190,7	1,0037
191,6	190,7	1,0047
190,7	190,1	1,0032
189,9	189,1	1,0042
190,9	190,0	1,0047
191,2	190,4	1,0042
191,3	190,5	1,0042
191,2	190,5	1,0037
190,6	189,9	1,0037
191,3	190,2	1,0058

Valeur moyenne du coefficient de conversion $F_m = 1,0042$ (Cette valeur est corrigée par la suite de l'erreur connue du Système de Mesure de Référence – voir e).

Ecart type $s_r = 0,073 \%$

en portant dans l'équation (H.10) $U_r = \frac{2,26 \times 0,073}{\sqrt{10}}$

ce qui donne une incertitude aléatoire pour $P = 95 \%$ de $U_r = \pm 0,052 \%$

b) Contributions d'incertitude systématique (équation (H.8))

1) Résolution de l'instrument dans le Système de Mesure de Référence

± la moitié du dernier chiffre pour le zéro = $\pm 0,05$ kV
= $\pm 0,026 \%$ de 190 kV

± la moitié du dernier chiffre pour la lecture = $\pm 0,05$ kV
= $\pm 0,026 \%$ de 190 kV

donc dans l'équation (H.9): $a_1 = 0,052 \%$

2) Résolution de l'instrument dans le Système de Mesure

± la moitié du dernier chiffre pour le zéro = $\pm 0,05$ kV
= $\pm 0,026 \%$ de 190 kV

± la moitié du dernier chiffre pour la lecture = $\pm 0,05$ kV
= $\pm 0,026 \%$ de 190 kV

donc dans l'équation (H.9): $a_2 = 0,052 \%$

H.6.2 Example 1 – Calibration of 1 MV direct voltage Measuring System by comparison with 200 kV Reference Measuring System – Mean value of direct voltage

- a) Random uncertainty contribution (estimated from 10 pairs of corresponding measurements)

Table H.2 – Measured values

Reference Measuring System V_A kV	Measuring System V_B kV	Scale factor of the Measuring System V_A / V_B
191,4	190,7	1,0037
191,6	190,7	1,0047
190,7	190,1	1,0032
189,9	189,1	1,0042
190,9	190,0	1,0047
191,2	190,4	1,0042
191,3	190,5	1,0042
191,2	190,5	1,0037
190,6	189,9	1,0037
191,3	190,2	1,0058

Mean value of scale factor $F_m = 1,0042$ (this value is subsequently corrected for the known error in the Reference Measuring System – see e).

Standard deviation $s_r = 0,073 \%$

substituting in equation (H.10)
$$U_r = \frac{2,26 \times 0,073}{\sqrt{10}}$$

gives a random uncertainty for $P = 95 \%$ of $U_r = \pm 0,052 \%$

- b) Systematic uncertainty contributions (equation (H.8))

- 1) Resolution of instrument in the Reference Measuring System

$$\begin{aligned} \pm \text{half of the last digit for zero} &= \pm 0,05 \text{ kV} \\ &= \pm 0,026 \% \text{ of } 190 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pm \text{half of the last digit for reading} &= \pm 0,05 \text{ kV} \\ &= \pm 0,026 \% \text{ of } 190 \text{ kV} \end{aligned}$$

so in equation (H.9): $a_1 = 0,052 \%$

- 2) Resolution of instrument in the Measuring System

$$\begin{aligned} \pm \text{half of the last digit for zero} &= \pm 0,05 \text{ kV} \\ &= \pm 0,026 \% \text{ of } 190 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pm \text{half of the last digit for reading} &= \pm 0,05 \text{ kV} \\ &= \pm 0,026 \% \text{ of } 190 \text{ kV} \end{aligned}$$

so in equation (H.9): $a_2 = 0,052 \%$

3) Dérive du coefficient de conversion du Système de Mesure de Référence

Une valeur $a_3 = 0,05 \%$ est considérée, basée sur l'expérience avec des systèmes similaires, pour inclure la dérive dans l'étalonnage du Système de Mesure de Référence depuis la dernière date d'étalonnage (aucune donnée sur la dérive de ce système n'était disponible).

4) Incertitude d'étalonnage du Système de Mesure de Référence

La valeur donnée sur le certificat d'essai est $\pm 0,3 \%$ à un niveau de confiance d'au moins 95 % (c'est-à-dire, $k_1 = 2$) et donc l'équation (H.9) donne: $(U_1/k_1) = 0,15 \%$

c) Incertitude systématique totale

On tire de l'équation (H.9),

pour $k = 2$ (c'est-à-dire, $P = 95 \%$): $U_s = \pm 0,32 \%$

d) Incertitude globale à un niveau de confiance d'au moins 95 %

On tire de l'équation (H.5):

$$U = [(0,32)^2 + (0,052)^2]^{1/2} \\ = \pm 0,33 \% \text{ qui est arrondi à } \pm 0,4 \%$$

e) Correction pour l'erreur d'étalonnage du Système de Mesure de Référence

L'erreur sur le coefficient de conversion du Système de Mesure de Référence donné sur le certificat d'étalonnage = $-0,1 \%$. Dès lors la valeur moyenne corrigée du coefficient de conversion du Système de Mesure est

$$F_m = 1,0042 \times 1,001 \\ = 1,0052 \text{ arrondi à } 1,005$$

f) Résultat de l'étalonnage du Système de Mesure

La valeur du coefficient de conversion assigné à 190 kV est 1,005 avec une incertitude de $\pm 0,4 \%$ à un niveau de confiance d'au moins 95 %.

