

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Environmental testing –

Part 2-86: Tests – Test Fx: Vibration – Multi-exciter and multi-axis method

Essais d'environnement –

Partie 2-86: Essais – Essai Fx: Vibrations – Méthode par excitateurs multiples et axes multiples



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Environmental testing –

Part 2-86: Tests – Test Fx: Vibration – Multi-exciter and multi-axis method

Essais d'environnement –

Partie 2-86: Essais – Essai Fx: Vibrations – Méthode par excitateurs multiples et axes multiples

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 19.040

ISBN 978-2-8322-8242-7

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
1 Scope	6
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	8
4 Background	9
4.1 General.....	9
4.2 Multi-axis and/or multi-exciter testing to achieve an improved distribution of dynamic responses	9
4.3 Multi-exciter testing for large equipment.....	10
4.4 Multi-axis testing for reliability growth	10
4.5 Multi-axis testing to reduce test durations	10
5 Test apparatus and control strategy.....	11
6 Test severities and tolerances	11
6.1 Test severities	11
6.2 Tolerances	11
6.3 Excitations outside the specified test frequency range	11
6.4 Cross-axis motions	12
7 Mounting of specimen and installation of measurement systems.....	12
8 Precursor testing	13
9 Vibration response investigation	13
10 Pre-conditioning	13
11 Initial measurement and functional performance test	14
12 Low level excitation for equalisation prior to testing	14
13 Testing	14
14 Intermediate measurement and functional performance	14
15 Recovery	14
16 Final measurement and functional performance and vibration response investigation	15
17 Test verification	15
18 Information to be specified in the relevant specification	15
19 Information to be given in the test report.....	16
Annex A (informative) Guidance on multi-axis and multi-exciter test control systems	18
A.1 General.....	18
A.2 Multi-exciter control strategies	18
A.3 Determined and over determined control strategies	19
A.4 Quantifying the inter-relationship between exciters for vibration testing	20
A.5 Quantifying the inter-relationship between exciters for time history replication testing.....	21
Annex B (informative) Additional testing guidance	23
B.1 Fixing, monitor, control and reference points.....	23
B.2 Control equalisation	23
B.3 Cross-axis motion, signal distortion and out of test frequency range responses	24
B.4 Precursor testing	25
B.5 Vibration response investigation	25

B.6	Temperature conditioning and stabilization	25
B.7	Performance evaluation	26
B.8	Verification of test procedure	26
Annex C (informative)	Guidance on the application of multi-axis / multi-vibrator tests	28
C.1	General.....	28
C.2	Advice on using multi-exciter systems for the testing of large specimens	28
C.2.1	General	28
C.2.2	Data measurements.....	28
C.2.3	Multi-exciter test fixture	28
C.2.4	Test control	29
C.2.5	Testing	29
C.3	Advice on using multi-axis systems for multi-degree of freedom testing	29
C.3.1	General	29
C.3.2	Data measurements.....	30
C.3.3	Multi-exciter test fixture	30
C.3.4	Test control	30
C.3.5	Testing	30
C.4	Advice on using multiple shakers attached directly to the specimen via flexible couplings	31
C.4.1	General	31
C.4.2	Data measurements.....	31
C.4.3	Multi-exciter test fixture	32
C.4.4	Test control	33
C.4.5	Interrelationship in testing.....	34
Annex D (informative)	Guidance on the use of measured data for multi-axis/multi-vibrator tests.....	35
D.1	General.....	35
D.2	Use of measured data to derive test severities.....	35
Annex E (informative)	Guidance on the selection of test tolerances	37
E.1	General.....	37
E.2	Test tolerances associated with measured data	37
E.3	Test tolerances applicable to different parameters	37
Bibliography		39
Figure A.1	Power Spectral Density (PSD) and Cross-Spectral Density (CSD) for a two exciter system	20
Figure A.2	Power Spectral Density (PSD) and Cross-Spectral Density (CSD) for a six exciter system.....	20
Figure C.1	Examples of spherical bearings	33
Table E.1	Test tolerances applicable to different parameters	38

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ENVIRONMENTAL TESTING –

**Part 2-86: Tests – Test Fx: Vibration –
Multi-exciter and multi-axis method**

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 60068-2-86 has been prepared by IEC technical committee 104: Environmental conditions, classification and methods of test. It is an International Standard.

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

Draft	Report on voting
104/1035/FDIS	104/1043/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

A list of all parts in the IEC 60068 series, published under the general title *Environmental testing*, can be found on the IEC website.

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

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-2-86:2024

ENVIRONMENTAL TESTING –

Part 2-86: Tests – Test Fx: Vibration – Multi-exciter and multi-axis method

1 Scope

This document provides a test procedure for use with multi-exciter and multi-axis vibration test systems. The vibration test is intended for general application to components, equipment, and other products, hereinafter referred to as "specimens", subjected to dynamic environments that could arise during an equipment life cycle. Although this document is mainly intended for vibration testing, the procedure is also applied to certain types of shock and transient tests.

The test procedure set out in this document is applicable where a specimen is required to demonstrate its adequacy to resist specified vibration, shock and transient conditions, without unacceptable degradation of functional or structural performance. The test procedure has significant similarity to test procedures of other IEC 60068-2 documents and encompasses the same range of vibration and shock excitation types.

This document is applicable to specimens subjected to vibration, shock and transient conditions resulting from transportation and/or operational environments, for example in aircraft, space vehicles and land vehicles. It is primarily intended for unpackaged specimens. It is applicable to specimens in their transportation container when the latter are considered as part of the specimen itself.

The test method and associated techniques addressed within this document are primarily intended for use with multiple electrodynamic or servo-hydraulic vibration generators along with an associated computer-based digital control system to control of the specimen excitations.

This document encompasses two testing approaches, commonly referred to as multi-exciter single-axis (MESA), and multi-exciter multi-axis (MEMA). These are:

- a) Utilising fixed base shakers either in a single axis or a selected combination of fixed X, Y, Z configurations, also allowing for rotations dependent upon fixture coupling design.
- b) Utilising multiple shakers attached directly to the specimen via flexible couplings or similar methods. Here the shakers are attached at any point and in any direction on the specimen. This approach is quite similar to that used for modal testing, but using environmental test severities.

It is emphasised that MESA and MEMA testing currently requires a high degree of engineering judgement and relevant experience, and both test specifier and tester are fully aware of this fact. Generally, MESA and MEMA testing requires greater resources to set up an appropriate test, but potentially provides a more accurate outcome.

For the purpose of this document, the creator of the relevant testing specification, the test specifier, is expected to select the procedure and the values of severity appropriate to the specimen and its use. Precursor testing is included within the procedure of this document, as an option, to permit the test specifier to establish the practicality of the test specification and severities with the specimen. A separate specimen is usually provisioned for such precursor testing.

The existing single axis, single vibrator test procedures within the IEC 60068-2 series can be used with a wide range of different excitations, such as broad band random, random on random, sine on random, swept sine, shock, and long-time history replication. Theoretically these different forms of excitations, can also be applied using multi-axis and multi-exciter methods. However, suitable techniques and commercially available test control software, for some of these types of testing, are not necessarily currently commonly available. For this reason, the procedure of this document is currently primarily intended for broad band random and time history replication as facilities to undertake these types of tests are commonly available. With that said, the procedure of this document may be adapted, by the user, for other forms of excitation and advice is provided.

Traditionally, vibration, shock and transient test severities are specified using acceleration as the control parameter. However, this is not an essential pre-requisite of the procedure within this document. For the purpose of this document, vibration, shock and transient test severities are specified by the user and may be in the form of acceleration, velocity, displacement, or force. The need to include different control parameters within this document arises because there is a greater likelihood when using multi-exciter testing to specify mixed parameters for control purposes. In which case the vibration, shock and transient waveforms applied to the specimen will be controlled based upon the feedback from transducers measuring the appropriate parameter.

Although primarily intended for electrotechnical specimens, this document is not restricted to them and may be used in other fields where desired.

2 Normative references

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

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

IEC 60068-2-6, *Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration, (Sinusoidal)*

IEC 60068-2-27, *Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock*

IEC 60068-2-57, *Environmental testing - Part 2-57: Tests – Test Ff: Vibration – Time-history and sine-beat method*

IEC 60068-2-64, *Environmental testing – Part 2-64: Tests – Test Fh: Vibration, broadband random and guidance*

IEC 60068-2-80, *Environmental testing – Part 2-80: Tests – Test Fi: Vibration – Mixed mode*

IEC 60068-2-85, *Environmental testing – Part 2-85: Tests – Test Fj: Vibration – Long time history replication*

ISO 2041, *Mechanical vibration, shock and condition monitoring – Vocabulary*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in ISO 2041, IEC 60068-1, IEC 60068-2-6, IEC 60068-2-27, IEC 60068-2-57, IEC 60068-2-64, IEC 60068-2-80 and IEC 60068-2-85 and the following apply.

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

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

3.1

multi-exciter single-axis

MESA

method of applying vibration test waveforms using multiple vibration exciters, but all applying the vibrations in a single specimen axis

3.2

multi-exciter multi-axis

MEMA

method of applying vibration test waveforms using multiple vibration exciters in two or more specimen axis

Note 1 to entry: The applied excitations may be in the translation axes, rotational axes or both translation and rotational axes.

3.3

single-input single-output

SISO

method of applying vibration test waveforms using input of a single drive signal to an exciter system in a single-degree of freedom configuration and a single measured output from the test specimen or its fixing points in a single-degree of freedom configuration

Note 1 to entry: This is essentially a conventional single axis/exciter test arrangement using a single measured response for control purposes.

3.4

single-input multiple-output

SIMO

method of applying vibration test waveforms using input of a single drive signal to an exciter system in a single degree of freedom configuration, and multiple measured outputs from the test specimen or its fixing points in a multi-degree of freedom configuration

Note 1 to entry: This is essentially an extension of a conventional single axis/exciter test arrangement, but manipulating multiple measured responses for control purposes.

3.5

multiple-input single-output

MISO

method of applying vibration test waveforms using input of multiple drive signals that are applied to the multiple exciters, to produce a single measured output from the test specimen or its fixing points

Note 1 to entry: Unless the multiple inputs are applying the identical waveform, this arrangement is often not possible as multi-exciter test control systems often require the number of outputs to match the number of inputs.

3.6

multiple-input multiple-output MIMO

method of applying vibration test waveforms using input of multiple drive signals that are applied to the exciters, to produce multiple measured outputs from the test specimen or its fixing points

Note 1 to entry: Commonly, as a minimum, the number of inputs and outputs should be the same, but many systems used for multi-exciter control, allow the number of outputs to exceed the number of inputs. Commonly, multi-exciter and multi-axis test control systems operate as multiple-input multiple-output systems.

4 Background

4.1 General

The capability to undertake multi-exciter testing has been available for some time for seismic as well as durability / fatigue testing. Generally, such tests utilise excitations which occur at relatively low frequencies. It is only comparatively recently that capabilities have become commonly available to undertake multi-axis and/or multi-exciter tests, at frequencies necessary for general purpose vibration, shock and transient testing.

The use of multi-axis and/or multi-exciter testing equipment [1]¹ for certain types of vibration, shock and transient testing is currently perceived as having advantage in a number of applications, some of which are set out below. This list should not be considered as exhaustive as applications for multi-axis and/or multi-exciter testing are still being identified. Broadly the advantages of multi-axis and/or multi-exciter testing include better loading distribution, more realistic excitations, and the potential for test time reduction.

4.2 Multi-axis and/or multi-exciter testing to achieve an improved distribution of dynamic responses

Multi-axis and/or multi-exciter testing is in regular use for large and/or dynamically complex specimens, where there is a need to ensure that the dynamic response motions of the specimen are correctly achieved. In such cases multi-exciter testing can achieve a far more accurate distribution of dynamic responses than the traditional vibration, shock and transient testing methods. This is particularly the case when the specimen would experience, in-service, dynamic excitations from multiple excitation sources. An example of this would be a road vehicle where somewhat different dynamic excitations arise from each wheel.

Using multi-axis and/or multi-exciter testing to achieve an improved distribution of dynamic responses within a specimen, usually requires test severities which are derived from vibration, shock or transient data, measured during actual life cycle conditions. The applied dynamic excitations are commonly controlled from measurements at multiple response locations. This is essentially a "controlled response" test control strategy. This is a fundamentally different control strategy, to that used for the majority of the single axis vibration, shock and transient tests within IEC 60068-2. Those single axis tests are basically "controlled excitation" tests both applying and controlling the excitations to the specimen's fixing points. Such a control strategy is not profoundly influenced by the dynamic responses of the specimen. Consequently, the test severities for such "controlled excitation" tests can readily adopt "generic" severities as the severities are independent of the dynamic responses of the specimen.

For some applications "generic" severities have advantage in that they may represent a wide range of life cycles conditions. For example, the generic test severities for transportation encompass a range of usage conditions and a variety of transportation platforms. The use of simple generic test severities with multi-axis and/or multi-exciter testing may limit the ability to achieve an accurate distribution of dynamic responses.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

4.3 Multi-exciter testing for large equipment

Multi-exciter testing is sometimes used as a testing convenience, permitting the use of several smaller exciters rather than a single much larger (and more expensive) exciter. In this case the use of multi-exciter testing can permit the testing of equipment which otherwise would not be practicable. As an example, four vibrators could be (electrically and mechanically) coupled together to provide a facility to test very large specimens such as entire vehicles. If the waveforms applied to each exciter are correlated, then such a setup is essentially that of a conventional single axis test procedure and comparable test severities could be adopted. If the waveforms are not correlated, then the procedure of this document would be more applicable. In such cases the test severities may be defined either as applied excitations to the specimen fixing points or as specimen responses. In either case, the testing arrangement means that the test will need to be controlled using a "controlled response" strategy.

Although the use of generic test severities is a possibility when using this type of test approach, the phase and amplitude relationship between the excitations will still need to be derived with some knowledge of actual relationships. This is necessary as, without such knowledge, the dynamic conditions experienced by the specimen may well be significantly increased and/or decreased in an indeterminate way from that of a single axis test.

4.4 Multi-axis testing for reliability growth

Multi-axis testing has been perceived as having advantage for reliability growth testing of certain types of electro-technical equipment. This is because the multi-axis dynamic responses produced within the specimen are different, in many ways, to those produced during single axis testing. The multi-axis dynamic responses produced are considered to exercise a greater number of potential failure and degradations modes of the specimen than the conventional single axis testing.

The test severities used for reliability growth testing are generally exaggerated (viz. greater than those likely to be experienced in-service) and applied at the fixing points of the specimen. For this specific purpose, the use of generic test severities may be appropriate. Nevertheless, the dynamic responses within the specimen may not necessarily represent conditions which actually occur during the specimen life cycle. For this reason, failures identified by such test are commonly the subject of a reliability failure assessment, to ensure they could realistically occur during the equipment's life cycle.

4.5 Multi-axis testing to reduce test durations

Multi-axis testing has sometimes been proposed as a testing convenience for reducing the duration of applied excitation. Simplistically, by applying excitations in all three-axis simultaneously, the test duration can be reduced by a third from that of single axis tests undertaken in three axes separately. It may also achieve savings in that only one test set up is required. However, these savings may not necessarily be fully achieved as the multi-axis test set up may be more complicated to achieve. When coupled with the purpose of achieving an improved distribution of dynamic responses, such a saving may not always be possible, as the use of more realistic severities may also require them to be applied for longer durations.

There can also be a concern when multi-axis testing is used with generic severities to achieve a test duration reduction. This is because the phase and amplitude relationship utilised between the different excitation axes, will produce indeterminately increased and/or decreased dynamic conditions with the specimen from those of three separate single axis tests. Commonly generic severities are based upon long historic experience with the existing single axis test. As such it may not be realistic to compare the outcome of multi-axis testing, undertaken with generic severities, with the outcome of historic single axis tests.

5 Test apparatus and control strategy

The use of any multi-exciter or multi-axis test system, capable of satisfying the test requirements, is acceptable [1]. The capability of the excitation equipment and control facility to conduct the test, as specified in the relevant specification, shall be verified prior to undertaking the test.

Guidance information on multi-exciter / multi-axis test control systems is provided in Annex A. Guidance on the application of different control strategies is provided in Annex B. Guidance on the use of different multi-exciter / multi-axis test configuration is provided in Annex C. Further general guidance on multi-exciter and multi-axis testing can be found in [2], [3], [4] and [5].

6 Test severities and tolerances

6.1 Test severities

The test severities utilised shall be those specified in the relevant specification. Unless specified otherwise, the severities and other parameters necessary to undertake this test should be based on the purpose for which it is being conducted and on the conditions the specimen is likely to experience during its life cycle.

Guidance information on establishing severities for multi-exciter / multi-axis testing is provided in Annex D.

6.2 Tolerances

The measured control responses shall not deviate from the specified requirements by more than the test tolerances quoted in the relevant specification.

Unless specified otherwise the tolerance on:

- a) Power spectral density values, of a Gaussian random vibration test, shall be within ± 3 dB of the specified values.
- b) Time history amplitudes, of a time history replication test, shall be within ± 20 % of the highest amplitude of the specified waveform for at 90 % of the specified waveform duration.

The test tolerances shall not be used to modify the specified requirements.

Any deviation from the specified tolerances shall be agreed with the relevant test specifier and the actual tolerances achieved, and reason for the deviation, stated in the test report. In order to achieve such an agreement, it is recommended that the verification measurements set out in Annex B should be made available to the relevant test specifier.

Guidance information on the selection of suitable tolerances for multi-exciter / multi-axis testing is provided in Annex E.

6.3 Excitations outside the specified test frequency range

Excitations outside the specified test frequency range shall be minimised and if required quantified. The approach to be used to quantify excitations outside the specified test frequency range, if required, shall be specified in the relevant specification. Guidance information on establishing severities for multi-exciter / multi-axis testing is provided in Annex B.

Unless specified otherwise the out of test frequency range excitations shall be established as set out below.

- a) Random vibration: For random vibration tests, including all the vibration tests, which have broad band and narrowband random components, the out of test frequency range responses

shall be established up to 5 000 Hz or 5 times the driving frequency, whichever is the lesser. The out of test frequency range responses shall be established in accordance with the procedure of IEC 60068-2-64, although it should be noted that the procedure of IEC 60068-2-64 is specifically related to the use of acceleration as a control parameter.

- b) Time history replication: For time signal replication tests the out of test frequency range responses shall be established up to 10 000 Hz or 10 times the driving frequency, whichever is the lesser. The out of test frequency range responses shall be established in accordance with the procedure of IEC 60068-2-85.
- c) Sinusoidal tests: For sinusoidal vibration tests (fixed, swept and stepped) the signal tolerance shall be established up to 5 000 Hz or 5 times the driving frequency, whichever is the lesser. This parameter applies whether the signal is acceleration, velocity, or displacement. The signal tolerance shall be established in accordance with the procedure of IEC 60068-2-6.

6.4 Cross-axis motions

The relevant specification shall specify whether cross-axis motions are to be controlled. If there is a requirement to control cross-axis motions, then the relevant specification shall also specify the approach to be used to quantify the cross-axis motions and the appropriate tolerance.

If cross-axis motions are of concern and no requirements are provided in the relevant specification, then the following are recommended.

