

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Overhead lines – Methods for testing self-damping characteristics of conductors

Lignes électriques aériennes – Méthodes d'essai des caractéristiques d'auto-amortissement des conducteurs

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

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

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you 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It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

Liens utiles:

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

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI 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.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Overhead lines – Methods for testing self-damping characteristics of conductors

Lignes électriques aériennes – Méthodes d'essai des caractéristiques d'auto-amortissement des conducteurs

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

W

ICS 29.060; 29.240.20

ISBN 978-2-8322-1056-7

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Symbols and units	8
5 Test span arrangements	8
5.1 General	8
5.2 Span terminations	9
5.3 Shaker and vibration control system	10
5.4 Location of the shaker	12
5.5 Connection between the shaker and the conductor under test	12
5.5.1 General	12
5.5.2 Rigid connection	13
5.5.3 Flexible connection	14
5.6 Transducers and measuring devices	14
5.6.1 Type of transducers	14
5.6.2 Transducer accuracy	15
6 Conductor conditioning	16
6.1 General	16
6.2 Clamping	16
6.3 Creep	16
6.4 Running-in	16
7 Extraneous loss sources	16
8 Test procedures	17
8.1 Determination of span resonance	17
8.2 Power Method	18
8.3 ISWR Method	20
8.4 Decay method	22
8.5 Comparison between the test methods	24
8.6 Data presentation	25
Annex A (normative) Recommended test parameters	27
Annex B (informative) Reporting recommendations	28
Annex C (informative) Correction for aerodynamic damping	31
Annex D (informative) Correction of phase shift between transducers	33
Bibliography	34
Figure 1 – Test span for conductor self-damping measurements	9
Figure 2 – Rigid clamp	10
Figure 3 – Electro-dynamic shaker	11
Figure 4 – Layout of a test stand for conductor self-damping measurements	12
Figure 5 – Example of rigid connection	13
Figure 6 – Example of flexible connection	14
Figure 7 – Miniature accelerometer	15

Figure 8 – Resonant condition detected by the acceleration and force signals	18
Figure 9 – Fuse wire system disconnecting a shaker from a test span; this double exposure shows the mechanism both closed and open.	23
Figure 10 – A decay trace	24
Figure B.1 – Example of conductor power dissipation characteristics	29
Figure B.2 – Example of conductor power dissipation characteristics	30
Table 1 – Comparison of laboratory methods	25
Table 2 – Comparison of Conductor Self-damping Empirical Parameters	26
Table C.1 – Coefficients to be used with equation C-3	32

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**OVERHEAD LINES – METHODS FOR TESTING SELF-DAMPING
CHARACTERISTICS OF CONDUCTORS**

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 62567 has been prepared by IEC technical committee 7: Overhead electrical conductors.

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

FDIS	Report on voting
7/629/FDIS	7/630/RVD

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

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

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013

INTRODUCTION

Conductor self-damping is a physical characteristic of the conductor that defines its capacity to dissipate energy internally while vibrating. For conventional stranded conductors, energy dissipation can be attributed partly to inelastic effects within the body of the wires (hysteresis damping at the molecular level) but mostly to frictional damping, due to small relative movements between overlapping individual wires, as the conductor flexes with the vibration wave shape.

Self-damping capacity is an important characteristic of the conductors for overhead transmission lines. This parameter is a principal factor in determining the response of a conductor to alternating forces induced by the wind.

As the conductor self-damping is generally not specified by the manufacturer, it can be determined through measurements performed on a laboratory test span. Semi-empirical methods to estimate the self-damping parameters of untested conventional stranded conductors are also available but often lead to different results. Further, a great variety of new conductor types is increasingly used on transmission lines and some of them may have self-damping characteristics and mechanisms different from the conventional stranded conductors.

A "Guide on conductor self-damping measurements" was prepared jointly in the past by the IEEE Task Force on Conductor Vibration and CIGRE SC22 WG01, to promote uniformity in measuring procedures. The Guide was published by IEEE as Std. 563-1978 and also by CIGRE in Electra n°62-1979.

Three main methods are recognized in the above documents and divided into two main categories which are usually referred to as the "forced vibration" and "free vibration" methods.

The first forced vibration method is the "Power [Test] Method" in which the conductor is forced into resonant vibrations, at a number of tunable harmonics, and the total power dissipated by the vibrating conductor is measured at the point of attachment to the shaker.

The second forced vibration method, known as the "Standing Wave Method" or more precisely "Inverse Standing Wave Ratio [Test] Method" (ISWR), determines the power dissipation characteristics of a conductor by the measurement of antinodal and nodal amplitudes on the span, for a number of tunable harmonics.

The free vibration method named "Decay [Test] Method" determines the power dissipation characteristics of a conductor by measuring, at a number of tunable harmonics, the decay rate of the free motion amplitude following a period of forced vibration.

Several laboratories around the world have performed conductor self-damping measurements in accordance with the above mentioned Guide. However, large disparities in self-damping predictions have been found among the results supplied by the various laboratories. The causes of these disparities have been identified into five main points:

- 1) The different test methods adopted for the self-damping measurements.
- 2) The different span end conditions set up in the various test laboratories (rigid clamps, flexure members, etc.)
- 3) The different types of connection between the shaker and the conductor (rigid or flexible) and the different location of the power input point along the span.
- 4) The different conductor conditioning before the test (creep, running in, etc.)
- 5) The different manufacturing processes of the conductor.

OVERHEAD LINES – METHODS FOR TESTING SELF-DAMPING CHARACTERISTICS OF CONDUCTORS

1 Scope

The scope of this Standard is to provide test procedures based on the above-mentioned documents and devoted to minimize the causes of discrepancy between test results, taking into consideration the large experience accumulated in the last 30 years by numerous test engineers and available in literature, including a CIGRE Technical Brochure specifically referring to this standard (see Bibliography).

This Standard describes the current methodologies, including apparatus, procedures and accuracies, for the measurement of conductor self-damping and for the data reduction formats. In addition, some basic guidance is also provided to inform the potential user of a given method's strengths and weaknesses.

The methodologies and procedures incorporated in this Standard are applicable only to testing on indoor laboratory spans.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-466:1990, *International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 466: Overhead lines*

IEEE Std. 563-1978, *IEEE Guide on conductor self-damping measurements*

IEEE Std. 664-1993, *IEEE Guide for laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductors*

3 Terms and definitions

For the purpose of this International Standard, the definitions of the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) apply, in particular IEC 60050-466. Those which differ or do not appear in the IEV are given below.

3.1

conductor self-damping:

the self-damping of a conductor subjected to a tensile load T is defined by the power P_c dissipated per unit length by the conductor vibrating in a natural mode, with a loop length $\lambda/2$, an antinode displacement amplitude Y_0 and a frequency f

3.2

node

in a vibrating conductor, nodes are the points in which the vibration amplitude is the smallest

3.3

anti-node

in a vibrating conductor, anti-nodes are the points in which the vibration amplitude is the greatest

4 Symbols and units

A	forcing point transverse acceleration, single amplitude	m/s^2
a_n	vibration amplitude at the n^{th} node	mm
D, d	diameter of the conductor	m
δ	logarithmic decrement	
E_{diss}	total energy dissipated by the vibrating conductor	Joule
E_{kin}	total kinetic energy of the vibrating conductor	Joule
F	single amplitude exciting force	N
f	vibration frequency	Hz
h	non dimensional viscous damping coefficient	
L	free length of the test span	m
λ	wavelength	m
$\lambda/2$	loop length	m
m	conductor mass per unit length	kg/m
n	number of vibrating loops in the span	
n_c	number of vibration cycles	
n_{kj}	number of loops between loop k and loop j	
P	power dissipated by the conductor	mW
P_c	power dissipated by the conductor per unit length	mW/m
P_j	power dissipated by the conductor, measured at loop j	mW
P_k	power dissipated by the conductor, measured at loop k	mW
θ_a	phase angle between force and acceleration	deg
θ_d	phase angle between force and displacement	deg
θ_v	phase angle between force and velocity	deg
S_j	Inverse standing wave ratio (ISWR) at loop j	
S_k	Inverse standing wave ratio (ISWR) at loop k	
S_n	Inverse standing wave ratio (ISWR) at the n^{th} loop	
T	conductor tension	N
V	forcing point transverse velocity, single amplitude	m/s
V_n	vibration velocity at the n^{th} antinode – peak value	m/s
ω	circular frequency	rad
Y_a	single antinode amplitude at the first decay cycle	mm
Y_f	vibration single amplitude at the driving point	mm
Y_n	vibration single amplitude at the n^{th} antinode	mm
Y_o	vibration single amplitude at antinode	mm
Y_z	single antinode amplitude at the last decay cycle	mm
$\sqrt{Tm}$	characteristic impedance of the conductor	N s/m

5 Test span arrangements

5.1 General

The laboratory test spans for conductor self-damping measurements are generally built indoor in still air areas where the variation of ambient temperature is minimal or can be suitably controlled. Ambient temperature variations up to 0,2 °C/h are considered acceptable.

The free span length L should preferably be at least ten times longer than the longest loop length used in the tests. For consistent results, a span length greater than 40m is recommended but satisfactory results can be obtained with spans in the range of 30m. For shorter spans, the influence of the termination losses and the distribution of the tensile load between the conductor strands may be critical.

The test span shall be strung between two massive blocks with a weight not lower than 10 per cent of the ultimate tensile strength of the largest conductor to be tested. Each block should be a single piece, generally made of steel reinforced concrete, and preferably be common or solidly connected with the concrete floor. The stiffness of these blocks should be as high as possible in order to minimize the losses and provide the maximum reflexion of the waves.

An example of laboratory test span layout is shown in Figure 1.

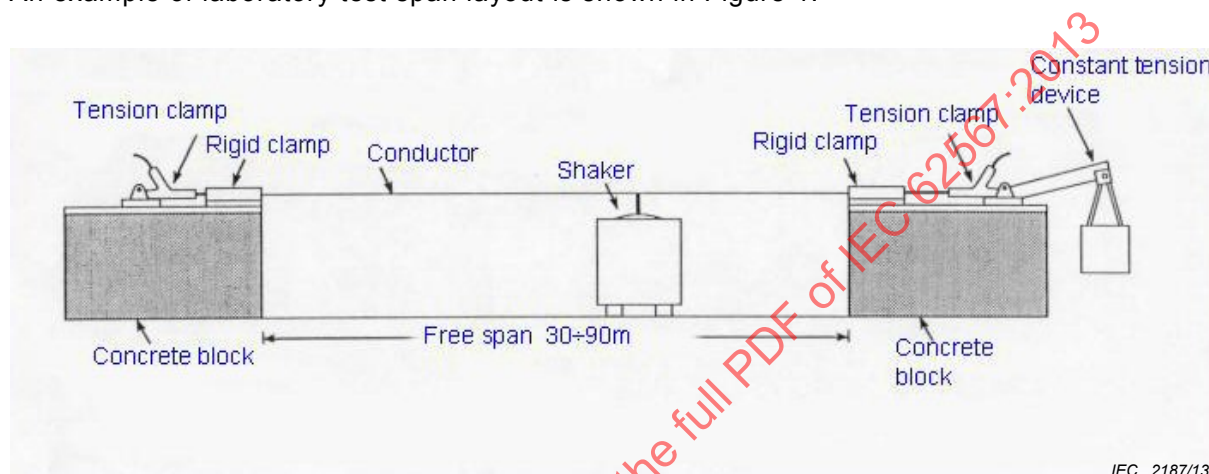


Figure 1 – Test span for conductor self-damping measurements

5.2 Span terminations

The test span should have the capability of maintaining a constant conductor tension. Hydraulic and pneumatic cylinders, springs, threaded bars and pivotal balance beams have been used successfully.

A rigid non-articulating square faced clamp similar to that shown in Figure 2 shall be used to minimize energy dissipation by the termination fixture. An example of a typical termination design is also provided in Figure 3 of IEEE Std. 563-1978. Terminating fixtures and rigid clamps shall be of sufficient stiffness to ensure that energy losses do not occur beyond the extremities of the free span.

Rigid end clamps (also called heavy clamps), equal to or up to ten times longer than the conductor diameters and with groove diameters not exceeding by more than 0,25 mm the diameter of the conductor, have given good results. Generally, the clamp groove is dimensioned for the biggest conductor to be tested and a set of sleeves is made available to accommodate smaller conductor diameters.

The rigid clamps shall not be used to maintain tension on the span. However, the rigid clamps, once closed, will retain some load. Consequently, the tension devices cannot fully control the conductor tension. Subsequent adjustments, if necessary, shall be performed only after releasing the rigid clamps.

It is very important to have a good alignment between tension clamps and rigid clamps in the horizontal direction. In the vertical direction, in order to eliminate the static bending of conductor at the rigid clamp departure, it may be necessary to incline the rigid clamps following the catenary angle. This practice, when necessary, would avoid any change in tensile load when closing or opening the clamps.



IEC 2188/13

Figure 2 – Rigid clamp

On a laboratory test span, normally, the wave shape of the end loops differs from the shape of the free loops and the end loop dissipation is greater than free loop dissipation. As the energy dissipation of the conductor is, to a first approximation, proportional to the square of its curvature, it is easy to explain the large dissipation of energy near the end of the span. The effect is more noticeable at low frequencies where the end loops constitute a higher proportion of the total number of loops. It further restricts the usefulness of very short indoor test spans.

Preference should be given to a test arrangement which would minimize energy dissipation at the span end terminations. If there is uncertainty about this, the energy should be assessed and eventually accounted for, unless using the ISWR method.

The termination losses may be minimized by terminating the conductor by a flexure member, such as a wide, flat bar of sufficient strength to accommodate the span tension but also flexible enough in the vertical direction to allow it to bend readily and to avoid bending the conductor through a sharp radius of curvature where it would normally enter the clamp. This procedure has the undesirable effect, though, of including the end termination in the test span. An example of flexible cantilever is provided in Figure 4 of IEEE Std. 563-1978.

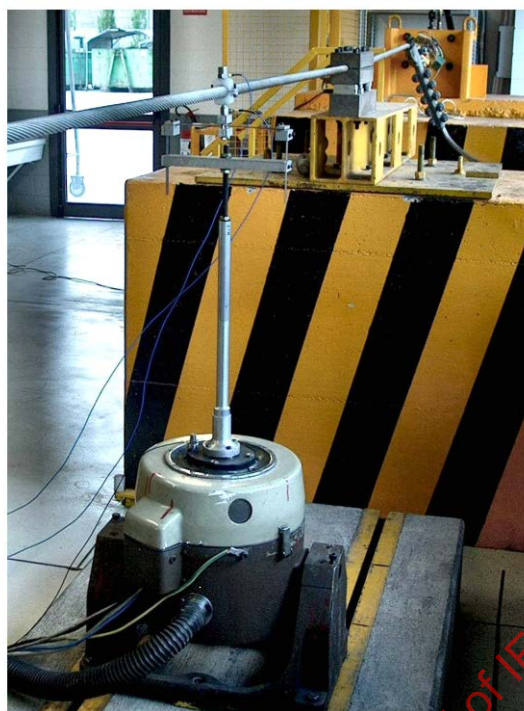
5.3 Shaker and vibration control system

The vibration exciter used for these tests is generally an electro-dynamic shaker (Figure 3). Hydraulic actuators are also used.

Modal shakers having light armature and linear bearings can be used to excite resonance modes of the conductor with minimal distortion of the natural mode shape and to produce virtually zero stiffness and zero damping in the direction of the movement.

The shaker shall be able to provide a suitable sinusoidal force to the test span. The alternating movement provided by the shaker shall be simple harmonic with a distortion level of less than 5 %.

Vibration amplitude and frequency shall be controllable to an accuracy of ± 2 % and frequency shall be stable within 0,001 Hz.