NOTE – Cet exemple est relatif à un Système de Mesure à lecture directe avec un coefficient de conversion nominal de 1. D'autres Systèmes de Mesure peuvent avoir de grands coefficients de conversion.

H.6.3 Exemple 2 – Etalonnage d'un Système de Mesure de choc de foudre de 2 MV, par comparaison avec un Système de mesure de Référence comprenant un diviseur résistif de 600 kV et un numériseur de 8 bits

H.6.3.1 Valeur crête d'un choc de foudre normalisé

a) Contribution d'incertitude aléatoire (à partir de couples de mesures correspondantes) avec des impulsions 1,2/50

3) Drift of scale factor of the Reference Measuring System

A value $a_3 = 0,05 \%$ is assumed, based on experience with similar systems, to cover drift in the calibration of the Reference Measuring System since the last calibration date (no data on the drift of this system was available).

4) Calibration uncertainty of the Reference Measuring System

The value given on the calibration certificate is $\pm 0,3 \%$ for a confidence level not less than 95 % (i.e. $k_1 = 2$) and so equation (H.9) gives: $(U_1/k_1) = 0,15 \%$

c) Total systematic uncertainty

From equation H.9,

$$\text{for } k = 2 \text{ (i.e. } P = 95 \text{ \%): } U_s = \pm 0,32 \%$$

d) Overall uncertainty for a confidence level not less than 95 %

From equation (H.5):

$$U = [(0,32)^2 + (0,052)^2]^{1/2} \\ = \pm 0,33 \% \text{ which is rounded up to } \pm 0,4 \%$$

e) Correction for the calibration error of the Reference Measuring System

The error in scale factor of Reference Measuring System given in calibration certificate = $-0,1 \%$. Hence corrected mean value of scale factor of Measuring System is:

$$F_m = 1,0042 \times 1,001 \\ = 1,0052 \text{ rounded to } 1,005$$

f) Result of calibration of the Measuring System

The value of assigned scale factor at 190 kV is 1,005 with an uncertainty of $\pm 0,4 \%$ for a confidence level of not less than 95 %.

NOTE – This example is for a direct reading Measuring System with a nominal scale factor of 1. Other Measuring Systems may have large scale factors.

H.6.3 Example 2 – Calibration of a 2 MV lightning impulse Measuring System, by comparison with a Reference Measuring System incorporating a 600 kV resistor divider and an 8-bit digitiser

H.6.3.1 Peak value of a standard lightning impulse

- a) Random uncertainty contribution (from pairs of corresponding measurements) with 1,2/50 impulses

Tableau H.3 – Valeurs mesurées

Système de Mesure de Référence V_A kV	Système de Mesure V_B kV	Coefficient de conversion du Système de Mesure V_A / V_B
516	509	1,0138
520	513	1,0136
520	514	1,0117
516	509	1,0138
515	509	1,0118
518	512	1,0117
515	508	1,0138
516	511	1,0098
512	507	1,0099
518	511	1,0137

Valeur moyenne du coefficient de conversion: $F_m = 1,0123$ (cette valeur est corrigée par la suite de l'erreur connue du Système de Mesure de Référence).

Ecart type $s_r = 0,16 \%$

$$\text{en portant dans l'équation (H.10)} \quad U_r = \frac{2,26 \times 0,16}{\sqrt{10}}$$

Ce qui donne une incertitude aléatoire pour $P = 95 \%$ de $U_r = \pm 0,12 \%$

b) Contributions d'incertitude systématique (équation (H.9))

1) Résolution de l'instrument dans le Système de Mesure de Référence

$\pm$ la moitié du dernier chiffre pour le zéro = $\pm 1/(2 \times 255)$ fois la valeur de la pleine échelle
(pour un enregistreur numérique de 8 bits) = $\pm 0,245 \%$ (pour 80 % de la valeur de la pleine échelle)

$\pm$ la moitié du dernier chiffre pour la lecture = $\pm 1/(2 \times 255)$ fois la valeur de la pleine échelle
(pour un enregistreur numérique de 8 bits) = $\pm 0,245 \%$ (pour 80 % de la valeur de la pleine échelle)

donc dans l'équation (H.9): $a_1 = 0,49 \%$

2) Résolution de l'instrument dans le Système de Mesure

$\pm$ la moitié du dernier chiffre pour le zéro = $\pm 1/(2 \times 255)$ fois la valeur de la pleine échelle
(pour un enregistreur numérique de 8 bits) = $\pm 0,245 \%$ (pour 80 % de la valeur de la pleine échelle)