- a) Random vibration: should not exceed -3 dB of the highest specified spectral acceleration for each control axis for each frequency up to 500 Hz or 0 dB for higher frequencies in accordance with IEC 60068-2-64.
- b) Sine vibration: should not exceed 50 % of the highest specified acceleration for each control axis for each frequency up to 500 Hz or 0 dB for higher frequencies in accordance with IEC 60068-2-6.
- c) Time history replication: should not exceed 50 % of the highest specified acceleration for each control axis at each time step in accordance with IEC 60068-2-85.

Any deviation from the specified cross-axis requirements shall be agreed with the relevant test specifier and the actual cross axes motions achieved, and reason for the deviation, stated in the test report. In order to achieve such an agreement, it is recommended that the verification measurements set out in Annex B should be made available to the relevant test specifier.

Further guidance information on cross-axis motions for multi-exciter/multi-axis testing is provided in Clause B.3.

7 Mounting of specimen and installation of measurement systems

The specimen shall be mechanically connected to the multi-exciter and fixtures, in the required orientation and state, as specified in the relevant specification. Unless specified otherwise, the specimen shall be held by its normal means of attachment. The specimen installation shall include, as required, any connections necessary for power supplies, test signals, performance monitoring and any monitoring instrumentation, to establish the responses from the test specimen.

General guidance on the mounting of specimens for vibration testing is provided in IEC 60068-2-47 [6]. However, the guidance and normative requirements of IEC 60068-2-47 are intended for single axis testing, they are not necessarily fully applicable to multi-exciter testing. Additional guidance on test fixtures and the mounting of specimens, applicable to different types of multi-axis or multi-exciter testing, is provided in [1] as well as in Annex C.

Thermal, vibration, shock and transient measurement instrumentation shall be installed on to the test specimen and test fixture, as specified by the relevant specification.

- a) The characteristics of the thermal, vibration, shock and transient measuring systems shall be such that they can determine whether the true value of the measured parameter is within the tolerance required for the test.
- b) The frequency range of vibration measurement systems shall extend from at least 0,5 times the lowest test frequency to 2,0 times the highest frequency of the test frequency range. For shock and transient measurement systems the frequency range shall extend from at least 0,5 times the lowest test frequency to 10,0 times the highest frequency of the test frequency range.
- c) The frequency response of the overall vibration, shock and transient measurement systems, which includes the transducer, signal conditioning, data acquisition and processing devices, shall be flat within $\pm 5\%$, over the test frequency range.

8 Precursor testing

Precursor testing is included within this procedure, as an option, to permit the test specifier to establish the practicality of the test specification and severities with the specimen. Precursor testing may be used in order to verify the adequacy of the control strategy, signal tolerance, out of test frequency range responses and cross-axis motion. Precursor testing may require the provision of a separate specimen.

The precursor testing may additionally be used to quantify the inter-relationship between the excitations, using the parameters specified in the relevant specification. The inter-relationships between the excitations are normally specified using parameters such as cross-spectral densities (amplitude and phase), partial coherence and multiple coherence. If no parameter is specified in the relevant specification the most convenient for the test controller may be utilised.

If precursor testing is required, by the relevant specification, it shall be undertaken as stipulated.

With the agreement of the test specifier, based upon the results of the precursor testing and/or pre-test dynamic characterisation, aspects of the test control severities, parameters and tolerances may be re-specified. Any agreed changes shall be recorded in the appropriate test report.

Further guidance on precursor testing is provided in Clause B.4.

9 Vibration response investigation

Any pre-test vibration response investigation to identify the dynamic characteristics of the specimen, stipulated in the relevant specification, shall be undertaken, and recorded in accordance with the stated procedure. Guidance on dynamic characterisation related specifically to this procedure is provided in Clause B.5. The vibration response investigation is a convenient and sensitive method for the evaluation of the effects of dynamic excitations. Aims, purpose and methods for vibration response investigations, with its advantages, are explained in IEC 60068-3-8. The requirements for sinusoidal excitation are given in test Fc (IEC 60068-2-6) and for random excitation in test Fh (IEC 60068-2-64).

10 Pre-conditioning

If appropriate the temperature chamber shall be adjusted to provide any temperature pre-conditioning requirements specified in the relevant specification. Unless specified otherwise, adjustment of temperature to achieve any pre-conditioning requirements shall be at a rate no greater than $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ per minute. Guidance on pre-conditioning and thermal stabilization is provided in Clauses B.5 and B.6 respectively, as well as [7].

11 Initial measurement and functional performance test

A pre-test functional or performance test shall be performed, as specified in the relevant specification to provide baseline data. Guidance on functional performance testing is provided in Clause B.7.

12 Low level excitation for equalisation prior to testing

The multi-exciter test control equipment shall be adjusted to achieve the desired equalisation, up to –6 dB of the specified level. Unless otherwise specified in the relevant specification, the equalisation process of Annex B shall be used. The time required to achieve equalisation shall not be subtracted from the test time.

13 Testing

The excitations shall be increased to the full specified test level. The finite time required to increase the test severity, to the specified test level, shall be the minimum possible and shall not exceed 10 % of the test duration. This time shall be recorded and shall not be subtracted from the test time. Guidance on vibration control equalisation and thermal stabilisation is provided in Annex B.

The required mechanical and thermal test cycles shall be applied to the test specimen, for the number of test cycles specified.

If for any reason the test is interrupted or disrupted then, unless there is an alternative procedure in the relevant specification, any interrupted shock or transient waveform shall be repeated in its entirety. Interrupted vibration testing shall recommence from the point where it was interrupted. In either case, the climatic pre-conditioning and stabilization, as required in Clause 10, shall be achieved before recommencing the test. If a single interruption occurs with a deviation in temperature of less than 10 %, then testing can continue from where the deviation or interruption ends.

When continuous vibration testing would cause unrealistic heating of the specimen or its mounting, the excitations may be interrupted by periods of rest for a duration time specified in the relevant specification.

The test procedure shall be repeated, for all specified mechanical and thermal test cycles. If using a multi-exciter single-axis test configuration, the test procedure shall be repeated, applying excitations along each specified axis in turn. When the test programme requires the application of a number of different types of vibration or shock, amplitude levels, durations or rigging conditions, unless otherwise specified by the relevant specification, it is permitted to complete the entire sequence of tests for one axis prior to changing to another axis.

14 Intermediate measurement and functional performance

Functional or performance testing shall be performed at intervals during the testing, as specified in the relevant specification. Guidance on functional performance testing is provided in Clause B.7.

15 Recovery

At the completion of the test, the climatic chamber shall be allowed to return to the laboratory conditions (preferably selected from IEC 60068-1), at a rate no greater than 3 °C per minute. Alternatively, the relevant specification may require that one of the recovery procedures of IEC 60068-1 be followed.

16 Final measurement and functional performance and vibration response investigation

Perform any post-test functional or performance testing specified in the relevant specification shall be undertaken. Guidance on functional performance testing is provided in Annex B.

Any post-test vibration response investigation, stipulated, shall be undertaken, and recorded in accordance with the stated procedure.

The specimen shall be examined for degradation and detrimental effects, as required by the relevant specification.

17 Test verification

Any measurements and analysis, specified in the relevant specification, to verify that the test has been achieved shall be undertaken. Guidance on test verification is provided in Clause B.7.

18 Information to be specified in the relevant specification

When this test is included in the relevant specification, the following details shall be given as far as they are applicable:

- a) Whether the test is a demonstration of performance or survival or both;
- b) The multi-exciter multi-axis test configuration;
- c) The method and orientation of mounting the specimen and details of any connections for necessary cables, pipes, etc.;
- d) If using a multi-exciter single-axis configuration; the axes and senses along which the multi-excitation is to be applied;
- e) Whether gravitational effects are to be considered;
- f) If the influence of stray magnetic fields is important, the acceptable limits and the action to be taken if these limits are exceeded;
- g) Whether the specimen is to be tested with or without isolating mounts fitted, where applicable;
- h) The precursor test strategy and requirements including the parameters to be established and test verification criteria to be adopted;
- i) The control strategy to be adopted, including the control and monitoring points, or the procedure for their selection;
- j) For vibration tests, the type of vibration test, the vibration test severities, the axis, and order in which the vibration tests are to be applied as well as the test duration including rest periods where applicable;
- k) For shock tests, the type of shock test, the shock test waveform, the axis, sense, and order in which the shocks are to be applied;
- l) The temperature and humidity conditions, and if applicable the thermal test cycles, under which the test is to be conducted, if other than standard atmospheric conditions;
- m) The minimum frequency resolutions to be used for control, monitoring and verification purposes;
- n) The maximum permissible variation between responses measured at the control points and the action to be taken if outside these limits (unless otherwise specified only applicable to multi-point control);
- o) Whether cross-axis motion is important, and if so the acceptable limits for this motion and the action to be taken, if the limits are exceeded;
- p) The tolerances to be applied;

- q) If functional performance is to be assessed, the phases of the test when the specimen is to operate and be assessed, and the levels of performance required;
- r) Whether any visual or other examinations are required, and if so at what phases of the test they are to be conducted;
- s) Whether any pre-test and post-test dynamic characterisation is required, the approach to be used and a suitable procedure;
- t) Any additional parameters to be recorded, test verification criteria to be adopted, data to be collected and method of analysis;
- u) Any permitted deviations from the test procedure.

19 Information to be given in the test report

As a minimum the test report shall show the following information:

- a) Customer (name and address);
- b) Test laboratory (name and address);
- c) Test report identification (date of issue, unique number);
- d) Test dates (date when test was run);
- e) Purpose of the test (development test, qualification, etc.);
- f) Test standard, edition (relevant test procedure);
- g) Test specimen description (initial status, unique ID, quantity, photo, drawing, etc.);
- h) Mounting of test specimen (fixture ID, drawing, photo, etc.);
- i) Performance of test apparatus (cross motion, etc.);
- j) Measuring system, sensor location (description, drawing, photo, etc.);
- k) Uncertainties of measuring system (overall uncertainty, calibration data, if required by relevant specification last/next date of calibration);
- l) Initial, intermediate and/or final measurements (if performed by the test laboratory);
- m) Test severities achieved (measured severities);
- n) Test results (final status of test specimen);
- o) Observations during testing and actions taken (details of any testing issues, test disruptions);

- p) Summary of test (summary of test, pass fail decisions);
- q) Test manager (name and signature);
- r) Distribution (list of those receiving the report).

NOTE 1 A test log is written for the testing, where the test is documented by, for example, a chronological list of test runs with test parameters, observations during testing, actions taken and data sheets on measurements made. The test log can be attached to the test report.

NOTE 2 See also ISO/IEC 17025 [8].

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-2-86:2024

Annex A (informative)

Guidance on multi-axis and multi-exciter test control systems

A.1 General

The use of multi-exciter and multi-axis systems for vibration, shock and transient testing can have positive advantages, especially when testing large or heavy structures or those with a dynamic response not easily replicated with a single excitation source. Multi-exciter test facilities can permit the application of a broader distribution of vibratory energy and vibratory forces into a specimen, than is typically possible with single exciter systems (either SISO or SIMO). The most common applications of multi-exciter testing are indicated below, although not necessarily limited to those applications.

- a) Multi-exciter systems can be used for the testing of large and heavy specimens, which cannot readily be tested with single exciters. The use of multi-exciter systems allows vibration, shock and transient testing of vehicle equipment or payloads, which would otherwise require evaluation on a test track. Advice on the use of multi-exciter systems (either MISO or MIMO) for the testing of large vehicle and ship systems is given in Annex C.
- b) Multi-exciter systems, configured to excite specimens in up to six degrees of freedom, have advantage for the evaluation of equipment reliability and the appraisal of some sensor systems. Advice on the use of multi-axis systems for multi-degree of freedom testing is given in is given in Annex C.

A.2 Multi-exciter control strategies

Multi-exciter test facilities are commonly configured in one of two ways, both of which are encompassed by the procedures of this chapter.

- a) Multi-exciter multi-axis (MEMA). This configuration utilises multiple exciters to apply dynamic inputs to the equipment in multiple directions. The multiple exciters may be configured to generate dynamic responses in one to six degrees of freedom simultaneously. This configuration is usually adopted when multi-axis excitations occur which either generate conditions or damage, which cannot be replicated by applying the excitation to each axis in-turn.
- b) Multi-exciter single-axis (MESA). This configuration utilises multi-exciter, to simultaneously apply dynamic inputs to equipment in a single direction. This configuration is frequently adopted for testing long slender structures, or for replicating multiple excitation sources (such as payloads of a wheeled vehicle). A special case of this test equipment configuration may be used, when a large force capacity is required. In such a case the multiple exciters may be operated with them coupled in-phase.

MESA and MEMA are the two general testing approaches encompassed by this document. Single-input single-output (SISO), single-input multiple-output (SIMO), multiple-input single-output (MISO) and multiple-input multiple-output (MIMO) are more detailed exciter arrangements of MESA or MEMA with defined drive signal and response measurement arrangements. In principle, with all the defined testing arrangements (SISO, SIMO, MISO and MIMO) rigid table or rigid frame with fixed base exciter or exciters attached directly with flexible couplings to the specimen may be used. In practice, some arrangements are more common and applicable than others.

Regardless of the configuration of the test facility, multi-exciter test control systems apply multiple drive waveforms to the various exciters, to reproduce multiple measured control responses. The measured control response or responses may be either on the test specimen or its attachments.

The general principles of a closed loop control strategy used for multi-exciter testing are essentially the same as that of single exciter testing. Vibration, shock or transient excitation is controlled to within specified bounds, by sampling the dynamic motions of the specimen under test, at specific locations. These locations may be at, or in close proximity to, the specimen fixing points (controlled input) or at defined points on the specimen (controlled response). In practice, most multi-exciter tests are controlled on the response of the specimen, but in some instances at locations in close proximity to the exciter attachment points. The control strategy is normally specified in the relevant specification, but may, with the agreement of the test specifier, be amended as a result of precursor testing.

Although the general principles of multi-exciter testing are similar to those used for the more commonly encountered single exciter testing (SISO or SIMO), there are additional considerations that need to be addressed. Control of a multi-exciter system typically necessitates the application of multiple drive waveforms to the exciters. In some situations, these excitations may be entirely correlated (with each exciter applying essentially the same excitation) or entirely uncorrelated (with each exciter applying entirely independent excitations). However, these two are special cases of the more common situation, where the excitations are partly correlated and there is some degree of inter-relationship, between the waveforms applied to the separate exciters. Moreover, quantitatively the degree of inter-relationship will vary with frequency and be dependent upon the dynamic characteristics of the specimens and its test fixture. Specifying and quantifying this inter-relationship, between the excitations applied by the separate exciters, is a critical difference between multi-exciter testing and the single exciter case.

With the exception of correlated exciter testing, establishing, and quantifying the inter-relationship between each response degree of freedom is an essential part of defining the test requirement for multi-exciter tests. This inter-relationship is normally developed from measurements made during environmental characterisation work to establish suitable severities. However, in the absence of suitable data, pre-cursor testing may be required to establish suitable requirements.

Quantifying the vibration inter-relationship between the responses is classically achieved by augmenting the normal power spectral density severities for each degree of freedom, with cross-spectral densities between each response pair. For multi-exciter time history or shock testing the power spectral densities and cross-spectral densities may be replaced by the auto correlation function and cross-correlation functions, respectively.

A.3 Determined and over determined control strategies

Historically, multi-exciter testing, has adopted a traditional "square" control technique, where the number of exciters equals the number of control measurements. As an example, an arrangement of two exciters would be controlled using two control accelerometers. Typically, the control accelerometers could be placed either the two exciter heads, the two attachment points, or two locations on the specimen near the attachment points. With this testing arrangement, many additional response measurements could also be made, providing a good estimate of the dynamic responses of the entire test system. Commonly several of the additional response measurements may also be used to limit the responses of the specimen, in conjunction with the two control measurements, to avoid over-testing. However, as with any limit control scenario, the use of the inherent extremal control can dramatically reduce the excitation levels and create discontinuities in the frequency responses.

An alternative and more recently used method is the so called over-determined or "rectangular" control, in which the number of control measurements exceeds the number of exciters. Over-determined control uses an approach akin to least-squares curve fitting methods, to provide an improved estimate of the system multiple frequency response functions, from which closed loop control is achieved. The reported advantage of over-determined control is that it can result in dynamic vibration responses which have a closer match to the reference spectral density matrix (in a least squares sense) over a greater number of degrees of freedom than could be achieved using square control with the same number of exciters. However, the disadvantage is that any individual degree of freedom may have a larger deviation from its reference spectrum than would be achieved using square control.

Multi-exciter testing using the multi-axis test configuration may encompass both orthogonal and rotational degrees of freedom. In such cases it may be necessary to adopt a control strategy which incorporates signal transformation. Signal transformation is essentially the linear mapping of the control points to some pre-determined degrees of freedom used for control. Typically, the mapped degrees of freedom of a 'virtual point' are chosen to be the rigid body degrees of freedom of interest. The location of the virtual point is usually defined by the test specifier. The intent of adding flexible body degrees of freedom to the control is to give the system more control authority, so it can work to suppress specific vibration modes. As an example, the signal transformation method can be used to map the response of four tri-axial accelerometers to six rigid body degrees of freedom with rotations defined about the virtual control point, which typically will be at the excitation equipment. The calculated linear and angular accelerations of the virtual control point are used as the control signals for the six degrees of freedom test.

A.4 Quantifying the inter-relationship between exciters for vibration testing

For a two-exciter system, a minimum of two power spectral densities and a complex conjugate pair of cross-spectral density are required. A six-exciter system would require a minimum of six power spectral densities as well as fifteen complex cross-spectral densities. These examples are illustrated in Figure A.1 and Figure A.2. It should be noted that only the upper half of the matrix needs to be defined, because the lower off-diagonal terms are the complex conjugates of the upper off-diagonal terms. A cross-spectral density may be specified in terms of its complex (real and imaginary) components or more commonly in terms of the relative amplitude and phase between the exciter pairs.

$PSD_{xx}(f)$	$CSD_{xy}(f)$
$CSD_{yx}(f)$	$PSD_{yy}(f)$

NOTE The lower off-diagonal term is the complex conjugates of the upper off-diagonal term.

Figure A.1 – Power Spectral Density (PSD) and Cross-Spectral Density (CSD) for a two exciter system

$PSD_{xx}(f)$	$CSD_{xy}(f)$	$CSD_{xz}(f)$	$CSD_{xa}(f)$	$CSD_{x\beta}(f)$	$CSD_{xy}(f)$
$CSD_{yx}(f)$	$PSD_{yy}(f)$	$CSD_{yz}(f)$	$CSD_{ya}(f)$	$CSD_{y\beta}(f)$	$CSD_{y\gamma}(f)$
$CSD_{zx}(f)$	$CSD_{zy}(f)$	$PSD_{zz}(f)$	$CSD_{za}(f)$	$CSD_{z\beta}(f)$	$CSD_{zy}(f)$
$CSD_{ax}(f)$	$CSD_{ay}(f)$	$CSD_{az}(f)$	$PSD_{aa}(f)$	$CSD_{a\beta}(f)$	$CSD_{a\gamma}(f)$
$CSD_{\beta x}(f)$	$CSD_{\beta y}(f)$	$CSD_{\beta z}(f)$	$CSD_{\beta a}(f)$	$PSD_{\beta\beta}(f)$	$CSD_{\beta\gamma}(f)$
$CSD_{\gamma x}(f)$	$CSD_{\gamma y}(f)$	$CSD_{\gamma z}(f)$	$CSD_{\gamma a}(f)$	$CSD_{\gamma\beta}(f)$	$PSD_{\gamma\gamma}(f)$

NOTE The lower off-diagonal terms are the complex conjugates of the upper off-diagonal terms.