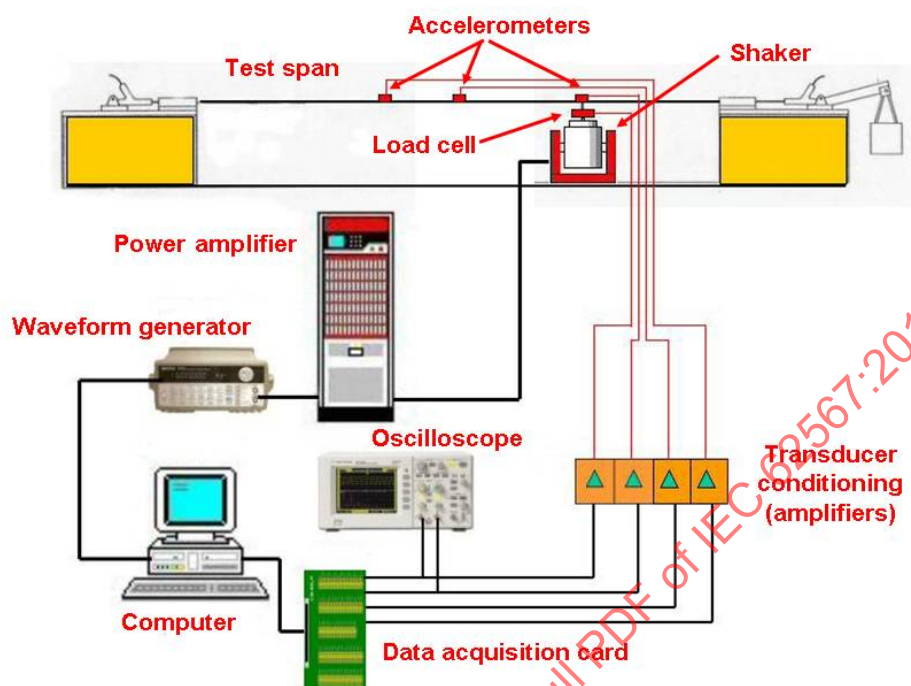


IEC 2189/13

Figure 3 – Electro-dynamic shaker

The use of computers and dedicated software for the shaker control and for the data acquisition, reduction and elaboration is considered as a normal practice.

An example of the layout for the conductor self-damping measurements, fully equipped to perform the conductor self-damping measurements with the methods outlined in this standard, is shown in Figure 4.



IEC 2190/13

Figure 4 – Layout of a test stand for conductor self-damping measurements

5.4 Location of the shaker

The most used position of the shaker is within one of the end loops of the span, but not necessarily at an anti-node. This location also makes it possible to excite greater amplitudes than the maximum travel of the shaker even if a rigid connection between the shaker and the conductor is used.

The near end location makes it possible to excite odd numbers of loops, as well as even. Although some span symmetry may be lost due to the presence of the shaker, a centre free loop will be present for the odd loop excitations. This often makes it possible to conduct amplitude measurements within the centre loop without being forced to relocate the transducer for each frequency investigated.

The shaker should be located at a distance from the rigid clamp which is less than the calculated loop length of the span at the highest test frequency. This will ensure that whole loops will not be forced to occur between the shaker and the nearest span extremity, because this may cause erroneous test results. It is preferably to identify a location of the shaker that can be maintained unchanged for the whole test on one conductor. A wide range of conductor sizes has been tested with the shaker at a fixed distance from the end clamp of 0,8 to 1,2 m.

5.5 Connection between the shaker and the conductor under test

5.5.1 General

In the artificial excitation of the indoor test span, the armature of the shaker can be connected to the test span either rigidly or by the use of a flexible connection. In any case, the fixture shall be as light as possible in order to avoid the introduction of unwanted inertial forces and to prevent that, at the higher frequencies, the force needed to vibrate that mass plus the shaker armature will be beyond the capability of the shaker system.

To avoid distortion of the mode shape in the conductor vibration, the clamp mass must be as low as possible and, in resonance conditions, the phase between force and acceleration, at the driving point, must be as close as possible to 90° . In this case, the force applied by the shaker has its minimum and equals the damping force. For angles different from 90° , inertia and elastic components are also present and can give rise to distortions.

The shaker connection shall be instrumented for force and vibration level measurements. The latter is generally made using accelerometers but also velocity transducers and displacement transducer can be used.

5.5.2 Rigid connection

Rigidly fixing the shaker to the conductor (Figure 5) has a tendency to create distortion in the standing wave vibration. Care should be taken when establishing span resonance to minimize this effect.



IEC 2191/13

Figure 5 – Example of rigid connection

Using a rigid connection, the vibration exciter becomes a part of the system being measured; if the mass of the moving system within the shaker is high, conductor distortion is induced in that portion of the span where the shaker is attached.

This changes the length of the loop to which the shaker is attached and is indicative of localized inertial and damping effects. The effect of attaching the shaker to the conductor should not change the loop length in which the attachment is made by more than 10 %. An attached mass of less than 20 % of the mass per unit length of the conductor is normally satisfactory. However, this can only be achieved using modal shakers or adopting a flexible connection as described in the following paragraph. Otherwise, the ISWR method, that is not sensitive to localized effects at the shaker as well as in end loops, should be used.

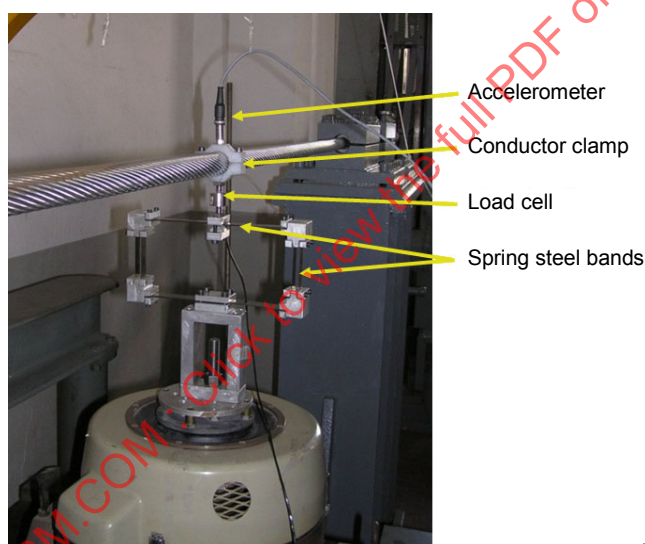
5.5.3 Flexible connection

Spring steel bands are often used to reduce distortion of the loop where the shaker is attached and to allow different conductor amplitudes at the drive point than the amplitude of the shaker. Suitable flexibility should be present in all directions in order to:

- 1) uncouple the shaker from the conductor so that possible misalignment between the centre of the shaker table and the point of attachment of the conductor can be accommodated and will not risk to damage the shaker armature;
- 2) prevent the shaker table from being driven by the conductor in resonant conditions where conductor vibration amplitude can be higher than the shaker amplitude;
- 3) avoid the introduction of additional inertial and damping effects due to the shaker armature and conductor attachment.

The stiffness of the springs in the excitation direction should be empirically determined in accordance with the conductor stiffness and mass. The spring should be soft enough to uncouple the conductor from the shaker but still able to transmit to the conductor enough force to excite vibration at the required amplitude.

An example of a flexible connection equipped with force and acceleration transducers is shown in Figure 6.



IEC 2192/13

Figure 6 – Example of flexible connection

5.6 Transducers and measuring devices

5.6.1 Type of transducers

The following transducers are used for the self-damping measurements:

- A. Load cells: to measure the force transmitted by the shaker to the conductor.
- B. Accelerometers, velocity transducers and displacement transducers: to measure the level of vibration.

In addition, strain gauges are sometimes used to control the tension of the individual wires of the outer layer and temperature probes may be used for monitoring the ambient and/or conductor temperature.

There is no limitation or preference regarding the working principle of the transducers, providing their mass is small enough in order not to interfere with the system. Miniature load

cells and miniature accelerometers (Figures 6, 7 and 8) are most commonly used for in-span measurements.

Contactless displacement transducers (laser or eddy current based) have also been used for measurements of node and antinode amplitudes, especially with small and light conductors.

Using transducers having a different working principle, for example a piezoelectric accelerometer and a strain gauge load cell, it is possible to have a phase shift between the two signals due to the different response time of the two transducers. This phase shift is frequency dependant and shall be taken into account in the determination of the phase angle between the measured quantities at each tunable vibration mode. A procedure to calculate the phase shift at each test frequency is presented in Annex D.

In a computer controlled test system, the data acquisition software can be set up to perform automatically the phase shift correction. In any case, for the sake of simplicity, it is recommended to use transducers having the same working principle so that no phase shift correction will be required.



IEC 2193/13

Figure 7 – Miniature accelerometer

5.6.2 Transducer accuracy

All the transducers used for the tests shall be checked for phase accuracy and linearity over the anticipated testing frequency range. The transducers shall be mounted on a shaker table and a small mass shall be rigidly attached on the force transducer. The transducers shall be shaken at all proposed test frequencies, and at approximately the amplitudes chosen for the conductor test. Correct operation of the transducers is demonstrated by two criteria: (1) the phase angle between force and acceleration (or displacement) should be at or near zero degrees and (2) the ratio of force to acceleration (F/A) should be constant at all frequencies and amplitudes. F/A , is the effective mass installed on the force transducer. If velocity transducers are used, the phase angle between force and velocity should be at or near 90 degrees and acceleration can be obtained by the derivative of the velocity signal acquired.

Deviations of the phase values up to ± 5 degrees are acceptable.

The test verifies (1) that there is no spurious phase shifting due to effects of fixtures, transducers and signal conditioning devices and (2) that the transducers are linear with respect to frequency and vibration amplitude. This is important especially for the transducers used for the measurement of the power imparted to the conductor by the shaker.

6 Conductor conditioning

6.1 General

Unless otherwise specified, the conductor under test shall be unused.

Before the installation on the test span, any looseness in the conductor layers should be worked out.

After that, the conductor is clamped and should be conditioned as described in the following.

6.2 Clamping

The terminations of the conductor under test can be made using compression dead end joints, or bolted dead end clamps. Wedge type tension clamps and potted (resin) terminations can also be used.

If compression end fittings are used, then they shall be reverse compressed (starting from the clamp mouth rather than from the end of the conductor) to prevent looseness from being worked back into the span.

6.3 Creep

After the installation of an unused conductor on the test span, a pre-stretching shall be performed in order to accomplish most of the metallurgic creep and the geometrical settlement of the conductor and distribute the tensile load more uniformly in the conductor strands. The pre-stretching consists in keeping the conductor at a tension equal or higher than the test tension for period of time, generally 12 to 48 hours. The tension to be applied during the preconditioning shall be established in accordance with the service parameters of the conductor.

The preconditioning will be considered sufficiently settled when the tension of the still conductor does not change more than 3 to 4 % in 30 minutes at constant room temperature.

The conductor shall be submitted to this preconditioning without clamping it into the end rigid clamps.

6.4 Running-in

When a conductor is unused its self-damping is not constant but varies with the accumulating vibration cycles. This variation may be in the order of 20-40 % during the first 30-60 minutes of vibration. A "running-in" is considered necessary to stabilize the conductor self-damping. This consists of vibrating the conductor at a fixed frequency, or with a swept frequency in a limited frequency range, at the maximum amplitude considered for the self-damping measurements. Power measurements should be performed every 15 minutes and the running in will be considered completed when the difference between two consecutive measurements will not exceed 3 to 4 %.

7 Extraneous loss sources

Apart of the main energy dissipation due to the vibration of the conductor at a natural frequency, some other energy losses take place in the test span. The source of these

extraneous losses has to be recognized and, if possible, eliminated or reduced to the minimum. They are:

- Conductor deformation induced by the device used to force conductor vibration.
- Conductor deformation at span extremities due to the clamping system.
- Aerodynamic losses due to the conductor vibration in still air. The contribution of the aerodynamic damping to total damping may not be negligible at low frequency but generally it is reduced practically to zero at high frequency. Aerodynamic losses can be calculated according to the method reported in Annex C and subtracted, if required, from the measured losses.
- Torsional, longitudinal and transversal motions other than the driven motion. Torsional and longitudinal motions may be induced through coupling with the forced transversal motion. Test frequencies where this occurs shall be skipped. Torsional modes can also be excited by the asymmetry of the conductor and by misalignment of the shaker. Transversal motions at low frequency can be excited by air movements or by accidental contact with the conductor. The vibrating conductor shall be visually controlled to verify the absence of these kinds of motion.
- Longitudinal support damping due to the insufficient rigidity of the terminating fixtures which results in the transmission of conductor vibration power into the tensioning apparatus where some of that power may be dissipated.

8 Test procedures

8.1 Determination of span resonance

All the test methods described in this Standard require that the conductor should reach a resonant condition.

To find the system resonance, the shaker is operated at a trial power setting and the frequency control is adjusted to provide for maximum displacement of the conductor at an antinode. Then the shaker power controls are adjusted to provide the correct loop amplitude/velocity at an antinode. Frequency is fine-tuned to maximize loop amplitude. If necessary, the shaker power is again adjusted to provide the desired loop amplitude. System resonance is found when adjustments of the frequency control no longer results in an increase in loop amplitude. Testing is performed when the standing wave is stable at the correct amplitude/velocity.

An alternative method make use of the measurements/monitoring of force and acceleration (or velocity) and their relative phase angle at the shaker attachment. The frequency is tuned until the phase angle between the force and the acceleration signals is stable at or near 90° (see Figure 8) or the phase angle between the force and the velocity signals is stable at or near zero degrees. In practice, the force signal may be distorted and filtering will be needed to obtain a valid phase measurement.

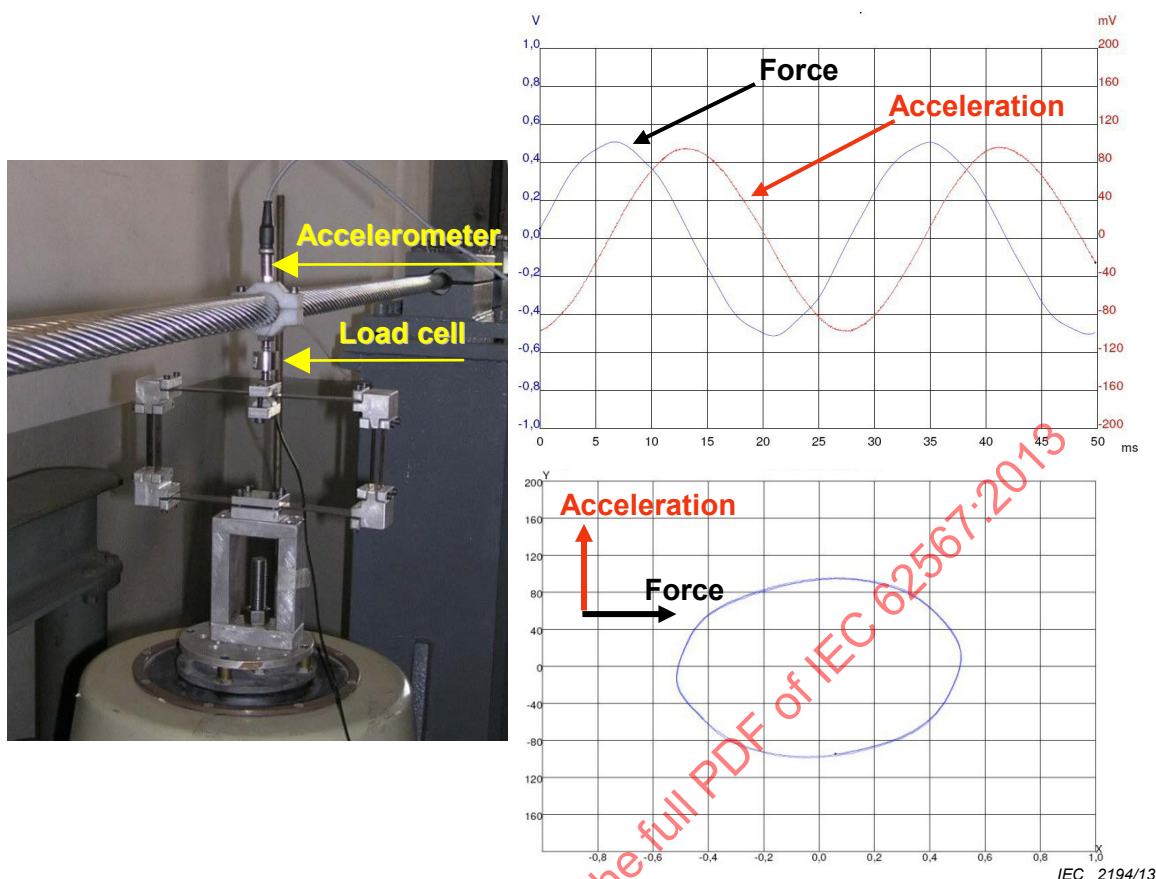


Figure 8 – Resonant condition detected by the acceleration and force signals

The vibration frequencies to be considered during the tests should cover the spectrum corresponding to a wind velocity range of 1 to 7 m/s (3,6 to 25,2 km/h) unless otherwise specified. Equation (A.1), in Annex A, can be used to convert wind velocity into vibration frequency. It is recommended that measurements be made at each tunable frequency; this criterion may be modified in accordance with the results desired by the end user but, in any case, minimum of 10 test frequencies shall be utilized.

