

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement techniques of piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators –
Part 4: Short-term frequency stability test methods**

**Techniques de mesure des oscillateurs piézoélectriques, diélectriques
et électrostatiques –
Partie 4: Méthodes d'essai de stabilité à court-terme de la fréquence**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2019 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
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 corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 once a month by email.

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: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries 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

67 000 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.

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.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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 une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques 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

67 000 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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Measurement techniques of piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators –
Part 4: Short-term frequency stability test methods**

**Techniques de mesure des oscillateurs piézoélectriques, diélectriques
et électrostatiques –
Partie 4: Méthodes d'essai de stabilité à court-terme de la fréquence**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 31.140

ISBN 978-2-8322-6876-6

**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	3
1 Scope	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions, units and symbols	5
3.1 Terms and definitions	5
3.2 Units and symbols	5
4 Short-term frequency stability	6
5 Allan variance (AVAR)	9
6 Allan deviation (ADEV), RMS fractional frequency fluctuations	10
7 Overlapping Allan variance (OAVAR) and overlapping Allan deviation (OADEV)	11
8 Modified Allan variance (MVAR) and modified Allan deviation (MDEV)	11
9 Hadamard Variance (HVAR)	12
10 Time interval error ($e_{(n)}$)	12
11 Maximum time interval error ($e_{m(n)}$)	13
12 Measurement of short-term frequency stability	13
12.1 General	13
12.2 Method 1: The two oscillators having exactly the same mean frequency	14
12.3 Method 2: frequency offset measurement	15
12.4 Method 3: time interval counter	15
12.5 Method 4: direct frequency counter method	16
12.6 Method 5: short-term stability computed by integration of phase noise data	16
12.7 Test conditions and precautions	17
12.7.1 Considerations for the test setup	17
12.7.2 Stabilization time	17
12.7.3 Supply voltage and control voltage	18
12.7.4 Impact of ambient conditions	19
Bibliography	20
Figure 1 – Phasor diagram of carrier and non-correlated amplitude and phase noise	6
Figure 2 – Phasor diagram after suppression of amplitude noise	7
Figure 3 – Various noise mechanisms over time	8
Figure 4 – Chart of Allan deviation (ADEV) as a function of τ	11
Figure 5 – Test circuit for method 1	14
Figure 6 – Test circuit for method 2	15
Figure 7 – Time interval counter measurement method	16
Figure 8 – Impact of a frequency drift to the measured Allan deviation	18
Table 1 – Relation between the areas of different slopes of phase noise and Allan deviation	17

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENT TECHNIQUES OF PIEZOELECTRIC, DIELECTRIC AND
ELECTROSTATIC OSCILLATORS –****Part 4: Short-term frequency stability test methods****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 62884-4 has been prepared by IEC technical committee 49: Piezoelectric, dielectric and electrostatic devices and associated materials for frequency control, selection and detection.

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

CDV	Report on voting
49/1277/CDV	49/1292/RVC

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.

A list of all parts in the IEC 62884 series, published under the general title *Measurement techniques of piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators*, can be found on the IEC website.

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62884-4:2019

MEASUREMENT TECHNIQUES OF PIEZOELECTRIC, DIELECTRIC AND ELECTROSTATIC OSCILLATORS –

Part 4: Short-term frequency stability test methods

1 Scope

This part of IEC 62884 describes the methods for the measurement and evaluation of the short-term frequency stability tests of piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators. Its purpose is to unify the test and evaluation methods for short-term frequency stability.

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 60027 (all parts), *Letter symbols to be used in electrical technology*

IEC 60050-561, *International electrotechnical vocabulary – Part 561: Piezoelectric, dielectric and electrostatic devices and associated materials for frequency control, selection and detection*. Available at www.electropedia.org

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

IEC 60617, *Graphical symbols for diagrams*, available at <http://std.iec.ch/iec60617>

IEC 60679-1, *Piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators of assessed quality – Part 1: Generic specification*

IEC 62884-1, *Measurement techniques of piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators – Part 1: Basic methods for the measurement*

ISO 80000-1, *Quantities and units – Part 1: General*

3 Terms and definitions, units and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60679-1 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>

3.2 Units and symbols

Units, graphical symbols, letter symbols and terminology shall, wherever possible, be taken from the following standards:

- IEC 60027;
- IEC 60050-561;
- IEC 60469;
- IEC 60617;
- ISO 80000-1.

4 Short-term frequency stability

The random fluctuations of the frequency of an oscillator over short periods of time [IEV 561-03-16]. In general, the output voltage of the oscillator is expressed by the following equation:

$$v(t) = [U_0 + \varepsilon(t)] \cdot \cos \phi(t) = [U_0 + \varepsilon(t)] \cdot \cos[2\pi \cdot F_0 \cdot t + \varphi(t)]$$

where

- U_0 is the nominal output voltage;
- $\varepsilon(t)$ is the amplitude noise;
- F_0 is the average oscillator frequency;
- $\varphi(t)$ is the phase fluctuation.

For the measurement of the short-term frequency stability, the amplitude noise $\varepsilon(t)$ is suppressed by a limiter, thus the output voltage of oscillator simplifies as follows:

$$v(t) = U_0 \cdot \cos \phi(t) = U_0 \cdot \cos[2\pi \cdot F_0 \cdot t + \varphi(t)] = \text{Re}(U_0 \cdot e^{j\phi(t)})$$

where

$\text{Re}(X)$ means the real part of the complex number X .

This can be presented in a phasor diagram (see Figure 1 below).

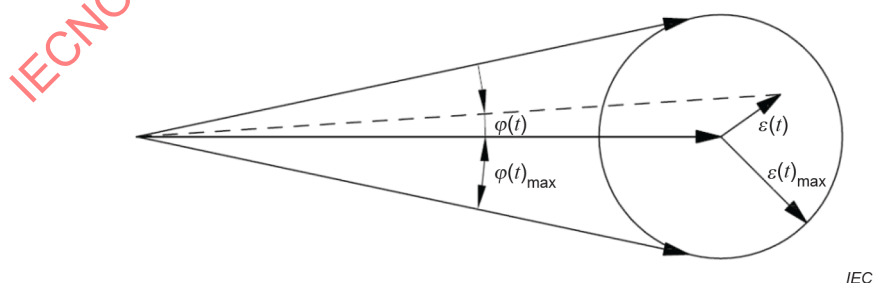


Figure 1 – Phasor diagram of carrier and non-correlated amplitude and phase noise

For the measurement of short-term stability, the amplitude noise $\varepsilon(t)$ is suppressed by a limiter, thus the phasor diagram simplifies as shown in Figure 2.

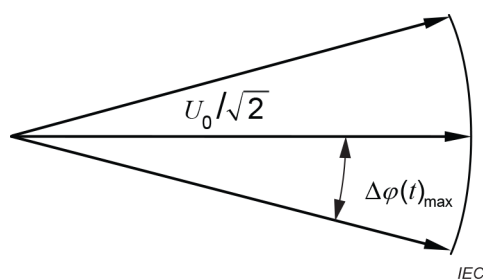


Figure 2 – Phasor diagram after suppression of amplitude noise

The instantaneous frequency $f(t)$ is the time derivative of the phase function.

$$\phi(t) = 2\pi \cdot F_0 \cdot t + \varphi(t)$$

i.e.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = F_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{2\pi F_0} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \right) = F_0 \cdot (1 + y(t))$$

$$y(t) = \frac{1}{2\pi F_0} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

where

$y(t)$ is the fractional frequency deviation to the average oscillator frequency F_0 .