Figure A.2 – Power Spectral Density (PSD) and Cross-Spectral Density (CSD) for a six exciter system

During the system identification step, the test controller calculates the frequency response function information between each separate exciter and response location and generates the required excitation waveforms to achieve the required responses.

The use of the partial coherence function is typically adopted to augment the use of the cross-spectral density, although in some instances may be used in place of the cross-spectral densities. The use of partial coherence functions can allow the relative amplitude between the exciter pairs to be estimated but does not define the phase relationship between the exciter pairs. Consequently, if only partial coherence functions are used, they may require additional cross-spectral density phase information to be defined or estimated. The partial coherence function is particularly relevant when non-linear responses are anticipated.

As already indicated, there are two special cases of the general situation, where the excitations are partly correlated and there is some degree of inter-relationship between the waveforms applied to the separate exciters. The first special case is where the excitations are entirely correlated, that is each exciter applies essentially the same waveform. The second special case is where the excitations are entirely uncorrelated, that is with each exciter applying entirely independent waveforms. This case may be a reasonable approximation to the higher frequency aerodynamic excitations experienced by external surfaces of an aircraft. If either of these cases applies, they permit a useful simplification of the information that needs to be specified.

A.5 Quantifying the inter-relationship between exciters for time history replication testing

Time history replication testing has been possible with most single-axis vibration test control equipment, for many years. However, this facility was originally limited to replicating only a single block of vibration data or a single shock pulse, either singly or repeatedly. Such facilities typically limited the vibration or shock waveforms to be defined by no more than 8 192 time points. Despite this limitation, the approach was often adopted to replicate events such as earthquakes and short duration transient responses. In recent years facilities have become commercially available, which extend the time history replication approach to allow the continuous application of long duration waveforms. This has allowed time history replication testing to be used, as an alternative to random vibration testing, when it is important to reproduce specific characteristics of the waveform, such as when undertaking fatigue / durability tests.

Time history replication can be used with waveforms, which are not necessarily stationary or Gaussian. The primary requirement for utilising the time history replication method is that the frequency range of the waveform, to be reproduced, is less than the frequency range capability of the excitation facilities to be used. If the time history replication method is used to replicate purely vibration responses, the frequency range of the waveform needs only to be a little less than the frequency range capability of the excitation facilities. However, if used to reproduce shock waveforms, the frequency range of the waveform needs to be significantly less than the frequency range capability of the excitation facilities.

There are several different test control strategies currently utilised by commercially available test controllers for undertaking extended waveform duration time history replication tests. Typically, commercially test controllers adopt a mix of frequency domain and time domain methods to achieve effective control and to compensate for the distortions introduced by the amplifier, exciter and test rig / specimen. In the simplest form controllers utilise time histories and impulse response functions, in place of power spectral densities and frequency response functions used for control of conventional random vibration tests. Such an approach has historically proven to be relatively slow in terms of undertaking the necessary calculations. A faster solution has been found to be possible by using a complex fast Fourier transform to convert a time history into a sequence of complex frequency spectra and translate impulse response functions into frequency response functions. Using such reversible relationships, test control can be undertaken largely in the frequency domain in a manner similar to that used for random vibration control. Hence, the procedure for undertaking a time history replication test can appear quite like that used for random vibration test. In particular, both random vibration and time history replication tests, need a period of equalisation to allow the test controller to derive a suitable impulse response function or frequency response function which characterise the distortions introduced by the amplifier, exciter, and test rig / specimen. In both cases this is utilised as the basis for modifying the excitation waveform to compensate for the distortions.

The adaption of the time history replication test control strategies for multi-axis / multi-exciter testing proved to be of importance for several applications, including earthquake testing and automotive durability testing. The control strategies developed for single axis testing have become the basis for the development of time history replication control strategies for multi-axis / multi-exciter testing. Whilst multi-axis/multi-exciter testing requires the individual time history waveforms to be specified, there are different ways by which the inter-relationship between exciter / axes is specified. In some cases, the same cross-spectral densities, specified or derived for random vibration testing, may be used. In other instances, cross-correlation functions may be required.

Annex B (informative)

Additional testing guidance

B.1 Fixing, monitor, control and reference points

The selection of suitable fixing, control and reference points, for a particular specimen and mounting fixture assembly, is an important aspect for ensuring a valid test. For this test procedure the definitions of the fixing, monitor, control and reference points are as follows:

- a) A fixing point is defined as a part of the specimen in contact with the mounting fixture or vibration table, at a point where it is normally attached.
- b) A monitor point is a position at which measurements are made, to establish knowledge of the specimen dynamic response behaviour. This may be the response of the specimen, test fixture or test equipment.
- c) A control point is a position, at which measurements are made, to allow the excitations to be controlled to within specific bounds, during the test.
- d) The reference point is the point, at which measurements are made to confirm that the requirements of the test are satisfied. The reference point location should be stated in the relevant specification. It may be a monitor point, a control point or a 'virtual' point, created by manual or automatic processing of responses from several control points.

Suitable fixing, monitor, control, and reference points should be either specified in the relevant specification or that document should contain a procedure for selecting them. The suitability of the specified reference and control points may need to be verified by means of precursor testing.

The control and reference points, associated with controlled response testing, when using severities based upon measured data, will normally reflect the actual measurement locations.

Further information regarding the use of fixing, monitor, control and reference points for different types of tests can be found in IEC 60068-1, IEC 60068-2-6, IEC 60068-2-27, IEC 60068-2-64, IEC 60068-2-80 and IEC 60068-2-85.

B.2 Control equalisation

A finite test duration is required to allow the control equipment to achieve the necessary equalisation, for closed loop control. The time required for equalisation will be dependent upon the controller used, the complexity of the waveform and the behaviour of the specimen under test. For multi-axis / multi-exciter testing the duration required for equalisation is almost always likely to be greater than that required for a single axis / exciter control system. If a dynamically representative test specimen is being used, then an unlimited test time for equalisation can be applied. However, if the actual test specimen is being used then, unless specified in the relevant specification, the equalisation test time should be as follows:

- a) Initial equalisation is conducted below –12 dB of the specified root mean square (rms) level for vibration and the peak amplitude for time history replication. No test time limit is imposed for this phase of equalisation.
- b) The vibration levels are increased from –12 dB to –6 dB of the specified rms level for vibration and the peak amplitude for time history replication. The total duration at these levels should be no more than a quarter of the specified test duration. This equalisation time should not be subtracted from the specified test time.

- c) The vibration levels are increased from –6 dB to 0 dB of the specified rms level for vibration and the peak amplitude for time history replication. The time spent at these levels should be kept to a minimum. The total duration at these levels should be no more than 10 % of the specified test duration. This equalisation time should not be subtracted from the specified test time.

Further information regarding control equalisation for different types of tests can be found in IEC 60068-1, IEC 60068-2-6, IEC 60068-2-27, IEC 60068-2-64, IEC 60068-2-80 and IEC 60068-2-85.

B.3 Cross-axis motion, signal distortion and out of test frequency range responses

The verification of cross-axis motion may not be necessary when undertaking some forms of multi-axis testing. However, when using multi-exciter to replicate a single-axis test (MESA) configuration as well as when undertaking many forms MEMA tests, the relevant specification may require cross-axis motions to be verified before the test is applied. This verification can be achieved by conducting either a sine or random investigation at a level prescribed by the relevant specification when the relevant specification requires cross-axis motions to be verified, the following are recommended tolerances for cross-axis motion:

- a) Random vibration: should not exceed –3 dB of the highest specified spectral acceleration in any axis for each frequency up to 500 Hz or 0 dB for higher frequencies, in accordance with IEC 60068-2-64.
- b) Sine vibration: should not exceed 50 % of the highest specified acceleration in any axis for each frequency up to 500 Hz or 0 dB for higher frequencies, in accordance with IEC 60068-2-6.
- c) Time history replication: should not exceed 50 % of the highest specified acceleration in any axis at each time step, in accordance with IEC 60068-2-85.

Notwithstanding the above, at some frequencies, especially with large-size or high mass specimens, the cross-axis motion requirements may be difficult to achieve, in such cases the cross-axis motion actually achieved over the test frequency range should be agreed with the test specifier and the achieved values stated in the test report.

Signal distortion (for sinusoidal or time history tests) or out of test frequency range responses (for random tests), should be established, by conducting either a sine or random investigation at a level prescribed by the relevant specification. High out of test frequency range responses, can be indicative of problems with rattling which could affect the ability to control the test and inflict higher or unwanted damage onto the specimen by higher kurtosis at the same controlled RMS level. High signal distortion or out of test frequency range responses, are sometimes indicative of deficiencies in the specimen mounting / rigging arrangement. These deficiencies are also of concern to multi-exciter / multi-axis testing. Indeed, there can be a greater potential for such issues to arise when undertaking multi-exciter / multi-axis testing due to the generally more complicated test arrangement.

Whilst the measurement of signal distortion and out of test frequency range responses are the traditional ways of establishing that the exciters, specimen, mounting and test fixture arrangement, are behaving linearly at all amplitudes, there are also other methods which may be utilised. The use of amplitude probability density, skewness and kurtosis can also, if correctly interpreted, be used as indicators of non-linear motions.

Further information on cross-axis motion, signal distortion and out of test frequency range responses can be found in IEC 60068-2-6 and IEC 60068-2-64.

B.4 Precursor testing

Precursor testing is not a normative requirement with this test procedure. However, it can prove to be an invaluable tool in reducing risk prior to testing of the actual specimen.

Precursor testing is commonly used to evaluate the test fixtures, establish that testing is viable at full severity levels over the required temperature range, confirm or identify the appropriate control strategy and verify, if applicable, that testing does not result in excessively over or under testing any part of the specimen. Precursor testing can also be used to verify that; cross-axis motions are within the required tolerance, the required signal tolerance or out of range frequency responses requirements can be achieved and to establish that the correct amplitude distribution is applied.

In some instances, it may be appropriate, when undertaking a multi-axis / multi-exciter test, to include a modal test as part of the precursor testing programme. A modal test is commonly used to quantitatively establish the dynamic characteristics of a specimen and fixture. Such information can prove to be vital for setting multi-axis / multi-exciter test arrangements as well as for establishing appropriate cross-spectral densities. In some instances, an acceptable alternative could be to establish the dynamic characteristics of a specimen and fixture from a suitably validated mathematical model, such as a finite element model.

B.5 Vibration response investigation

Pre and post-test vibration response investigation may be required by the relevant specification to establish the dynamic characteristics of the specimen or the specimen/fixture. Such characterisation investigations may utilise resonance tests or modal testing. Vibration response investigations can be applied before and after the test to identify any changes in the frequency or damping. A change in frequency or damping can indicate that some form of specimen structural degradation has occurred. Any arrangements made to detect changes in the frequency or damping characteristics should be chosen so as not to substantially change the dynamic behaviour of the specimen.

It should be remembered that, in the case of a non-linear resonance, a specimen may respond differently to the sweep direction. Critical frequencies should be determined on the upward and downward part of the sweep cycle.

When prescribing vibration response investigations, the relevant specification should state, the method and procedure to be used. It may also, if appropriate, state the actions to be taken during and following the test, if changes in frequency or damping are detected.

B.6 Temperature conditioning and stabilization

If required by the relevant specification, the specimen may need to be pre-conditioned to specified temperature and/or humidity conditions. Sufficient time needs to be allowed, before the start of the test, to allow the specimen to stabilize at the required initial temperature.

All specimens, large or small should be pre-conditioned to ensure that they begin the test in a known condition to ensure test repeatability. The minimum period of climatic pre-conditioning should be sufficient for the test specimen to stabilise at either the appropriate standard atmospheric condition selected from those of IEC 60068-1 or the specified temperature for constant temperature conditioning.

The minimum period of climatic pre-condition will depend upon the thermal characteristics of the specimen, such as thermal capacity, physical size and thermal transfer. Temperature stabilization should be considered to have been reached when that part of the test specimen which is considered to have the longest thermal lag reaches the required temperature within the stated test tolerances. Some families of specimen may have an agreed conditioning duration for stabilization. These are not always particularly accurate as they depend upon the initial condition of the specimen and assumes all equipment in the family have equivalent thermal capacity, physical size and thermal transfer characteristics. For this reason, it is good practice to confirm the validity of any agreed conditioning duration for stabilization.

In a situation where the specimen can modify the temperature, the relevant specification should consider; airflow over the specimen, test chamber size and the extent to which the temperature can be modified. When testing, temperature modifying specimens it may be preferable not to use forced air circulation. However, if the only practicable procedure is to use forced air circulation, then there are two methods which may be employed, the detailed implementation of which is given in IEC 60068-1.

High temperature conditioning may accelerate the chemical ageing of certain materials and can have detrimental effects. Moreover, degradation can be further exacerbated by the heat generated during vibration testing, for example, the characteristics of some elastomeric mounts may also be significantly modified by thermal effects including those induced by vibration testing. In such cases it may be necessary to monitor the bulk (internal) temperature of the material of concern or include rest periods. It has been found that the surface temperature of an elastomer subject to temperature and vibration conditions can be significantly lower than that at the core of the elastomer.

B.7 Performance evaluation

If specified in the relevant specification, that the specimen should be operated during multi-axis/multi-exciter testing, then this should be undertaken at the specified times. Performance of non-heat dissipating specimens can be evaluated at any time that the test conditions have stabilised, to within the required test tolerances. The performance of heat-dissipating specimens can be evaluated when both temperature and vibration test conditions have stabilised. In general, one of the following procedures will apply:

- a) The specimen should be operated continuously, with performance evaluation made at the times specified in the environmental test specification.
- b) The specimen should be operated intermittently and allowed to stabilise before performance evaluation is undertaken.

For tests undertaken to demonstrate survival of the specimens and requiring performance evaluation, then the specimen should be operated and evaluated at the end of the test.

B.8 Verification of test procedure

The measurements, suggested below, can be undertaken to enable a verification process to be completed which demonstrates that the required test severities have been achieved, within the specified tolerances.

The verification information should, as a minimum, be established at the beginning, middle and end of the test, unless specified otherwise in the relevant specification. Where swept components are included in the test severity, then verification should include a complete (up and down) sweep. The verification of a complete (up and down) sweep may not be possible with some vibration test controllers, in such cases a separate vibration analyser/recorder should be utilised.

Unless specified otherwise, the verification measurements should encompass a frequency range from half the lowest test frequency, up to at least twice the highest test frequency for

random vibration and at least ten times the highest frequency for shock or transient waveforms. The verification measurements for random vibration should be capable of containing peaks at least 3 times the overall root mean square (RMS) value. However, for shock, transient or non-Gaussian waveforms the appropriate capability should be specified in the relevant specification.

Verification is required that multi-axis / multi-exciter control has been achieved, for vibration tests this should include power spectral densities and multiple coherence at all control and monitor points, cross-spectral densities (amplitude and phase) and partial coherence between each pair of control points. For time history replication tests, verification should include auto correlation functions at all control and monitor points and cross-correlation functions, between each pair of control points.

If using a multi-exciter single-axis test configuration, cross-axis motions, at all control points, should be measured and reported. Normally this would be established at the start of the test or during precursor testing.

The signal tolerance or the out of test frequency range responses should be established and reported, as well as the amplitude distribution. The amplitude distribution should be obtained from a probability density function analysis undertaken on measurements made at the reference point (or each control point when using multi-point control) for a period of not less than 2 min during testing. Normally this needs to be undertaken only once during the test.

Photographic evidence of the test set up and the measurement and control locations should be reported.

If applicable, a record should be taken of the temperature and humidity of the air at sufficient locations to characterise the variability, within the working space of the chamber. The temperature and humidity should be recorded at suitable intervals, not less than 10 min or 100th of the overall period and any required preconditioning, whichever is the smaller.

Annex C (informative)

Guidance on the application of multi-axis / multi-vibrator tests

C.1 General

This annex is included to provide guidance on different multi-exciter testing configurations that could be adopted in specific circumstances. Although a number of different testing configurations are considered, it is not an exhaustive list. Rather the intent is to provide practical information on common issues which may arise when using different multi-exciter and multi-axis testing configurations. Further advice on different multi-exciter configurations is provided in [1].

C.2 Advice on using multi-exciter systems for the testing of large specimens

C.2.1 General

Multi-exciter systems have proven to be a useful in the testing of large specimens, which cannot be credibly tested with single exciter systems. In such circumstances, the multi-exciter can be configured to apply similar excitations, effectively replicating a single exciter test, or using different excitations. The latter can be applicable, for example to testing a container carried by a road vehicle where the multi-exciter is configured to apply vibrations at the vehicle attachments located at the four corners of the container.

The usual approach, for the multi-exciter testing of large specimens, is the use of the multiple exciters single axis (MESA) test configuration. The specimen is arranged so that multiple exciters, commonly two, four or more, are used to produce vibration responses, in a single plane, at different locations on the specimen. The multi-exciter test severities may be based upon existing single axis test severities or may be derived from a measurement campaign, with measurements made at the appropriate excitation locations.

The most common measurement parameter used in the multi-exciter testing of large specimens is acceleration. Ideally any measurements used in the multi-exciter test, should utilise a data acquisition and instrumentation chain, with similar characteristics (frequency range, filtering, etc.) to those to be used in the test, otherwise additional data pre-conditioning may be needed.

C.2.2 Data measurements

Measurements to establish test severities for multi-exciter testing, of the appropriate life-cycle conditions, need to match those to be used for laboratory environmental testing. For example, acceleration measurements would be required at potential control and limit control locations. This will require some pre-knowledge of the testing approach to be used.

C.2.3 Multi-exciter test fixture

The specimen should be connected to the exciters, via suitable fixtures, via its normal attachment points, in the specimen's normal usage configuration. The type of fixtures adopted will depend upon the specimen and test under consideration. Fixtures can be considered with fixed and flexible attachments, namely the specimen may be connected to the exciters by; direct attachment, via flexible drive rods, by hinges/knife edges or by pivots, ball joints etc. depending upon the number of degrees of freedom to be constrained.

C.2.4 Test control

The traditional multiple exciters single-axis test configuration uses two or four exciters, the same number of control measurements; placed either on the exciter tables, the two attachment points, or two locations on the specimen adjacent to the attachment points. If the attachment arrangements are not rigid or linear it may be appropriate to adopt control locations on the specimen adjacent to the attachment points. In addition to the control locations, additional monitor points should be specified, to ensure an understanding of the dynamic responses of the specimen and its entire test system.

C.2.5 Testing

Historically, when undertaking multi-exciter testing of large equipment, it has often been assumed that the excitations experienced by the specimen are correlated at each attachment point. In this configuration all the exciters act in unison as if they are a single vibrator (i.e. SIMO). Also, only a single power spectral density needs to be defined to specify the test severity. The assumption is that the excitations experienced by specimen are essentially correlated at each attachment point is a reasonable approximation for small specimens but becomes progressively less appropriate for large specimens. Generally, the assumption will result in an over-test in comparison to actual conditions.