The natural frequencies of the span may be estimated by using the following equation:

$$f = \frac{n}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (1)$$

Conductor stiffness and the influence of the shaker on the span may modify the vibration modes, and thereby change the natural frequencies. However, equation (1) provides a good starting point for finding resonances.

8.2 Power Method

The power method determines the dissipation characteristics of a conductor by the measurement of the force and the vibration level imparted to the test span at the point of attachment to the shaker.

The conductor, tensioned on the experimental span, is forced to vibrate at one of its resonant frequencies, with both amplitude and frequency being controlled by means of the driving system.

Due to the general non-linear characteristics of the conductor response it may not always be possible to produce pure sinusoidal signals at resonance. The frequency components of the signal, other than the fundamental component, shall be filtered out. If analog filtering is used, the signals of both the force and the vibration level transducers shall be filtered and the filters shall be matched for phase and gain. Alternatively, a suitable two-channel Fast Fourier Transform Analyser or equivalent software may be used.

When a stationary condition is reached, the energy introduced by the shaker to the conductor, over one cycle of vibration, is equal to that dissipated by the span. The energy introduced in the conductor, and largely dissipated by its self-damping mechanism, is determined by measuring the force F acting between the conductor and the shaker and the displacement of the driving point Y_f . The result is then given by the formula:

$$E_{\text{diss}} = \pi \times F \times Y_f \times \sin \theta_d \quad (2)$$

The test procedure is as follows:

- Establish span resonance beginning at the first tunable harmonic within the prescribed frequency range (minimum of ten loops).
- Measure and record the vibration frequency.
- Locate a mid-span antinode.
- Adjust the antinodal amplitude to the prescribed level and record this value.
- Record the input force and acceleration (or velocity or displacement) and their phase angle differential at the driving point.
- Measure and record the free loop length.
- Proceed to the next tunable harmonic frequency.
- Continue this procedure until the upper end of the required frequency range has been reached.
- Following the acquisition of data, the power dissipated by the conductor can be calculated from the following equation:

$$P = \frac{I}{4 \times \pi \times f} \times F \times A \times \sin \theta_a \quad (3)$$

If a velocity transducer is used for the data acquisition, then the power dissipated by the conductor can be calculated from the following equation:

$$P = \frac{I}{2} \times F \times V \times \cos \theta_v \quad (4)$$

If a displacement transducer is used for the data acquisition, then the power dissipated by the conductor can be calculated from the following equation:

$$P = \pi \times F \times f \times Y_f \times \sin \theta_d \quad (5)$$

It should be noted that, in all these cases, the phase angle might have to be corrected due to phase shifting within the transducers as discussed in 5.6.1.

The calculated power can be plotted vs. the antinode amplitude or frequency (see Annex B).

The non-dimensional viscous damping coefficient, h , can be calculated by dividing the energy introduced in the conductor E_{diss} ($=P/f$) by the total kinetic energy of the conductor E_{kin} .

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{\text{diss}}}{E_{\text{kin}}} \quad (6)$$

E_{kin} is given by the formula:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{4} mL\omega^2 Y_0^2 \quad (7)$$

The power method is simple and requires a limited number of measurement points. However, all the extraneous dissipation is part of the total calculation of the conductor self-damping and special care must, therefore, be devoted to reduce all these extraneous loss sources or to account for them. For example, it is comparatively easy to determine the total amount of vibration energy dissipation in the span, because it is equal to the total amount of energy introduced into the system. This would be quite sufficient for determining the self-damping of the conductor if all the loops of the span had equal energy dissipation. Unfortunately, the loops at the ends of the span and at the shaker connection behave differently from the rest of the span, having an energy dissipation that can be much higher than that of all of the rest of the span.

The end losses can be determined by comparing the power inputs for two spans of different lengths identically terminated. Where it is not convenient to change the span length, it is necessary to minimize these losses or to use the ISWR method.

8.3 ISWR Method

The ISWR method determines the power dissipation characteristics of a conductor by the measurement of nodal and antinodal amplitudes on the span at each tunable harmonic.

To understand the principle involved in this method, it is necessary to trace the waves leaving the vibration shaker as they are reflected at the span ends.

For this argument, we may assume that the shaker is attached near one of the span terminations. Impulses induced by the shaker will travel to the far end of the span to return as reflected waves.

If no losses are present in the system, the incident and reflected waves are equal. Perfect nodes will be formed where the two waves meet and pass. That is: zero motion will exist at the nodes. The anti-nodes will have an amplitude equal to the sum of the incident and reflected waves. If losses are present in the system, however, motion will appear at the nodes. The amplitude of this motion will be the difference between the incident and the reflected waves. The ratio between nodal amplitude and anti-nodal amplitude is indicative of the dissipation within the system. Where low span losses are present, the very fine measurements, necessary for determining nodal amplitude, can be a problem.

The ISWR testing procedure is as follows:

- Establish span resonance beginning at the first tunable harmonic within the prescribed frequency range (minimum of ten loops).
- Measure and record the vibration frequency
- Locate a free antinode and an adjacent node.
- Adjust the antinodal amplitude to the prescribed level and record this value.
- Measure and record the nodal amplitude.
- Measure and record the free loop length.
- Measure node and antinode amplitudes in a second location.
- Proceed to the next tunable harmonic frequency.

- Continue this procedure until the upper end of the required frequency range has been reached.

Following the acquisition of data, the total power dissipated by the conductor can be calculated from the following equation:

$$P = \sqrt{T \times m} \times \frac{V_n^2}{2} \times \left(\frac{a_n}{Y_n} \right) \quad (8)$$

where

$\sqrt{T \times m}$	is the wave or characteristic impedance (at high frequencies this may be modified due to the effect of the stiffness of the conductor).
$V_n = \omega Y_n$	is the vibration velocity at the n^{th} antinode
$S_n = \frac{a_n}{Y_n}$	is the inverse standing wave ratio ISWR at the n^{th} loop.

Performing two measurements in two different loops j and k , the power dissipated by the conductor section between these loops will be:

$$P = P_k - P_j \quad (9)$$

And the power dissipated per unit length P_c will be:

$$P_c = \frac{P_k - P_j}{n_{kj} \frac{\lambda}{2}} \quad (10)$$

where n_{kj} is the number of loops between nodes k and j , and λ is the wavelength.

The value of the non-dimensional viscous damping coefficient is given by:

$$h = \frac{S_k - S_j}{\pi \times n_{kj}} \quad (11)$$

where S_k and S_j are the ISWR respectively at loop k and j .

Ideally, the two nodes should be as far apart as practical to maximize the difference in their amplitudes relative to the measurement error.

The advantage of this method is that the measured dissipation relates to the considered portion of conductor only; therefore, the estimated self-damping value is not affected by the already mentioned influence of span ends and shaker-conductor connection.

The main problems that the method presents are the correct estimation of the node positions and the measurement of the node amplitude of vibration, which can have a very small value on the order of a few micrometers; an error in the measurement of the node vibration amplitude significantly changes the self-damping estimation.

Two methods can be suggested to improve the accuracy of these measurements.

The first considers to measure in many points around one node and to fit the measurements with an interpolating function: in this way, it is not necessary to know exactly the position of

the node (to place the transducers) and the minimum of the interpolating function gives the node amplitude.

The second way would be to use a mathematical model well representing the real deflection shape of the vibrating conductor. This would allow reducing the number of transducers (only two around each node).

The calculated power dissipation can be plotted vs. antinode amplitude or frequency (see Annex B).

8.4 Decay method

The decay method determines the power dissipation characteristics of a conductor by the measurement of the decay rate of the amplitude of motion of a span following a period of forced vibration at a natural frequency and fixed amplitude. The rate of decay is a function of the system losses. Where low dissipation levels are present, decay times are long.

This method, if correctly employed, can give, in one trial, an estimation of the value of the self-damping at several vibration amplitudes. Moreover, it is very quick and easy, requiring, in its simplest form, just one transducer measuring the decay. However, as in the Power method, all the extraneous dissipation is part of the total calculation of the conductor self-damping. Therefore it is necessary to minimize all these extraneous loss sources or accounting for them. When this is not possible the use of the ISWR method is recommended.

Decay testing can be applied by bringing a test span into steady state resonance and suddenly removing the excitation by the shaker from the conductor. The decay can be affected by the method used to disconnect the driving force as any additional disturbance of the conductor causes other vibration modes to be generated. With proper precautions, the shaker can be disconnected inducing a minimal disturbing impulse into the system.

Four methods can be used to terminate forced vibration of a span:

- (1) a fusible link to mechanically release a spring-loaded clamp. One example is shown in Figure 9. The shaker is coupled to the span through a link mechanism which is held shut by a length of fuse wire. Opening of the link is accomplished by blowing the fuse using a high current source.
- (2) a modal shaker (with a decay relay) which is left attached to the span during the decay phase. The mass of the armature will be active during both the forced vibration and decay phase of the test. The effect will be negligible if the armature mass is small when compared with the total mass of the vibrating span. Nevertheless, friction in the shaker bearings, if any, may contribute to the dissipation of the system. The decrements for the span will reflect all the sources of dissipation, including friction in the shaker.
- (3) a very soft connection between the shaker and the conductor under test, which produces a de-coupling between the conductor and the shaker armature. One example is shown in Figure 6.
- (4) excitation to the shaker is cut off and a mechanical latch is simultaneously activated to lock the armature and hold it rigid.

The decay test procedure is as follows:

- Establish span resonance beginning at the first tunable harmonic within the frequency range of interest.
- Measure and record the vibration frequency.
- Locate the transducer for vibration level measurement at a mid-span antinode.
- Adjust the antinodal amplitude to be somewhat greater than the prescribed level. This is done to ensure that the test amplitude passes through the prescribed level during the decay.

- Record loop length and loop amplitude.
- Terminate forced vibration, and record the time history of the decay. An oscillographic or other waveform recorder may be used for this purpose.
- Proceed to the next tunable harmonic frequency.
- Continue this procedure until the upper end of the frequency range has been reached.

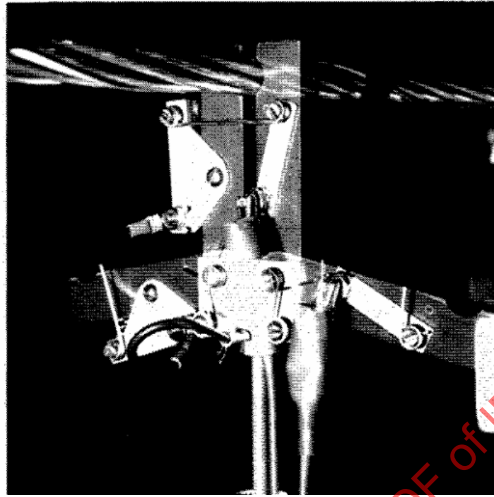


Figure 9 – Fuse wire system disconnecting a shaker from a test span; this double exposure shows the mechanism both closed and open.

Decay rate is recorded and expressed in terms of logarithmic decrement which is basically the natural logarithm of the amplitude ratio of two successive cycles of vibration.

Based on the acquisition of data, the logarithmic decrement can be calculated by the following equation:

$$\delta = \frac{1}{n_c} \ln \frac{Y_a}{Y_z} \quad (12)$$

where

- δ = logarithmic decrement
- n_c = number of vibration cycles between the two cycles considered
- Y_a = single antinode amplitude of the first cycle considered
- Y_z = single antinode amplitude of the last cycle considered

The power P dissipated by the conductor can be determined from the following equation:

$$P = \frac{1}{2} \times f \times m \times V_a^2 \times L \times \delta \quad (13)$$

where V_a is antinode velocity at the initial constant antinode amplitude.

If a lightly damped system ($h \ll 1$) is left free to vibrate from a forced resonance condition, it undergoes a transient decay of motion that looks like Figure 10.

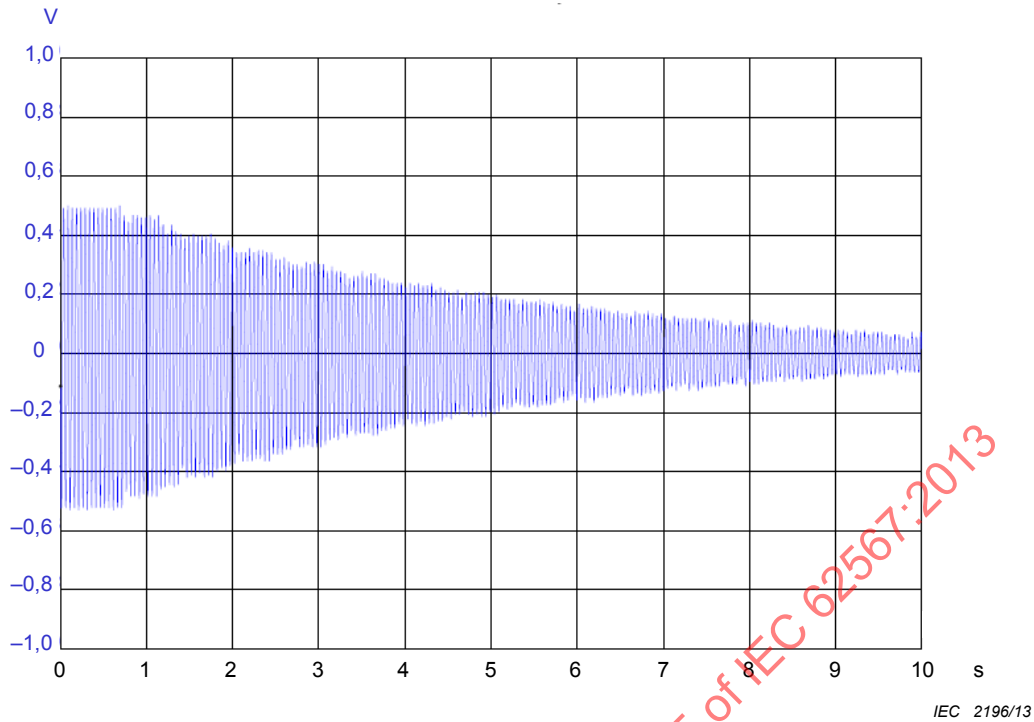


Figure 10 – A decay trace

The nondimensional viscous damping coefficient, h , can be calculated as follows:

$$h = \frac{\delta}{2\pi} \quad (14)$$

The decay record may take the form of a series of steps occurring at the fundamental frequency of the test span [3,4]. The particular shape of the steps will depend upon where the vibration is sensed and is more pronounced in highly damped spans. The steps are a result of the wave-like character of span vibration. However, in normal cases, they are very shallow due to the fact that dissipation caused by self-damping is quite small and the phenomenon is easily overlooked especially when relatively slow recording speed is used.

The steps may be removed from consideration, if necessary, by fitting a smooth curve to the envelope of the decay trace, and evaluating the decay of that envelope using Equation (12). Applying that equation to the cycles that were actually recorded leads to very inaccurate results unless n_c is large enough to cover several of the steps or is exactly an integer multiple of the number of vibration cycles per step. Use of the smooth envelope is recommended.

In some cases, a transfer of energy may occur between the horizontal and vertical response of the span, although the initial conditions imposed vertical excitation. When this happens, erratic recordings may be observed. Normally, these occur at certain frequencies that are not prevalent enough to influence the entire program, and these frequencies can be avoided.

To improve the results, it is possible to calculate the energy transferred from the conductor to the shaker during the decay with the same set up already described for the power method. However, this shaker loss is usually one order of magnitude less than that of the conductor.

8.5 Comparison between the test methods

Each of the three methods described contains advantages and disadvantages. A comparative summary of some general characteristics of each of the methods is given in Table 1.

Table 1 – Comparison of laboratory methods

General characteristics	ISWR	Power	Decay	Notes
test span with unknown end losses	required	not recommended	not recommended	end losses to be minimized in all cases
low self-damping conductors	applicable	applicable	applicable	shield wires, ADSS, OPGW
high self-damping conductors	Not applicable to conductors that may have a gap	preferable	applicable	special conductors and low conductor tensions
Estimated testing time per sample	36 h	24 h	12 h	based on three tensions, three vibration levels and > 10 frequencies
Main advantage	Insensitive to end span and drive point losses	simple data collection and analysis	wide range of testing amplitudes in one trial	
Main disadvantage	difficult to measure node amplitudes	possible errors due to end and drive point losses	possible errors due to end and drive point losses	

Although widely accepted, the ISWR and Power Method are considered costly to equip and tedious to perform. The decay method is intuitively easy to understand, relatively easy to perform, and requires minimal instrumentation. When damping is low, the decay test has good accuracy and resolution while both the power method and the ISWR method suffer reduced accuracy, therefore, the decay test may be a suitable complement to these methods. However, when conductor damping is low the relative effect of other damping sources is larger and therefore the ISWR method may be considered advantageous.