$\pm$ la moitié du dernier chiffre pour la lecture = $\pm 1/(2 \times 255)$ fois la valeur de la pleine échelle
(pour un enregistreur numérique de 8 bits) = $\pm 0,245 \%$ (pour 80 % de la valeur de la pleine échelle)

donc dans l'équation (H.9): $a_1 = 0,49 \%$

3) Dérive du coefficient de conversion de l'instrument dans le Système de Mesure de Référence

Pas de contribution puisque la vérification de routine faite avec un générateur de choc étalon montrait que le coefficient de conversion n'avait pas changé.

Table H.3 – Measured values

Reference Measuring System V_A kV	Measuring System V_B kV	Scale factor of the Measuring System V_A / V_B
516	509	1,0138
520	513	1,0136
520	514	1,0117
516	509	1,0138
515	509	1,0118
518	512	1,0117
515	508	1,0138
516	511	1,0098
512	507	1,0099
518	511	1,0137

Mean value of scale factor: $F_m = 1,0123$ (this value is subsequently corrected for the known error in the Reference Measuring System).

Standard deviation: $s_r = 0,16 \%$

$$\text{substituting in equation (H.10)} \quad U_r = \frac{2,26 \times 0,16}{\sqrt{10}}$$

gives a random uncertainty for $P = 95 \%$ of $U_r = \pm 0,12 \%$

b) Systematic uncertainty contributions (equation (H.9))

1) Resolution of instrument in the Reference Measuring System

$\pm$ half of the last digit for zero = $\pm 1/(2 \times 255)$ full-scale value (for an 8-bit digital recorder)
= $\pm 0,245 \%$ (for 80 % of the full-scale value)

$\pm$ half of the last digit for reading = $\pm 1/(2 \times 255)$ full-scale value (for an 8-bit digital recorder)
= $\pm 0,245 \%$ (for 80 % of the full-scale value)

so in equation (H.9): $a_1 = 0,49 \%$

2) Resolution of instrument in the Measuring System

half of the last digit for zero = $\pm 1/(2 \times 255)$ full-scale value (for an 8-bit digital recorder)
= $\pm 0,245 \%$ (for 80 % of the full-scale value)

half of the last digit for reading = $\pm 1/2 \times 255$ full-scale value (for an 8-bit digital recorder)
= $\pm 0,245 \%$ (for 80 % of the full-scale value)

so in equation (H.9): $a_1 = 0,49 \%$

3) Drift of the scale factor of the instrument in the Reference Measuring System

No contribution as a routine check with an impulse calibrator showed the scale factor had not changed.

4) Dérive du coefficient de conversion du diviseur de tension dans le Système de Mesure de Référence

Estimée égale à: $a_3 = 0,2 \%$

5) Incertitude d'étalonnage de l'instrument dans le Système de Mesure de Référence

Extrait du certificat d'étalonnage: $U_1 = 0,4 \%$ à un niveau de confiance de 95 % ($k_1 = 2$) donnant

$$U_1/k_1 = 0,2 \%$$

6) Incertitude d'étalonnage du diviseur de tension dans le Système de Mesure de Référence

Extrait du certificat d'étalonnage: $U_2 = 0,4 \%$ à un degré de confiance de 95 % ($k_2 = 2$) donnant

$$U_2/k_2 = 0,2 \%$$

c) Incertitude systématique totale

Tiré de l'équation (H.9), pour $k = 2$ (c'est-à-dire, $P = 95 \%$): $U_s = \pm 0,95 \%$

d) Incertitude totale pour un degré de confiance d'au moins 95 %

Tiré de l'équation (H.5): $U = (0,95^2 + 0,12^2)^{1/2} \%$
 $= \pm 0,96 \%$, arrondi à $\pm 1 \%$

e) Correction pour l'erreur d'étalonnage du Système de Mesure de Référence

L'erreur dans le coefficient de conversion du Système de Mesure de Référence, donnée dans le certificat d'étalonnage, est $-0,15 \%$. Dès lors, la valeur moyenne corrigée du coefficient de conversion du Système de Mesure est $1,0123 \times 1,0015 = 1,0138$ arrondi à 1,014.

f) Résultat de l'étalonnage pour la valeur crête

La valeur du coefficient de conversion assignée pour des impulsions 1,2/50 μs à 500 kV est 1,014 avec une incertitude de $\pm 1 \%$ à un niveau de confiance d'au moins 95 %.

NOTE – Cet exemple est relatif à un Système de Mesure à lecture directe avec un coefficient de conversion nominal de 1. D'autres Systèmes de Mesure peuvent avoir de grands coefficients de conversion.

H.6.3.2 Durée de front du choc de foudre (T_1)

a) Contribution de l'incertitude aléatoire (estimée à partir de 10 couples de mesures correspondantes)