The phase and frequency fluctuations can be distinguished according to their appearances over time as shown in Figure 3.

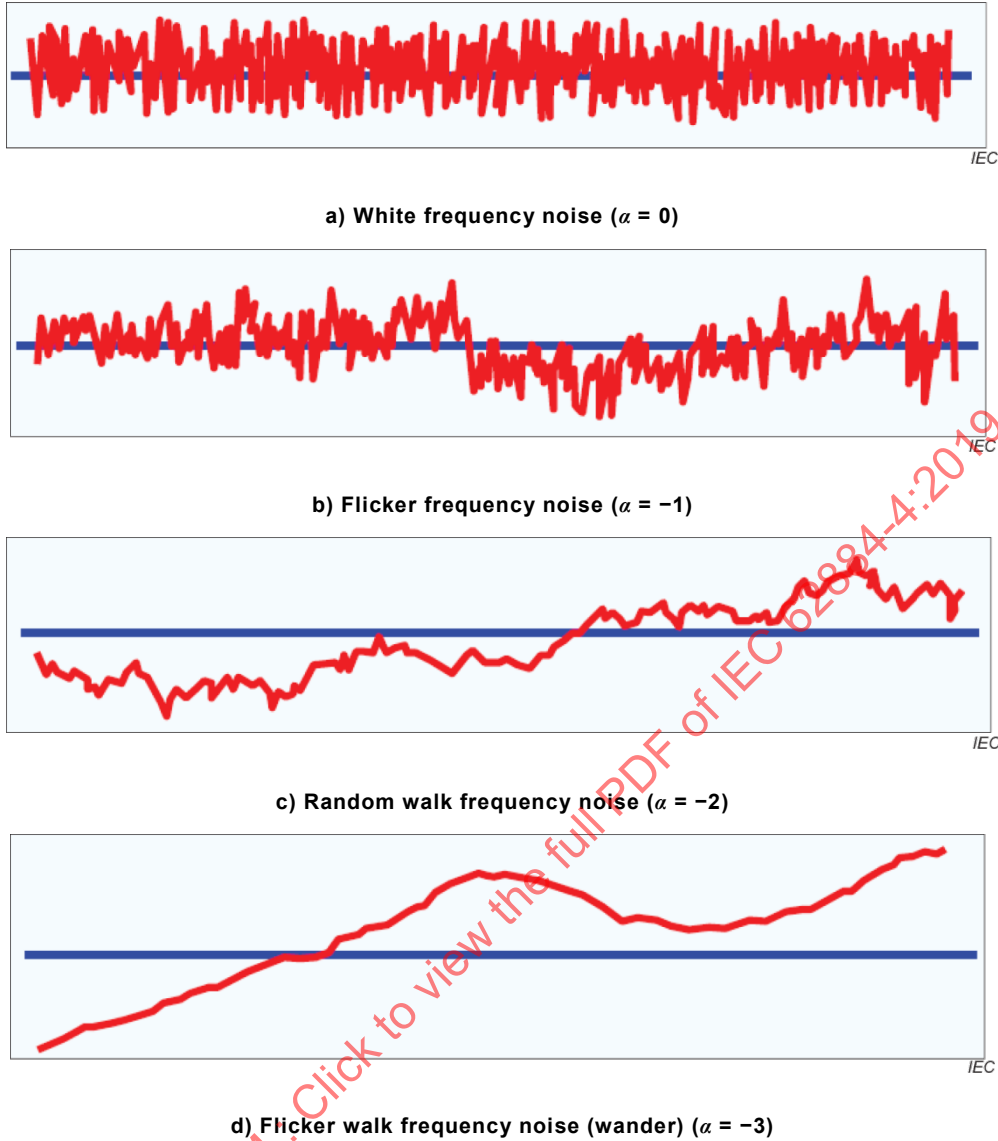


Figure 3 – Various noise mechanisms over time

with α being the exponent of the fractional frequency fluctuation, i.e. the slope in the double-logarithmic phase noise response

$$S_y \sim f^\alpha$$

Usually, short-term stability is considered over time intervals of $> 0,001$ to $1\,000$ seconds.

$$y_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = \frac{1}{2\pi F_0 \tau} [\varphi(t_k + \tau) - \varphi(t_k)] = \frac{1}{\tau} [x(t_k + \tau) - x(t_k)]$$

$$y_k = \frac{\varphi(t_k)}{2\pi F_0}$$

$x(t)$ is the phase-time fluctuation, that is, the random phase fluctuation converted into time and measured in seconds.

The relation of $x(t)$ and $y(t)$ is represented as follows:

$$y(t) = \frac{d(x(t))}{dt}$$

The classical variance σ^2 and the standard deviation σ at M samples of y_i is represented as

$$\sigma^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2$$

Using the mean value $\bar{y}$.

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i$$

The $\bar{y}$ from small sampling of y_i is not suitable for the analysis of frequency stability, because of lack of convergence for some common types of clock noise. Their value depends on the number of samples taken.

5 Allan variance (AVAR)

The Allan variance $\sigma_y(\tau)$ is the most common measure for time domain stability.

It is an unbiased estimate of the preferred definition in the time domain of the short-term stability characteristics of the oscillator output frequency:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^{M-1} \frac{(y_{k+1} - y_k)^2}{2}$$

where

y_k are the average fractional frequency fluctuations obtained sequentially, with no systematic dead time between measurements;

τ is the sample time over which measurement is averaged;

M is the number of measurements.

The confidence on the estimate improves as M increases.

AVAR can be alternatively derived from phase measurement samples x_i taken in measurement intervals τ :

$$\sigma_y^2(\tau, M) = \frac{1}{2 \cdot (M-2) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-2} (x_{i+2} - 2 \cdot x_{i+1} + x_i)^2$$

6 Allan deviation (ADEV), RMS fractional frequency fluctuations

In detail specifications, instead of the variance AVAR, usually its square root σ is used, which is called Allan deviation (ADEV). It has the same order of magnitude as the relative frequency fluctuations that are to be characterized.

It is a measure in the time domain of the short-term frequency stability of an oscillator, based on the statistical properties of a number of frequency measurements, each representing an average of the frequency over the specified sampling interval τ .

$$\sigma_y(\tau, M) = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}$$

ADEV can be alternatively derived from phase measurement samples x_i taken in measurement intervals τ .

$$\sigma_y(\tau, M) = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (M-2) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-2} (x_{i+2} - 2 \cdot x_{i+1} + x_i)^2}$$

NOTE In IEC 60679-1:1997, 2.2.24, ADEV was called RMS fractional frequency fluctuation.

M shall be sufficiently large in order to achieve a satisfactory confidence interval. A simple approximation for the confidence interval u for $\pm 1 \sigma$ error (with no consideration of the noise type) is

$$u = \pm \frac{\sigma_y(\tau)}{\sqrt{M}}$$

The confidence interval u is usually depicted as error bars in the ADEV chart. If not, the number of samples M should be indicated in the test report.

ADEV is either defined for certain discrete values of τ or it is displayed graphically as a function of the sample interval τ (Sigma-Tau diagram) with the confidence interval for each value shown as error-bars. This presentation allows for the identification of the various underlying noise types (see Figure 4).