8.6 Data presentation

It is customary to fit self-damping data to empirical equations that are thought to model the self-damping phenomenon. This is done to facilitate energy balance calculations and to provide a basis for extrapolating the measurements beyond the ranges covered in the laboratory tests. Ability to extrapolate is important since limits on measurement accuracy effectively prevent obtaining useable data at the lower vibration frequencies, yet these may be the frequencies where greatest fatigue stresses occur.

Data measured in the laboratory span are generally expressed empirically through a power law:

$$\frac{P}{L} = k \frac{Y_0^l f^m}{T^n} \quad (15)$$

in which P/L describes the power per unit length dissipated by the conductor, k is a factor of proportionality, Y_0 is the antinode amplitude of vibration, f is the frequency of vibration, while l , m and n are the amplitude, frequency and tension exponents, respectively. Using the above empirical rule, self-damping determined in laboratory spans could be extrapolated to actual much longer spans.

The damping properties of some conductors, such as ADSS, gap conductors, etc. cannot be expressed by the above formula and require other interpolating functions to be defined as the best fit of the measurement data.

Table 2 (from CIGRE 22.11 TF1 (1998)) summarizes the exponents obtained by a number of investigators for Equation (15), together with the method of measurement used, the test span length, span end conditions and number of conductors and tensions tested.

Table 2 – Comparison of Conductor Self-damping Empirical Parameters

Investigations	l	m	n	Method	End Conditions	Span length (m)	Number of conductors × number of tensions
Tompkins et al. (1956)	2,3 to 2,6	5,0 to 6,0	1,9 ⁽¹⁾	ISWR	N.A.	36	1 × 2
Claren & Diana (1969b)	2,0	4,0	2,5; 3,0;1,5	PT	M.B.	46	3 × 3
Seppä (1971), Noiseux (1991)	2,5	5,75	2,8	ISWR	N.A.	36	1 × 8
Rawlins (1983)	2,2	5,4		ISWR	N.A.	36	1 × 1
Lab. A (CIGRE 22.01 1989)	2,0	4,0		PT	M.B.	46	1 × 1
Lab. B (CIGRE 22.01 1989)	2,2	5,2		PT	P.E.	30	1 × 1
Lab. C (CIGRE 22.01 1989)	2,44	5,5		ISWR	N.A.	36	1 × 1
Kraus & Hagedorn (1991)	2,47	5,38	2,80	PT	P.E.	30	1 × ?
Noiseux (1991) ⁽²⁾	2,44	5,63	2,76	ISWR	N.A.	63	7 × 4
Tavano (1988)	1,9 to 2,3	3,8 to 4,2		PT	M.B.	92	4 × 1
Möcks & Schmidt (1989)	2,45	5,38	2,4	PT	P.E.	30	16 × 3
Mechanical Laboratory Politecnico di Milano (2000)	2,43	5,5	2	ISWR	P.E.	46	4 × 2
ISWR: Inverse Standing Wave Method PT: Power Method N.A.: Non applicable M.B.: Massive block P.E.: Pivoted Extremity (1): extrapolated (2): Data corrected for aerodynamic damping							

The power method for conductor self-damping measurements on laboratory test spans with rigidly fixed extremities produces empirical rules with an amplitude exponent close to 2,0 and a frequency exponent close to 4,0, in comparison to about 2,4 to 2,5 and 5,5, respectively, for the ISWR method and PT method with pivoted extremities.

Such differences in the above exponent values, together with those in the k factor of proportionality, may lead to large differences in the predicted self-damping values. It thus appears that, the major disparities among conductor self-damping values reported by different laboratories are mainly related to end effects.

Annex A (normative)

Recommended test parameters

The values of the tensile load to be used in the test, if not specially required by a particular conductor application, shall be suitably chosen in order to be representative of normal conductor loadings in service.

A minimum of three different tensile loads shall be used, the medium value of which should correspond to the most common conductor loading on the line.

For example, the following loadings suggested by IEEE Std. 563-1978, expressed as percentages of the conductor rated strength RTS can be used 15 (17,5), 20 (22,5), 25 (27,5). The values in brackets are optional.

During the test, the variation of the conductor tensile load shall not exceed $\pm 3 \%$.

To ensure tension stability during the tests, testing should be performed in an area where the ambient temperature does not vary more than $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$. If the conductor temperature changes more than $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, adjustment of the conductor tension is necessary.

A minimum of three different antinode double amplitudes for each loop length shall be tested and the values (in millimetres) should be between $25/f$ and $150/f$ according to IEEE Std. 563-1978. Alternatively, a minimum of three antinode velocities should be used in the range 100 to 300 mm/s (peak values) as prescribed by IEEE Std. 664-1993. The two ranges are not equivalent.

A minimum of ten different tunable vibration modes shall be tested. Vibration modes should correspond to those associated with frequencies that are generated in the wind velocity range of 1 to 7 m/s on the conductor under test. However, some difficulties may arise for the measurements of the power dissipated at low frequencies due to the long loop lengths associated. A minimum of ten loops is considered necessary to obtain suitable measurements on normal conductors.

The relationship between frequency, wind velocity and conductor diameter is as follows

$$f = 0,185 \times \frac{V}{D} \quad (\text{A.1})$$

It is recommended that the loop lengths chosen are common to all the tensile loads used. It is also recommended that, within the previously suggested range values, the antinode vibration amplitudes or velocities be the same to all the loop lengths used.

Annex B (informative)

Reporting recommendations

The reporting of test results should be as complete as possible to aid repeatability of the tests. Table 1 of IEEE Std. 563-1978 is an example of a typical table of results. Additional information such as test span description, characteristics of the measurement devices, method(s) and specific testing procedures used, ambient temperature during testing and a description of the conductor under test should be reported. In more details:

- Together with the usual conductor data (manufacturer, year of fabrication, stranding, weight per unit length, RTS), information should be supplied on the type of lubricant or grease applied to it, if any. Moreover, the previous history of the conductor i.e. if new ex-factory or unused from the store or taken from the line, should be stated. If the specimen is taken from the line, the tensile loads to which it has been subjected and the period of time during which it has been in service should be stated.

The test span arrangement should be briefly described and shown in a sketch similar to Figure 1. The free span length L and the position of the shaker in the span should be indicated.

The methods used to assess that no energy was transferred from the conductor free length to span end terminations and to minimize the conductor looseness should be clearly indicated. Otherwise, the methods used to measure such an energy should be clearly stated.

- The method used to correct data for aerodynamic damping should be clearly indicated if this operation has been performed

Moreover information should be provided for:

- The accuracy of the tensile load measuring methods.
- Tensile load variations during the test.
- The type of shaker used and the type of mechanical connections between the shaker and the conductor.
- The method used to drive the conductor to vibrate at resonance.
- The method used to assess resonance conditions.
- The parameters that are measured to obtain the power dissipated and the accuracy of the measurements.

IEEE Std. 563-1978 recommends that the measurement results be presented in diagrams showing the power dissipated per conductor unit length, as a function of the ratio of the antinode displacement amplitude Y_0 to conductor diameter, for each loop length $\lambda/2$ and corresponding frequency f and tensile load T . In the same diagram, the data referring to the different loop lengths and frequencies can be shown provided different symbols are used. It is preferable to present measurement results in different diagrams for each tensile load, unless otherwise required for specific comparison purposes.

Diagrams should clearly show, for each value of T , $\lambda/2$, f , Y_0 , all the measured values of P_c . The units shall be as indicated in the list of symbols.

An example of these diagrams is given in Figure B.1.

It may be also useful to present the results as a plot of conductor velocity at the drive point against force per unit length for different frequencies and associated loop lengths, for each tension. This presentation allows, by simple calculation, the determination of the power dissipated, the conductor amplitude at the drive point, and the mechanical impedance of the

conductor that is the ratio of the force to the conductor velocity, for a wide variety of conditions.

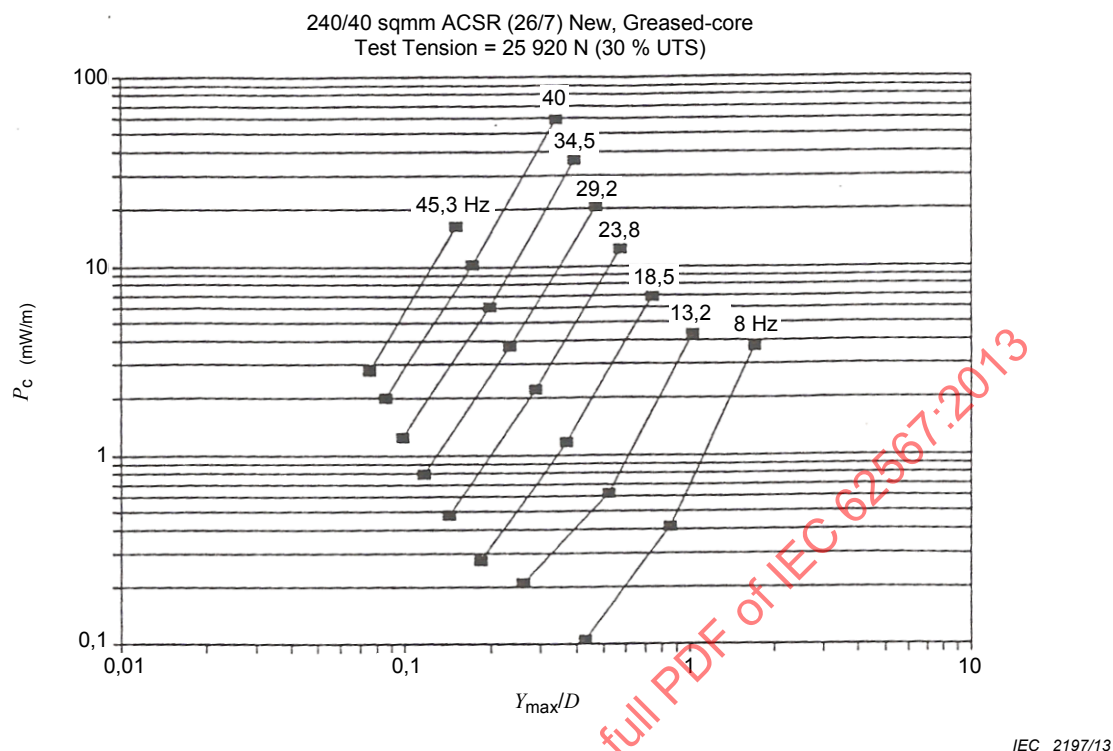


Figure B.1 – Example of conductor power dissipation characteristics

Some investigators use to present the results as a family of curves of the power dissipated versus vibration frequency for each vibration amplitude or velocity and for each conductor tension as shown in Figure B.2.

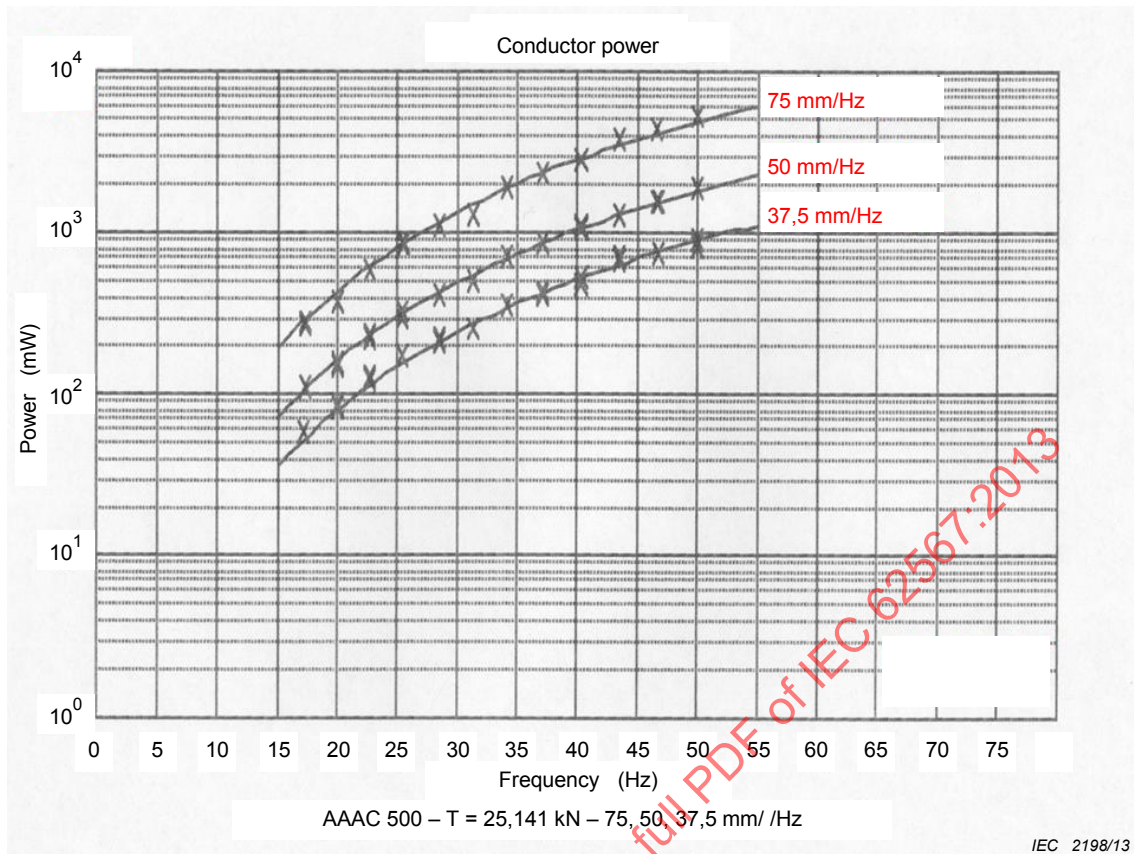


Figure B.2 – Example of conductor power dissipation characteristics

Annex C (informative)

Correction for aerodynamic damping

In order to get the net power dissipated structurally within the conductor, it is necessary to correct the total power measured over the test span for the aerodynamic damping generated by the conductor vibrating in still air. With P_{net} representing the net structural power loss per unit conductor length, P_{meas} the measured power loss per unit length and P_{aero} the power loss per unit length due to aerodynamic damping, this may be done using the following expressions:

$$P_{\text{net}} = P_{\text{meas}} - P_{\text{aero}} \quad (\text{C.1})$$

where

$$P_{\text{aero}} = \pi^2 \times \rho \times f^3 \times x^2 \times d^4 \times \delta_r \quad (\text{C.2})$$

ρ = air density (= 1,205 kg/m³ at 20 °C and 1 atm.)

f = vibration frequency

x = Y_0/d

Y_0 = free loop single antinode amplitude

d = conductor diameter

and

$$\delta_r = A \times \delta_{\text{st}} + B \times x + C \times x^{D/\sqrt{x}} + E \quad (\text{C.3})$$

where

$$\delta_{\text{st}} = 11,137 / \sqrt{\beta} \quad (\text{C.4})$$

β = Stokes' number (= $d^2 \times f/\nu$)

ν = kinematic viscosity of air (= 15,11 × 10⁻⁶ m²/s at 20 °C and 1 atm.)

The values of the best fit coefficients A , B , C , D and E together with the applicable range of x and β are shown Table C.1 for a smooth cylinder as well as for stranded conductors as a function of the number of strands in the outer layer. These coefficients are applicable for sine-loop motion as displayed in actual conductor vibrations.

For 6-strand models vibrating in sine-loops, the formula for δ_r is:

$$\delta_r = -0,55 - 0,15 (\beta - 500)/1\,500 + [3,885 + (\beta - 500)/1667] \times x + 1,093 \times e^{-2,513 \times x} \quad (\text{C.5})$$

For smooth body conductors, such as those using trapezoidal strands on their outer layer, it is recommended to use the coefficients applicable to the smooth cylinder in Table C.1.

Table C.1 – Coefficients to be used with equation C-3

Stands	A	B	C	D	E	X range	β range
Cylinder	1,05	0,00	2,62	1,30	0,00	0 to 0,71	340 to 728
6						0 to 0,71	360 to 781
10	1,00	0,37	2,91	1,25	0,06	0 to 0,79	288 to 626
12	1,10	0,66	1,70	1,20	0,00	0 to 0,59	512 to 1 111
16	1,20	0,00	2,43	1,15	0,00	0 to 0,69	364 to 778
18*	1,15	0,17	2,35	1,33	0,00	0 to 0,63	452 to 966
20	1,10	0,34	2,27	1,50	0,00	0 to 0,56	540 to 1 154
24	1,15	0,24	2,07	1,40	0,00	0 to 0,47	650 to 1 594
27	1,40	0,26	2,47	1,40	0,00	0 to 0,43	913 to 1 956
* Entries in the 18 strand case are interpolated.							