In practice, most carriage platforms (such as wheeled road vehicles and trains) will generate partly correlated conditions at the attachment points of large equipment. In such cases the inter-relationship between the excitations applied by the separate exciters needs to be defined, using power spectral densities, cross-spectral densities, and partial coherence functions. This is achieved by augmenting the normal power spectral density severities for each control location with cross-spectral densities for each exciter pair. Although specifying the test severity in this way is more complicated than the historic approach, it has the potential to produce more realistic conditions during the test.

C.3 Advice on using multi-axis systems for multi-degree of freedom testing

C.3.1 General

Multi-degree of freedom testing has proven to be a useful for evaluating the capabilities of certain types of electro-technical equipment. Mostly, these applications use up to six degree of freedom test facilities. Until recently, the upper frequency capability, of such tests, have been lower than traditionally used for vibration testing. However, commercially available six degree of freedom test equipment are now in use which can apply excitations up to and beyond 2 kHz. Such equipment has been found to identify failure modes, not identified using single axis testing. Generally, such applications of multiple exciters multiple-axis testing relate to the evaluation of small and modest sized specimens.

Multi-degree of freedom testing, using a multiple exciters multiple-axis configuration, has been successfully used for the environmental testing of large civil space boosters and satellites, as well as for evaluating the effects of earthquakes on building sized specimens. Moreover, facilities to undertake such tests are available at a few test sites. Generally, such facilities mostly excite the specimen through its base or normal attachment points. However, the testing of such large specimens is currently beyond the general scope of this annex.

C.3.2 Data measurements

The testing of specimens, using up to six degree of freedom test equipment, can be limited by the absence of test severities related to the rotational degrees of freedom. Although limited rotational measurements are made in a few instances, these are mostly made to evaluate human body and ride quality, rather than for environmental testing. Until recently rotational transducers tended to be expensive, susceptible to damage and have a limited frequency range. The use of the signal transformation approach allows the use of traditional orthogonal transducers, such as accelerometers, to obtain the required information. However, up to twelve single axis measurements would be required using such an approach. Another disadvantage of the signal transformation approach is that it effectively takes differences between measurements, making the outcome sensitive to signal noise and flexibility between measurement locations.

Even when multi-degree of freedom testing is restricted to the traditional orthogonal degrees of freedom, hardly any test severities quote the inter-relationship between the orthogonal axes. However, most measurement exercises do make measurements in three orthogonal degrees of freedom and consequently suitable information could be calculated from such measurements.

C.3.3 Multi-exciter test fixture

Mostly multi-exciter systems for multi-degree of freedom testing comprise a table or cube onto which the specimen is attached. In this case conventional vibration fixtures can be utilised to attach the specimen using its normal fixing arrangement. The multi-degree of freedom testing of small equipment is commonly a controlled input test although controlled response tests are possible.

Particular care needs to be taken with the design of test fixtures when using multi-exciter systems, especially when higher frequency excitations are utilised. This is because it can be more difficult to mount a specimen when excitations are applied in multiple axes and to avoid the occurrence of relative motions occurring between parts of the test fixture and between the test fixture and the specimen. Additionally, it can also be more difficult to identify the occurrence of any resultant rattling with a multi-exciter / multi-axis test than with a traditional single exciter single axis test.

C.3.4 Test control

Multi-exciter systems for multi-degree of freedom testing generally adopt over-determined or "rectangular" control, in-conjunction with signal transformation. Signal transformation is essentially the linear mapping of the control points to some pre-determined degrees of freedom used for control. Typically, the mapped degrees of freedom of a 'virtual point' are chosen to be the rigid body degrees of freedom of interest. The location of the virtual point is usually defined by the user. Additional degrees of freedom may be defined, which may be flexible body modes of the table or cube. The intent of adding flexible body degrees of freedom to the control is to give the system more control authority over the table so it can work to suppress particular vibration modes.

C.3.5 Testing

When undertaking multi-degree of freedom testing of simple specimens, the excitations may be specified at the attachment points only in terms of power spectral density information. In such cases the multi-exciter test controller may be used to derive suitable cross-spectral density functions. However, this may not always be the case, and in such cases the relevant test specification should set out the appropriate cross-correlation information.

C.4 Advice on using multiple shakers attached directly to the specimen via flexible couplings

C.4.1 General

The use of multiple small exciters flexibly attached to a specimen suspended from low frequency mounts, is a common way establishing the dynamic characteristics of a structure. A similar approach can also be used to test equipment to quite high severities. Such an approach is useful for large structure and particularly those of an awkward shape (for example long and slender) when the use of more conventional vibration testing approaches would not be practicable.

There are two different reasons why multiple small exciters flexibly attached to a specimen suspended from low frequency mounts may be currently used. The first is for large structures when the excitations are required to be applied to a few of its response modes. In such cases the locations of the exciters can be chosen to maximise the structural response for low levels of excitation. The second common reason for using the approach is when an unconstrained structure is, in-service, subject to multiple largely uncorrelated excitations. This situation often arises when vibrations are induced by flow over the structure, for example air flow over the skin of an aircraft.

The usual approach for using multiple small shakers attached directly to the specimen via flexible couplings, is either a multiple exciters multiple-axis (MEMA) or a multiple exciters single-axis (MESA) configuration, depending on intent.

Various measurement parameters can be used, although, the most common measurement is acceleration. The additional use of force measurements to limit the applied loading or strain measurements of the structure to limit bending may also be adopted. Ideally the measurements used in the multi-exciter test, should be for the same parameter and at the same locations as used in operation. Moreover, the data acquisition and instrumentation chain, should preferably have similar characteristics (frequency range, filtering, etc.), otherwise additional data pre-conditioning would need to be considered.

C.4.2 Data measurements

Measurements of suitable data to establish appropriate test severities, generally need to be acquired at locations which match those to be used in the test. For example, acceleration measurements should be acquired at potential vibration control and limit control locations. Establishing suitable locations, before the measurement exercise, will require some knowledge of the testing approach to be used as well as a good understanding of the dynamic behaviour of the specimen. Some, differences between measurements will undoubtedly exist and these will usually arise because of differences in the mounting configuration. Such differences may require further data analysis or analytical modelling, to determine if they are relevant to the test. In most cases, the measured data will need to be acquired specifically, for the purposes of the multi-axis / multi-exciter test derivation process. To obtain consistent test severities it is necessary to utilise specific data reduction, extraction techniques.

Measured data, intended for use in multi-axis / multi-exciter vibration testing, will normally be analysed in terms of power spectral density, cross-spectral density and partial coherence functions. Although the use of suitably adjusted measured waveforms may be used as possible alternatives when using time history replication methods.

It may be necessary to remove any frequency components that are above the upper frequency capabilities of the excitation system and to remove any low frequency components that may result in high displacements. The latter may trigger over-travel or velocity limit protection on the exciters. It is also necessary to address the factors that need to be applied to the vibration test specification, to account for statistical variability. As all these modifications will change the resultant test severity it is important to verify that resultant severity still meets the aims of the test. For example, to ensure key waveform features have not been either removed or excessively increased.

C.4.3 Multi-exciter test fixture

There are three main decisions which need to be made with regard the test fixture for this type of test, i.e. the way in which exciters are mounted, the manner used to transmit the applied loadings from the exciter to the specimen and how the applied excitations will be monitored.

Broadly there are two ways by which the multiple exciters may each be mounted. They may be rigidly fixed to a suitable frame at positions and angles by which they can excite the equipment. If this approach is used the framework needs to be sufficiently rigid to withstand the exciter reaction forces without excessive deflection. Alternatively, each exciter may be suspended from low frequency flexible supports again at positions and angles by which they can excite the equipment. In this approach each exciter will usually need to be mounted onto a sufficiently large seismic mass to permit the necessary forces to be applied. The specimen may be supported in its normal attachment arrangement or supported by means of low frequency flexible supports such as elastic cords or air bags.

Whichever approach is used to support the exciters, a means of transmitting the applied loadings from each exciter to the equipment is required. To prevent the transmission device constraining the equipment, the device needs to be able to transmit the forces in the axis of excitation but be flexible in the other axis. A number of examples of different ways of connecting exciters to the specimen are provided in [1].

The most common way of achieving this is by means of a slender rod which may be either straight or have a thinned waist to allow it to be flexible of the plane of excitation. Such devices are sometimes called "stingers". If this approach is used it may be necessary, if using an electro-dynamic vibrator, to prevent the rod from producing damaging out of plane loads on the exciter armature. This is usually achieved by running the rod through a supported bearing at the exciter end of the rod.

The use of a slender rod, as a means of coupling the exciters to the specimen, will transfer a certain amount of out of plane loads to the specimen. However, such an arrangement will allow the specimen some freedom and allows a less disturbed transfer of excitations, even over higher frequencies ranges, provided the slender rod is not resonating excessively. The buckling load limit of the slender rod will limit the force that can be transmitted. However, a stiffer rod will produce greater out of plane loads to the specimen. Slender flexible rods are prone to fatigue failure, nevertheless, using a stiffer rod to overcome this can move the failure to the specimen. Generally changing a failed rod is better than prematurely failing the specimen.

A sometimes-adopted alternative to slender rods is the use of spherical bearings (see Figure C.1) connecting the exciter to the equipment. These transmit force in one plane but not in the other plane. Several spherical bearing designs have been utilised for this purpose, some successful, others have proven problematic as they can limit the frequency range of excitation and may distort the applied waveform. Spherical bearing, such as those shown in Figure C.1, need to be lubricated.

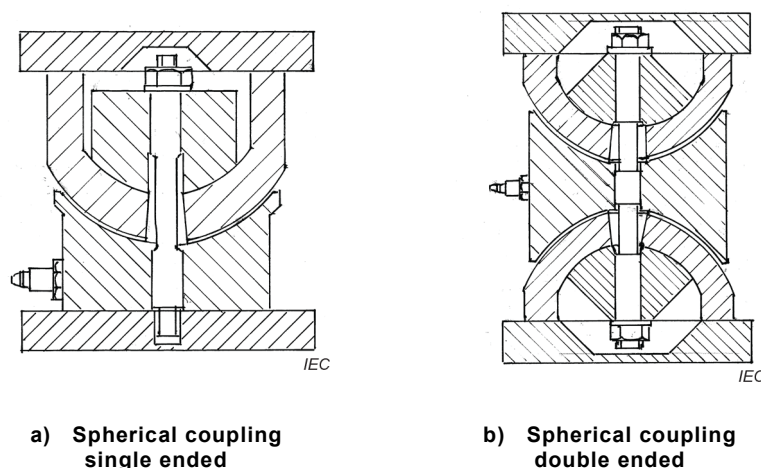


Figure C.1 – Examples of spherical bearings

The most suitable approach for coupling the exciters to the specimen, for a particular test, will depend on the frequency range to be tested, the side movement (translation and rotation), the force to be transmitted as well as the possible need for a quick release function in safety critical applications.

Any coupling method involving a gap in the vibration load transfer path, such as the spherical bearings depicted in Figure C.1, is prone for rattling and contact resonances. The frequency range over which these phenomena occur, will usually be shifted upwards by pretension in the bearing or higher pressure of lubrication oil or grease. Conversely, the frequency range of occurrence may be shifted downwards during the test, due to wear, pressure loss in the bearing lubrication or higher local contact forces. Any rattling effects can be noticed by a skewed amplitude probability density, a kurtosis value higher than intended and/ or significant high frequency content measured. A good power spectral density and overall rms of a Gaussian test do preclude the occurrence of rattling or contact non-linearities. Generally, the higher amplitudes produced by rattling can produce increased levels of specimen damage than would be expected for a test with the same power spectral density and overall rms.

Although it may not be essential that the individual excitations are monitored at the point of application, for some equipment it may be necessary to limit the loads applied at a specific attachment point. In such cases a force transducer at the attachment point may be utilised. Alternatively, a transducer such as an accelerometer may be positioned close to the attachment. Measurement transducers are available which permit both force and acceleration to be measured at the same point.

C.4.4 Test control

This type of test may utilise a number of separate exciters (10 or more is not uncommon) in which case the control software needs to be capable of handling both the required number of separate excitations as well as an appropriate number of control and monitor measurements, over the required test frequency range.

Test control may utilise either a "square" or "rectangular" control strategy. The former applies when the number of exciters and the number of control locations are identical. The control strategy is referred to as "rectangular" when the number of control locations exceeds the number of excitations, it is also sometimes referred to as over-determined. Both control strategies have been found to produce good results provided suitable severities are utilised. For several applications, the more accurate distribution of vibrations has been found to be produced using a "square" control strategy. However, the over-determined or "rectangular" control strategy can also produce good results.

C.4.5 Interrelationship in testing

The waveform from the different exciters is typically partly correlated. The interrelationship between the excitations applied by the separate exciters may be defined from measurements, using power spectral densities, cross-spectral densities, partial coherence functions or auto and cross-correlation functions. Alternatively, the interrelationship between the excitations may be established from the test set up and then used within the test. This latter approach has been found to give good results for a number of different applications.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-2-86:2024

Annex D (informative)

Guidance on the use of measured data for multi-axis/multi-vibrator tests

D.1 General

When multi-axis and/or multi-exciter testing is adopted as a means of improving the accuracy of the vibration test, ideally test severities should be based on measured data derived from life-cycle conditions and usage. In such situations, the use of measured data also allows cross-axis/excitation information such as cross-spectral correlation of the excitations, to be established.

When using multi-axis and/or multi-exciter testing as a testing convenience, it may be that existing, single axis, test severities are adopted. For example, the vibration severities may be those recommended in the IEC 60721-4 series, IEC 60068-2-6, or IEC 60068-2-64. In such cases the relevant specification will need to set out how the cross-axis/excitation information relationship between the excitations are to be established. This is often achieved by adopting the cross-spectral correlation produced by the test set up. This approach can also be used when the severities are based upon measured data. There may also be situations when the test specifier may require that all the excitations are set to be fully correlated or entirely uncorrelated.

The use of test severities, originally intended for single axis testing, may not necessarily be easily reproducible when using multi-axis and/or multi-exciter testing. The practical ability to utilise test severities, originally intended for single axis testing will depend upon the multi-axis and/or multi-exciter test equipment, the test configuration and the location of the control points.

D.2 Use of measured data to derive test severities

When measured data are utilised to derive test severities, it is necessary that the data are compatible with good data analysis procedures. In particular, the measurement record durations should be sufficient to provide an acceptable statistical error. Consideration should be given not only to statistical error in the power spectral density estimates, but also in the cross spectral density, frequency response function and coherence function estimates. It is important to correctly diagnose the presence of any low coherence values in the measurements. Low coherence could imply that the vibration energy between measurements is uncorrelated, but it could also arise because of a poorly considered measurement configuration. To eliminate such issues, the configuration of the multi-exciter test control arrangement should be considered prior to any measurement exercise.

Ideally, test severities should be based on measured data, derived from actual life-cycle conditions and usage. When measured responses are used as the basis for control or monitoring purposes, they need to be of sufficient quality and from enough locations, to allow the derivation of an explicit inter-relationship between the excitations. As the measurements will contain the dynamic response characteristic of the specimens and its usage mounting configuration, the test specimen needs to possess similar dynamic response characteristic. Multi-exciter testing based upon measurements can be particularly sensitive to differences in dynamic effects, between the actual mounting configuration and the test fixture. It is usually convenient to ensure that the measurement locations are coincident with the intended test control positions.

If adequate measured data are not available, it may be possible to develop multi-exciter test severities from a combination of generic test severity data, modal analysis, and experimental laboratory tests of the specimens installed in the test fixture. Such an approach requires a detailed understanding of the specimens' dynamic characteristics and the potential failure modes. These can only be credibly established by the test specifier, who should agree any such derived multi-exciter test severities. Precursor testing can be used to estimate the cross-correlation relationships, between the specimen control points. Additionally, modal tests can be used to verify similarity of dynamic responses, between an actual usage platform installed specimen and the test fixture installed specimen.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-2-86:2024

Annex E (informative)

Guidance on the selection of test tolerances

E.1 General

When multi-axis and/or multi-exciter testing is been adopted as a means of improving the accuracy of the vibration, shock or transient tests, the appropriate test tolerances and associated constraints should be established alongside the test severities. There are a number of ways in which test tolerances can be applied to a multi-axis/multi-exciter test severity. Guidance on this is provided within this annex.

When multi-axis and/or multi-exciter testing is being adopted as a testing convenience and existing, single axis, test severities are to be used, the tolerances and associated constraints of that existing test severity should be adopted. However, some modifications to those tolerances and constraints may be needed. For example, the common utilised cross-axis motion limits may not be applicable.

E.2 Test tolerances associated with measured data

When deriving multi-axis / multi-exciter test severities from measured data, a pragmatic approach is to identify the important parameters of the test severity and set the appropriate tolerances for those parameters. The most important features may be related to a characteristic of the applied waveform or related to a potential damage mechanism. The most significant potential damage mechanism related to vibration tests is high cycle fatigue, although the vibration amplitudes can cause other forms of damage such as fretting, low cycle fatigue or even material rupture. In such cases the characteristic of the applied waveform may be characterised by parameters such as power spectral density, overall rms or amplitude probability density. Parameters which characterise potential damage mechanisms include cycle and level crossing counts, rainflow counting methods as well use of the fatigue damage spectrum.

The time history replication tests are frequently used when it is necessary to reproduce specific features of a waveform, which have the potential to exercise damage and failure modes of the specimen. The two most common failure modes exercised in this way are medium to long duration fatigue failures as well as single exposure / low cycle fatigue failures. If the concern is with medium to long duration fatigue failures, then the most appropriate parameters for consideration are level crossing, cycle counting, rainflow counting methods, amplitude probability density, power spectral density, block statistics and fatigue damage spectra. If the concern is with single exposure / low cycle fatigue failures, then the most appropriate parameters for consideration are peak amplitudes, shock response spectrum, amplitude probability density, temporal moments, level crossing counts block statistics and maximum response spectra.

A range of different parameters are available against which appropriate tolerance can be set. Several appropriate parameters may be selected for a particular test. The reason for selecting several parameters, is that all the various parameters have some limitations, and no single parameter is likely to be valid for all circumstances.

E.3 Test tolerances applicable to different parameters

Recommended and commonly used tolerances associated with the most frequently adopted parameters are listed in Table E.1. However, this list should not be considered exhaustive.