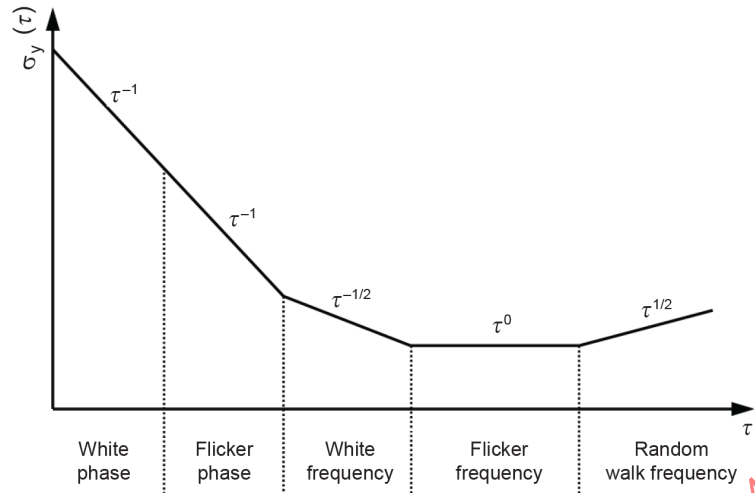


Figure 4 – Chart of Allan deviation (ADEV) as a function of τ

7 Overlapping Allan variance (OAVAR) and overlapping Allan deviation (OADEV)

A form of the normal Allan variance $\sigma_y^2(\tau)$, that makes maximum use of a data set by forming all possible fully overlapping samples at each averaging time τ . It can be estimated from a set of M frequency measurements for averaging time $\tau = m \cdot t_0$, where m is the averaging factor and t_0 is the basic measurement interval.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2 \cdot (M - 2m + 1)} \sum_{j=1}^{M-2m+1} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} (y_{i+m} - y_i)^2 \right]^2$$

Derived from phase data:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot (M - 2m) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-2m} (x_{i+2m} - 2 \cdot x_{i+m} + x_i)^2$$

Usually the square root $\sigma_y(\tau)$ of these expressions is used, which is called overlapping Allan deviation (OADEV).

The Overlapping Allan Deviation OADEV is the most widely used general purpose measure of frequency short-term stability (even if it is often erroneously named Allan deviation).

The confidence interval of OADEV is better than that of a normal ADEV.

8 Modified Allan variance (MVAR) and modified Allan deviation (MDEV)

The modified Allan variance (MVAR) and the modified Allan deviation (MDEV) allow to distinguish between flicker PM noise, which appears with a slope of (τ^{-1}) and white PM, which

has a slope of $\left(\tau^{-3/2}\right)$ in the MDEV-chart. It is estimated from a set of M frequency measurements for averaging time $\tau = m \cdot \tau_0$, where m is the averaging factor and τ_0 is the basic measurement interval.

$$Mod_ \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^4 \cdot (M - 3m + 2)} \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} \left[\sum_{k=i}^{i+m-1} (y_{k+m} - y_k) \right] \right]^2$$

Derived from phase data:

$$Mod_ \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2 \cdot (M - 3m + 1) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-3m+1} \left[\sum_{j=i}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2 \cdot x_{i+m} + x_i) \right]^2$$

The results are usually expressed by their square roots $Mod_ \sigma_y(\tau)$, the modified Allan deviation (MDEV).

For $m=1$, the modified Allan variance (deviation) is equal to the normal Allan variance (deviation).

The estimate for the confidence interval of MDEV is the same as that of ADEV.

9 Hadamard Variance (HVAR)

The Hadamard variance (HVAR) is a 3-sample variance version of the Allan variance. It examines the second difference of the fractional frequencies.

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6 \cdot (M - 2)} \sum_{i=1}^{M-2} (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i)^2$$

Derived from phase data:

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6 \cdot (M - 3) \cdot \tau^2} \sum_{j=1}^{M-3} (x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i)^2$$

The Hadamard variance (HVAR) rejects the linear frequency drift.

10 Time interval error ($e_{(n)}$)

The time interval error is a common stability statistic used in the telecommunications industry. It is defined by

$$e_{(n)} = \sqrt{\frac{1}{M-n} \sum_{i=1}^{M-n} (x_{i+n} - x_i)^2}$$

where

$n = 1, 2, \dots, M-1$ = averaging factor;

M = number of phase data points.

In the case of no frequency drift, $e_{(n)}$ is approximately equal to the Allan deviation (ADEV) multiplied by the averaging time.

11 Maximum time interval error ($e_{m(n)}$)

The maximum time interval error is a commonly used measure of clock error in the telecommunication industry. It is calculated by moving an n -point window (with $n = \tau/\tau_0$) through the phase (time error) data and finding the difference between the maximum and the minimum values at each window position. The maximum time interval error is the overall maximum of this time interval error over the entire data set.

$$e_{m(n)} = \text{MAX}_{1 \leq k \leq (M-n)} \left[\text{MAX}_{k \leq i \leq (k+n)} (x_i) - \text{MIN}_{k \leq i \leq (k+n)} (x_i) \right]$$

where

$n = 1, 2, \dots, M-1$ = averaging factor;

$k = 1 \dots (M-n)$ = index of the n -point window, that moves through the N phase data points X_i .

The maximum time interval error is a measure of the peak time deviation of a clock and is therefore very sensitive to single extreme values, transients or outliers.

12 Measurement of short-term frequency stability

12.1 General

The test and measurement procedures shall be carried out in accordance with the relevant detail specification.

Where any discrepancies occur for any reason, documents shall rank in the following order of precedence:

- detail specification;
- sectional specification;
- generic specification;
- any other international documents (for example of the IEC) to which reference is made.

The same order of precedence shall apply to equivalent national documents.

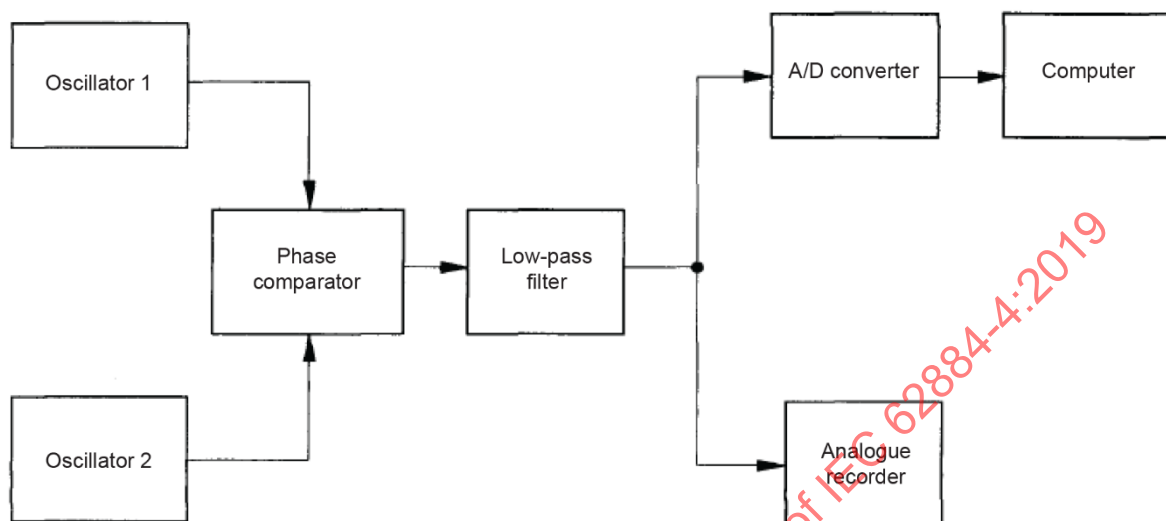
In principle, time domain stability measurements are made with respect to a reference source having much better stability than the unit under test.