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013

Annex D

(informative)

Correction of phase shift between transducers

Using transducers having a different working principle, for example a piezoelectric accelerometer and a strain gauge load cell, it is possible to have a phase shift between the two signals due to the different response time of the two transducers.

This phase shift can be measured mounting the transducers on a shaker table and fixing a small mass on the force transducer. The transducers should be shaken at all proposed test frequencies, and at approximately the amplitudes chosen for the conductor test.

The phase shift angle between the force and acceleration (or displacement) signals, due to the different principle of functioning of the two devices, increases linearly with the frequency. This phase shift angle should be recorded for each tunable frequency and subtracted from the phase angle measured, at the same frequency, during the self-damping measurements.

To simplify this procedure, it is suggested to measure the phase angle α (rad) between the signals of the two transducer at a frequency f (Hz) and then calculate the time shift t_s (s) between the transducer signals by the following formula:

$$t_s = \frac{\alpha}{2\pi \times f} \quad (\text{D.1})$$

Considering that t_s is constant, the phase shift angle α can be calculated for any other vibration frequency by the same formula.

For better precision, the time shift t_s should be determined for three or more different frequencies and the average value used as indicated above.

Bibliography

- [1] Tompkins, J.S., L.L. Merrill and B.L. Jones. October 1956. "Quantitative Relationships in Conductor Vibration Damping". AIEE Transactions, Part III (Power Apparatus and Systems) vol.75, pp. 879-84.
- [2] Rawlins C.B., 1958. "Recent Developments in Conductor Vibration Research". Alcoa, Technical paper No. 13.
- [3] Slethei, T.O. and Huse, J. June 1965. "Conductor Vibration – Theoretical and Experimental Investigations on a laboratory Test Span." Proceeding IEEE (London), vol.112, pp. 1173-1179.
- [4] Hard A. R. and R. D. Holben. February 1967 "Application of the vibration decay test to transmission line conductors" AIEE Transactions (Power Apparatus and Systems) vol. PAS-86 no.2 , pp. 189-199.
- [5] Claren, R., and G. Diana. 1969. "Mathematical Analysis of Transmission Line Vibration."IEEE Trans Power Appar. Syst., Vol. PAS-88, pp. 1741-71.
- [6] Seppä, T. 1971. "Self-damping measurements and energy balance of ACSR Drake". IEEE Winter Power Meeting. New York. Paper No 71-CP-161-PWR, 8 pp.
- [7] Di Giacomo G: 1972 "Internal damping characteristics of Zebra conductor". ENEL DSR-CREI Report L6/73-27.
- [8] CIGRE. 1979. "Guide on conductor self-damping measurements." Electra Vol. 62 (identical to IEEE 563-1978 Standard)
- [9] Doocy et al, 1979. "Wind Induced Conductor Motion". Section 3.3 EPRI Transmission Line Reference Book, Electrical Power Research Institute, Palo Alto.
- [10] Rawlins C.B., July 1983. "Notes on the measurements of conductor self-damping". Alcoa, Technical report No 93-83-4.
- [11] CIGRE, May 1985. "Guide for endurance tests of conductors inside clamps." Electra, No 100. pp. 77-86.
- [12] Noiseux D.U., Houle S., and Beauchemin R. December 1986 « Study of effective aeolian wind power imparted to single conductor spans » Canadian Electrical Association (CEA) Research Report 146 T 328.
- [13] Tavano, F. 1988. "Results of self-damping measurements on conductor for overhead lines and on earth wires with optical fibres". CIGRE Report SC22-88(WG11)18.
- [14] CIGRE SC22 WG01. May 1989. "Report on Aeolian Vibration." Electra Vol. 124, pp. 40-77.
- [15] Möcks, L. and Schmidt J. 1989. "Survey on measurements of mechanical self-damping of ACSR conductors" CIGRESC22-89 (WG-11)TF1-2.
- [16] Hardy C. June 1990 "Analysis of self-damping characteristics of stranded cables in transverse vibration" CSME Mechanical Engineering Forum Toronto.
- [17] Tavano, F. 1991. "Collection of experimental data on conductor self-damping". CIGRE Report SC22-91(WG11-TF1)7.

- [18] Kraus, M. and Hagedorn, P. July 1991 "Aeolian vibration: wind energy input evaluated from measurements on an energized transmission line" IEEE Trans Power Del, Vol. 6, Iss. 3, pp.1264-1270.
- [19] Claren, R. Diana, G. Tavano, F. 8 September 1991 "Proposal for calculating, on the basis of experimental results, the conductor self-damping. CIGRESC22-91 (WG-11 – TF1).
- [20] Noiseux D. 1992 "Similarity law of the internal damping of stranded cables in transverse vibration" IEEE Trans Power Del, Vol. 7, No. 3, pp.1574-1581.
- [21] Hardy C. A. Leblond, 1993. "Comparison of Conductor Self-Damping Measurements" CIGRE SC22-93 (WG-11)88.
- [22] Tavano, F. et al. August 1994. "Conductor Self-Damping". CIGRE Report SC22-94 (WG11)-126.
- [23] A. Leblond, L. Cloutier, C. Hardy & L. Cheng, 1995, "A Model on Self-Damping of Stranded Cables in Random Transverse Vibrations", Canadian Acoustics, 23(3), 1995, pp. 31-32.
- [24] C. Hardy, A. Leblond, L. Cloutier & S. Goudreau, 1995, "Review of Models on Self-Damping of Stranded Cables in Transverse Vibrations", Proc. of the International Symposium on Cable Dynamics, Liege, Belgium, October 19-21, pp. 61-68.
- [25] Papailiou, K.O. 1997. "On the Bending Stiffness of Transmission Line Conductors". IEEE Trans Power Del, Vol. 12, No. 4, pp.1576-1588.
- [26] Leblond & C. Hardy, 1997, "Extended Similarity Laws of Self-Damping for Multilayered Stranded Cables in Transverse Vibrations", Comptes rendus du 16ième Congrès canadien de mécanique appliquée, Université Laval, Québec, 1-5 juin, pp. 155-156.
- [27] S. Goudreau, F. Charette, C. Hardy & L. Cloutier, 1998, "Bending Energy Dissipation of Simplified Single-Layer Stranded Cable", J. of Engineering Mechanics, ASCE, August, pp. 811-817.
- [28] Consonni, E., P. Marelli, M. Falco, A. Cigada and M. Vanali. November 1998. "All Dielectric Self-Supporting Cables: mechanical features and aeolian behaviour." Proc. of the Int. Wire and Cable Symposium (IWCS). Philadelphia.
- [29] CIGRE SC22 WG11 TF1. December 1998. "Modelling of Aeolian Vibrations of Single Conductors: Assessment of the Technology." *Electra* Vol. 181, pp. 53-69.
- [30] C. B. Rawlins, "Measurements of Fluid-Dynamic Damping of Stranded Cable Models at Low Oscillation Amplitudes", *Proceedings*, 1998 ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, June 21-25, 1998, Washington DC.
- [31] C.B. Rawlins, Addendum to above paper.
- [32] Hardy C., A. Leblond, S. Goudreau and L. Cloutier. 1999. "Application of Contact Mechanics to Cable Self-Damping." Third International Symposium on Cable Dynamics. Trondheim (Norway), August 16-18. pp. 1-6.
- [33] Diana, G, Falco, M. Cigada, A. and Manenti A. January 2000. "On the measurement of over head transmission lines conductor self-damping." IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 15, No.1, pp. 285-292.

- [34] C. Hardy & A. Leblond, 15-18 September 2003, "On the Dynamic Flexural Rigidity of Taut Stranded Cables", Proceedings of the Fifth International Symposium on Cable Dynamics, Santa Margherita Ligure (Italy), pp.45-52.
- [35] Dastous, J. B. January 2005. "Non linear Finite-Element Analysis of Stranded Conductors with Variable Bending Stiffness using the Tangent Stiffness Method." IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 20, No. 1, pp 328-338.
- [36] A. Leblond & C. Hardy, 19-22 September 2005, "Assessment of the Fretting-Fatigue-Inducing Stresses within Vibrating Stranded Conductors in the Vicinity of Clamps", Proceedings of the Sixth International Symposium on Cable Dynamics, Charleston, S.C., U.S.A.
- [37] EPRI Transmission Line Reference Book, 2006 "Wind-Induced Conductor Motions" Chapter 2. EPRI, Palo Alto, CA 1012317.
- [38] C. B. Rawlins, 2008, "Review of selected self-damping data using the flexural hysteresis model. Power Point presentation, CIGRE SC22-08 (WG-11) Paris.
- [39] C. B. Rawlins, 2009, "Flexural self-damping in overhead electrical transmission conductors" Journal of Sound and Vibration.323 (2009) 232-256.
- [41] CIGRE SC22 WG B2.25, 2011 "State of the art for testing self-damping characteristics of stranded conductors for overhead lines. TB 482, December 2011¹

¹ To be published.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	40
INTRODUCTION.....	42
1 Domaine d'application	43
2 Références normatives	43
3 Termes et définitions	43
4 Symboles et unités	44
5 Agencements de portée d'essai	45
5.1 Généralités.....	45
5.2 Terminaisons de la portée	46
5.3 Secoueur et système de contrôle des vibrations	47
5.4 Emplacement du secoueur	48
5.5 Liaison entre le secoueur et le conducteur soumis à essai	49
5.5.1 Généralités.....	49
5.5.2 Liaison rigide	49
5.5.3 Liaison flexible	50
5.6 Capteurs et dispositifs de mesure.....	51
5.6.1 Type de capteurs.....	51
5.6.2 Précision des capteurs	52
6 Conditionnement du conducteur	53
6.1 Généralités.....	53
6.2 Serrage	53
6.3 Fluage.....	53
6.4 Rodage	53
7 Sources de pertes extérieures	54
8 Modes opératoires d'essai.....	54
8.1 Détermination de la résonance de la portée.....	54
8.2 Méthode de puissance.....	56
8.3 Méthode de l'ISWR.....	57
8.4 Méthode de décroissance.....	59
8.5 Comparaison entre les méthodes d'essai	62
8.6 Présentation des données	63
Annexe A (normative) Paramètres d'essai recommandés.....	65
Annexe B (informative) Recommandations pour le rapport.....	66
Annexe C (informative) Correction de l'amortissement aérodynamique	69
Annexe D (informative) Correction de déphasage entre capteurs	71
Bibliographie.....	72
Figure 1 – Portée d'essai pour les mesures d'auto-amortissement de conducteur	45
Figure 2 – Pince rigide.....	46
Figure 3 – Secoueur électrodynamique	47
Figure 4 – Configuration d'un montage d'essai pour les mesures d'auto-amortissement de conducteur.....	48
Figure 5 – Exemple de liaison rigide	50
Figure 6 – Exemple de liaison flexible	51
Figure 7 – Accéléromètre miniature	52

Figure 8 – Condition de résonance détectée par les signaux d'accélération et de force.....	55
Figure 9 – Système à fil fusible déconnectant un secoueur d'une portée d'essai; cette double exposition montre le mécanisme à la fois fermé et ouvert.	60
Figure 10 – Tracé de décroissance	61
Figure B.1 – Exemple de caractéristiques de dissipation en puissance d'un conducteur.....	67
Figure B.2 – Exemple de caractéristiques de dissipation en puissance d'un conducteur.....	68
Tableau 1 – Comparaison des méthodes de laboratoire	62
Tableau 2 – Comparaison des paramètres empiriques d'auto-amortissement d'un conducteur.....	64
Tableau C.1 – Coefficients à utiliser avec l'équation C-3.....	70

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

LIGNES ÉLECTRIQUES AÉRIENNES – MÉTHODES D'ESSAI DES CARACTÉRISTIQUES D'AUTO-AMORTISSEMENT DES CONDUCTEURS

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62567 a été établie par le Comité d'études 7 de la CEI: Conducteurs pour lignes électriques aériennes.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
7/629/FDIS	7/630/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous «<http://webstore.iec.ch>» dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62567:2013

INTRODUCTION

L'auto-amortissement d'un conducteur est une caractéristique physique du conducteur définissant sa capacité à dissiper de l'énergie de manière interne tout en vibrant. Pour les conducteurs toronnés classiques, on peut attribuer la dissipation d'énergie partiellement à des effets inélastiques au sein du corps des fils (amortissement d'hystérésis au niveau moléculaire), mais principalement à l'amortissement par frottement, dû aux petits mouvements relatifs entre des fils individuels se recouvrant, lorsque le conducteur se courbe avec la forme d'onde des vibrations.

La capacité d'auto-amortissement est une caractéristique importante des conducteurs pour les lignes de transmission aériennes. Ce paramètre constitue un facteur principal pour déterminer la réponse d'un conducteur à des forces alternatives induites par le vent.

L'auto-amortissement d'un conducteur n'étant généralement pas spécifié par le fabricant, il peut être déterminé par des mesures effectuées sur une portée de laboratoire. Des méthodes semi-empiriques pour estimer les paramètres d'auto-amortissement de conducteurs toronnés classiques non soumis aux essais sont également disponibles, mais elles conduisent souvent à des résultats différents. En outre, on utilise de plus en plus sur les lignes de transmission un grand nombre de nouveaux types de conducteurs et certains d'entre eux peuvent avoir des caractéristiques et des mécanismes d'auto-amortissement différents de ceux des conducteurs toronnés classiques.

Un «Guide des mesures d'auto-amortissement des conducteurs» a été élaboré dans le passé, conjointement par la «IEEE Task Force on Conductor Vibration» et le WG01 du SC22 du CIGRÉ pour promouvoir l'uniformité des procédures de mesure. Ce Guide a été publié par l'IEEE sous forme d'une norme 563-1978 ainsi que par le CIGRÉ dans Electra n°62-1979.

Trois méthodes principales sont reconnues dans les documents ci-dessus et elles sont divisées en deux catégories principales qui sont habituellement appelées méthodes des «vibrations forcées» et des «vibrations libres».

La première méthode des vibrations forcées, est la «Power [Test] Method» (Méthode d'essai de puissance) dans laquelle on force le conducteur à vibrer en résonance à un certain nombre d'harmoniques accordables et la puissance totale dissipée par le conducteur vibrant est mesurée au point de fixation au secoueur.

La seconde méthode de vibrations forcées, appelée «Méthode des ondes stationnaires» ou plus précisément «Méthode [d'essai] du rapport d'ondes stationnaires inverse» détermine les caractéristiques de dissipation en puissance d'un conducteur en mesurant les amplitudes aux ventres et aux nœuds sur la portée, pour un certain nombre d'harmoniques accordables.

La méthode des vibrations libres appelée «Méthode [d'essai] par décroissance» détermine les caractéristiques de dissipation en puissance d'un conducteur en mesurant pour un certain nombre d'harmoniques accordables le taux de décroissance de l'amplitude d'un mouvement libre suivant une période de vibration forcée.

Plusieurs laboratoires dans le monde ont effectué des mesures d'auto-amortissement de conducteurs conformément au Guide mentionné ci-dessus. On a constaté toutefois de grandes disparités de prédiction d'auto-amortissement entre les résultats fournis par les divers laboratoires. Les causes de ces disparités ont été identifiées en cinq points principaux:

- 1) Les différentes méthodes d'essai adoptées pour les mesures d'auto-amortissement.
- 2) Les différentes conditions d'extrémités de portée mises en place dans les divers laboratoires d'essais (pincés rigides, éléments de flexion, etc.)
- 3) Les différents types de connexions entre le secoueur et le conducteur (rigide ou flexible) et les différents emplacements du point d'entrée de puissance sur la portée.
- 4) Les différents conditionnements de conducteurs avant l'essai (fluage, rodage, etc.)
- 5) Les différents processus de fabrication du conducteur.

LIGNES ÉLECTRIQUES AÉRIENNES – MÉTHODES D'ESSAI DES CARACTÉRISTIQUES D'AUTO-AMORTISSEMENT DES CONDUCTEURS

1 Domaine d'application

Le domaine d'application de la présente Norme recouvre la fourniture de procédures d'essai basées sur les documents mentionnés ci-dessus et dont le but est de minimiser les causes de divergence entre les résultats d'essais, en tenant compte de la grande expérience accumulée ces 30 dernières années par un grand nombre d'ingénieurs d'essai, et disponible dans les documentations, incluant une brochure technique du CIGRÉ se référant spécifiquement à cette norme (voir la Bibliographie).

La présente Norme décrit les méthodologies actuelles, incluant les appareils, modes opératoires et précisions, pour la mesure de l'auto-amortissement d'un conducteur et pour les formats de réduction de données. De plus, certaines directives fondamentales sont également fournies pour informer l'utilisateur potentiel des forces et des faiblesses d'une méthode donnée.