Table E.1 – Test tolerances applicable to different parameters

Recommended test tolerances associated with different parameters <i>(As a minimum, at least two parameters and their associated tolerance should be used. Actual values used should be specified in the relevant specification.)</i>	
Waveform amplitude	Within a constant amplitude tolerance band for at least 90 % of the specified waveform. The amplitude of the tolerance band should be ± 20 % of the highest amplitude of the specified waveform.
Amplitude probability density	Within 20 % of those computed from the specified time history
CORA Corridor Method [9] (Correlation analysis metric)	Inner and outer corridors set to ± 5 % and ± 50 % respectively, of the largest amplitude of the specified waveform, used with weighting factor of 2.
Instantaneous peak levels	Within 10 % of specified values
Block statistics such as root mean square (RMS), skewness and kurtosis.	Within 10 % of those computed from the specified severity
Cycle, rainflow counting and level crossing counts.	Within 10 % of those computed from the specified severity
Amplitude domain comparison	Within a 10 % of the specified severity.
Power spectral density, discrete Fourier transforms and cross-spectral density.	Within ± 3 dB of the specified severity
Auto correlation and cross-correlation functions	Within 1 dB of the specified severity
Maximum response spectrum.	Within 20 % of the specified severity
Fatigue damage spectrum	Within ± 6 dB of the specified severity.
Transient waveform peak amplitudes	Within 20 % from the specified waveform amplitude for at least 90 % of the peaks.
Transient waveform characteristics	Velocity change within ± 15 % of the value corresponding to the specified shock waveform. Effective Duration within ± 20 % of the specified target waveform. The time for a shock pulse to decay to the -60 dB point should be within 20 % of the specified target waveform.
Temporal moments	Tolerances are application specific
Shock response spectrum	Within $\pm 1,5$ dB of that computed from the specified time history, using a Q of 10 (5 % damping) and at least a one-twelfth octave bandwidth resolution. Although this may be relaxed to ± 3 dB for up to 20 % of the specified frequency range.

Bibliography

- [1] ISO 10813-4:2022, *Vibration generating machines – Guidance for selection – Part 4: Equipment for multi-axial environmental testing*
 - [2] IEST RP-DTE022.1, *Multi-shaker test and control*
 - [3] STANAG 4370, AECTP 400, Method 421, *Environmental Testing – Mechanical Environmental Tests – Multi-exciter Vibration and Shock Test*
 - [4] Def Stan 00-035, Part 3, Test 2-02, *Environmental Handbook for Defence Specimens – Environmental Test Methods – Test M2 – Multi-Exciter and Multi-Axis Vibration and Shock Test*
 - [5] Mil Std 810, Part 2 Method 527, *Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests – Laboratory Tests – Multi-exciter test*
 - [6] IEC 60068-2-47, *Environmental testing – Part 2-47: Tests – Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests*
 - [7] IEC 60721 (all parts), *Classification of environmental conditions*
 - [8] ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
 - [9] ISO/TR 16250:2013, *Road vehicles – Objective rating metrics for dynamic systems*
-

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	42
1 Domaine d'application	44
2 Références normatives	45
3 Termes et définitions	46
4 Contexte	47
4.1 Généralités	47
4.2 Recours aux essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples pour améliorer la répartition des réponses dynamiques	48
4.3 Recours aux essais à excitateurs multiples pour les matériels volumineux	49
4.4 Recours aux essais à axes multiples pour la croissance de la fiabilité	49
4.5 Recours aux essais à axes multiples pour réduire la durée des essais	49
5 Appareillage d'essai et stratégie de pilotage	50
6 Sévérités d'essai et tolérances	50
6.1 Sévérités d'essai	50
6.2 Tolérances	50
6.3 Excitations en dehors de la plage de fréquences d'essai spécifiée	51
6.4 Mouvements transversaux	51
7 Montage du spécimen et installation des systèmes de mesure	52
8 Essais préliminaires	52
9 Recherche et étude des fréquences critiques	53
10 Préconditionnement	53
11 Mesures initiales et essai de performance de fonctionnement	53
12 Faible excitation pour l'égalisation avant les essais	53
13 Essais	53
14 Mesure intermédiaire et essai de performance de fonctionnement	54
15 Reprise	54
16 Mesure finale, essai de performance de fonctionnement et recherche et étude des fréquences critiques	54
17 Vérification de l'essai	54
18 Renseignements à spécifier dans la spécification pertinente	55
19 Renseignements à fournir dans le rapport d'essai	55
Annexe A (informative) Recommandations pour les systèmes de pilotage d'essai à excitateurs multiples/à axes multiples	57
A.1 Généralités	57
A.2 Stratégies de pilotage à excitateurs multiples	57
A.3 Stratégies de pilotage dimensionnée et surdimensionnée	59
A.4 Quantification de l'interrelation entre les excitateurs pour les essais de vibrations	59
A.5 Quantification de l'interrelation entre les excitateurs pour les essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes	61
Annexe B (informative) Recommandations supplémentaires pour les essais	63
B.1 Points de fixation, de surveillance, de pilotage et de référence	63
B.2 Égalisation du pilotage	63
B.3 Mouvements transversaux, distorsion des signaux et réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai	64
B.4 Essais préliminaires	65

B.5	Recherche et étude des fréquences critiques	65
B.6	Conditionnement en température et stabilisation thermique	66
B.7	Évaluation des performances	66
B.8	Vérification de la procédure d'essai.....	67
Annexe C (informative) Recommandations pour l'application des essais à axes multiples/à excitateurs multiples		68
C.1	Généralités	68
C.2	Conseils concernant l'utilisation de systèmes à excitateurs multiples pour les essais de spécimens volumineux	68
C.2.1	Généralités	68
C.2.2	Mesures des données	68
C.2.3	Bâti de fixation à excitateurs multiples	69
C.2.4	Pilotage d'essai	69
C.2.5	Essais	69
C.3	Conseils concernant l'utilisation de systèmes à axes multiples pour les essais selon plusieurs degrés de liberté.....	69
C.3.1	Généralités	69
C.3.2	Mesures des données	70
C.3.3	Bâti de fixation à excitateurs multiples	70
C.3.4	Pilotage d'essai	71
C.3.5	Essais	71
C.4	Conseils concernant l'utilisation de plusieurs excitateurs fixés directement au spécimen par des accouplements souples.....	71
C.4.1	Généralités	71
C.4.2	Mesures des données	72
C.4.3	Bâti de fixation à excitateurs multiples	72
C.4.4	Pilotage d'essai	74
C.4.5	Interrelation lors des essais	74
Annexe D (informative) Recommandations pour l'utilisation des données mesurées lors d'essais à axes multiples/à excitateurs multiples		75
D.1	Généralités	75
D.2	Utilisation des données mesurées pour déduire les sévérités d'essai	75
Annexe E (informative) Recommandations pour le choix des tolérances d'essai		77
E.1	Généralités	77
E.2	Tolérances d'essai associées aux données mesurées	77
E.3	Tolérances d'essai applicables aux différents paramètres	78
Bibliographie.....		79
Figure A.1 – Densité spectrale de puissance (PSD) et densité spectrale croisée (CSD) pour un système à deux excitateurs		60
Figure A.2 – Densité spectrale de puissance (PSD) et densité spectrale croisée (CSD) pour un système à six excitateurs		60
Figure C.1 – Exemples de roulements sphériques.....		73
Tableau E.1 – Tolérances d'essai applicables aux différents paramètres		78

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ESSAIS D'ENVIRONNEMENT –

**Partie 2-86: Essais – Essai Fx: Vibrations –
Méthode par excitateurs multiples et axes multiples**

AVANT PROPOS

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

L'IEC 60068-2-86 a été établie par le comité d'études 104 de l'IEC: Conditions, classification et essais d'environnement. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

Projet	Rapport de vote
104/1035/FDIS	104/1043/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.

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60068, publiées sous le titre général *Essais d'environnement*, se trouve sur le site web de l'IEC.

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

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-2-86:2024

ESSAIS D'ENVIRONNEMENT –

Partie 2-86: Essais – Essai Fx: Vibrations – Méthode par excitateurs multiples et axes multiples

1 Domaine d'application

Le présent document fournit une procédure d'essai à utiliser avec les systèmes d'essai de vibrations à excitateurs multiples/à axes multiples. Ces essais de vibrations sont destinés à une application générale pour les composants, matériels et autres produits, dénommés ci-après "spécimens", soumis à des sollicitations dynamiques susceptibles de se produire au cours de leur cycle de vie. Même si le présent document est essentiellement destiné aux essais de vibrations, la procédure est également appliquée à certains types d'essais de chocs et de conditions transitoires.

La procédure d'essai décrite dans le présent document s'applique lorsque la capacité d'un spécimen à supporter les vibrations, les chocs et les conditions transitoires spécifiés, sans dégradation inacceptable de ses performances fonctionnelles ou structurelles, doit être démontrée. La procédure d'essai présente d'importantes similitudes avec les procédures d'essai décrites dans les autres documents de la série IEC 60068-2 et couvre la même plage de types d'excitations induites par les vibrations et chocs.

Le présent document s'applique aux spécimens soumis à des vibrations, des chocs et des conditions transitoires dues au transport et/ou à leurs environnements de fonctionnement, par exemple à bord d'avions, de véhicules spatiaux ou de véhicules terrestres. Il est destiné en premier lieu aux spécimens non emballés. Il s'applique aux spécimens placés dans leur emballage de transport lorsque ce dernier est considéré comme faisant partie du spécimen lui-même.

La méthode d'essai et les techniques associées traitées dans le présent document sont principalement destinées à être utilisées avec plusieurs excitateurs électrodynamiques ou servohydrauliques, ainsi qu'avec un système de pilotage numérique associé pour piloter les excitations appliquées sur le spécimen.

Le présent document décrit deux approches d'essai, couramment appelées "excitateurs multiples/axe unique" (MESA, *Multi-Exciter Single-Axis*) et "excitateurs multiples/axes multiples" (MEMA, *Multi-Exciter Multi-Axis*). Ces approches:

- a) utilisent des excitateurs à base fixe soit dans un seul axe, soit dans une combinaison choisie de configurations X, Y, Z fixes, qui permettent également d'effectuer des rotations en fonction du type d'accouplement du bâti;
- b) utilisent plusieurs excitateurs fixés directement au spécimen par des accouplements souples ou des méthodes analogues. Dans ce cas, les excitateurs sont fixés en tout point et dans n'importe quelle direction sur le spécimen. Cette approche est relativement similaire à celle utilisée pour les essais modaux, mais elle utilise des sévérités d'essai d'environnement.

L'attention est attirée sur le fait que les essais MESA et MEMA exigent actuellement un niveau élevé de jugement technique et d'expérience associée, et le spécificateur d'essai et le technicien d'essai sont pleinement conscients de ce fait. En général, les essais MESA et MEMA exigent des ressources plus importantes pour mettre en œuvre un essai approprié, mais fournissent potentiellement des résultats plus exacts.

Pour les besoins du présent document, l'auteur de la spécification d'essai pertinente (le spécificateur d'essai) est présumé choisir la procédure et les valeurs de sévérité appropriées au spécimen et à son utilisation. La procédure du présent document inclut des essais préliminaires (facultatifs) pour permettre au spécificateur d'essai d'établir la pertinence de la spécification d'essai et les sévérités d'essai applicables au spécimen. Un spécimen distinct est généralement fourni pour ces essais préliminaires.

Les procédures d'essai avec un seul excitateur et dans un seul axe actuellement utilisées dans la série IEC 60068-2 peuvent être mises en œuvre pour une large gamme d'excitations de différents types, comme les excitations aléatoires à large bande, les excitations aléatoires sur aléatoires, les excitations sinusoïdales sur aléatoires, le balayage d'excitations sinusoïdales, les chocs et les essais de reproduction des excitations par accélérogrammes. En théorie, ces différents types d'excitations peuvent également être appliqués selon les méthodes à excitateurs multiples et axes multiples. Toutefois, les techniques appropriées et les logiciels de pilotage d'essai disponibles dans le commerce, pour certains de ces types d'essais, ne sont pas forcément facilement accessibles actuellement. Pour cette raison, la procédure du présent document est actuellement destinée en premier lieu aux essais des excitations aléatoires à large bande et aux essais de reproduction des excitations par accélérogrammes, car les installations permettant d'effectuer ces types d'essais sont couramment disponibles. L'utilisateur peut néanmoins adapter la procédure du présent document pour d'autres types d'excitations; des conseils sont fournis dans ce cas.

Généralement, les sévérités associées aux essais de vibrations, de chocs et de transitoires sont spécifiées en utilisant l'accélération comme paramètre de pilotage. Toutefois, cet élément ne constitue pas une condition préalable essentielle pour la procédure du présent document. Pour les besoins du présent document, les sévérités des essais de vibrations, de chocs et de transitoires sont spécifiées par le fabricant, et peuvent l'être en fonction de différents paramètres (accélération, vitesse, déplacement ou force). La nécessité d'inclure différents paramètres de pilotage dans le présent document tient au fait qu'il est plus probable de spécifier des paramètres mixtes pour les besoins du pilotage, dans le cadre d'essais à excitateurs multiples. Dans ce cas, les formes d'onde des vibrations, des chocs et des transitoires appliquées au spécimen sont pilotées en fonction des données relevées par les transducteurs de mesure du paramètre approprié.

Même s'il est destiné en premier lieu à des spécimens électrotechniques, le présent document ne s'applique pas exclusivement à ces derniers et peut être utilisé dans d'autres domaines, s'il y a lieu.

2 Références normatives

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

IEC 60068-1, *Essais d'environnement – Partie 1: Généralités et lignes directrices*

IEC 60068-2-6, *Essais d'environnement – Partie 2-6: Essais – Essai Fc: Vibrations (sinusoïdales)*

IEC 60068-2-27, *Essais d'environnement – Partie 2-27: Essais – Essai Ea et guide: Chocs*

IEC 60068-2-57, *Essais d'environnement – Partie 2-57: Essais – Essai Ff: Vibrations – Méthode par accélérogrammes et sinusoïdes modulées*

IEC 60068-2-64, *Essais d'environnement – Partie 2-64: Essais – Essai Fh: Vibrations aléatoires à large bande et guide*

IEC 60068-2-80, *Essais d'environnement – Partie 2-80: Essais – Essai Fi: Vibrations – Mode mixte*

IEC 60068-2-85, *Essais d'environnement – Partie 2-85: Essais – Essai Fj: Vibrations – Reproduction dans le temps par accélérogrammes*

ISO 2041, *Vibrations et chocs mécaniques, et leur surveillance – Vocabulaire*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'ISO 2041, l'IEC 60068-1, l'IEC 60068-2-6, l'IEC 60068-2-27, l'IEC 60068-2-57, l'IEC 60068-2-64, l'IEC 60068-2-80 et l'IEC 60068-2-85 ainsi que les suivants s'appliquent.

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

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

3.1

excitateurs multiples/axe unique

MESA

méthode d'application des formes d'onde d'essai de vibrations qui utilise plusieurs excitateurs et où tous les excitateurs appliquent les vibrations dans un seul axe du spécimen

Note 1 à l'article: L'abréviation "MESA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "multi-exciter single-axis".

3.2

excitateurs multiples/axes multiples

MEMA

méthode d'application des formes d'onde d'essai de vibrations qui utilise plusieurs excitateurs et où les vibrations sont appliquées dans deux axes du spécimen ou plus

Note 1 à l'article: Les excitations appliquées peuvent s'exercer dans les axes de translation, dans les axes de rotation ou dans les deux.

Note 2 à l'article: L'abréviation "MEMA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "multi-exciter multi-axis".

3.3

entrée unique/sortie unique

SISO

méthode d'application des formes d'onde d'essai de vibrations dont le principe repose sur l'utilisation de l'entrée d'un seul signal d'excitation appliqué à un système d'excitation dans une configuration à un seul degré de liberté et d'une seule sortie mesurée sur le spécimen d'essai ou sur ses points de fixation dans une configuration à un seul degré de liberté

Note 1 à l'article: Cette méthode repose principalement sur un dispositif d'essai à exciteur unique/à axe unique conventionnel qui utilise une seule réponse mesurée pour les besoins du pilotage.

Note 2 à l'article: L'abréviation "SISO" est dérivée du terme anglais développé correspondant "single-input/single-output".

3.4

entrée unique/sorties multiples

SIMO

méthode d'application des formes d'onde d'essai de vibrations dont le principe repose sur l'utilisation de l'entrée d'un seul signal d'excitation appliqué à un système d'excitation dans une configuration à un seul degré de liberté et de plusieurs sorties mesurées sur le spécimen d'essai ou sur ses points de fixation dans une configuration à un plusieurs degrés de liberté

Note 1 à l'article: Cette méthode repose principalement sur une extension d'un dispositif d'essai à excitateur unique/à axe unique conventionnel, mais qui utilise plusieurs réponses mesurées pour les besoins du pilotage.

Note 2 à l'article: L'abréviation "SIMO" est dérivée du terme anglais développé correspondant "single-input/multiple-output".

3.5

entrées multiples/sortie unique

MISO

méthode d'application des formes d'onde d'essai de vibrations dont le principe repose sur l'utilisation de l'entrée de plusieurs signaux d'excitation qui sont appliqués sur plusieurs systèmes d'excitation afin de produire une seule sortie mesurée sur le spécimen d'essai ou sur ses points de fixation

Note 1 à l'article: Sauf si les entrées multiples appliquent une forme d'onde identique, ce dispositif n'est souvent pas techniquement réalisable, car les systèmes de pilotage d'essai à excitateurs multiples exigent souvent le même nombre de sorties et d'entrées.

Note 2 à l'article: L'abréviation "MISO" est dérivée du terme anglais développé correspondant "multiple-input single-output".

3.6

entrées multiples/sorties multiples

MIMO

méthode d'application des formes d'onde d'essai de vibrations dont le principe repose sur l'utilisation de l'entrée de plusieurs signaux d'excitation qui sont appliqués sur les systèmes d'excitation afin de produire plusieurs sorties mesurées sur le spécimen d'essai ou sur ses points de fixation

Note 1 à l'article: Généralement, il convient que le nombre d'entrées et de sorties soit à minima identique, mais de nombreux systèmes utilisés pour le pilotage d'excitateurs multiples tolèrent un nombre de sorties supérieur au nombre d'entrées. En général, les systèmes de pilotage d'essai à excitateurs multiples et axes multiples fonctionnent comme des systèmes à entrées multiples/à sorties multiples.

Note 2 à l'article: L'abréviation "MIMO" est dérivée du terme anglais développé correspondant "multiple-input multiple-output".

4 Contexte

4.1 Généralités

Les essais à excitateurs multiples sont utilisés depuis longtemps dans le cadre des essais sismiques, mais également des essais de durabilité/fatigue. Généralement, ces essais appliquent des excitations qui se produisent à des fréquences relativement basses. Il y a relativement peu de temps que les capacités d'essai se sont développées pour permettre l'exécution d'essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples, aux fréquences nécessaires pour les essais généraux de vibrations, de chocs et de transitoires.

L'utilisation de matériels d'essai à axes multiples et/ou à excitateurs multiples [1]¹ pour certains types d'essais de vibrations, de chocs et de transitoires est actuellement jugée pertinente dans un certain nombre d'applications, dont certaines sont décrites ci-après. Il convient de ne pas considérer cette liste comme exhaustive, car les applications appropriées pour les essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples sont encore en cours d'identification. Généralement, les essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples présentent l'avantage d'améliorer la répartition des charges, d'appliquer des excitations plus réalistes et de réduire la durée des essais.

4.2 Recours aux essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples pour améliorer la répartition des réponses dynamiques

Les essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples sont régulièrement utilisés pour les spécimens volumineux et/ou complexes sur le plan dynamique, lorsqu'il est nécessaire de s'assurer que les mouvements des réponses dynamiques du spécimen sont correctement réalisés. Dans de tels cas, les essais à excitateurs multiples peuvent permettre une répartition des réponses dynamiques nettement plus exacte par rapport aux méthodes classiques d'essais de vibrations, de chocs et de transitoires. C'est notamment le cas lorsque le spécimen est soumis, en service, à des excitations dynamiques générées par plusieurs sources d'excitation. C'est par exemple le cas d'un véhicule routier lorsque chaque roue génère des excitations dynamiques sensiblement différentes.

Le recours aux essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples pour améliorer la répartition des réponses dynamiques à l'intérieur d'un spécimen exige généralement l'utilisation de sévérités d'essai qui ont été déduites à partir de données de vibrations, de chocs ou de transitoires, mesurées dans des conditions de cycle de vie réelles. Les excitations dynamiques appliquées sont généralement pilotées à partir de mesures effectuées en plusieurs positions de réponse. Cette stratégie de pilotage d'essai est dite à "pilotage de réponse". Cette stratégie de pilotage est fondamentalement différente de celle utilisée pour la plupart des essais de vibrations, de chocs et de transitoires à axe unique spécifiés dans l'IEC 60068-2. Ces essais à axe unique sont essentiellement des essais de pilotage d'excitation qui appliquent et pilotent les excitations aux points de fixation du spécimen. Une telle stratégie de pilotage n'est pas influencée de manière significative par les réponses dynamiques du spécimen. Par conséquent, les sévérités d'essai pour ces essais de pilotage d'excitation peuvent facilement adopter des sévérités "génériques", car les sévérités sont indépendantes des réponses dynamiques du spécimen.

Pour certaines applications, les sévérités "génériques" présentent l'avantage de pouvoir représenter une large gamme de conditions de cycles de vie. Les sévérités d'essai génériques pour le transport couvrent, par exemple, une gamme de conditions d'utilisation et différentes plateformes de transport. L'utilisation de sévérités d'essai génériques simples avec les essais à axes multiples et/ou à excitateurs multiples peut limiter la capacité à obtenir une répartition exacte des réponses dynamiques.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

4.3 Recours aux essais à excitateurs multiples pour les matériels volumineux

Les essais à excitateurs multiples sont parfois utilisés pour des raisons pratiques, car cela permet d'utiliser plusieurs excitateurs de taille réduite en lieu et place d'un seul excitateur beaucoup plus grand (et plus coûteux). Dans ce cas, le recours aux essais à excitateurs multiples peut permettre d'évaluer les matériels pour lesquels des essais n'auraient pas été techniquement réalisables. Par exemple, quatre excitateurs peuvent être accouplés (électriquement et mécaniquement) afin de fournir une installation d'essai pour les spécimens très volumineux comme les véhicules entiers. Si les formes d'onde appliquées à chaque excitateur sont corrélées, ce montage repose généralement sur une procédure d'essai à axe unique conventionnelle et des sévérités d'essai comparables pourraient alors être adoptées. Si les formes d'onde ne sont pas corrélées, la procédure du présent document serait dans ce cas plus appropriée. Dans de tels cas, les sévérités d'essai peuvent être définies en fonction des excitations appliquées aux points de fixation du spécimen ou des réponses du spécimen. Dans les deux cas, le dispositif d'essai signifie qu'il est nécessaire de piloter l'essai selon une stratégie de "pilotage de réponse".

Même s'il est possible d'utiliser des sévérités d'essai génériques avec ce type d'approche d'essai, il est néanmoins toujours nécessaire de déterminer la relation de phase et d'amplitude utilisée entre les excitations en s'appuyant sur une bonne connaissance des relations réelles. Cela est nécessaire, car, en l'absence de telles connaissances, les conditions dynamiques auxquelles est soumis le spécimen peuvent augmenter et/ou diminuer de manière significative et indéterminée par rapport aux conditions induites lors d'un essai à axe unique.

4.4 Recours aux essais à axes multiples pour la croissance de la fiabilité

Les essais à axes multiples ont été jugés pertinents pour les essais de croissance de la fiabilité de certains types de matériels électrotechniques. En effet, les réponses dynamiques à axes multiples générées à l'intérieur du spécimen sont différentes, à bien des égards, de celles générées lors des essais à axe unique. Les réponses dynamiques à axes multiples générées sont considérées comme exerçant un plus grand nombre de modes de défaillance et de dégradation potentiels sur le spécimen par rapport aux essais à axe unique conventionnels.

Les sévérités d'essai utilisées pour les essais de croissance de la fiabilité sont généralement surdimensionnées (c'est-à-dire supérieures à celles susceptibles d'être observées en service) et appliquées aux points de fixation du spécimen. Pour ce faire, l'utilisation de sévérités d'essai génériques peut être appropriée. Néanmoins, les réponses dynamiques à l'intérieur du spécimen peuvent ne pas forcément représenter les conditions qui se produisent effectivement au cours du cycle de vie du spécimen. C'est pourquoi les défaillances identifiées lors d'un tel essai sont généralement soumises à une évaluation des défaillances de fiabilité afin de s'assurer qu'elles peuvent se produire de manière réaliste au cours du cycle de vie du matériel.

4.5 Recours aux essais à axes multiples pour réduire la durée des essais

Les essais à axes multiples ont parfois été privilégiés pour des raisons pratiques dans le but de réduire la durée d'application des excitations. En appliquant simultanément l'ensemble des excitations dans les trois axes, la durée des essais peut ainsi être réduite d'un tiers par rapport aux essais à axe unique réalisés séparément dans les trois axes. Ces essais permettent également de réaliser des économies, car un seul montage d'essai est exigé. Toutefois, ces économies peuvent ne pas forcément être réalisées en totalité, car l'élaboration du montage d'essai à axes multiples peut être plus complexe. En outre, lorsque l'objectif de ces essais est d'améliorer la répartition des réponses dynamiques, ces économies peuvent ne pas toujours être réalisables, car l'utilisation de sévérités plus réalistes peut également exiger leur application sur des durées plus longues.

Par ailleurs, cela peut également être problématique lorsque les essais à axes multiples sont associés à des sévérités génériques dans le but de réduire la durée des essais. En effet, la relation de phase et d'amplitude utilisée entre les différents axes d'excitation génère au niveau du spécimen des conditions dynamiques qui augmentent et/ou diminuent de manière indéterminée par rapport aux conditions induites lors des essais à axe unique réalisés séparément dans les trois axes. Les sévérités génériques couramment utilisées ont été établies à partir des retours d'expérience acquis sur de longues périodes dans le cadre des essais à axe unique historiques. Ainsi, il peut ne pas être réaliste de comparer les résultats des essais à axes multiples, réalisés avec des sévérités génériques, à ceux des essais à axe unique historiques.

5 Appareillage d'essai et stratégie de pilotage

L'utilisation de tout système d'essai à excitateurs multiples ou à axes multiples, capable de satisfaire aux exigences d'essai, est acceptable [1]. L'aptitude du matériel d'excitation et de l'installation de pilotage à exécuter l'essai, comme cela est indiqué dans la spécification pertinente, doit être vérifiée avant d'engager l'essai.

L'Annexe A fournit des recommandations concernant les systèmes de pilotage d'essai à excitateurs multiples/à axes multiples. L'Annexe B fournit des recommandations concernant l'application des différentes stratégies de pilotage. L'Annexe C fournit des recommandations concernant l'utilisation des différentes configurations d'essais à excitateurs multiples/à axes multiples. D'autres recommandations générales concernant les essais à excitateurs multiples/à axes multiples peuvent être trouvées dans les ouvrages [2], [3], [4] et [5].

6 Sévérités d'essai et tolérances

6.1 Sévérités d'essai

Les sévérités d'essai utilisées doivent correspondre à celles indiquées dans la spécification pertinente. Sauf spécification contraire, il convient de définir les sévérités et autres paramètres nécessaires à la réalisation de cet essai en fonction de l'objet de l'essai proprement dit, mais également des conditions que le spécimen est susceptible de rencontrer au cours de son cycle de vie.

L'Annexe D fournit des recommandations concernant la définition des sévérités pour les essais à excitateurs multiples/à axes multiples.

6.2 Tolérances

Les réponses de pilotage mesurées ne doivent pas s'écarter des exigences spécifiées en dépassant les tolérances d'essai indiquées dans la spécification pertinente.

Sauf spécification contraire, la tolérance sur:

- les valeurs de la densité spectrale de puissance (DSP, *Power Spectral Density*) d'un essai de vibrations aléatoires avec distribution gaussienne doit être de ± 3 dB par rapport aux valeurs spécifiées;
- les amplitudes des accélérogrammes, lors d'un essai de reproduction des vibrations par accélérogrammes, doivent être de ± 20 % par rapport à l'amplitude la plus élevée de la forme d'onde spécifiée pour 90 % de la durée spécifiée de la forme d'onde.

Les tolérances d'essai ne doivent pas être utilisées pour modifier les exigences spécifiées.

Tout écart par rapport aux tolérances spécifiées doit faire l'objet d'un accord avec le spécificateur d'essai concerné. En outre, les tolérances réelles obtenues, ainsi que la raison de cet écart, doivent être indiquées dans le rapport d'essai. Pour établir un tel accord, il est recommandé de mettre les mesures de vérification indiquées à l'Annexe B à la disposition du spécificateur d'essai concerné.

L'Annexe E fournit des recommandations concernant le choix des tolérances appropriées pour les essais à excitateurs multiples/à axes multiples.

6.3 Excitations en dehors de la plage de fréquences d'essai spécifiée

Les excitations en dehors de la plage de fréquences d'essai spécifiée doivent être réduites le plus possible et, si cela est exigé, quantifiées. L'approche à utiliser pour quantifier les excitations en dehors de la plage de fréquences d'essai spécifiée, si cela est exigé, doit être indiquée dans la spécification pertinente. L'Annexe B fournit des recommandations concernant la définition des sévérités pour les essais à excitateurs multiples/à axes multiples.

Sauf spécification contraire, les excitations en dehors de la plage de fréquences d'essai doivent être établies de la manière indiquée ci-dessous.

- a) Essais de vibrations aléatoires: Pour les essais de vibrations aléatoires, y compris tous les essais de vibrations, qui comportent des composantes aléatoires à large bande et à bande étroite, les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai doivent être établies jusqu'à 5 000 Hz ou 5 fois la fréquence d'excitation, si cette valeur est plus faible. Les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai doivent être établies conformément à la procédure de l'IEC 60068-2-64, même s'il convient de noter que la procédure de l'IEC 60068-2-64 utilise spécifiquement l'accélération comme paramètre de pilotage.
- b) Essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes: Pour les essais de reproduction des signaux par accélérogrammes, les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai doivent être établies jusqu'à 10 000 Hz ou 10 fois la fréquence d'excitation, si cette valeur est plus faible. Les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai doivent être établies conformément à la procédure de l'IEC 60068-2-85.
- c) Essais de vibrations sinusoïdales: Pour les essais de vibrations sinusoïdales (à fréquences fixes, par balayage et par paliers), la tolérance sur les signaux doit être établie jusqu'à 5 000 Hz ou 5 fois la fréquence d'excitation, si cette valeur est plus faible. Ce paramètre s'applique, quel que soit le signal considéré (accélération, vitesse ou déplacement). La tolérance sur les signaux doit être établie conformément à l'IEC 60068-2-6.

6.4 Mouvements transversaux

La spécification pertinente doit préciser si les mouvements transversaux doivent être pilotés. S'il existe une exigence pour le pilotage des mouvements transversaux, alors la spécification pertinente doit également spécifier l'approche à utiliser pour quantifier les mouvements transversaux et la tolérance appropriée.

Si les mouvements transversaux sont pris en compte et si aucune exigence n'est donnée dans la spécification pertinente, alors les valeurs suivantes sont recommandées.

- a) Vibrations aléatoires: il convient de ne pas dépasser -3 dB de l'accélération spectrale spécifiée la plus élevée pour chaque axe de pilotage et pour chaque fréquence inférieure ou égale à 500 Hz ou 0 dB pour les fréquences supérieures, conformément à l'IEC 60068-2-64.
- b) Vibrations sinusoïdales: il convient de ne pas dépasser 50 % de l'accélération spécifiée la plus élevée pour chaque axe de pilotage et pour chaque fréquence inférieure ou égale à 500 Hz ou 0 dB pour les fréquences supérieures, conformément à l'IEC 60068-2-6.
- c) Reproduction des vibrations par accélérogrammes: il convient de ne pas dépasser 50 % de l'accélération spécifiée la plus élevée pour chaque axe de pilotage et à chaque intervalle de temps, conformément à l'IEC 60068-2-85.

Tout écart par rapport aux exigences spécifiées pour les mouvements transversaux doit faire l'objet d'un accord avec le spécificateur d'essai concerné. En outre, les mouvements transversaux réels obtenus, ainsi que la raison de l'écart, doivent être indiqués dans le rapport d'essai. Pour établir un tel accord, il est recommandé de mettre les mesures de vérification indiquées à l'Annexe B à la disposition du spécificateur d'essai concerné.

L'Article B.3 fournit des recommandations supplémentaires concernant les mouvements transversaux pour les essais à excitateurs multiples/à axes multiples.

7 Montage du spécimen et installation des systèmes de mesure

Le spécimen doit être connecté mécaniquement aux excitateurs multiples et aux fixations, en respectant l'orientation et l'état exigés, comme cela est indiqué dans la spécification pertinente. Sauf spécification contraire, le spécimen doit être maintenu par son moyen de fixation normal. L'installation du spécimen doit inclure, selon les exigences, les connexions nécessaires à l'alimentation électrique, les signaux d'essai, les appareils de surveillance de performance et les éventuels appareils de surveillance, afin d'établir les réponses du spécimen d'essai.

L'IEC 60068-2-47 [6] fournit des recommandations générales concernant le montage des spécimens pour les essais de vibrations. Toutefois, les recommandations et les exigences normatives de l'IEC 60068-2-47 sont destinées aux essais à axe unique; elles ne s'appliquent pas forcément aux essais à excitateurs multiples. L'ouvrage [1] et l'Annexe C fournissent des recommandations supplémentaires concernant les bâtis de fixation et le montage des spécimens, qui s'appliquent aux différents types d'essais à axes multiples ou à excitateurs multiples.

Les appareils de mesure thermique, de vibrations, de chocs et de transitoires doivent être installés sur le spécimen d'essai et le bâti de fixation, comme cela est indiqué dans la spécification pertinente.

- a) Les caractéristiques des systèmes de mesure thermique, de vibrations, de chocs et de transitoires doivent être telles qu'elles puissent déterminer si la valeur réelle du paramètre mesuré se situe dans les limites de la tolérance exigée pour l'essai.
- b) La plage de fréquences des systèmes de mesure de vibrations doit être comprise entre au moins 0,5 fois la fréquence d'essai la plus basse et 2,0 fois la fréquence la plus élevée de la plage de fréquences d'essai. La plage de fréquences des systèmes de mesure de chocs et de transitoires doit être comprise entre au moins 0,5 fois la fréquence d'essai la plus basse et 10,0 fois la fréquence la plus élevée de la plage de fréquences d'essai.
- c) La réponse en fréquence des systèmes globaux de mesure de vibrations, de chocs et de transitoires, qui comprend le transducteur, le conditionnement des signaux, les dispositifs d'acquisition et de traitement des données, doit être égale à ± 5 % de la plage de fréquences d'essai.

8 Essais préliminaires

La présente procédure inclut des essais préliminaires (facultatifs) pour permettre au spécificateur d'essai d'établir la pertinence de la spécification d'essai et les sévérités d'essai applicables au spécimen. Les essais préliminaires peuvent être utilisés pour vérifier l'adéquation de la stratégie de pilotage, la tolérance sur les signaux, les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai et les mouvements transversaux. Les essais préliminaires peuvent exiger la fourniture d'un spécimen distinct.

Les essais préliminaires peuvent également être utilisés pour quantifier les interrelations entre les excitations, en utilisant les paramètres indiqués dans la spécification pertinente. Les interrelations entre les excitations sont normalement spécifiées au moyen de paramètres comme les densités spectrales croisées (en amplitude et en phase), la cohérence partielle et la cohérence multiple. Si aucun paramètre n'est indiqué dans la spécification pertinente, le paramètre le plus pratique pour le pilote d'essai peut être utilisé.

Si des essais préliminaires sont exigés par la spécification pertinente, ils doivent être effectués comme cela est indiqué.

Avec l'accord du spécificateur d'essai, en fonction des résultats des essais préliminaires et/ou de la caractérisation dynamique préalable aux essais, les détails des sévérités, des paramètres et des tolérances de pilotage d'essai peuvent faire l'objet d'une nouvelle spécification. Toute modification décidée par accord doit être consignée dans le rapport d'essai approprié.

L'Article B.4 fournit des recommandations supplémentaires concernant les essais préliminaires.

9 Recherche et étude des fréquences critiques

Toute recherche et étude des fréquences critiques avant les essais pour identifier les caractéristiques dynamiques du spécimen, indiquée dans la spécification pertinente, doit être effectuée et consignée conformément à la procédure définie. L'Article B.5 fournit des recommandations concernant la caractérisation dynamique liée spécifiquement à cette procédure. La recherche et l'étude des fréquences critiques constituent une méthode pratique et sensible pour l'évaluation des effets des excitations dynamiques. Les objectifs des recherches et études des fréquences critiques, les méthodes et les avantages correspondants sont expliqués dans l'IEC 60068-3-8. Les exigences relatives à l'excitation sinusoïdale sont données dans l'essai Fc (IEC 60068-2-6) et celles relatives à l'excitation aléatoire dans l'essai Fh (IEC 60068-2-64).

10 Préconditionnement

S'il y a lieu, l'enceinte climatique doit être réglée de manière à respecter les exigences de preconditionnement en température indiquées dans la spécification pertinente. Sauf spécification contraire, le réglage de la température doit être effectué conformément aux exigences de preconditionnement, sans dépasser 3 °C par minute. Des recommandations concernant le preconditionnement et la stabilisation thermique sont fournies respectivement à l'Article B.5 et à l'B.6, ainsi que dans l'ouvrage [7].

11 Mesures initiales et essai de performance de fonctionnement

Avant d'engager les essais, un essai fonctionnel ou de performance préalable doit être effectué, comme cela est indiqué dans la spécification pertinente, afin d'établir les données de référence. L'Article B.7 fournit des recommandations concernant les essais de performance de fonctionnement.

12 Faible excitation pour l'égalisation avant les essais

Le matériel de pilotage d'essai à excitateurs multiples doit être réglé de manière à obtenir l'égalisation souhaitée, jusqu'à -6 dB par rapport au niveau spécifié. Sauf indication contraire dans la spécification pertinente, le processus d'égalisation de l'Annexe B doit être utilisé. Le temps exigé pour atteindre cette égalisation ne doit pas être déduit de la durée des essais.

13 Essais

Les excitations doivent être augmentées jusqu'au niveau d'essai maximal spécifié. La durée limitée exigée pour augmenter la sévérité d'essai, jusqu'au niveau d'essai spécifié, doit correspondre à la durée minimale possible et ne doit pas dépasser 10 % de la durée des essais. Ce temps doit être consigné et ne doit pas être déduit de la durée des essais. L'Annexe B fournit des recommandations concernant l'égalisation du pilotage des vibrations et la stabilisation thermique.

Les cycles d'essais mécaniques et thermiques exigés doivent être appliqués au spécimen d'essai, selon le nombre de cycles d'essais spécifiés.

Si, pour une raison quelconque, l'essai est interrompu ou suspendu, sous réserve qu'aucune autre procédure ne soit indiquée dans la spécification pertinente, toute forme d'onde de choc ou transitoire interrompue doit être répétée dans son intégralité. Les essais de vibrations interrompus doivent être repris au point, où ils ont été interrompus. Dans les deux cas, le préconditionnement et la stabilisation climatiques, comme cela est exigé à l'Article 10, doivent être effectués avant la reprise de l'essai. Si une seule interruption se produit avec un écart de température inférieur à 10 %, les essais peuvent être poursuivis au point, où les essais ont été interrompus ou l'écart s'est produit.

Lorsque les essais de vibrations continus entraînent un échauffement irréaliste du spécimen ou de son montage, les excitations peuvent être interrompues en appliquant des périodes de repos pendant la durée indiquée dans la spécification pertinente.

La procédure d'essai doit être répétée pour l'ensemble des cycles d'essais mécaniques et thermiques spécifiés. Si une configuration d'essai à excitateurs multiples/à axe unique est utilisée, la procédure d'essai doit être répétée, en appliquant les excitations successivement dans chacun des axes spécifiés. Lorsque le programme d'essais exige l'application de différents types de vibrations ou de chocs, niveaux d'amplitude, durées ou conditions de timonerie, sauf indication contraire dans la spécification pertinente, il est admis de réaliser la séquence d'essais complète dans un axe avant de changer d'axe.

14 Mesure intermédiaire et essai de performance de fonctionnement

Les essais fonctionnels ou de performance doivent être effectués à intervalles réguliers lors des essais, comme cela est indiqué dans la spécification pertinente. L'Article B.7 fournit des recommandations concernant les essais de performance de fonctionnement.

15 Reprise

À l'issue de l'essai, on doit laisser l'enceinte climatique revenir aux conditions de laboratoire (préférentiellement choisies dans l'IEC 60068-1), sans dépasser 3 °C par minute. En variante, la spécification pertinente peut exiger l'application de l'une des procédures de reprise de l'IEC 60068-1.

16 Mesure finale, essai de performance de fonctionnement et recherche et étude des fréquences critiques

Tout essai fonctionnel ou de performance après les essais, indiqué dans la spécification pertinente, doit être effectué. L'Annexe B fournit des recommandations concernant les essais de performance de fonctionnement.

Toute recherche et étude des fréquences critiques après les essais, indiquée dans la spécification pertinente, doit être effectuée et consignée conformément à la procédure définie.

Le spécimen doit être examiné afin de détecter d'éventuels signes de dégradation et d'effets nuisibles, comme cela est exigé dans la spécification pertinente.

17 Vérification de l'essai

Toute mesure et analyse, indiquées dans la spécification pertinente, visant à vérifier la validité de l'essai doit être effectuée. L'Article B.7 fournit des recommandations concernant la vérification de l'essai.

18 Renseignements à spécifier dans la spécification pertinente

Lorsque cet essai est inclus dans la spécification pertinente, les renseignements suivants doivent être spécifiés, dans la mesure où ils s'appliquent:

- a) si l'objet de l'essai est de démontrer les performances ou l'intégrité du spécimen, ou les deux;
- b) la configuration d'essai à excitateurs multiples/à axes multiples;
- c) la méthode et l'orientation de montage du spécimen, ainsi que les détails des connexions éventuelles pour les câbles, tuyaux, etc. nécessaires;
- d) si une configuration à excitateurs multiples/à axe unique est utilisée, les axes et les directions dans lesquels doivent être appliquées les différentes excitations;
- e) si les effets de la gravitation doivent être pris en compte;
- f) si l'influence des champs magnétiques parasites est importante, les limites acceptables et les actions à engager dans l'éventualité où ces limites seraient dépassées;
- g) si le spécimen doit être soumis à l'essai avec ou sans les montages isolants en place, le cas échéant;
- h) la stratégie et les exigences pour les essais préliminaires, y compris les paramètres à établir et les critères de vérification des essais à appliquer;
- i) la stratégie de pilotage à adopter, y compris les points de pilotage et de surveillance, ou la procédure à suivre pour choisir ces points;
- j) pour les essais de vibrations, le type d'essai de vibrations, les sévérités d'essai de vibrations, l'axe et l'ordre dans lesquels doivent être effectués les essais de vibrations, ainsi que la durée des essais, y compris les périodes de repos, le cas échéant;
- k) pour les essais de choc, le type d'essai de choc, la forme d'onde d'essai de choc, l'axe, la direction et l'ordre dans lesquels doivent être appliqués les chocs;
- l) les conditions de température et d'humidité et, s'il y a lieu, les cycles d'essai thermique dans lesquels doit être effectué l'essai, s'il ne s'agit pas des conditions atmosphériques normales;
- m) les résolutions de fréquence minimales à utiliser pour les besoins du pilotage, de la surveillance et des vérifications;
- n) la variation maximale admissible entre les réponses mesurées aux points de pilotage et les actions à engager si ces valeurs sont en dehors de ces limites (sauf indication contraire uniquement dans le cadre du pilotage multipoint);
- o) si les mouvements transversaux sont importants et, dans un tel cas, les limites acceptables associées et les actions à engager si ces limites sont dépassées;
- p) les tolérances à appliquer;
- q) si les performances de fonctionnement doivent être évaluées, les phases de l'essai où le spécimen doit être mis en fonctionnement et évalué, ainsi que les niveaux de performance exigés;
- r) si des examens visuels ou autres sont exigés et, dans un tel cas, à quelles phases de l'essai ces examens doivent être effectués;
- s) si une caractérisation dynamique est exigée avant et après les essais, l'approche à utiliser et la procédure appropriée;
- t) tout paramètre supplémentaire à consigner, les critères de vérification des essais à appliquer, les données à recueillir et la méthode d'analyse;
- u) tout écart admis par rapport à la procédure d'essai.

19 Renseignements à fournir dans le rapport d'essai

Le rapport d'essai doit comporter au minimum les renseignements suivants:

- a) client (nom et adresse);

- b) laboratoire d'essai (nom et adresse);
- c) identification du rapport d'essai (date de parution, numéro unique);
- d) dates de l'essai (dates auxquelles l'essai a été effectué);
- e) objet de l'essai (essai de développement, d'homologation, etc.);
- f) norme d'essai, édition (procédure d'essai appropriée);
- g) description du spécimen d'essai (état initial, numéro d'identification unique, quantité, photographie, dessin, etc.);
- h) montage du spécimen d'essai (numéro d'identification de la fixation, dessin, photographie, etc.);
- i) performances de l'appareillage d'essai (mouvements transversaux, etc.);
- j) chaîne de mesure, position des capteurs (description, dessin, photographie, etc.);
- k) incertitudes du système de mesure (incertitude globale, données d'étalonnage, dernière/prochaine date d'étalonnage si la spécification pertinente l'exige);
- l) mesures initiales, intermédiaires et/ou mesures finales (si elles sont effectuées par le laboratoire d'essai);
- m) sévérités d'essai atteintes (sévérités mesurées);
- n) résultats des essais (état final du spécimen d'essai);
- o) observations au cours des essais et actions engagées (détails des problèmes rencontrés lors des essais, interruptions lors des essais);
- p) récapitulatif de l'essai (récapitulatif de l'essai, décisions de réussite/d'échec);
- q) questionnaire de l'essai (nom et signature);
- r) Distribution (liste des destinataires du rapport);

NOTE 1 Une liste de contrôle des essais est établie pour les besoins des essais. Cette liste documente les essais en utilisant, par exemple, une liste chronologique des cycles d'essai avec les paramètres d'essai, les observations formulées lors des essais, les actions engagées, ainsi que des fiches techniques sur les mesures effectuées. La liste de contrôle des essais peut être fournie avec le rapport d'essai.

NOTE 2 Voir aussi l'ISO/IEC 17025 [8].

Annexe A (informative)

Recommandations pour les systèmes de pilotage d'essai à excitateurs multiples/à axes multiples

A.1 Généralités

L'utilisation de systèmes à excitateurs multiples/à axes multiples pour les essais de vibrations, de chocs et de transitoires peut présenter des avantages non négligeables, en particulier lors des essais de structures volumineuses ou lourdes ou de structures pour lesquelles il n'est pas facile de reproduire les réponses dynamiques avec une seule source d'excitation. Les installations d'essai à excitateurs multiples peuvent permettre une meilleure répartition de l'énergie vibratoire et des forces vibratoires dans un spécimen, ce qui est généralement possible avec des systèmes à excitateur unique (SISO ou SIMO). Les applications les plus courantes des essais à excitateurs multiples sont indiquées ci-dessous, mais ces essais ne se limitent pas nécessairement à de telles applications.

- a) Les systèmes à excitateurs multiples peuvent être utilisés pour les essais de spécimens volumineux et lourds, qui ne peuvent pas être soumis à l'essai facilement avec des excitateurs uniques. L'utilisation de systèmes à excitateurs multiples permet d'effectuer des essais de vibrations, de chocs et de transitoires sur les matériels ou sur les charges utiles des véhicules, ce qui exigerait normalement des évaluations sur piste d'essai. L'Annexe C formule des conseils concernant l'utilisation de systèmes à excitateurs multiples (MISO ou MIMO) dans le cadre des essais de systèmes de véhicules et de navires volumineux.
- b) Les systèmes à excitateurs multiples, configurés pour exciter les spécimens selon six degrés de liberté au maximum, présentent l'avantage de pouvoir évaluer la fiabilité du matériel et de certains systèmes de capteurs. L'Annexe C formule des conseils concernant l'utilisation de systèmes à axes multiples dans le cadre des essais selon plusieurs degrés de liberté.

A.2 Stratégies de pilotage à excitateurs multiples

Les installations d'essai à excitateurs multiples sont généralement configurées selon les deux manières suivantes, qui sont toutes deux couvertes par les procédures du présent article.

- a) Excitateurs multiples/axes multiples (MEMA). Cette configuration utilise plusieurs excitateurs pour appliquer des entrées dynamiques sur le matériel dans plusieurs directions. Les différents excitateurs peuvent être configurés de manière à générer simultanément des réponses dynamiques selon un à six degrés de liberté. Cette configuration est généralement utilisée lorsque les excitations s'exercent dans plusieurs axes, ce qui génère des conditions ou des dommages qui ne peuvent pas être reproduits en appliquant les excitations successivement dans chacun des axes.
- b) Excitateurs multiples/axe unique (MESA). Cette configuration utilise plusieurs excitateurs pour appliquer simultanément des entrées dynamiques sur le matériel dans une seule direction. Elle est fréquemment utilisée pour les essais de structures longues et minces ou pour la reproduction de plusieurs sources d'excitation (comme les charges utiles d'un véhicule à roues). Il est admis d'utiliser cette configuration de matériel d'essai dans un cas particulier lorsque les forces exigées sont importantes. Dans ce cas, les différents excitateurs peuvent être mis en fonctionnement par un accouplement en phase.

Les méthodes MESA et MEMA sont les deux approches d'essai générales traitées dans le présent document. Les dispositifs à entrée unique/à sortie unique (SISO), à entrée unique/à sorties multiples (SIMO), à entrées multiples/à sortie unique (MISO) et à entrées multiples/à sorties multiples (MIMO) sont des dispositifs d'excitateurs plus élaborés des méthodes MESA ou MEMA, avec des dispositifs de mesure des signaux d'excitation et des réponses bien définis. En principe, avec tous les dispositifs d'essai définis (SISO, SIMO, MISO et MIMO), il est admis d'utiliser une table rigide ou un bâti rigide équipés d'excitateurs à base fixe ou d'excitateurs fixés directement au spécimen par des accouplements souples. Dans la pratique, certains dispositifs sont plus courants et appropriés que d'autres.

Quelle que soit la configuration de l'installation d'essai, les systèmes de pilotage d'essai à excitateurs multiples appliquent plusieurs formes d'onde d'excitation sur les différents excitateurs, afin de reproduire les réponses de pilotage multiples mesurées. La ou les réponses de pilotage mesurées peuvent être situées sur le spécimen d'essai ou sur ses fixations.

Les principes généraux des stratégies de pilotage en boucle fermée utilisées pour les essais à excitateurs multiples sont sensiblement les mêmes que ceux utilisés pour les essais à excitateur unique. Les vibrations, les chocs ou les transitoires sont pilotés à l'intérieur des limites spécifiées par échantillonnage des mouvements dynamiques du spécimen en essai à des positions spécifiques. Ces positions peuvent se trouver au niveau ou à proximité des points de fixation du spécimen (pilotage d'entrée) ou en des points définis du spécimen (pilotage de réponse). Dans la pratique, la plupart des essais à excitateurs multiples sont pilotés en fonction de la réponse du spécimen, mais dans certains cas ils sont pilotés à proximité des points de fixation des excitateurs. La stratégie de pilotage est normalement indiquée dans la spécification pertinente, mais peut, avec l'accord du spécificateur d'essai, être modifiée à la suite des essais préliminaires.

Même si les principes généraux des essais à excitateurs multiples sont similaires à ceux utilisés pour les essais à excitateur unique les plus couramment rencontrés (SISO ou SIMO), il est nécessaire de prendre compte d'autres aspects. Le pilotage d'un système à excitateurs multiples nécessite généralement l'application de plusieurs formes d'onde d'excitation sur les excitateurs. Dans certains cas, ces excitations peuvent être entièrement corrélées (chaque excitateur appliquant généralement la même excitation) ou pas du tout corrélées (chaque excitateur appliquant des excitations totalement indépendantes). Cependant, ces deux cas particuliers ne reflètent pas la situation la plus courante, c'est-à-dire où les excitations sont partiellement corrélées et où il existe un certain degré d'interrelation entre les formes d'onde appliquées sur les différents excitateurs. En outre, sur le plan quantitatif, le degré d'interrelation varie en fonction de la fréquence et dépend des caractéristiques dynamiques des spécimens et de leurs bâtis de fixation. La spécification et la quantification de cette interrelation, entre les excitations appliquées par les différents excitateurs, constituent la différence majeure entre les essais à excitateurs multiples et les essais à excitateur unique.

À l'exception des essais avec des excitateurs corrélés, la définition et la quantification de l'interrelation entre chaque degré de liberté de réponse constituent un élément important de la spécification des exigences d'essai pour les essais à excitateurs multiples. Cette interrelation est normalement définie à partir de mesures effectuées lors des travaux de caractérisation de l'environnement pour établir les sévérités appropriées. Toutefois, en l'absence de données appropriées, des essais préliminaires peuvent être exigés afin d'établir des exigences appropriées.

L'interrelation des vibrations entre les réponses est généralement quantifiée en procédant à une augmentation des sévérités de densité spectrale de puissance normale pour chaque degré de liberté, avec des densités spectrales croisées (CSD, *Cross Spectral Density*) entre chaque paire de réponses. Pour les essais de reproduction par accélérogrammes ou les essais de chocs à excitateurs multiples, les densités spectrales de puissance et les densités spectrales croisées peuvent être remplacées par la fonction de corrélation automatique et les fonctions de corrélation croisée, respectivement.

A.3 Stratégies de pilotage dimensionnée et surdimensionnée

Historiquement, les essais à excitateurs multiples appliquent une technique de pilotage "carrée" classique, où le nombre d'excitateurs est égal au nombre de mesures de pilotage. Par exemple, un dispositif à deux excitateurs serait piloté à l'aide de deux accéléromètres de pilotage. En règle générale, les accéléromètres de pilotage pourraient être placés soit sur les deux têtes d'excitateurs, soit sur les deux points de fixation, soit en deux emplacements sur le spécimen situés à proximité des points de fixation. Avec ce dispositif d'essai, de nombreuses mesures de réponse supplémentaires peuvent également être effectuées, ce qui permet d'obtenir une bonne estimation des réponses dynamiques du système d'essai dans son ensemble. En général, plusieurs de ces mesures de réponse supplémentaires peuvent également être utilisées afin de limiter les réponses du spécimen, conjointement avec les deux mesures de pilotage, ce qui permet de réduire le nombre d'essais. Cependant, comme pour tout scénario de pilotage des limites, l'utilisation du pilotage aux extrêmes inhérent peut réduire considérablement les niveaux d'excitation et créer des irrégularités dans les réponses en fréquence.

Une autre méthode, plus récemment utilisée, est la stratégie de pilotage dite surdimensionnée ou "rectangulaire", où le nombre de mesures de pilotage est supérieur au nombre d'excitateurs. Le pilotage surdimensionné applique une approche similaire aux méthodes d'ajustement linéaire par les moindres carrés, afin de fournir une meilleure estimation des différentes fonctions de réponse en fréquence du système, sur laquelle est effectué le pilotage en boucle fermée. D'après les retours d'expérience, l'avantage du pilotage surdimensionné est qu'il peut donner des réponses de vibrations dynamiques plus proches de la matrice de densité spectrale de référence (selon la méthode d'ajustement par les moindres carrés) sur un nombre de degrés de liberté supérieur à celui qui pourrait être obtenu en appliquant un pilotage carré avec le même nombre d'excitateurs. Toutefois, l'inconvénient est que tout degré de liberté peut présenter un écart plus important par rapport à son spectre de référence qui serait normalement obtenu avec la stratégie de pilotage carrée.

Les essais à excitateurs multiples qui utilisent la configuration d'essai à axes multiples peuvent inclure des degrés de liberté orthogonaux et de rotation. Dans de tels cas, il peut être nécessaire d'adopter une stratégie de pilotage qui intègre la transformation des signaux. La transformation des signaux consiste essentiellement en la cartographie linéaire des points de pilotage à des degrés de liberté prédéterminés, utilisés pour le pilotage. En règle générale, les degrés de liberté cartographiés d'un "point virtuel" sont choisis comme les degrés de liberté considérés pour un corps rigide. La position du point virtuel est généralement définie par le spécificateur d'essai. L'ajout de degrés de liberté pour un corps souple dans le cadre du pilotage a pour objet d'élargir la marge de pilotage du système, afin que celui-ci puisse supprimer des modes de vibrations spécifiques. Par exemple, la méthode par transformation des signaux peut être utilisée pour cartographier la réponse de quatre accéléromètres triaxiaux à six degrés de liberté du corps rigide, avec des rotations définies par rapport au point de pilotage virtuel, qui se situe généralement sur le matériel d'excitation. Les accélérations linéaires et angulaires calculées pour le point de pilotage virtuel sont utilisées comme signaux de pilotage pour les six degrés d'essai de liberté.

A.4 Quantification de l'interrelation entre les excitateurs pour les essais de vibrations

Pour un système à deux excitateurs, deux densités spectrales de puissance au minimum et une paire conjuguée complexe de densités spectrales croisées sont exigées. Un système à six excitateurs exigerait au minimum six densités spectrales de puissance, ainsi que 15 densités spectrales croisées complexes. Ces exemples sont représentés à la Figure A.1 et à la Figure A.2 Il convient de noter que seule la moitié supérieure de la matrice nécessite d'être définie, car les termes hors diagonale inférieurs sont les conjugués complexes des termes hors diagonale supérieurs. Une densité spectrale croisée peut être spécifiée par rapport à ses composantes complexes (réelles et imaginaires) ou plus fréquemment par rapport à l'amplitude relative et la phase entre les paires d'excitateurs.