In general practice, however, comparisons are commonly made between two oscillators of similar design, and it is usually assumed that the probability densities and distribution functions of their random noise processes are nearly the same. Since the noise processes combine on a power basis, the fractional frequency fluctuations between the two similar oscillators shall be divided by $\sqrt{2}$ to arrive at an estimate of the fluctuation due to one of the oscillators alone.

This is reflected in the formulae derived for each of the two methods.

12.2 Method 1: The two oscillators having exactly the same mean frequency

The two oscillators should be connected as shown in Figure 5



IEC

NOTE 1 Phase comparators are often sensitive to both phase and amplitude deviations. In order to minimize sensitivity to amplitude, it is normal practice to use a double-balanced mixer as a quadrature detector.

NOTE 2 If the mean frequency is not exactly the same, both oscillators can be locked to each other by a PLL.

NOTE 3 The loop time constant τ_{loop} limits the maximum evaluable τ of ADEV. $\tau_{\text{loop}} > 10 \cdot \tau_{\text{ADEVmax}}$.

Figure 5 – Test circuit for method 1

In the case of method 1, the phase comparator produces an analogue signal that is directly proportional to the instantaneous phase fluctuations between the two oscillator signals (for Fourier frequencies below the cut-off of the low-pass filter). This signal may be examined by analogue methods (such as continuous strip chart recorder, RMS voltmeter or spectrum analyzer), or it can be examined by time domain methods using a sampling type A/D converter with a controlled sample averaging time, and the repetitive measurements of the samples are stored for analysis by a computer. Using this method, there is no dead time introduced in the measurement system, and the RMS fractional frequency fluctuation is:

$$\frac{\Delta F}{F_0}(\tau)_{\text{RMS}} = \frac{1}{2\pi F_0 \tau} \left[\frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} \left[\left[\varphi(t_k + 2\tau) - \varphi(t_k + \tau) \right] - \left[\varphi(t_k + \tau) - \varphi(t_k) \right] \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

where

M is the number of repetitive measurements;

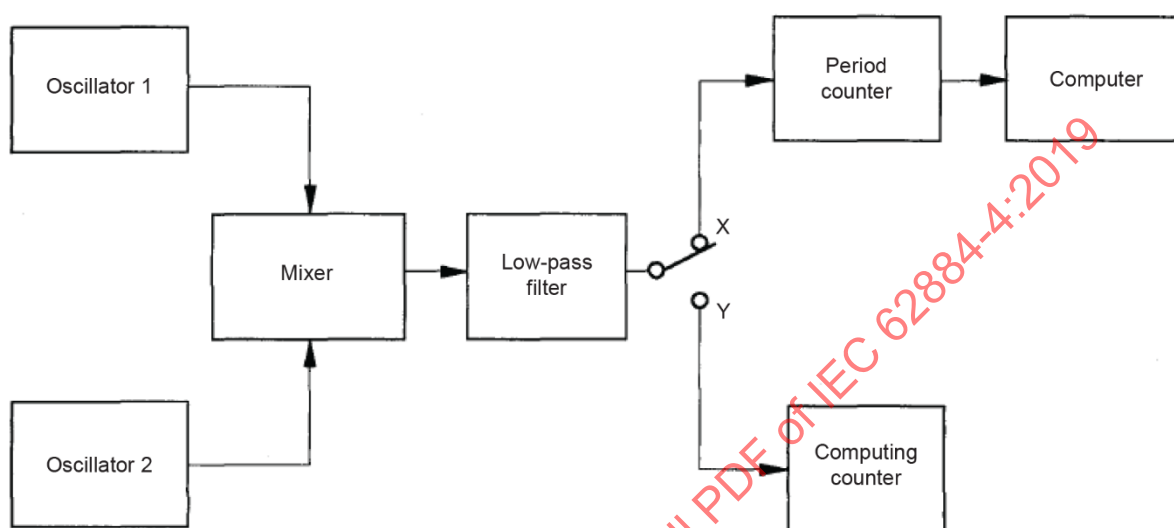
τ is the sample averaging time.

If, in fact, the reference oscillator used has much better stability than the unit under test, then all of the frequency fluctuations can be attributed to the unit under test and the equation above is multiplied by $\sqrt{2}$.

12.3 Method 2: frequency offset measurement

The two oscillators being compared are usually made to be essentially identical, except that one of them is adjusted to a slightly different frequency, commonly somewhere in the range from 100 Hz to 10 kHz. It is assumed that the small difference in oscillator adjustment will not significantly influence the noise characteristic of the oscillators.

The two oscillators shall be connected as shown in Figure 6.



IEC

Position X or Y may be used to obtain the Allan variance and deviation. X allows determination of the standard deviation as well

Figure 6 – Test circuit for method 2

The specified number of measurements M of the period of the beat frequency is made using the specified averaging time τ (τ should be an integral number of periods of the beat frequency). The interval between successive measurements T will usually be at least one period of the beat frequency longer than the sample averaging time τ and may be two or more periods greater depending upon the beat frequency and the recycling time of the counter data acquisition system.

By this method the resolution is increased by the factor $f_{\text{osc}} / f_{\text{beat}}$.

12.4 Method 3: time interval counter

Because time interval measurements directly at the oscillator frequency causes frequent phase spillovers, in this measurement method the frequency of both oscillators is divided down to a very low frequency, usually to 1 Hz (1 pps). For a frequency difference of 1×10^{-6} , the phase spillover time extends to 5,8 days.

Figure 7 shows the setup principle:

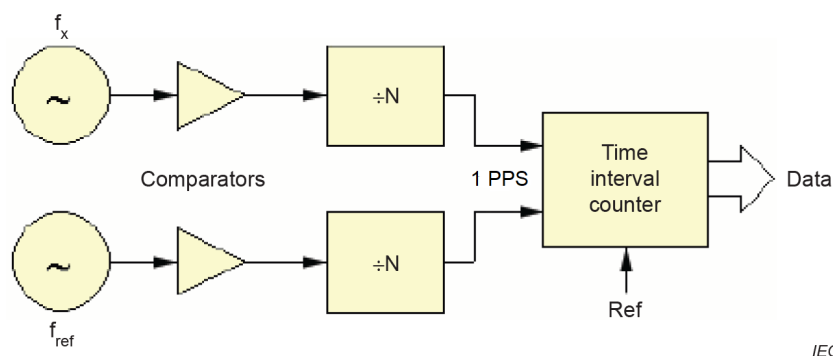


Figure 7 – Time interval counter measurement method

This method allows for the evaluation of the short-term stability only for longer than $\tau > 1$ s.