Les méthodologies et les modes opératoires incorporés dans la présente Norme ne sont applicables qu'à un essai sur des portées de laboratoire intérieures.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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).

CEI 60050-466:1990, *Vocabulaire Electrotechnique International. Chapitre 466: Lignes aériennes*

IEEE Std. 563-1978, *IEEE Guide on conductor self-damping measurements* (disponible uniquement en anglais)

IEEE Std. 664-1993, *IEEE Guide for laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductors* (disponible uniquement en anglais)

3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions du Vocabulaire électrotechnique international (VEI) s'appliquent, en particulier la CEI 60050-466. Celles qui sont différentes ou n'apparaissent pas dans le VEI sont données ci-dessous.

3.1

auto-amortissement d'un conducteur:

l'auto-amortissement d'un conducteur soumis à une charge de traction T est défini par la puissance P_c dissipée par unité de longueur par le conducteur vibrant dans un mode naturel, avec une longueur de boucle de $\lambda/2$, une amplitude de déplacement au ventre Y_0 et une fréquence f

3.2

nœud

dans un conducteur vibrant, les nœuds sont les points où l'amplitude des vibrations est la plus faible

3.3

ventre

dans un conducteur vibrant, les ventres sont les points où l'amplitude des vibrations est la plus grande

4 Symboles et unités

A	accélération transversale au point de forçage, amplitude unique	m/s^2
a_n	amplitude des vibrations au $n^{\text{ème}}$ nœud	mm
D, d	diamètre du conducteur	m
δ	décrément logarithmique	
E_{diss}	énergie totale dissipée par le conducteur vibrant	Joule
E_{kin}	énergie cinétique totale du conducteur vibrant	Joule
F	force d'excitation d'amplitude unique	N
f	fréquence des vibrations	Hz
h	coefficient d'amortissement visqueux, sans dimension	
L	longueur libre de la portée d'essai	m
λ	longueur d'onde	m
$\lambda/2$	longueur de boucle	m
m	masse du conducteur par unité de longueur	kg/m
n	nombre de boucles vibrantes dans la portée	
n_c	nombre de cycles de vibration	
n_{kj}	nombre de boucles entre la boucle k et la boucle j	
P	puissance dissipée par le conducteur	mW
P_c	puissance dissipée par le conducteur par unité de longueur	mW/m
P_j	puissance dissipée par le conducteur, mesurée sur la boucle j	mW
P_k	puissance dissipée par le conducteur, mesurée sur la boucle k	mW
θ_a	angle de phase entre la force et l'accélération	deg
θ_d	angle de phase entre la force et le déplacement	deg
θ_v	angle de phase entre la force et la vitesse	deg
S_j	Rapport d'ondes stationnaires inverse (ISWR) sur la boucle j	
S_k	Rapport d'ondes stationnaires inverse (ISWR) sur la boucle k	
S_n	Rapport d'ondes stationnaires inverse (ISWR) sur la $n^{\text{ème}}$ boucle	
T	tension du conducteur	N
V	vitesse transversale au point de forçage, amplitude unique	m/s
V_n	vitesse des vibrations au $n^{\text{ème}}$ ventre – valeur crête	m/s
ω	fréquence circulaire	rad
Y_a	amplitude de ventre unique au premier cycle de décroissance	mm
Y_f	amplitude unique des vibrations au point d'attaque	mm
Y_n	amplitude unique des vibrations au $n^{\text{ème}}$ ventre	mm
Y_o	amplitude unique des vibrations au ventre	mm
Y_z	amplitude de ventre unique au dernier cycle de décroissance	mm
$\sqrt{Tm}$	impédance caractéristique du conducteur	N s/m

5 Agencements de portée d'essai

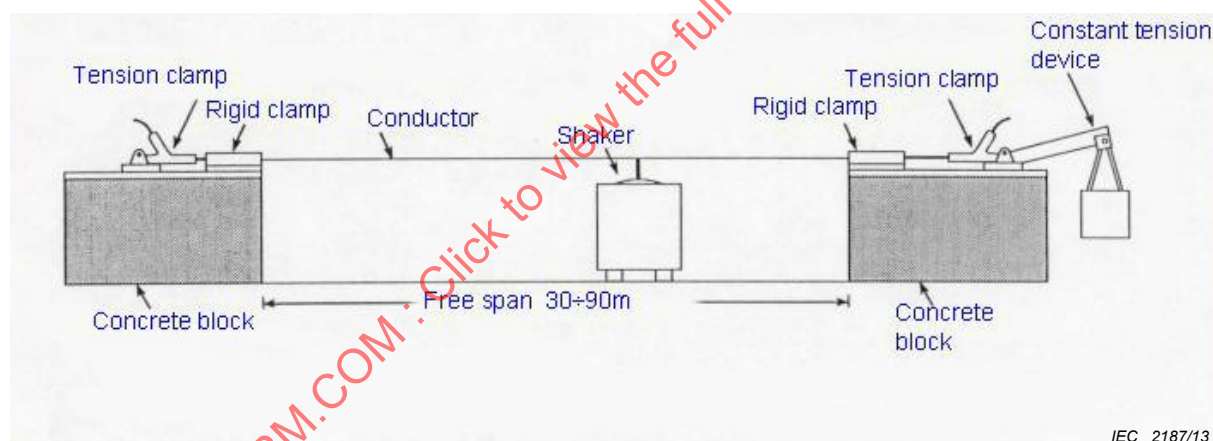
5.1 Généralités

Les portées d'essai de laboratoire pour les mesures d'auto-amortissement de conducteur sont généralement construites à l'intérieur dans des zones d'air calme où la variation de la température ambiante est minimale ou peut être convenablement régulée. Des variations de température ambiante allant jusqu'à 0,2 °C/h sont considérées comme acceptables.

Il convient de préférence que la longueur de la portée libre L soit au moins dix fois plus grande que la longueur de la boucle la plus longue utilisée dans les essais. Pour obtenir des résultats cohérents, une longueur de portée supérieure à 40 m est recommandée, mais des résultats satisfaisants peuvent être obtenus avec des portées de l'ordre de 30 m. Pour des portées plus courtes, l'influence des pertes des terminaisons et de la distribution de la charge de traction entre les brins du conducteur peut être critique.

La portée d'essai doit être tendue entre deux blocs massifs avec un poids supérieur ou égal à 10 pour cent de la résistance à la traction finale du plus grand conducteur à soumettre à essai. Il convient que chaque bloc soit en une seule pièce, généralement fabriquée en béton renforcé d'acier et qu'il fasse de préférence partie du sol en béton ou y soit solidement relié. Il convient que la rigidité de ces blocs soit la plus élevée possible afin de minimiser les pertes et d'assurer la réflexion maximale des ondes.

Un exemple de configuration de portée d'essai de laboratoire est représenté à la Figure 1.



IEC 2187/13

Légende

Anglais	Français
Tension clamp	Pince de tension
Rigid clamp	Pince rigide
Conductor	Conducteur
Shaker	Secoueur
Rigid clamp	Pince rigide
Tension clamp	Pince de tension
Constant tension device	Dispositif de tension constante
Concrete block	Bloc en béton
Free span	Portée libre

Figure 1 – Portée d'essai pour les mesures d'auto-amortissement de conducteur

5.2 Terminaisons de la portée

Il convient que la portée d'essai ait la possibilité de maintenir une tension constante du conducteur. On a utilisé avec succès des vérins hydrauliques et pneumatiques, des ressorts, des barres filetées et des poutres d'équilibrage pivotantes.

Une pince rigide à faces carrées sans articulation, similaire à celle qui est représentée à la Figure 2, doit être utilisée pour réduire au minimum la dissipation d'énergie par la monture de fixation. Un exemple de conception de terminaison type est également fourni à la Figure 3 de la norme IEEE 563-1978. Les montures de terminaison et les pinces rigides doivent avoir une rigidité suffisante pour garantir l'absence de perte d'énergie au-delà des extrémités de la portée libre.

Des pinces d'extrémité rigides (appelées également pinces lourdes) d'une longueur égale ou jusqu'à dix fois supérieure à celle des diamètres des conducteurs, et avec des diamètres de gorge ne dépassant pas de plus de 0,25 mm le diamètre du conducteur, ont donné de bons résultats. La gorge de la pince est généralement dimensionnée pour le plus grand conducteur à soumettre à essai et un ensemble de manchons est mis à disposition pour recevoir des plus petits diamètres de conducteur.

Les pinces rigides ne doivent pas être utilisées pour maintenir la tension sur la portée. Cependant, une fois fermées, les pinces rigides maintiennent une certaine charge. En conséquence, les dispositifs de tension ne peuvent pas contrôler entièrement la tension du conducteur. Les réglages ultérieurs éventuels ne doivent être effectués qu'après avoir desserré les pinces rigides.

Il est très important d'avoir un bon alignement entre les pinces de tension et les pinces rigides dans la direction horizontale. Dans la direction verticale, pour éliminer la courbure statique du conducteur au départ de la pince rigide, il peut s'avérer nécessaire d'incliner les pinces rigides derrière l'angle de la caténaire. Cette pratique, lorsqu'elle est nécessaire, évite toute modification de la charge de traction lorsqu'on ouvre ou on ferme les pinces.



IEC 2188/13

Figure 2 – Pince rigide

Normalement, sur une portée d'essai de laboratoire, la forme d'onde des boucles d'extrémité est différente de la forme des boucles libres et la dissipation des boucles d'extrémité est supérieure à la dissipation de la boucle libre. Puisqu'en première approximation, la dissipation d'énergie du conducteur est proportionnelle au carré de sa courbure, il est facile d'expliquer la forte dissipation d'énergie près de l'extrémité de la portée. Cet effet est plus remarquable aux fréquences basses où les boucles d'extrémité constituent une proportion plus élevée du nombre total de boucles. Ceci limite encore l'utilité des essais sur portée très rapprochée.

Il convient d'accorder la préférence à une configuration d'essai minimisant la dissipation d'énergie aux terminaisons d'extrémité de la portée. Si celle-ci demeure imprécise, il convient d'évaluer l'énergie et de la prendre éventuellement en compte, sauf si l'on utilise la méthode de l'ISWR.

Les pertes des terminaisons peuvent être minimisées en terminant le conducteur par un élément de flexion, par exemple une large barre plate d'une solidité suffisante pour tenir la tension de la portée mais également suffisamment flexible dans la direction verticale pour lui permettre de se courber facilement et pour éviter de courber le conducteur avec un rayon de courbure brutal à l'endroit où il entre normalement dans la pince. Ce mode opératoire présente cependant l'effet indésirable d'inclure la terminaison d'extrémité dans la portée d'essai. Un exemple de porte-à-faux flexible est indiqué à la Figure 4 de la norme IEEE 563-1978.

5.3 Secoueur et système de contrôle des vibrations

L'excitateur de vibrations utilisé pour ces essais est généralement un secoueur électrodynamique (Figure 3). Des actionneurs hydrauliques sont également utilisés.

Des secoueurs modaux ayant une armature légère et des paliers linéaires peuvent être utilisés pour exciter les modes de résonance du conducteur avec une distorsion minimale de la forme du mode naturel et pour produire une rigidité virtuellement nulle et un amortissement virtuellement nul dans la direction du mouvement.

Le secoueur doit être capable de fournir une force sinusoïdale appropriée à la portée d'essai. Le mouvement alternatif fourni par le secoueur doit être un harmonique simple avec un niveau de distorsion inférieur à 5 %.

L'amplitude et la fréquence des vibrations doivent pouvoir être réglées avec une précision de ± 2 % et la fréquence doit être stable à moins de 0,001 Hz.

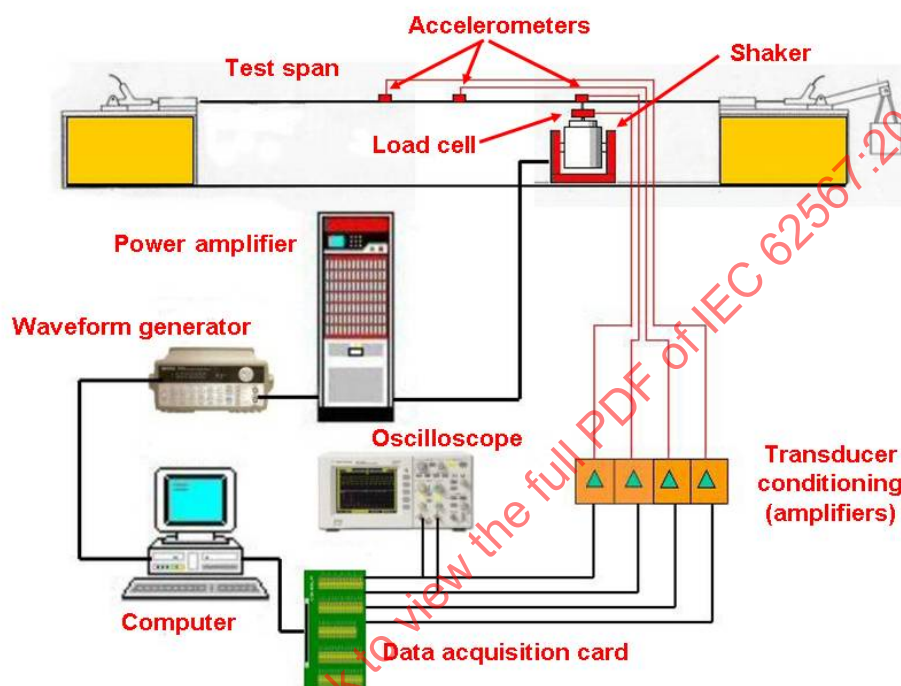


IEC 2189/13

Figure 3 – Secoueur électrodynamique

L'utilisation d'ordinateurs et d'un logiciel dédié pour la régulation du secoueur et pour l'acquisition, la réduction et l'élaboration des données est considérée comme une pratique normale.

Un exemple de configuration pour les mesures d'auto-amortissement de conducteur, entièrement équipée pour effectuer les mesures d'auto-amortissement de conducteur avec les méthodes mentionnées dans la présente Norme, est représenté à la Figure 4.



IEC 2190/13

Légende

Anglais	Français
Test span	Portée d'essai
Accelerometers	Accéléromètres
Load cell	Cellule dynamométrique
Shaker	Secoueur
Power amplifier	Amplificateur de puissance
Waveform generator	Générateur de forme d'onde
Oscilloscope	Oscilloscope
Transducer conditioning (amplifiers)	Conditionnement des capteurs (amplificateurs)
Computer	Ordinateur
Data acquisition card	Carte d'acquisition de données

Figure 4 – Configuration d'un montage d'essai pour les mesures d'auto-amortissement de conducteur

5.4 Emplacement du secoueur

La position la plus utilisée du secoueur est à l'intérieur de l'une des boucles d'extrémité de la portée, mais pas obligatoirement sur un ventre. Cet emplacement permet également d'exciter

de plus grandes amplitudes que le déplacement maximum du secoueur, même si l'on utilise une connexion rigide entre le secoueur et le conducteur.

L'emplacement proche de l'extrémité permet d'exciter un nombre impair de boucles, ainsi qu'un nombre pair. Bien que l'on puisse perdre une certaine symétrie de la portée en raison de la présence du secoueur, une boucle libre centrale sera présente pour les excitations de boucles impaires. Ceci permet souvent d'effectuer des mesures d'amplitude à l'intérieur de la boucle centrale sans être obligé de modifier l'emplacement du capteur à chaque fréquence étudiée.

Il convient que le secoueur soit placé à une distance de la pince rigide inférieure à la longueur de boucle calculée de la portée à la fréquence d'essai la plus élevée. Ceci garantit que la totalité des boucles n'est pas obligée de se trouver entre le secoueur et l'extrémité de la portée la plus proche, car ceci peut provoquer des résultats d'essai erronés. Il est préférable d'identifier un emplacement du secoueur pouvant être maintenu inchangé pendant la totalité de l'essai sur un conducteur. Une large gamme de dimensions de conducteur a été soumise à essai, le secoueur se trouvant à une distance fixe de la pince d'extrémité comprise entre 0,8 et 1,2 m.

5.5 Liaison entre le secoueur et le conducteur soumis à essai

5.5.1 Généralités

Lors de l'excitation artificielle de la portée d'essai intérieure, l'armature du secoueur peut être reliée à la portée d'essai, soit de façon rigide, soit en utilisant une connexion flexible. Dans tous les cas, la monture doit être aussi légère que possible afin d'éviter d'introduire des forces inertielles indésirables et d'empêcher qu'aux fréquences supérieures la force nécessaire pour faire vibrer cette masse s'ajoutant à l'armature du secoueur dépasse la capacité du système secoueur.