$PSD_{xx}(f)$	$CSD_{xy}(f)$
$CSD_{yx}(f)$	$PSD_{yy}(f)$

NOTE Le terme hors diagonale inférieur est le conjugué complexe du terme hors diagonale supérieur.

Figure A.1 – Densité spectrale de puissance (PSD) et densité spectrale croisée (CSD) pour un système à deux excitateurs

$PSD_{xx}(f)$	$CSD_{xy}(f)$	$CSD_{xz}(f)$	$CSD_{xa}(f)$	$CSD_{x\beta}(f)$	$CSD_{xy}(f)$
$CSD_{yx}(f)$	$PSD_{yy}(f)$	$CSD_{yz}(f)$	$CSD_{ya}(f)$	$CSD_{y\beta}(f)$	$CSD_{yy}(f)$
$CSD_{zx}(f)$	$CSD_{zy}(f)$	$PSD_{zz}(f)$	$CSD_{za}(f)$	$CSD_{z\beta}(f)$	$CSD_{zy}(f)$
$CSD_{ax}(f)$	$CSD_{ay}(f)$	$CSD_{az}(f)$	$PSD_{aa}(f)$	$CSD_{a\beta}(f)$	$CSD_{ay}(f)$
$CSD_{\beta x}(f)$	$CSD_{\beta y}(f)$	$CSD_{\beta z}(f)$	$CSD_{\beta a}(f)$	$PSD_{\beta\beta}(f)$	$CSD_{\beta y}(f)$
$CSD_{yx}(f)$	$CSD_{yy}(f)$	$CSD_{yz}(f)$	$CSD_{ya}(f)$	$CSD_{y\beta}(f)$	$PSD_{yy}(f)$

NOTE Les termes hors diagonale inférieurs sont les conjugués complexes des termes hors diagonale supérieurs.

Figure A.2 – Densité spectrale de puissance (PSD) et densité spectrale croisée (CSD) pour un système à six excitateurs

Au cours de l'étape d'identification du système, le pilote d'essai calcule les informations de la fonction de réponse en fréquence entre chaque excitateur et chaque position de réponse, après quoi il génère les formes d'onde d'excitation exigées pour obtenir les réponses exigées.

La fonction de cohérence partielle est généralement appliquée pour augmenter l'utilisation de la densité spectrale croisée, même si, dans certains cas, elle peut être utilisée en lieu et place des densités spectrales croisées. L'utilisation de fonctions de cohérence partielle peut permettre d'estimer l'amplitude relative entre les paires d'excitateurs, mais ne définit pas la relation de phase entre les paires d'excitateurs. Par conséquent, si seules des fonctions de cohérence partielle sont utilisées, elles peuvent exiger des informations supplémentaires concernant la phase de la densité spectrale croisée à définir ou à estimer. La fonction de cohérence partielle est particulièrement pertinente lorsque des réponses non linéaires sont attendues.

Comme cela est indiqué ci-dessus, il existe deux cas particuliers qui ne reflètent pas la situation générale, c'est-à-dire où les excitations sont partiellement corrélées et où il existe un certain degré d'interrelation entre les formes d'onde appliquées sur les différents excitateurs. Dans le premier cas particulier, les excitations sont entièrement corrélées: chaque excitateur applique généralement la même forme d'onde. Dans le second cas particulier, les excitations ne sont pas du tout corrélées: chaque excitateur applique des formes d'onde totalement indépendantes. Ce cas peut donner une approximation raisonnable des excitations aérodynamiques à des fréquences plus élevées, exercées sur les surfaces externes d'un avion. Quel que soit le cas, ils permettent de simplifier les informations à spécifier.

A.5 Quantification de l'interrelation entre les excitateurs pour les essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes

Depuis longtemps, il est possible d'effectuer des essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes avec la plupart des matériels de pilotage d'essai de vibrations à axe unique. À l'origine, cette installation était toutefois limitée à la reproduction, isolée ou répétée, d'un seul bloc de données de vibrations ou d'une seule impulsion de choc. En outre, ces installations limitaient la définition des formes d'onde de vibrations ou de chocs sur un nombre maximal de 8 192 points temporels. Malgré cette limitation, l'approche a souvent été utilisée pour reproduire des événements tels que des séismes et des réponses transitoires de courte durée. Au cours des dernières années, les installations sont devenues disponibles dans le commerce, ce qui développe l'approche de reproduction des vibrations par accélérogrammes afin de permettre l'application continue de formes d'onde de longue durée. Il est désormais possible d'utiliser les essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes, en lieu et place des essais de vibrations aléatoires, lorsqu'il est important de reproduire des caractéristiques spécifiques de la forme d'onde, par exemple dans le cadre d'essais de fatigue/durabilité.

La reproduction des vibrations par accélérogrammes peut être utilisée avec des formes d'onde qui ne sont pas nécessairement fixes ou gaussiennes. L'exigence principale concernant l'utilisation de la méthode de reproduction des vibrations par accélérogrammes est que la plage de fréquences de la forme d'onde à reproduire est inférieure à la capacité de la plage de fréquences des excitateurs à utiliser. Si la méthode de reproduction des vibrations par accélérogrammes est utilisée pour reproduire simplement des comportements aux vibrations, il est uniquement nécessaire que la plage de fréquences de la forme d'onde soit légèrement inférieure à la capacité de la plage de fréquences des excitateurs. Cependant, si cette méthode est utilisée pour reproduire des formes d'onde de choc, il est nécessaire que la plage de fréquences de la forme d'onde soit significativement inférieure à la capacité de la plage de fréquences des excitateurs.

Plusieurs stratégies de pilotage d'essai sont actuellement utilisées par les pilotes d'essai disponibles dans le commerce pour les essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes des formes d'onde de longue durée. En règle générale, les pilotes d'essai disponibles dans le commerce mettent en œuvre des méthodes dans le domaine de fréquence et le domaine temporel afin d'optimiser le pilotage et de compenser les distorsions induites par l'amplificateur, l'excitateur et le banc d'essai/spécimen. Dans leur forme la plus simple, les pilotes utilisent des accélérogrammes et des fonctions de réponse impulsionnelle en lieu et place des densités spectrales de puissance et des fonctions de réponse en fréquence utilisées pour le pilotage des essais de vibrations aléatoires conventionnels. Cette approche a été jugée relativement lente par le passé, notamment pour l'exécution des calculs nécessaires. Une solution plus rapide a été identifiée: elle consiste à utiliser une transformée de Fourier rapide complexe pour convertir un accélérogramme en une séquence de spectres de fréquences complexes et traduire les fonctions de réponse impulsionnelle en fonctions de réponse en fréquence. En utilisant de telles relations réversibles, le pilotage d'essai peut être effectué en grande partie dans le domaine des fréquences d'une manière similaire à celle utilisée pour le pilotage des vibrations aléatoires. Par conséquent, la procédure d'essai de reproduction des vibrations par accélérogrammes peut sembler relativement similaire à celle utilisée pour l'essai de vibrations aléatoires. En particulier, les essais de vibrations aléatoires et les essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes nécessitent une période d'égalisation pour permettre au pilote d'essai d'identifier une fonction de réponse impulsionnelle ou une fonction de réponse en fréquence appropriée qui caractérise les distorsions induites par l'amplificateur, l'excitateur et le banc d'essai/le spécimen. Dans les deux cas, cette approche est utilisée pour modifier la forme d'onde d'excitation afin de compenser les distorsions.

L'adaptation des stratégies d'essai de reproduction des vibrations par accélérogrammes pour les essais à axes multiples/à excitateurs multiples s'est révélée pertinente pour plusieurs applications, notamment les essais de résistance sismique et les essais de durabilité automobiles. Les stratégies de pilotage développées pour les essais à axe unique sont devenues la référence pour l'élaboration des stratégies de pilotage par reproduction des vibrations par accélérogrammes dans le cadre des essais à axes multiples/à excitateurs multiples. Alors que les essais à axes multiples/à excitateurs multiples exigent la spécification des formes d'onde des différents accélérogrammes, il existe différentes manières de spécifier l'interrelation entre l'excitateur/les axes. Dans certains cas, les mêmes densités spectrales croisées, spécifiées ou déduites pour les essais de vibrations aléatoires, peuvent être utilisées. Dans d'autres cas, des fonctions de corrélation croisée peuvent être exigées.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60068-2-86:2024

Annexe B (informative)

Recommandations supplémentaires pour les essais

B.1 Points de fixation, de surveillance, de pilotage et de référence

Le choix des points de fixation, de pilotage et de référence appropriés pour un spécimen et un bâti de fixation donnés constitue un élément important pour assurer la validité des essais. Pour cette procédure d'essai, les points de fixation, de surveillance, de pilotage et de référence répondent aux définitions suivantes:

- a) un point de fixation est défini comme une partie du spécimen qui est en contact avec le bâti de fixation ou la table vibrante, en un point auquel il est normalement fixé;
- b) un point de surveillance est une position, où sont effectuées les mesures pour collecter des données sur le comportement dynamique du spécimen. Il peut s'agir de la réponse du spécimen, du bâti de fixation ou du matériel d'essai;
- c) un point de pilotage est une position, où sont effectuées les mesures pour permettre le pilotage des excitations à l'intérieur de limites spécifiques pendant l'essai;
- d) le point de référence est le point, où sont effectuées les mesures pour confirmer que les exigences de l'essai sont respectées. Il convient que la position du point de référence soit indiquée dans la spécification pertinente. Il peut s'agir d'un point de surveillance, d'un point de pilotage ou d'un point "virtuel", défini par traitement manuel ou automatique des réponses relevées sur plusieurs points de pilotage.

Il convient que les points de fixation, de surveillance, de pilotage et de référence appropriés soient indiqués dans la spécification pertinente ou que le document comporte la procédure à suivre pour choisir ces points. Il peut être nécessaire de vérifier l'adéquation des points de référence et de pilotage spécifiés en procédant à des essais préliminaires.

Les points de pilotage et de référence, associés aux essais de pilotage de réponse, lorsqu'ils utilisent des sévérités reposant sur des données mesurées, reflètent normalement les positions de mesure réelles.

L'IEC 60068-1, l'IEC 60068-2-6, l'IEC 60068-2-27, l'IEC 60068-2-64, l'IEC 60068-2-80 et l'IEC 60068-2-85 fournissent des informations supplémentaires concernant l'utilisation des points de fixation, de surveillance, de pilotage et de référence pour différents types d'essais.

B.2 Égalisation du pilotage

Une durée d'essai limitée est exigée pour permettre au matériel de pilotage d'atteindre l'égalisation nécessaire pour le pilotage en boucle fermée. Le temps exigé pour l'égalisation dépend du pilote utilisé, de la complexité de la forme d'onde et du comportement du spécimen en essai. Pour les essais à axes multiples/à excitateurs multiples, la durée exigée pour l'égalisation est presque toujours susceptible d'être supérieure à celle exigée pour un système de pilotage à exciteur unique/à axe unique. Si un spécimen d'essai dynamiquement représentatif est utilisé, alors une durée d'essai illimitée pour l'égalisation peut être appliquée. Si le spécimen d'essai réel est utilisé, sauf indication contraire dans la spécification pertinente, il convient toutefois que le temps d'égalisation pour les essais remplisse les conditions suivantes:

- a) l'égalisation initiale est effectuée à -12 dB au-dessous du niveau efficace spécifié pour les vibrations et de l'amplitude de crête pour la reproduction des vibrations par accélérogrammes. Aucune limite de durée d'essai n'est imposée pour cette phase d'égalisation;

- b) les niveaux de vibrations sont augmentés de –12 dB à –6 dB par rapport au niveau efficace spécifié pour les vibrations et à l'amplitude de crête pour la reproduction des vibrations par accélérogrammes. Il convient que le temps d'application total de ces niveaux ne dépasse pas plus d'un quart de la durée d'essai spécifiée. Il convient de ne pas déduire ce temps d'égalisation de la durée d'essai spécifiée;
- c) les niveaux de vibrations sont augmentés de –6 dB à 0 dB par rapport au niveau efficace spécifié pour les vibrations et à l'amplitude de crête pour la reproduction des vibrations par accélérogrammes. Il convient de réduire le plus possible le temps d'application de ces niveaux. Il convient que le temps d'application total de ces niveaux ne dépasse pas plus de 10 % de la durée d'essai spécifiée. Il convient de ne pas déduire ce temps d'égalisation de la durée d'essai spécifiée.

L'IEC 60068-1, l'IEC 60068-2-6, l'IEC 60068-2-27, l'IEC 60068-2-64, l'IEC 60068-2-80 et l'IEC 60068-2-85 fournissent des informations supplémentaires concernant l'égalisation du pilotage pour différents types d'essais.

B.3 Mouvements transversaux, distorsion des signaux et réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai

La vérification des mouvements transversaux peut ne pas être nécessaire lors de l'exécution de certains types d'essais à axes multiples. Toutefois, lorsque plusieurs excitateurs sont utilisés pour reproduire une configuration d'essai à axe unique (MESA) et lorsque plusieurs types d'essais MEMA sont réalisés, la spécification pertinente peut exiger la vérification des mouvements transversaux avant d'engager les essais. Pour cette vérification, une étude sinusoïdale ou aléatoire peut être effectuée au niveau indiqué dans la spécification pertinente. Lorsque la spécification pertinente exige la vérification des mouvements transversaux, les tolérances suivantes sont recommandées pour les mouvements transversaux:

- a) vibrations aléatoires: il convient de ne pas dépasser –3 dB de l'accélération spectrale spécifiée la plus élevée, dans tout axe, pour chaque fréquence inférieure ou égale à 500 Hz ou 0 dB pour les fréquences supérieures, conformément à l'IEC 60068-2-64;
- b) vibrations sinusoïdales: il convient de ne pas dépasser 50 % de l'accélération spécifiée la plus élevée, dans tout axe, pour chaque fréquence inférieure ou égale à 500 Hz ou 0 dB pour les fréquences supérieures, conformément à l'IEC 60068-2-6;
- c) reproduction des vibrations par accélérogrammes: il convient de ne pas dépasser 50 % de l'accélération spécifiée la plus élevée, dans tout axe et à chaque intervalle de temps, conformément à l'IEC 60068-2-85.

Nonobstant ce qui précède, à certaines fréquences, en particulier pour les spécimens volumineux ou lourds, les exigences relatives aux mouvements transversaux peuvent être difficiles à respecter. Dans de tels cas, il convient de fixer les mouvements transversaux effectifs sur la plage de fréquences d'essai avec l'accord du spécificateur d'essai et il convient de consigner les valeurs obtenues dans le rapport d'essai.

Il convient d'établir la distorsion des signaux (pour les essais de vibrations sinusoïdales ou les essais de reproduction des vibrations par accélérogrammes) ou les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai (pour les essais de vibrations aléatoires) en effectuant une étude sinusoïdale ou aléatoire au niveau indiqué dans la spécification pertinente. Un nombre important de réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai peut être le signe de problèmes de cliquetis qui pourraient altérer la capacité de pilotage d'essai et induire des dommages plus importants ou non souhaitables sur le spécimen par un aplatissement supérieur au même niveau efficace piloté. Une distorsion importante des signaux ou un nombre important de réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai sont parfois le signe d'anomalies dans le montage du spécimen/dispositif de timonerie. Ces anomalies sont également préoccupantes pour les essais à excitateurs multiples/à axes multiples. En effet, de tels problèmes peuvent être plus susceptibles de se produire lorsque des essais à excitateurs multiples/à axes multiples sont effectués, en raison du dispositif d'essai généralement plus complexe.

Si la mesure de la distorsion des signaux et des réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai est couramment utilisée pour déterminer si les excitateurs, le spécimen, le montage et le bâti de fixation ont un comportement linéaire à toutes les amplitudes, d'autres méthodes peuvent également être utilisées. L'utilisation de la densité de probabilité d'amplitude, de l'asymétrie et de l'aplatissement peut également, si celle-ci est correctement interprétée, être utilisée comme indicateurs de mouvements non linéaires.

L'IEC 60068-2-6 et l'IEC 60068-2-64 fournissent des informations supplémentaires sur les mouvements transversaux, la distorsion des signaux et les réponses en dehors de la plage de fréquences d'essai.

B.4 Essais préliminaires

Les essais préliminaires ne constituent pas une exigence normative pour cette procédure d'essai. Cependant, ces essais peuvent contribuer à réduire les risques avant d'engager des essais sur le spécimen réel.

Les essais préliminaires sont couramment utilisés pour évaluer les bâtis de fixation, déterminer si les essais sont viables à des niveaux de sévérité élevés dans la plage de températures exigées, confirmer ou identifier la stratégie de pilotage appropriée et, le cas échéant, vérifier que les essais n'entraînent pas une surévaluation ou une sous-évaluation de toute partie du spécimen. Les essais préliminaires peuvent également être utilisés pour vérifier que les mouvements transversaux se situent dans les limites de la tolérance exigée, que la tolérance exigée sur les signaux ou que les exigences relatives aux réponses en dehors de la plage de fréquences peuvent être respectées, mais également pour déterminer si la distribution d'amplitude appropriée est appliquée.

Dans certains cas, il peut être approprié, lors de l'exécution d'un essai à axes multiples/à excitateurs multiples, d'ajouter un essai modal au programme d'essais préliminaires. Un essai modal est couramment utilisé pour effectuer une évaluation quantitative des caractéristiques dynamiques d'un spécimen et d'un bâti de fixation. Ces informations peuvent être essentielles pour déterminer les dispositifs d'essai à axes multiples/à excitateurs multiples, mais également pour définir les densités spectrales croisées appropriées. Dans certains cas, une autre solution acceptable peut consister à établir les caractéristiques dynamiques d'un spécimen et d'un bâti de fixation en s'appuyant sur un modèle mathématique dûment validé, comme un modèle à éléments finis.

B.5 Recherche et étude des fréquences critiques

Des recherches et études des fréquences critiques avant et après les essais peuvent être exigées dans la spécification pertinente pour établir les caractéristiques dynamiques du spécimen ou du bâti de fixation. De telles études de caractérisation peuvent reposer sur des essais de résonance ou des essais modaux. Des recherches et études des fréquences critiques peuvent être effectuées avant et après les essais afin d'identifier les variations de la fréquence ou de l'amortissement. Une variation de la fréquence ou des caractéristiques d'amortissement peuvent indiquer que le spécimen a subi une dégradation structurelle. Il convient de choisir les dispositifs réalisés pour détecter les variations de la fréquence ou des caractéristiques d'amortissement en veillant à ce qu'ils ne modifient pas de manière significative le comportement dynamique du spécimen.

Il convient de se rappeler que, dans le cas d'une résonance non linéaire, un spécimen peut répondre différemment selon la direction de balayage. Il convient de déterminer les fréquences critiques sur les parties ascendante et descendante du cycle de balayage.

Lorsque des recherches et études des fréquences critiques sont indiquées, il convient que la spécification pertinente précise la méthode et la procédure à utiliser. Le cas échéant, cette spécification peut également indiquer les actions à engager pendant et après les essais, si des variations de la fréquence ou des caractéristiques d'amortissement sont détectées.