12.5 Method 4: direct frequency counter method

Deriving short-term frequency stability data from the direct recording of a series of frequency readings from a frequency counter leads to systematic errors, which may result in severely erroneous results. The major causes for this are the following:

- the impact of the counter dead time due to the data acquisition process and – if remotely controlled – of the data transfer time through the computer interface. The error introduced by the counter acquisition time can be considered by introducing a correction function $B_2(\tau \cdot \mu)$, which was derived and tabulated by Barnes;
- the impact of the interpolation techniques used in modern frequency counters. Owing to this technique, the displayed frequencies are already a result of statistically weighted averages.

Therefore, this method shall not be used without consideration of potential underlying systematic errors.

12.6 Method 5: short-term stability computed by integration of phase noise data

Short-term stability can be computed from phase noise test data $S_y(f)$ by numerical integration according to the following equation:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \cdot \int_{f_L}^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi \tau f)}{(\pi \tau f)^2} df$$

The lower integration limit f_L is determined by the maximum τ value, and the upper integration limit f_h is determined by the minimum τ value to be computed.

The relation between the areas of different slope of the phase noise responses $L(f)$, $S_y(f)$ and the Allan deviation $\sigma_y(\tau)$ is summarized in Table 1.

Table 1 – Relation between the areas of different slopes of phase noise and Allan deviation

	$L(f)$	$S_y(f)$	$\sigma_y(\tau)$
Random walk frequency noise	f^{-4}	f^{-2}	$\tau^{0,5}$
Flicker frequency noise	f^{-3}	f^{-1}	τ^0
White frequency noise	f^{-2}	f^0	$\tau^{-0,5}$
Flicker phase noise	f^{-1}	f^1	τ^{-1}
White phase noise	f^0	f^2	τ^{-1}

The computation of ADEV for longer τ values requires phase noise data from very close to carrier to achieve reasonably accurate results, e.g. for valuable results at $\tau > 0,1$ s, the $S_y(f)$ data shall include a range a frequency range down to $f \ll 1$ Hz.

12.7 Test conditions and precautions

12.7.1 Considerations for the test setup

The following precautions shall be taken to avoid interferences and trigger errors.

- Avoid ground loops in the test setup.
- Use phase-stable cabling.
- The measured signals shall have fast rise and decay time with low added jitter and hysteresis by the square-wave generation.

Prior to the computational analysis, the data set should be reviewed for consistency. Outliers – i.e. phase or frequency jumps – should be identified and removed, if it is certain that these are caused by external influences and do not originate from oscillators.

12.7.2 Stabilization time

Before starting the data acquisition, the oscillators shall be continuously operating over a longer stabilization time. Oven-controlled crystal oscillators (OCXO) require a longer stabilization time than the other oscillator types (SPXO, VCXO, TCXO, etc.).

The minimum stabilization time (besides the warm-up time for OCXO) can be estimated from the targeted maximum τ , which should be characterized. The slope of the remaining frequency drift of oscillators under test shall be small enough to have a negligible impact on the short-term stability measure $\sigma_y(\tau)$, otherwise the ADEV of oscillators under test is to be computed by

$$\sigma_y(\tau)_{\text{osc}} = \sqrt{\sigma_y^2(\tau)_{\text{meas}} - \sigma_y^2(\tau)_D}$$

where

$\sigma_y^2(\tau)_D$ is the Allan variance caused by the frequency drift.

Figure 8 shows the Allan deviation (ADEV) $\sigma_n(\tau)_D$ contributed by a frequency drift (in ppb [1×10^{-9}] per hour) of oscillators under test.

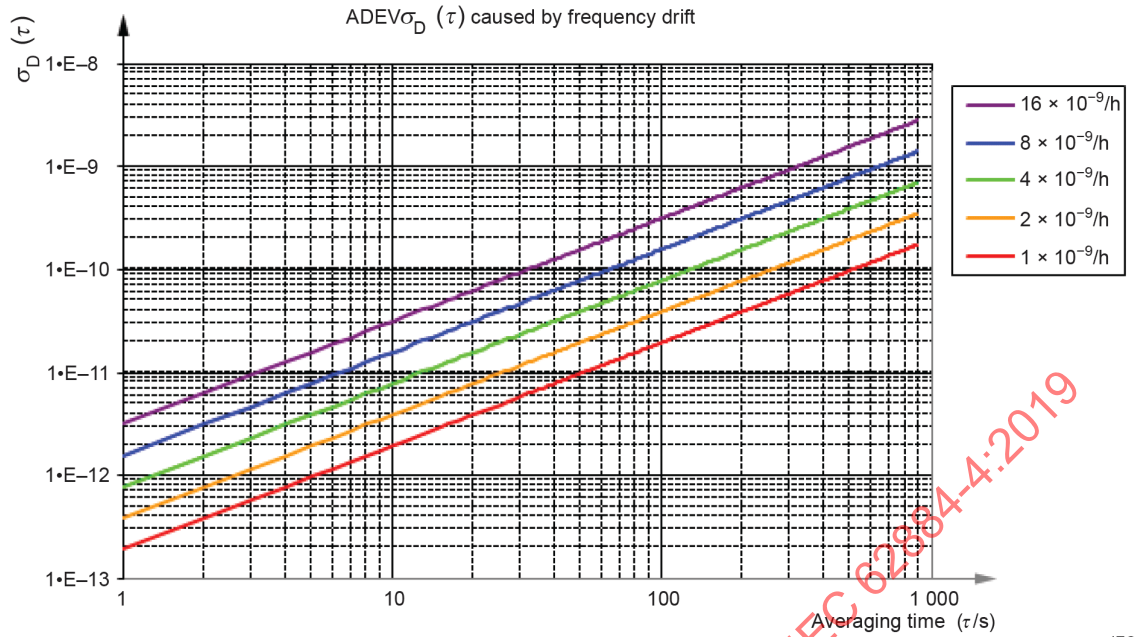


Figure 8 – Impact of a frequency drift to the measured Allan deviation

If after stabilization, the oscillator under test has a remaining frequency drift of $4 \times 10^{-9}/h$, this contributes an error of $8 \cdot 10^{-12}$ to the Allan deviation at $\tau = 10$ s. Assuming that the fully stabilized oscillator would have $\sigma_y(\tau) = 5 \cdot 10^{-12}$, the measurement would yield a value of

$$\sigma_y(\tau)_{\text{meas}} = \sqrt{5^2 + 8^2} \cdot 10^{-12} = 9,43 \cdot 10^{-12}$$

If the stabilization time is increased until a drift of $1 \times 10^{-9}/h$ is reached, the measurement would yield a value of $\sigma_y(\tau)$ of $5,38 \cdot 10^{-12}$, which may be close enough to the real value.

If $\sigma_y(\tau)$ is determined with a maximum relative error of $\pm \varepsilon \%$, then the allowed ADEV of the frequency drift $\sigma_n(\tau)$ shall be

$$\sigma_D(\tau) \leq \sigma_y(\tau) \cdot \sqrt{\frac{|\varepsilon|}{50}}$$

If the impact of the frequency drift is too strong, the use of the Hadamard variance instead of ADEV is recommended.

12.7.3 Supply voltage and control voltage

The power supply unit for the oscillators under test shall provide a low-noise DC voltage, which does not deteriorate the short-term stability.

Especially attention has to be given that the frequency control voltage (if present) source has no impact on the short-term stability as well.

Batteries are a preferred solution for both cases.

If two oscillators are measured against each other, the power supply of both units shall be sufficiently decoupled to avoid any injection locking. It is recommended to use two separate power supply units.

12.7.4 Impact of ambient conditions

The ambient temperature shall be as stable as possible. Thermal isolation against the environment and airflow is highly recommended.

Acoustic noise and vibrations shall be strictly avoided.

Electromagnetic shielding of the oscillators under test may be necessary if the electromagnetic sensitivity of the devices is higher. Also, magnetic fields can have an impact.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62884-4:2019

Bibliography

Rubiola, E., *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators*, Cambridge University Press, (Nov. 2008)

Allan, D.W., *Statistics of Atomic Frequency Standards*; Proc. IEEE, Vo.54, (Feb.1966), pp. 221-230

IEC 60068-1, *Environmental testing – Part 1: General and guidance*

Sullivan, D.B., Allan, D.W., Howe, D.A., Walls, F.I. (Editors): *Characterization of Clocks and Oscillators*; NIST Technical Note 1337, (March 1990)

Riley, W., *Stable32 Frequency Stability Analysis – User Manual*, Version 1.3, Hamilton Technical Services, Beaufort (USA)

Barnes, J.A., *Tables of Bias Functions B1 and B2 for Variances Based on Finite Samples of Processes with Power Law Spectral Densities*; NBS Technical Note 375, (Jan. 1969)

Riley, W.J., *Handbook of Frequency Stability Analysis*; NIST Special Publication 1065, (July 2008)

Vig, J.R., *Quartz Crystal Resonators and Oscillators For Frequency Control and Timing Applications – A Tutorial*, US Army Communications-Electronics Research, Development & Engineering Center Ft, Monmouth/USA, (Jan. 2004)

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62884-4:2019

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62884-4:2019

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	23
1 Domaine d'application	25
2 Références normatives	25
3 Termes, définitions, unités et symboles	25
3.1 Termes et définitions	25
3.2 Unités et symboles.....	26
4 Stabilité à court-terme de la fréquence	26
5 Variance d'Allan (AVAR).....	29
6 Ecart-type d'Allan (ADEV), fluctuations relatives efficaces de fréquence.....	30
7 Variance d'Allan avec recouvrement (OAVAR: <i>Overlapping Allan Variance</i>) et écart-type d'Allan avec recouvrement (OADEV: <i>Overlapping Allan Deviation</i>).....	31
8 Variance d'Allan modifiée (MVAR: <i>Modified Allan Variance</i>) et écart-type d'Allan modifié (MDEV: <i>Modified Allan Deviation</i>).....	32
9 Variance d'Hadamard (HVAR)	32
10 Erreur d'intervalle de temps ($e_{(n)}$).....	32
11 Erreur d'intervalle de temps maximale ($e_{m(n)}$).....	33
12 Mesure de la stabilité à court-terme de la fréquence.....	33
12.1 Généralités	33
12.2 Méthode 1: deux oscillateurs ayant exactement la même fréquence moyenne	34
12.3 Méthode 2: mesure du décalage de la fréquence	35
12.4 Méthode 3: compteur d'intervalle de temps	35
12.5 Méthode 4: méthode du compteur de fréquence directe	36
12.6 Méthode 5: stabilité à court terme calculée par intégration des données de bruit de phase.....	36
12.7 Conditions et précautions d'essai.....	37
12.7.1 Considérations sur le montage d'essai.....	37
12.7.2 Temps de stabilisation	37
12.7.3 Tension d'alimentation et tension de commande	38
12.7.4 Effet des conditions ambiantes	39
Bibliographie.....	40
Figure 1 – Diagramme de phaseur d'une porteuse et de l'amplitude et de la phase non corrélés du bruit.....	26
Figure 2 – Diagramme de phaseur après suppression de l'amplitude du bruit	27
Figure 3 – Différents mécanismes de bruit en fonction du temps.....	28
Figure 4 – Diagramme des écarts-types d'Allan (ADEV) en fonction de τ	31
Figure 5 – Circuit d'essai pour la méthode 1	34
Figure 6 – Circuit d'essai pour la méthode 2	35
Figure 7 – Méthode de mesure du compteur d'intervalle de temps	36
Figure 8 – Effet d'une dérive de fréquence sur l'écart-type d'Allan mesuré	38
Tableau 1– Relation entre les régions dont les pentes du bruit de phase et de l'écart-type d'Allan sont différentes	37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**TECHNIQUES DE MESURE DES OSCILLATEURS PIÉZOÉLECTRIQUES,
DIÉLECTRIQUES ET ÉLECTROSTATIQUES –****Partie 4: Méthodes d'essai de stabilité à court-terme de la fréquence****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 averti de leur existence.

La Norme internationale IEC 62884-4 a été établie par le comité d'études 49 de l'IEC: Dispositifs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques et matériaux associés pour la détection, le choix et la commande de la fréquence.

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

CDV	Rapport de vote
49/1277/CDV	49/1292/RVC

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62884, publiées sous le titre général *Techniques de mesure des oscillateurs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62884-4:2019

TECHNIQUES DE MESURE DES OSCILLATEURS PIÉZOÉLECTRIQUES, DIÉLECTRIQUES ET ÉLECTROSTATIQUES –

Partie 4: Méthodes d'essai de stabilité à court-terme de la fréquence

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62884 décrit les méthodes de mesure et d'évaluation des essais de stabilité à court terme de la fréquence des oscillateurs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques. Son but est d'unifier les méthodes d'essai et d'évaluation de la stabilité à court terme de la fréquence.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils 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 60027 (toutes les parties), *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*

IEC 60050-561, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 561: Dispositifs piézoélectriques, diélectriques et électrostatiques et matériaux associés pour la détection, le choix et la commande de la fréquence*, disponible à l'adresse www.electropedia.org

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

IEC 60617, *Symboles graphiques pour schémas*, disponible à l'adresse <http://std.iec.ch/iec60617>

IEC 60679-1, *Piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators of assessed quality – Part 1: Generic specification* (disponible en anglais seulement)

IEC 62884-1, *Measurement techniques of piezoelectric, dielectric and electrostatic oscillators – Part 1: Basic methods for the measurement* (disponible en anglais seulement)

ISO 80000-1, *Grandeurs et unités – Partie 1: Généralités*

3 Termes, définitions, unités et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60679-1 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>

3.2 Unités et symboles

Les unités, symboles graphiques, symboles littéraux et la terminologie doivent, autant que possible, être issus des normes suivantes:

- IEC 60027;
- IEC 60050-561;
- IEC 60469;
- IEC 60617;
- ISO 80000-1.

4 Stabilité à court-terme de la fréquence

Les fluctuations aléatoires de la fréquence d'un oscillateur sur de courts intervalles de temps [IEV 561-04-16]. En général, la tension de sortie de l'oscillateur est exprimée par l'équation suivante:

$$v(t) = [U_0 + \varepsilon(t)] \cdot \cos \phi(t) = [U_0 + \varepsilon(t)] \cdot \cos [2\pi \cdot F_0 \cdot t + \varphi(t)]$$

où

U_0 est la tension nominale de sortie;

$\varepsilon(t)$ est l'amplitude du bruit;

F_0 est la fréquence moyenne de l'oscillateur;

$\varphi(t)$ est la fluctuation de phase.

Pour la mesure de la stabilité à court terme de la fréquence, l'amplitude du bruit $\varepsilon(t)$ est supprimée par un limiteur, et la tension de sortie de l'oscillateur se simplifie donc comme suit:

$$v(t) = U_0 \cdot \cos \phi(t) = U_0 \cdot \cos [2\pi \cdot F_0 \cdot t + \varphi(t)] = \text{Re}(U_0 \cdot e^{j\phi(t)})$$

où

$\text{Re}(X)$ représente la partie réelle du nombre complexe X .

Ceci peut être représenté dans un diagramme de phaseur (voir Figure 1 ci-dessous).

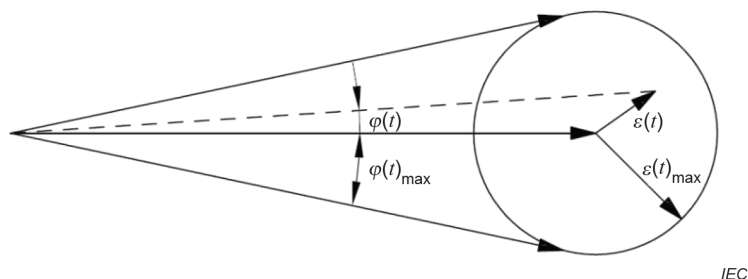


Figure 1 – Diagramme de phaseur d'une porteuse et de l'amplitude et de la phase non corrélés du bruit

Pour la mesure de la stabilité à court terme, l'amplitude du bruit $\varepsilon(t)$ est supprimée par un limiteur et donc le diagramme de phaseur se simplifie comme cela est représenté à la Figure 2.

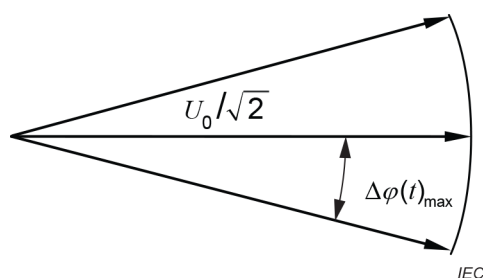


Figure 2 – Diagramme de phaseur après suppression de l'amplitude du bruit

La fréquence instantanée $f(t)$ est la dérivée dans le temps de la fonction de phase.

$$\phi(t) = 2\pi \cdot F_0 \cdot t + \phi(t)$$

c'est-à-dire

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = F_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{2\pi F_0} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \right) = F_0 \cdot (1 + y(t))$$

$$y(t) = \frac{1}{2\pi F_0} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$$

où

$y(t)$ est l'écart relatif de fréquence par rapport à la fréquence moyenne de l'oscillateur F_0 .

Les fluctuations de phase et de fréquence peuvent être différenciées par leur apparence en fonction du temps comme cela est représenté à la Figure 3.



Figure 3 – Différents mécanismes de bruit en fonction du temps

α étant l'exposant de la fluctuation relative de fréquence, c'est-à-dire la pente de la réponse du bruit de phase sur une échelle logarithmique double

$$S_y \sim f^\alpha$$

La stabilité à court terme est généralement considérée sur des intervalles de temps de plus de 0,001 à 1 000 secondes.

$$y_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = \frac{1}{2\pi F_0 \tau} [\varphi(t_k + \tau) - \varphi(t_k)] = \frac{1}{\tau} [x(t_k + \tau) - x(t_k)]$$

$$y_k = \frac{\varphi(t_k)}{2\pi F_0}$$

$x(t)$ est la fluctuation phase-temps, c'est-à-dire la fluctuation aléatoire de phase convertie en temps et mesurée en secondes.

La relation entre $x(t)$ et $y(t)$ est donnée par l'équation suivante:

$$y(t) = \frac{d(x(t))}{dt}$$

La variance classique σ^2 et l'écart-type σ pour M échantillons de y_i sont donnés par l'équation suivante:

$$\sigma^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2$$

en utilisant la valeur moyenne $\bar{y}$.

$$\bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i$$

Une valeur moyenne $\bar{y}$ calculée à partir d'un petit nombre d'échantillons de y_i ne convient pas à l'analyse la stabilité de la fréquence, en raison du manque de convergence de certains types courants de bruits d'horloge. Leur valeur dépend du nombre d'échantillons prélevés.

5 Variance d'Allan (AVAR)

La variance d'Allan $\sigma_y(\tau)$ est la mesure la plus courante de la stabilité dans le temps.

Il s'agit d'une estimation non biaisée de la définition préférentielle dans le domaine temporel de la caractéristique de stabilité à court terme de la fréquence de sortie de l'oscillateur donnée par:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^{M-1} \frac{(y_{k+1} - y_k)^2}{2}$$

où

y_k sont les fluctuations relatives moyennes de fréquence obtenues de manière séquentielle, sans temps mort systématique entre les mesures;

τ est la durée d'échantillon sur laquelle la moyenne des mesures est calculée;

M est le nombre de mesures.

Le niveau de confiance de l'estimation augmente au fur et à mesure de l'augmentation de M .

En variante, la variance d'Allan peut être obtenue à partir d'échantillons de mesure de phase x_i prélevés dans des intervalles de mesure τ .

$$\sigma_y^2(\tau, M) = \frac{1}{2 \cdot (M-2) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-2} (x_{i+2} - 2 \cdot x_{i+1} + x_i)^2$$

6 Ecart-type d'Allan (ADEV), fluctuations relatives efficaces de fréquence

Dans les spécifications particulières, c'est généralement la racine carrée σ , appelée écart-type d'Allan (ADEV), qui est utilisée à la place de la variance d'Allan (AVAR). L'écart-type d'Allan est du même ordre de grandeur que les fluctuations relatives de fréquence à caractériser.

Il s'agit d'une mesure de la stabilité à court terme de la fréquence d'un oscillateur dans le domaine temporel, fondée sur les propriétés statistiques d'un certain nombre de mesures de fréquence, chacune représentant une fréquence moyenne dans un intervalle d'échantillonnage spécifié τ .

$$\sigma_y(\tau, M) = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}$$

En variante, l'écart-type d'Allan (ADEV) peut être obtenu à partir d'échantillons de mesure de phase x_i prélevés dans des intervalles de mesure τ .

$$\sigma_y(\tau, M) = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (M-2) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-2} (x_{i+2} - 2 \cdot x_{i+1} + x_i)^2}$$

NOTE Au paragraphe 2.2.24 de l'IEC 60679-1:1997, ADEV s'appelait fluctuation relative efficace de fréquence.

M doit être suffisamment élevé pour obtenir un intervalle de confiance satisfaisant. Une approximation simple pour l'intervalle de confiance u pour une erreur de $\pm 1 \sigma$ (sans tenir compte du type de bruit) est

$$u = \pm \frac{\sigma_y(\tau)}{\sqrt{M}}$$

L'intervalle de confiance u est généralement représenté sous la forme d'un diagramme en bâtons dans le diagramme des écarts-types d'Allan (ADEV). Sinon, il convient d'indiquer le nombre d'échantillons M dans le rapport d'essai.

ADEV est défini pour certaines valeurs discrètes de τ ou il est représenté de manière graphique comme une fonction des intervalles d'échantillons τ (courbe σ en fonction de τ) avec l'intervalle de confiance pour chaque valeur représenté sous la forme de bâtons d'erreurs. Cette présentation permet d'identifier les différents types de bruits sous-jacents (voir Figure 4).

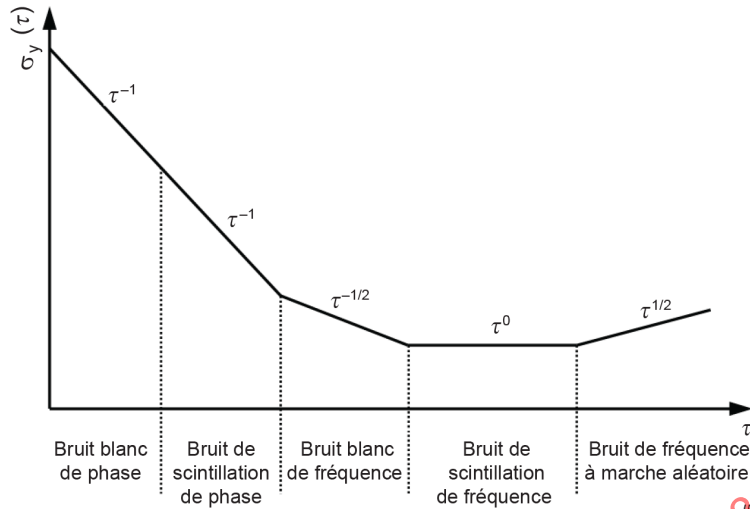


Figure 4 – Diagramme des écarts-types d'Allan (ADEV) en fonction de τ

7 Variance d'Allan avec recouvrement (OAVAR: *Overlapping Allan Variance*) et écart-type d'Allan avec recouvrement (OADEV: *Overlapping Allan Deviation*)

Une forme de variance d'Allan normale $\sigma_y^2(\tau)$, qui utilise au maximum un ensemble de données en formant tous les échantillons possibles avec recouvrement complet à chaque durée d'intégration τ . Elle peut être estimée à partir d'un ensemble de M mesures de fréquence pour une durée d'intégration $\tau = m \cdot t_0$, où m est le facteur de moyenne et t_0 l'intervalle de mesure de base.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2 \cdot (M - 2m + 1)} \sum_{j=1}^{M-2m+1} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} (y_{i+m} - y_i)^2 \right]^2$$

Obtenu à partir des données de phase:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot (M - 2m) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-2m} (x_{i+2m} - 2 \cdot x_{i+m} + x_i)^2$$

C'est généralement la racine carrée $\sigma_y(\tau)$ de ces expressions, appelée écart-type d'Allan avec recouvrement (OADEV), qui est utilisée.

L'écart-type d'Allan avec recouvrement (OADEV) est la mesure universelle la plus couramment utilisée pour la mesure de la stabilité à court terme de la fréquence (même si elle est souvent appelée à tort écart-type d'Allan).

L'intervalle de confiance d'OADEV est meilleur que celui d'ADEV.

8 Variance d'Allan modifiée (MVAR: *Modified Allan Variance*) et écart-type d'Allan modifié (MDEV: *Modified Allan Deviation*)

La variance d'Allan modifiée (MVAR) et l'écart-type d'Allan modifié (MDEV) permettent de distinguer le bruit de scintillation de phase, qui apparaît avec une pente de (τ^{-1}) et le bruit blanc de phase, dont la pente est $(\tau^{-3/2})$ dans le diagramme MDEV. Ils sont estimés à partir d'un ensemble de M mesures de fréquence pour une durée d'intégration $\tau = m \cdot \tau_0$, où m est le facteur de moyenne et τ_0 l'intervalle de mesure de base.

$$Mod_ \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^4 \cdot (M - 3m + 2)} \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left[\sum_{i=j}^{j+m-1} \left[\sum_{k=i}^{i+m-1} (y_{k+m} - y_k) \right] \right]^2$$

Obtenu à partir des données de phase:

$$Mod_ \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2 \cdot (M - 3m + 1) \cdot \tau^2} \sum_{i=1}^{M-3m+1} \left[\sum_{j=i}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2 \cdot x_{i+m} + x_i) \right]^2$$

C'est généralement la racine carrée $Mod_ \sigma_y(t)$, appelée écart-type d'Allan modifié (MDEV), qui est utilisée pour exprimer les résultats.

Pour $m=1$, la variance (écart-type) d'Allan modifiée est égale à la variance (écart-type) d'Allan normale.

L'estimation pour l'intervalle de confiance de MDEV est la même que celle d'ADEV.

9 Variance d'Hadamard (HVAR)

La variance d'Hadamard (HVAR) est une version de la variance d'Allan à trois échantillons. Elle examine la différence seconde des fréquences relatives.

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6 \cdot (M - 2)} \sum_{i=1}^{M-2} (y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i)^2$$

Obtenu à partir des données de phase:

$$\sigma_H^2(\tau) = \frac{1}{6 \cdot (M - 3) \cdot \tau^2} \sum_{j=1}^{M-3} (x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i)^2$$

La variance d'Hadamard (HVAR) rejette la dérive de fréquence linéaire.

10 Erreur d'intervalle de temps ($e_{(n)}$)

L'erreur d'intervalle de temps est une statistique de stabilité courante utilisée dans l'industrie des télécommunications. Elle est définie par

$$e_{(n)} = \sqrt{\frac{1}{M-n} \sum_{i=1}^{M-n} (x_{i+n} - x_i)^2}$$

où

$n = 1, 2, \dots, M-1$ = facteur de moyenne;

M = nombre de points de données de phase.

En l'absence de dérive de fréquence, $e_{(n)}$ est approximativement égale à l'écart-type d'Allan (ADEV) multiplié par le temps d'intégration.

11 Erreur d'intervalle de temps maximale ($e_{m(n)}$)

L'erreur d'intervalle de temps maximale est une mesure d'erreur d'horloge utilisée couramment dans l'industrie des télécommunications. Elle est calculée en déplaçant une fenêtre de n points (avec $n = \tau/\tau_0$) sur les données de phase (erreur de temps) et en trouvant la différence entre les valeurs maximales et minimales pour chaque position de fenêtre. L'erreur d'intervalle de temps maximale est le maximum global de cette erreur d'intervalle de temps sur l'ensemble des données.

$$e_{m(n)} = \max_{1 \leq k \leq (M-n)} \left[\max_{k \leq i \leq (k+n)} (x_i) - \min_{k \leq i \leq (k+n)} (x_i) \right]$$

où

$n = 1, 2, \dots, M-1$ = facteur de moyenne;

$k = 1 \dots (M-n)$ = indice de la fenêtre de n points qui se déplace sur les N points de données de phase x_i .

L'erreur d'intervalle de temps maximale est une mesure de l'écart-type maximal du temps d'une horloge et elle est donc très sensible aux valeurs extrêmes, aux valeurs transitoires ou aux valeurs aberrantes.

12 Mesure de la stabilité à court-terme de la fréquence

12.1 Généralités

Les procédures d'essai et de mesure doivent être effectuées conformément à la spécification particulière applicable.

En cas de divergence pour quelque raison que ce soit, les documents doivent être classés dans l'ordre de priorité suivant:

- spécification particulière;
- spécification intermédiaire;
- spécification générique;
- tout autre document international (par exemple de l'IEC) auquel il est fait référence.

Le même ordre de priorité doit s'appliquer aux spécifications nationales équivalentes.

En principe, les mesures de stabilité du domaine temporel sont réalisées en tenant compte d'une source de référence ayant une meilleure stabilité que l'unité en essai.