Pour éviter une distorsion de la forme du mode de vibration du conducteur, la masse de la pince doit être aussi faible que possible et dans les conditions de résonance, la phase entre la force et l'accélération, au point d'excitation, doit être aussi proche que possible de 90 °. Dans ce cas, la force appliquée par le secoueur est minimale et est égale à la force d'amortissement. Pour des angles différents de 90 °, des composantes inertielles et élastiques sont également présentes et peuvent donner lieu à des distorsions.

La liaison au secoueur doit être munie d'instruments de mesure de force et de niveau de vibrations. Ce dernier est généralement réalisé en utilisant des accéléromètres mais des capteurs de vitesse et des capteurs de déplacement peuvent également être utilisés.

5.5.2 Liaison rigide

Une fixation rigide du secoueur au conducteur (Figure 5) a tendance à créer une distorsion de la vibration des ondes stationnaires. Il convient d'apporter du soin à l'établissement de la résonance sur la portée pour minimiser cet effet.



IEC 2191/13

Figure 5 – Exemple de liaison rigide

En utilisant une liaison rigide, l'excitateur de vibrations devient une partie du système mesuré; si la masse du système mobile à l'intérieur du secoueur est importante, une distorsion du conducteur est induite dans la partie de la portée où est fixé le secoueur.

Ceci modifie la longueur de la boucle à laquelle est fixé le secoueur et indique la présence d'effets d'inertie et d'amortissement localisés. Il convient que l'effet de la fixation du secoueur au conducteur ne modifie pas de plus de 10 % la longueur de boucle dans laquelle la fixation est réalisée. Une masse attachée de moins de 20 % de la masse par unité de longueur du conducteur est normalement satisfaisante. Ceci ne peut toutefois être obtenu qu'en utilisant des secoueurs modaux ou en adoptant une liaison flexible comme décrit à l'alinéa suivant. Sinon, il convient d'utiliser la méthode de l'ISWR, qui n'est pas sensible aux effets localisés au niveau du secoueur ainsi que dans les boucles d'extrémité.

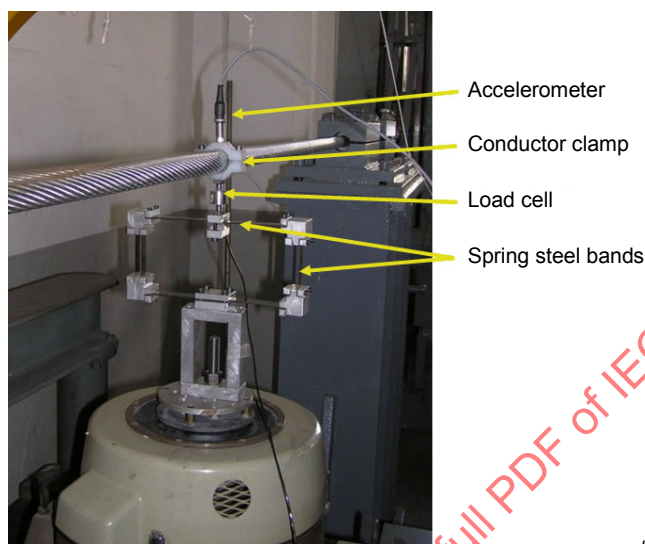
5.5.3 Liaison flexible

On utilise souvent des bandes en acier à ressort pour diminuer la distorsion de la boucle à l'endroit où est fixé le secoueur et pour admettre des amplitudes de conducteur au point d'attaque différentes de l'amplitude du secoueur. Il convient qu'une flexibilité appropriée soit présente dans toutes les directions pour:

- 1) désaccoupler le secoueur du conducteur de façon à pouvoir admettre un désalignement possible entre le centre de la table du secoueur et le point de fixation du conducteur, et à ne pas risquer d'endommager l'armature du secoueur;
- 2) empêcher la table du secoueur d'être entraînée par le conducteur dans des conditions de résonance lorsque l'amplitude des vibrations du conducteur peut être supérieure à l'amplitude du secoueur;
- 3) éviter l'introduction d'effets supplémentaires d'inertie et d'amortissement dus à l'armature du secoueur et à la fixation du conducteur.

Il convient de déterminer de façon empirique la rigidité des ressorts dans la direction de l'excitation, en fonction de la rigidité et de la masse du conducteur. Il convient que le ressort soit suffisamment souple pour désaccoupler le conducteur du secoueur mais soit toujours capable de transmettre au conducteur une force suffisante pour exciter les vibrations à l'amplitude requise.

Un exemple de liaison flexible équipée de capteurs de force et d'accélération est présenté à la Figure 6.



IEC 2192/13

Légende

Anglais	Français
Accelerometer	Accéléromètre
Conductor clamp	Pince de conducteur
Load cell	Cellule dynamométrique
Spring steel bands	Bandes en acier à ressort

Figure 6 – Exemple de liaison flexible

5.6 Capteurs et dispositifs de mesure

5.6.1 Type de capteurs

Les capteurs suivants sont utilisés pour les mesures d'auto-amortissement:

- A. Cellule dynamométrique: pour mesurer la force transmise par le secoueur au conducteur.
- B. Accéléromètres, capteurs de vitesse et capteurs de déplacement: pour mesurer le niveau des vibrations.

De plus, on utilise parfois des jauges de contraintes pour réguler la tension de chacun des fils de la couche extérieure et on peut utiliser des sondes de température pour surveiller la température ambiante et/ou celle du conducteur.

Il n'y a pas de limitation ou de préférence en ce qui concerne le principe de fonctionnement des capteurs, à condition que leur masse soit suffisamment petite pour ne pas influencer sur le système. Des cellules dynamométriques miniatures et des accéléromètres miniatures (Figures 6, 7 et 8) sont les plus couramment utilisés pour les mesures dans la portée.

Des capteurs de déplacement sans contact (à laser ou basé sur les courants de Foucault) ont également été utilisés pour les mesures des amplitudes des nœuds et des ventres, en particulier avec des conducteurs petits et légers.

Si l'on utilise des capteurs ayant un principe de fonctionnement différent, par exemple un accéléromètre piézo-électrique et une cellule dynamométrique à jauge de contrainte, il est possible d'observer un déphasage entre les deux signaux, dû au temps de réponse différent des deux capteurs. Ce déphasage dépend de la fréquence et doit être pris en compte dans la détermination de l'angle de phase entre les quantités mesurées pour chaque mode de vibration accordable. Un mode opératoire pour calculer le déphasage à chaque fréquence d'essai est présenté à l'Annexe D.

Dans un système d'essai commandé par ordinateur, le logiciel d'acquisition de données peut être paramétré pour effectuer automatiquement la correction de déphasage. Dans tous les cas, dans un but de simplicité, il est recommandé d'utiliser des capteurs ayant le même principe de fonctionnement de façon à ne nécessiter aucune correction de déphasage.



IEC 2193/13

Figure 7 – Accéléromètre miniature

5.6.2 Précision des capteurs

La précision et la linéarité de la phase sur la plage de fréquences d'essai prévue doivent être contrôlées sur tous les capteurs utilisés pour les essais. Les capteurs doivent être montés sur une table à secousses et une petite masse doit être solidement fixée au capteur de force. Les capteurs doivent être secoués à toutes les fréquences d'essai proposées et approximativement aux amplitudes choisies pour l'essai du conducteur. Le bon fonctionnement des capteurs est démontré par deux critères: (1) il convient que l'angle de phase entre la force et l'accélération (ou le déplacement) soit égal à ou proche de zéro degré et (2) il convient que le rapport entre la force et l'accélération (F/A) soit constant à toutes les fréquences et amplitudes. F/A est la masse effective installée sur le capteur de force. Si l'on utilise des capteurs de vitesse, il convient que l'angle de phase entre la force et la vitesse soit égal à ou proche de 90° et l'accélération peut être obtenue par la dérivée du signal de vitesse acquis.

Des écarts des valeurs de phase allant jusqu'à $\pm 5^\circ$ sont acceptables.

L'essai vérifie (1) qu'il n'y a pas de déphasage parasite en raison des effets de montage, des capteurs et des dispositifs de conditionnement de signal et (2) que les capteurs sont linéaires par rapport à la fréquence et à l'amplitude des vibrations. Ceci est important en particulier

pour les capteurs utilisés pour la mesure de la puissance communiquée au conducteur par le secoueur.

6 Conditionnement du conducteur

6.1 Généralités

Sauf spécification contraire, le conducteur soumis à essai doit être inutilisé.

Avant l'installation sur la portée d'essai, il convient de vérifier tout desserrement dans les couches du conducteur.

Le conducteur est ensuite serré et il convient de le conditionner comme décrit dans ce qui suit.

6.2 Serrage

Les terminaisons du conducteur soumis à essai peuvent être réalisées en utilisant des manchons d'ancrage à compression ou des pinces d'ancrage boulonnées. On peut également utiliser des pinces de tension du type à coin et des terminaisons enrobées (dans de la résine).

Si l'on utilise des raccords d'extrémité de compression, ils doivent alors être comprimés de façon inverse (en commençant par l'embouchure de la pince plutôt que par l'extrémité du conducteur) pour empêcher l'apparition d'un desserrement dans la portée.

6.3 Fluage

Après installation d'un conducteur inutilisé sur la portée d'essai, une pré-tension doit être établie afin d'obtenir la majeure partie du fluage métallurgique et de la stabilisation géométrique du conducteur et de distribuer plus uniformément la charge de traction dans les brins du conducteur. La pré-tension consiste à maintenir le conducteur à une tension supérieure ou égale à la tension d'essai pendant une durée généralement de 12 à 48 heures. La tension à appliquer pendant le préconditionnement doit être déterminée conformément aux paramètres de service du conducteur.

Le préconditionnement sera considéré comme suffisamment stabilisé lorsque la tension du conducteur immobile ne varie pas de plus de 3 à 4 % pendant 30 minutes à température ambiante constante.

Le conducteur doit être soumis à ce préconditionnement sans le serrer dans les pinces rigides d'extrémité.

6.4 Rodage

Lorsqu'un conducteur est inutilisé, son auto-amortissement n'est pas constant mais il varie en fonction des cycles de vibrations qui s'accumulent. Cette variation peut être de l'ordre de 20 à 40 % pendant les 30 à 60 premières minutes de vibration. Un «rodage» est considéré comme nécessaire pour stabiliser l'auto-amortissement du conducteur. Cela consiste à faire vibrer le conducteur à une fréquence fixe ou à une fréquence variable dans une plage de fréquences limitée, à l'amplitude maximale envisagée pour les mesures d'auto-amortissement. Il convient d'effectuer des mesures de puissance toutes les 15 minutes et le rodage sera considéré comme terminé lorsque la différence entre deux mesures consécutives ne dépassera pas 3 à 4 %.

7 Sources de pertes extérieures

Hormis la dissipation d'énergie principale due à la vibration du conducteur à la fréquence naturelle, certaines autres pertes d'énergie apparaissent dans la portée d'essai. La source de ces pertes extérieures doit être comprise et si possible éliminée ou réduite au minimum. Ce sont:

- Une déformation du conducteur induite par le dispositif utilisé pour forcer la vibration du conducteur.
- Une déformation du conducteur aux extrémités de la portée, due au système de serrage.
- Des pertes aérodynamiques dues à la vibration du conducteur dans l'air calme. La contribution de l'amortissement aérodynamique à l'amortissement total peut ne pas être négligeable aux fréquences basses mais elle est généralement pratiquement réduite à zéro aux fréquences élevées. Les pertes aérodynamiques peuvent être calculées selon la méthode indiquée à l'Annexe C et si nécessaire, soustraites des pertes mesurées.
- Des mouvements de torsion, longitudinaux et transversaux, autres que le mouvement d'entraînement. Des mouvements de torsion et longitudinaux peuvent être induits par couplage avec le mouvement transversal forcé. Les fréquences d'essai où ce phénomène se produit doivent être ignorées. Les modes de torsion peuvent également être excités par l'asymétrie du conducteur et par un désalignement du secoueur. Les mouvements transversaux aux fréquences basses peuvent être excités par les mouvements de l'air ou par un contact accidentel avec le conducteur. Le conducteur vibrant doit être contrôlé visuellement pour vérifier l'absence de ces types de mouvement.
- Un amortissement longitudinal du support dû à la rigidité insuffisante des montures de terminaison produisant la transmission de la puissance de vibration du conducteur dans le dispositif de mise en tension où une partie de cette puissance peut être dissipée.

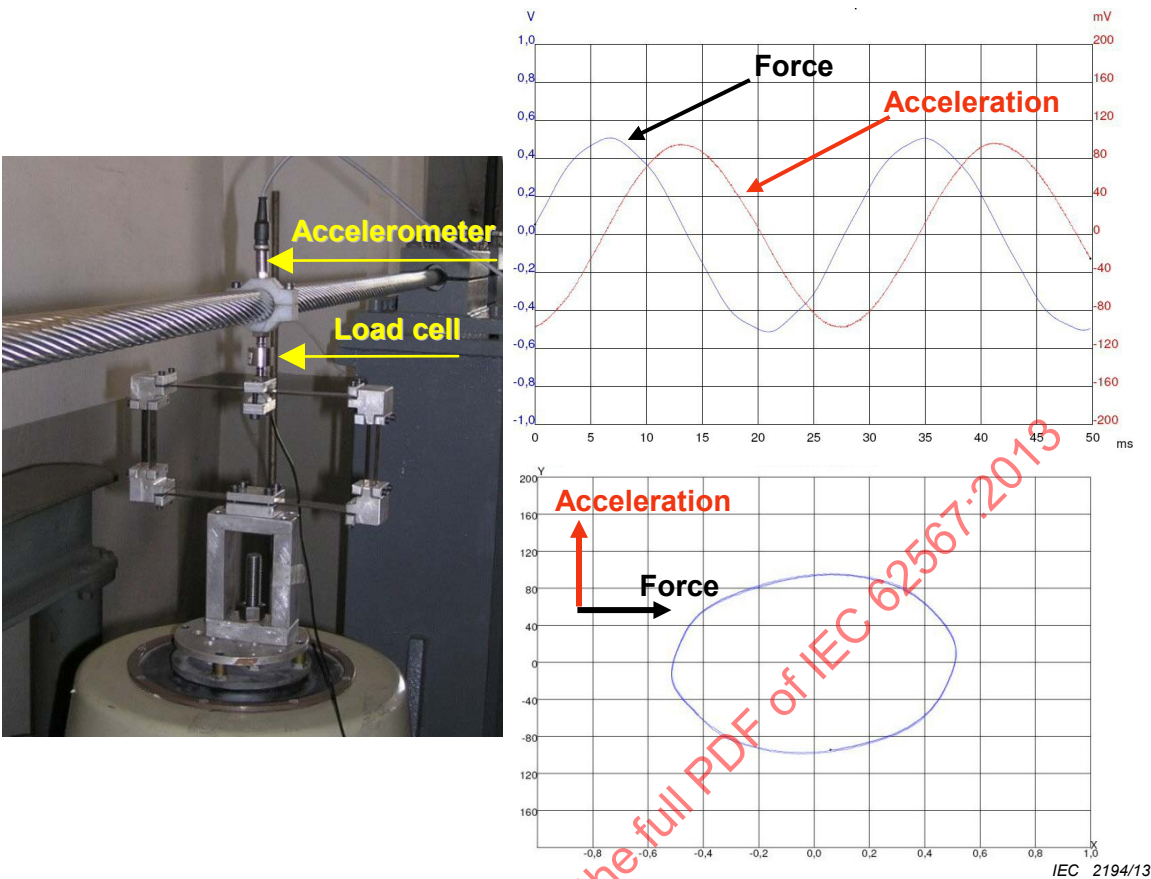
8 Modes opératoires d'essai

8.1 Détermination de la résonance de la portée

Toutes les méthodes décrites dans la présente Norme nécessitent que le conducteur atteigne une condition de résonance.

Pour trouver la résonance du système, on fait fonctionner le secoueur avec un réglage de puissance d'essai et on règle la commande de fréquence pour fournir le déplacement maximum du conducteur sur un ventre. Les commandes de puissance du secoueur sont ensuite réglées pour fournir l'amplitude/la vitesse de boucle correcte sur un ventre. La fréquence est réglée précisément pour maximiser l'amplitude de boucle. Si nécessaire, la puissance du secoueur est de nouveau réglée pour fournir l'amplitude de boucle désirée. On trouve la résonance du système lorsque les réglages de la commande de fréquence ne produisent plus d'augmentation de l'amplitude de boucle. L'essai est effectué lorsque l'onde stationnaire est stable à l'amplitude/la vitesse correcte.

Une autre méthode utilise les mesures/la surveillance de la force et de l'accélération (ou de la vitesse) et de leur angle de phase relatif au niveau de la fixation du secoueur. La fréquence est syntonisée jusqu'à ce que l'angle de phase entre les signaux de force d'accélération soit stable à 90° ou près de cette valeur (voir Figure 8) ou que l'angle de phase entre les signaux de force et de vitesse soit stable à zéro degré ou près de cette valeur. En pratique, le signal de force peut être déformé et un filtrage sera nécessaire pour obtenir une mesure de phase valable.



Légende

Anglais	Français
Accelerometer	Accéléromètre
Load cell	Cellule dynamométrique
Acceleration	Accélération
Force	Force

Figure 8 – Condition de résonance détectée par les signaux d'accélération et de force

Il convient que les fréquences de vibration à considérer pendant les essais couvrent un spectre correspondant à une plage de vitesses du vent de 1 à 7 m/s (3,6 à 25,2 km/h) sauf spécification contraire. L'Équation (A.1) de l'Annexe A peut être utilisée pour convertir la vitesse du vent en fréquence de vibration. Il est recommandé d'effectuer les mesures à chaque fréquence accordable; ce critère peut être modifié selon les résultats désirés par l'utilisateur final mais dans tous les cas, on doit utiliser un minimum de 10 fréquences d'essai.

Les fréquences naturelles de la portée peuvent être estimées en utilisant l'équation suivante:

$$f = \frac{n}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{m}} \tag{1}$$

La rigidité du conducteur et l'influence du secoueur sur la portée peuvent modifier les modes de vibration et changer ainsi les fréquences naturelles. L'équation (1) fournit toutefois un bon point de départ pour trouver les résonances.

8.2 Méthode de puissance

La méthode de la puissance détermine les caractéristiques de dissipation d'un conducteur en mesurant la force et le niveau des vibrations communiquées à la portée d'essai au point de fixation du secoueur.

Le conducteur, tendu sur la portée expérimentale, est forcé à vibrer à l'une de ses fréquences de résonance, l'amplitude et la fréquence étant toutes deux commandées au moyen du système de commande.

En raison des caractéristiques généralement non linéaires de la réponse du conducteur, il se peut qu'il ne soit pas toujours possible de produire des signaux sinusoïdaux purs à la résonance. Les composantes de fréquence du signal autres que la composante fondamentale doivent être filtrées. Si l'on utilise un filtrage analogique, les signaux des capteurs de force et de niveau de vibration doivent tous deux être filtrés et les filtres doivent être adaptés en phase et en gain. En variante, un analyseur approprié de transformée de Fourier rapide à deux canaux ou un logiciel équivalent peut être utilisé.

Lorsqu'un état d'immobilité est atteint, l'énergie introduite par le secoueur au conducteur pendant un cycle de vibration est égale à celle qui est dissipée par la portée. L'énergie introduite dans le conducteur et largement dissipée par son mécanisme d'auto-amortissement est déterminée en mesurant la force F agissant entre le conducteur et le secoueur et le déplacement du point d'attaque Y_f . Le résultat est alors donné par la formule suivante:

$$E_{\text{diss}} = \pi \times F \times Y_f \times \sin \theta_d \quad (2)$$

Le mode opératoire d'essai est le suivant:

- Faire résonner la portée en commençant au premier harmonique accordable dans la plage de fréquences prescrite (dix boucles minimum).
- Mesurer et enregistrer la fréquence de la vibration.
- Localiser un ventre à mi-portée.
- Régler l'amplitude au ventre au niveau prescrit et enregistrer cette valeur.
- Enregistrer la force et l'accélération d'entrée (ou la vitesse ou le déplacement) et leur différence d'angle de phase au point d'attaque.
- Mesurer et enregistrer la longueur de boucle libre.
- Passer à la fréquence harmonique accordable suivante.
- Poursuivre ce mode opératoire jusqu'à ce que l'extrémité supérieure de la plage de fréquences requise ait été atteinte.
- À la suite de l'acquisition des données, on peut calculer la puissance dissipée par le conducteur à partir de l'équation suivante:

$$P = \frac{I}{4 \times \pi \times f} \times F \times A \times \sin \theta_a \quad (3)$$

Si l'on utilise un capteur de vitesse pour l'acquisition des données, la puissance dissipée par le conducteur peut alors être calculée d'après l'équation suivante:

$$P = \frac{I}{2} \times F \times V \times \cos \theta_v \quad (4)$$

Si l'on utilise un capteur de déplacement pour l'acquisition des données, la puissance dissipée par le conducteur peut alors être calculée d'après l'équation suivante:

$$P = \pi \times F \times f \times Y_f \times \sin \theta_d \quad (5)$$

Il convient de noter que dans tous les cas, il peut s'avérer nécessaire de corriger l'angle de phase en raison du déphasage dans les capteurs, comme expliqué en 5.6.1.

On peut tracer la puissance calculée en fonction de l'amplitude ou de la fréquence du ventre (voir Annexe B).

Le coefficient d'amortissement visqueux sans dimension, h , peut être calculé en divisant l'énergie introduite dans le conducteur E_{diss} ($=P/f$) par l'énergie cinétique totale du conducteur E_{kin} .

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{\text{diss}}}{E_{\text{kin}}} \quad (6)$$

E_{kin} est donnée par la formule:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{4} m L \omega^2 Y_0^2 \quad (7)$$

La méthode de la puissance est simple et nécessite un nombre limité de points de mesure. Toutefois, toute la dissipation extérieure fait partie du calcul total de l'auto-amortissement du conducteur et il faut donc apporter un soin particulier pour diminuer toutes ces sources de pertes extérieures ou d'en tenir compte. Il est par exemple comparativement facile de déterminer la valeur de la dissipation d'énergie totale des vibrations dans la portée, car celle-ci est égale à la quantité totale d'énergie introduite dans le système. Ceci est largement suffisant pour déterminer l'auto-amortissement du conducteur si toutes les boucles de la portée ont une dissipation d'énergie égale. Malheureusement, les boucles situées aux extrémités de la portée et au niveau de la liaison au secoueur se comportent différemment du reste de la portée, elles ont une dissipation d'énergie pouvant être bien supérieure à celle de tout le reste de la portée.

Les pertes d'extrémité peuvent être déterminées en comparant les puissances d'entrée pour deux portées de longueurs différentes, terminées de façon identique. Lorsqu'il n'est pas commode de modifier la longueur de la portée, il est nécessaire de minimiser ces pertes ou d'utiliser la méthode de l'ISWR.

8.3 Méthode de l'ISWR

La méthode de l'ISWR détermine les caractéristiques de dissipation de puissance d'un conducteur en mesurant les amplitudes aux nœuds et aux ventres de la portée à chaque harmonique accordable.

Pour comprendre le principe mis en œuvre dans cette méthode, il est nécessaire de suivre deux ondes quittant le secoueur de vibrations lorsqu'elles se réfléchissent aux extrémités de la portée.

Selon cet argument, on peut supposer que le secoueur est fixé près de l'une des terminaisons de la portée. Les impulsions induites par le secoueur cheminent jusqu'à l'extrémité distante de la portée où elles sont renvoyées sous forme d'ondes réfléchies.

Si aucune perte n'est présente dans le système, les ondes incidentes et réfléchies sont égales. Des nœuds parfaits seront formés lorsque les deux ondes se rencontrent et sont transmises. C'est-à-dire qu'il n'existe aucun mouvement au niveau des nœuds. Les ventres ont une amplitude égale à la somme des ondes incidentes et réfléchies. Toutefois, si des pertes sont présentes dans le système, un mouvement apparaîtra au niveau des nœuds. L'amplitude de ce mouvement sera la différence entre les ondes incidentes et réfléchies. Le

rapport entre l'amplitude des nœuds et l'amplitude des ventres indique la dissipation dans le système. Lorsque de faibles pertes de portée sont présentes, les mesures très précises nécessaires pour déterminer l'amplitude des nœuds peuvent constituer un problème.

Le mode opératoire d'essai d'ISWR est le suivant:

- Faire résonner la portée en commençant au premier harmonique accordable dans la plage de fréquences prescrite (dix boucles minimum).
- Mesurer et enregistrer la fréquence des vibrations
- Localiser un ventre libre et un nœud adjacent.
- Régler l'amplitude au ventre au niveau exigé et enregistrer cette valeur.
- Mesurer et enregistrer l'amplitude du nœud.
- Mesurer et enregistrer la longueur de boucle libre.
- Mesurer les amplitudes des nœuds et des ventres à un deuxième emplacement.
- Passer à la fréquence harmonique accordable suivante.
- Poursuivre ce mode opératoire jusqu'à ce que l'extrémité supérieure de la plage de fréquences requise ait été atteinte.

À la suite de l'acquisition des données, on peut calculer la puissance totale dissipée par le conducteur à partir de l'équation suivante:

$$P = \sqrt{T \times m} \times \frac{V_n^2}{2} \times \left(\frac{a_n}{Y_n} \right) \quad (8)$$

où

$\sqrt{T \times m}$	est l'impédance d'onde ou caractéristique (aux fréquences élevées, celle-ci peut être modifiée en raison de l'effet de la rigidité du conducteur).
$V_n = \omega Y_n$	est la vitesse des vibrations au n ^{ème} ventre
$S_n = \frac{a_n}{Y_n}$	est le rapport d'ondes stationnaires inverse, ISWR, sur la n ^{ème} boucle.

En effectuant deux mesures dans deux boucles différentes, j et k, la puissance dissipée par la section de conducteur entre ces boucles sera:

$$P = P_k - P_j \quad (9)$$

Et la puissance dissipée par unité de longueur P_c sera:

$$P_c = \frac{P_k - P_j}{n_{kj} \frac{\lambda}{2}} \quad (10)$$

où n_{kj} est le nombre de boucles entre les nœuds k et j, et λ est la longueur d'onde.

La valeur du coefficient d'amortissement visqueux sans dimension est donnée par:

$$h = \frac{S_k - S_j}{\pi \times n_{kj}} \quad (11)$$

où S_k et S_j sont l'ISWR respectivement pour la boucle k et j .

De façon idéale, il convient que les deux nœuds soient aussi éloignés que possible pour rendre maximale la différence entre leurs amplitudes par rapport à l'erreur de mesure.

L'avantage de cette méthode est que la dissipation mesurée concerne la seule partie considérée du conducteur; en conséquence, la valeur d'auto-amortissement estimée n'est pas affectée par l'influence déjà mentionnée des extrémités de la portée et la liaison secoueur-conducteur.

Les principaux problèmes présentés par la méthode sont l'estimation correcte des positions des nœuds et la mesure de l'amplitude de la vibration des nœuds, pouvant être d'une très faible valeur de l'ordre de quelques micromètres; une erreur de mesure de l'amplitude de la vibration des nœuds modifie de façon significative l'estimation de l'auto-amortissement.

On peut suggérer deux méthodes pour améliorer la précision de ces mesures.

La première méthode envisage la mesure en un grand nombre de points autour d'un nœud et l'ajustement des mesures avec une fonction d'interpolation: de cette manière, il n'est pas nécessaire de connaître exactement la position du nœud (pour placer les capteurs) et le minimum de la fonction d'interpolation donne l'amplitude du nœud.

La deuxième manière consiste à utiliser un modèle mathématique représentant bien la forme de la déformation réelle du conducteur vibrant. Ceci permet de diminuer le nombre de capteurs (deux seulement autour de chaque nœud).

On peut tracer la dissipation de puissance calculée en fonction de l'amplitude ou de la fréquence du ventre (voir Annexe B).

8.4 Méthode de décroissance

La méthode de décroissance détermine les caractéristiques de dissipation de puissance d'un conducteur en mesurant la vitesse de décroissance de l'amplitude du mouvement d'une portée après une période de vibration forcée à une fréquence naturelle et à une amplitude fixe. La vitesse de décroissance est fonction des pertes du système. Lorsque de faibles niveaux de dissipation sont présents, les temps de décroissance sont longs.

Si elle est correctement utilisée, cette méthode peut donner en un essai une estimation de la valeur de l'auto-amortissement pour plusieurs amplitudes de vibration. De plus, elle est très rapide et facile, nécessitant dans sa forme la plus simple un seul capteur pour mesurer la décroissance. Toutefois, comme dans la méthode de la puissance, toute la dissipation extérieure fait partie du calcul total de l'auto-amortissement du conducteur. Il est donc nécessaire de minimiser toutes ces sources de pertes extérieures ou d'en tenir compte. Lorsque ceci n'est pas possible, l'utilisation de la méthode de l'ISWR est recommandée.

L'essai de décroissance peut être appliqué en amenant une portée d'essai en résonance en régime établi et en supprimant brutalement du conducteur l'excitation du secoueur. La décroissance peut être affectée par la méthode utilisée pour déconnecter la force de commande car toute perturbation supplémentaire du conducteur provoque la génération d'autres modes de vibration. En prenant les précautions adéquates, on peut déconnecter le secoueur en induisant une impulsion perturbatrice minimale dans le système.

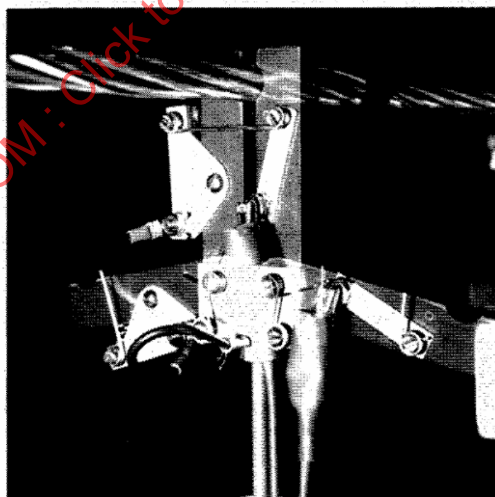
On peut utiliser quatre méthodes pour interrompre une vibration forcée d'une portée:

- (1) une liaison fusible pour ouvrir mécaniquement une pince à ressort. Un exemple est présenté à la Figure 9. Le secoueur est couplé à la portée par l'intermédiaire d'un mécanisme de liaison qui est maintenu fermé par une certaine longueur de fil fusible. L'ouverture de la liaison est effectuée en faisant fondre le fusible avec une source de courant fort.

- (2) un secoueur modal (avec un relais de décroissance) qu'on laisse fixé à la portée pendant la phase de décroissance. La masse de l'armature sera active à la fois pendant la vibration forcée et pendant la phase de décroissance de l'essai. L'effet sera négligeable si la masse de l'armature est faible par rapport à la masse totale de la portée vibrante. Néanmoins, le frottement dans les paliers du secoueur s'il y a lieu, peut contribuer à la dissipation du système. Les décrétements de la portée réfléchissent toutes les sources de dissipation, y compris le frottement dans le secoueur.
- (3) une liaison très souple entre le secoueur et le conducteur soumis à essai, produisant un découplage entre le conducteur et l'armature du secoueur. Un exemple est présenté à la Figure 6.
- (4) l'excitation du secoueur est interrompue et un verrou mécanique est activé simultanément pour bloquer l'armature et la maintenir rigide.

Le mode opératoire d'essai de décroissance est le suivant:

- Faire résonner la portée en commençant au premier harmonique accordable dans la plage de fréquences d'intérêt.
- Mesurer et enregistrer la fréquence des vibrations.
- Disposer le capteur de mesure du niveau de vibrations sur un ventre à mi-portée.
- Régler l'amplitude du ventre légèrement au-dessus du niveau prescrit. Ceci est effectué pour garantir que l'amplitude d'essai passe par le niveau exigé pendant la décroissance.
- Enregistrer la longueur de boucle et l'amplitude de boucle.
- Interrompre la vibration forcée et enregistrer l'historique dans le temps de la décroissance. On peut utiliser dans ce but un enregistreur oscillographique ou d'une autre forme d'onde.
- Passer à la fréquence harmonique accordable suivante.
- Poursuivre ce mode opératoire jusqu'à ce que l'extrémité supérieure de la plage de fréquences ait été atteinte.



IEC 2195/13

Figure 9 – Système à fil fusible déconnectant un secoueur d'une portée d'essai; cette double exposition montre le mécanisme à la fois fermé et ouvert.

La vitesse de décroissance est enregistrée et exprimée en termes de décrémentation logarithmique qui est fondamentalement le logarithme naturel du rapport des amplitudes de deux cycles de vibrations successifs.

En se basant sur l'acquisition des données, on peut calculer le décrétement logarithmique au moyen de l'équation suivante: