

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Discrete devices –
Part 14-4: Semiconductor accelerometers**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets –
Partie 14-4: Accéléromètres à semiconducteurs**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60747-14-4:2011



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Semiconductor devices – Discrete devices –
Part 14-4: Semiconductor accelerometers**

**Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets –
Partie 14-4: Accéléromètres à semiconducteurs**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XD

ICS 31.080.01

ISBN 978-2-88912-323-0

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terminology and letter symbols	9
3.1 Terms and definitions	9
3.2 Letter symbols.....	15
4 Essential ratings and characteristics.....	16
4.1 General.....	16
4.1.1 Operating principle	16
4.1.2 Single axis and multi-axis	16
4.1.3 Performance evaluation	17
4.1.4 Sensitivity.....	17
4.1.5 Classification.....	18
4.1.6 Symbol (<i>g</i>).....	19
4.1.7 Customer and supplier.....	19
4.1.8 Linearity and nonlinearity.....	19
4.1.9 Element materials.....	19
4.1.10 Handling precautions.....	20
4.1.11 Accelerometer mounting condition.....	20
4.1.12 Specifications	20
4.2 Ratings (limiting values)	20
4.3 Recommended operating conditions	20
4.4 Characteristics	21
4.4.1 Measurement range.....	21
4.4.2 Sensitivity and sensitivity error	21
4.4.3 Bias (offset) and bias (offset) error	21
4.4.4 Linearity	21
4.4.5 Misalignment.....	22
4.4.6 Cross-axis sensitivity.....	22
4.4.7 Cross-coupling coefficient.....	22
4.4.8 Temperature coefficient of sensitivity.....	22
4.4.9 Temperature coefficient of bias.....	22
4.4.10 Frequency response	22
4.4.11 Supply current	22
4.4.12 Output noise.....	22
4.4.13 Ratiometricity	22
4.4.14 Self test.....	23
5 Measuring methods	23
5.1 General.....	23
5.1.1 Standard test conditions	23
5.1.2 Applicable measurement methods for test and calibration method	23
5.2 Testing methods for characteristics	25
5.2.1 Measurement range.....	25
5.2.2 Supply voltage range.....	26
5.2.3 Sensitivity and sensitivity error	26

5.2.4	Bias and bias error	26
5.2.5	Linearity	27
5.2.6	Misalignment	29
5.2.7	Cross-axis sensitivity	30
5.2.8	Cross-coupling coefficient	30
5.2.9	Temperature coefficient of sensitivity	31
5.2.10	Temperature coefficient of bias	31
5.2.11	Frequency response	31
5.2.12	Supply current	35
5.2.13	Output noise	35
6	Acceptance and reliability	36
6.1	Environmental test	36
6.1.1	High temperature storage	36
6.1.2	Low-temperature storage	36
6.1.3	Temperature humidity storage	37
6.1.4	Temperature cycle	37
6.1.5	Thermal shock	37
6.1.6	Salt mist	37
6.1.7	Vibration	37
6.1.8	Mechanical shock	37
6.1.9	Electrical noise immunity	37
6.1.10	Electro-static discharge immunity	37
6.1.11	Electro-magnetic field radiation immunity	38
6.2	Reliability test	38
6.2.1	Steady-state life	38
6.2.2	Temperature humidity life	38
Annex A	(informative) Definition of sensitivity matrix of an accelerometer	39
Annex B	(informative) Dynamic linearity measurement using an impact acceleration generator	79
Annex C	(informative) Measurement of peak sensitivity	88
Bibliography		97
Figure 1	– Single axis accelerometer	17
Figure 2	– Multi-axis accelerometer	17
Figure 3	– Concept of the mathematical definition of accelerometers	18
Figure 4	– Concept of dynamic linearity of an accelerometer on gain	28
Figure 5	– Concept of dynamic linearity of an accelerometer on phase	29
Figure 6	– The semiconductor accelerometer as a system	33
Figure 7	– Example of the structure of assembled semiconductor accelerometer system for the concept of accelerometer frequency response	34
Figure 8	– Schematic diagram of frequency response measurement by electrical input	35
Figure A.1	– Example of direction cosine	46
Figure A.2	– Accelerometers or pick-offs assembled in a normal co-ordinate system (top figure) and the acceleration component projection to the three co-ordinate axis plains, XY, YZ and ZX (bottom figure)	53
Figure B.1	– Set-up for dynamic linearity measurement	86
Figure C.1	– Peak sensitivity as a function of each frequency bandwidth from DC to f_n	88
Figure C.2	– Set-up for the control of frequency bandwidth of shock acceleration	96

Table 1 – List of letter symbols	15
Table 2 – Level of accelerometers and the definition	18
Table 3 – Test items and the recommended corresponding measurement methods	24
Table 4 – Relation between recommended applicable calibration methods and type of accelerometers	25
Table A.1 – Symbols for the relationship between input acceleration and the output signal from an accelerometer using one-dimensional vibration table	46
Table A.2 – Symbols for input acceleration and output signals from an accelerometer	47
Table A.3 – Definition of symbols for describing the input acceleration, output signal from the target accelerometer and the direction cosine repeated three times	47
Table A.4 – Relationship between the expression of transfer function in a matrix form and the number of axis of the target accelerometers	49
Table A.5 – Definition of vector space related to the generalization of the transverse sensitivity using the vector space concept	57
Table A.6 – Relation between input acceleration and output signal for the calibration, using the six-dimensional vibration table	59
Table A.7 – Normal sensitivities, explicit cross-sensitivities and implicit cross-sensitivities obtained by the calibration carried out in the application acceleration vector space with three dimensions	75
Table A.8 – Normal sensitivities, explicit cross-sensitivities and implicit cross-sensitivities obtained by the calibration carried out in the application acceleration vector space with six dimensions	76
Table A.9 – List of symbols in terms of measurement uncertainty using an accelerometer with M output axis assuming that N is larger than M	77
Table B.1 – Dynamic linearity when both input and output are vector quantities	79
Table B.2 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and the signal from the output axis	80
Table B.3 – Relationship between the direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and the signal from the output axis	81
Table B.4 – Conditions on the direction cosine for dynamic linearity measurement	82
Table B.5 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to two-axis accelerometers and the signal from the output axis	82
Table B.6 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to two-axis accelerometers and the signal from the output axis	83
Table B.7 – Conditions on the direction cosine for the dynamic linearity measurement	83
Table B.8 – Relationship between the direction cosine of the input acceleration to three-axis accelerometers and the signal from the output axis	84
Table B.9 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to three-axis accelerometers and the signal from the output axis	85
Table B.10 – Conditions on the direction cosine for dynamic linearity measurement	85
Table C.1 – Definition of elements in one-axis accelerometer peak sensitivity	88
Table C.2 – Peak sensitivity of one-axis accelerometer	89
Table C.3 – Relationship of direction cosine and the co-ordinate system of the target accelerometer	89
Table C.4 – Definition of elements in two-axis accelerometer peak sensitivity	91
Table C.5 – Definition of elements in three-axis accelerometer peak sensitivity	93

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SEMICONDUCTOR DEVICES –
DISCRETE DEVICES –****Part 14-4: Semiconductor accelerometers**

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.

International Standard IEC 60747-14-4 has been prepared by subcommittee 47E: Discrete semiconductor devices, of IEC technical committee 47: Semiconductor devices.

This part of IEC 60747 should be read in conjunction with IEC 60747-1:2006. It provides basic information on semiconductor

- terminology;
- letter symbols;
- essential ratings and characteristics;
- measuring methods;
- acceptance and reliability.

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

FDIS	Report on voting
47E/405/FDIS	47E/409/RVD

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

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

A list of all the parts in the IEC 60747 series, under the general title *Semiconductor devices – Discrete devices*, can be found on the IEC website.

Future standards in this series will carry the new general title as cited above. Titles of existing standards in this series will be updated at the time of the next edition.

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

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

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

INTRODUCTION

The International Electrotechnical Commission (IEC) draws attention to the fact that it is claimed that compliance with this document may involve the use of a patent concerning following items.

- a) Measurement technique and apparatus for matrix sensitivity in “definition of sensitivity matrix of an accelerometer” given in Subclause 4.1.5 and Annex A.
- b) Measurement technique and apparatus for the dynamic linearity measurement of AC accelerometers in “dynamic linearity measurement using an impact acceleration generator” given in Annex B.
- c) Measurement technique and apparatus for the frequency response measurement of accelerometers under the frequency bandwidth control in “method of controlling the frequency bandwidth of the shock acceleration” given in Clause C.5.
- d) Measurement technique and apparatus for the dynamic response and peak sensitivity measurement of accelerometers in the form of matrix using elastic pulse in “definition of sensitivity matrix of an accelerometer” given in Annex A.
- e) Projectiles for frequency bandwidth control in “method of controlling the frequency bandwidth of the shock acceleration” given in Clause C.5 and for the dynamic response and peak sensitivity measurement of accelerometers in the form of matrix using elastic pulse in “definition of sensitivity matrix of an accelerometer” given in Annex A.

IEC takes no position concerning the evidence, validity and scope of this patent right.

The holder of these patent rights has assured the IEC that he/she is willing to negotiate licences under reasonable and non-discriminatory terms and conditions with applicants throughout the world. In this respect, the statement of the holder of this patent right is registered with IEC. Information may be obtained from:

Name: Intellectual Planning Office, Intellectual Property Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Address: 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564, Japan.

Name: VectorDynamics Corporation
Address: 1-11-7 Higashikanda, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0031, Japan.
Heights Kanda Iwamotocho #305

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights other than those identified above. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

ISO (www.iso.org/patents) and IEC (http://www.iec.ch/tctools/patent_decl.htm) maintain on-line data bases of patents relevant to their standards. Users are encouraged to consult the data bases for the most up to date information concerning patents.

SEMICONDUCTOR DEVICES – DISCRETE DEVICES –

Part 14-4: Semiconductor accelerometers

1 Scope

This part of IEC 60747 applies to semiconductor accelerometers for all types of products.

This standard applies not only to typical semiconductor accelerometers with built-in electric circuits, but also to semiconductor accelerometers accompanied by external circuits.

This standard does not (or should not) violate (or interfere with) the agreement between customers and suppliers in terms of a new model or parameters for business.

NOTE 1 This standard, although directed toward semiconductor accelerometers, may be applied in whole or in part to any mass produced type of accelerometer.

NOTE 2 The purpose of this standard is to allow for a systematic description, which covers the subjects initiated by the advent of semiconductor accelerometers. The tasks imposed on the semiconductor accelerometers are not only common to all accelerometers but also inherent to them and not yet totally solved. The descriptions are based on latest research results. One typical example is the multi-axis accelerometer. This standard states the method of measuring acceleration as a vector quantity using multi-axis accelerometers.

NOTE 3 This standard does not conflict in any way with any existing parts of either ISO 16063 or ISO 5347. This standard intends to provide the concepts and the procedures of calibration of the semiconductor multi-axis accelerometers which are used not only for the measurement of acceleration but also for the control of motion in the wide frequencies ranging from DC.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60747-1:2006, *Semiconductor devices – Part 1: General*

IEC 60749 (all parts), *Semiconductor devices – Mechanical and climate test methods*

IEC 60749-1, *Semiconductor devices – Mechanical and climate test methods – Part 1: General*

IEC 60749-5, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 5: Steady-state temperature humidity bias life test*

IEC 60749-6, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 6: Storage at high temperature*

IEC 60749-10, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 10: Mechanical shock*

IEC 60749-11, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 11: Rapid change of temperature – Two-fluid-bath method*

IEC 60749-12, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 12: Vibration, variable frequency*

IEC 60749-13, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 13: Salt atmosphere*

IEC 60749-25, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 25: Temperature cycling*

IEC 61000-4 (all parts), *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques*

IEC 61000-4-2:1995, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test*

IEC 61000-4-3:2006, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*

IEC 61000-4-4:2004, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 4: Electrical fast transient/burst immunity test*

ISO 5347 (all parts), *Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups*

ISO 5347-11:1993, *Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups – Part 11: Testing of transverse vibration sensitivity*

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

3 Terminology and letter symbols

3.1 Terms and definitions

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

3.1.1

accelerometer

device whose output is a vector representing the projection of the acceleration in a multidimensional space of the acceleration applied to it

3.1.2

AC accelerometer

accelerometer which has a high-pass filter in either real or equivalent signal processing circuits in characteristics

NOTE It responds to AC band domain input in its frequency characteristics. This type of accelerometer is useful for measurement of vibration, shock and sway.

3.1.3

DC accelerometer

accelerometer that responds to the input from DC to specified AC band domain in its frequency characteristics

NOTE It has the second order open-loop system or closed-loop system. This type of accelerometer is useful for measurement of inclination angle, velocity and displacement by integration of output.

3.1.4

semiconductor accelerometer

accelerometer manufactured by the semiconductor technology for at least one acceleration sensing element

NOTE A typical example might be a combination of a silicon seismic system by micro-machining with sensing mechanism and an electrical circuit.

3.1.5

one-dimensional accelerometer

accelerometer whose characteristics are measured in the calibration acceleration vector space with dimension one

3.1.6

two-dimensional accelerometer

accelerometer whose characteristics are measured in the calibration acceleration vector space with dimension two

3.1.7

three-dimensional accelerometer

accelerometer whose characteristics are measured in the calibration acceleration vector space with dimension three

3.1.8

four-dimensional accelerometer

accelerometer whose characteristics are measured in the calibration acceleration vector space with dimension four

3.1.9

five-dimensional accelerometer

accelerometer whose characteristics are measured in the calibration acceleration vector space with dimension five

3.1.10

six-dimensional accelerometer

accelerometer whose characteristics are measured in the calibration acceleration vector space with dimension six

3.1.11

level 1 accelerometer

accelerometer with a sensitivity that is not defined in a form of a matrix

NOTE The sensitivity along the input axis is separated from the cross axis sensitivity.

3.1.12

level 2 accelerometer

accelerometer with sensitivity in the form of a matrix in which all components of the matrix are constant as a function of frequency and other parameters if necessary

3.1.13

level 3 accelerometer

accelerometer with sensitivity in the form of a matrix in which some of the components are defined as functions of frequency and other parameters if necessary

3.1.14

level 4 accelerometer

accelerometer with sensitivity in the form of a matrix in which all of the components are defined as functions of frequency and other parameters if necessary

3.1.15**input acceleration vector space**

real motion vector space where the input acceleration is an element of a set

NOTE Input acceleration vector space is divided into the application acceleration vector space and the calibration acceleration vector space.

3.1.16**accelerometer output vector space**

vector space where the output signal from an accelerometer is an element of a set

3.1.17**gravitational acceleration**

acceleration due to gravity

NOTE The symbol g denotes a unit of acceleration equal in magnitude to the value of local gravity and the symbol g_n represents the standard value of g under international agreement, $g_n=9,80665 \text{ m/s}^2$.

3.1.18**input axis**

axis along or about which the accelerometer output for the applied acceleration indicates a maximum value

NOTE Neither misalignment nor cross-axis sensitivity compensation is employed. The IA direction only may be marked on the external package.

3.1.19**input reference axis**

direction of an axis that is nominally parallel to the input axis

NOTE It is defined by the package mounting surfaces or external package markings.

3.1.20**output axis**

axis along or about which the output of the accelerometer is measured

NOTE In some cases, it is referred to as the hinge or flexure axis.

3.1.21**output reference axis**

direction of an axis that is nominally parallel to the output axis

NOTE It is defined by the package mounting surfaces or external package markings.

3.1.22**pendulum axis**

axis through the proof mass centre in pendulum accelerometers

NOTE It is perpendicular to and intersecting the output axis.

3.1.23**pendulum reference axis**

direction of an axis that is nominally parallel to the pendulum axis

NOTE It is defined by the package mounting surfaces or external package markings.

3.1.24**misalignment**

angle between an input axis and the corresponding input reference axis that is indicated on the accelerometer package, when the device is at a 0 g position

3.1.25

pick-off

device that indicates the displacement of proof mass generated by input acceleration

3.1.26

proof mass

mass whose inertia produces an acceleration signal

NOTE Pendulum-mass or translational-mass is generally used.

3.1.27

bias

outputs without any acceleration along the input axis

NOTE It may be represented by the algebraic means between the peak outputs given when acceleration is applied equally along both directions of the input axis.

3.1.28

bias discrepancy

difference between the bias values at the 1 *g* and the 0 *g* positions

NOTE It is a function of the non-linear characteristics of sensitivity.

3.1.29

bias error

algebraic difference between the bias of a device and the nominal bias in the specification

NOTE The bias specification of the device is comprised of the variation due to temperature and voltage.

3.1.30

temperature coefficient of bias

change in bias per unit change in temperature relative to the bias at the specified temperature

3.1.31

ratiometricity

proportionality of the output acceleration to the supply voltage change on the accelerometer

3.1.32

supply voltage range

maximum and minimum supply voltage values among which the device can operate normally

3.1.33

measurement range

maximum and minimum acceleration values that are measurable

3.1.34

input acceleration limits

extreme values of the input acceleration, within which the accelerometer can keep the specified performance

3.1.35

first resonant frequency

lowest frequency at which the ratio of output versus input acceleration takes a peak value

3.1.36

dynamic linearity

linearity that is concerned with the relationship between the transient input signals and output signals

NOTE See Annex B.

3.1.37**sensitivity matrix**

matrix that transforms the input acceleration vector space to the output signal vector space under the assumption that the transformation is linear

NOTE 1 Diagonal terms and non-diagonal terms correspond to normal sensitivities and cross-sensitivities, respectively.

NOTE 2 Calibration of an accelerometer should be recognized as the process of determining all of the components of the sensitivity matrix.

NOTE 3 Matrix sensitivity can be used to describe the sensitivity of accelerometers of level 2, 3 and 4. It is used to place an emphasis on the difference between the conventional sensitivity of the level 1 and level 2, 3 and 4 accelerometers (see 4.1.5: Classification)

3.1.38**peak sensitivity matrix**

matrix with the components of peak sensitivity considered along the normal sensitivity axis as the diagonal terms and the components of peak sensitivity considered along the cross-sensitivity axis as the non-diagonal terms

3.1.39**sensitivity**

output change per unit change of input acceleration in either static or dynamic state

NOTE 1 Sensitivity in steady state of level 1 accelerometers is generally evaluated as the slope of the straight line that can be fitted by the least square method applied to input-output data obtained by varying the input within the measurement range.

NOTE 2 Sensitivity for level 2, 3 and 4 accelerometers is expressed by a matrix.

3.1.40**sensitivity error**

algebraic difference between a sensitivity of a device and the nominal sensitivity in the specification, with the percentage expression applied with the nominal sensitivity

NOTE The sensitivity of the device possesses the maximum and the minimum values among the over-all figures containing the temperature coefficient, etc.

3.1.41**temperature coefficient of sensitivity**

change in sensitivity per unit change in temperature relative to the sensitivity at the specified temperature

3.1.42**normal sensitivity**

sensitivity defined along the axis with the maximum sensitivity of an accelerometer

3.1.43**cross-sensitivity**

sensitivity defined by the output along the specified axis perpendicular to the input along the normal sensitivity axis

3.1.44**cross-axis sensitivity**

maximum sensitivity in the plane perpendicular to the measuring direction relative to the sensitivity in the measuring direction

NOTE 1 The maximum sensitivity in the perpendicular plane is obtained as the geometric sum of the sensitivities in two perpendicular directions in this plane.

NOTE 2 Transverse sensitivity can be used in stead of cross-axis sensitivity.

3.1.45

cross-coupling coefficient

ratio of the variation of accelerometer output to the product of acceleration applied normal and parallel to an input reference axis

3.1.46

peak sensitivity

value as the ratio of the maximum output signal divided by the maximum input acceleration

NOTE See Annex C.

3.1.47

frequency response of sensitivity

ratio of the output signal to the applied acceleration at discrete frequency or in narrow bandwidth as a function of frequency

3.1.48

frequency response of cross-sensitivity

ratio of the output signal to the applied acceleration at discrete frequency or in narrow bandwidth in orthogonal direction as a function of frequency

3.1.49

Doppler shift interferometer

interferometer based on Doppler shift principle

3.1.50

laser interferometer

system that measures a motion by means of an optical interference using a laser as a light source

NOTE It serves for the primary calibration of accelerometers.

3.1.51

strain gauge

sensor that electrically detects the strain

3.1.52

uncertainty

parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand

NOTE See Guide to the expression of uncertainty in measurement.

3.2 Letter symbols

For the purposes of this document, letter symbols given in Table 1, apply.

Table 1 – List of letter symbols

Name and designation	Letter symbol	Remarks
Acceleration: – at input points of $j = 1, \dots, n$ – of a positive specific input to DC accelerometer – of a negative specific input to DC accelerometer – of a specific input to AC accelerometer – of a positive maximum input – of a negative maximum input – due to local gravity – due to standard gravity	a_j a_+ a_- a_{rms} a_{max} a_{min} g g_n	$g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$
Accelerometer output: – in accelerometer output units – at input-acceleration points of $j = 1, \dots, n$ – at a positive specific input a_+ – at a negative specific input a_- – at a specific input arms – at the UP(+1 g) position – at the DOWN(–1 g) position	E E_j E_+ E_- E_{rms} E_{up} E_{down}	
Bias: – apparent value – in the high temperature operating condition – in the low temperature operating condition – in the standard condition – at the 0 g position (0 g bias) – at the 1 g position (1 g bias) – temperature coefficient	B' B_{high} B_{low} B_{std} B_0 B_1 B_{tco}	
Bias discrepancy	B_d	
Deviation of the accelerometer output: – from the straight line at points of E_j – largest absolute value from the straight line	δE_j δE	
Linearity – for static linearity	SL	
Cross-coupling coefficient – for IRA and PA – for IRA and OA	K_p K_o	
Misalignment of the IA with respect to the IRA: – composite value – about the OA – about the PA	γ γ_o γ_p	
Sensitivity: – nominal value – apparent value – in the high temperature operating condition – in the low temperature operating condition – in the standard condition – temperature coefficient	S S' S_{high} S_{low} S_{std} S_{tco}	

Table 1 (continued)

Name and designation	Letter symbol	Remarks
Temperature:		
– in the high temperature operating condition	T_{high}	
– in the low temperature operating condition	T_{low}	
– in the standard condition	T_{std}	
– minimum value rated during the specified storage time	$T_{\text{stg min}}$	

4 Essential ratings and characteristics

4.1 General

4.1.1 Operating principle

The operating principle of semiconductor accelerometers is almost equal to that of other types of accelerometers. Accelerometers with heat convection as the operating principle might be considered an exception. Semiconductor accelerometers can be classified as piezo-resistive type, and capacitive type, etc. by considering the detection principle of seismic mass motion. The large variety seen in semiconductor accelerometers is due to the nature of the operating principles.

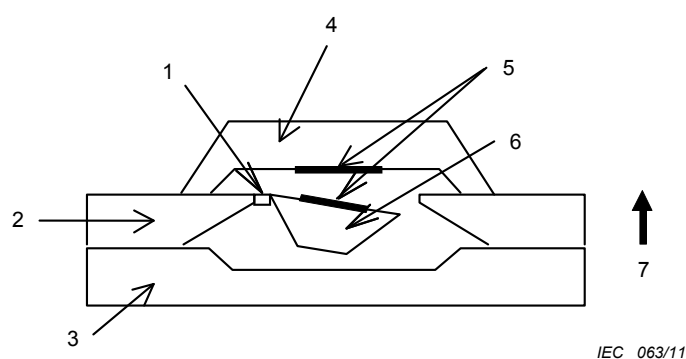
NOTE Capacitive type accelerometers include those having driving mechanism such as comb drive accelerometers, servo accelerometers and vibration beam accelerometers, etc.

4.1.2 Single axis and multi-axis

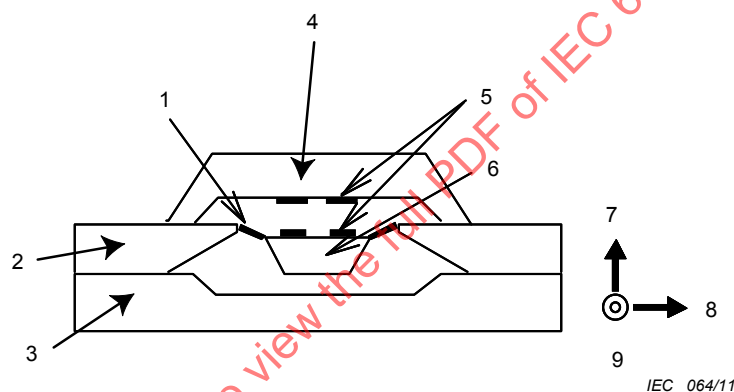
There exist both single-axis type and multi-axis type semiconductor accelerometers. Most of the technical aspects on the one-axis semiconductor accelerometers are covered by traditional standards on the subject. Since traditional acceleration devices were invented, the greatest innovation caused by semiconductor technology is the multi-axis accelerometers up to the six-axis. This standard is written based on the philosophy that not only single-axis accelerometers but also multi-axis accelerometers may be described within the same concept. The idea is simply that the acceleration is a vector quantity. The description given of one-axis accelerometers in this standard mainly comes from this idea, leading to the generation of differences from existing standards on accelerometers.

In these cases, each input axis (IA) for accelerometer mount surface should be defined in the co-ordinate system affixed to the specified accelerometer. The widely accepted idea that multi-axis accelerometers can measure acceleration as a vector has been re-examined, and mathematically investigated using a vector space theory. Both the theories and the practical techniques based on this concept are described in Annexes A to C.

The following figures 1 and 2 show the typical structure of semiconductor accelerometers.

**Key**

1	flexure hinge	2	silicon	3	glass
4	glass	5	pick off electrode	6	proof mass
7	acceleration (Z)				

Figure 1 – Single axis accelerometer**Key**

1	flexure hinge	2	Silicon	3	glass
4	glass	5	pick off electrode	6	proof mass
7	acceleration (Z)	8	acceleration (Y)	9	acceleration (X)

Figure 2 – Multi-axis accelerometer

This standard applies to semiconductor accelerometers with built-in electric circuits. It is not applicable to the sensing element alone because it does not generate any electric signals.

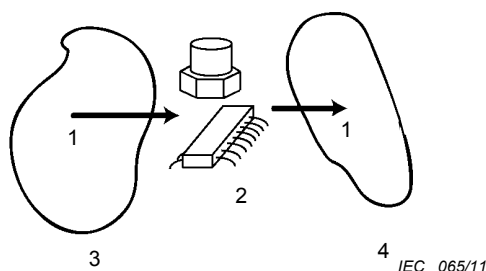
4.1.3 Performance evaluation

Performance evaluation of accelerometers should be carried out utilizing, in principle, inertia in local level co-ordinate systems. In some applications, care should be taken over the co-ordinate system transformation between the local level co-ordinate system and the inertia co-ordinate system. Local gravity or centripetal acceleration is recommended as the reference acceleration for measuring the sensitivity of DC accelerometers. To measure the sensitivity of AC accelerometers and the frequency response characteristics of DC accelerometers, it is recommended using a vibration generator and a laser interferometer for the primary calibration.

4.1.4 Sensitivity

The purpose of the accelerometer is to measure acceleration. This can be a definition of physical function of accelerometers. On the other hand, the definition of mathematical function of accelerometers is the projection of vector space of actual acceleration vectors to the output signal vector space, because acceleration is a vector quantity. Therefore, as linear

algebra indicates, only a matrix can define the sensitivity of accelerometers, since a matrix can transform a vector space into another vector space. Figure 3 shows the concept of the mathematical definition of accelerometers.



Key

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| 1 Dimension | 3 Input acceleration vector space |
| 2 Accelerometers | 4 Input acceleration vector space |

Figure 3 – Concept of the mathematical definition of accelerometers

“Dimension” in Figure 3 stands for the maximum number of linearly independent vectors in the vector space. Dimension of the space where the accelerometer sensitivity is defined is very important, because it is related to the size of the sensitivity matrix. The purpose of acceleration generation using machines for calibration such as vibration tables is to simulate the application acceleration vector space. Accelerometers shall be calibrated in the calibration acceleration vector space with the dimension that is normally larger than or equal to the dimension of the application acceleration vector space.

NOTE 1 For further details see Annex A.

NOTE 2 The concept shown in Figure 3 can be shared with the other vector quantity detection sensors such as gyros, IMUs, and force sensors.

4.1.5 Classification

It is evident that a matrix should describe the sensitivity of an accelerometer. However, it is not always practical to obtain the definition of sensitivity using a matrix at every instant, because it is not always the case that both direction and magnitude are measured. In some cases, the direction of motion is predictable using a priori information. A typical example might be the vibration of a beam with a very flat cross-section. On the other hand, the sensitivity of accelerometers for crash detection should be a matrix, because it is almost impossible to predict the direction of the crash. In order to cope with these real applications, this standard introduces the classification of accelerometers, as shown in Table 2.

Table 2 – Level of accelerometers and the definition

Level of accelerometers	Descriptions
Level 4 accelerometer	The sensitivity of level 4 accelerometers is defined as a matrix. All components in the matrix are defined as functions of frequencies
Level 3 accelerometer	The sensitivity of level 3 accelerometers is defined as a matrix. Some of the components in the sensitivity matrix are defined as functions of frequency. Non-diagonal components are not zero
Level 2 accelerometer	The sensitivity of level 2 accelerometers is defined as a matrix. All components of the matrix are constant with a clear frequency and specification including the nonzero non-diagonal terms
Level 1 accelerometer	The matrix sensitivity is not considered in level 1 accelerometers. The sensitivity along the input axis is separated from the cross axis sensitivity

NOTE 1 The ISO 16063 and ISO 5347 series standard might be applicable to level 1 accelerometers. The major purpose of the descriptions in this standard is to provide the technologies covered by neither the ISO 16063 series standard nor the ISO 5347 series standard.

NOTE 2 "Frequency" in Table 1 includes zero frequency, because DC accelerometers for levels 2, 3 and 4 possess matrix sensitivities at 0 Hz.

NOTE 3 All of the components of the static sensitivity matrix for level 2 to level 4 DC accelerometers are defined at 0 Hz. Each term of the static sensitivity matrix is the same in level 2, level 3 and level 4 accelerometers, i.e. if i and j of a_{ij} are equal to m and n of a_{mn} of the different level accelerometers, a_{ij} is equal to a_{mn} .

The technical aspects of this classification are as follows:

- The classification is regarded as the basic framework for accelerometers to meet the specific application requirement, neither introducing too much nor too little detail.
- All products fit the above description on the level of accelerometers.
- The classification should be applied to accelerometers with either angular velocity or angular acceleration detection capabilities.
- The classification is applicable to every accelerometer without any regard to the number of sensitivity axes.
- The classification clarifies whether the sensitivity is defined in the vector space or not.
- The classification describes the dimension of the vector space where the sensitivity of the accelerometer is defined.
- The classification is beneficial to customers who will recognize it as the fundamental performance criteria.

NOTE 4 See Annex A for further details.

NOTE 5 ISO/IEC 17025 clearly states that reference standards and calibration guaranteed by NMIs are not the only way for traceability. It states that the programme for calibration of equipment shall be designed and operated so as to ensure calibrations and measurements are traceable to the international System of Units (SI) (Système International d'unités). This standard provides the possibility of establishing the traceability of multi-axis accelerometers; i.e. calibration based on SI.

NOTE 6 The classification shown in Table 2 is applicable to gyros and IMUs.

4.1.6 Symbol (g)

In this standard, the symbol ' g ' is used for acceleration when calibration or test is carried out using local gravity.

4.1.7 Customer and supplier

This standard shall neither violate nor interfere with the agreement between customers and suppliers in terms of a new model or parameters for business.

4.1.8 Linearity and nonlinearity

In some cases, signals in the non-linear region of an accelerometer are used. This results from a strong demand for low production cost and special signal processing largely dependent on the application. In other cases, application requires a simulation model of semiconductor accelerometers in the system design stage, covering not only linearity but also non-linearity between input and output.

4.1.9 Element materials

Materials used for semiconductor accelerometers consist mainly of silicon. Ratings of semiconductor accelerometers depend on the element materials.

4.1.10 Handling precautions

Due to the fragile nature of sensing elements and electrical circuits, semiconductor accelerometers should not be subjected to an environment which exceeds the ratings. This is in order to avoid permanent changes in the specified characteristics. When handling the devices, the precautions given in Clause 8 of IEC 60747-1:2006 shall be referred to.

4.1.11 Accelerometer mounting condition

Outer packaging of accelerometers should have enough rigidity for their intended use. Suppliers should describe the requirements for the accelerometer mounting and mounting surface conditions in the specifications. Dynamic measurement described in this standard should be carried out under the recommended conditions.

NOTE A quantitative description concerning sufficient rigidity is described in each calibration measurement technique.

4.1.12 Specifications

Specifications for semiconductor accelerometers should contain the following:

- name of manufacturer, model;
- classification;
- dimensions, mass (weight) and package type, e.g. DIP;
- recommended mounting method;
- ratings, recommended operating conditions and characteristics as defined in 4.2 to 4.4.

4.2 Ratings (limiting values)

The following items should be described in the specification, unless otherwise stated in the relevant procurement specifications. Stresses over these limits may cause permanent damage to the devices:

- storage temperature range;
- storage humidity range;
- mechanical shock;
- supply voltage range;
- input acceleration limits;
- maximum supply voltage or current.

4.3 Recommended operating conditions

The following items should be described in the specification, unless otherwise stated in the relevant procurement specifications. These conditions are recommended in order to keep the characteristics of the devices stable during operation:

- operating temperature range;
- operating humidity range;
- operating acceleration range;
- nominal supply voltage.

4.4 Characteristics

4.4.1 General

Characteristics shall be measured at 25 °C, unless otherwise stated. Other temperatures should be taken from the list in Clause 5 of IEC 60747-1:2006.

4.4.2 Measurement range

Maximum and minimum acceleration values shall be as per the measurable acceleration values.

4.4.3 Sensitivity and sensitivity error

Sensitivity is defined as output change per unit change of input acceleration. It should be expressed by output signal (e.g. voltage) per unit input acceleration.

The sensitivity error for level 1 accelerometers is the algebraic difference between the sensitivity of a device and the nominal sensitivity in the specification, with the percentage deviation from the nominal sensitivity. Maximum and minimum values among the over-all figures containing the temperature coefficient etc. should be used.

For level 2, 3 and 4 accelerometers, the sensitivity error is expressed by a matrix. Every component in the sensitivity error matrix is the algebraic difference between the sensitivity matrix component and the corresponding nominal sensitivity matrix component in the specification, with the percentage deviation from the corresponding nominal sensitivity matrix components.

4.4.4 Bias (offset) and bias (offset) error

Bias is the output without any acceleration along the input axis. This may be represented by the algebraic means of the two outputs when the acceleration is applied in two directions, +g and –g, along the input axis and with typical values.

Bias error is the algebraic difference between the bias of a device and the nominal bias in the specification. Maximum and minimum values among the overall figures containing the temperature coefficients should be used.

NOTE 1 Offset is also used in a similar way as bias.

NOTE 2 Offset error is also used in a similar way as bias error.

NOTE 3 Bias and bias error are independent from the classification of accelerometers.

4.4.5 Linearity

4.4.5.1 Linearity in DC acceleration measurement

Linearity is defined as the deviation of the output of a device from the straight line defined by the sensitivity. Percentage expression with the full scale of the specification and maximum values should be mentioned.

4.4.5.2 Linearity in sinusoidal acceleration measurement

Linearity in sinusoidal acceleration is concerned with both gain and phase. Gain linearity is defined as the maximum deviation of the gain of a device at each frequency from the straight line defined by the absolute value of the complex sensitivity in sinusoidal acceleration as a function of amplitude and frequency of an input signal. Phase linearity is defined as the maximum deviation of the phase of a device at each frequency from the straight line, defined by the phase of the complex sensitivity in sinusoidal acceleration, as a function of amplitude and frequency of an input signal. For details see Annex B.

4.4.6 Misalignment

This represents the angle between the input axis and the input reference axis indicated on the accelerometer package. Maximum values should be specified.

4.4.7 Cross-axis sensitivity

This should be described as the percentage expression of the sensitivity of specified input axis caused by the acceleration applied along the perpendicular direction to the specified input axis, with the input axis sensitivity.

NOTE 1 For matrix sensitivity see Annex A.

NOTE 2 This should be described by the non-diagonal terms of sensitivity matrix for level 2 to 4 accelerometers.

4.4.8 Cross-coupling coefficient

This coefficient is observed not only in a pendulum accelerometer with the open-loop control system but also in the cantilever accelerometer manufactured by micro-machining technology and is originated from inclination of input axis (e.g. pendulum or cantilever). This is one of the coefficients by which the deviations of the real output of a device from the straight line defined by the sensitivity are composed.

This coefficient is calculated by the Equation (8) in 5.2.8 from the data at the specific positions under the local earth's gravitation, g . The coefficient should be expressed by the maximum value.

4.4.9 Temperature coefficient of sensitivity

The maximum per cent change in sensitivity at +25 °C per unit change in temperature.

4.4.10 Temperature coefficient of bias

The maximum per cent change in bias at +25 °C per unit change in temperature.

4.4.11 Frequency response

Frequency response is a set of data or a diagram showing the amplitude ratio and phase shift between the input that changes sinusoidally over time and the sinusoidal output signal as a function of frequency. The frequency where the gain decreases to 3 dB below the maximum gain is called cut-off frequency, f_c and the minimum values should be mentioned. It should be noted that this concept is applicable only to a linear system.

NOTE For frequency response for level 2 to 4 accelerometers see Annex A.

4.4.12 Supply current

The supply current is specified under the condition of no load and normal temperature, +25 °C, unless otherwise specified.

4.4.13 Output noise

This comprises the AC components included in the output signal on the steady-state operation. This should be expressed either as an r.m.s. value in a specified frequency bandwidth, or as volt per square root of frequency.

4.4.14 Ratiometricity

This represents the linearity of the accelerometer output to the supply voltage change. It should be clearly stated if capability of ratiometricity exists or not. The output quantity

variations due to the supply voltage variations may be estimated through this figure, deviation from the linearity. Ratiometricity is expressed as either the maximum (volts) or percentage.

4.4.15 Self test

This is to check the proper functionality of the accelerometer without any real acceleration. Functionality is judged by measuring the electrical output when the specified electrical signal is applied to the specified terminals of the accelerometer. Self test should be specified by stating the input electrical signal to the self test terminals, the electrical outputs for judgement and the designated area covered by the self test.

5 Measuring methods

5.1 General

Measurement is divided into two categories:

- test,
- calibration.

The difference between test and calibration is made by the traceability to the national standards. Calibration is the measurement carried out using the instrumentation traceable to the authorized national standard equipment and techniques written in the specified document.

Uncertainty is indispensable in calibration. Test is more practical than calibration, because it can be done based on the negotiation between manufacturers and customers without traceability to national standard. However, it should be noted that the measurement techniques for calibration could be utilised for test. The basics used for the calibration or test should be documented, if the corresponding standard does not exist.

5.1.1 Standard test conditions

Standard test conditions are as follows:

- a) temperature: $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$
- b) relative humidity: 45 % to 75 %, where appropriate
- c) air pressure: 86 kPa to 106 kPa, (860 mbar to 1060 mbar)
- d) nominal supply voltage $A\text{ V} \pm B\text{ V}$. Supply voltage A and its tolerance B shall be determined in individual specifications.

The electrical precautions are described in Clause 6 of IEC 60747-1:2006 and the standard test conditions recommended are in accordance with Clause 5 of IEC 60747-1:2006. The accelerometer and test equipment shall be brought to the operating condition with the specified acceleration input. The accelerometer and the immediate environment shall be allowed to reach thermal equilibrium so that the output of the accelerometer may be stabilized with the required accuracy before proceeding with the test.

5.1.2 Applicable measurement methods for test and calibration method

The standard temperature condition for calibration is $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$. Relative humidity and air pressure are the same as shown in 5.1.1. Table 3 shows the relation between a test item and the recommended corresponding measurement methods. Table 4 shows the relation between a type of accelerometers and recommended corresponding applicable calibration methods.

Table 4 – Relation between recommended applicable calibration methods and type of accelerometers

Type		No. of axis	Dividing head		Centrifuge		Dimension (vibration)		Shock acceleration	
			Four point	Two point	Single	Double	One	Three	Vib.	Elastic pulse
DC accelerometer	Level 1	1	X ^a	X	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
	Level 2	1	X	b	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
	Level 3	1	X	b	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
	Level 4	1	X	b	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
AC accelerometer	Level 1	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X
	Level 2	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X
	Level 3	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X
	Level 4	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X

^a X = Test item is covered by the method marked X.

^b Blank = The method is essentially not applicable to the specified test item.

5.2 Testing methods for characteristics

5.2.1 Measurement range

The accelerometer shall be installed on the well defined, mechanical motion-generating equipment so that the acceleration may be applied along the input axis.

The accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1.

- Apply the positive maximum acceleration, $a_{\max}$. Record the accelerometer output E_+ .
- Apply the negative maximum acceleration, $a_{\min}$. Record the accelerometer output E_- .
- The difference between E_+ and E_- divided by the nominal sensitivity S shall conform to the individual specification.

5.2.2 Supply voltage range

The accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1.

- a) Apply the maximum supply voltage to the accelerometer, measure the measurement range, the sensitivity and the bias.
- b) Apply the minimum supply voltage to the accelerometer, measure the measurement range, the sensitivity and the bias.

The measurement range, the sensitivity and the bias shall conform to the requirement of the individual specification.

5.2.3 Sensitivity and sensitivity error

The accelerometer shall be installed on the well-defined mechanical motion-generating equipment so that the acceleration may be applied along the input axis. Unless otherwise specified, the accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1.

- a) Apply the necessary and sufficient number of positive acceleration with approximately equal increments ending the positive measurement range value.
- b) The number of acceleration applied might be selected by considering many factors such as required accuracy of the target accelerometer and efficiency of measurement etc. Record the input acceleration and the accelerometer output, E_j at each of the input accelerations.
- c) Apply the necessary and sufficient number of negative acceleration with approximately equal decrements ending the negative measurement range value.
- d) Calculate the value of the scale factor, S' , as the slope of the least squares straight line fit to the data points obtained by a) and b) above.

$$E_j = S'a_j + B' \quad (1)$$

$$S' = \frac{(n \sum a_j E_j - \sum a_j \sum E_j)}{n \sum (a_j)^2 - (\sum a_j)^2} \quad (2)$$

The sensitivity error shall include temperature coefficient of sensitivity, defined by 4.2.9, supply voltage coefficient of sensitivity and pressure coefficient of sensitivity, etc.

The sensitivity shall conform to the requirement of the individual specification.

An alternate method of measuring the sensitivity is to obtain accelerometer outputs at two or four cardinal positions using the local gravitational acceleration.

See Annex C concerning the method of measuring the peak sensitivity.

5.2.4 Bias and bias error

From the data obtained in 5.2.3, determine the algebraic sum of the outputs, E_{0+} , E_{0-} , when zero input is approached from each of the full scales. Calculate the value of the bias as follows:

$$B' = \frac{(E_{0+} + E_{0-})}{2S'} \quad (3)$$

Bias error shall include temperature coefficient of the bias, defined by 5.2.10, supply voltage coefficient of the bias and pressure coefficient of the bias, etc.

The bias and bias error shall conform to the requirement of the individual specification.

NOTE Deletion of S' in the denominator of the Equation (3) stands for offset.

5.2.5 Linearity

5.2.5.1 Static linearity

From the data obtained in 5.2.3, determine the deviations of the data points δE_j as follows:

$$\delta E_j = E_j - S'a_j - B' \quad (4)$$

Select the largest absolute valued δE_j as δE , then calculate the linearity SL as follows:

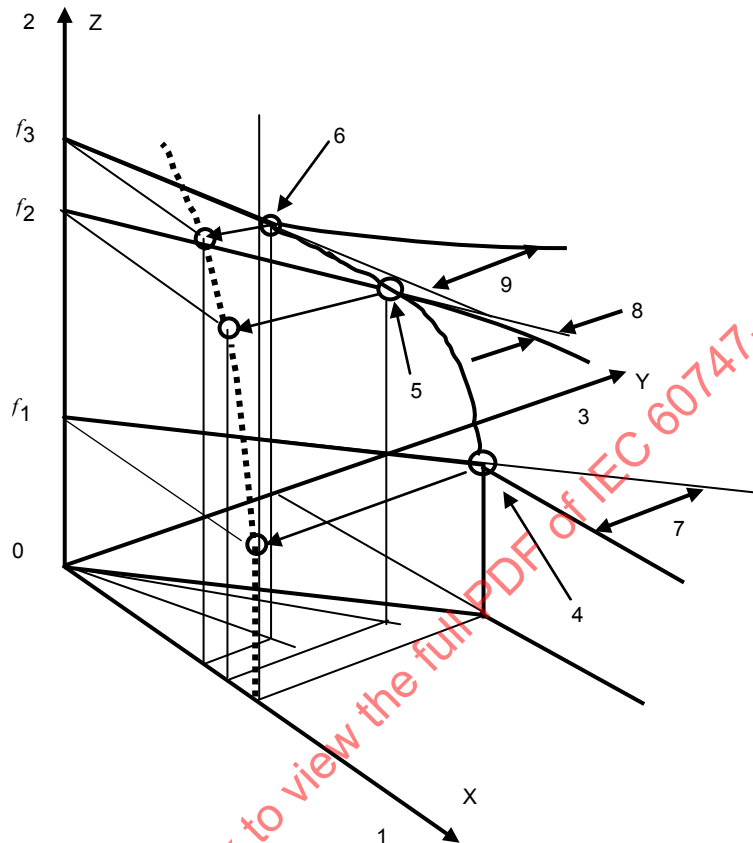
$$SL = \frac{\delta E}{(a_{\max} - a_{\min})} \times 100 \% \quad (5)$$

The linearity SL shall conform to the requirement of the individual specification.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60747-14-4:2011

5.2.5.2 Dynamic linearity

5.2.5.2.1 Dynamic linearity on gain



IEC 066/11

Key

- | | |
|--|--|
| 1 X-axis, input acceleration amplitude | 6 limit of gain dynamic linearity at frequency f_3 |
| 2 Z-axis, frequency | 7 deviation from linearity at frequency f_1 |
| 3 Y-axis, accelerometer output signal amplitude | 8 deviation from linearity at frequency f_2 |
| 4 limit of gain dynamic linearity at frequency f_1 | 9 deviation from linearity at frequency f_3 |
| 5 limit of gain dynamic linearity at frequency f_2 | |

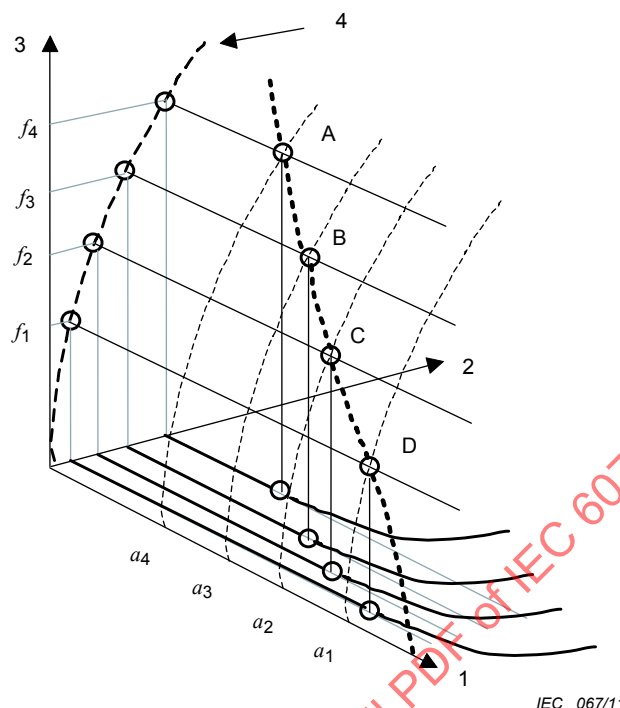
Figure 4 – Concept of dynamic linearity of an accelerometer on gain

The concept of linearity is usually shown as a relationship between DC acceleration input and the output acceleration signal from an accelerometer at the steady state. However, linearity is also an important concept in terms of dynamic response. Unless dynamic linearity is clearly defined, frequency response measurement does not make sense.

Figure 4 shows the concept of gain dynamic linearity as a function of input acceleration amplitude, output amplitude from accelerometer and frequency. Limit of gain dynamic linearity of an accelerometer is defined as a trajectory in the space with the X-axis as a function of input acceleration amplitude, the Y-axis as a function of output acceleration, and the Z-axis as a function of frequency. The projection of the trajectory to X-Z plane can define a region where the gain dynamic linearity holds. The boundary specifies the maximum input acceleration under the given maximum frequency or maximum frequency under the given maximum input acceleration amplitude.

5.2.5.2.2 Dynamic linearity on phase

Dynamic phase linearity is defined, based on the following diagram:



Key

- 1 X-axis, amplitude of input acceleration
- 2 Y-axis, phase of output from an accelerometer
- 3 Z-axis, frequency
- 4 relationship between frequency and phase lag when the input amplitude is very close to zero

Figure 5 – Concept of dynamic linearity of an accelerometer on phase

As long as the dynamic linearity on phase holds, the phase lag at each frequency is not dependent on the amplitude of the input acceleration to an accelerometer. However, as the input amplitude of acceleration to an accelerometer increases, phase lag will change from the constant value when the value is small. The dynamic linearity on phase is defined by the three-dimensional curved surface surrounded by the curve on the Y-Z plane, i.e. the relationship between frequency and phase lag when the amplitude of input acceleration to an accelerometer is very close to zero, the three-dimensional curve A, B, C and D, and the X-axis, i.e. axis of amplitude of input acceleration. The curve specifies the maximum input acceleration amplitude under a given frequency for dynamic linearity. It also specifies the maximum frequency under a given maximum acceleration amplitude. For instance, in Figure 5, if frequency f_3 is given as a maximum frequency, the upper limit of the input acceleration should be a_3 for dynamic linearity on phase.

5.2.6 Misalignment

The accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1, unless otherwise specified.

- a) The accelerometer shall be installed on the acceleration generating equipment so that the acceleration may be applied along the pendulum reference axis.
- b) Apply a positive specific acceleration and record the accelerometer output.
- c) Apply a negative specific acceleration and record the accelerometer output.
- d) Calculate the misalignment angle, γ_p .

- e) The accelerometer shall be installed on the acceleration generating equipment so that the acceleration may be applied along the output reference axis.
- f) Repeat the above procedures b), c) and d), and calculate the misalignment angle, γ_0 .

The value of misalignment angle shall conform to the requirements of 4.4.5.

5.2.7 Cross-axis sensitivity

The accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1, unless otherwise specified.

- a) The accelerometer shall be installed on the acceleration generating equipment so that the acceleration may be applied along the pendulum reference axis.
- b) In the case of DC accelerometers, apply a positive specific acceleration, a_+ and record the accelerometer output, E_+ ; apply a negative specific acceleration, a_- and record the accelerometer output, E_- .
- c) In the case of AC accelerometers, apply a specific acceleration, a_{rms} and record the accelerometer output, E_{rms} .
- d) Calculate the cross-sensitivity K_{cp} for pendulum reference axis using the following algebraic definitions:

$$K_{cp} = (E_+ - E_-)/(a_+ - a_-) / S \quad g/g \text{ (for DC accelerometers)} \quad (6)$$

$$K_{cp} = (E_{rms}/a_{rms}) / S \quad g/g \text{ (for AC accelerometers)} \quad (7)$$

- e) The accelerometer shall be installed on the acceleration generating equipment so that the acceleration may be applied along the output reference axis.
- f) Repeat b), c) and d) for the output reference axis to obtain the cross-sensitivity K_{co} .
- g) The cross-axis sensitivity is calculated as a square root of the sum of the squares of K_{co} and K_{cp} .

The value of cross-axis sensitivity shall conform to the requirements of 4.4.6.

5.2.8 Cross-coupling coefficient

The accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1, unless otherwise specified.

- a) The accelerometer should be installed on the acceleration generating equipment so that the acceleration may be applied along both the input axis and the pendulum axis.
- b) For DC accelerometers, apply a specific acceleration, $0,707g$ and record the accelerometer outputs, E_1 and E_2 at 45° position and 225° position respectively by the multi-point test. Apply a specific acceleration, $0,707g$ and record the accelerometer outputs, E_3 , E_4 at 135° position and 315° position, respectively.
- c) Calculate the cross-coupling coefficient K_p using the following algebraic definition:

$$K_p = \left(\frac{E_1}{1g \sin \theta_1 \times 1g \cos \theta_1} + \frac{E_2}{1g \sin \theta_2 \times 1g \cos \theta_2} - \frac{E_3}{1g \sin \theta_3 \times 1g \cos \theta_3} - \frac{E_4}{1g \sin \theta_4 \times 1g \cos \theta_4} \right) \times \frac{1}{2S} \quad g/g^2 \quad (8)$$

where $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 225^\circ$, $\theta_3 = 135^\circ$, $\theta_4 = 315^\circ$.

- d) The accelerometer shall be installed on the acceleration generating equipment so that the acceleration may be applied along both the input axis and the output axis.

- e) Repeat the above procedures b), c) to calculate the cross-coupling coefficient K_o for this position.

The value of cross-coupling coefficient shall conform to the requirements of 4.4.7.

5.2.9 Temperature coefficient of sensitivity

- a) Mount the accelerometer in a temperature-controlled chamber with the standard test conditions of 5.1. Stabilize the accelerometer temperature at $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- b) Measure the sensitivity in accordance with 5.2.3.
- c) Repeat these measurements at the high operating temperature and the low operating temperature, as defined in 4.3.1.
- d) Calculate the temperature coefficient of the sensitivity, S_{tco} as follows:

$$S_{tco} = \frac{\left(\frac{S_{high} - S_{std}}{S_{std}} \right)}{T_{high} - T_{std}} \times 100\text{ } \%/^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

$$S_{tco} = \frac{\left(\frac{S_{low} - S_{std}}{S_{std}} \right)}{T_{low} - T_{std}} \times 100\text{ } \%/^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

- e) The temperature coefficient of the sensitivity takes the larger figure of the above definitions (9) and (10).

The value of the temperature coefficient of sensitivity shall conform to the requirement of the individual specification.

5.2.10 Temperature coefficient of bias

- a) Mount the accelerometer in a temperature-controlled chamber with the standard test conditions of 5.1. Stabilize the accelerometer temperature at $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- b) Measure the bias in accordance with 5.2.4.
- c) Repeat these measurements at the high operating temperature and the low operating temperature, as defined by 4.3.1.
- d) Calculate the temperature coefficient of the bias, B_{tco} as follows:

$$B_{tco} = (B_{high} - B_{std}) / (T_{high} - T_{std}) \quad g/^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

$$B_{tco} = (B_{low} - B_{std}) / (T_{low} - T_{std}) \quad g/^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

- e) The temperature coefficient of the bias takes the larger figure of the above definitions (11) and (12).

The value of the temperature coefficient of the bias shall conform to the requirement of the individual specification.

5.2.11 Frequency response

5.2.11.1 Mechanical considerations

Input acceleration to an accelerometer shall be clearly and explicitly defined for the whole range of frequency response characteristic measurement with the uncertainty that enables the final specified uncertainty of the characterization. With this in mind, it is not recommended to utilise a back-to-back reference accelerometer for the characterization of an accelerometer by impact.

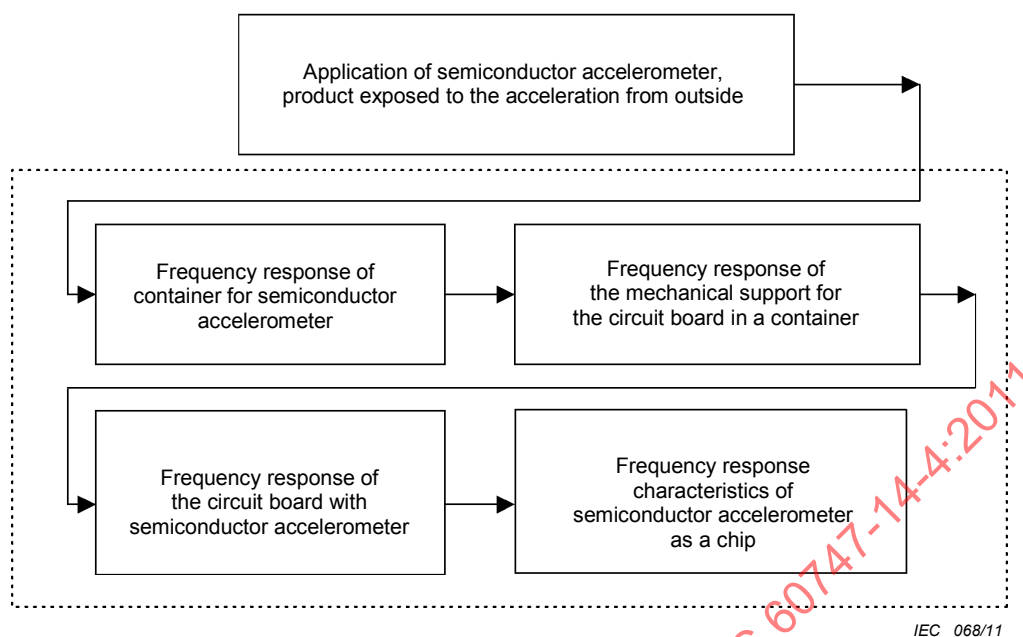
The implicit assumption on reference accelerometers is that the rigidity of the casing is infinitive and that the motion of the front end surface and the back end surface are always in the same phase. This is of course impossible. Manufacturers of de facto standard accelerometers do not provide the information on the limit of the frequency and acceleration level under which the motion of the same phase holds. It also should be noted that the de facto standard piezoelectric accelerometers available on the market are only one-dimensional under the calibration authorisation with one-dimension capability. Assembled three-dimensional accelerometers using one-dimensional piezoelectric accelerometers are not calibrated using the three-dimensional motion.

If the target accelerometer is of a semiconductor multi-axis type, it is absolutely necessary to add acceleration along each sensitive axis of the accelerometer independently. The acceleration vibration component whose axis is vertical to the sensitive axis of the target accelerometer shall be clearly stated in the report of the frequency response characteristic measurement. Since the off-axis sensitivity or cross-axis sensitivity is a function of frequency, simultaneous and independent excitation of the vibration motion perpendicular to the main axis motion is indispensable.

It is hardly possible to add acceleration directly to the semiconductor accelerometer chips defined in Clause 3. They are soldered on the PC board accompanied by other electronic devices, amplifiers and discrete devices. The board may be mechanically supported and placed in a container, which might be connected to the structures of the target application. Therefore, it should be noted that the frequency response characteristics of semiconductor accelerometers is measured with regards to the system, including not only the target semiconductor accelerometer but also PC board with electronic devices and a mechanical support component. Therefore, it should be noted that two systems with the same accelerometer chips but with different support, or fixing mechanism, and different PC boards are dissimilar.

If the frequency response characteristic measurement is concerned with the accelerometer module whose mechanical structure is different from that of the real application, the compensation of the mechanical structure difference shall be carried out. If the target accelerometer is of multi-axis type and if the compensation of the frequency response of mechanical structure difference is required, it shall be noted that the measurement is valid within the frequency range where compensation data is available along all of the axis of the accelerometer.

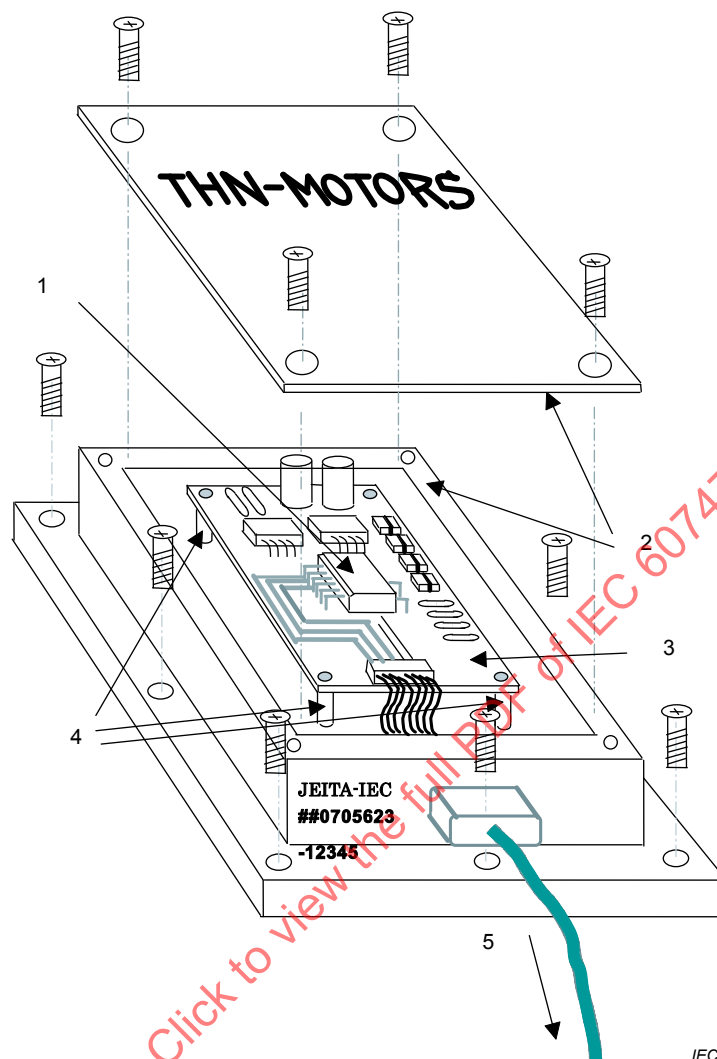
It should be strongly noted that the frequency response is measured in the domain where the dynamic linearity of accelerometers is guaranteed. Though the measurement of dynamic linearity using a vibration generator is rather tedious, it is, in principle, indispensable. Also in the shock acceleration measurement, dynamic linearity is very important in terms of the resonant frequency. This standard describes dynamic linearity as the basis of the measurement of frequency response measurement.



NOTE The target of the frequency response characteristic measurement is the system circled by the dotted line.

Figure 6 – The semiconductor accelerometer as a system

Figure 7 gives an example of the structure of assembled semiconductor accelerometer system for the concept of accelerometer frequency response.



IEC 069/11

Key

- 1 accelerometer
- 2 container for circuit board with accelerometer chip, electrical circuits and cables
- 3 circuit board
- 4 support
- 5 cable

Figure 7 – Example of the structure of assembled semiconductor accelerometer system for the concept of accelerometer frequency response

5.2.11.2 Electrical considerations

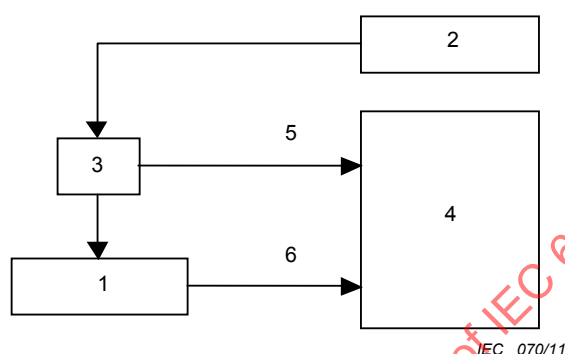
The purpose of the method shown here is to obtain the response of the target accelerometer to the applied electrical signals corresponding to the real accelerations. The electrical signals should have the required frequency components.

Although this method is suitable for the low-frequency response measurement for closed loop accelerometers, with appropriate accuracy consideration, it can be applied to either higher frequency regions or open loop accelerometers. As this method can provide frequency

response characteristics of the semiconductor accelerometer as a chip, without being influenced by the packaging, the circuit boards and containers, it may be used for in-process inspection by accelerometer manufacturers along with the self test.

The accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1 unless otherwise specified.

- a) Set up the measuring apparatus as shown in Figure 8.
- b) Apply electrical signal and measure signal of channel A and channel B.
- c) Calculate the gain and phase characteristic using the obtained data.



Key

- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1 target accelerometer | 2 signal generator |
| 3 input monitor device | 4 signal analyser |
| 5 channel A | 6 channel B |

Figure 8 – Schematic diagram of frequency response measurement by electrical input

5.2.12 Supply current

Unless otherwise specified, the accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1.1.

- a) Connect the current measuring devices and apply power as specified in 5.1.1 d).
- b) Record the current from each source.

The value of the supply current shall conform to the requirement of the individual specification.

5.2.13 Output noise

Unless otherwise specified, the accelerometer shall be operated under the standard test conditions of 5.1.1.

- a) Connect the output to the spectrum analysis equipment and apply power as specified in 5.1.1 d).
- b) Record the r.m.s. value in a specified analysis bandwidth V_{rms}/Hz and express as volt per square root of hertz $V/\sqrt{\text{Hz}}$.

The value shall conform to the requirement of the individual specification.

6 Acceptance and reliability

6.1 General

The test in this clause shall, in general, be in accordance with the IEC 60749 series and, for test procedures, in accordance with the IEC 61000-4 series.

Test conditions such as temperature, humidity and so on should be in accordance with IEC 60749-1 unless otherwise stated in the relevant procurement specification.

6.2 Environmental test

6.2.1 High temperature storage

IEC 60749-6, with some modification, is applicable for this test procedure.

Storage temperature shall be the maximum storage temperature as given in the relevant specification.

For storage duration, IEC 60749-6 is applicable, unless otherwise stated in the relevant specification.

6.2.2 Low-temperature storage

6.2.2.1 General

This subclause provides the methods to evaluate the endurance of semiconductor accelerometers when stored at low temperature for a long time.

Since the IEC 60749 series does not provide any standard for a low-temperature storage test, the following test procedures are recommended.

6.2.2.2 Test equipment

The chamber to be used in this test shall keep the test temperature at the value specified in 6.1.2.3.2 and within the tolerances given. In this case, the chamber shall be constructed so that the specimen may not be exposed to direct radiation from the cold source during the test.

6.2.2.3 Procedure

6.2.2.3.1 Initial measurement

Initial measurement shall be carried out in conformity with the items and conditions specified in the detailed specification.

6.2.2.3.2 Test

Store the specimen in the thermostatic chamber and pre-set at the specified low temperature for the specified time. The storage temperature should be the minimum rated temperature, $T_{\text{stg min}}$, unless otherwise specified.

The allowance of the storage temperature should be $\pm 5^\circ\text{C}$ at a temperature lower than -25°C , and from $+3^\circ\text{C}$ to -5°C at a temperature not lower than -25°C .

The test duration should be 1 000 h, unless otherwise specified.

6.2.2.3.3 Post treatment

After finishing the test, take the specimen out of the thermostatic chamber, and leave it standing under standard conditions for 2 h to 24 h so that the specimen may reach thermal equilibrium.

Frost or water droplets on the specimen should be removed beforehand.

6.2.2.3.4 End-point measurement

Carry out the end-point measurement in conformity with the items and conditions specified in the detail specification.

Information to be given in the detailed specification is as follows:

- a) Items and conditions of the initial measurements given in 6.1.2.3.1.
- b) Storage temperature, if it is different from $T_{\text{stg min}}$, given in 6.1.2.3.2.
- c) Test duration if different from 1 000 h given in 6.1.2.3.2.
- d) Post treatment, if compulsory and not given in 6.1.2.3.3.
- e) Items and conditions of end-point measurements, as given in this subclause.

6.2.3 Temperature humidity storage

IEC 60749-5 is applicable without bias voltage for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specification.

6.2.4 Temperature cycle

IEC 60749-25 is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specifications.

6.2.5 Thermal shock

IEC 60749-11 is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specifications.

6.2.6 Salt mist

IEC 60749-13 is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specifications.

6.2.7 Vibration

IEC 60749-12 is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specifications.

6.2.8 Mechanical shock

IEC 60749-10 is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specifications.

6.2.9 Electrical noise immunity

IEC 61000-4-4 is applicable for this test procedure.

6.2.10 Electro-static discharge immunity

IEC 61000-4-2 is applicable for this test procedure.

6.2.11 Electro-magnetic field radiation immunity

IEC 61000-4-3 is applicable for this test procedure.

6.3 Reliability test

6.3.1 Steady-state life

IEC 60749-6, with some modification, is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specification.

The principal test conditions in this standard are as follows:

- a) ambient temperature to be the maximum operating ambient temperature according to the ratings of the devices;
- b) application of the nominal or maximum supply voltage according to the ratings of the device;
- c) no acceleration along the input axis of the device.

6.3.2 Temperature humidity life

IEC 60749-5 is applicable for this test procedure, unless otherwise stated in the relevant specifications.

The principal test conditions in this standard are as follows:

- a) application of the nominal or maximum supply voltage according to the ratings of the device;
- b) no acceleration along the input axis of the device.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60747-14-4:2011

Annex A (informative)

Definition of sensitivity matrix of an accelerometer

A.1 Introductory remarks

One of the new aspects of the semiconductor accelerometer is the intrinsic mechanical structure for the measurement of acceleration as a vector. Classical three-axis accelerometer is a combination of three one-axis accelerometers calibrated using a one-dimensional vibration generator.

Normally, the sensitivity axis of one-axis accelerometers is always along the direction of vibration motion. However, it should be noted that the calibration of a one-axis accelerometer using a one-axis vibration table is very contradictory, because the direction is not taken into account. The measurement of acceleration is the measurement of amplitude and direction, because acceleration is a vector quantity. Since the one-axis vibration generator cannot clarify cross-axis sensitivity of one-axis accelerometers as a function of frequency, combining three one-axis accelerometers along the orthogonal co-ordinate system cannot be a physically rigorous method of measuring acceleration as a vector. Therefore three-axis accelerometers differ from three-dimensional accelerometers that can measure acceleration as a vector defined in the three-dimensional space with three degrees of freedom. The conventional technique can only calibrate level 1 accelerometers, even though it has long been accepted. This comes from the fact that almost all of the vibration tables have possessed only a single axis. This is obviously from the point of view that the vibration table is a machine that generates the input acceleration vector space.

This standard describes the sensitivity as a matrix, defining a relationship between the input acceleration vector space and the accelerometer output vector space. Though an acceleration vector includes not only translational but also rotational components, the current vibration generator is not yet mature enough for precision motion with six degrees of freedom. The sensitivity matrix is therefore derived in terms of translational acceleration in the beginning.

NOTE 1 It should be noted that sensitivity matrix can be applied to any multi-axis accelerometers. This includes, of course not only multi-axis semiconductor accelerometers but also assembled three-axis accelerometers where three, one-axis piezoelectric accelerometers or servo-accelerometers are fixed on the block stage in the orthogonal co-ordinate system. The essential difference between semiconductor multi-axis accelerometers and the conventional multi-axis accelerometers is the number of seismic systems in the multi-axis accelerometer. Most of the semiconductor multi-axis accelerometers possess only single seismic systems with multi-dimensional acceleration sensitivity.

NOTE 2 The space where an accelerometer is calibrated can have maximally six dimensions. Even if the normal motion space where the accelerometers are applied is a translational motion space with three degrees of freedom in design, the abnormal situations such as natural disasters or accidents can generate the rotational motion, i.e. the motion spaces with larger dimensions than that assumed in design. Apparently, it is expensive to calibrate accelerometers in the vector space with dimensions which are larger than 3. However, it is impossible to dismiss the advent of multi-axis semiconductor accelerometers such as three-axis, five-axis or six-axis in the market. This trend has clarified the gap of the measurement quality of the characterization techniques between what is available at present and what shall be available in the future. Moreover, one cannot prevent the development of motion space generation machines for the six-dimension vector space which is enjoying global success. For these reasons, this annex describes the sensitivity of an accelerometer in the form of a matrix derived in the vector space with the dimension three or six.

NOTE 3 As was stated in 5.2.1 measurement range, conventional acceleration measurement has assumed that the acceleration is applied along the input axis. This is reasonable only when an input axis is single and the direction of motion is always predictable. It does not make sense to apply the acceleration along one of the input axes of multi-axis accelerometers. As long as the acceleration is a vector quantity, measuring acceleration using accelerometers means measuring both magnitude and direction with a component expression. Therefore, the conventional calibration technique for accelerometers would not contribute to the acceleration measurement when neither the amplitude nor the direction is known.

NOTE 4 ISO 2041 states that acceleration is a vector quantity.

NOTE 5 Annex A, is applicable to semiconductor gyros, semiconductor gyros with acceleration detection capability and inertial measurement units, so called IMU.

A.2 Basics

A.2.1 Mathematical formulation

A.2.1.1 Formulation of three-axis accelerometer

Since acceleration is a vector quantity, the matrix notation of sensitivity of an accelerometer is generally accepted. As long as the sensitivity of a three-axis accelerometer is acknowledged, then the sensitivity of an accelerometer as a function of frequency and in the form of a matrix has to be defined. The fundamental assumption is the linearity in the neighbourhood of the equilibrium point. Assuming that the sensitivity matrix is only valid at the specified mounting can solve the difficulty that mechanical balance is dependent on how an accelerometer is installed.

Input acceleration shall be defined as a vector as follows:

$$\mathbf{A}_{\text{input}}(t) = \begin{pmatrix} a_{g,x}(t) \\ a_{g,y}(t) \\ a_{g,z}(t) \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$\mathbf{A}_{\text{outout}}(t) = \begin{pmatrix} a_{s,x}(t) \\ a_{s,y}(t) \\ a_{s,z}(t) \end{pmatrix}$$

where $\mathbf{A}_{\text{input}}(t)$ and $\mathbf{A}_{\text{outout}}(t)$ are the acceleration input to the accelerometer and the output from the target accelerometer, respectively. Normally, an accelerometer has sensitivity not only along the sensitivity axis but also along the axis that is orthogonal to the sensitivity axis. The sensitivity matrix of an accelerometer is defined as follows:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

where $S_{pq}(p = q)$ and $S_{pq}(p \neq q)$ are a normal sensitivity and a cross-sensitivity, respectively. Each element of the sensitivity matrix is a function of angular frequency, ω . $S_{xx}(j\omega)$, $S_{xy}(j\omega)$ and $S_{xz}(j\omega)$ are defined as follows by activating the target accelerometer using the acceleration $(a_x(t) \ 0 \ 0)$ along the X-axis:

$$\begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) \\ S_{yx}(j\omega) \\ S_{zx}(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L[a_{x,x}(t)]}{L[a_x(t)]} \\ \frac{L[a_{y,x}(t)]}{L[a_x(t)]} \\ \frac{L[a_{z,x}(t)]}{L[a_x(t)]} \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

where $a_{x,x}(t)$, $a_{y,x}(t)$ and $a_{z,x}(t)$ are the X-axis output by X-axis input, Y-axis output by X-axis input and Z-axis output by X-axis input, respectively, L stands for Laplace transform operator and j is the imaginary unit.

$S_{xy}(j\omega)$, $S_{yy}(j\omega)$ and $S_{zy}(j\omega)$ are defined as follows by activating the target accelerometer using acceleration $\begin{pmatrix} 0 & a_y(t) & 0 \end{pmatrix}$ along the Y-axis:

$$\begin{pmatrix} S_{xy}(j\omega) \\ S_{yy}(j\omega) \\ S_{zy}(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L[a_{x,y}(t)]}{L[a_y(t)]} \\ \frac{L[a_{y,y}(t)]}{L[a_y(t)]} \\ \frac{L[a_{z,y}(t)]}{L[a_y(t)]} \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

where $a_{x,y}(t)$, $a_{y,y}(t)$ and $a_{z,y}(t)$ are the X-axis output by Y-axis input, Y-axis output by Y-axis input and Z-axis output by Y-axis input, respectively.

$S_{xz}(j\omega)$, $S_{yz}(j\omega)$ and $S_{zz}(j\omega)$ are defined as follows by activating the target accelerometer using the acceleration $\begin{pmatrix} 0 & 0 & a_z(t) \end{pmatrix}$ along Z-axis:

$$\begin{pmatrix} S_{xz}(j\omega) \\ S_{yz}(j\omega) \\ S_{zz}(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L[a_{x,z}(t)]}{L[a_z(t)]} \\ \frac{L[a_{y,z}(t)]}{L[a_z(t)]} \\ \frac{L[a_{z,z}(t)]}{L[a_z(t)]} \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

where $a_{x,z}(t)$, $a_{y,z}(t)$ and $a_{z,z}(t)$ are the X-axis output by Z-axis input, Y-axis output by Z-axis input and Z-axis output by Z-axis input, respectively.

Therefore, the general relationship between the input vector acceleration to the target accelerometer and the output from the accelerometer in the frequency domain is expressed as follows:

$$\begin{aligned} L[\mathbf{A}_{\text{output}}] &= \begin{pmatrix} L[a_{s,x}(t)] \\ L[a_{s,y}(t)] \\ L[a_{s,z}(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{s,x}(j\omega) \\ a_{s,y}(j\omega) \\ a_{s,z}(j\omega) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) & S_{xy}(j\omega) & S_{xz}(j\omega) \\ S_{yx}(j\omega) & S_{yy}(j\omega) & S_{yz}(j\omega) \\ S_{zx}(j\omega) & S_{zy}(j\omega) & S_{zz}(j\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{g,x}(j\omega) \\ a_{g,y}(j\omega) \\ a_{g,z}(j\omega) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

A.2.1.2 Sensitivity matrix of two-axis accelerometer

Even when the target accelerometer is two-axis type, the exact definition still needs to be shown in a matrix form. If the target accelerometer is installed in the X-Y plane, components of the sensitivity matrix related to the Z-axis output such as $S_{zx}(j\omega)$, $S_{zy}(j\omega)$ and $S_{zz}(j\omega)$ are of course zero. However, the output induced by the X-axis input and Y-axis input acceleration can be influenced by the Z-axis acceleration input as well. The following relationship therefore holds:

$$\begin{aligned}
 & L[A_{\text{output}}(t)] \\
 &= \begin{pmatrix} L[a_{s,x}(t)] \\ L[a_{s,y}(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{s,x}(j\omega) \\ a_{s,y}(j\omega) \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) & S_{xy}(j\omega) & S_{xz}(j\omega) \\ S_{yx}(j\omega) & S_{yy}(j\omega) & S_{yz}(j\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{g,x}(j\omega) \\ a_{g,y}(j\omega) \\ a_{g,z}(j\omega) \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

where j is the imaginary unit.

A.2.1.3 Sensitivity matrix of one-axis accelerometer

If the target accelerometer is one-axis type, it should be accepted that the exact definition shall be given in a matrix form. Here it is assumed that the accelerometer sensitivity axis is equal to the X-axis.

$$\begin{aligned}
 & L[A_{\text{output}}(t)] \\
 &= L[a_{s,x}(t)] = a_{s,x}(j\omega) \\
 &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) & S_{xy}(j\omega) & S_{xz}(j\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{g,x}(j\omega) \\ a_{g,y}(j\omega) \\ a_{g,z}(j\omega) \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

A.2.2 Calibration

A.2.2.1 Calibration using a vibration table

A.2.2.1.1 Calibration using a three-dimensional vibration table

Mathematical consideration has shown that a matrix should express the sensitivity of an accelerometer. Calibration is a process of determining all of the components of the matrix as a function of frequency and other parameters, if necessary. Since acceleration is a vector quantity, an accelerometer shall be calibrated not only by the amplitude but also the direction on principle. Calibration of the accelerometer which measures acceleration as a vector must inspect if the component of acceleration along the sensitivity axis is accurately measured, regardless of the direction. It is, needless to say, impossible to check it in every direction. However, determining every component in the sensitivity matrix is equivalent to calibrating both amplitude and direction, which is the essence of a vector quantity.

At the specified frequency f_i , three kinds of vector acceleration are generated:

$$\mathbf{a}_{i,1} = \begin{pmatrix} a_{i,1,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \tag{A.9}$$

$$\mathbf{a}_{i,2} = \begin{pmatrix} a_{i,2,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,2,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,2,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \tag{A.10}$$

$$\mathbf{a}_{i,3} = \begin{pmatrix} a_{i,3,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,3,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,3,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Output vector acceleration from the target accelerometer $\mathbf{b}_{i,1}$, $\mathbf{b}_{i,2}$ and $\mathbf{b}_{i,3}$ are expressed as follows:

$$\mathbf{b}_{i,1} = \begin{pmatrix} b_{i,1,x}(j\omega_i) e^{j2\pi f_i t} \\ b_{i,1,y}(j\omega_i) e^{j2\pi f_i t} \\ b_{i,1,z}(j\omega_i) e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) & S_{xy}(j\omega_i) & S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) & S_{yy}(j\omega_i) & S_{yz}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) & S_{zy}(j\omega_i) & S_{zz}(j\omega_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{i,1,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{b}_{i,2} = \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) & S_{xy}(j\omega_i) & S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) & S_{yy}(j\omega_i) & S_{yz}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) & S_{zy}(j\omega_i) & S_{zz}(j\omega_i) \end{pmatrix} \mathbf{a}_{i,2} \quad (\text{A.13})$$

$$\mathbf{b}_{i,3} = \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) & S_{xy}(j\omega_i) & S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) & S_{yy}(j\omega_i) & S_{yz}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) & S_{zy}(j\omega_i) & S_{zz}(j\omega_i) \end{pmatrix} \mathbf{a}_{i,3} \quad (\text{A.14})$$

where each component of ($\mathbf{b}_{i,1}$, $\mathbf{b}_{i,2}$, $\mathbf{b}_{i,3}$) is a complex number and should be measured with the maximum possible precision, i.e. laser interferometer. Solving following simultaneous linear equations will lead to the sensitivity matrix at a given frequency of f_i , ($\omega_i = 2\pi f_i$).

$$\begin{aligned} S_{xx}(j\omega_i) a_{i,1,x} + S_{xy}(j\omega_i) a_{i,1,y} + S_{xz}(j\omega_i) a_{i,1,z} &= b_{i,1,x}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) a_{i,1,x} + S_{yy}(j\omega_i) a_{i,1,y} + S_{yz}(j\omega_i) a_{i,1,z} &= b_{i,1,y}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) a_{i,1,x} + S_{zy}(j\omega_i) a_{i,1,y} + S_{zz}(j\omega_i) a_{i,1,z} &= b_{i,1,z}(j\omega_i) \\ S_{xx}(j\omega_i) a_{i,2,x} + S_{xy}(j\omega_i) a_{i,2,y} + S_{xz}(j\omega_i) a_{i,2,z} &= b_{i,2,x}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) a_{i,2,x} + S_{yy}(j\omega_i) a_{i,2,y} + S_{yz}(j\omega_i) a_{i,2,z} &= b_{i,2,y}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) a_{i,2,x} + S_{zy}(j\omega_i) a_{i,2,y} + S_{zz}(j\omega_i) a_{i,2,z} &= b_{i,2,z}(j\omega_i) \\ S_{xx}(j\omega_i) a_{i,3,x} + S_{xy}(j\omega_i) a_{i,3,y} + S_{xz}(j\omega_i) a_{i,3,z} &= b_{i,3,x}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) a_{i,3,x} + S_{yy}(j\omega_i) a_{i,3,y} + S_{yz}(j\omega_i) a_{i,3,z} &= b_{i,3,y}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) a_{i,3,x} + S_{zy}(j\omega_i) a_{i,3,y} + S_{zz}(j\omega_i) a_{i,3,z} &= b_{i,3,z}(j\omega_i) \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Rewriting Equation (A.15) gives the Equation (A.16) as simultaneous linear equations on sensitivity matrix components:

$$\begin{pmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yx} \\ S_{yy} \\ S_{yz} \\ S_{zx} \\ S_{zy} \\ S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{i,1,x} \\ b_{i,1,y} \\ b_{i,1,z} \\ b_{i,2,x} \\ b_{i,2,y} \\ b_{i,2,z} \\ b_{i,3,x} \\ b_{i,3,y} \\ b_{i,3,z} \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

It should be noted that the right side of the Equations (A.16) is a complex vector. The relation obtained by exchanging rows of the coefficient matrix as shown in Expression (A.17) demonstrates that the Equations (A.16) can be solved if $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ and $a_{i,3}$ are linearly independent.

$$\begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix}^3 \quad (\text{A.17})$$

The frequency response diagram requires repeated measurement at frequency f_n ($n = 1, \dots, N$) and solving the above simultaneous linear equations.

If the target accelerometer is two-axis type, the following equations shall be solved to obtain all of the components of the sensitivity matrix at any given frequency, f_i .

$$\begin{aligned} S_{xx}(j\omega_i)a_{i,1,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,1,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,1,z} &= b_{i,1,x} \\ S_{yx}(j\omega_i)a_{i,1,x} + S_{yy}(j\omega_i)a_{i,1,y} + S_{yz}(j\omega_i)a_{i,1,z} &= b_{i,1,y} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,2,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,2,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,2,z} &= b_{i,2,x} \\ S_{yx}(j\omega_i)a_{i,2,x} + S_{yy}(j\omega_i)a_{i,2,y} + S_{yz}(j\omega_i)a_{i,2,z} &= b_{i,2,y} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,3,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,3,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,3,z} &= b_{i,3,x} \\ S_{yx}(j\omega_i)a_{i,3,x} + S_{yy}(j\omega_i)a_{i,3,y} + S_{yz}(j\omega_i)a_{i,3,z} &= b_{i,3,z} \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Rewriting the Equations (A.18) gives the Equations (A.19) as simultaneous linear equations on sensitivity matrix components.

$$\begin{pmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) \\ S_{xy}(j\omega_i) \\ S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) \\ S_{yy}(j\omega_i) \\ S_{yz}(j\omega_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{i,1,x} \\ b_{i,1,y} \\ b_{i,2,x} \\ b_{i,2,y} \\ b_{i,3,x} \\ b_{i,3,y} \end{pmatrix} \quad (\text{A.19})$$

It should be noted that the right side of the Equations (A.19) is a complex vector. The relation obtained by exchanging the rows of the coefficient matrix demonstrates that the Equations (A.19) can be solved if $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ and $a_{i,3}$ are linearly independent as shown in the Expression (A.20).

$$\begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix}^2 \quad (\text{A.20})$$

If the target accelerometer is one-axis type, the following equations shall be solved to obtain all of the components in the sensitivity matrix at any given frequency, f_i .

$$\begin{aligned} S_{xx}(j\omega_i)a_{i,1,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,1,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,1,z} &= b_{i,1,x} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,2,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,2,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,2,z} &= b_{i,2,x} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,3,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,3,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,3,z} &= b_{i,3,x} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

The simultaneous linear Equations (A.21) can be solved if $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ and $a_{i,3}$ are linearly independent.

A.2.2.1.2 Calibration using a one-dimensional vibration table (see Table A.1)

The sensitivity matrix might be derived using a one-dimensional vibration tables in theory. The one-dimensional vibration table generates either one-dimensional translational motion or rotational motion. However, following difficulties should be considered seriously:

- The influence of the gravitational acceleration on the performance of the mechanical part of the accelerometer is neglected.
- The base strain of the target accelerometer caused by the installation is not constant, because mounting is adjusted so that the motion direction of the one-dimensional table may be along with one of the input axis of the multi-axis accelerometers.
- Low calibration efficiency is unavoidable.
- High calibration cost is introduced because of the low calibration efficiency.
- It is difficult to cope with the high volume production of semiconductor accelerometers.
- Information of the jig with precise adjustment and mechanical robustness is not available.

Figure A.1 gives an example of direction cosine.

Table A.1 – Symbols for the relationship between input acceleration and the output signal from an accelerometer using one-dimensional vibration table

Input side				Output side	
Excitation	Output acceleration of one-dimensional vibration table	Direction cosine between the input acceleration by one-dimensional vibration table and the input co-ordinate axis	Input acceleration vector	No. of axis	Output from the accelerometer
1	$a_{iz,1} \exp(j\omega t)$	$\cos \alpha_1$	$a_{iz,1} \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \\ \cos \beta_1 \\ \cos \gamma_1 \end{pmatrix} \exp(j\omega t)$	1	$V_{ox1} \exp(j\omega t)$
		$\cos \beta_1$		2	$(V_{ox1} \ V_{oy1}) \exp(j\omega t)$
		$\cos \gamma_1$		3	$(V_{ox1} \ V_{oy1} \ V_{oz1}) \exp(j\omega t)$
2	$a_{iz,2} \exp(j\omega t)$	$\cos \alpha_2$	$a_{iz,2} \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 \\ \cos \beta_2 \\ \cos \gamma_2 \end{pmatrix} \exp(j\omega t)$	1	$V_{ox2} \exp(j\omega t)$
		$\cos \beta_2$		2	$(V_{ox2} \ V_{oy2}) \exp(j\omega t)$
		$\cos \gamma_2$		3	$(V_{ox2} \ V_{oy2} \ V_{oz2}) \exp(j\omega t)$
3	$a_{iz,3} \exp(j\omega t)$	$\cos \alpha_3$	$a_{iz,3} \begin{pmatrix} \cos \alpha_3 \\ \cos \beta_3 \\ \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \exp(j\omega t)$	1	$V_{ox3} \exp(j\omega t)$
		$\cos \beta_3$		2	$(V_{ox3} \ V_{oy3}) \exp(j\omega t)$
		$\cos \gamma_3$		3	$(V_{ox3} \ V_{oy3} \ V_{oz3}) \exp(j\omega t)$

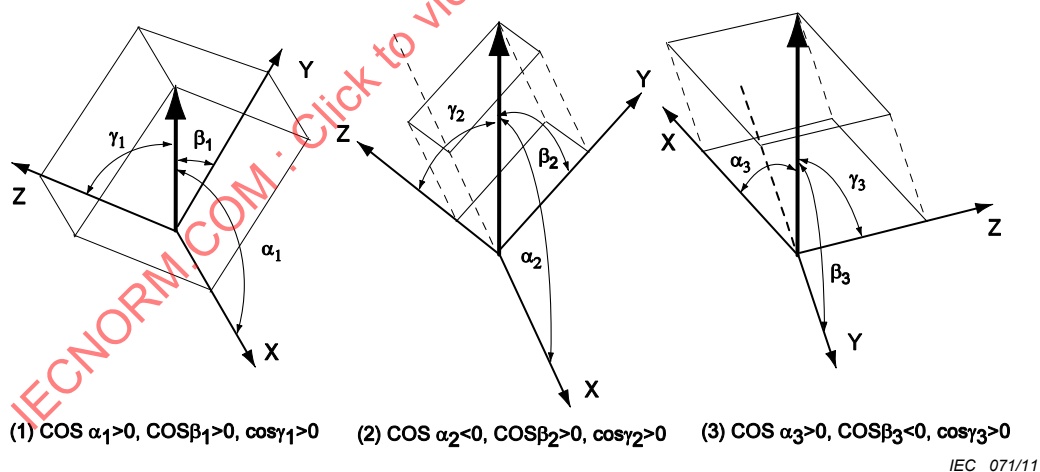


Figure A.1 – Example of direction cosine

A.2.2.2 Calibration using the impact excitation

A.2.2.2.1 Calibration using a three-dimensional impact exciter

The apparatus of motion generation for calibration is originally a motion simulator of the real motion vector space. If the target accelerometer is used to measure the acceleration in the three-dimensional motion vector space, it is natural to think that the motion generator i.e. the vibration table, should generate the three-dimensional motion vector space. The acceleration vector a generated by an N -dimensional vibration table is described by the following expression:

$$\mathbf{a} = \sum_{j=1}^N c_j \mathbf{e}_j \quad (\text{A.22})$$

where $c_j (j=1, \dots, N)$ are the constants and $\mathbf{e}_j (j=1, \dots, N)$ are the unit acceleration vector generated by each actuator in total up to N . It should be noted that the N -dimensional vibration table could generate the arbitrary acceleration as the linear combination expressed by Expression (A.22). On the other hand, an N -axis vibration table could not normally generate arbitrary acceleration in the form of Expression (A.22).

Table A.2 – Symbols for input acceleration and output signals from an accelerometer

Excitation	Input acceleration as a function of time	Number of axis	Output acceleration signal
1st	$(a_{i,1,x}(t) \ a_{i,1,y}(t) \ a_{i,1,z}(t))$	1	$a_{oz1}(t)$
		2	$(a_{oy1}(t) \ a_{oz1}(t))$
		3	$(a_{ox1}(t) \ a_{oy1}(t) \ a_{oz1}(t))$
2nd	$(a_{i,2,x}(t) \ a_{i,2,y}(t) \ a_{i,2,z}(t))$	1	$a_{oz2}(t)$
		2	$(a_{oy2}(t) \ a_{oz2}(t))$
		3	$(a_{ox2}(t) \ a_{oy2}(t) \ a_{oz2}(t))$
3rd	$(a_{i,3,x}(t) \ a_{i,3,y}(t) \ a_{i,3,z}(t))$	1	$a_{oz3}(t)$
		2	$(a_{oy3}(t) \ a_{oz3}(t))$
		3	$(a_{ox3}(t) \ a_{oy3}(t) \ a_{oz3}(t))$

Table A.3 – Definition of symbols for describing the input acceleration, output signal from the target accelerometer and the direction cosine repeated three times

Excitation acceleration		Relation along the x-axis of the target accelerometer		Relation along the y-axis of the target accelerometer		Relation along the z-axis of the target accelerometer	
Excitation	Amplitude m/s ²	Output	Direction cosine	Output	Direction cosine	Output	Direction cosine
First time	$a_{i1}(t)$	$a_{ox1}(t)$	$\cos \alpha_1$	$a_{oy1}(t)$	$\cos \beta_1$	$a_{oz1}(t)$	$\cos \gamma_1$
Second time	$a_{i2}(t)$	$a_{ox2}(t)$	$\cos \alpha_2$	$a_{oy2}(t)$	$\cos \beta_2$	$a_{oz2}(t)$	$\cos \gamma_2$
Third time	$a_{i3}(t)$	$a_{ox3}(t)$	$\cos \alpha_3$	$a_{oy3}(t)$	$\cos \beta_3$	$a_{oz3}(t)$	$\cos \gamma_3$

The vector expression of the first time excitation, the second time excitation and the thirteenth time excitation are written as $(a_{ix1}(t) \ a_{iy1}(t) \ a_{iz1}(t))$, $(a_{ix2}(t) \ a_{iy2}(t) \ a_{iz2}(t))$ and $(a_{ix3}(t) \ a_{iy3}(t) \ a_{iz3}(t))$, respectively. Then the following definitions from definition (A.23) to definition (A.34) hold:

$$a_{i1}(t) = \sqrt{(a_{ix1}(t))^2 + (a_{iy1}(t))^2 + (a_{iz1}(t))^2} \quad (\text{A.23})$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{a_{i1x}(t)}{a_{i1}(t)} \quad (\text{A.24})$$

$$\cos \beta_1 = \frac{a_{i1y}(t)}{a_{i1}(t)} \quad (\text{A.25})$$

$$\cos \gamma_1 = \frac{a_{i1z}(t)}{a_{i1}(t)} \quad (\text{A.26})$$

$$a_{i2}(t) = \sqrt{(a_{i2x}(t))^2 + (a_{i2y}(t))^2 + (a_{i2z}(t))^2} \quad (\text{A.27})$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{a_{i2x}(t)}{a_{i2}(t)} \quad (\text{A.28})$$

$$\cos \beta_2 = \frac{a_{i2y}(t)}{a_{i2}(t)} \quad (\text{A.29})$$

$$\cos \gamma_2 = \frac{a_{i2z}(t)}{a_{i2}(t)} \quad (\text{A.30})$$

$$a_{i3}(t) = \sqrt{(a_{i3x}(t))^2 + (a_{i3y}(t))^2 + (a_{i3z}(t))^2} \quad (\text{A.31})$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{a_{i3x}(t)}{a_{i3}(t)} \quad (\text{A.32})$$

$$\cos \beta_3 = \frac{a_{i3y}(t)}{a_{i3}(t)} \quad (\text{A.33})$$

$$\cos \gamma_3 = \frac{a_{i3z}(t)}{a_{i3}(t)} \quad (\text{A.34})$$

A.2.2.2.1.1 One-axis accelerometers

One-axis level 1 accelerometers are calibrated using the equipment in which the sensitivity axis of the target accelerometer coincides with the direction of the impact acceleration. In the frequency and time domain in which the dynamic linearity is guaranteed, normal sensitivity is derived from the transfer function, $G_N(S)$ formulated by Definition (A.35).

$$G_N(S) = \frac{L[V_{\text{out}}(t)]}{L[a_{\text{in}}(t)]} \quad (\text{A.35})$$

where $a_{\text{in}}(t)$ and $V_{\text{out}}(t)$ are the input acceleration and the output from the accelerometer, respectively. The cross-sensitivity is also obtained from the transfer function that is derived using the set-up in which the impact acceleration is in the plane, perpendicular to the normal sensitivity of the target accelerometer.

On the other hand, sensitivity of the accelerometers with the level that is different from level 1 shall be derived from the transfer function in a form of a matrix. Table A.4 shows the relationship between the expression of the transfer function in a matrix form and the number of axis of the target accelerometers.

Table A.4 – Relationship between the expression of transfer function in a matrix form and the number of axis of the target accelerometers

Number of axis	Expression of transfer function in a matrix form	Input axis	Output axis
1	$\begin{pmatrix} G_{zx}(S) & G_{zy}(S) & G_{zz}(S) \end{pmatrix}$	X - axis, Y - axis, Z - axis $\begin{pmatrix} a_{ix}(t) & a_{iy}(t) & a_{iz}(t) \end{pmatrix}$	Z-axis
2	$\begin{pmatrix} G_{zx}(S) & G_{zy}(S) & G_{zz}(S) \\ G_{yx}(S) & G_{yy}(S) & G_{yz}(S) \end{pmatrix}$	X - axis, Y - axis, Z - axis $\begin{pmatrix} a_{ix}(t) & a_{iy}(t) & a_{iz}(t) \end{pmatrix}$	Y - axis, Z-axis
3	$\begin{pmatrix} G_{zx}(S) & G_{zy}(S) & G_{zz}(S) \\ G_{yx}(S) & G_{yy}(S) & G_{yz}(S) \\ G_{xx}(S) & G_{xy}(S) & G_{xz}(S) \end{pmatrix}$	X - axis, Y - axis, Z - axis $\begin{pmatrix} a_{ix}(t) & a_{iy}(t) & a_{iz}(t) \end{pmatrix}$	X-axis, Y-axis, Z-axis

$G_{zx}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the X-axis and the Z-axis output.

$G_{zy}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the Y-axis and the Z-axis output.

$G_{zz}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the Z-axis and the Z-axis output.

$G_{yx}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the X-axis and the Y-axis output.

$G_{yy}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the Y-axis and the Y-axis output.

$G_{yz}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the Z-axis and the Y-axis output.

$G_{xx}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the X-axis and the X-axis output.

$G_{xy}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the Y-axis and the X-axis output.

$G_{xz}(S)$: Transfer function describing the relationship between input acceleration along the Z-axis and the X-axis output.

Expression (A.36) is derived by considering the general situation where the input acceleration is not along the input axis of the one axis accelerometer.

$$a_{oz}(t) = a_{oz}(t) \Big|_{\text{contribution by X-axis component}} + a_{oz}(t) \Big|_{\text{contribution by Y-axis component}} + a_{oz}(t) \Big|_{\text{contribution by X-axis component}} \quad (\text{A.36})$$

where $a_{oz}(t)$ is the output along the Z-axis of the one-axis accelerometer. Expression (A.36) means that the output along Z-axis is the sum of the input along the input axis of X, Y and Z. Assuming the amplitude of the input acceleration as $a_i(t)$ and Laplace transformation of Expression (A.36) lead to the Expression (A.37).

$$\frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_i(t)]} = \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_{ix}(t)]} \cdot \frac{L[a_{ix}(t)]}{L[a_i(t)]} + \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_{iy}(t)]} \cdot \frac{L[a_{iy}(t)]}{L[a_i(t)]} + \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_{iz}(t)]} \cdot \frac{L[a_{iz}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.37})$$

Expression (A.37) can be rewritten as Expression (A.38):

$$G_{zx}(S) \cos \alpha + G_{zy}(S) \cos \beta + G_{zz}(S) \cos \gamma = \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.38})$$

The excitations are carried out three times and the subscripts 1, 2 and 3 correspond to the first time, the second time and the third time. Introduction of subscripts 1, 2 and 3 to Expression (A.38) leads to the Equations (A.39):

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{zx}(S) \\ G_{zy}(S) \\ G_{zz}(S) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (\text{A.39})$$

The equations (A.39) can be solved under the condition that the determinant of the coefficient matrix is not zero as shown by (A.40):

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (\text{A.40})$$

The physical meaning of condition (A.40) is that the three input shock accelerations are linearly independent, i.e. three direction cosine vectors $(\cos \alpha_1 \cos \beta_1 \cos \gamma_1)$, $(\cos \alpha_2 \cos \beta_2 \cos \gamma_2)$ and $(\cos \alpha_3 \cos \beta_3 \cos \gamma_3)$ are linearly independent. See also Table A.3.

A.2.2.2.1.2 Two-axis accelerometers

It is assumed that the outputs of the target accelerometer are from Y-axis and Z-axis as shown in Table A.4. As for the normal sensitivities and cross-sensitivities of level 1 two-axis accelerometers, the theory stated in A.2.2.2.1.1 is applied to the Y-axis and the Z-axis.

As for the two-axis accelerometer with the level that differs from level 1, the transfer function shall be derived in the form of a matrix. The expression similar to Expression (A.38) holds in terms of Y-axis output as follows:

$$G_{yx}(S)\cos \alpha + G_{yy}(S)\cos \beta + G_{yz}(S)\cos \gamma = \frac{L[a_{oy}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.41})$$

The relationship between the input and output signals is articulated by Expression (A.38), and Expression (A.41). The subscripts 1, 2 and 3 correspond to the excitation of the first time, the second time and the third time, respectively. The application of the shock acceleration to the target accelerometer three times leads to the simultaneous linear Equations (A.42):

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{yx}(S) \\ G_{yy}(S) \\ G_{yz}(S) \\ G_{zx}(S) \\ G_{zy}(S) \\ G_{zz}(S) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{oy1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oy2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oy3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (\text{A.42})$$

Exchanging rows of the coefficient matrix in the Equations (A.42) will change the expression as shown in the Equations (A.43). Therefore, the solution of (A.42) is derived under the condition that the three direction cosine vectors are linearly independent as shown by (A.40).

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}^2 \quad (\text{A.43})$$

A.2.2.2.1.3 Three-axis accelerometers

It is assumed that the outputs of the target accelerometer are from X-axis and Y-axis and Z-axis as shown in Table A.4. As for the normal sensitivities and the cross-sensitivities of level 1 three-axis accelerometers, the theory stated in A.2.2.2.1.1 is applied to X-axis, Y-axis and Z-axis.

For the three-axis accelerometer, with the level that is different from level 1, the transfer function shall be derived in the form of a matrix. The expression similar to Expression (A.38) holds in terms of the X-axis output as follows:

$$G_{xx}(S)\cos \alpha + G_{xy}(S)\cos \beta + G_{xz}(S)\cos \gamma = \frac{L[a_{ox}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.44})$$

The relationship between the input and the output signals is expressed by Expressions (A.38), (A.41) and (A.44). The subscripts 1, 2 and 3 correspond to the first time, the second time and the third time, respectively. The application of the shock acceleration to the target accelerometer three times leads to Equations (A.45):

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{X}_3 = \mathbf{b}_3 \quad (\text{A.45})$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.46})$$

$$\mathbf{X}_3 = \begin{pmatrix} G_{xx}(S) \\ G_{xy}(S) \\ G_{xz}(S) \\ G_{yx}(S) \\ G_{yy}(S) \\ G_{yz}(S) \\ G_{zx}(S) \\ G_{zy}(S) \\ G_{zz}(S) \end{pmatrix} \quad (\text{A.47})$$

$$\mathbf{b}_3 = \begin{pmatrix} L[a_{ox1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oy1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{ox2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oy2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{ox3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oy3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (\text{A.48})$$

Exchanging rows of the coefficient matrix in Expression (A.46) will change the expression of the determinant as shown in Expression (A.49). Therefore, the solution of (A.42) is derived under the condition that the three direction cosine vectors are linearly independent as shown by (A.40).

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} \quad (\text{A.49})$$

$$= - \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}^3$$

A.2.2.2 Calibration using a one-dimensional impact exciter

One-dimensional impact exciter stands for a one-axis vibration table with either vertical or horizontal motion direction and a high impact acceleration generation based on the reflection of elastic waves.

A.3 Influence of gravity acceleration

Though it is not written explicitly, it should be noted that each element of the sensitivity matrix is dependent on gravity acceleration particularly when the target accelerometer is of DC type with high sensitivity. Controlling the angle between the direction of the input acceleration to the target accelerometer and the gravity acceleration could clarify this influence, as long as the direction of the input acceleration to the target accelerometer is kept the same. Mechanical mount for fixing accelerometers could be used in a system using the shock acceleration or vibration generators. The system is normally only applicable to AC accelerometers, unless the influence of the gravity acceleration can be controlled.

A.4 Relation between traditional sensitivity and matrix sensitivity

A.4.1 Traditional descriptions of sensitivities

The normal sensitivity of a one-axis accelerometer is calibrated using a one-axis vibration table with the alignment that the sensitivity axis of the accelerometer is aligned with the

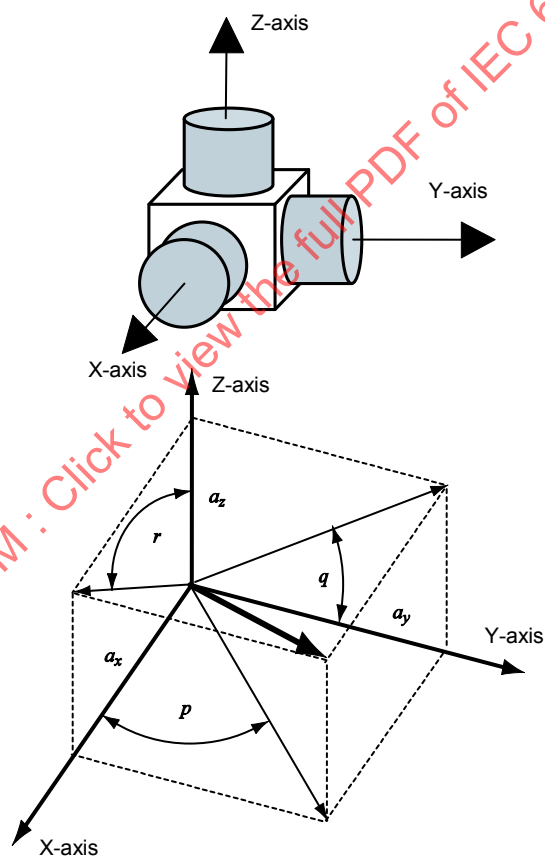
motion axis of the one-axis vibration table. ISO 5347-11:1993 states the procedures of deriving the sensitivity caused by the transverse motion as follows:

- Vibrate the pick-up at the reference amplitude and frequency in its sensing axis to determine its sensitivity.
- Determine the maximum and minimum values for transverse sensitivity by vibrating perpendicularly to the main axis of the pick-up.
- Then check the transverse response at different frequencies by frequency sweeping. The directions and magnitude of the maximum and minimum transverse responses shall be reported at the reference frequency.

It should be noted that the normal sensitivity is separated from the transverse sensitivity in both theory and practice in the traditional descriptions.

A.4.2 Comparison of matrix sensitivities with traditional descriptions

Figure A.2 shows accelerometers or pick-offs assembled in a normal co-ordinate system (top figure) and the acceleration component projection to the three co-ordinate axis plains, XY, YZ and ZX (bottom figure).



IEC 072/11

Figure A.2 – Accelerometers or pick-offs assembled in a normal co-ordinate system (top figure) and the acceleration component projection to the three co-ordinate axis plains, XY, YZ and ZX (bottom figure)

The following is the definition of cross-axis sensitivities as a mathematical expression:

$$\varepsilon_{x,\text{cross-axis}} = \text{MAX}\{\varepsilon_x(q)\}_{0 \leq q \leq 2\pi} \quad (\text{A.50})$$

$$\varepsilon_{y,\text{cross-axis}} = \text{MAX}\{\varepsilon_y(r)\}_{0 \leq r \leq 2\pi} \quad (\text{A.51})$$

$$\varepsilon_{z,\text{cross-axis}} = \text{MAX}\{\varepsilon_z(p)\}_{0 \leq p \leq 2\pi} \quad (\text{A.52})$$

where

$\varepsilon_{x,\text{cross-axis}}$ is the cross-axis sensitivity with accelerometer sensitivity of X direction and transverse motion input in YZ-plane as a function of q ,

$\varepsilon_{y,\text{cross-axis}}$ is the cross-axis sensitivity with accelerometer sensitivity of Y direction and transverse motion input in ZX-plane as a function of r ,

$\varepsilon_{z,\text{cross-axis}}$ is the cross-axis sensitivity with accelerometer sensitivity of Z direction and transverse motion input in XY-plane as a function of p ,

ε_x is the cross-sensitivity as a function of q ,

ε_y is the cross-sensitivity as a function of r ,

ε_z is the cross-sensitivity as a function of p .

The following expressions are derived for the relations between input acceleration and the output signals using the definitions of the cross-sensitivities when the sinusoidal acceleration is applied:

$$V_{ox} = S_x(a_{ix} + \varepsilon_x \sqrt{a_{iy}^2 + a_{iz}^2}) \quad (\text{A.53})$$

$$V_{oy} = S_y(a_{iy} + \varepsilon_y \sqrt{a_{iz}^2 + a_{ix}^2}) \quad (\text{A.54})$$

$$V_{oz} = S_z(a_{iz} + \varepsilon_z \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2}) \quad (\text{A.55})$$

On the other hand, contribution of cross-sensitivities in the matrix sensitivity to the output signal along the X-axis is formulated as follows:

$$\begin{aligned} S_{xy}a_{i,1,y} + S_{xz}a_{i,1,z} &= S_{xy}\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2} \cos q + S_{xz}\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2} \sin q \\ &= \sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2} \sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2} \cos(q - q_m) \\ \cos q &= \frac{a_{i,1,y}}{\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2}}, \quad \sin q = \frac{a_{i,1,z}}{\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2}} \\ \cos q_m &= \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2}}, \quad \sin q_m = \frac{S_{xz}}{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2}} \end{aligned} \quad (\text{A.56})$$

Comparison between Expressions (A.53) and (A.56) leads to following expression:

$$\varepsilon_x = \frac{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2}}{S_{xx}} \cos(q - q_m) \quad (\text{A.57})$$

In Expression (A.57), the relationship $S_x = S_{xx}$ is used. The procedures shown in Expression (A.57) provide the following expressions:

$$\varepsilon_y = \frac{\sqrt{S_{yz}^2 + S_{yx}^2}}{S_{yy}} \cos(r - r_m) \quad (\text{A.58})$$

$$\cos r = \frac{a_{i,1,z}}{\sqrt{a_{i,1,z}^2 + a_{i,1,x}^2}}, \sin r = \frac{a_{i,1,x}}{\sqrt{a_{i,1,z}^2 + a_{i,1,x}^2}} \quad (\text{A.59})$$

$$\cos r_m = \frac{S_{yz}}{\sqrt{S_{yz}^2 + S_{yx}^2}}, \sin r_m = \frac{S_{yx}}{\sqrt{S_{yz}^2 + S_{yx}^2}} \quad (\text{A.60})$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}}{S_{zz}} \cos(p - p_m) \quad (\text{A.61})$$

$$\cos r = \frac{a_{i,1,x}}{\sqrt{a_{i,1,x}^2 + a_{i,1,y}^2}}, \sin r = \frac{a_{i,1,y}}{\sqrt{a_{i,1,x}^2 + a_{i,1,y}^2}} \quad (\text{A.62})$$

$$\cos r_m = \frac{S_{zx}}{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}}, \sin r_m = \frac{S_{zy}}{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}} \quad (\text{A.63})$$

It is easily understood from Expressions (A.57), (A.58) and (A.61) that the cross-sensitivity by conventional definition shows the figure of eight if it is drawn as a function of argument, p , q , r in the polar co-ordinate system.

A.4.3 Errors

If an accelerometer is used for the measurement of acceleration as a vector quantity, the sensitivity should be defined as a matrix. Therefore the scaling between the acceleration detection device and the accelerometer output should be the multiplication of the inverse sensitivity matrix to the first stage output signal from the acceleration detection devices. Level 2, level 3 or level 4 accelerometers will be realised using the embedded inverse sensitivity matrix multiplication circuits. If the direction of motion is predetermined, or could be known *a priori*, level 1 accelerometers are used. If the demand on the accuracy is not strict, it is reasonable to measure acceleration as a vector quantity using level 1 accelerometers. Since the cross-axis sensitivity is disregarded in the utilization of level 1 accelerometers, it is important to know the errors.

$$\begin{pmatrix} S_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{ix} \exp(j\omega t) \\ a_{iy} \exp(j\omega t) \\ a_{iz} \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (\text{A.64})$$

Expression (A.64) explains the process of measuring the acceleration as a vector using the level 1 accelerometers. The error of the acceleration amplitude, $Error_M$, introduced by disregarding the cross-sensitivity is articulated by the following expressions:

$$Error_M = \frac{\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2} - \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2}}{\sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2}} \quad (A.65)$$

$$M_1 = \left(a_{ix} + \frac{S_{xy}}{S_{xx}} a_{iy} + \frac{S_{xz}}{S_{xx}} a_{iz} \right) \quad (A.66)$$

$$M_2 = \left(\frac{S_{yx}}{S_{yy}} a_{ix} + a_{iy} + \frac{S_{yz}}{S_{yy}} a_{iz} \right) \quad (A.67)$$

$$M_3 = \left(\frac{S_{zx}}{S_{zz}} a_{ix} + \frac{S_{zy}}{S_{zz}} a_{iy} + a_{iz} \right) \quad (A.68)$$

Consideration of the direction cosine changes Expressions (A.65) to (A.68) as follows:

$$Error_M = \sqrt{M_{1c}^2 + M_{2c}^2 + M_{3c}^2} - 1 \quad (A.69)$$

$$M_{1c} = \left(\cos \alpha + \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \cos \beta + \frac{S_{xz}}{S_{xx}} \cos \gamma \right) \quad (A.70)$$

$$M_{2c} = \left(\frac{S_{yx}}{S_{yy}} \cos \alpha + \cos \beta + \frac{S_{yz}}{S_{yy}} \cos \gamma \right) \quad (A.71)$$

$$M_{3c} = \left(\frac{S_{zx}}{S_{zz}} \cos \alpha + \frac{S_{zy}}{S_{zz}} \cos \beta + \cos \gamma \right) \quad (A.72)$$

Expression (A.69) states that the error is a function of the direction of motion.

A.4.4 Generalization of the transverse sensitivity using the vector space concept

As Clause A.2 shows, the number of columns of the sensitivity matrix stands for the dimension of the vector space in which the accelerometer is calibrated. On the other hand, the number of rows of the sensitivity matrix stands for the number of the output axis. This subclause generalizes the transverse sensitivity stated in A.4.2 and in ISO 5347-11:1993.

Table A.5 gives the definition of vector space and symbols for sensitivities as they relate, in general.

Table A.5 – Definition of vector space related to the generalization of the transverse sensitivity using the vector space concept

Symbol		Definition
W_m		Dimension of the vector space in which the acceleration as an input to the target accelerometer is defined
W_1		Vector space of the acceleration corresponding to the specified output axis of the target accelerometer. The ratio between the acceleration in this space and the output signal from the specified output axis is normal sensitivity
W_{m-1}		Vector space of the acceleration that is orthogonal to W_1
$a_{o,W1} \times \exp(j\omega t)$		Output signal from the specified output axis induced by the acceleration $\mathbf{a}_{in,1} \times \exp(j\omega t)$ as an element of the space, W_1
$a_{o,wm-1} \times \exp(j\omega t)$		Output signal from the specified output axis induced by the acceleration $\mathbf{a}_{in,wm-1} \times \exp(j\omega t)$ as an element of the space, W_{m-1}
sensitivities	S_N	Normal sensitivity due to the input acceleration in W_1
	S_C	Cross-sensitivity due to the input acceleration in W_{m-1}
	S_T	Transverse sensitivity due to the input acceleration in W_{m-1}

The following expressions hold according to Table A.5:

$$|S_N| = \frac{|a_{o,W1}|}{|a_{in,1}|} \quad (\text{A.73})$$

$$|S_C| = \frac{|a_{o,W1}|}{|a_{in,wm-1}|} \quad (\text{A.74})$$

$$S_{T,max} = \frac{\max |S_C|_{\text{input}=\mathbf{a} \in W_{m-1}}}{|S_N|} \quad (\text{A.75})$$

$$S_{T,min} = \frac{\min |S_C|_{\text{input}=\mathbf{a} \in W_{m-1}}}{|S_N|} \quad (\text{A.76})$$

Expression (A.73) stands for the sensitivity defined along the sensitivity axis, the same as the traditional definition. Expression (A.74) stands for the definition of the cross-sensitivity in which the plain normal to the sensitivity axis appearing in the conventional definition is generalized to the vector space W_{m-1} orthogonal to the vector space, W_1 . Expressions (A.75) and (A.76) are the generalization of the conventional definition of transverse sensitivity, because the maximum and the minimum of the cross-sensitivity are normalized by the normal sensitivity due to the input acceleration in W_1 . The same idea can be applied to the generalization of the shock transverse sensitivity by the vector space.

A.5 Expansion to six-axis accelerometers

A.5.1 Dimension of the vector space for calibration of accelerometers

A set of motions generated by a machine for calibration creates a vector space where a target accelerometer is calibrated. Since the maximum dimension of the vector space in engineering is six, it should be considered whether accelerometers can be calibrated in the vector space with six dimensions. When the dimension of the calibration vector space is larger than the dimension of the vector space where the target accelerometer is normally used, the influence of motion not considered in a normal situation on the output of the accelerometer can be clarified. This is the generalization of the conventional transverse sensitivity of the one-axis, piezo-electric accelerometers. This clause formalizes the calibration using the six-dimensional vibration table.

A.5.2 Sensitivity matrix of one-axis accelerometers

The sensitivity matrix S_{16} of one-axis accelerometers defined in the six-dimension calibration acceleration vector space is expressed as follows:

$$S_{16} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{xy} \end{pmatrix} \quad (A.77)$$

It is assumed that the output axis is the X-axis. X, Y and Z temporarily stand for the coordinate axis expressing the translational motion. α , β and γ also temporarily stand for the coordinate axis expressing the rotational motion. The calibration of accelerometers of level 4 is to derive all of the components in S_{16} as a function of frequency. The subscript 1 of S_{16} means that a target accelerometer is one axis type. The subscript 6 of S_{16} means that the calibration is carried out in the vector space with the dimension six. If the dimension of the input acceleration vector space is 4 with three degrees of freedom of translational motion and one degree of freedom of rotational motion along the α -axis, $S_{x\alpha}$ might be called an explicit cross-sensitivity and $S_{x\beta}$ and S_{xy} could be called implicit cross-sensitivities. Therefore, one-axis accelerometers defined in six-dimensional vector space possess one normal sensitivity and five implicit cross-sensitivities. At the specified frequency f_i , six linearly independent acceleration vectors can be generated:

$$\mathbf{a}_{i,1} = \begin{pmatrix} a_{i,1,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,1,x} \\ a_{i,1,y} \\ a_{i,1,z} \\ a_{i,1,\alpha} \\ a_{i,1,\beta} \\ a_{i,1,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,1}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (A.78)$$

$$\mathbf{a}_{i,2} = \begin{pmatrix} a_{i,2,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,2,x} \\ a_{i,2,y} \\ a_{i,2,z} \\ a_{i,2,\alpha} \\ a_{i,2,\beta} \\ a_{i,2,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,2}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (A.79)$$

$$\mathbf{a}_{i,3} = \begin{pmatrix} a_{i,3,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,3,x} \\ a_{i,3,y} \\ a_{i,3,z} \\ a_{i,3,\alpha} \\ a_{i,3,\beta} \\ a_{i,3,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,3}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.80})$$

$$\mathbf{a}_{i,4} = \begin{pmatrix} a_{i,4,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,4,x} \\ a_{i,4,y} \\ a_{i,4,z} \\ a_{i,4,\alpha} \\ a_{i,4,\beta} \\ a_{i,4,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,4}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.81})$$

$$\mathbf{a}_{i,5} = \begin{pmatrix} a_{i,5,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,5,x} \\ a_{i,5,y} \\ a_{i,5,z} \\ a_{i,5,\alpha} \\ a_{i,5,\beta} \\ a_{i,5,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,5}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.82})$$

$$\mathbf{a}_{i,6} = \begin{pmatrix} a_{i,6,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,6,x} \\ a_{i,6,y} \\ a_{i,6,z} \\ a_{i,6,\alpha} \\ a_{i,6,\beta} \\ a_{i,6,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,6}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.83})$$

The superscript, T, stands for a transpose operation. The transposed column vector is a row vector and the transposed row vector is a column vector.

Table A.6 – Relation between input acceleration and output signal for the calibration, using the six-dimensional vibration table

Term		First	Second	Third	Fourth	Fifth	Sixth
Input		$\mathbf{a}_{i,1}$	$\mathbf{a}_{i,2}$	$\mathbf{a}_{i,3}$	$\mathbf{a}_{i,4}$	$\mathbf{a}_{i,5}$	$\mathbf{a}_{i,6}$
Symbol of output signal and Number of output axes	1	$\mathbf{b}_{1,1}$	$\mathbf{b}_{1,2}$	$\mathbf{b}_{1,3}$	$\mathbf{b}_{1,4}$	$\mathbf{b}_{1,5}$	$\mathbf{b}_{1,6}$
	2	$\mathbf{b}_{2,1}$	$\mathbf{b}_{2,2}$	$\mathbf{b}_{2,3}$	$\mathbf{b}_{2,4}$	$\mathbf{b}_{2,5}$	$\mathbf{b}_{2,6}$
	3	$\mathbf{b}_{3,1}$	$\mathbf{b}_{3,2}$	$\mathbf{b}_{3,3}$	$\mathbf{b}_{3,4}$	$\mathbf{b}_{3,5}$	$\mathbf{b}_{3,6}$
	4	$\mathbf{b}_{4,1}$	$\mathbf{b}_{4,2}$	$\mathbf{b}_{4,3}$	$\mathbf{b}_{4,4}$	$\mathbf{b}_{4,5}$	$\mathbf{b}_{4,6}$
	5	$\mathbf{b}_{5,1}$	$\mathbf{b}_{5,2}$	$\mathbf{b}_{5,3}$	$\mathbf{b}_{5,4}$	$\mathbf{b}_{5,5}$	$\mathbf{b}_{5,6}$
	6	$\mathbf{b}_{6,1}$	$\mathbf{b}_{6,2}$	$\mathbf{b}_{6,3}$	$\mathbf{b}_{6,4}$	$\mathbf{b}_{6,5}$	$\mathbf{b}_{6,6}$

The output signals from the target accelerometer in the six-dimensional vector space in Table A.6, $\mathbf{b}_{1,k}$, $\mathbf{b}_{2,k}$, $\mathbf{b}_{3,k}$, $\mathbf{b}_{4,k}$, $\mathbf{b}_{5,k}$ and $\mathbf{b}_{6,k}$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) are expressed as shown below. It should be noted that the vectors $\mathbf{b}_{1,k}^m$, $\mathbf{b}_{2,k}^m$, $\mathbf{b}_{3,k}^m$, $\mathbf{b}_{4,k}^m$, $\mathbf{b}_{5,k}^m$ and $\mathbf{b}_{6,k}^m$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) are all complex vectors for the following reasons:

- the amplitude of the output signal of the target accelerometer decreases as the frequency goes up;
- the phase delay of the output signal from the target accelerometer increases as the frequency goes up;
- the time dependency is only expressed by the term $\exp(j2\pi f_i t)$ and shared in the input side and the output side.

$$\mathbf{b}_{1,k} = b_{1,1,k} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{1,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.84}$$

$$\mathbf{b}_{2,k} = \begin{pmatrix} b_{2,1,k} \\ b_{2,2,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{2,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.85}$$

$$\mathbf{b}_{3,k} = \begin{pmatrix} b_{3,1,k} \\ b_{3,2,k} \\ b_{3,3,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{3,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.86}$$

$$\mathbf{b}_{4,k} = \begin{pmatrix} b_{4,1,k} \\ b_{4,2,k} \\ b_{4,3,k} \\ b_{4,4,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{4,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.87}$$

$$\mathbf{b}_{5,k} = \begin{pmatrix} b_{5,1,k} \\ b_{5,2,k} \\ b_{5,3,k} \\ b_{5,4,k} \\ b_{5,5,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{5,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.88}$$

$$\mathbf{b}_{6,k} = \begin{pmatrix} b_{6,1,k} \\ b_{6,2,k} \\ b_{6,3,k} \\ b_{6,4,k} \\ b_{6,5,k} \\ b_{6,6,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{6,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.89}$$

From the Expression (A.77) and Table A.6, the following six equations are derived:

$$\mathbf{S}_{16} \mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{b}_{1,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad \text{A.90}$$

Deleting the exponential terms that appear on both sides in Equations (A.90) leads to the following equations:

$$S_{xx}a_{i,1,x}^m + S_{xy}a_{i,1,y}^m + S_{xz}a_{i,1,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,1,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,1,\beta}^m + S_{xy}a_{i,1,\gamma}^m = b_{1,1}^m \quad (\text{A.91})$$

$$S_{xx}a_{i,2,x}^m + S_{xy}a_{i,2,y}^m + S_{xz}a_{i,2,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,2,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,2,\beta}^m + S_{xy}a_{i,2,\gamma}^m = b_{1,2}^m \quad (\text{A.92})$$

$$S_{xx}a_{i,3,x}^m + S_{xy}a_{i,3,y}^m + S_{xz}a_{i,3,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,3,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,3,\beta}^m + S_{xy}a_{i,3,\gamma}^m = b_{1,3}^m \quad (\text{A.93})$$

$$S_{xx}a_{i,4,x}^m + S_{xy}a_{i,4,y}^m + S_{xz}a_{i,4,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,4,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,4,\beta}^m + S_{xy}a_{i,4,\gamma}^m = b_{1,4}^m \quad (\text{A.94})$$

$$S_{xx}a_{i,5,x}^m + S_{xy}a_{i,5,y}^m + S_{xz}a_{i,5,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,5,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,5,\beta}^m + S_{xy}a_{i,5,\gamma}^m = b_{1,5}^m \quad (\text{A.95})$$

$$S_{xx}a_{i,6,x}^m + S_{xy}a_{i,6,y}^m + S_{xz}a_{i,6,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,6,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,6,\beta}^m + S_{xy}a_{i,6,\gamma}^m = b_{1,6}^m \quad (\text{A.96})$$

Rewriting Equations (A.91) to (A.96) as simultaneous linear equations on all of the components of the sensitivity matrix for one-axis accelerometers gives the following equations:

$$\mathbf{A}_{16} \mathbf{x}_{16} = \mathbf{B}_{16} \quad (\text{A.97})$$

$$\mathbf{A}_{16} = \begin{pmatrix} a_{i,1}^m \\ a_{i,2}^m \\ a_{i,3}^m \\ a_{i,4}^m \\ a_{i,5}^m \\ a_{i,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.98})$$

$$\mathbf{x}_{16} = \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{x\alpha} \\ S_{x\beta} \\ S_{xy} \end{pmatrix} = \left((S_{xx} \ S_{xy} \ S_{xz} \ S_{x\alpha} \ S_{x\beta} \ S_{xy})^T \right) \quad (\text{A.99})$$

$$\mathbf{B}_{16} = \begin{pmatrix} b_{1,1}^m \\ b_{1,2}^m \\ b_{1,3}^m \\ b_{1,4}^m \\ b_{1,5}^m \\ b_{1,6}^m \end{pmatrix} = \left(\mathbf{b}_{1,k}^m \right) \quad (\text{A.100})$$

It should be noted that A_{16} is a 6×6 square matrix and that x_{16} and B_{16} are both 6×1 column vectors. Since the vectors $a_{i,1}^m$, $a_{i,2}^m$, $a_{i,3}^m$, $a_{i,4}^m$, $a_{i,5}^m$ and $a_{i,6}^m$ are linearly independent and the determinant of the coefficient matrix is not zero, it is apparent that the solution exists in the Equations (A.97). The calibration of one-axis accelerometers in the six-dimensional vector space is mathematically possible.

NOTE 1 It should be noted that the formalization is similar even when the X-axis is an axis showing the rotation.

NOTE 2 The significance of implicit cross-sensitivities cannot be overemphasized when the real vector space where the accelerometers are used deviates from the vector space considered in the design.

NOTE 3 The concepts such as implicit cross-sensitivities and explicit cross-sensitivities hold even when the dimension of the vector space for the calibration is three.

A.5.3 Sensitivity matrix of two-axis accelerometers

The sensitivity matrix S_{26} of two-axis accelerometers defined in the six-dimension calibration acceleration vector space is expressed as follows:

$$S_{26} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{yy} \end{pmatrix} \quad (A.101)$$

In Expression (A.101), the X-axis and Y-axis are temporarily selected as output axes. Two-axis accelerometers defined in six-dimensional vector space possess two normal sensitivities, two explicit cross-sensitivities and eight implicit cross-sensitivities. At the specified frequency f_i , six linearly independent acceleration vectors can be generated. From the Expression (A.101), Expressions (A.78) to (A.83) and Table A.6, the following six equations are derived:

$$S_{26}a_{i,k} = b_{2,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (A.102)$$

Deleting the exponential terms on both sides of the Equations (A.102) and writing equations term by term lead to the following Equations (A.103) to (A.114):

$$S_{xx}a_{i,1,x}^m + S_{xy}a_{i,1,y}^m + S_{xz}a_{i,1,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,1,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,1,\beta}^m + S_{xy}a_{i,1,\gamma}^m = b_{2,1,1} \quad (A.103)$$

$$S_{yx}a_{i,1,x}^m + S_{yy}a_{i,1,y}^m + S_{yz}a_{i,1,z}^m + S_{y\alpha}a_{i,1,\alpha}^m + S_{y\beta}a_{i,1,\beta}^m + S_{yy}a_{i,1,\gamma}^m = b_{2,2,1} \quad (A.104)$$

$$S_{xx}a_{i,2,x}^m + S_{xy}a_{i,2,y}^m + S_{xz}a_{i,2,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,2,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,2,\beta}^m + S_{xy}a_{i,2,\gamma}^m = b_{2,1,2} \quad (A.105)$$

$$S_{yx}a_{i,2,x}^m + S_{yy}a_{i,2,y}^m + S_{yz}a_{i,2,z}^m + S_{y\alpha}a_{i,2,\alpha}^m + S_{y\beta}a_{i,2,\beta}^m + S_{yy}a_{i,2,\gamma}^m = b_{2,2,2} \quad (A.106)$$

$$S_{xx}a_{i,3,x}^m + S_{xy}a_{i,3,y}^m + S_{xz}a_{i,3,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,3,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,3,\beta}^m + S_{xy}a_{i,3,\gamma}^m = b_{2,1,3} \quad (A.107)$$

$$S_{yx}a_{i,3,x}^m + S_{yy}a_{i,3,y}^m + S_{yz}a_{i,3,z}^m + S_{y\alpha}a_{i,3,\alpha}^m + S_{y\beta}a_{i,3,\beta}^m + S_{yy}a_{i,3,\gamma}^m = b_{2,2,3} \quad (A.108)$$

$$S_{xx}a_{i,4,x}^m + S_{xy}a_{i,4,y}^m + S_{xz}a_{i,4,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,4,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,4,\beta}^m + S_{xy}a_{i,4,\gamma}^m = b_{2,1,4} \quad (A.109)$$

$$S_{yx}a_{i,4,x}^m + S_{yy}a_{i,4,y}^m + S_{yz}a_{i,4,z}^m + S_{y\alpha}a_{i,4,\alpha}^m + S_{y\beta}a_{i,4,\beta}^m + S_{y\gamma}a_{i,4,\gamma}^m = b_{2,2,4} \quad (\text{A.110})$$

$$S_{xx}a_{i,5,x}^m + S_{xy}a_{i,5,y}^m + S_{xz}a_{i,5,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,5,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,5,\beta}^m + S_{x\gamma}a_{i,5,\gamma}^m = b_{2,1,5} \quad (\text{A.111})$$

$$S_{yx}a_{i,5,x}^m + S_{yy}a_{i,5,y}^m + S_{yz}a_{i,5,z}^m + S_{y\alpha}a_{i,5,\alpha}^m + S_{y\beta}a_{i,5,\beta}^m + S_{y\gamma}a_{i,5,\gamma}^m = b_{2,2,5} \quad (\text{A.112})$$

$$S_{xx}a_{i,6,x}^m + S_{xy}a_{i,6,y}^m + S_{xz}a_{i,6,z}^m + S_{x\alpha}a_{i,6,\alpha}^m + S_{x\beta}a_{i,6,\beta}^m + S_{x\gamma}a_{i,6,\gamma}^m = b_{2,1,6} \quad (\text{A.113})$$

$$S_{yx}a_{i,6,x}^m + S_{yy}a_{i,6,y}^m + S_{yz}a_{i,6,z}^m + S_{y\alpha}a_{i,6,\alpha}^m + S_{y\beta}a_{i,6,\beta}^m + S_{y\gamma}a_{i,6,\gamma}^m = b_{2,2,6} \quad (\text{A.114})$$

Equations (A.115) shows the formalization, using a matrix derived from Equations (A.103) to (A.114):

$$\mathbf{A}_{26} \mathbf{x}_{26} = \mathbf{B}_{26} \quad (\text{A.115})$$

$$\mathbf{A}_{26} = \begin{pmatrix} a_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,1}^m \\ a_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,2}^m \\ a_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,3}^m \\ a_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,4}^m \\ a_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,5}^m \\ a_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,6}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{261} \\ \mathbf{A}_{262} \\ \mathbf{A}_{263} \\ \mathbf{A}_{264} \\ \mathbf{A}_{265} \\ \mathbf{A}_{266} \end{pmatrix} \quad (\text{A.116})$$

$$\mathbf{0}_{16} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (\text{A.117})$$

$$\mathbf{A}_{261} = \begin{pmatrix} a_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,1}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.118})$$

$$\mathbf{A}_{262} = \begin{pmatrix} a_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,2}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.119})$$

$$\mathbf{A}_{263} = \begin{pmatrix} a_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & a_{i,3}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.120})$$

$$\mathbf{A}_{264} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.121})$$

$$\mathbf{A}_{265} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.122})$$

$$\mathbf{A}_{266} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.123})$$

$$\mathbf{x}_{26} = \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{x\alpha} \\ S_{x\beta} \\ S_{xy} \\ S_{yx} \\ S_{yy} \\ S_{yz} \\ S_{y\alpha} \\ S_{y\beta} \\ S_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{xy})^T \\ (S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{yy})^T \end{pmatrix} \quad (\text{A.124})$$

$$\mathbf{B}_{26} = \begin{pmatrix} b_{2,1,1} \\ b_{2,2,1} \\ b_{2,1,2} \\ b_{2,2,2} \\ b_{2,1,3} \\ b_{2,2,3} \\ b_{2,1,4} \\ b_{2,2,4} \\ b_{2,1,5} \\ b_{2,2,5} \\ b_{2,1,6} \\ b_{2,2,6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{2,1}^m \\ \mathbf{b}_{2,2}^m \\ \mathbf{b}_{2,3}^m \\ \mathbf{b}_{2,4}^m \\ \mathbf{b}_{2,5}^m \\ \mathbf{b}_{2,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.125})$$

$\mathbf{A}_{26}$, $\mathbf{x}_{26}$ and $\mathbf{B}_{26}$ form a 12×12 square matrix, a 12×1 column vector and a 12×1 column vector, respectively.

NOTE The X-axis and Y-axis output signals can stand for 1) two translational motions, 2) one translational motion and one rotational motion; and 3) two rotational motions.

The determinant of the coefficient matrix in the Equations (A.115) can be rewritten and evaluated by exchanging rows of $\mathbf{A}_{26}$ several times as follows:

$$\det(\mathbf{A}_{26}) = -\det \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{a}_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,3}^m \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m \end{pmatrix} = -\det \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} \end{pmatrix} = -[\det(\mathbf{A}_{16})]^2 \neq 0 \quad (\text{A.126})$$

$$\mathbf{0}_{66} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.127})$$

It is mathematically apparent that the solution of the Equations (A.115) exists, because the determinant of the coefficient matrix is not zero. The calibration of two-axis accelerometers in the six-dimensional vector space is mathematically possible.

NOTE The significance of implicit cross-sensitivities cannot be overemphasized when the real vector space where the accelerometers are used deviates from the vector space considered in the design.

A.5.4 Sensitivity matrix of three-axis accelerometers

The sensitivity matrix $\mathbf{S}_{36}$ of a three-axis accelerometer, defined in the six-dimension calibration acceleration vector space, is expressed as follows:

$$\mathbf{S}_{36} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{x\gamma} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{y\gamma} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} & S_{z\alpha} & S_{z\beta} & S_{z\gamma} \end{pmatrix} \quad (\text{A.128})$$

In Expression (A.128), the X-axis, Y-axis and Z-axis are temporarily selected as output axis. Three-axis accelerometers defined in six-dimensional vector space possess three normal sensitivities, six explicit cross-sensitivities and nine implicit cross-sensitivities. At the specified frequency f_i , six linearly independent acceleration vectors can be generated. From Expression (A.128), Expressions (A.78) to (A.83) and Table A.6, the following six equations are derived:

$$\mathbf{S}_{36} \mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{b}_{3,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.129})$$

Deleting the exponential terms on both sides of the Equations (A.129) leads to the Equations (A.130).

$$\mathbf{A}_{36}\mathbf{x}_{36} = \mathbf{B}_{36} \quad (\text{A.130})$$

$$\mathbf{A}_{36} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{361} \\ \mathbf{A}_{362} \\ \mathbf{A}_{363} \\ \mathbf{A}_{364} \\ \mathbf{A}_{365} \\ \mathbf{A}_{366} \end{pmatrix} \quad (\text{A.131})$$

$$\mathbf{A}_{361} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.132})$$

$$\mathbf{A}_{362} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.133})$$

$$\mathbf{A}_{363} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,3}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.134})$$

$$\mathbf{A}_{364} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.135})$$

$$\mathbf{A}_{365} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.136})$$

$$\mathbf{A}_{366} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.137})$$

$$\mathbf{x}_{36} = \begin{pmatrix} (S_{xx} \ S_{xy} \ S_{xz} \ S_{x\alpha} \ S_{x\beta} \ S_{xy})^T \\ (S_{yx} \ S_{yy} \ S_{yz} \ S_{y\alpha} \ S_{y\beta} \ S_{yy})^T \\ (S_{zx} \ S_{zy} \ S_{zz} \ S_{z\alpha} \ S_{z\beta} \ S_{zy})^T \end{pmatrix} \quad (\text{A.138})$$

$$\mathbf{B}_{36} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{3,1}^m \\ \mathbf{b}_{3,2}^m \\ \mathbf{b}_{3,3}^m \\ \mathbf{b}_{3,4}^m \\ \mathbf{b}_{3,5}^m \\ \mathbf{b}_{3,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.139})$$

$\mathbf{A}_{36}$, $\mathbf{x}_{36}$ and $\mathbf{B}_{36}$ form an 18×18 square matrix, an 18×1 column vector and an 18×1 column vector, respectively.

NOTE Any selection of the three output axes from six degrees of freedom does not make any essential difference to the description shown above.

The determinant of the coefficient matrix in the Equations (A.130) can be rewritten and evaluated by exchanging rows of $\mathbf{A}_{36}$ several times as follows:

$$\det(\mathbf{A}_{36}) = -\det \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} \end{pmatrix} = -[\det(\mathbf{A}_{16})]^3 \neq 0 \quad (\text{A.140})$$

It is mathematically apparent that the solution in the Equations (A.130) exists, because the determinant of the coefficient matrix is not zero. The calibration of three-axis accelerometers in the six-dimensional vector space is mathematically possible.

NOTE The significance of implicit cross-sensitivities cannot be overemphasized when the real vector space where the accelerometers are used deviates from the vector space considered in the design.

A.5.5 Sensitivity matrix of four-axis accelerometers

The sensitivity matrix $\mathbf{S}_{46}$ of the four-axis accelerometer, defined in the six-dimension calibration acceleration vector space, is expressed as follows:

$$\mathbf{S}_{46} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{x\gamma} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{y\gamma} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} & S_{z\alpha} & S_{z\beta} & S_{z\gamma} \\ S_{\alpha x} & S_{\alpha y} & S_{\alpha z} & S_{\alpha\alpha} & S_{\alpha\beta} & S_{\alpha\gamma} \end{pmatrix} \quad (\text{A.141})$$

In Expression (A.141), the X-axis, Y-axis, Z-axis, as well as the α -axis, are temporarily selected as output axes. Four-axis accelerometers defined in six-dimensional vector space possess four normal sensitivities, twelve explicit cross-sensitivities and eight implicit cross-sensitivities. At the specified frequency f_i , six linearly independent acceleration vectors can be generated. From Expression (A.141), Expressions (A.78) to (A.83) and Table A.6, the following six equations are derived:

$$\mathbf{S}_{46} \mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{b}_{4,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.142})$$

Deleting the exponential terms on both sides of the Equation (A.142) leads to the Equations (A.143):

$$\mathbf{A}_{46} \mathbf{x}_{46} = \mathbf{B}_{46} \quad (\text{A.143})$$

$$\mathbf{A}_{46} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{461} \\ \mathbf{A}_{462} \\ \mathbf{A}_{463} \\ \mathbf{A}_{464} \\ \mathbf{A}_{465} \\ \mathbf{A}_{466} \end{pmatrix} \quad (\text{A.144})$$

$$\mathbf{A}_{461} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.145})$$

$$\mathbf{A}_{462} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.146})$$

$$\mathbf{A}_{463} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,3}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,3}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.147})$$

$$\mathbf{A}_{464} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,4}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.148})$$

$$\mathbf{A}_{465} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,5}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.149})$$

$$\mathbf{A}_{466} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.150})$$

$$\mathbf{x}_{46} = \begin{pmatrix} (S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{xy})^T \\ (S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{yy})^T \\ (S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} & S_{z\alpha} & S_{z\beta} & S_{zy})^T \\ (S_{\alpha x} & S_{\alpha y} & S_{\alpha z} & S_{\alpha\alpha} & S_{\alpha\beta} & S_{\alpha\gamma})^T \end{pmatrix} \quad (\text{A.151})$$

$$\mathbf{B}_{46} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{4,1}^m \\ \mathbf{b}_{4,2}^m \\ \mathbf{b}_{4,3}^m \\ \mathbf{b}_{4,4}^m \\ \mathbf{b}_{4,5}^m \\ \mathbf{b}_{4,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.152})$$

$\mathbf{A}_{46}$, $\mathbf{x}_{46}$ and $\mathbf{B}_{46}$ form a 24×24 square matrix, a 24×1 column vector and a 24×1 column vector, respectively.

NOTE 1 Any selection of four output axes from six degrees of freedom does not make any essential difference to the description shown above.

The determinant of the coefficient matrix in the Equations (A.143) can be rewritten and evaluated by exchanging rows of $\mathbf{A}_{46}$ several times as follows:

$$\det(\mathbf{A}_{46}) = \det \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} \end{pmatrix} = [\det(\mathbf{A}_{16})]^4 \neq 0 \quad (\text{A.153})$$

It is mathematically apparent that the solution of the Equations (A.143) exists, because the determinant of the coefficient matrix is not zero. The calibration of four-axis accelerometers in six-dimensional vector space is mathematically possible.

NOTE 2 The significance of implicit cross-sensitivities cannot be overemphasized when the real vector space where the accelerometers are used deviates from the vector space considered in the design.

A.5.6 Sensitivity matrix of five-axis accelerometers

The sensitivity matrix $\mathbf{S}_{56}$ of five-axis accelerometer defined in the six-dimension calibration acceleration vector space is expressed as follows:

$$\mathbf{S}_{56} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{yy} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} & S_{z\alpha} & S_{z\beta} & S_{zy} \\ S_{\alpha x} & S_{\alpha y} & S_{\alpha z} & S_{\alpha\alpha} & S_{\alpha\beta} & S_{\alpha y} \\ S_{\beta x} & S_{\beta y} & S_{\beta z} & S_{\beta\alpha} & S_{\beta\beta} & S_{\beta y} \end{pmatrix} \quad (\text{A.154})$$

In Expression (A.154), the X-axis, Y-axis, Z-axis, as well as the α -axis and β -axis, are temporarily selected as output axes. Five-axis accelerometers defined in six-dimensional vector space possess five normal sensitivities, fifteen explicit cross-sensitivities and five implicit cross-sensitivities. At the specified frequency f_i , six linearly independent acceleration vectors can be generated. From Expression (A.154), Expressions (A.78) to (A.83) and Table A.6, the following six equations are derived:

$$\mathbf{S}_{56} \mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{b}_{5,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.155})$$

Deleting the exponential terms on both sides in the Equations (A.155) leads to the Equations (A.156):

$$\mathbf{A}_{56} \cdot \mathbf{x}_{56} = \mathbf{B}_{56} \quad (\text{A.156})$$

$$\mathbf{A}_{56} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{561} \\ \mathbf{A}_{562} \\ \mathbf{A}_{563} \\ \mathbf{A}_{564} \\ \mathbf{A}_{565} \\ \mathbf{A}_{566} \end{pmatrix} \quad (\text{A.157})$$

$$\mathbf{A}_{561} = \begin{pmatrix} a_{i,1}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & a_{i,1}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & a_{i,1}^m & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,1}^m & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,1}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.158})$$

$$\mathbf{A}_{562} = \begin{pmatrix} a_{i,2}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & a_{i,2}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & a_{i,2}^m & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,2}^m & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,2}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.159})$$

$$\mathbf{A}_{563} = \begin{pmatrix} a_{i,3}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & a_{i,3}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & a_{i,3}^m & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,3}^m & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,3}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.160})$$

$$\mathbf{A}_{564} = \begin{pmatrix} a_{i,4}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & a_{i,4}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & a_{i,4}^m & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,4}^m & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,4}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.161})$$

$$\mathbf{A}_{565} = \begin{pmatrix} a_{i,5}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & a_{i,5}^m & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & a_{i,5}^m & 0_{16} & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,5}^m & 0_{16} \\ 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & 0_{16} & a_{i,5}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.162})$$

$$\mathbf{A}_{566} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.163})$$

$$\mathbf{x}_{56} = \begin{pmatrix} (S_{xx} \ S_{xy} \ S_{xz} \ S_{x\alpha} \ S_{x\beta} \ S_{xy})^T \\ (S_{yx} \ S_{yy} \ S_{yz} \ S_{y\alpha} \ S_{y\beta} \ S_{yy})^T \\ (S_{zx} \ S_{zy} \ S_{zz} \ S_{z\alpha} \ S_{z\beta} \ S_{zy})^T \\ (S_{\alpha x} \ S_{\alpha y} \ S_{\alpha z} \ S_{\alpha\alpha} \ S_{\alpha\beta} \ S_{\alpha y})^T \\ (S_{\beta x} \ S_{\beta y} \ S_{\beta z} \ S_{\beta\alpha} \ S_{\beta\beta} \ S_{\beta y})^T \end{pmatrix} \quad (\text{A.164})$$

$$\mathbf{B}_{56} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{5,1}^m \\ \mathbf{b}_{5,2}^m \\ \mathbf{b}_{5,3}^m \\ \mathbf{b}_{5,4}^m \\ \mathbf{b}_{5,5}^m \\ \mathbf{b}_{5,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.165})$$

$\mathbf{A}_{56}$, $\mathbf{x}_{56}$ and $\mathbf{B}_{56}$ form a 30×30 square matrix, a 30×1 column vector and a 30×1 column vector, respectively.

NOTE Any selection of five output axes from six degrees of freedom does not make any essential difference to the description shown above.

The determinant of the coefficient matrix in the Equations (A.156) can be rewritten and evaluated by exchanging rows of $\mathbf{A}_{56}$ several times as follows:

$$\det(\mathbf{A}_{56}) = \det \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} \end{pmatrix} = [\det(\mathbf{A}_{16})]^5 \neq 0 \quad (\text{A.166})$$

It is mathematically apparent that the solution in the Equations (A.156) exists, because the determinant of the coefficient matrix is not zero. The calibration of five-axis accelerometers in six-dimensional vector space is mathematically possible.

NOTE The significance of implicit cross-sensitivities cannot be overemphasized when the real vector space where the accelerometers are used deviates from the vector space considered in the design.

A.5.7 Sensitivity matrix of six-axis accelerometers

The sensitivity matrix $\mathbf{S}_{66}$ of the six-axis accelerometer defined in the six-dimension calibration acceleration vector space is expressed as follows:

$$\mathbf{S}_{66} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{x\gamma} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} & S_{y\alpha} & S_{y\beta} & S_{y\gamma} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} & S_{z\alpha} & S_{z\beta} & S_{z\gamma} \\ S_{\alpha x} & S_{\alpha y} & S_{\alpha z} & S_{\alpha\alpha} & S_{\alpha\beta} & S_{\alpha\gamma} \\ S_{\beta x} & S_{\beta y} & S_{\beta z} & S_{\beta\alpha} & S_{\beta\beta} & S_{\beta\gamma} \\ S_{\gamma x} & S_{\gamma y} & S_{\gamma z} & S_{\gamma\alpha} & S_{\gamma\beta} & S_{\gamma\gamma} \end{pmatrix} \quad (\text{A.167})$$

Six-axis accelerometers defined in six-dimensional vector space possess six normal sensitivities and thirty explicit cross-sensitivities. At the specified frequency f_i , six linearly independent acceleration vectors can be generated. From Expression (A.167), Expressions (A.78) to (A.83) and Table A.6, the following six equations are derived:

$$\mathbf{S}_{66} \mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{b}_{6,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.168})$$

Deleting the exponential terms on both sides of the Equations (A.168) leads to the Equations (A.169):

$$\mathbf{A}_{66} \mathbf{x}_{66} = \mathbf{B}_{66} \quad (\text{A.169})$$

$$\mathbf{A}_{66} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{661} \\ \mathbf{A}_{662} \\ \mathbf{A}_{663} \\ \mathbf{A}_{664} \\ \mathbf{A}_{665} \\ \mathbf{A}_{666} \end{pmatrix} \quad (\text{A.170})$$

$$\mathbf{A}_{661} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,1}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.171})$$

$$\mathbf{A}_{662} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m & \mathbf{0}_{16} \\ \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{0}_{16} & \mathbf{a}_{i,2}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.172})$$

$$\mathbf{B}_{66} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{6,1}^m \\ \mathbf{b}_{6,2}^m \\ \mathbf{b}_{6,3}^m \\ \mathbf{b}_{6,4}^m \\ \mathbf{b}_{6,5}^m \\ \mathbf{b}_{6,6}^m \end{pmatrix} \quad (\text{A.178})$$

$\mathbf{A}_{66}$, $\mathbf{x}_{66}$ and $\mathbf{B}_{66}$ form a 36×36 square matrix, a 36×1 column vector and a 36×1 column vector, respectively. The determinant of the coefficient matrix in the Equations (A.169) can be rewritten and evaluated by exchanging rows of $\mathbf{A}_{66}$ several times as follows:

$$\det(\mathbf{A}_{66}) = -\det \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} & \mathbf{0}_{66} \\ \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{0}_{66} & \mathbf{A}_{16} \end{pmatrix} = -[\det(\mathbf{A}_{16})]^6 \neq 0 \quad (\text{A.179})$$

It is mathematically apparent that the solution of the Equations (A.169) exists, because the determinant of the coefficient matrix is not zero. The calibration of six-axis accelerometers in six-dimensional vector space is mathematically possible.

NOTE 1 It should be noted that implicit cross-sensitivity disappears when the number of the output-axis is six.

NOTE 2 The significance of implicit cross-sensitivities cannot be overemphasized when the real vector space where the accelerometers are used deviates from the vector space considered in the design.

The formalization of the sensitivity matrix has been shown for following accelerometers and the calibration vector space:

- One-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension three;
- Two-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension three;
- Three-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension three;
- One-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension six;
- Two-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension six;
- Three-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension six;
- Four-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension six;
- Five-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension six;
- Six-axis accelerometers in the calibration vector space with dimension six;

Formalization of the matrix sensitivity depends upon neither the selection of the number of the output axis nor the selection of the dimension of the calibration vector space. When the output axis number is smaller than the dimension of the calibration vector space, the sensitivity matrix is under-determined. When the output axis number is equal to the dimension of the calibration vector space, the sensitivity matrix is square. When the output axis number is larger than the dimension of the calibration vector space, the sensitivity matrix is over-determined. As long as the acceleration vectors selected in the calibration vector space and used to activate the target accelerometer are linearly independent, the sensitivity matrix can be derived from the sensitivity simultaneous linear equations.

A.5.8 Explicit cross-sensitivity and implicit cross-sensitivity

Explicit cross-sensitivity stands for the sensitivity defined between the acceleration component along the explicitly defined input acceleration axis and the defined output axis with the different name or symbol. On the other hand, implicit cross-sensitivity stands for the sensitivity defined between the acceleration component along the implicitly defined input acceleration axis and the defined output axis. The implicitly defined input acceleration axis exists in the vector space for calibration, but not in the application input acceleration vector space. The introduction of the implicit cross-sensitivity is inevitable in the following cases:

- The dimension of the vector space where an accelerometer is calibrated is larger than the real input acceleration vector space where the accelerometer is applied for the specific purpose.
- While the system with accelerometers achieves a motion in the larger dimensional vector space than in the design, for some reasons such as accidents or failure, the output of the accelerometers is influenced by the acceleration component along the input axis not considered in the design.

Although the introduction of the inverse sensitivity matrix can compensate the influences through the explicit cross-sensitivities, the effect caused by the implicit cross-sensitivities can not be compensated. The exception is the case when the accelerometer with the six output axes is calibrated in the six-dimension vector space.

The following two tables show the summary of normal sensitivities, explicit cross-sensitivities and implicit cross-sensitivities. Table A.7 shows the number of parameters concerning sensitivities obtained by the calibration carried out in the vector space with three dimensions. Table A.8 shows the number of parameters concerning sensitivities obtained by the calibration carried out in the vector space with six dimensions.

Table A.7 – Normal sensitivities, explicit cross-sensitivities and implicit cross-sensitivities obtained by the calibration carried out in the application acceleration vector space with three dimensions

Output axis	Sensitivities	Number of parameters
One-axis	Normal sensitivities	1
	Explicit cross-sensitivities	0
	Implicit cross-sensitivities	2
Two-axis	Normal sensitivities	2
	Explicit cross-sensitivities	2
	Implicit cross-sensitivities	2
Three-axis	Normal sensitivities	3
	Explicit cross-sensitivities	6
	Implicit cross-sensitivities	0

Table A.8 – Normal sensitivities, explicit cross-sensitivities and implicit cross-sensitivities obtained by the calibration carried out in the application acceleration vector space with six dimensions

Output axis	Sensitivities	Number of parameters
One-axis	Normal sensitivities	1
	Explicit cross-sensitivities	0
	Implicit cross-sensitivities	5
Two-axis	Normal sensitivities	2
	Explicit cross-sensitivities	2
	Implicit cross-sensitivities	8
Three-axis	Normal sensitivities	3
	Explicit cross-sensitivities	6
	Implicit cross-sensitivities	9
Four-axis	Normal sensitivities	4
	Explicit cross-sensitivities	12
	Implicit cross-sensitivities	8
Five-axis	Normal sensitivities	5
	Explicit cross-sensitivities	20
	Implicit cross-sensitivities	5
Six-axis	Normal sensitivities	6
	Explicit cross-sensitivities	30
	Implicit cross-sensitivities	0

Introduction of the vector space concept to the accelerometer calibration clarifies the following factors:

- The dimensions of the vector space where a target accelerometer is calibrated shall be as high as possible because the influence of the implicit cross-sensitivities to the measurement uncertainties become less.
- It is a serious problem to regard an accelerometer possessing implicit cross-sensitivities as a reference accelerometer.
- The dimensions of the vector space where a reference accelerometer is calibrated shall be as high as possible so that the influences caused by the implicit cross-sensitivities that cannot be compensated by inverse sensitivity matrix may be as small as possible.
- The difference in dimensions between the two vector spaces for application and calibration might make a significant difference to the measurement uncertainty evaluation.

A.5.9 Uncertainty analysis in acceleration vector space

The fundamental and general framework of the uncertainty analysis in the vector space should be conceptually clarified, because traditional uncertainty analysis has been concerned with one-axis accelerometers. The following shows the matters that need to be clarified:

- The input acceleration vector space is divided into two classes, the application acceleration vector space and the calibration acceleration vector space. Therefore, the uncertainty analysis should clarify which vector space is considered.
- The dimension of the vector space where the uncertainty analysis is carried out shall be stated. This is particularly important if the dimension of the calibration acceleration vector space is larger than the dimension of the application acceleration vector space. The implicit cross-sensitivity appears if the dimensions of the two vector spaces differ.

- A new style of expression for the uncertainty analysis in vector space is required. The example is $[U]_{\text{subscript1}, \text{subscript2}}^{\text{superscript}}$. The superscript expresses calibration acceleration vector space by c and the application acceleration vector space by a . The subscript1 expresses the dimension of the application acceleration vector space. The subscript2 expresses the dimension of the calibration acceleration vector space.
- If the following three conditions of the accelerometer with M output axis is assumed, Expression (A.180) might hold, because of the influences of the implicit normal and cross-sensitivities.
 - The dimension of the calibration acceleration vector space is N .
 - The dimension of the application acceleration vector space is M .
 - N is larger than M .

$$[U]_{M,N}^a \geq [U]_{M+1,N}^a \geq \cdots [U]_{N,N}^c \quad (\text{A.180})$$

where

$[U]_{M,N}^a$ stands for uncertainty in terms of the measurement obtained using the $M \times M$ sensitivity matrix;

$[U]_{M+1,N}^a$ stands for uncertainty in terms of the measurement obtained using the $(M+1) \times (M+1)$ sensitivity matrix;

$[U]_{N,N}^c$ stands for uncertainty in terms of the measurement obtained using the $N \times N$ sensitivity matrix.

- The number of output axes is parameterized in inequalities (A.180). On the other hand, another situation where the dimension of the calibration acceleration vector space is parameterized should be considered, because the number of the output axis is normally constant in the application acceleration vector space. The specialized knowledge in each field of engineering and science provides information on the probability of dimension of the application acceleration vector space. Table A.9 shows the list of symbols in terms of an accelerometer with M output axis. The symbol p_i ($i = M, \cdots, N$) stands for the probability that the application vector space possesses the dimension i .

Table A.9 – List of symbols in terms of measurement uncertainty using an accelerometer with M output axis assuming that N is larger than M

Dimension of application acceleration vector space	Probability	Uncertainty
M	p_M	$[U]_{M,M}^a$
$M + 1$	p_{M+1}	$[U]_{M,M+1}^a$
$\bullet$	$\bullet$	$\bullet$
$\bullet$	$\bullet$	$\bullet$
N	p_N	$[U]_{M,N}^a$

The following is the synthesized uncertainty of the acceleration measurement using an accelerometer with M output axis under the support of a calibration machine generating the calibration acceleration vector space with N dimension.

$$\sum_{k=M}^N p_k \times [U]_{M,k}^a \quad (\text{A.181})$$

- The implicit cross-sensitivities in the application acceleration vector space contributes to the information as type B uncertainty.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60747-14-4:2011

Annex B (informative)

Dynamic linearity measurement using an impact acceleration generator

B.1 Introductory remarks

Linearity is essential not only in static measurement but also in dynamic measurement. Dynamic calibration of accelerometers is carried out using a vibration generator, an impact acceleration generator or a rotating machine. Frequency response is originally applicable to a system linearized in the neighbourhood of an equilibrium point of a non-linear dynamic system. It is useful to understand the dynamic behaviour of a complicated non-linear system. Frequency response characteristics, therefore, do not make sense unless they are accompanied by the dynamic linearity data. Annex B gives the method for measuring dynamic linearity in a wide frequency range, up to high acceleration level, using an impact acceleration generator such as a vibration table operated under the shock operation mode and a metal bar for elastic wave reflection. The equilibrium of AC accelerometers is only the point when the input acceleration is zero.

B.2 Definition of dynamic linearity

B.2.1 Dynamic linearity of one-axis accelerometers (see Table B.1)

It is assumed that the output signal from a target accelerometer is $X_1(t)$ and $X_2(t)$ when the input acceleration to the accelerometer is $x_1(t)$ and $x_2(t)$, respectively. The dynamic linearity holds if the output from the accelerometer is $aX_1(t) + bX_2(t)$, when the input acceleration to the accelerometer is $ax_1(t) + bx_2(t)$ where a and b are arbitrary constants. If both the input and the output signals are a vector quantity, each component should have the following property:

Table B.1 – Dynamic linearity when both input and output are vector quantities

Relation	Input acceleration vector	Output signal vector
Relation 1	$\mathbf{x}_1(t) = \begin{pmatrix} x_{11}(t) \\ x_{12}(t) \\ \vdots \\ x_{1N}(t) \end{pmatrix}$	$\mathbf{X}_1 = \begin{pmatrix} X_{11}(t) \\ X_{12}(t) \\ \vdots \\ X_{1N}(t) \end{pmatrix}$
Relation 2	$\mathbf{x}_2(t) = \begin{pmatrix} x_{21}(t) \\ x_{22}(t) \\ \vdots \\ x_{2N}(t) \end{pmatrix}$	$\mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} X_{21}(t) \\ X_{22}(t) \\ \vdots \\ X_{2N}(t) \end{pmatrix}$
Relation 3	$\mathbf{x}_3(t) = a\mathbf{x}_1(t) + b\mathbf{x}_2(t) = \begin{pmatrix} ax_{11}(t) + bx_{21}(t) \\ ax_{12}(t) + bx_{22}(t) \\ \vdots \\ ax_{1N}(t) + bx_{2N}(t) \end{pmatrix}$	$\mathbf{X}_3 = a\mathbf{X}_1(t) + b\mathbf{X}_2(t) = \begin{pmatrix} aX_{11}(t) + bX_{21}(t) \\ aX_{12}(t) + bX_{22}(t) \\ \vdots \\ aX_{1N}(t) + bX_{2N}(t) \end{pmatrix}$

NOTE Selection of arbitrary constants a and b in Table B.1 depends on the equipment for acceleration generation.

The arbitrary constants a and b are assumed to be 1 for convenience in the following descriptions. The values are dependent on the input acceleration generation machine for the dynamic linearity calibration.

B.2.1.1 Dynamic linearity of one-axis and level 1 accelerometers

Table B.2 shows the relations between direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and the signal from the output axis. This table is concerned with the dynamic linearity measurement using a one-dimensional motion generator. The direction cosine $\cos \alpha_N$, $\cos \beta_N$, $\cos \gamma_N$ ($N=1, 2, 3$) are arranged by a mechanical mount so that the three direction cosine vectors may be linearly independent. Since one-dimensional motion generator is used, input acceleration amplitude in the third excitation $a_{i3}(t)$ shall be the sum of the amplitude of the first and the second excitation, $a_{i1}(t)$ and $a_{i2}(t)$.

Table B.2 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and the signal from the output axis

Excitation	Output axis	Symbol of output signal	Input acceleration	Direction cosine	Component of impact acceleration
1st	–	–	Absolute value = $a_{i1}(t)$ $(a_{ix1}(t) \ a_{iy1}(t) \ a_{iz1}(t))$	$\cos \alpha_1$	$a_{i1}(t) \cos \alpha_1$
	–	–		$\cos \beta_1$	$a_{i1}(t) \cos \beta_1$
	Z-axis	$f_{oz1}(t)$		$\cos \gamma_1$	$a_{i1}(t) \cos \gamma_1$
2nd	–	–	Absolute value = $a_{i2}(t)$ $(a_{ix2}(t) \ a_{iy2}(t) \ a_{iz2}(t))$	$\cos \alpha_2$	$a_{i2}(t) \cos \alpha_2$
	–	–		$\cos \beta_2$	$a_{i2}(t) \cos \beta_2$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_2$	$a_{i2}(t) \cos \gamma_2$
3rd	–	–	Absolute value = $a_{i3}(t)$ $(a_{ix3}(t) \ a_{iy3}(t) \ a_{iz3}(t))$	$\cos \alpha_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \alpha_3$
	–	–		$\cos \beta_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \beta_3$
	Z-axis	$f_{oz3}(t)$		$\cos \gamma_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \gamma_3$
NOTE This table is concerned with the dynamic linearity measurement using a one-dimensional motion generator.					

Since the sensitivity of level 1 accelerometers is not expressed by a matrix, dynamic linearity should be considered as the relation between the input acceleration along the single sensitivity axis and the output signal. Expressions (B.1), (B.2) and (B.3) are derived by generalizing this input-output relationship:

$$\cos \alpha_1 = \cos \alpha_2 = \cos \alpha_3 \quad (\text{B.1})$$

$$\cos \beta_1 = \cos \beta_2 = \cos \beta_3 \quad (\text{B.2})$$

$$\cos \gamma_1 = \cos \gamma_2 = \cos \gamma_3 \quad (\text{B.3})$$

Table B.2 shows that Expression (B.4) provides the necessary and sufficient conditions for dynamic linearity:

$$f_{oz3}(t) = f_{oz1}(t) + f_{oz2}(t) \quad (\text{B.4})$$

Dynamic linearity in the frequency domain is expressed by Expression (B.5):

$$\frac{L[f_{oz3}(t)]}{L[f_{oz1}(t) + f_{oz2}(t)]} = 1 \quad (\text{B.5})$$

As either the amplitude of the left side of Expression (B.5) deviates from 1, or the argument of the left side of (B.5) deviates from 0, the dynamic linearity degrades.

Though dynamic linearity of the one-axis level 1 accelerometer can be investigated by a three-dimensional motion generator, the result will be the same as obtained with a one-dimensional motion generator.

B.2.1.2 Dynamic linearity of one-axis and level 2, 3, and 4 accelerometers

If the dynamic linearity of one-axis, level 2, 3, and 4 accelerometers is investigated using a one-dimensional motion generator, Expression (B.4) should hold under the conditions of the following Expressions (B.6), (B.7) and (B.8):

$$a_{i1}(t)\cos\alpha_1 + a_{i2}(t)\cos\alpha_2 = a_{i3}\cos\alpha_3 = (a_{i1}(t) + a_{i2}(t))\cos\alpha_3 \quad (\text{B.6})$$

$$a_{i1}(t)\cos\beta_1 + a_{i2}(t)\cos\beta_2 = a_{i3}\cos\beta_3 = (a_{i1}(t) + a_{i2}(t))\cos\beta_3 \quad (\text{B.7})$$

$$a_{i1}(t)\cos\gamma_1 + a_{i2}(t)\cos\gamma_2 = a_{i3}\cos\gamma_3 = (a_{i1}(t) + a_{i2}(t))\cos\gamma_3 \quad (\text{B.8})$$

Table B.3 shows the relationship between direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and the signal from the output axis. This table is concerned with the dynamic linearity measurement using a three-dimensional motion generator (see also Table B.4). Since the three-dimensional motion generator is used, the conditions of the amplitude on the third excitation do not exist. If dynamic linearity of one-axis, level 2, 3 and 4 accelerometers is investigated using a three-dimensional motion generator, Expression (B.4) should hold under the following conditions of Expressions (B.9), (B.10) and (B.11):

$$a_{i1}(t)\cos\alpha_1 + a_{i2}(t)\cos\alpha_2 = a_{i3}(t)\cos\alpha_3 \quad (\text{B.9})$$

$$a_{i1}(t)\cos\beta_1 + a_{i2}(t)\cos\beta_2 = a_{i3}(t)\cos\beta_3 \quad (\text{B.10})$$

$$a_{i1}(t)\cos\gamma_1 + a_{i2}(t)\cos\gamma_2 = a_{i3}(t)\cos\gamma_3 \quad (\text{B.11})$$

Table B.3 – Relationship between the direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and the signal from the output axis

Excitation	Output axis	Symbol of output signal	Input acceleration	Direction cosine	Component of impact acceleration
1st	–	–	Absolute value = $a_{i1}(t)$ $\begin{pmatrix} a_{ix1}(t) & a_{iy1}(t) & a_{iz1}(t) \end{pmatrix}$	$\cos \alpha_1$	$a_{i1}(t)\cos \alpha_1$
	–	–		$\cos \beta_1$	$a_{i1}(t)\cos \beta_1$
	Z-axis	$f_{oz1}(t)$		$\cos \gamma_1$	$a_{i1}(t)\cos \gamma_1$
2nd	–	–	Absolute value = $a_{i2}(t)$ $\begin{pmatrix} a_{ix2}(t) & a_{iy2}(t) & a_{iz2}(t) \end{pmatrix}$	$\cos \alpha_2$	$a_{i2}(t)\cos \alpha_2$
	–	–		$\cos \beta_2$	$a_{i2}(t)\cos \beta_2$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_2$	$a_{i2}(t)\cos \gamma_2$
3rd	–	–	Absolute value = $a_{i3}(t)$ $\begin{pmatrix} a_{ix3}(t) & a_{iy3}(t) & a_{iz3}(t) \end{pmatrix}$	$\cos \alpha_3$	$a_{i3}(t)\cos \alpha_3$
	–	–		$\cos \beta_3$	$a_{i3}(t)\cos \beta_3$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_3$	$a_{i3}(t)\cos \gamma_3$
NOTE This table is concerned with dynamic linearity measurement using a three-dimensional motion generator.					

In order to check the dependency of the dynamic linearity on the direction of input acceleration, the conditions in Table B.3 should be applied to the Equations (B.9), (B.10) and (B.11). It should be noted that the measurement of the dynamic linearity between the output and the input that is perpendicular to the output axis validates the sensitivity matrix.

Table B.4 – Conditions on the direction cosine for dynamic linearity measurement

Dynamic linearity along the axis	Excitation	Conditions on the direction cosines
Dynamic linearity between input along X-axis and Z-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 1 (i = 1, 2, 3)$, $\cos \beta_i = 0 (i = 1, 2, 3)$, $\cos \gamma_i = 0 (i = 1, 2, 3)$
Dynamic linearity between input along Y-axis and Z-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 0 (i = 1, 2, 3)$, $\cos \beta_i = 1 (i = 1, 2, 3)$, $\cos \gamma_i = 0 (i = 1, 2, 3)$
Dynamic linearity between input along Z-axis and Z-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 0 (i = 1, 2, 3)$, $\cos \beta_i = 0 (i = 1, 2, 3)$, $\cos \gamma_i = 1 (i = 1, 2, 3)$

B.2.2 Dynamic linearity of two-axis accelerometers

B.2.2.1 Dynamic linearity of two-axis and level 1 accelerometers

Table B.5 shows the relationship between the input acceleration direction cosine and the output axis, Y-axis and Z-axis, when the one-dimension motion generator is used. Conditions expressed by Expressions (B.1), (B.2) and (B.3) should hold. The dynamic linearity of two-axis and level 1 accelerometers is then expressed by Expressions (B.4) and (B.12):

$$f_{oy3}(t) = f_{oy1}(t) + f_{oy2}(t) \quad (\text{B.12})$$

Dynamic linearity of Y-axis output in the frequency domain is expressed by Expression (B.13).

$$\frac{L[f_{oy3}(t)]}{L[f_{oy1}(t) + f_{oy2}(t)]} = 1 \quad (\text{B.13})$$

Table B.5 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to two-axis accelerometers and the signal from the output axis

Excitation	Output axis	Symbol of output signal	Input acceleration	Direction cosine	Component of impact acceleration
1st	—	—	Absolute value = $a_{i1}(t)$ $\begin{pmatrix} a_{ix1}(t) & a_{iy1}(t) & a_{iz1}(t) \end{pmatrix}$	$\cos \alpha_1$	$a_{i1}(t) \cos \alpha_1$
	Y-axis	$f_{oy1}(t)$		$\cos \beta_1$	$a_{i1}(t) \cos \beta_1$
	Z-axis	$f_{oz1}(t)$		$\cos \gamma_1$	$a_{i1}(t) \cos \gamma_1$
2nd	—	—	Absolute value = $a_{i2}(t)$ $\begin{pmatrix} a_{ix2}(t) & a_{iy2}(t) & a_{iz2}(t) \end{pmatrix}$	$\cos \alpha_2$	$a_{i2}(t) \cos \alpha_2$
	Y-axis	$f_{oy2}(t)$		$\cos \beta_2$	$a_{i2}(t) \cos \beta_2$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_2$	$a_{i2}(t) \cos \gamma_2$
3rd	—	—	Absolute value = $a_{i3}(t)$ $\begin{pmatrix} a_{ix3}(t) & a_{iy3}(t) & a_{iz3}(t) \end{pmatrix}$	$\cos \alpha_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \alpha_3$
	Y-axis	$f_{oy3}(t)$		$\cos \beta_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \beta_3$
	Z-axis	$f_{oz3}(t)$		$\cos \gamma_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \gamma_3$
NOTE This table is concerned with dynamic linearity measurement using a one-dimensional motion generator.					

As either the amplitude of the left side of Expression (B.13) deviates from 1 or the argument of the left side of Expression (B.13) deviates from 0, the dynamic linearity degrades. Expression (B.5) should also be considered.

Though dynamic linearity of a two-axis, level 1 accelerometer can be investigated using a three-dimensional motion generator, the result will be the same as obtained with a one-dimensional motion generator.

B.2.2.2 Dynamic linearity of two-axis and level 2, 3, and 4 accelerometers

If dynamic linearity of two-axis, level 2, 3, and 4 accelerometers is investigated using one-dimensional motion generator, Expressions (B.4) and (B.12) should hold under the conditions of Expressions (B.6), (B.7) and (B.8).

Table B.6 shows the relationship between direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and signal from the output axis. This table is concerned with the dynamic linearity measurement using a three-dimensional motion generator. Since the three-dimensional motion generator is used, the conditions of the amplitude on the third excitation do not exist. When dynamic linearity of two-axis, level 2, 3, and 4 accelerometers is investigated using a three-dimensional motion generator. Expressions (B.4) and (B.12) should hold under the following conditions of Expressions (B.9), (B.10) and (B.11):

Table B.6 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to two-axis accelerometers and the signal from the output axis

Excitation	Output axis	Symbol of output signal	Input acceleration	Direction cosine	Component of impact acceleration
1st	—	—	Absolute value = $a_{i1}(t)$ $(a_{ix1}(t) \ a_{iy1}(t) \ a_{iz1}(t))$	$\cos \alpha_1$	$a_{i1}(t) \cos \alpha_1$
	Y-axis	$f_{oy1}(t)$		$\cos \beta_1$	$a_{i1}(t) \cos \beta_1$
	Z-axis	$f_{oz1}(t)$		$\cos \gamma_1$	$a_{i1}(t) \cos \gamma_1$
2nd	—	—	Absolute value = $a_{i2}(t)$ $(a_{ix2}(t) \ a_{iy2}(t) \ a_{iz2}(t))$	$\cos \alpha_2$	$a_{i2}(t) \cos \alpha_2$
	Y-axis	$f_{oy2}(t)$		$\cos \beta_2$	$a_{i2}(t) \cos \beta_2$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_2$	$a_{i2}(t) \cos \gamma_2$
3rd	—	—	Absolute value = $a_{i3}(t)$ $(a_{ix3}(t) \ a_{iy3}(t) \ a_{iz3}(t))$	$\cos \alpha_3$	$a_{i3}(t) \cos \alpha_3$
	Y-axis	$f_{oy3}(t)$		$\cos \beta_3$	$a_{i3}(t) \cos \beta_3$
	Z-axis	$f_{oz3}(t)$		$\cos \gamma_3$	$a_{i3}(t) \cos \gamma_3$
NOTE This table is concerned with dynamic linearity measurement using a three-dimensional motion generator.					

Table B.7 – Conditions on the direction cosine for the dynamic linearity measurement

Dynamic linearity along the axis	Excitation	Conditions on the direction cosines
Dynamic linearity between input along X-axis and Y-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 1 \ (i = 1, 2, 3)$, $\cos \beta_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$, $\cos \gamma_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$
Dynamic linearity between input along Y-axis and Y-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$, $\cos \beta_i = 1 \ (i = 1, 2, 3)$, $\cos \gamma_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$
Dynamic linearity between input along Z-axis and Y-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$, $\cos \beta_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$, $\cos \gamma_i = 1 \ (i = 1, 2, 3)$

In order to check the dependency of the dynamic linearity on the direction of input acceleration, the conditions in Table B.4 and Table B.7 should be applied to Expressions (B.9), (B.10) and (B.11). It should be noted that the measurement of the dynamic linearity between the output and the input that is perpendicular to the output axis validates the sensitivity matrix.

B.2.3 Dynamic linearity of three-axis accelerometers

B.2.3.1 Dynamic linearity of three-axis and level 1 accelerometers

Table B.8 shows the relationship between the input acceleration direction cosine and the output axis, X-axis, Y-axis and Z-axis when the one-dimensional motion generator is used. Conditions expressed by Expressions (B.1), (B.2) and (B.3) should hold. The dynamic linearity of three-axis and level 1 accelerometers is then expressed by Expressions (B.4), (B.12) and (B.14).

Table B.8 – Relationship between the direction cosine of the input acceleration to three-axis accelerometers and the signal from the output axis

Excitation	Output axis	Symbol of output signal	Input acceleration	Direction cosine	Component of impact acceleration
1st	X-axis	$f_{ox1}(t)$	Absolute value = $a_{i1}(t)$ $(a_{ix1}(t) \ a_{iy1}(t) \ a_{iz1}(t))$	$\cos \alpha_1$	$a_{i1}(t) \cos \alpha_1$
	Y-axis	$f_{oy1}(t)$		$\cos \beta_1$	$a_{i1}(t) \cos \beta_1$
	Z-axis	$f_{oz1}(t)$		$\cos \gamma_1$	$a_{i1}(t) \cos \gamma_1$
2nd	X-axis	$f_{ox2}(t)$	Absolute value = $a_{i2}(t)$ $(a_{ix2}(t) \ a_{iy2}(t) \ a_{iz2}(t))$	$\cos \alpha_2$	$a_{i2}(t) \cos \alpha_2$
	Y-axis	$f_{oy2}(t)$		$\cos \beta_2$	$a_{i2}(t) \cos \beta_2$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_2$	$a_{i2}(t) \cos \gamma_2$
3rd	X-axis	$f_{ox3}(t)$	Absolute value = $a_{i3}(t)$ $(a_{ix3}(t) \ a_{iy3}(t) \ a_{iz3}(t))$	$\cos \alpha_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \alpha_3$
	Y-axis	$f_{oy3}(t)$		$\cos \beta_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \beta_3$
	Z-axis	$f_{oz3}(t)$		$\cos \gamma_3$	$(a_{i1}(t) + a_{i2}(t)) \cos \gamma_3$
NOTE This table is concerned with dynamic linearity measurement using a one-dimensional motion generator.					

$$f_{ox3}(t) = f_{ox1}(t) + f_{ox2}(t) \quad (B.14)$$

Dynamic linearity of the X-axis output in the frequency domain is expressed by Expression (B.15):

$$\frac{L[f_{ox3}(t)]}{L[f_{ox1}(t) + f_{ox2}(t)]} = 1 \quad (B.15)$$

As either the amplitude of the left side of Expression (B.15) deviates from 1 or the argument of the left side of Expression (B.15) deviates from 0, the dynamic linearity degrades. Expressions (B.5) and (B.13) should also be considered.

Though dynamic linearity of the three-axis, level 1 accelerometer can be investigated using a three-dimensional motion generator, the result will be the same as obtained with a one-dimensional motion generator.

B.2.3.2 Dynamic linearity of three-axis and level 2, 3, and 4 accelerometers

If dynamic linearity of three-axis, level 2, 3, and 4 accelerometers is investigated using one-dimensional motion generator, Expressions (B.4), (B.12) and (B.14) should hold under the conditions of Expressions (B.6), (B.7) and (B.8).

Table B.9 shows the relationship between direction cosine of the input acceleration to one-axis accelerometers and signal from the output axis. This table is concerned with the dynamic linearity measurement using a three-dimensional motion generator. Since the three-dimensional motion generator is used, the conditions of the amplitude on the third excitation do not exist. If dynamic linearity of three-axis, level 2, 3, and 4 accelerometers is investigated using a three-dimensional motion generator, Expressions (B.4), (B.12) and (B.14) should hold under the following conditions of Expressions (B.9), (B.10) and (B.11):

Table B.9 – Relations between the direction cosine of the input acceleration to three-axis accelerometers and the signal from the output axis

Excitation	Output axis	Symbol of output signal	Input acceleration	Direction cosine	Component of impact acceleration
1st	X-axis	$f_{ox1}(t)$	Absolute value = $a_{i1}(t)$ $(a_{ix1}(t) \ a_{iy1}(t) \ a_{iz1}(t))$	$\cos \alpha_1$	$a_{i1}(t) \cos \alpha_1$
	Y-axis	$f_{oy1}(t)$		$\cos \beta_1$	$a_{i1}(t) \cos \beta_1$
	Z-axis	$f_{oz1}(t)$		$\cos \gamma_1$	$a_{i1}(t) \cos \gamma_1$
2nd	X-axis	$f_{ox2}(t)$	Absolute value = $a_{i2}(t)$ $(a_{ix2}(t) \ a_{iy2}(t) \ a_{iz2}(t))$	$\cos \alpha_2$	$a_{i2}(t) \cos \alpha_2$
	Y-axis	$f_{oy2}(t)$		$\cos \beta_2$	$a_{i2}(t) \cos \beta_2$
	Z-axis	$f_{oz2}(t)$		$\cos \gamma_2$	$a_{i2}(t) \cos \gamma_2$
3rd	X-axis	$f_{ox3}(t)$	Absolute value = $a_{i3}(t)$ $(a_{ix3}(t) \ a_{iy3}(t) \ a_{iz3}(t))$	$\cos \alpha_3$	$a_{i3}(t) \cos \alpha_3$
	Y-axis	$f_{oy3}(t)$		$\cos \beta_3$	$a_{i3}(t) \cos \beta_3$
	Z-axis	$f_{oz3}(t)$		$\cos \gamma_3$	$a_{i3}(t) \cos \gamma_3$
NOTE This table is concerned with dynamic linearity measurement using a three-dimensional motion generator.					

Table B.10 – Conditions on the direction cosine for dynamic linearity measurement

Dynamic linearity along the axis	Excitation	Conditions on the direction cosines
Dynamic linearity between input along X-axis and X-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 1 \ (i = 1, 2, 3), \cos \beta_i = 0 \ (i = 1, 2, 3), \cos \gamma_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$
Dynamic linearity between input along Y-axis and X-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 0 \ (i = 1, 2, 3), \cos \beta_i = 1 \ (i = 1, 2, 3), \cos \gamma_i = 0 \ (i = 1, 2, 3)$
Dynamic linearity between input along Z-axis and X-axis output	First excitation, the second excitation and the third excitation	$\cos \alpha_i = 0 \ (i = 1, 2, 3), \cos \beta_i = 0 \ (i = 1, 2, 3), \cos \gamma_i = 1 \ (i = 1, 2, 3)$

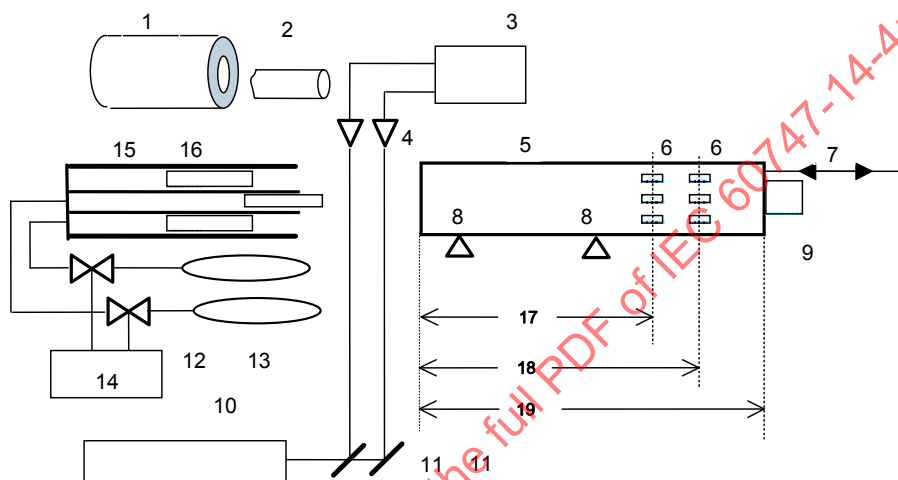
In order to check the dependency of the dynamic linearity on the direction of input acceleration, the conditions in Table B.4, Table B.7 and Table B.10 should be applied to Expressions (B.9), (B.10) and (B.11). It should be noted that the measurement of the dynamic linearity between the output and the input that is perpendicular to the output axis validates the sensitivity matrix.

B.3 Measurement technique and apparatus

B.3.1 Measurement technique using a one-dimensional motion generator

One-dimensional motion generators for dynamic linearity measurement in this standard consist of a double-centrifuge, a metal bar for elastic pulse reflection at the end of the bar and a one-dimensional vibration table.

Figure B.1 shows the fundamental set-up of the measurement system for level 1 accelerometers. The dynamic linearity of level 2, level 3 and level 4 accelerometers can be tested by affixing them on the mechanical mount mounted on the end surface of the metal bar so that three linearly independent input acceleration may be provided.



IEC 073/11

Key

- | | |
|---|--|
| 1 projectile launched through the outer launching tube | 2 projectile launched through the inner launching tube |
| 3 counter | 4 high-speed photo-detector |
| 5 metal bar | 6 strain gage |
| 7 laser light emission from laser interferometer | 8 point contact bar support |
| 9 target accelerometer | 10 laser light source |
| 11 mirror | 12 valve |
| 13 high-pressure gas sources | 14 control system for valve opening and closing |
| 15 outer launching tube | 16 inner launching tube |
| 17 distance between the impact end surface and the first strain gage | |
| 18 distance between the impact end surface and the second strain gage | |
| 19 length of a metal bar | |

Figure B.1 – Set-up for dynamic linearity measurement

Input acceleration to the target accelerometer can be measured by using the following techniques:

- 1) laser interferometer;
- 2) strain gauges with the experimental compensation data provided for the combination of the metal bar with the specified accelerometer;

- 3) strain gauges with the experimental compensation data provided for the metal bar;
- 4) strain gauges with the theoretical compensation data provided for the metal bar.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60747-14-4:2011

Annex C (informative)

Measurement of peak sensitivity

C.1 Introductory remarks

Though peak sensitivity of an accelerometer is an easily understood criterion for the judgement of an impact severity, it should be considered under the multi-axis scheme in the field of semiconductor accelerometers. The concept of the peak sensitivity matrix is the counter-part of the sensitivity matrix for the sinusoidal acceleration.

Reliability of the peak value measurement, however, is largely dependent on how the input signal to an accelerometer is defined in the calibration. Even if the peak sensitivity calibration of the target accelerometer is carried out under well-defined shock acceleration, ambiguity still remains if the bandwidth of the input acceleration is within the bandwidth of the calibration in the real measurement. This ambiguity can be cancelled out by using a plural number of accelerometers with the well-known peak sensitivity and the bandwidth.

C.2 Peak sensitivity of one-dimensional accelerometer

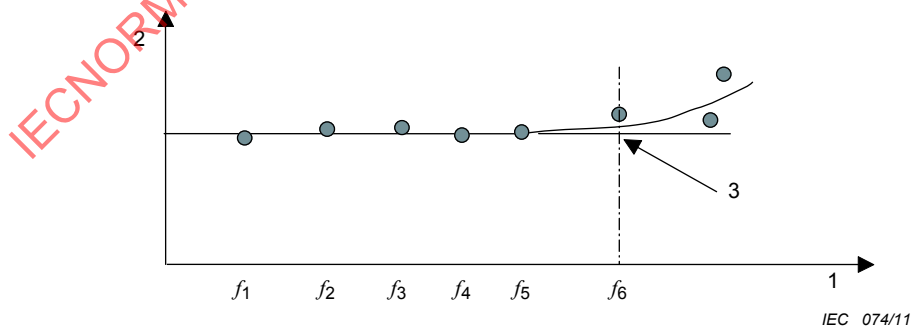
C.2.1 Outline of determination of peak sensitivity of a one-axis accelerometer

The peak sensitivity of a one-axis accelerometer is defined in the three-dimensional space by the following 1 x 3 matrix. A definition of each element is shown in Table C.1.

$$\begin{pmatrix} PS_{zx} & PS_{zy} & PS_{zz} \end{pmatrix} \quad (C.1)$$

Table C.1 – Definition of elements in one-axis accelerometer peak sensitivity

Term	Definition
PS_{zx}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by X-axis input
PS_{zy}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by Y-axis input
PS_{zz}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by Z-axis input



Key

- 1 frequency
- 2 peak sensitivity
- 3 maximum allowable limit from a straight line

Figure C.1 – Peak sensitivity as a function of each frequency bandwidth from DC to f_n

Figure C.1 shows the fundamental concept of the peak sensitivity. The seismic system in an accelerometer has a resonant frequency. Normally, an accelerometer is allowed to be used in the frequency bandwidth below these resonant frequencies for the reason that the sensitivity becomes larger if the frequency component of the impact acceleration includes the frequency that triggers the resonance. The wider the bandwidth of the impact acceleration waveform, the larger the sensitivity becomes. As the horizontal line in Figure C.1 shows, as long as the bandwidth is sufficiently below the minimum resonant frequency, sensitivity remains constant. The peak sensitivity shall be measured using the input acceleration that does not generate the resonance. Therefore, the peak sensitivity shall always be accompanied by the frequency bandwidth in which the peak sensitivity value is defined and the allowable deviation from the constant is shown, as Figure C.1 illustrates.

PS_{zx} , PS_{zy} and PS_{zz} can be obtained using the following procedures, as shown in Table C.2.

Table C.2 – Peak sensitivity of one-axis accelerometer

Procedure no.	Description of each step
1	Target accelerometer is subjected to the acceleration with peak A_p and frequency bandwidth from DC to f_1
2	Target accelerometer is subjected to the acceleration with peak A_p and frequency bandwidth from DC to f_2
⋮	⋮
N	Target accelerometer is subjected to the acceleration with peak A_p and frequency bandwidth from DC to f_N

The procedure for deriving peak sensitivity with the defined frequency bandwidth is as follows:

- Activate the target accelerometer by the impact acceleration with the constant peak value either both in plus and minus side or one side at each shot to the target accelerometer.
- Frequency bandwidth should be controlled at each shot. The first shot should cover the bandwidth from DC to f_1 , the second shot should cover the bandwidth from DC to f_2 and the n -th shot should cover the bandwidth from DC to f_N .
- At each n -th shot ($n = 1 \cdots N$), repeat the same calculation.

C.2.2 Calculation of peak sensitivity components of a one-axis accelerometer

Three linearly independent sinusoidal acceleration vectors are used for the matrix sensitivity calculation given in Annex A. The same is true for the peak sensitivity calculation. Let three shock accelerations $a_{i,1}(t)$, $a_{i,2}(t)$ and $a_{i,3}(t)$, be defined. The following table shows the definition of the direction cosine between the three shock acceleration vectors and the rectangular co-ordinate system fixed to the target accelerometer.

Table C.3 – Relationship of direction cosine and the co-ordinate system of the target accelerometer

Excitation	X-axis	Y-axis	Z-axis
$a_{i,1}(t)$	$\cos \alpha_1$	$\cos \beta_1$	$\cos \gamma_1$
$a_{i,2}(t)$	$\cos \alpha_2$	$\cos \beta_2$	$\cos \gamma_2$
$a_{i,3}(t)$	$\cos \alpha_3$	$\cos \beta_3$	$\cos \gamma_3$

Since three shock accelerations $a_{i,1}(t)$, $a_{i,2}(t)$ and $a_{i,3}(t)$ are linearly independent, the following must hold:

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (C.2)$$

Reasonable techniques for generating shock accelerations $a_{i,1}(t)$, $a_{i,2}(t)$ and $a_{i,3}(t)$ are to use a three-dimensional vibration generator under a good control for the low acceleration and the elastic pulse reflection for the high acceleration. Assuming the output axis of the target accelerometer is the Z-axis, this leads to the Equations (C.3):

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{zx} \\ S_{zy} \\ S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{oz1}]/L[a_{i1}] \\ L[a_{oz2}]/L[a_{i2}] \\ L[a_{oz3}]/L[a_{i3}] \end{pmatrix} \quad (C.3)$$

Equations (C.3) define the components of sensitivity matrix of 1×3 as a function of angular frequency, since determinant of the coefficient matrix is not zero. Because the peak sensitivity is defined using the signals in the time-domain, following is derived:

$$PS_{zx}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{zx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{zx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \alpha_1 : a_{i1}(t) \cos \alpha_1 \geq 0 \}} \quad (C.4)$$

$$PS_{zx}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{zx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{zx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \alpha_1 : a_{i1}(t) \cos \alpha_1 \leq 0 \}} \quad (C.5)$$

$$PS_{zy}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{zy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{zy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \beta_1 : a_{i1}(t) \cos \beta_1 \geq 0 \}} \quad (C.6)$$

$$PS_{zy}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{zy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{zy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \beta_1 : a_{i1}(t) \cos \beta_1 \leq 0 \}} \quad (C.7)$$

$$PS_{zz}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{zz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{zz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \gamma_1 : a_{i1}(t) \cos \gamma_1 \geq 0 \}} \quad (C.8)$$

$$PS_{zz}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{zz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{zz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \gamma_1 : a_{i1}(t) \cos \gamma_1 \leq 0 \}} \quad (C.9)$$

where PS_{zx}^{i+} , PS_{zx}^{i-} , PS_{zy}^{i+} , PS_{zy}^{i-} , PS_{zz}^{i+} and PS_{zz}^{i-} are the peak sensitivities on the + side by Z-axis output versus X-axis input, peak sensitivity on the – side by Z-axis output versus X-axis input, peak sensitivity on the + side by Z-axis output versus Y-axis input, peak sensitivity on the – side by Z-axis output versus Y-axis input, peak sensitivity on the + side by Z-axis output versus Z-axis input and peak sensitivity on the – side by Z-axis output versus Z-axis input, respectively.

- a) In the final stage, plot the peak sensitivity PS_{zx}^{i+} or PS_{zx}^{i-} as a function of frequency bandwidth. The deviation of peak sensitivity from the straight line exceeds the prescribed allowable limit at the frequency f_6 in Figure C.1. The frequency f_6 determines the maximum bandwidth available for the peak acceleration measurement using the target accelerometer.
- b) The same procedures should be applied to PS_{zy}^{i+} , PS_{zy}^{i-} , PS_{zz}^{i+} and PS_{zz}^{i-} .
- c) Then change the peak value A_p and make a similar measurement. This step clarifies the maximum peak acceleration within the requested frequency bandwidth. In other words, this measurement will lead to the dynamic linearity of peak sensitivity within the specified frequency bandwidth.

NOTE 1 Accurate evaluation of the peak sensitivity matrix requires the control of the bandwidth of the impact acceleration in terms of the resonant frequency of a target accelerometer. The more important this is, the higher the peak acceleration is. It should be noted that bandwidth of impact acceleration with a high peak is very much dependent on the impulse acceleration duration time.

NOTE 2 It is very important to set a co-ordinate system fixed to every target accelerometer in order to calibrate under this scheme that acceleration is a vector quantity.

C.3 Peak sensitivity of a two-axis accelerometer

C.3.1 Outline of determination of peak sensitivity of a two-axis accelerometer

The peak sensitivity of a two-axis accelerometer is defined in the three dimensional space by following 2 x 3 matrix:

$$\begin{pmatrix} PS_{yx} & PS_{yy} & PS_{yz} \\ PS_{zx} & PS_{zy} & PS_{zz} \end{pmatrix} \quad (C.10)$$

A definition for each element is shown in Table C.4.

Table C.4 – Definition of elements in two-axis accelerometer peak sensitivity

Term	Definition
PS_{yx}	Peak sensitivity defined by Y-axis output induced by X-axis input
PS_{yy}	Peak sensitivity defined by Y-axis output induced by Y-axis input
PS_{yz}	Peak sensitivity defined by Y-axis output induced by Z-axis input
PS_{zx}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by X-axis input
PS_{zy}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by Y-axis input
PS_{zz}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by Z-axis input

C.3.2 Calculation of peak sensitivity of a two-axis accelerometer

It is assumed that output axes of the accelerometer are Y-axis and Z-axis and that the direction cosine shown in Table C.3 holds. The simultaneous linear equations for all of the components in the sensitivity matrix is defined as follows:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{yx} \\ S_{yy} \\ S_{yz} \\ S_{zx} \\ S_{zy} \\ S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{oy1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oy2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oy3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (C.11)$$

Since the following relationship holds, the Equations (C.11) can be solved.

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}^2 \neq 0 \quad (C.12)$$

Definitions from (C.4) to (C.9) are applied to the solution of (C.11). The peak sensitivity in terms of the Y-axis are derived from (C.11) as follows:

$$PS_{yx}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{yx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{yx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \alpha_1 : a_{i1}(t) \cos \alpha_1 \geq 0 \}} \quad (C.13)$$

$$PS_{yx}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{yx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{yx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \alpha_1 : a_{i1}(t) \cos \alpha_1 \leq 0 \}} \quad (C.14)$$

$$PS_{yy}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{yy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{yy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \beta_1 : a_{i1}(t) \cos \beta_1 \geq 0 \}} \quad (C.15)$$

$$PS_{yy}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{yy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{yy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \beta_1 : a_{i1}(t) \cos \beta_1 \leq 0 \}} \quad (C.16)$$

$$PS_{yz}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{yz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{yz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \gamma_1 : a_{i1}(t) \cos \gamma_1 \geq 0 \}} \quad (C.17)$$

$$PS_{yz}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{yz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{yz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \gamma_1 : a_{i1}(t) \cos \gamma_1 \leq 0 \}} \quad (C.18)$$

where PS_{yx}^{i+} , PS_{yx}^{i-} , PS_{yy}^{i+} , PS_{yy}^{i-} , PS_{yz}^{i+} and PS_{yz}^{i-} represent peak sensitivity on the + side by Y-axis output versus X-axis input, peak sensitivity on the – side by Y-axis output versus X-axis input, peak sensitivity on the + side by Y-axis output versus Y-axis input, peak sensitivity on the – side by Y-axis output versus Y-axis input, peak sensitivity on the + side by Y-axis output versus Z-axis input and peak sensitivity on the – side by Y-axis output versus Z-axis input, respectively.

The procedures for deriving a peak sensitivity matrix in terms of the frequency bandwidth are the same as in C.2.2. Care should be taken with the control of the bandwidth of the impact acceleration for the evaluation of the peak sensitivity matrix described in NOTE 1 in C.2.2.

C.4 Peak sensitivity of three-axis accelerometer

C.4.1 Outline of determination of peak sensitivity of a three-axis accelerometer

Peak sensitivity of a three-axis accelerometer is defined in the three-dimensional space by the following 3×3 matrix:

$$\begin{pmatrix} PS_{xx} & PS_{xy} & PS_{xz} \\ PS_{yx} & PS_{yy} & PS_{yz} \\ PS_{zx} & PS_{zy} & PS_{zz} \end{pmatrix} \quad (C.19)$$

A definition of each element is shown in Table C.5.

Table C.5 – Definition of elements in three-axis accelerometer peak sensitivity

Term	Definition
PS_{xx}	Peak sensitivity defined by X-axis output induced by X-axis input
PS_{xy}	Peak sensitivity defined by X-axis output induced by Y-axis input
PS_{xz}	Peak sensitivity defined by X-axis output induced by Z-axis input
PS_{yx}	Peak sensitivity defined by Y-axis output induced by X-axis input
PS_{yy}	Peak sensitivity defined by Y-axis output induced by Y-axis input
PS_{yz}	Peak sensitivity defined by Y-axis output induced by Z-axis input
PS_{zx}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by X-axis input
PS_{zy}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by Y-axis input
PS_{zz}	Peak sensitivity defined by Z-axis output induced by Z-axis input

C.4.2 Calculation of peak sensitivity components of a three-axis accelerometer

It is assumed that the output axes of the accelerometer are the X-axis, Y-axis and Z-axis and that the direction cosine shown in Table C.3 holds. The simultaneous linear equations for all of the components in the sensitivity matrix is expressed as follows:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yx} \\ S_{yy} \\ S_{yz} \\ S_{zx} \\ S_{zy} \\ S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{ox1}]/L[a_{i1}] \\ L[a_{oy1}]/L[a_{i1}] \\ L[a_{oz1}]/L[a_{i1}] \\ L[a_{ox2}]/L[a_{i2}] \\ L[a_{oy2}]/L[a_{i2}] \\ L[a_{oz2}]/L[a_{i2}] \\ L[a_{ox3}]/L[a_{i3}] \\ L[a_{oy3}]/L[a_{i3}] \\ L[a_{oz3}]/L[a_{i3}] \end{pmatrix} \quad (C.20)$$

Since the following relationship holds, the Equations (C.20) can be solved:

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}^3 \neq 0 \quad (C.21)$$

Definitions (C.4) to (C.9) and (C.13) to (C.18) are applied to the solution of (C.20). The peak sensitivity in terms of the X-axis are derived from the Equations (C.20) as follows:

$$PS_{xx}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{xx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{xx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \alpha_1 : a_{i1}(t) \cos \alpha_1 \geq 0 \}} \quad (C.22)$$

$$PS_{xx}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{xx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{xx}(\omega) \cos \alpha_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \alpha_1 : a_{i1}(t) \cos \alpha_1 \leq 0 \}} \quad (C.23)$$

$$PS_{xy}^{i+} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{xy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{xy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \beta_1 : a_{i1}(t) \cos \beta_1 \geq 0 \}} \quad (C.24)$$

$$PS_{xy}^{i-} = \frac{\max \{ L^{-1}[S_{xy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{xy}(\omega) \cos \beta_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \beta_1 : a_{i1}(t) \cos \beta_1 \leq 0 \}} \quad (C.25)$$

$$PS_{xz}^{i+} = \frac{\max \left\{ L^{-1}[S_{xz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{xz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] \geq 0 \right\}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \gamma_1 : a_{i1}(t) \cos \gamma_1 \geq 0 \}} \quad (C.26)$$

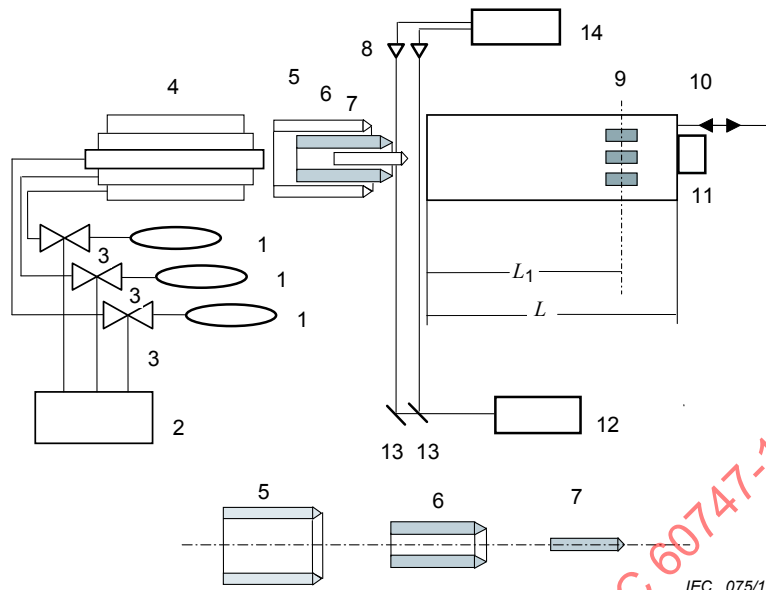
$$PS_{xz}^{i-} = \frac{\max \left\{ L^{-1}[S_{xz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] : L^{-1}[S_{xz}(\omega) \cos \gamma_1 L[a_{i1}(t)]] \leq 0 \right\}}{\max \{ a_{i1}(t) \cos \gamma_1 : a_{i1}(t) \cos \gamma_1 \leq 0 \}} \quad (C.27)$$

where PS_{xx}^{i+} , PS_{xx}^{i-} , PS_{xy}^{i+} , PS_{xy}^{i-} , PS_{xz}^{i+} and PS_{xz}^{i-} are the peak sensitivity on the + side by X-axis output versus X-axis input, peak sensitivity on the – side by X-axis output versus X-axis input, peak sensitivity on the + side by X-axis output versus Y-axis input, peak sensitivity on the – side by X-axis output versus Y-axis input, peak sensitivity on the + side by X-axis output versus Z-axis input and peak sensitivity on the – side by X-axis output versus Z-axis input, respectively.

The procedures for deriving the peak sensitivity matrix are the same as in C.2.2. Care should be taken with the control of the bandwidth of the impulse acceleration for the evaluation of the peak sensitivity matrix described in Note 1 in C.2.2.

C.5 Method of controlling the frequency bandwidth of the shock acceleration

The frequency bandwidth of the impact acceleration is dependent on the pulse shape. The pulse shape is generated in a function generator of a vibration generator. However, it is not easy to achieve if the elastic waves are used for a much broader frequency bandwidth and high acceleration. This clause depicts the method for controlling the frequency bandwidth of the shock acceleration using pulse elastic waves. Figure C.2 shows the basic set-up of the method.



Key

- | | |
|---------------------------|--|
| 1 high pressure air tank | 2 electromagnetic valve controller |
| 3 electromagnetic valve | 4 launching tube |
| 5 most outside projectile | 6 second outside projectile |
| 7 inside projectile | 8 photo diode |
| 9 strain gauges | 10 laser light from an interferometer system |
| 11 target accelerometer | 12 laser light source |
| 13 mirrors | 14 counter |

Figure C.2 – Set-up for the control of frequency bandwidth of shock acceleration

This technique is normally applied to AC accelerometers using a bar supported horizontally. When the target is a DC accelerometer, the bar should be vertically supported.

If the length of the bar is much longer than the diameter, elastic waves become plain waves at the point far away from the impact end surface of the bar. Linearity holds in the elastic waves as long as the deformation in the bar is elastic. If the launching of the multiple projectiles is precisely controlled, the principle of superposition works among the elastic pulses generated by each impact.

The materials and structures of each projectile are also very important for the control of the wave forms of the elastic pulse. At the same time, the relationship between the pulse duration time, the bar length and the longitudinal elastic wave velocity should be considered.

The input acceleration to an accelerometer is measured by either an interferometer or strain gauges.

Bibliography

ISO 2041, *Vibration and shock – Vocabulary*

ISO 8041, *Human response to vibration – Measuring instrumentation*

ISO 2631 (all parts), *Mechanical vibration and shock*

ISO 5349 (all parts), *Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration*

ISO 13090 (all parts), *Mechanical vibration and shock – Guidance on safety aspects of tests and experiments with people*

ISO 13091 (all parts), *Mechanical vibration – Vibrotactile perception thresholds for the assessment of nerve dysfunction*

ISO 16063 (all parts), *Methods for the calibration of vibration and shock transducers*

ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

Guide to the expression of uncertainty in measurement corrected and reprinted 1995, ISBN 92-67-10188-9 BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML

A dictionary of statistical terms, F. H.C. Marriott, ISBN 0-470-21349-3 Longman Scientific and Technical

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	102
INTRODUCTION	104
1 Domaine d'application	105
2 Références normatives.....	105
3 Terminologie et symboles littéraux	106
3.1 Termes et définitions.....	106
3.2 Symboles littéraux.....	112
4 Caractéristiques et valeurs assignées essentielles.....	113
4.1 Généralités	113
4.1.1 Principe de fonctionnement	113
4.1.2 Axe unique et axes multiples	113
4.1.3 Évaluation des performances	114
4.1.4 Sensibilité	115
4.1.5 Classification.....	115
4.1.6 Symbole (<i>g</i>).....	116
4.1.7 Client et fournisseur	117
4.1.8 Linéarité et non-linéarité.....	117
4.1.9 Matériaux des éléments	117
4.1.10 Précautions pour la manipulation	117
4.1.11 Condition de montage des accéléromètres	117
4.1.12 Spécifications.....	117
4.2 Caractéristiques assignées (valeurs limites).....	117
4.3 Conditions de fonctionnement recommandées	118
4.4 Caractéristiques	118
4.4.1 Plage de mesure.....	118
4.4.2 Sensibilité et erreur de sensibilité.....	118
4.4.3 Polarisation (décalage) et erreur de polarisation (décalage)	118
4.4.4 Linéarité.....	119
4.4.5 Erreur d'alignement.....	119
4.4.6 Sensibilité d'axe transversal.....	119
4.4.7 Coefficient de couplage transversal.....	119
4.4.8 Coefficient de température de sensibilité	119
4.4.9 Coefficient de température de polarisation	120
4.4.10 Réponse en fréquence	120
4.4.11 Courant d'alimentation	120
4.4.12 Bruit en sortie.....	120
4.4.13 Ratiométrie.....	120
4.4.14 Autotest	120
5 Méthodes de mesure.....	120
5.1 Généralités	120
5.1.1 Conditions normales d'essai.....	121
5.1.2 Méthodes de mesure applicables pour la méthode d'essai et d'étalonnage	121
5.2 Méthodes d'essai des caractéristiques	123
5.2.1 Plage de mesure	123
5.2.2 Gamme de tension d'alimentation.....	124

5.2.3	Sensibilité et erreur de sensibilité.....	124
5.2.4	Polarisation et erreur de polarisation.....	124
5.2.5	Linéarité.....	125
5.2.6	Erreur d'alignement.....	127
5.2.7	Sensibilité d'axe transversale.....	128
5.2.8	Coefficient de couplage transversal.....	128
5.2.9	Coefficient de température de sensibilité.....	129
5.2.10	Coefficient de température de polarisation.....	129
5.2.11	Réponse en fréquence.....	130
5.2.12	Courant d'alimentation.....	133
5.2.13	Bruit en sortie.....	133
6	Réception et fiabilité.....	134
6.1	Essai d'environnement.....	134
6.1.1	Stockage à haute température.....	134
6.1.2	Stockage à basse température.....	134
6.1.3	Stockage à l'humidité, température.....	135
6.1.4	Cycle de température.....	135
6.1.5	Choc thermique.....	135
6.1.6	Brouillard salin.....	135
6.1.7	Vibrations.....	135
6.1.8	Chocs mécaniques.....	135
6.1.9	Immunité au bruit électrique.....	135
6.1.10	Immunité aux décharges électrostatiques.....	135
6.1.11	Immunité aux rayonnements de champs électromagnétiques.....	136
6.2	Essai de fiabilité.....	136
6.2.1	Durée de vie en régime permanent.....	136
6.2.2	Durée de vie sous température et humidité.....	136
Annexe A (informative)	Définition de la matrice de sensibilité d'un accéléromètre.....	137
Annexe B (informative)	Mesure de linéarité dynamique utilisant un générateur d'accélération.....	178
Annexe C (informative)	Mesure de la sensibilité de crête.....	187
Bibliographie		197
Figure 1	– Accéléromètre à axe unique.....	114
Figure 2	– Accéléromètre à axes multiples.....	114
Figure 3	– Concept de définition mathématique des accéléromètres.....	115
Figure 4	– Concept de linéarité dynamique d'un accéléromètre sur gain.....	126
Figure 5	– Concept de linéarité dynamique d'un accéléromètre sur phase.....	127
Figure 6	– L'accélérateur à semiconducteur en tant que système.....	131
Figure 7	– Exemple de structure de système d'accéléromètre à semiconducteurs assemblé pour le concept de réponse en fréquence d'accéléromètre.....	132
Figure 8	– Schéma de la mesure de réponse en fréquence par entrée électrique.....	133
Figure A.1	– Exemple de cosinus directeur.....	144
Figure A.2	– Accéléromètres ou capteurs assemblés dans un système de coordonnées normal (Figure du haut) et projection de la composante d'accélération sur les trois plans d'axes de coordonnées, XY, YZ et ZX (Figure du bas).....	152
Figure B.1	– Montage pour la mesure de la linéarité dynamique.....	186

Figure C.1 – Sensibilité de crête en fonction de chaque largeur de bande de fréquence, du courant continu jusqu'à f_n	188
Figure C.2 – Montage pour le contrôle de la largeur de bande de l'accélération de choc	196
Tableau 1 – Liste des symboles littéraux	112
Tableau 2 – Niveau des accéléromètres et définition	116
Tableau 3 – Éléments d'essai et méthodes de mesure correspondantes recommandées	122
Tableau 4 – Relation entre les méthodes d'étalonnage applicables recommandées et le type d'accéléromètres	123
Tableau A.1 – Symboles pour la relation entre l'accélération d'entrée et le signal de sortie d'un accéléromètre en utilisant une table vibrante à une dimension	144
Tableau A.2 – Symboles pour les signaux d'accélération d'entrée et les signaux de sortie d'un accéléromètre	145
Tableau A.3 – Définition des symboles pour décrire le signal d'accélération d'entrée, signal de sortie d'un accéléromètre cible et le cosinus directeur répété trois fois	145
Tableau A.4 – Relation entre l'expression de la fonction de transfert sous la forme d'une matrice et le nombre d'axes des accéléromètres cibles	147
Tableau A.5 – Définition de l'espace vectoriel lié à la généralisation de la sensibilité transversale utilisant le concept d'espace vectoriel	156
Tableau A.6 – Relation entre l'accélération d'entrée et le signal de sortie pour l'étalonnage utilisant la table vibrante à six dimensions	158
Tableau A.7 – Sensibilités normales, sensibilités transversales explicites et sensibilités transversales implicites obtenues par l'étalonnage réalisé dans l'espace vectoriel d'accélération d'application avec trois dimensions	174
Tableau A.8 – Sensibilités normales, sensibilités transversales explicites et sensibilités transversales implicites obtenues par l'étalonnage réalisé dans l'espace vectoriel d'accélération d'application avec six dimensions	175
Tableau A.9 – Liste de symboles en termes d'incertitude de mesure en utilisant un accéléromètre à M axes de sortie en supposant N plus grand que M	177
Tableau B.1 – Linéarité dynamique lorsque les signaux d'entrée et de sortie sont des grandeurs vectorielles	178
Tableau B.2 – Relations entre le cosinus directeur de l'accélération d'entrée à des accéléromètres à un axe et le signal provenant de l'axe de sortie	179
Tableau B.3 – Relation entre le cosinus directeur de l'accélération d'entrée à des accéléromètres à un axe et le signal provenant de l'axe de sortie	181
Tableau B.4 – Conditions concernant le cosinus directeur pour la mesure de la linéarité dynamique	181
Tableau B.5 – Relations entre le cosinus directeur de l'accélération d'entrée à des accéléromètres à deux axes et le signal provenant de l'axe de sortie	182
Tableau B.6 – Relations entre le cosinus directeur de l'accélération d'entrée à des accéléromètres à deux axes et le signal provenant de l'axe de sortie	183
Tableau B.7 – Conditions concernant le cosinus directeur pour la mesure de la linéarité dynamique	183
Tableau B.8 – Relation entre le cosinus directeur de l'accélération d'entrée à des accéléromètres à trois axes et le signal provenant de l'axe de sortie	184
Tableau B.9 – Relations entre le cosinus directeur de l'accélération d'entrée à des accéléromètres à trois axes et le signal provenant de l'axe de sortie	185
Tableau B.10 – Conditions concernant le cosinus directeur pour la mesure de la linéarité dynamique	185

Tableau C.1 – Définition des éléments dans une sensibilité de crête d'un accéléromètre à un axe	187
Tableau C.2 – Sensibilité de crête d'un accéléromètre à un axe	188
Tableau C.3 – Relation du cosinus directeur et du système de coordonnées de l'accéléromètre cible.....	189
Tableau C.4 – Définition des éléments dans une sensibilité de crête d'un accéléromètre à deux axes.....	191
Tableau C.5 – Définition des éléments dans une sensibilité de crête d'un accéléromètre à trois axes.....	193

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60747-14-4:2011

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS DISCRETS –

Partie 14-4: Accéléromètres à semiconducteurs

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 60747-14-4 a été établie par le sous-comité 47E: Dispositifs discrets à semiconducteurs, du comité d'études 47 de la CEI: Dispositifs à semiconducteurs.

Il convient de lire la présente partie de la CEI 60747 conjointement à la CEI 60747-1:2006. Elle fournit les informations de base sur les semiconducteurs

- terminologie;
- symboles littéraux;
- valeurs assignées caractéristiques essentielles;
- méthodes de mesure;
- réception et fiabilité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
47E/405/FDIS	47E/409/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60747, présentées sous le titre général *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Les futures normes de cette série porteront dorénavant le nouveau titre général cité ci-dessus. Le titre des normes existant déjà dans cette série sera mis à jour lors de la prochaine édition.

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

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

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

INTRODUCTION

La Commission Électrotechnique Internationale (CEI) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité aux dispositions de la présente Norme internationale peut impliquer l'utilisation d'un brevet concernant les objets suivants.

- a) Technique et appareillage de mesure pour la sensibilité en matrice dans «Définition de la matrice de sensibilité d'un accéléromètre» donnés à la Paragraphe 4.1.5 et l'Annexe A
- b) Technique et appareillage de mesure pour la mesure de la linéarité dynamique des accéléromètres à courant alternatif dans «Mesure de la linéarité dynamique utilisant un générateur d'accélération d'impact» donnés à l'Annexe B.
- c) Technique et appareillage de mesure pour la mesure de la réponse en fréquence des accéléromètres sous contrôle de largeur de bande de fréquence dans «Méthode de contrôle de la largeur de bande de fréquence de l'accélération de chocs» donnés en C.5.
- d) Technique et appareillage de mesure de la réponse dynamique et de la sensibilité de crête des accéléromètres sous la forme d'une matrice utilisant une impulsion élastique dans «Définition de la matrice de sensibilité d'un accéléromètre» donnés à l'Annexe A.
- e) Projectiles pour le contrôle de largeur de bande de fréquence dans «Méthode de contrôle de la largeur de bande de fréquence de l'accélération de choc» donnés en C.5 et pour la mesure de la réponse dynamique et de la sensibilité de crête des accéléromètres sous la forme d'une matrice utilisant une impulsion élastique dans «Définition de la matrice de sensibilité d'un accéléromètre» donnée à l'Annexe A.

La CEI ne prend pas position quant à la preuve, la validité et la portée de ces droits de propriété.

Le détenteur de ces droits a donné l'assurance à la CEI qu'il consent à négocier des licences avec des demandeurs du monde entier, en des termes et à des conditions raisonnables et non discriminatoires. A ce propos, la déclaration du détenteur des droits de propriété est enregistrée à la CEI. Des informations peuvent être obtenues auprès de:

Nom: Intellectual Planning Office, Intellectual Property Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Adresse: 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564, Japon.

Nom: VectorDynamics Corporation
Adresse: 1-11-7 Higashikanda, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0031, Japon.
Heights Kanda Iwamotocho #305

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété industrielle distincts de ceux identifiés ci-dessus. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

L'ISO (www.iso.org/patents) et la CEI (http://www.iec.ch/tctools/patent_decl.htm) maintiennent des bases de données de brevets en ligne correspondant à leurs normes. Les utilisateurs sont invités à consulter les bases de données pour obtenir les informations les plus récentes concernant les brevets.

DISPOSITIFS À SEMICONDUCTEURS – DISPOSITIFS DISCRETS –

Partie 14-4: Accéléromètres à semiconducteurs

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60747 s'applique aux accéléromètres à semiconducteurs pour tous les types de produits.

La présente norme s'applique non seulement aux accéléromètres à semiconducteurs types à circuits électriques intégrés, mais aussi aux accéléromètres à semiconducteurs qui possèdent des circuits externes.

La présente norme ne viole pas (ou ne devrait pas entraver) (ou n'entre pas en contradiction avec) l'accord entre client et fournisseur pour un nouveau modèle ou de nouveaux paramètres commerciaux.

NOTE 1 Bien qu'elle concerne les accéléromètres à semiconducteurs, la présente norme peut être appliquée complètement ou partiellement à tout type d'accéléromètre produit en masse.

NOTE 2 L'objet de la présente norme est de permettre une description systématique, qui couvre les sujets initiés par l'apparition des accéléromètres à semiconducteurs. Les tâches imposées sur les accéléromètres à semiconducteurs non seulement sont communes à tous les accéléromètres mais aussi leur sont inhérentes et ne sont pas encore complètement résolues. Les descriptions sont fondées sur les résultats de recherche les plus récents. Un exemple type est celui de l'accéléromètre à axes multiples. La présente norme énonce la méthode de mesure de l'accélération comme une grandeur vectorielle utilisant des accéléromètres à axes multiples.

NOTE 3 La présente norme n'est pas du tout en contradiction avec les parties existantes de l'ISO 16063 ou de l'ISO 5347. La présente norme est destinée à fournir des concepts et des procédures d'étalonnage des accéléromètres à semiconducteurs à axes multiples qui sont utilisés non seulement pour la mesure de l'accélération mais aussi pour le contrôle du mouvement dans les fréquences larges depuis les valeurs en courant continu.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

CEI 60747-1:2006, *Dispositifs à semiconducteurs – Partie 1: Généralités*

CEI 60749 (toutes les parties), *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques*

CEI 60749-1, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 1: Généralités*

CEI 60749-5, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 5: Essai continu de durée de vie sous température et humidité avec polarisation*

CEI 60749-6, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 6: Stockage à haute température*

CEI 60749-10, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 10: Chocs mécaniques*

CEI 60749-11, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 11: Variations rapides de température – Méthode des deux bains*

CEI 60749-12, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 12: Vibrations, fréquences variables*

CEI 60749-13, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 13: Atmosphère saline*

CEI 60749-25, *Dispositifs à semiconducteurs – Méthodes d'essais mécaniques et climatiques – Partie 25: Cycles de température*

CEI 61000-4 (toutes les parties), *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: Techniques d'essai et de mesure*

CEI 61000-4-2:1995, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux décharges électrostatiques*

CEI 61000-4-3:2006, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-3: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques*

CEI 61000-4-4:2004, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-4: Techniques d'essai et de mesure – Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salves*

ISO 5347 (toutes les parties), *Méthodes pour l'étalonnage des transducteurs de vibrations et de chocs*

ISO 5347-11:1993, *Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups – Part 11: Testing of transverse vibration sensitivity* (disponible en anglais seulement)

ISO/CEI Guide 99, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*

3 Terminologie et symboles littéraux

3.1 Termes et définitions

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

3.1.1

accéléromètre

dispositif dont la valeur de sortie est un vecteur qui représente la projection de l'accélération dans un espace multidimensionnel de l'accélération qui lui est appliquée

3.1.2

accéléromètre à courant alternatif

accéléromètre qui possède un filtre passe-haut soit dans des circuits de traitement de signal réels, soit dans des circuits de traitement de signal équivalents en caractéristiques

NOTE Il répond à une entrée du domaine de bande en courant alternatif dans ses caractéristiques de fréquence. Ce type d'accéléromètre est utile pour la mesure des vibrations, des chocs et des oscillations.

3.1.3**accéléromètre à courant continu**

accéléromètre qui répond à une entrée du domaine de bande en courant continu au domaine de bande en courant alternatif spécifié dans ses caractéristiques de fréquence

NOTE Il a le système de boucle ouverte ou de boucle fermée de deuxième degré. Ce type d'accéléromètre est utile pour la mesure de l'angle d'inclinaison, de la vitesse et du déplacement par intégration de la sortie.

3.1.4**accéléromètre à semiconducteurs**

accéléromètre fabriqué selon la technologie des semiconducteurs pour au moins un élément de détection d'accélération

NOTE Un exemple type pourrait être une combinaison d'un système sismique en silicium par micro-usinage avec un mécanisme de détection et un circuit électrique.

3.1.5**accéléromètre unidimensionnel**

accéléromètre dont les caractéristiques sont mesurées dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage de dimension 1

3.1.6**accéléromètre bidimensionnel**

accéléromètre dont les caractéristiques sont mesurées dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage de dimension 2

3.1.7**accéléromètre tridimensionnel**

accéléromètre dont les caractéristiques sont mesurées dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage de dimension 3

3.1.8**accéléromètre tétradimensionnel**

accéléromètre dont les caractéristiques sont mesurées dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage de dimension 4

3.1.9**accéléromètre pentadimensionnel**

accéléromètre dont les caractéristiques sont mesurées dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage de dimension 5

3.1.10**accéléromètre hexadimensionnel**

accéléromètre dont les caractéristiques sont mesurées dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage de dimension 6

3.1.11**accéléromètre de niveau 1**

accéléromètre avec une sensibilité qui n'est pas définie sous la forme d'une matrice

NOTE La sensibilité le long de l'axe d'entrée est séparée de la sensibilité de l'axe transversal.

3.1.12**accéléromètre de niveau 2**

accéléromètre dont la sensibilité a la forme d'une matrice dans laquelle tous les éléments de la matrice sont constants en fonction de la fréquence et d'autres paramètres si nécessaire

3.1.13

accéléromètre de niveau 3

accéléromètre dont la sensibilité a la forme d'une matrice dans laquelle certains éléments sont définis en fonction de la fréquence et d'autres paramètres si nécessaire

3.1.14

accéléromètre de niveau 4

accéléromètre dont la sensibilité a la forme d'une matrice dans laquelle tous les éléments de la matrice sont définis en fonction de la fréquence et d'autres paramètres si nécessaire

3.1.15

espace vectoriel d'accélération d'entrée

espace vectoriel de déplacement réel dans lequel l'accélération d'entrée est un élément d'un ensemble

NOTE L'espace vectoriel d'accélération d'entrée est divisé en espace vectoriel d'accélération d'application et en espace vectoriel d'accélération d'étalonnage.

3.1.16

espace vectoriel de sortie d'accéléromètre

espace vectoriel dans lequel le signal de sortie d'un accéléromètre est un élément d'un ensemble

3.1.17

accélération gravitationnelle

accélération due à la pesanteur

NOTE Le symbole g indique une unité d'accélération égale en amplitude à la valeur de la gravité locale et le symbole g_n représente la valeur normalisée de g dans le cadre d'un accord international, $g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$.

3.1.18

axe d'entrée

axe le long ou autour duquel la sortie de l'accéléromètre pour l'accélération appliquée indique une valeur maximale

NOTE Il n'est utilisé ni compensation d'erreur d'alignement ni compensation de sensibilité d'axe transversal. Seule la direction IA peut être marquée sur l'emballage extérieur.

3.1.19

axe de référence d'entrée

direction d'un axe qui est nominalement parallèle à l'axe d'entrée

NOTE Il est défini par les surfaces de montage de l'emballage ou par les marquages de l'emballage externe.

3.1.20

axe de sortie

axe le long ou autour duquel la sortie de l'accéléromètre est mesurée

NOTE Dans certains cas, il est désigné sous le terme axe de charnière ou de flexion.

3.1.21

axe de référence de sortie

direction d'un axe qui est nominalement parallèle à l'axe de sortie

NOTE Il est défini par les surfaces de montage de l'emballage ou par les marquages de l'emballage externe.

3.1.22

axe de pendule

axe traversant le centre de masse étalon dans les accéléromètres à pendule

NOTE Il est perpendiculaire à l'axe de sortie et il le traverse.

3.1.23**axe de référence de pendule**

direction d'un axe qui est nominalement parallèle à l'axe de pendule

NOTE Il est défini par les surfaces de montage de l'emballage ou par les marquages de l'emballage externe.

3.1.24**erreur d'alignement**

angle entre un axe d'entrée et l'axe de référence d'entrée correspondant qui est indiqué sur l'emballage de l'accéléromètre lorsque le dispositif se trouve à un emplacement 0 g

3.1.25**capteur**

dispositif qui indique le déplacement de la masse étalon générée par l'accélération d'entrée

3.1.26**masse étalon**

masse dont l'inertie produit un signal d'accélération

NOTE La masse-pendule ou la masse de translation est généralement utilisée.

3.1.27**polarisation**

sorties sans accélération le long de l'axe d'entrée

NOTE Elle peut être représentée par les moyens algébriques entre les signaux de sortie de crête donnés lorsque l'accélération est appliquée de manière égale le long des deux directions de l'axe d'entrée.

3.1.28**divergence de polarisation**

différence entre les valeurs de polarisation aux emplacements 1 g et 0 g

NOTE Elle est une fonction des caractéristiques non linéaires de sensibilité.

3.1.29**erreur de polarisation**

différence algébrique entre la polarisation d'un dispositif et la polarisation nominale dans la spécification

NOTE La spécification de polarisation du dispositif est constituée de la variation due à la température et à la tension.

3.1.30**coefficient de température de polarisation**

variation de polarisation par variation d'unité en température par rapport à la polarisation à la température spécifiée

3.1.31**ratiométrie**

proportionnalité de l'accélération de sortie par rapport à la variation de la tension d'alimentation sur l'accéléromètre

3.1.32**gamme de tension d'alimentation**

valeurs de tension d'alimentation maximale et minimale pour lesquelles le dispositif peut fonctionner normalement

3.1.33**plage de mesure**

valeurs d'accélération maximale et minimale qui sont mesurables

3.1.34

limites d'accélération d'entrée

valeurs extrêmes de l'accélération d'entrée dans lesquelles l'accéléromètre peut conserver la performance spécifiée

3.1.35

première fréquence de résonance

fréquence la plus faible à laquelle le rapport de sortie sur l'accélération d'entrée prend une valeur de crête

3.1.36

linéarité dynamique

linéarité qui est concernée par la relation entre les signaux d'entrée et signaux de sortie transitoires

NOTE Voir Annexe B.

3.1.37

matrice de sensibilité

matrice qui transforme l'espace vectoriel d'accélération d'entrée en espace vectoriel de signal de sortie en considérant que la transformation est linéaire

NOTE 1 Les termes diagonaux et les termes non diagonaux correspondent respectivement aux sensibilités normales et aux sensibilités transversales.

NOTE 2 Il convient que l'étalonnage d'un accéléromètre soit reconnu comme étant le processus de détermination de tous les éléments de la matrice de sensibilité.

NOTE 3 La sensibilité en matrice peut être utilisée pour décrire la sensibilité des accéléromètres de niveau 2, 3 ou 4. Elle est utilisée pour souligner la différence entre la sensibilité conventionnelle des accéléromètres de niveau 1 et ceux de niveau 2, 3 et 4 (voir 4.1.5: Classification).

3.1.38

matrice de sensibilité de crête

matrice dont les termes diagonaux sont les composantes de la sensibilité de crête considérées le long de l'axe de sensibilité normale et dont les termes non diagonaux sont les composantes de la sensibilité de crête considérées le long de l'axe de sensibilité transversale

3.1.39

sensibilité

variation de sortie par variation unitaire de l'accélération d'entrée en état statique ou dynamique

NOTE 1 La sensibilité en état continu des accéléromètres de niveau 1 est généralement évaluée comme étant la pente de la droite qui peut être établie par la méthode des moindres carrés appliquée aux données entrée-sortie obtenues en faisant varier la valeur d'entrée dans la plage de mesure.

NOTE 2 La sensibilité pour les accéléromètres de niveau 2, 3 ou 4 est exprimée par une matrice.

3.1.40

erreur de sensibilité

différence algébrique entre une sensibilité d'un dispositif et la sensibilité nominale dans la spécification, avec l'expression en pourcentage appliquée avec la sensibilité nominale

NOTE La sensibilité du dispositif intègre les valeurs maximale et minimale parmi les chiffres globaux contenant le coefficient de température, etc.

3.1.41

coefficient de température de sensibilité

variation de sensibilité par variation unitaire de température par rapport à la sensibilité à la température spécifiée

3.1.42**sensibilité normale**

sensibilité définie le long de l'axe avec la sensibilité maximale d'un accéléromètre

3.1.43**sensibilité transversale**

sensibilité définie par la sortie le long de l'axe spécifié perpendiculaire à l'entrée le long de l'axe de sensibilité normale

3.1.44**sensibilité d'axe transversal**

sensibilité maximale dans le plan perpendiculaire à la direction de mesure par rapport à la sensibilité dans la direction de mesure

NOTE 1 La sensibilité maximale dans le plan perpendiculaire est obtenue en faisant la somme géométrique des sensibilités dans deux directions perpendiculaires dans ce plan.

NOTE 2 La sensibilité transversale peut être utilisée à la place de la sensibilité d'axe transversal.

3.1.45**coefficient de couplage transversal**

rapport de la variation de la sortie de l'accéléromètre sur le produit de l'accélération appliqué perpendiculairement et parallèlement à un axe de référence d'entrée

3.1.46**sensibilité de crête**

valeur correspondant au rapport du signal de sortie maximal divisé par l'accélération d'entrée maximale

NOTE Voir Annexe C.

3.1.47**réponse aux fréquences de sensibilité**

rapport du signal de sortie sur l'accélération appliquée à la fréquence discrète ou en largeur de bande étroite en fonction de la fréquence

3.1.48**réponse en fréquence de la sensibilité transversale**

rapport du signal de sortie sur l'accélération appliquée à la fréquence discrète ou en largeur de bande étroite dans la direction orthogonale en fonction de la fréquence

3.1.49**interféromètre à déplacement Doppler**

interféromètre fondé sur le principe du déplacement Doppler

3.1.50**interféromètre laser**

système qui mesure un mouvement au moyen d'une interférence optique utilisant un laser comme source de lumière

NOTE Il sert pour l'étalonnage primaire des accéléromètres.

3.1.51**extensomètre**

capteur qui détecte électriquement la déformation

3.1.52**incertitude**

paramètre, associé au résultat d'une mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande

NOTE Voir le guide sur l'expression de l'incertitude de mesure.

3.2 Symboles littéraux

Pour les besoins du présent document, les symboles littéraux énumérés dans le Tableau 1 s'appliquent.

Tableau 1 – Liste des symboles littéraux

Nom et désignation	Symbole littéral	Remarques
Accélération: – aux points d'entrée de $j = 1, \dots, n$ – d'une entrée spécifique positive vers l'accéléromètre pour c.c – d'une entrée spécifique négative vers l'accéléromètre pour c.c – d'une entrée spécifique vers l'accéléromètre pour c.a – d'une entrée maximale positive – d'une entrée maximale négative – due à la gravité locale – due à la gravité normalisée	a_j a_+ a_- a_{rms} a_{max} a_{min} g g_n	$g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2$
Sortie de l'accéléromètre: – dans les unités de sortie de l'accéléromètre – aux points d'accélération d'entrée de $j = 1, \dots, n$ – à une entrée spécifique positive a_+ – à une entrée spécifique négative a_- – aux bras d'entrée spécifiques – à la position UP(+1 g) – à la position DOWN(-1 g)	E E_j E_+ E_- E_{rms} E_{up} E_{down}	
Polarisation: – valeur apparente – dans les conditions de fonctionnement à température élevée – conditions de fonctionnement à basse température – dans les conditions normalisées – à la position 0 g (polarisation 0 g) – à la position 1 g (polarisation 1 g) – coefficient de température	B' B_{high} B_{low} B_{std} B_0 B_I B_{tco}	
Divergence de polarisation	B_d	
Écart de sortie d'accéléromètre: – par rapport à la ligne droite aux points E_j – valeur absolue la plus élevée par rapport à la ligne droite	δE_j δE	
Linéarité – pour linéarité statique	SL	
Coefficient de couplage transversal – pour IRA et PA – pour IRA et OA	K_p K_o	
Erreur d'alignement de IA par rapport à l'IRA: – valeur composite – autour de OA – autour de PA	γ γ_o γ_p	

Tableau 1 (suite)

Nom et désignation	Symbole littéral	Remarques
Sensibilité:		
– valeur nominale	S	
– valeur apparente	S'	
– dans les conditions de fonctionnement à température élevée	S_{high}	
– conditions de fonctionnement à basse température	S_{low}	
– dans les conditions normalisées	S_{std}	
– coefficient de température	S_{tco}	
Température:		
– dans les conditions de fonctionnement à température élevée	T_{high}	
– conditions de fonctionnement à basse température	T_{low}	
– dans les conditions normalisées	T_{std}	
– valeur minimale assignée au cours de la durée de stockage spécifiée	$T_{\text{stg min}}$	

4 Caractéristiques et valeurs assignées essentielles

4.1 Généralités

4.1.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des accéléromètres à semiconducteurs est pratiquement le même que celui des autres types d'accéléromètres. Les accéléromètres qui fonctionnent selon le principe de la convection de chaleur pourraient être considérés comme une exception. Les accéléromètres à semiconducteurs peuvent être classés en type piézorésistif et en type capacitif, etc., en tenant compte du principe de détection de déplacement de masse sismique. La grande diversité qui existe parmi les accéléromètres à semiconducteurs est due à la nature des principes de fonctionnement.

NOTE Les accéléromètres de type capacitif englobent ceux qui ont un mécanisme d'entraînement comme les accéléromètres à entraînement en peigne, les accéléromètres d'asservissement et les accéléromètres à rayon de vibration, etc.

4.1.2 Axe unique et axes multiples

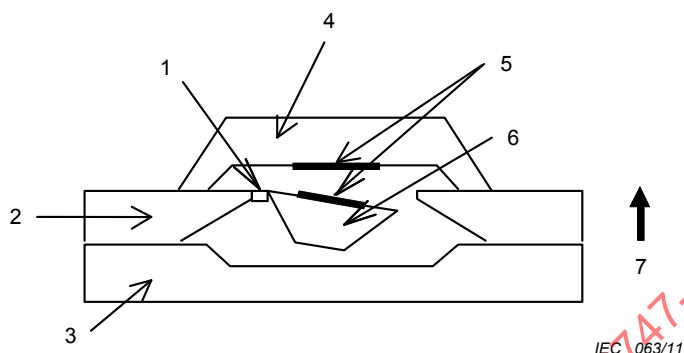
Il existe des accéléromètres à semiconducteurs à axe unique et à axes multiples. La plupart des aspects techniques des accéléromètres à semiconducteurs à axe unique sont couverts par des normes traditionnelles sur le sujet. Depuis que les dispositifs d'accélération traditionnels ont été inventés, la plus grande innovation due à la technologie des semiconducteurs est constituée par les accéléromètres à axes multiples pouvant atteindre le nombre de six axes. La présente norme part de l'idée selon laquelle non seulement les accéléromètres à axe unique mais aussi les accéléromètres à axes multiples peuvent être décrits dans le cadre du même concept. Le principe est simplement que l'accélération est une grandeur vectorielle. La description des accéléromètres à axe unique donnée dans la présente norme suit essentiellement cette idée, ce qui conduit à des différences par rapport aux normes existantes sur les accéléromètres.

Dans ce cas, il convient que chaque axe d'entrée (IA)¹ pour la surface de montage de l'accéléromètre soit défini dans le système de coordonnées fixé à l'accéléromètre spécifié. L'idée largement acceptée selon laquelle les accéléromètres à axes multiples peuvent

¹ IA = Input Axis.

mesurer l'accélération comme un vecteur a été réexaminée et soumise à une analyse mathématique utilisant une théorie de l'espace vectoriel. Les théories et aussi les techniques pratiques fondées sur ce concept sont décrites dans les Annexes A à C.

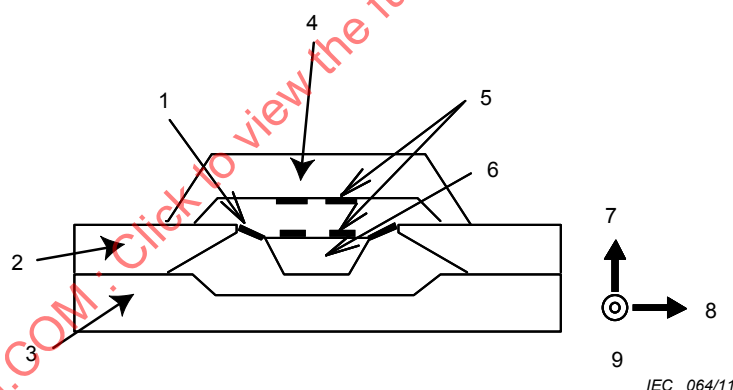
Les Figures 1 et 2 suivantes représentent la structure type des accéléromètres à semiconducteurs.



Légende

1	Charnière de flexion	2	Silicium	3	Verre
4	Verre	5	Électrode-capteur	6	Masse étalon
7	Accélération (Z)				

Figure 1 – Accéléromètre à axe unique



Légende

1	Charnière de flexion	2	Silicium	3	Verre
4	Verre	5	Électrode-capteur	6	Masse étalon
7	Accélération (Z)	8	Accélération (Y)	9	Accélération (X)

Figure 2 – Accéléromètre à axes multiples

La présente norme s'applique aux accéléromètres à semiconducteurs à circuits électriques intégrés. Elle n'est pas applicable à l'élément sensible seul car celui-ci ne génère pas de signaux électriques.

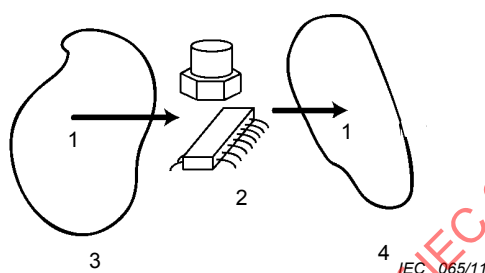
4.1.3 Évaluation des performances

Il convient de réaliser l'évaluation des performances des accéléromètres en utilisant, dans le principe, l'inertie dans des systèmes de coordonnées de niveau local. Dans certaines applications, il convient de veiller à la transformation de système de coordonnées entre le système de coordonnées de niveau local et le système de coordonnées d'inertie. La gravité locale ou l'accélération centripète est recommandée comme accélération de référence pour la mesure de la sensibilité des accéléromètres à courant continu. Pour mesurer la sensibilité

des accéléromètres à courant alternatif et les caractéristiques de réponse en fréquence des accéléromètres à courant continu, il est recommandé d'utiliser un générateur de vibrations et un interféromètre à laser pour l'étalonnage primaire.

4.1.4 Sensibilité

L'objet de l'accéléromètre est de mesurer l'accélération. Ceci peut être une définition de la fonction physique des accéléromètres. D'un autre côté, la définition de la fonction mathématique des accéléromètres est la projection de l'espace vectoriel des vecteurs de l'accélération réelle dans l'espace vectoriel du signal de sortie car l'accélération est une grandeur vectorielle. Ainsi, comme l'indique l'algèbre linéaire, seule une matrice peut définir la sensibilité des accéléromètres car une matrice peut transformer un espace vectoriel en un autre. La Figure 3 illustre le concept de définition mathématique des accéléromètres.



Legende

- | | |
|------------------|--|
| 1 Dimension | 3 Espace vectoriel d'accélération d'entrée |
| 2 Accéléromètres | 4 Espace vectoriel de sortie d'accéléromètre |

Figure 3 – Concept de définition mathématique des accéléromètres

Le terme «Dimension» dans la Figure 3 donne le nombre maximal de vecteurs linéairement indépendants dans l'espace vectoriel. La dimension de l'espace dans lequel est définie la sensibilité de l'accéléromètre est très importante car elle est liée à la taille de la matrice de sensibilité. Le but de la génération de l'accélération utilisant des machines pour l'étalonnage comme les tables vibrantes est de simuler l'espace vectoriel d'accélération d'application. Les accéléromètres doivent être étalonnés dans l'espace vectoriel d'accélération d'étalonnage avec la dimension qui est normalement supérieure ou égale à la dimension de l'espace vectoriel d'accélération d'application.

NOTE 1 Pour plus de détails, voir l'Annexe A.

NOTE 2 Le concept illustré à la Figure 3 peut être partagé avec les autres capteurs de détection de grandeurs vectorielles tels que les gyroscopes, les mesureurs inertiels et les capteurs de force.

4.1.5 Classification

Il est évident qu'il convient qu'une matrice décrive la sensibilité d'un accéléromètre. Cependant, il n'est pas toujours pratique d'obtenir la définition de la sensibilité en utilisant une matrice en permanence car ce n'est pas dans tous les cas que la direction et l'amplitude sont mesurées. Dans certains cas, la direction du mouvement est prévisible en utilisant des informations a priori. Un exemple type pourrait être la vibration d'un rayon avec une section très plate. D'un autre côté, il convient que la sensibilité des accéléromètres de détection de crash soit réalisée avec une matrice car il est pratiquement impossible de prédire la direction d'un crash. Pour traiter ces applications réelles, la présente norme introduit la classification des accéléromètres, représentée au Tableau 2.

Tableau 2 – Niveau des accéléromètres et définition

Niveau des accéléromètres	Descriptions
Accéléromètre de niveau 4	La sensibilité des accéléromètres de niveau 4 est définie comme une matrice. Tous les éléments de la matrice sont définis comme des fonctions de fréquences.
Accéléromètre de niveau 3	La sensibilité des accéléromètres de niveau 3 est définie comme une matrice. Certaines des composantes de la matrice de sensibilité sont définies comme des fonctions de la fréquence. Les éléments non diagonaux ne sont pas nuls.
Accéléromètre de niveau 2	La sensibilité des accéléromètres de niveau 2 est définie comme une matrice. Tous les éléments de la matrice sont constants avec une fréquence claire et une spécification incluant les termes non diagonaux non nuls.
Accéléromètre de niveau 1	La sensibilité de la matrice n'est pas prise en compte dans les accéléromètres de niveau 1. La sensibilité le long de l'axe d'entrée est séparée de la sensibilité d'axe transversal.

NOTE 1 Les séries de normes ISO 16063 et ISO 5347 pourraient être applicables aux accéléromètres de niveau 1. Le but principal des descriptions de la présente norme est de fournir les technologies qui ne sont couvertes ni par la série de normes ISO 16063 ni par la série de normes ISO 5347.

NOTE 2 «Fréquence» dans le Tableau 1 inclut la fréquence zéro car les accéléromètres à courant continu de niveau 2, 3 ou 4 possèdent des sensibilités en matrice à 0 Hz.

NOTE 3 Tous les éléments de la matrice de sensibilité statique pour les accéléromètres à courant continu de niveau 2 à 4 sont définis à 0 Hz. Chaque terme de la matrice de sensibilité statique est le même dans les accéléromètres de niveau 2, de niveau 3 et de niveau 4, c'est-à-dire si i et j de a_{ij} sont égaux à m et n de a_{mn} des accéléromètres de différent niveau, a_{ij} est égal à a_{mn} .

Les aspects techniques de cette classification sont les suivants:

- La classification est considérée comme le cadre fondamental pour que les accéléromètres puissent satisfaire à l'exigence d'application spécifique, en n'introduisant ni trop ni trop peu de détails.
- Tous les produits correspondent à la description ci-dessus du niveau des accéléromètres.
- Il convient que la classification soit appliquée aux accéléromètres avec des capacités de détection de vitesse angulaire ou d'accélération angulaire.
- La classification est applicable à chaque accéléromètre sans tenir compte du nombre d'axes de sensibilité.
- La classification clarifie si la sensibilité est définie dans l'espace vectoriel ou non.
- La classification décrit la dimension de l'espace vectoriel dans lequel la sensibilité de l'accéléromètre est définie.
- La classification est intéressante pour les clients qui la jugeront comme étant le critère de performance fondamental.

NOTE 4 Voir l'Annexe A pour plus de détails.

NOTE 5 L'ISO/CEI 17025 énonce clairement que les normes de référence et l'étalonnage garanti par des NMI ne sont pas le seul moyen pour assurer la traçabilité. Elle énonce que le programme pour l'étalonnage des équipements doit être conçu et mis en fonctionnement d'une manière assurant que les étalonnages et les mesures sont traçables à l'International System of Units (SI) (Système International d'unités). La présente Norme fournit la possibilité d'établir la traçabilité des accéléromètres à axes multiples; c'est-à-dire l'étalonnage basé sur le système SI.

NOTE 6 La classification montrée au Tableau 2 est applicable aux gyroscopes et aux mesureurs inertiels.

4.1.6 Symbole (g)

Dans la présente norme, le symbole « g » est utilisé pour l'accélération lorsque l'étalonnage ou l'essai est réalisé en utilisant la gravité locale.

4.1.7 Client et fournisseur

La présente norme ne doit ni violer ni entraver l'accord entre clients et fournisseurs en termes de nouveau modèle ou de nouveaux paramètres commerciaux.

4.1.8 Linéarité et non-linéarité

Dans certains cas, les signaux dans la région non linéaire d'un accéléromètre sont utilisés. Ceci est dû à une forte demande pour des coûts de production faible et à un traitement spécial de signal qui dépend en grande partie de l'application. Dans d'autres cas, l'application exige un modèle de simulation des accéléromètres à semiconducteurs au stade de conception de système couvrant non seulement la linéarité mais aussi la non-linéarité entre entrée et sortie.

4.1.9 Matériaux des éléments

Les matériaux utilisés pour les accéléromètres à semiconducteurs sont constitués de silicium principalement. Les caractéristiques assignées des accéléromètres à semiconducteurs dépendent des matériaux des éléments.

4.1.10 Précautions pour la manipulation

En raison de la nature fragile des éléments sensibles et des circuits électriques, il convient de ne pas soumettre les accéléromètres à semiconducteurs à un environnement qui dépasse les caractéristiques assignées, ce afin d'éviter les variations permanentes des caractéristiques spécifiées. Pour manipuler les dispositifs, référer aux précautions données à l'Article 8 de la CEI 60747-1:2006.

4.1.11 Condition de montage des accéléromètres

Il convient que l'emballage extérieur des accéléromètres ait la rigidité suffisante pour l'utilisation prévue. Il convient que les fournisseurs décrivent les exigences pour le montage de l'accéléromètre et les conditions de surface de montage dans les spécifications. Il convient que la mesure dynamique décrite dans la présente norme soit réalisée dans les conditions recommandées.

NOTE Une description quantitative concernant la rigidité suffisante est décrite dans chaque technique de mesure pour l'étalonnage.

4.1.12 Spécifications

Il convient que les spécifications pour les accéléromètres à semiconducteurs contiennent ce qui suit:

- nom du fabricant, modèle;
- classification;
- dimensions, masse (poids) et type d'emballage, par exemple boîtier DIP;
- méthode de montage recommandée;
- caractéristiques assignées, conditions et caractéristiques de fonctionnement recommandées comme définies dans les paragraphes 4.2 à 4.4.

4.2 Caractéristiques assignées (valeurs limites)

Il convient que les points suivants soient décrits dans la spécification, sauf indication contraire dans les spécifications d'approvisionnement correspondantes. Les contraintes supérieures à ces limites peuvent causer des dommages permanents à ces dispositifs.

- plage de températures de stockage;
- plage d'humidité de stockage;

- chocs mécaniques;
- plage de tensions d'alimentation;
- limites d'accélération d'entrée;
- valeur maximale de la tension ou du courant d'alimentation.

4.3 Conditions de fonctionnement recommandées

Il convient que les points suivants soient décrits dans la spécification, sauf indication contraire dans les spécifications d'approvisionnement correspondantes. Ces conditions sont recommandées afin de maintenir stables les caractéristiques des dispositifs en fonctionnement.

- plage de températures de fonctionnement;
- plage d'humidité de fonctionnement;
- plage d'accélération de fonctionnement;
- tension nominale d'alimentation.

4.4 Caractéristiques

4.4.1 Generalites

Les caractéristiques doivent être mesurées à 25 °C, sauf indication contraire. Il convient que les autres températures soient extraites de la liste donnée dans l'Article 5 de la CEI 60747-1:2006.

4.4.2 Plage de mesure

Les valeurs maximale et minimale de l'accélération doivent être selon les valeurs mesurables de l'accélération.

4.4.3 Sensibilité et erreur de sensibilité

La sensibilité est définie comme étant la variation de la sortie par variation unitaire de l'accélération d'entrée. Il convient qu'elle soit exprimée par le signal de sortie (par exemple tension) par accélération d'entrée unitaire.

L'erreur de sensibilité pour les accéléromètres de niveau 1 est la différence algébrique entre la sensibilité d'un dispositif et la sensibilité nominale dans la spécification avec l'écart en pourcentage par rapport à la sensibilité nominale. Il convient d'utiliser les valeurs minimale et maximale parmi les chiffres globaux contenant le coefficient de température etc.

Pour les accéléromètres de niveau 2, 3 ou 4, l'erreur de sensibilité est exprimée par une matrice. Chaque composante de la matrice d'erreur de sensibilité est la différence algébrique entre la composante de la matrice de sensibilité et la composante de la matrice de sensibilité nominale correspondante, avec l'écart de pourcentage par rapport aux composantes de la matrice de sensibilité nominale correspondantes.

4.4.4 Polarisation (décalage) et erreur de polarisation (décalage)

La polarisation est la sortie sans accélération le long de l'axe d'entrée. Ceci peut être représenté par les moyennes algébriques des deux valeurs de sortie lorsque l'accélération est appliquée dans les deux sens, $+g$ et $-g$, le long de l'axe d'entrée et avec les valeurs types.

L'erreur de polarisation est la différence algébrique entre la polarisation d'un dispositif et la polarisation nominale dans la spécification. Il convient d'utiliser les valeurs minimale et maximale parmi les chiffres globaux contenant les coefficients de température.

NOTE 1 Le décalage est également utilisé de la même manière que la polarisation.

NOTE 2 L'erreur de décalage est également utilisée de la même manière que l'erreur de polarisation.

NOTE 3 La polarisation et l'erreur de polarisation sont indépendantes de la classification des accéléromètres.

4.4.5 Linéarité

4.4.5.1 Linéarité en mesure d'accélération à courant continu

La linéarité est définie comme l'écart de la sortie d'un dispositif par rapport à la droite définie par la sensibilité. Il convient de mentionner l'expression de pourcentage avec la pleine échelle de la spécification et les valeurs maximales.

4.4.5.2 Linéarité en mesure d'accélération sinusoïdale

La linéarité dans l'accélération sinusoïdale est concernée à la fois par le gain et la phase. La linéarité de gain est définie comme l'écart maximal de gain d'un dispositif à chaque fréquence par rapport à la droite définie par la valeur absolue de la sensibilité complexe dans l'accélération sinusoïdale en fonction de l'amplitude et de la fréquence d'un signal d'entrée. La linéarité de phase est définie comme étant l'écart maximal de phase d'un dispositif à chaque fréquence par rapport à la droite, définie par la phase de la sensibilité complexe dans l'accélération sinusoïdale, en fonction de l'amplitude et de la fréquence d'un signal d'entrée. Pour les détails, voir l'Annexe B.

4.4.6 Erreur d'alignement

Elle représente l'angle entre l'axe d'entrée et l'axe de référence d'entrée indiqué sur l'emballage de l'accéléromètre. Il convient de spécifier les valeurs maximales.

4.4.7 Sensibilité d'axe transversal

Il convient de la décrire comme l'expression du pourcentage de la sensibilité de l'axe d'entrée spécifié causée par l'accélération appliquée le long de la direction perpendiculaire à l'axe d'entrée spécifié avec la sensibilité de l'axe d'entrée.

NOTE 1 Pour la sensibilité en matrice, voir l'Annexe A.

NOTE 2 Il convient de la décrire par les termes non diagonaux de la matrice de sensibilité pour les accéléromètres de niveau 2 à 4.

4.4.8 Coefficient de couplage transversal

Ce coefficient est observé non seulement dans un accéléromètre à pendule avec système de contrôle à boucle ouverte mais aussi dans l'accéléromètre à flèche fabriqué avec une technologie de micro-usinage et il provient de l'inclinaison de l'axe d'entrée (par exemple pendule ou flèche). Il s'agit de l'un des coefficients qui composent les écarts de la sortie réelle d'un dispositif par rapport à la droite définie par la sensibilité.

Ce coefficient est calculé avec l'équation (8) décrite en 5.2.8 à partir des données aux emplacements spécifiques sous la gravitation tellurique locale, g . Il convient que le coefficient soit exprimé par la valeur maximale.

4.4.9 Coefficient de température de sensibilité

La variation maximale en pourcentage de la sensibilité à +25 °C par variation unitaire de température.

4.4.10 Coefficient de température de polarisation

La variation maximale en pourcentage de la polarisation à +25 °C par variation unitaire de température.

4.4.11 Réponse en fréquence

La réponse en fréquence est un ensemble de données ou un schéma représentant le rapport d'amplitude et le décalage de phase entre l'entrée qui change de manière sinusoïdale dans le temps et le signal de sortie sinusoïdal en fonction de la fréquence. La fréquence à laquelle le gain s'abaisse à 3 dB en dessous du gain maximal est appelée fréquence de coupure f_c et il convient de mentionner les valeurs minimales. Il convient de noter que ce concept est uniquement applicable à un système linéaire.

NOTE Pour la réponse en fréquence des accéléromètres de niveau 2 à 4, voir l'Annexe A.

4.4.12 Courant d'alimentation

Le courant d'alimentation est spécifié en condition à vide et à la température normale, +25 °C sauf spécification contraire.

4.4.13 Bruit en sortie

Il comprend les composantes à courant alternatif dans le signal de sortie en fonctionnement continu. Il convient que cela soit exprimé soit comme valeur efficace dans une largeur de bande de fréquence spécifiée, soit en volts par racine carrée de fréquence.

4.4.14 Ratiométrie

Elle représente la linéarité de la sortie de l'accéléromètre sur la variation de la tension d'alimentation. Il convient de mentionner clairement s'il existe une capacité de ratiométrie ou non. Les variations de grandeur de sortie dues aux variations de tension d'alimentation peuvent être estimées par ce chiffre, écart par rapport à la linéarité. La ratiométrie est exprimée soit comme une valeur maximale (en volts), soit en pourcentage.

4.4.15 Autotest

Il est destiné à vérifier la fonctionnalité correcte de l'accéléromètre sans accélération réelle. La fonctionnalité est jugée en mesurant la sortie électrique lorsque le signal électrique spécifié est appliqué aux bornes spécifiées de l'accéléromètre. Il convient que l'autotest soit spécifié en indiquant le signal électrique d'entrée aux bornes de l'autotest, les sorties électriques pour le jugement et la zone désignée couverte par l'autotest.

5 Méthodes de mesure

5.1 Généralités

La mesure est divisée en deux catégories:

- essai,
- étalonnage.

La différence entre essai et étalonnage est établie par la traçabilité selon les normes nationales. L'étalonnage est la mesure réalisée en utilisant l'instrumentation traçable aux équipements et les techniques autorisées par les normes nationales et inscrites dans le document spécifié.

L'incertitude est indispensable en étalonnage. L'essai est plus pratique que l'étalonnage car il peut être effectué sur la base de la négociation entre fabricants et clients sans traçabilité à

une norme nationale. Toutefois, il convient de noter que les techniques de mesure pour l'étalonnage pourraient être utilisées pour l'essai. Il convient de documenter les éléments utilisés pour l'étalonnage ou l'essai si la norme correspondante n'existe pas.

5.1.1 Conditions normales d'essai

Les conditions d'essai normales sont les suivantes:

- a) température: $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$;
- b) humidité relative: 45 % à 75 %, si approprié;
- c) pression atmosphérique: 86 kPa à 106 kPa, (860 mbar à 1 060 mbar);
- d) tension d'alimentation nominale $A\text{ V} \pm B\text{ V}$. La tension d'alimentation A et sa tolérance B doivent être déterminées dans les spécifications individuelles.

Les précautions électriques sont décrites à l'Article 6 de la CEI 60747-1:2006 et les conditions normales d'essai recommandées sont conformes à l'Article 5 de la CEI 60747-1:2006. L'accéléromètre et l'équipement d'essai doivent être mis en condition de fonctionnement avec l'entrée d'accélération spécifiée. L'accéléromètre et l'environnement immédiat doivent être autorisés à atteindre l'équilibre thermique afin que la sortie de l'accéléromètre puisse ainsi être stabilisée avec la précision nécessaire avant de procéder à l'essai.

5.1.2 Méthodes de mesure applicables pour la méthode d'essai et d'étalonnage

La condition normale de température pour l'étalonnage est de $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$. L'humidité relative et la pression atmosphérique sont les mêmes que celles données en 5.1.1. Le Tableau 3 montre la relation entre un élément d'essai et les méthodes de mesure correspondantes recommandées. Le Tableau 4 montre la relation entre un type d'accéléromètre et les méthodes d'étalonnage applicables correspondantes recommandées.

Tableau 3 – Éléments d'essai et méthodes de mesure correspondantes recommandées

Type	Élément d'essai	Accélération gravitationnelle		Accélération centripète		Vibrations		Accélération de choc	
		Diviseur	Marbre	Unique	Double	Vibrations sinusoïdales	Vibrations aléatoires	Vib.	Impulsion élastique
Accéléromètre à courant continu	Plage de mesure			X	X	X	X	X	X
	Sensibilité	X	X	X	X	X	X	X	X
	Polarisation et erreur de polarisation	X	X	X	X	X	c	c	c
	Linéarité statique	X	X	X	c	c	c	c	c
	Linéarité dynamique				X	X	X	X	X
	Sensibilité d'axe transversale	X	X	X	X	X	X	X	X
	Coefficient de couplage transversal	X	X	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	Sensibilité du coefficient de température	X	X	X	X	X	X	X	X
	Coefficient de température de polarisation	X	X	X	X	Z			
	Réponse en fréquence	c	c	c	X	X	X	X	X
Accéléromètre à courant alternatif	Plage de mesure	c	c	c	X ^a	X	X	X	X
	Sensibilité	c	c	c	X	X	X	X	X
	Polarisation et erreur de polarisation	c	c	c	X	Z ^b			
	Linéarité dynamique	c	c	c	X	X	X	X	X
	Sensibilité d'axe transversale	c	c	c	X	X	X	X	X
	Coefficient de couplage transversal	c	c	c	Z	Z	Z	Z	Z
	Sensibilité du coefficient de température	c	c	c	X	X	X	X	X
	Coefficient de température de polarisation	c	c	c	Z	Z	c	c	c
	Réponse en fréquence	c	c	c	X	X	X	X	X

^a X = l'élément d'essai est couvert par la méthode marquée X.

^b Z = l'élément d'essai n'est pas indiqué dans la présente norme.

^c Vide = La méthode n'est globalement pas applicable à l'élément d'essai spécifié.

Tableau 4 – Relation entre les méthodes d'étalonnage applicables recommandées et le type d'accéléromètres

Type		Numéro d'axe	Diviseur		Centrifugeuse		Dimension (vibrations)		Accélération de choc	
			Quatre points	Deux points	Unique	Double	Une	Trois	Vib.	Impulsion élastique
Accéléromètre à courant continu	Niveau 1	1	X ^a	X	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
	Niveau 2	1	X	b	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
	Niveau 3	1	X	b	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
	Niveau 4	1	X	b	X	X	X	X	X	X
		2	X	b	X	X	X	X	X	X
		3	X	b	X	X	X	X	X	X
Accéléromètre à courant alternatif	Niveau 1	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X
	Niveau 2	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X
	Niveau 3	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X
	Niveau 4	1	b	b	b	X	X	X	X	X
		2	b	b	b	X	X	X	X	X
		3	b	b	b	X	X	X	X	X

^a X = l'élément d'essai est couvert par la méthode marquée X.

^b Vide = La méthode n'est globalement pas applicable à l'élément d'essai spécifié.

5.2 Méthodes d'essai des caractéristiques

5.2.1 Plage de mesure

L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement qui génère le mouvement mécanique bien défini de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée le long de l'axe d'entrée.

L'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions normales d'essai de 5.1.

- Appliquer l'accélération maximale positive, $a_{\max}$. Enregistrer la sortie de l'accéléromètre E_+ .
- Appliquer l'accélération maximale négative, $a_{\min}$. Enregistrer la sortie de l'accéléromètre E_- .

- c) La différence entre E_+ et E_- divisée par la sensibilité nominale S doit être conforme à la spécification individuelle.

5.2.2 Gamme de tension d'alimentation

L'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions normales d'essai de 5.1.

- Appliquer la tension d'alimentation maximale à l'accéléromètre, mesurer la plage de mesure, la sensibilité et la polarisation.
- Appliquer la tension d'alimentation minimale à l'accéléromètre, mesurer la plage de mesure, la sensibilité et la polarisation.

La plage de mesure, la sensibilité et la polarisation doivent être conformes à l'exigence de la spécification individuelle.

5.2.3 Sensibilité et erreur de sensibilité

L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement qui génère le mouvement mécanique bien défini de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée le long de l'axe d'entrée. Sauf spécification contraire, l'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1.

- Appliquer le nombre nécessaire et suffisant d'accélérations positives avec des incréments approximativement égaux finissant la valeur de la plage de mesure positive.
- Le nombre d'accélérations appliquées pourrait être choisi en tenant compte de beaucoup de facteurs tels que la précision exigée de l'accéléromètre cible et le rendement de la mesure, etc. Enregistrer l'accélération d'entrée et la sortie de l'accéléromètre, E_j à chacune des accélérations d'entrée.
- Appliquer le nombre nécessaire et suffisant d'accélérations négatives avec des décréments approximativement égaux finissant la valeur de la plage de mesure négative.
- Calculer la valeur du facteur d'échelle S' , comme la pente de la droite des moindres carrés adaptée aux points de données obtenus par a) et b) ci-dessus.

$$E_j = S'a_j + B' \quad (1)$$

$$S' = \frac{(n \sum a_j E_j - \sum a_j \sum E_j)}{\left\{ n \sum (a_j)^2 - (\sum a_j)^2 \right\}} \quad (2)$$

L'erreur de sensibilité doit inclure le coefficient de température de la sensibilité défini en 4.2.9, le coefficient de tension d'alimentation de la sensibilité et le coefficient de pression de la sensibilité, etc.

La sensibilité doit être conforme à l'exigence de la spécification individuelle.

Une méthode alternative de mesure de la sensibilité consiste à obtenir les valeurs de sortie de l'accéléromètre en deux ou quatre emplacements cardinaux en utilisant l'accélération gravitationnelle locale.

Voir l'Annexe C concernant la méthode de mesure de la sensibilité de crête.

5.2.4 Polarisation et erreur de polarisation

À partir des données obtenues en 5.2.3, déterminer la somme algébrique des valeurs de sortie, E_{0+} , E_{0-} , lorsqu'une entrée nulle est approchée à partir de chacune des pleines échelles. Calculer la valeur de la polarisation comme suit:

$$B' = (E_{0+} + E_{0-}) / 2S' \quad (3)$$

L'erreur de polarisation doit inclure le coefficient de température de la polarisation, défini en 5.2.10, le coefficient de tension d'alimentation de la polarisation et le coefficient de pression de la polarisation, etc.

La polarisation et l'erreur de polarisation doivent être conformes à l'exigence de la spécification individuelle.

NOTE La suppression de S' dans le dénominateur de l'équation (3) marque le décalage.

5.2.5 Linéarité

5.2.5.1 Linéarité statique

À partir des données obtenues en 5.2.3, déterminer les écarts des points de données δE_j comme suit:

$$\delta E_j = E_j - S'a_j - B' \quad (4)$$

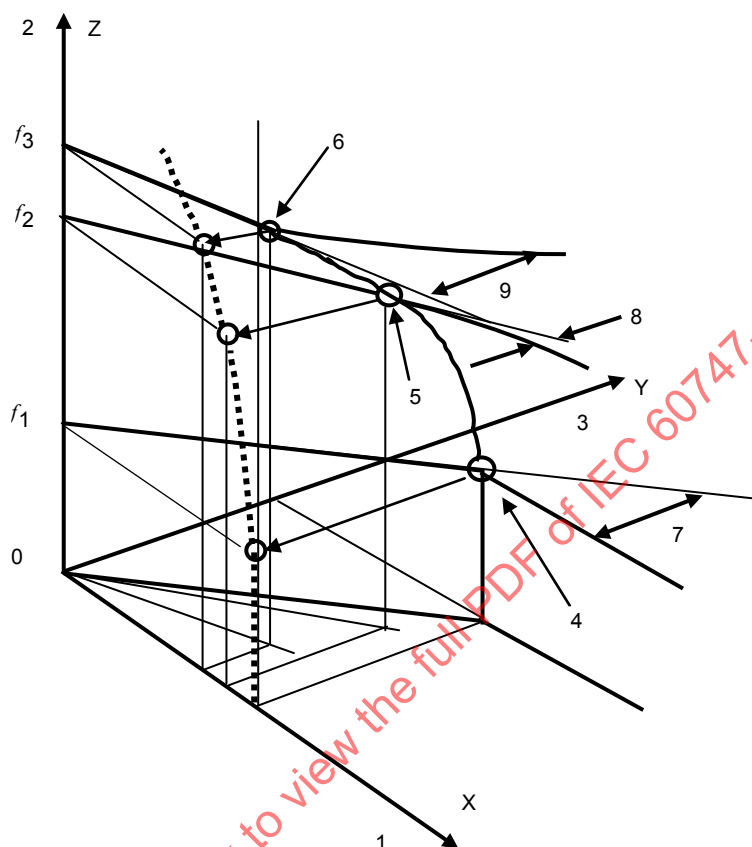
Choisir la valeur absolue la plus élevée δE_j comme δE , puis calculer la linéarité SL comme suit:

$$SL = \delta E / (a_{\max} - a_{\min}) \times 100 \% \quad (5)$$

La linéarité SL doit être conforme à l'exigence de la spécification individuelle.

5.2.5.2 Linéarité dynamique

5.2.5.2.1 Linéarité dynamique sur le gain



IEC 066/11

Légende

- | | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Axe X, amplitude d'accélération d'entrée | 6 | Limite de la linéarité dynamique de gain à la fréquence f_3 |
| 2 | Axe Z, fréquence | 7 | Écart par rapport à la linéarité à la fréquence f_1 |
| 3 | Axe Y, amplitude du signal de sortie de l'accéléromètre | 8 | Écart par rapport à la linéarité à la fréquence f_2 |
| 4 | Limite de la linéarité dynamique de gain à la fréquence f_1 | 9 | Écart par rapport à la linéarité à la fréquence f_3 |
| 5 | Limite de la linéarité dynamique de gain à la fréquence f_2 | | |

Figure 4 – Concept de linéarité dynamique d'un accéléromètre sur gain

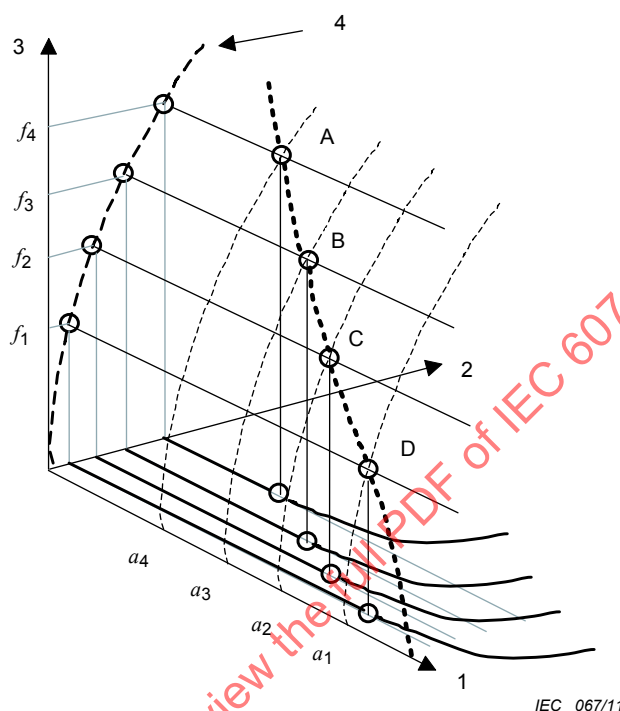
Le concept de linéarité est généralement représenté comme une relation entre l'entrée d'accélération à courant continu et le signe d'accélération de sortie d'un accéléromètre en régime permanent. Toutefois, la linéarité est aussi un concept important en termes de réponse dynamique. Sauf définition claire de la linéarité dynamique, la mesure de la réponse en fréquence n'a pas de sens.

La Figure 4 représente le concept de linéarité dynamique de gain en fonction de l'amplitude d'accélération d'entrée, de l'amplitude de sortie de l'accéléromètre et de la fréquence. La limite de linéarité dynamique de gain d'un accéléromètre est définie comme une trajectoire dans l'espace avec l'axe X en fonction de l'amplitude d'accélération d'entrée, l'axe Y en fonction de l'accélération de sortie et l'axe Z en fonction de la fréquence. La projection de la

trajectoire sur le plan X-Z peut définir une région dans laquelle la linéarité dynamique du gain se maintient. La limite spécifie l'accélération d'entrée maximale sous la fréquence maximale ou fréquence maximale donnée sous l'amplitude d'accélération d'entrée maximale donnée.

5.2.5.2.2 Linéarité dynamique sur la phase

La linéarité de phase dynamique est définie, à partir du schéma suivant:



Légende

- 1 Axe X, Amplitude de l'accélération d'entrée
- 2 Axe Y, Phase de sortie d'un accéléromètre
- 3 Axe Z, Fréquence
- 4 Relation entre la fréquence et l'enregistrement de phase lorsque l'amplitude d'entrée est très proche de zéro

Figure 5 – Concept de linéarité dynamique d'un accéléromètre sur phase

Tant que la linéarité dynamique sur phase se maintient, l'enregistrement de phase à chaque fréquence ne dépend pas de l'amplitude de l'accélération d'entrée vers un accéléromètre. Toutefois, comme l'amplitude d'entrée d'accélération vers un accéléromètre augmente, l'enregistrement de phase changera de la valeur constante lorsque la valeur sera faible. La linéarité dynamique sur la phase est définie par la surface incurvée à trois dimensions entourée par la courbe sur le plan Y-Z, c'est-à-dire la relation entre la fréquence et le retard de phase lorsque l'amplitude de l'accélération d'entrée vers un accéléromètre est très proche de zéro, la courbe à trois dimensions A, B, C et D et l'axe X, c'est à dire l'axe d'amplitude de l'accélération d'entrée. La courbe spécifie l'amplitude d'accélération d'entrée maximale sous une fréquence donnée pour la linéarité dynamique. Elle spécifie aussi la fréquence maximale sous une amplitude d'accélération maximale donnée. Par exemple, à la Figure 5, si la fréquence f_3 est donnée comme une fréquence maximale, il convient que la limite supérieure de l'accélération d'entrée soit a_3 pour la linéarité dynamique sur phase.

5.2.6 Erreur d'alignement

L'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1, sauf spécification contraire.

- a) L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement de génération d'accélération de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée le long de l'axe de référence du pendule.
- b) Appliquer une accélération spécifique positive et enregistrer la valeur de sortie de l'accéléromètre.
- c) Appliquer une accélération spécifique négative et enregistrer la valeur de sortie de l'accéléromètre.
- d) Calculer le défaut d'alignement, γ_p .
- e) L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement de génération d'accélération de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée le long de l'axe de référence de sortie.
- f) Répéter les procédures b), c) et d) ci-dessus et calculer l'angle d'erreur d'alignement, γ_o .

La valeur de l'angle d'erreur d'alignement doit être conforme aux exigences de 4.4.5.

5.2.7 Sensibilité d'axe transversale

L'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1, sauf spécification contraire.

- a) L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement de génération d'accélération de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée le long de l'axe de référence du pendule.
- b) Dans le cas des accéléromètres à courant continu, appliquer une accélération spécifique positive, a_+ et enregistrer la sortie de l'accéléromètre, E_+ ; appliquer une accélération spécifique négative, a_- et enregistrer la valeur de sortie de l'accéléromètre, E_- .
- c) Dans le cas des accéléromètres à courant alternatif, appliquer une accélération spécifique, a_{rms} et enregistrer la valeur de sortie de l'accéléromètre, E_{rms} .
- d) Calculer la sensibilité transversale K_{cp} pour l'axe de référence du pendule en utilisant les définitions algébriques suivantes:

$$K_{cp} = (E_+ - E_-) / (a_+ - a_-) / S \quad g/g \text{ (pour les accéléromètres à courant continu)} \quad (6)$$

$$K_{cp} = (E_{rms} / a_{rms}) / S \quad g/g \text{ (pour les accéléromètres à courant alternatif)} \quad (7)$$

- e) L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement de génération d'accélération de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée le long de l'axe de référence de sortie.
- f) Répéter b), c) et d) pour l'axe de référence de sortie pour obtenir la sensibilité transversale K_{co} .
- g) La sensibilité d'axe transversal est calculée comme une racine carrée de la somme des carrés de K_{co} et K_{cp} .

La valeur de la sensibilité de l'axe transversal doit être conforme aux exigences de 4.4.6.

5.2.8 Coefficient de couplage transversal

L'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1, sauf spécification contraire.

- a) Il convient que l'accéléromètre soit installé sur l'équipement de génération d'accélération de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée tant le long de l'axe d'entrée que le long de l'axe de pendule.

- b) Pour l'accéléromètre à courant continu, appliquer une accélération spécifique, $0,707g$ et enregistrer les valeurs de sortie de l'accéléromètre, E_1 et E_2 à 45° et à 225° respectivement par l'essai multipoint. Appliquer une accélération spécifique, $0,707g$ et enregistrer les valeurs de sortie de l'accéléromètre, E_3 , E_4 à 135° et 315° , respectivement.
- c) Calculer le coefficient de couplage transversal K_p en utilisant la définition algébrique suivante:

$$K_p = \left(\frac{E_1}{1g \sin \theta_1 \times 1g \cos \theta_1} + \frac{E_2}{1g \sin \theta_2 \times 1g \cos \theta_2} - \frac{E_3}{1g \sin \theta_3 \times 1g \cos \theta_3} - \frac{E_4}{1g \sin \theta_4 \times 1g \cos \theta_4} \right) \times \frac{1}{2S} \quad g/g^2 \quad (8)$$

où $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 225^\circ$, $\theta_3 = 135^\circ$, $\theta_4 = 315^\circ$.

- d) L'accéléromètre doit être installé sur l'équipement de génération d'accélération de manière à ce que l'accélération puisse être appliquée tant le long de l'axe d'entrée que le long de l'axe de sortie.
- e) Répéter les procédures ci-dessus b), c) pour calculer le coefficient de couplage transversal K_o pour cette position.

La valeur du coefficient de l'axe transversal doit être conforme aux exigences de 4.4.7.

5.2.9 Coefficient de température de sensibilité

- a) Monter l'accéléromètre dans une enceinte à température régulée dans les conditions d'essai normales de 5.1. Stabiliser la température de l'accéléromètre à $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.
- b) Mesurer la sensibilité conformément à 5.2.3.
- c) Répéter ces mesures à la température élevée de fonctionnement et à la basse température de fonctionnement, comme défini en 4.3.1.
- d) Calculer le coefficient de température de la sensibilité, S_{tco} comme suit:

$$S_{tco} = \frac{\left(\frac{S_{\text{high}} - S_{\text{std}}}{S_{\text{std}}} \right)}{T_{\text{high}} - T_{\text{std}}} \times 100 \quad \%/^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$S_{tco} = \frac{\left(\frac{S_{\text{low}} - S_{\text{std}}}{S_{\text{std}}} \right)}{T_{\text{low}} - T_{\text{std}}} \times 100 \quad \%/^\circ\text{C} \quad (10)$$

- e) Le coefficient de température de la sensibilité prend le chiffre le plus élevé des définitions (9) et (10) ci-dessus.

La valeur du coefficient de température de sensibilité doit être conforme à l'exigence de la spécification individuelle.

5.2.10 Coefficient de température de polarisation

- a) Monter l'accéléromètre dans une enceinte à température régulée dans les conditions d'essai normales de 5.1. Stabiliser la température de l'accéléromètre à $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.
- b) Mesurer la polarisation conformément à 5.2.4.
- c) Répéter ces mesures à la température élevée de fonctionnement et à la basse température de fonctionnement, comme défini par 4.3.1.
- d) Calculer le coefficient de température de la polarisation, B_{tco} comme suit:

$$B_{tco} = (B_{high} - B_{std}) / (T_{high} - T_{std}) \quad g/^{\circ}C \quad (11)$$

$$B_{tco} = (B_{low} - B_{std}) / (T_{low} - T_{std}) \quad g/^{\circ}C \quad (12)$$

- e) Le coefficient de température de la polarisation prend le chiffre le plus élevé des définitions (11) et (12) ci-dessus.

La valeur du coefficient de température de polarisation doit être conforme à l'exigence de la spécification individuelle.

5.2.11 Réponse en fréquence

5.2.11.1 Considérations mécaniques

L'accélération d'entrée à un accéléromètre doit être clairement et explicitement définie pour toute la plage de mesure de caractéristique de réponse en fréquence avec l'incertitude qui permet d'atteindre l'incertitude finale spécifiée de la caractérisation. En gardant cela à l'esprit, il n'est pas recommandable d'utiliser un accéléromètre de référence dos à dos pour la caractérisation d'un accéléromètre par impact.

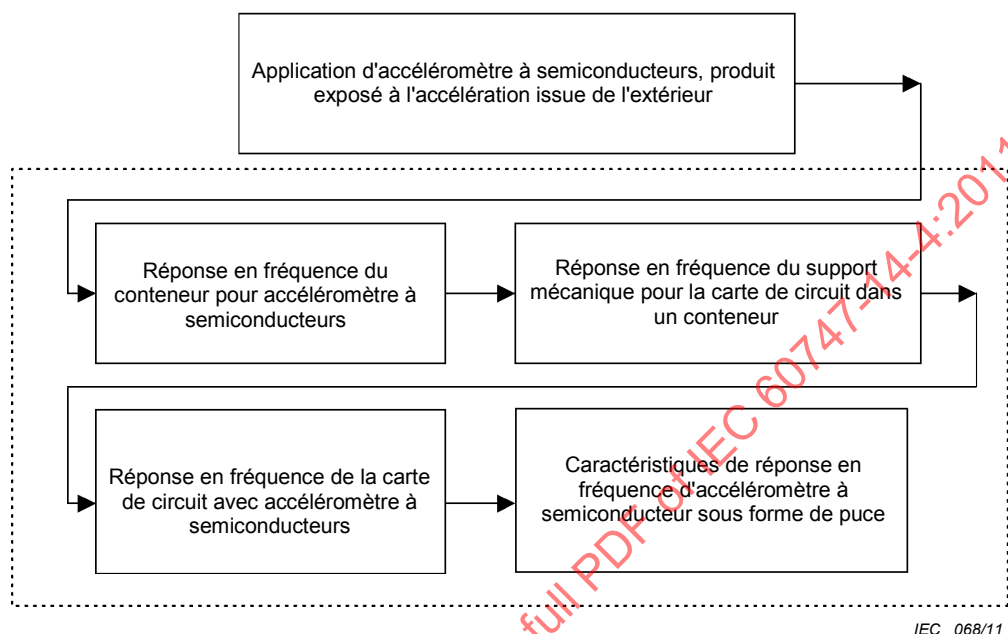
L'hypothèse implicite concernant les accéléromètres de référence est que la rigidité du boîtier est infinie et que le mouvement de la surface de l'extrémité frontale et la surface de l'extrémité arrière sont toujours dans la même phase. Ceci est bien entendu impossible. Les fabricants des accéléromètres normalisés de facto ne fournissent pas les informations sur la limite de la fréquence et le niveau d'accélération pour lesquels le mouvement de la même phase se maintient. Il convient également de noter que les accéléromètres piézoélectriques normalisés de facto disponibles sur le marché sont seulement à une dimension sous l'autorisation d'étalonnage avec capacité à une dimension. Les accéléromètres tridimensionnels assemblés utilisant des accéléromètres piézoélectriques à une dimension ne sont pas étalonnés en utilisant le mouvement à trois dimensions.

Si l'accéléromètre cible est de type multiaxial à semiconducteurs, il est absolument nécessaire d'ajouter l'accélération le long de chaque axe sensible de l'accéléromètre indépendamment. Le composant de vibration d'accélération dont l'axe est vertical par rapport à l'axe sensible de l'accéléromètre cible doit être clairement indiqué dans le rapport de la mesure caractéristique de réponse en fréquence. Dans la mesure où la sensibilité d'axe décalé ou la sensibilité d'axe transversal dépend de la fréquence, une excitation simultanée indépendante du mouvement de vibration perpendiculaire au mouvement de l'axe principal est indispensable.

Il est à peine possible d'ajouter l'accélération directement aux puces d'accéléromètres à semiconducteurs définies à l'Article 3. Elles sont soudées sur la carte PC en étant accompagnées d'autres dispositifs électroniques, d'amplificateurs et de dispositifs discrets. La carte peut être supportée mécaniquement et placée dans un conteneur qui pourrait être connecté aux structures de l'application cible. C'est pourquoi il convient de noter que les caractéristiques de réponse en fréquence des accéléromètres à semiconducteurs sont mesurées par rapport au système, y compris non seulement l'accéléromètre à semiconducteurs cible mais aussi la carte PC avec les dispositifs électroniques et un composant de support mécanique. C'est pourquoi il convient de noter que deux systèmes avec les mêmes puces d'accéléromètre mais avec un support ou mécanisme de fixation différent et des cartes PC différentes sont dissemblables.

Si la mesure de la caractéristique de réponse en fréquence est concernée par le module de l'accéléromètre dont la structure mécanique est différente de celle de l'application réelle, la compensation de la différence de structure mécanique doit être réalisée. Si l'accéléromètre cible est de type multiaxial et si la compensation de la réponse en fréquence de la différence de structure mécanique est exigée, on doit noter que la mesure est valable dans la gamme de fréquences dans laquelle les données de compensation sont disponibles le long de tous les axes de l'accéléromètre.

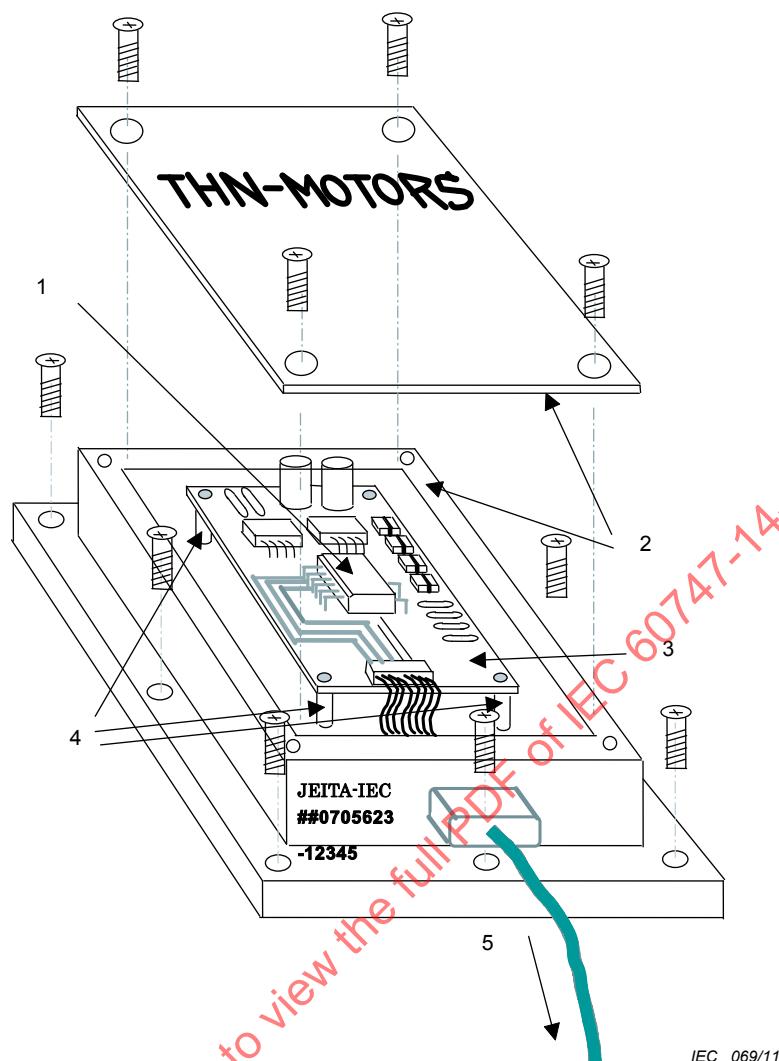
Il convient de bien noter que la réponse en fréquence est mesurée dans le domaine dans lequel la linéarité dynamique des accéléromètres est garantie. Bien que la mesure de la linéarité dynamique utilisant un générateur de vibrations soit plutôt fastidieuse, elle est indispensable en principe. La linéarité dynamique est aussi très importante en termes de fréquence de résonance dans la mesure de l'accélération de choc. La présente norme décrit la linéarité dynamique comme base de la mesure de la mesure de la réponse en fréquence.



NOTE La cible de la mesure de la caractéristique de la réponse en fréquence est le système entouré par la ligne en pointillés.

Figure 6 – L'accélérateur à semiconducteur en tant que système

La Figure 7 donne un exemple de la structure de système d'accéléromètre à semiconducteurs assemblé pour le concept de réponse en fréquence d'accéléromètre.



Légende

- 1 Accéléromètre
- 2 Conteneur pour une carte de circuit avec puce accéléromètre, circuits et câbles électriques
- 3 Carte de circuit
- 4 Support
- 5 Câble

Figure 7 – Exemple de structure de système d'accéléromètre à semiconducteurs assemblée pour le concept de réponse en fréquence d'accéléromètre

5.2.11.2 Considérations électriques

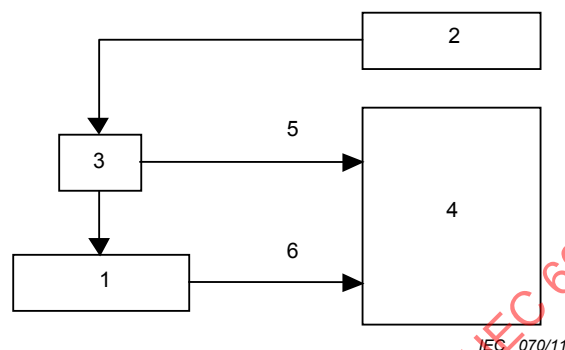
Le but de la méthode présentée ici est d'obtenir la réponse de l'accéléromètre cible aux signaux électriques appliqués correspondant aux accélérations réelles. Il convient que les signaux électriques aient les composants de fréquence nécessaires.

Bien que cette méthode soit adaptée à la mesure de réponse en basse fréquence pour les accéléromètres à boucle fermée, avec prise en compte appropriée de la précision, elle peut être appliquée soit à des régions de fréquence plus élevée soit à des accéléromètres à boucle ouverte. Comme cette méthode peut donner les caractéristiques de réponse en fréquence de l'accéléromètre à semiconducteurs sous la forme d'une puce, sans être

influencée par l'emballage, les cartes de circuit et les conteneurs, elle peut être utilisée pour une inspection en cours de processus par les fabricants d'accéléromètres avec l'autotest.

L'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1, sauf spécification contraire.

- Installer l'appareillage de mesure comme indiqué à la Figure 8.
- Appliquer le signal électrique et mesurer le signal de la voie A et de la voie B.
- Calculer le gain et la caractéristique de phase en utilisant les données obtenues.



Légende

- | | |
|---------------------------------------|------------------------|
| 1 Accéléromètre cible | 2 Générateur de signal |
| 3 Dispositif de surveillance d'entrée | 4 Analyseur de signal |
| 5 Voie A | 6 Voie B |

Figure 8 – Schéma de la mesure de réponse en fréquence par entrée électrique

5.2.12 Courant d'alimentation

Sauf spécification contraire, l'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1.1.

- Connecter les dispositifs de mesure de courant et appliquer la puissance comme spécifié en 5.1.1 d).
- Enregistrer le courant de chaque source.

La valeur du courant d'alimentation doit être conforme à l'exigence de la spécification individuelle.

5.2.13 Bruit en sortie

Sauf spécification contraire, l'accéléromètre doit être mis en fonctionnement dans les conditions d'essai normales de 5.1.1.

- Connecter la sortie à l'équipement d'analyse de spectre et appliquer la puissance comme spécifié en 5.1.1 d).
- Enregistrer la valeur quadratique moyenne dans une largeur de bande d'analyse spécifiée V_{rms}/Hz et l'exprimer en volts par racine carrée de hertz $V/\sqrt{\text{Hz}}$.

La valeur doit être conforme à l'exigence de la spécification individuelle.

6 Réception et fiabilité

6.1 Généralités

L'essai dans cet article doit, en général, être conforme à la série CEI 60749 et, pour les modes opératoires d'essai, à la série CEI 61000-4.

Il convient que les conditions d'essai telles que la température, l'humidité etc. soient conformes à la CEI 60749-1, sauf indication contraire dans la spécification d'approvisionnement applicable.

6.2 Essai d'environnement

6.2.1 Stockage à haute température

La CEI 60749-6, avec quelque modification, est applicable pour le mode opératoire d'essai.

La température de stockage doit être la température de stockage maximale donnée dans la spécification particulière.

Pour la durée de stockage, la 60749-6 est applicable, sauf indication contraire dans la spécification applicable.

6.2.2 Stockage à basse température

6.2.2.1 Généralités

Ce paragraphe donne les méthodes pour évaluer l'endurance des accéléromètres à semiconducteurs lorsqu'ils sont stockés à basse température pendant une longue durée.

Comme la série CEI 60749 ne donne aucune norme pour l'essai de stockage à basse température, les modes opératoires d'essai suivants sont recommandés.

6.2.2.2 Équipement d'essai

L'enceinte à utiliser pour cet essai doit conserver la température d'essai à la valeur spécifiée en 6.1.2.3.2 et dans les tolérances données. Dans ce cas, la chambre doit être construite de manière à ce que l'éprouvette ne puisse pas être exposée aux rayonnements directs provenant de la source de froid au cours de l'essai.

6.2.2.3 Mode opératoire

6.2.2.3.1 Mesure initiale

La mesure initiale doit être réalisée conformément aux éléments et conditions stipulés dans la spécification détaillée.

6.2.2.3.2 Essai

Stocker l'éprouvette dans l'enceinte thermostatée et la prérégler à la basse température spécifiée pour la durée spécifiée. Il convient que la température de stockage soit la température minimale assignée, $T_{\text{stg min}}$, sauf spécification contraire.

Il convient que la tolérance pour la température de stockage soit de $\pm 5^\circ\text{C}$ à une température inférieure à -25°C et de $+3^\circ\text{C}$ à -5°C à une température qui n'est pas inférieure à -25°C .

Il convient que la durée d'essai soit de 1 000 h, sauf spécification contraire.

6.2.2.3.3 Post-traitement

A l'issue de l'essai, sortir l'éprouvette de l'enceinte thermostatée et la laisser dans les conditions normales pendant 2 h à 24 h de manière à ce que l'éprouvette puisse atteindre l'équilibre thermique.

Il convient d'éliminer au préalable le givre ou les gouttes d'eau sur le spécimen.

6.2.2.3.4 Mesure de point final

Réaliser la mesure de point final conformément aux éléments et conditions stipulés dans la spécification détaillée.

Les informations à donner dans la spécification détaillée sont les suivantes:

- a) éléments et conditions des mesures initiales données en 6.1.2.3.1;
- b) température de stockage, si elle est différente de $T_{\text{stg min}}$, donnée en 6.1.2.3.2;
- c) durée d'essai si elle est différente de 1 000 h donnée en 6.1.2.3.2;
- d) post-traitement, si obligatoire et pas donné en 6.1.2.3.3;
- e) éléments et conditions des mesures de point final, donnés dans le présent paragraphe.

6.2.3 Stockage à l'humidité, température

La CEI 60749-5 est applicable sans tension de polarisation pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans la spécification applicable.

6.2.4 Cycle de température

La CEI 60749-25 est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans les spécifications applicables.

6.2.5 Choc thermique

La CEI 60749-11 est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans les spécifications applicables.

6.2.6 Brouillard salin

La CEI 60749-13 est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans les spécifications applicables.

6.2.7 Vibrations

La CEI 60749-12 est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans les spécifications applicables.

6.2.8 Chocs mécaniques

La CEI 60749-10 est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans les spécifications applicables.

6.2.9 Immunité au bruit électrique

La CEI 61000-4-4 est applicable pour cette procédure d'essai.

6.2.10 Immunité aux décharges électrostatiques

La CEI 61000-4-2 est applicable pour cette procédure d'essai.

6.2.11 Immunité aux rayonnements de champs électromagnétiques

La CEI 61000-4-3 est applicable pour cette procédure d'essai.

6.3 Essai de fiabilité

6.3.1 Durée de vie en régime permanent

La CEI 60749-6, avec quelques modifications, est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans la spécification applicable.

Les principales conditions d'essai de la présente norme sont les suivantes:

- a) température ambiante qui doit être la température ambiante de fonctionnement maximale conformément aux caractéristiques assignées des dispositifs;
- b) application de la tension d'alimentation nominale ou maximale conformément aux caractéristiques assignées du dispositif;
- c) aucune accélération le long de l'axe d'entrée du dispositif.

6.3.2 Durée de vie sous température et humidité

La CEI 60749-5 est applicable pour cette procédure d'essai sauf indication contraire dans les spécifications applicables.

Les principales conditions d'essai de la présente norme sont les suivantes:

- a) application de la tension d'alimentation nominale ou maximale conformément aux caractéristiques assignées du dispositif;
- b) aucune accélération le long de l'axe d'entrée du dispositif.

Annexe A (informative)

Définition de la matrice de sensibilité d'un accéléromètre

A.1 Remarques préliminaires

Un des nouveaux aspects de l'accéléromètre à semiconducteurs est la structure mécanique intrinsèque pour la mesure de l'accélération comme un vecteur. Un accéléromètre à trois axes classique est une combinaison de trois accéléromètres à axe unique étalonnés en utilisant le générateur de vibrations à une dimension.

Normalement, l'axe de sensibilité des accéléromètres à axe unique suit toujours la direction du mouvement de vibration. Toutefois, il convient de noter que l'étalonnage d'un accéléromètre à axe unique en utilisant une table vibrante à un axe est très litigieux car la direction n'est pas prise en compte. La mesure de l'accélération est la mesure de l'amplitude et de la direction car l'accélération est une grandeur vectorielle. Comme un générateur de vibration à un axe ne peut pas clarifier la sensibilité d'axe transversal des accéléromètres à un axe en fonction de la fréquence, combiner trois accéléromètres à un axe le long du système de coordonnées orthogonales ne peut pas être une méthode physiquement rigoureuse de mesure de l'accélération comme vecteur. C'est pourquoi les accéléromètres à trois axes diffèrent des accéléromètres tridimensionnels qui peuvent mesurer l'accélération comme un vecteur défini dans l'espace à trois dimensions avec trois degrés de liberté. La technique conventionnelle peut étalonner uniquement les accéléromètres de niveau 1 même si elle a été longtemps acceptée. Ceci est dû au fait que presque toutes les tables vibrantes ont seulement possédé un seul axe. Ceci provient manifestement du fait que la table vibrante est une machine qui génère l'espace vectoriel d'accélération d'entrée.

La présente norme décrit la sensibilité comme une matrice définissant une relation entre l'espace vectoriel d'accélération d'entrée et l'espace vectoriel de sortie de l'accéléromètre. Bien qu'un vecteur d'accélération ne comprenne pas uniquement des composantes de translation, mais comporte aussi des composantes de rotation, le générateur de vibrations actuel n'est pas encore assez évolué pour le mouvement de précision avec six degrés de liberté. La matrice de sensibilité est donc dérivée en termes d'accélération de translation au commencement.

NOTE 1 Il convient de noter que la matrice de sensibilité peut être appliquée à n'importe quel accéléromètre à axes multiples. Cela intègre bien entendu non seulement les accéléromètres à semiconducteurs à axes multiples mais aussi les accéléromètres assemblés à trois axes dans lesquels trois accéléromètres piézoélectriques à un axe ou accéléromètres d'asservissement sont fixés sur le plateau de bloc dans le système de coordonnées orthogonales. La différence essentielle entre les accéléromètres à semiconducteurs à axes multiples et les accéléromètres à axes multiples conventionnels est le nombre de systèmes sismiques dans l'accéléromètre à axes multiples. La plupart des accéléromètres à semiconducteurs à axes multiples possèdent seulement des systèmes sismiques simples avec une sensibilité d'accélération multidimensionnelle.

NOTE 2 L'espace dans lequel un accéléromètre est étalonné peut avoir au maximum six dimensions. Même si l'espace de mouvement normal dans lequel les accéléromètres sont appliqués est un espace de mouvement de translation avec trois degrés de liberté à la conception, les situations anormales telles que les catastrophes naturelles ou les accidents peuvent générer le mouvement de rotation, c'est-à-dire les espaces de mouvement avec des dimensions supérieures à celles prises en compte à la conception. Apparemment, il est coûteux d'étalonner des accéléromètres dans l'espace vectoriel dont les dimensions sont supérieures à 1. Toutefois, il est impossible d'écarter les accéléromètres à semiconducteurs à axes multiples comme ceux à trois, cinq ou six axes sur le marché. Cette tendance a clarifié le vide des techniques de caractérisation de la qualité de mesure entre ce qui est disponible à l'heure actuelle et ce qui doit être disponible dans le futur. En outre, personne ne peut empêcher le développement de machines de génération d'espace de mouvement pour l'espace vectoriel hexadimensionnel qui jouit actuellement d'un succès mondial. Pour ces raisons, la présente annexe décrit la sensibilité d'un accéléromètre sous la forme d'une matrice dérivée dans l'espace vectoriel avec la dimension trois ou six.

NOTE 3 Comme énoncé en 5.2.1 Plage de mesure, la mesure de l'accélération conventionnelle part de l'hypothèse selon laquelle l'accélération est appliquée le long de l'axe d'entrée. Ceci est raisonnable uniquement lorsqu'un axe d'entrée est seul et que la direction de mouvement est toujours prévisible. Cela n'a pas de sens

d'appliquer l'accélération le long d'un des axes d'entrée des accéléromètres à axes multiples. Tant que l'accélération est une grandeur vectorielle, mesurer l'accélération en utilisant des accéléromètres signifie mesurer à la fois l'amplitude et la direction avec une expression de composante. Par conséquent, la technique conventionnelle d'étalonnage pour les accéléromètres ne contribue pas à la mesure de l'accélération lorsque ni l'amplitude ni la direction ne sont connues.

NOTE 4 L'ISO 2041 énonce que l'accélération est une grandeur vectorielle.

NOTE 5 L'Annexe A est applicable aux gyroscopes à semiconducteurs, aux gyroscopes à semiconducteurs avec une capacité de détection d'accélération et aux mesureurs inertiels, lesquels sont appelés IMU.

A.2 Fondamentaux

A.2.1 Formulation mathématique

A.2.1.1 Formulation d'accéléromètre à trois axes

L'accélération étant une grandeur vectorielle, la notation matricielle de la sensibilité d'un accéléromètre est généralement acceptée. Tant que la sensibilité d'un accéléromètre à trois axes est reconnue, la sensibilité d'un accéléromètre en fonction de la fréquence et sous la forme d'une matrice doit être définie. L'hypothèse fondamentale est la linéarité dans le voisinage du point d'équilibre. Le fait d'admettre par hypothèse que la matrice de sensibilité est seulement valable pour un montage spécifié peut résoudre la difficulté consistant en ce que l'équilibre mécanique dépend de la manière dont l'accéléromètre est installé.

L'accélération d'entrée doit être définie comme un vecteur comme suit:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{input}}(t) &= \begin{pmatrix} a_{g,x}(t) \\ a_{g,y}(t) \\ a_{g,z}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_{\text{output}}(t) &= \begin{pmatrix} a_{s,x}(t) \\ a_{s,y}(t) \\ a_{s,z}(t) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

où $\mathbf{A}_{\text{input}}(t)$ et $\mathbf{A}_{\text{output}}(t)$ sont respectivement l'accélération injectée en entrée dans l'accéléromètre et à la sortie délivrée par l'accéléromètre cible. Normalement, un accéléromètre a une sensibilité non seulement le long de l'axe de sensibilité mais aussi le long de l'axe qui est orthogonal à l'axe de sensibilité. La matrice de sensibilité d'un accéléromètre est définie comme suit:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

où $S_{pq}(p=q)$ et $S_{pq}(p \neq q)$ sont respectivement la sensibilité normale et la sensibilité transversale. Chaque élément de la matrice de sensibilité est une fonction de la fréquence angulaire, ω . Les sensibilités $S_{xx}(j\omega)$, $S_{xy}(j\omega)$ et $S_{xz}(j\omega)$ sont définies comme suit en activant l'accéléromètre cible à l'aide de l'accélération $(a_x(t) \ 0 \ 0)$ le long de l'axe X:

$$\begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) \\ S_{yx}(j\omega) \\ S_{zx}(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L[a_{x,x}(t)]}{L[a_x(t)]} \\ \frac{L[a_{y,x}(t)]}{L[a_x(t)]} \\ \frac{L[a_{z,x}(t)]}{L[a_x(t)]} \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

où $a_{x,x}(t)$, $a_{y,x}(t)$ et $a_{z,x}(t)$ sont respectivement la sortie de l'axe X par l'entrée de l'axe X, la sortie de l'axe Y par l'entrée de l'axe X et la sortie de l'axe Z par l'entrée de l'axe X, L représente l'opérateur de la transformée de Laplace et j est l'unité imaginaire.

Les sensibilités $S_{xy}(j\omega)$, $S_{yy}(j\omega)$ et $S_{zy}(j\omega)$ sont définies comme suit en activant l'accéléromètre cible par l'accélération $(0 \ a_y(t) \ 0)$ le long de l'axe Y:

$$\begin{pmatrix} S_{xy}(j\omega) \\ S_{yy}(j\omega) \\ S_{zy}(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L[a_{x,y}(t)]}{L[a_y(t)]} \\ \frac{L[a_{y,y}(t)]}{L[a_y(t)]} \\ \frac{L[a_{z,y}(t)]}{L[a_y(t)]} \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

où $a_{x,y}(t)$, $a_{y,y}(t)$ et $a_{z,y}(t)$ sont respectivement la sortie de l'axe X par l'entrée de l'axe Y, la sortie de l'axe Y par l'entrée de l'axe Y et la sortie de l'axe Z par l'entrée de l'axe Y.

Les sensibilités $S_{xz}(j\omega)$, $S_{yz}(j\omega)$ et $S_{zz}(j\omega)$ sont définies comme suit en activant l'accéléromètre cible par l'accélération $(0 \ 0 \ a_z(t))$ le long de l'axe Z:

$$\begin{pmatrix} S_{xz}(j\omega) \\ S_{yz}(j\omega) \\ S_{zz}(j\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L[a_{x,z}(t)]}{L[a_z(t)]} \\ \frac{L[a_{y,z}(t)]}{L[a_z(t)]} \\ \frac{L[a_{z,z}(t)]}{L[a_z(t)]} \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

où $a_{x,z}(t)$, $a_{y,z}(t)$ et $a_{z,z}(t)$ sont respectivement la sortie de l'axe X par l'entrée de l'axe Z, la sortie de l'axe Y par l'entrée de l'axe Z et la sortie de l'axe Z par l'entrée de l'axe Z.

C'est pourquoi la relation générale entre l'accélération vectorielle d'entrée vers l'accéléromètre cible et la sortie de l'accéléromètre dans le domaine de fréquence est exprimée comme suit:

$$\begin{aligned} & L[\mathbf{A}_{\text{output}}] \\ &= \begin{pmatrix} L[a_{s,x}(t)] \\ L[a_{s,y}(t)] \\ L[a_{s,z}(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{s,x}(j\omega) \\ a_{s,y}(j\omega) \\ a_{s,z}(j\omega) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) & S_{xy}(j\omega) & S_{xz}(j\omega) \\ S_{yx}(j\omega) & S_{yy}(j\omega) & S_{yz}(j\omega) \\ S_{zx}(j\omega) & S_{zy}(j\omega) & S_{zz}(j\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{g,x}(j\omega) \\ a_{g,y}(j\omega) \\ a_{g,z}(j\omega) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

A.2.1.2 Matrice de sensibilité d'un accéléromètre à deux axes

Même si l'accéléromètre cible est de type à deux axes, il est toujours nécessaire de montrer la définition exacte sous forme de matrice. Si l'accéléromètre cible est installé dans le plan X-Y, les composants de la matrice de sensibilité liés à la sortie de l'axe Z, tels que $S_{zx}(j\omega)$, $S_{zy}(j\omega)$ et $S_{zz}(j\omega)$, sont bien entendu nuls. Cependant, la sortie induite par l'entrée de

l'accélération de l'axe X et de l'axe Y peut être influencée par l'entrée de l'accélération de l'axe Z également. La relation suivante est donc valide:

$$\begin{aligned} L[A_{\text{output}}(t)] &= \begin{pmatrix} L[a_{s,x}(t)] \\ L[a_{s,y}(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{s,x}(j\omega) \\ a_{s,y}(j\omega) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) & S_{xy}(j\omega) & S_{xz}(j\omega) \\ S_{yx}(j\omega) & S_{yy}(j\omega) & S_{yz}(j\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{g,x}(j\omega) \\ a_{g,y}(j\omega) \\ a_{g,z}(j\omega) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

où j est l'unité imaginaire.

A.2.1.3 Matrice de sensibilité d'un accéléromètre à un axe

Si l'accéléromètre cible est du type à un axe, il convient de reconnaître que la définition exacte doit être donnée sous la forme d'une matrice. Ici, l'hypothèse posée est que l'axe de sensibilité de l'accéléromètre est l'axe X.

$$\begin{aligned} L[A_{\text{output}}(t)] &= L[a_{s,x}(t)] = a_{s,x}(j\omega) \\ &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega) & S_{xy}(j\omega) & S_{xz}(j\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{g,x}(j\omega) \\ a_{g,y}(j\omega) \\ a_{g,z}(j\omega) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

A.2.2 Étalonnage

A.2.2.1 Étalonnage utilisant une table vibrante

A.2.2.1.1 Étalonnage utilisant une table vibrante tridimensionnelle

Les considérations mathématiques ont montré qu'il convient qu'une matrice exprime la sensibilité d'un accéléromètre. L'étalonnage est un processus pour déterminer tous les composants de la matrice en fonction de la fréquence et d'autres paramètres si nécessaire. L'accélération étant une grandeur vectorielle, un accéléromètre doit en principe être étalonné non seulement par l'amplitude mais aussi par la direction. L'étalonnage de l'accéléromètre qui mesure l'accélération comme un vecteur doit vérifier si la composante d'accélération le long de l'axe de sensibilité est mesurée avec précision, quelle que soit la direction. Cela va sans dire, il est impossible de le vérifier dans chaque direction. Toutefois, déterminer chaque composant dans la matrice de sensibilité équivaut à étalonner à la fois l'amplitude et la direction, ce qui est l'essence d'une grandeur vectorielle.

À la fréquence spécifiée f_i , trois sortes de vecteur accélération sont créées:

$$\mathbf{a}_{i,1} = \begin{pmatrix} a_{i,1,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$\mathbf{a}_{i,2} = \begin{pmatrix} a_{i,2,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,2,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,2,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$\mathbf{a}_{i,3} = \begin{pmatrix} a_{i,3,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,3,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,3,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Les vecteurs accélération de sortie de l'accéléromètre cible $\mathbf{b}_{i,1}$, $\mathbf{b}_{i,2}$ et $\mathbf{b}_{i,3}$ sont exprimés comme suit:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{i,1} &= \begin{pmatrix} b_{i,1,x}(j\omega_i) e^{j2\pi f_i t} \\ b_{i,1,y}(j\omega_i) e^{j2\pi f_i t} \\ b_{i,1,z}(j\omega_i) e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) & S_{xy}(j\omega_i) & S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) & S_{yy}(j\omega_i) & S_{yz}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) & S_{zy}(j\omega_i) & S_{zz}(j\omega_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{i,1,x} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,y} e^{j2\pi f_i t} \\ a_{i,1,z} e^{j2\pi f_i t} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{b}_{i,2} = \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) & S_{xy}(j\omega_i) & S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) & S_{yy}(j\omega_i) & S_{yz}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) & S_{zy}(j\omega_i) & S_{zz}(j\omega_i) \end{pmatrix} \mathbf{a}_{i,2} \quad (\text{A.13})$$

$$\mathbf{b}_{i,3} = \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) & S_{xy}(j\omega_i) & S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) & S_{yy}(j\omega_i) & S_{yz}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) & S_{zy}(j\omega_i) & S_{zz}(j\omega_i) \end{pmatrix} \mathbf{a}_{i,3} \quad (\text{A.14})$$

où chaque composant de $(\mathbf{b}_{i,1} \ \mathbf{b}_{i,2} \ \mathbf{b}_{i,3})$ est un nombre complexe et il convient qu'il soit mesuré avec la précision maximale possible, c'est-à-dire avec un interféromètre à laser. La résolution des équations linéaires simultanées suivantes conduit à la matrice de sensibilité à une fréquence donnée de f_i , ($\omega_i = 2\pi f_i$).

$$\begin{aligned} S_{xx}(j\omega_i) a_{i,1,x} + S_{xy}(j\omega_i) a_{i,1,y} + S_{xz}(j\omega_i) a_{i,1,z} &= b_{i,1,x}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) a_{i,1,x} + S_{yy}(j\omega_i) a_{i,1,y} + S_{yz}(j\omega_i) a_{i,1,z} &= b_{i,1,y}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) a_{i,1,x} + S_{zy}(j\omega_i) a_{i,1,y} + S_{zz}(j\omega_i) a_{i,1,z} &= b_{i,1,z}(j\omega_i) \\ S_{xx}(j\omega_i) a_{i,2,x} + S_{xy}(j\omega_i) a_{i,2,y} + S_{xz}(j\omega_i) a_{i,2,z} &= b_{i,2,x}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) a_{i,2,x} + S_{yy}(j\omega_i) a_{i,2,y} + S_{yz}(j\omega_i) a_{i,2,z} &= b_{i,2,y}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) a_{i,2,x} + S_{zy}(j\omega_i) a_{i,2,y} + S_{zz}(j\omega_i) a_{i,2,z} &= b_{i,2,z}(j\omega_i) \\ S_{xx}(j\omega_i) a_{i,3,x} + S_{xy}(j\omega_i) a_{i,3,y} + S_{xz}(j\omega_i) a_{i,3,z} &= b_{i,3,x}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) a_{i,3,x} + S_{yy}(j\omega_i) a_{i,3,y} + S_{yz}(j\omega_i) a_{i,3,z} &= b_{i,3,y}(j\omega_i) \\ S_{zx}(j\omega_i) a_{i,3,x} + S_{zy}(j\omega_i) a_{i,3,y} + S_{zz}(j\omega_i) a_{i,3,z} &= b_{i,3,z}(j\omega_i) \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

La réécriture de l'équation (A.15) donne l'équation (A.16) comme équations linéaires simultanées sur les composants de la matrice de sensibilité.

$$\begin{pmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{xy} \\ S_{xz} \\ S_{yx} \\ S_{yy} \\ S_{yz} \\ S_{zx} \\ S_{zy} \\ S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{i,1,x} \\ b_{i,1,y} \\ b_{i,1,z} \\ b_{i,2,x} \\ b_{i,2,y} \\ b_{i,2,z} \\ b_{i,3,x} \\ b_{i,3,y} \\ b_{i,3,z} \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Il convient de noter que la partie droite des équations (A.16) est un vecteur complexe. La relation obtenue par l'échange de lignes de la matrice de coefficients comme représenté dans l'équation (A.17) démontre que les équations (A.16) peuvent être résolues si $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ et $a_{i,3}$ sont linéairement indépendants.

$$\begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix}^3 \quad (\text{A.17})$$

Le schéma de réponse en fréquence exige une mesure répétée à la fréquence f_n ($n = 1, \dots, N$) et la résolution des équations linéaires ci-dessus.

Si l'accéléromètre cible est du type à deux axes, les équations suivantes doivent être résolues pour obtenir tous les composants de la matrice de sensibilité à n'importe quelle fréquence donnée, f_i .

$$\begin{aligned} S_{xx}(j\omega_i)a_{i,1,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,1,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,1,z} &= b_{i,1,x} \\ S_{yx}(j\omega_i)a_{i,1,x} + S_{yy}(j\omega_i)a_{i,1,y} + S_{yz}(j\omega_i)a_{i,1,z} &= b_{i,1,y} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,2,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,2,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,2,z} &= b_{i,2,x} \\ S_{yx}(j\omega_i)a_{i,2,x} + S_{yy}(j\omega_i)a_{i,2,y} + S_{yz}(j\omega_i)a_{i,2,z} &= b_{i,2,y} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,3,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,3,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,3,z} &= b_{i,3,x} \\ S_{yx}(j\omega_i)a_{i,3,x} + S_{yy}(j\omega_i)a_{i,3,y} + S_{yz}(j\omega_i)a_{i,3,z} &= b_{i,3,z} \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

La réécriture des équations (A.18) donne les équations (A.19) comme équations linéaires simultanées sur les composants de la matrice de sensibilité.

$$\begin{pmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx}(j\omega_i) \\ S_{xy}(j\omega_i) \\ S_{xz}(j\omega_i) \\ S_{yx}(j\omega_i) \\ S_{yy}(j\omega_i) \\ S_{yz}(j\omega_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{i,1,x} \\ b_{i,1,y} \\ b_{i,2,x} \\ b_{i,2,y} \\ b_{i,3,x} \\ b_{i,3,y} \end{pmatrix} \quad (\text{A.19})$$

Il convient de noter que la partie droite des équations (A.19) est un vecteur complexe. La relation obtenue par l'échange de lignes de la matrice de coefficients démontre que les équations (A.19) peuvent être résolues si $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ et $a_{i,3}$ sont linéairement indépendants comme montré dans l'équation (A.20).

$$\begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} a_{i,1,x} & a_{i,1,y} & a_{i,1,z} \\ a_{i,2,x} & a_{i,2,y} & a_{i,2,z} \\ a_{i,3,x} & a_{i,3,y} & a_{i,3,z} \end{vmatrix}^2 \quad (\text{A.20})$$

Si l'accéléromètre cible est du type à un axe, les équations suivantes doivent être résolues pour obtenir tous les composants dans la matrice de sensibilité à n'importe quelle fréquence donnée, f_i .

$$\begin{aligned} S_{xx}(j\omega_i)a_{i,1,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,1,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,1,z} &= b_{i,1,x} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,2,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,2,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,2,z} &= b_{i,2,x} \\ S_{xx}(j\omega_i)a_{i,3,x} + S_{xy}(j\omega_i)a_{i,3,y} + S_{xz}(j\omega_i)a_{i,3,z} &= b_{i,3,x} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Les équations linéaires simultanées (A.21) peuvent être résolues si $a_{i,1}$, $a_{i,2}$ et $a_{i,3}$ sont linéairement indépendants.

A.2.2.1.2 Étalonnage utilisant une table vibrante à une dimension (voir Tableau A.1)

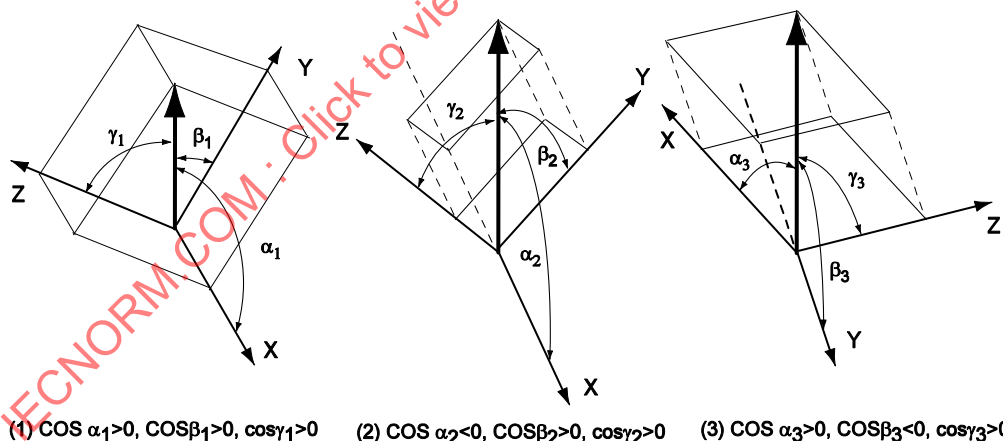
En théorie, la matrice de sensibilité pourrait être dérivée en utilisant des tables vibrantes à une dimension. La table vibrante à une dimension crée soit un mouvement de translation à une dimension, soit un mouvement de rotation à une dimension. Cependant, il convient de considérer sérieusement les difficultés suivantes:

- L'influence de l'accélération gravitationnelle sur la performance de la partie mécanique de l'accéléromètre est négligée.
- La contrainte de base de l'accéléromètre cible due à l'installation n'est pas constante car le montage est ajusté de sorte que la direction du mouvement de la table vibrante à une dimension puisse être le long d'un des axes d'entrée des accéléromètres à axes multiples.
- Une faible efficacité de l'étalonnage est inévitable.
- Un coût élevé d'étalonnage est induit par la faible efficacité de l'étalonnage.
- Il est difficile de faire face à la forte production en masse des accéléromètres à semiconducteurs.
- Les informations sur le gabarit de réglage précis et de robustesse mécanique ne sont pas disponibles.

La Figure A.1 donne un exemple du cosinus directeur.

Tableau A.1 – Symboles pour la relation entre l'accélération d'entrée et le signal de sortie d'un accéléromètre en utilisant une table vibrante à une dimension

Du côté de l'entrée				Du côté de la sortie	
Excitation	Accélération de sortie d'une table vibrante à une dimension	Cosinus directeur entre l'accélération entrée par une table vibrante à une dimension et l'axe de coordonnées d'entrée	Vecteur accélération d'entrée	Numéro d'axe	Valeur de sortie délivrée par l'accéléromètre
1	$a_{iz,1} \exp(j\omega t)$	$\cos \alpha_1$	$a_{iz,1} \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \\ \cos \beta_1 \\ \cos \gamma_1 \end{pmatrix} \exp(j\omega t)$	1	$V_{ox1} \exp(j\omega t)$
		$\cos \beta_1$		2	$(V_{ox1} \ V_{oy1}) \exp(j\omega t)$
		$\cos \gamma_1$		3	$(V_{ox1} \ V_{oy1} \ V_{oz1}) \exp(j\omega t)$
2	$a_{iz,2} \exp(j\omega t)$	$\cos \alpha_2$	$a_{iz,2} \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 \\ \cos \beta_2 \\ \cos \gamma_2 \end{pmatrix} \exp(j\omega t)$	1	$V_{ox2} \exp(j\omega t)$
		$\cos \beta_2$		2	$(V_{ox2} \ V_{oy2}) \exp(j\omega t)$
		$\cos \gamma_2$		3	$(V_{ox2} \ V_{oy2} \ V_{oz2}) \exp(j\omega t)$
3	$a_{iz,3} \exp(j\omega t)$	$\cos \alpha_3$	$a_{iz,3} \begin{pmatrix} \cos \alpha_3 \\ \cos \beta_3 \\ \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \exp(j\omega t)$	1	$V_{ox3} \exp(j\omega t)$
		$\cos \beta_3$		2	$(V_{ox3} \ V_{oy3}) \exp(j\omega t)$
		$\cos \gamma_3$		3	$(V_{ox3} \ V_{oy3} \ V_{oz3}) \exp(j\omega t)$



IEC 071/11

Figure A.1 – Exemple de cosinus directeur

A.2.2.2 Étalonnage utilisant l'excitation d'impact

A.2.2.2.1 Étalonnage utilisant un excitateur d'impact à trois dimensions

L'appareillage de génération de mouvement pour l'étalonnage est à l'origine un simulateur de mouvement de l'espace vectoriel de mouvement réel. Si l'accéléromètre cible est utilisé pour mesurer l'accélération dans l'espace vectoriel de mouvement à trois dimensions, il est naturel de penser qu'il convient que le générateur de mouvement, c'est-à-dire la table vibrante, génère l'espace vectoriel de mouvement à trois dimensions. Le vecteur accélération a généré par une table vibrante à N dimensions est décrit par l'équation suivante:

$$\mathbf{a} = \sum_{j=1}^N c_j \mathbf{e}_j \quad (\text{A.22})$$

où $c_j (j=1, \dots, N)$ sont les constantes et $\mathbf{e}_j (j=1, \dots, N)$ le vecteur accélération unité généré par chaque actionneur au total jusqu'à N . Il convient de noter que la table vibrante à N dimensions pourrait générer l'accélération arbitraire comme une combinaison linéaire traduite par l'équation (A.22). Par contre, une table vibrante à N axes ne pourrait normalement pas générer d'accélération arbitraire sous la forme de l'équation (A.22).

Tableau A.2 – Symboles pour les signaux d'accélération d'entrée et les signaux de sortie d'un accéléromètre

Excitation	Accélération d'entrée en fonction du temps	Nombre d'axes	Signal d'accélération de sortie
1ère	$(a_{i,1,x}(t) \ a_{i,1,y}(t) \ a_{i,1,z}(t))$	1	$a_{oz1}(t)$
		2	$(a_{oy1}(t) \ a_{oz1}(t))$
		3	$(a_{ox1}(t) \ a_{oy1}(t) \ a_{oz1}(t))$
2ème	$(a_{i,2,x}(t) \ a_{i,2,y}(t) \ a_{i,2,z}(t))$	1	$a_{oz2}(t)$
		2	$(a_{oy2}(t) \ a_{oz2}(t))$
		3	$(a_{ox2}(t) \ a_{oy2}(t) \ a_{oz2}(t))$
3ème	$(a_{i,3,x}(t) \ a_{i,3,y}(t) \ a_{i,3,z}(t))$	1	$a_{oz3}(t)$
		2	$(a_{oy3}(t) \ a_{oz3}(t))$
		3	$(a_{ox3}(t) \ a_{oy3}(t) \ a_{oz3}(t))$

Tableau A.3 – Définition des symboles pour décrire le signal d'accélération d'entrée, signal de sortie d'un accéléromètre cible et le cosinus directeur répété trois fois

Accélération d'excitation		Relation suivant l'axe X de l'accéléromètre cible		Relation suivant l'axe Y de l'accéléromètre cible		Relation suivant l'axe Z de l'accéléromètre cible	
Excitation	Amplitude m/s ²	Sortie	Cosinus directeur	Sortie	Cosinus directeur	Sortie	Cosinus directeur
Première fois	$a_{i1}(t)$	$a_{ox1}(t)$	$\cos \alpha_1$	$a_{oy1}(t)$	$\cos \beta_1$	$a_{oz1}(t)$	$\cos \gamma_1$
Deuxième fois	$a_{i2}(t)$	$a_{ox2}(t)$	$\cos \alpha_2$	$a_{oy2}(t)$	$\cos \beta_2$	$a_{oz2}(t)$	$\cos \gamma_2$
Troisième fois	$a_{i3}(t)$	$a_{ox3}(t)$	$\cos \alpha_3$	$a_{oy3}(t)$	$\cos \beta_3$	$a_{oz3}(t)$	$\cos \gamma_3$

Les expressions vectorielles des première, deuxième et troisième excitations sont respectivement écrites comme $(a_{ix1}(t) \ a_{iy1}(t) \ a_{iz1}(t))$, $(a_{ix2}(t) \ a_{iy2}(t) \ a_{iz2}(t))$ et $(a_{ix3}(t) \ a_{iy3}(t) \ a_{iz3}(t))$. Les équations (A.23) à (A.34) suivantes sont alors valides:

$$a_{i1}(t) = \sqrt{(a_{ix1}(t))^2 + (a_{iy1}(t))^2 + (a_{iz1}(t))^2} \quad (\text{A.23})$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{a_{i1x}(t)}{a_{i1}(t)} \quad (\text{A.24})$$

$$\cos \beta_1 = \frac{a_{i1y}(t)}{a_{i1}(t)} \quad (\text{A.25})$$

$$\cos \gamma_1 = \frac{a_{i1z}(t)}{a_{i1}(t)} \quad (\text{A.26})$$

$$a_{i2}(t) = \sqrt{(a_{i2x}(t))^2 + (a_{i2y}(t))^2 + (a_{i2z}(t))^2} \quad (\text{A.27})$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{a_{i2x}(t)}{a_{i2}(t)} \quad (\text{A.28})$$

$$\cos \beta_2 = \frac{a_{i2y}(t)}{a_{i2}(t)} \quad (\text{A.29})$$

$$\cos \gamma_2 = \frac{a_{i2z}(t)}{a_{i2}(t)} \quad (\text{A.30})$$

$$a_{i3}(t) = \sqrt{(a_{i3x}(t))^2 + (a_{i3y}(t))^2 + (a_{i3z}(t))^2} \quad (\text{A.31})$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{a_{i3x}(t)}{a_{i3}(t)} \quad (\text{A.32})$$

$$\cos \beta_3 = \frac{a_{i3y}(t)}{a_{i3}(t)} \quad (\text{A.33})$$

$$\cos \gamma_3 = \frac{a_{i3z}(t)}{a_{i3}(t)} \quad (\text{A.34})$$

A.2.2.2.1.1 Accéléromètres à un axe

Les accéléromètres de niveau 1 à un axe sont étalonnés en utilisant l'équipement dans lequel l'axe de sensibilité de l'accéléromètre cible coïncide avec la direction de l'accélération d'impact. Dans les domaines fréquentiel et temporel dans lesquels la linéarité dynamique est garantie, la sensibilité normale est déduite de la fonction de transfert, $G_N(S)$, formulée par l'équation (A.35).

$$G_N(S) = \frac{L[V_{\text{out}}(t)]}{L[a_{\text{in}}(t)]} \quad (\text{A.35})$$

où $a_{\text{in}}(t)$ et $V_{\text{out}}(t)$ sont respectivement l'accélération d'entrée et la valeur de sortie de l'accéléromètre. La sensibilité transversale est également obtenue à partir de la fonction de transfert qui est dérivée en utilisant le montage dans lequel l'accélération d'impact est dans le plan, perpendiculairement à la sensibilité normale de l'accéléromètre cible.

D'un autre côté, la sensibilité des accéléromètres avec le niveau qui est différent du niveau 1 doit être déduite de la fonction de transfert sous la forme d'une matrice. Le Tableau A.4 montre la relation entre l'expression de la fonction de transfert sous la forme d'une matrice et le nombre d'axes des accéléromètres cibles.

Tableau A.4 – Relation entre l'expression de la fonction de transfert sous la forme d'une matrice et le nombre d'axes des accéléromètres cibles

Nombre d'axes	Expression de la fonction de transfert sous la forme d'une matrice	Axe d'entrée	Axe de sortie
1	$\begin{pmatrix} G_{zx}(S) & G_{zy}(S) & G_{zz}(S) \end{pmatrix}$	Axe X, axe Y, axe Z $\begin{pmatrix} a_{ix}(t) & a_{iy}(t) & a_{iz}(t) \end{pmatrix}$	Axe Z
2	$\begin{pmatrix} G_{zx}(S) & G_{zy}(S) & G_{zz}(S) \\ G_{yx}(S) & G_{yy}(S) & G_{yz}(S) \end{pmatrix}$	Axe X, axe Y, axe Z $\begin{pmatrix} a_{ix}(t) & a_{iy}(t) & a_{iz}(t) \end{pmatrix}$	Axe Y, axe Z
3	$\begin{pmatrix} G_{zx}(S) & G_{zy}(S) & G_{zz}(S) \\ G_{yx}(S) & G_{yy}(S) & G_{yz}(S) \\ G_{xx}(S) & G_{xy}(S) & G_{xz}(S) \end{pmatrix}$	Axe X, axe Y, axe Z $\begin{pmatrix} a_{ix}(t) & a_{iy}(t) & a_{iz}(t) \end{pmatrix}$	Axe X, axe Y, axe Z

$G_{zx}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe X et la sortie de l'axe Z

$G_{zy}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe Y et la sortie de l'axe Z

$G_{zz}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe Z et la sortie de l'axe Z

$G_{yx}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe X et la sortie de l'axe Y

$G_{yy}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe Y et la sortie de l'axe Y

$G_{yz}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe Z et la sortie de l'axe Y

$G_{xx}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe X et la sortie de l'axe X

$G_{xy}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe Y et la sortie de l'axe X

$G_{xz}(S)$: Fonction de transfert décrivant la relation entre l'accélération d'entrée le long de l'axe Z et la sortie de l'axe X

L'équation (A.36) est déduite en tenant compte de la situation générale dans laquelle l'accélération d'entrée n'est pas le long de l'axe d'entrée de l'accéléromètre à un axe.

$$a_{oz}(t) = a_{oz}(t) \Big|_{\text{la composante d'axe X}}^{\text{contribution de}} + a_{oz}(t) \Big|_{\text{la composante d'axe Y}}^{\text{contribution de}} + a_{oz}(t) \Big|_{\text{la composante d'axe Z}}^{\text{contribution de}} \quad (\text{A.36})$$

où $a_{oz}(t)$ est la sortie le long de l'axe Z de l'accéléromètre à un axe. L'équation (A.36) signifie que la sortie le long de l'axe Z est la somme des entrées le long des axes d'entrée X, Y et Z. Si l'on prend l'amplitude de l'accélération d'entrée comme étant $a_i(t)$ et la transformation de Laplace de l'équation (A. 36), on obtient l'équation (A.37).

$$\frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_i(t)]} = \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_{ix}(t)]} \cdot \frac{L[a_{ix}(t)]}{L[a_i(t)]} + \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_{iy}(t)]} \cdot \frac{L[a_{iy}(t)]}{L[a_i(t)]} + \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_{iz}(t)]} \cdot \frac{L[a_{iz}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.37})$$

L'équation (A.37) peut être réécrite sous la forme de l'équation (A.38):

$$G_{zx}(S) \cos \alpha + G_{zy}(S) \cos \beta + G_{zz}(S) \cos \gamma = \frac{L[a_{oz}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.38})$$

Les excitations sont effectuées trois fois et les indices 1, 2 et 3 correspondent respectivement à la première fois, la deuxième fois et la troisième fois. L'introduction des indices 1, 2 et 3 dans l'équation (A.38) conduit aux équations (A.39):

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{zx}(S) \\ G_{zy}(S) \\ G_{zz}(S) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (\text{A.39})$$

Les équations (A.39) peuvent être résolues à condition que le déterminant de la matrice de coefficients ne soit pas nul comme montré par (A.40):

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (\text{A.40})$$

La signification physique de la condition (A.40) est que les trois accélérations de chocs d'entrée sont linéairement indépendantes, c'est-à-dire que les trois vecteurs cosinus directeurs $(\cos \alpha_1 \cos \beta_1 \cos \gamma_1)$, $(\cos \alpha_2 \cos \beta_2 \cos \gamma_2)$ et $(\cos \alpha_3 \cos \beta_3 \cos \gamma_3)$ sont linéairement indépendants. Voir également le Tableau A.3.

A.2.2.2.1.2 Accéléromètres à deux axes

On part de l'hypothèse selon laquelle les sorties de l'accéléromètre cible viennent de l'axe Y et de l'axe Z comme indiqué au Tableau A.4. Quant aux sensibilités normales et sensibilités transversales des accéléromètres de niveau 1 à deux axes, la théorie énoncée en A.2.2.2.1.1 est appliquée à l'axe Y et à l'axe Z.

Quant à l'accéléromètre à deux axes dont le niveau est différent du niveau 1, la fonction de transfert doit être déduite sous la forme d'une matrice. L'expression similaire à l'équation (A.38) est valide en termes de sortie d'axe Y comme suit:

$$G_{yx}(S) \cos \alpha + G_{yy}(S) \cos \beta + G_{yz}(S) \cos \gamma = \frac{L[a_{oy}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.41})$$

La relation entre les signaux d'entrée et de sortie est articulée par l'équation (A.38) et l'équation (A.41). Les indices 1, 2 et 3 correspondent respectivement à l'excitation de la première, de la deuxième et de la troisième fois. L'application de l'accélération de choc à l'accélérateur cible trois fois conduit aux équations linéaires simultanées (A.42).

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{yx}(S) \\ G_{yy}(S) \\ G_{yz}(S) \\ G_{zx}(S) \\ G_{zy}(S) \\ G_{zz}(S) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L[a_{oy1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oy2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oy3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (\text{A.42})$$

L'échange de lignes de la matrice de coefficients dans les équations (A.42) changera l'expression comme indiqué dans les équations (A.43). Par conséquent, la solution des équations (A.42) est dérivée à condition que les trois vecteurs cosinus directeurs soient linéairement indépendants comme montré par (A.40).

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}^2 \quad (\text{A.43})$$

A.2.2.2.1.3 Accéléromètres à trois axes

On part de l'hypothèse selon laquelle les valeurs de sortie de l'accéléromètre cible proviennent de l'axe X et de l'axe Y et de l'axe Z comme indiqué au Tableau A.4. Quant aux sensibilités normales et sensibilités transversales des accéléromètres de niveau 1 à trois axes, la théorie énoncée en A.2.2.2.1.1 est appliquée à l'axe X, à l'axe Y et à l'axe Z.

Quant à l'accéléromètre à trois axes dont le niveau est différent du niveau 1, la fonction de transfert doit être déduite sous la forme d'une matrice. L'expression similaire à l'équation (A.38) est valide en termes de sortie d'axe X comme suit:

$$G_{xx}(S)\cos \alpha + G_{xy}(S)\cos \beta + G_{xz}(S)\cos \gamma = \frac{L[a_{ox}(t)]}{L[a_i(t)]} \quad (\text{A.44})$$

La relation entre les signaux d'entrée et de sortie est traduite par les équations (A.38), (A.41) et (A.44). Les indices 1, 2 et 3 correspondent respectivement à la première fois, à la deuxième fois et à la troisième fois. L'application de l'accélération de choc à l'accélérateur cible trois fois conduit aux équations (A.45).

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{X}_3 = \mathbf{b}_3 \quad (\text{A.45})$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.46})$$

$$\mathbf{X}_3 = \begin{pmatrix} G_{xx}(S) \\ G_{xy}(S) \\ G_{xz}(S) \\ G_{yx}(S) \\ G_{yy}(S) \\ G_{yz}(S) \\ G_{zx}(S) \\ G_{zy}(S) \\ G_{zz}(S) \end{pmatrix} \quad (\text{A.47})$$

$$\mathbf{b}_3 = \begin{pmatrix} L[a_{ox1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oy1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{oz1}(t)]/L[a_{i1}(t)] \\ L[a_{ox2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oy2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{oz2}(t)]/L[a_{i2}(t)] \\ L[a_{ox3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oy3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \\ L[a_{oz3}(t)]/L[a_{i3}(t)] \end{pmatrix} \quad (\text{A.48})$$

L'échange de lignes de la matrice de coefficients dans l'équation (A.46) changera l'expression du déterminant comme indiqué dans l'équation (A.49). Par conséquent, la solution de (A.42) est dérivée à condition que les trois vecteurs cosinus directeurs soient linéairement indépendants comme montré par (A.40).

$$\begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix} \quad (\text{A.49})$$

$$= - \begin{vmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \beta_1 & \cos \gamma_1 \\ \cos \alpha_2 & \cos \beta_2 & \cos \gamma_2 \\ \cos \alpha_3 & \cos \beta_3 & \cos \gamma_3 \end{vmatrix}^3$$

A.2.2.2.2 Étalonage utilisant un excitateur d'impact à une dimension

Un excitateur d'impact à une dimension correspond à une table vibrante à un axe avec direction de mouvement verticale ou horizontale et génération de forte accélération d'impact fondée sur la réflexion d'ondes élastiques.

A.3 Influence de l'accélération de la pesanteur

Bien que ce ne soit pas écrit explicitement, il convient de noter que chaque élément de la matrice de sensibilité dépend de l'accélération de la pesanteur, en particulier lorsque l'accéléromètre cible est de type à courant continu avec une sensibilité élevée. Le fait de contrôler l'angle entre la direction de l'accélération d'entrée à l'accéléromètre cible et l'accélération de la pesanteur pourrait clarifier cette influence, tant que la direction de l'accélération d'entrée vers l'accéléromètre cible est maintenue identique. Un montage mécanique pour fixer les accéléromètres pourrait être utilisé dans un système utilisant les générateurs de vibrations ou d'accélération de choc. Le système est normalement applicable uniquement aux accéléromètres à courant continu, à moins que l'influence de l'accélération de la pesanteur soit maîtrisable.

A.4 Relation entre sensibilité traditionnelle et sensibilité en matrice

A.4.1 Descriptions traditionnelles des sensibilités

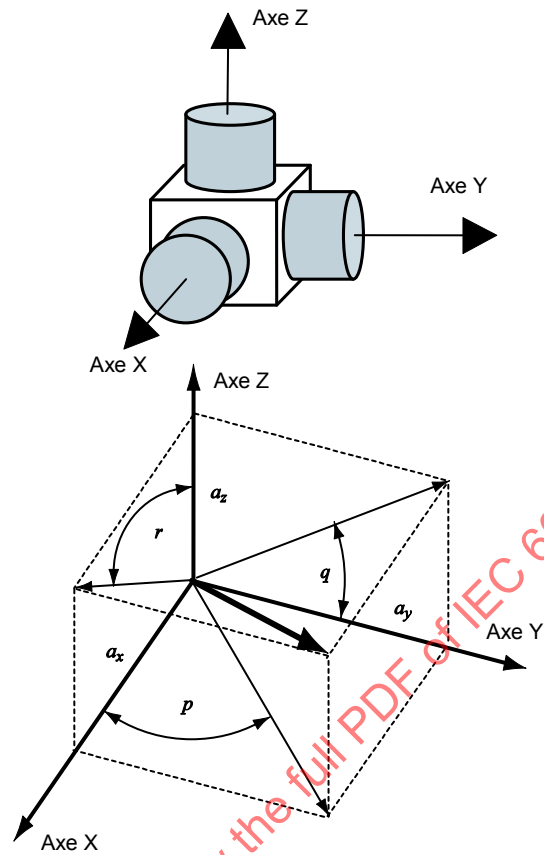
La sensibilité normale d'un accéléromètre à un axe est étalonnée en utilisant une table vibrante à un axe avec l'alignement dans lequel l'axe de sensibilité de l'accéléromètre est aligné avec l'axe de mouvement de la table vibrante à un axe. L'ISO 5347-11:1993 énonce les procédures de dérivation de la sensibilité due au mouvement transversal comme suit:

- Faire vibrer le capteur à l'amplitude et la fréquence de référence dans son axe de détection pour déterminer sa sensibilité.
- Déterminer les valeurs maximale et minimale de la sensibilité transversale en faisant vibrer perpendiculairement à l'axe principal du capteur.
- Ensuite, vérifier la réponse transversale à des fréquences différentes par un balayage en fréquence. Les directions et l'amplitude des réponses transversales maximale et minimale doivent être consignées à la fréquence de référence.

Il convient de noter que la sensibilité normale est séparée de la sensibilité transversale à la fois en théorie et en pratique dans les descriptions traditionnelles.

A.4.2 Comparaison des sensibilités en matrice avec les descriptions traditionnelles

La Figure A.2 montre des accéléromètres ou capteurs assemblés dans un système de coordonnées normal (Figure du haut) et la projection de la composante d'accélération sur les trois plans d'axes de coordonnées, XY, YZ et ZX (Figure du bas).



IEC 072/11

Figure A.2 – Accéléromètres ou capteurs assemblés dans un système de coordonnées normal (Figure du haut) et projection de la composante d'accélération sur les trois plans d'axes de coordonnées, XY, YZ et ZX (Figure du bas)

Ce qui suit est la définition des sensibilités d'axe transversal sous la forme d'une expression mathématique.

$$\varepsilon_{x,\text{cross-axis}} = \text{MAX}\{\varepsilon_x(q)\}_{0 \leq q \leq 2\pi} \quad (\text{A.50})$$

$$\varepsilon_{y,\text{cross-axis}} = \text{MAX}\{\varepsilon_y(r)\}_{0 \leq r \leq 2\pi} \quad (\text{A.51})$$

$$\varepsilon_{z,\text{cross-axis}} = \text{MAX}\{\varepsilon_z(p)\}_{0 \leq p \leq 2\pi} \quad (\text{A.52})$$

où

$\varepsilon_{x,\text{cross-axis}}$ est la sensibilité d'axe transversal avec sensibilité d'accéléromètre de direction X et entrée de mouvement transversal dans le plan YZ en fonction de q ,

$\varepsilon_{y,\text{cross-axis}}$ est la sensibilité d'axe transversal avec sensibilité d'accéléromètre de direction Y et entrée de mouvement transversal dans le plan ZX en fonction de r ,

$\varepsilon_{z,\text{cross-axis}}$ est la sensibilité d'axe transversal avec sensibilité d'accéléromètre de direction Z et entrée de mouvement transversal dans le plan XY en fonction de p ,

ε_x est la sensibilité transversale en fonction de q ,

ε_y est la sensibilité transversale en fonction de r ,

ε_z est la sensibilité transversale en fonction de p .

Les expressions suivantes sont dérivées pour les relations entre l'accélération d'entrée et les signaux de sortie en utilisant les définitions des sensibilités transversales lorsque l'accélération sinusoïdale est appliquée.

$$V_{ox} = S_x(a_{ix} + \varepsilon_x \sqrt{a_{iy}^2 + a_{iz}^2}) \quad (\text{A.53})$$

$$V_{oy} = S_y(a_{iy} + \varepsilon_y \sqrt{a_{iz}^2 + a_{ix}^2}) \quad (\text{A.54})$$

$$V_{oz} = S_z(a_{iz} + \varepsilon_z \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2}) \quad (\text{A.55})$$

Par ailleurs, la contribution des sensibilités transversales dans la sensibilité en matrice au signal de sortie le long de l'axe X est formulée comme suit:

$$\begin{aligned} S_{xy}a_{i,1,y} + S_{xz}a_{i,1,z} &= S_{xy}\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2} \cos q + S_{xz}\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2} \sin q \\ &= \sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2} \sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2} \cos(q - q_m) \\ \cos q &= \frac{a_{i,1,y}}{\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2}}, \quad \sin q = \frac{a_{i,1,z}}{\sqrt{a_{i,1,y}^2 + a_{i,1,z}^2}} \\ \cos q_m &= \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2}}, \quad \sin q_m = \frac{S_{xz}}{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2}} \end{aligned} \quad (\text{A.56})$$

La comparaison entre les équations (A.53) et (A.56) conduit à l'expression suivante.

$$\varepsilon_x = \frac{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2}}{S_{xx}} \cos(q - q_m) \quad (\text{A.57})$$

Dans l'équation (A.57), la relation $S_x = S_{xx}$ est utilisée. Les procédures montrées dans l'équation (A.57) donnent les équations suivantes:

$$\varepsilon_y = \frac{\sqrt{S_{yz}^2 + S_{yx}^2}}{S_{yy}} \cos(r - r_m) \quad (\text{A.58})$$

$$\cos r = \frac{a_{i,1,z}}{\sqrt{a_{i,1,z}^2 + a_{i,1,x}^2}}, \sin r = \frac{a_{i,1,x}}{\sqrt{a_{i,1,z}^2 + a_{i,1,x}^2}} \quad (\text{A.59})$$

$$\cos r_m = \frac{S_{yz}}{\sqrt{S_{yz}^2 + S_{yx}^2}}, \sin r_m = \frac{S_{yx}}{\sqrt{S_{yz}^2 + S_{yx}^2}} \quad (\text{A.60})$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}}{S_{zz}} \cos(p - p_m) \quad (\text{A.61})$$

$$\cos r = \frac{a_{i,1,x}}{\sqrt{a_{i,1,x}^2 + a_{i,1,y}^2}}, \sin r = \frac{a_{i,1,y}}{\sqrt{a_{i,1,x}^2 + a_{i,1,y}^2}} \quad (\text{A.62})$$

$$\cos r_m = \frac{S_{zx}}{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}}, \sin r_m = \frac{S_{zy}}{\sqrt{S_{zx}^2 + S_{zy}^2}} \quad (\text{A.63})$$

Il est facilement compréhensible à partir des équations (A.57), (A.58) et (A.61) que la sensibilité transversale selon la définition conventionnelle indique le chiffre huit si elle est tracée comme une fonction de l'argument p , q , r dans le système de coordonnées polaires.

A.4.3 Erreurs

Si un accéléromètre est utilisé pour la mesure de l'accélération comme une grandeur vectorielle, il convient que la sensibilité soit définie comme une matrice. C'est pourquoi il convient que la normalisation entre le dispositif de détection d'accélération et la sortie de l'accéléromètre soit la multiplication de la matrice de sensibilité inverse sur le signal de sortie de premier étage des dispositifs de détection de l'accélération. Les accéléromètres de niveau 2, niveau 3 ou niveau 4 seront réalisés en utilisant les circuits intégrés de multiplication de matrices de sensibilité inverses. Si la direction du mouvement est prédéterminée ou pourrait être connue *a priori*, les accéléromètres de niveau 1 sont utilisés. Si l'exigence sur la précision n'est pas stricte, il est raisonnable de mesurer l'accélération comme une grandeur vectorielle en utilisant des accéléromètres de niveau 1. Comme la sensibilité d'axe transversal n'est pas prise en compte dans l'utilisation des accéléromètres de niveau 1, il est important de connaître les erreurs.

$$\begin{pmatrix} S_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & S_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{zz} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{ix} \exp(j\omega t) \\ a_{iy} \exp(j\omega t) \\ a_{iz} \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (\text{A.64})$$

L'équation (A.64) explique le processus de mesure de l'accélération comme un vecteur en utilisant les accéléromètres de niveau 1. L'erreur de l'amplitude d'accélération, $Error_M$, introduite en ne tenant pas compte de la sensibilité transversale est articulée par les équations suivantes

$$Error_M = \frac{\sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2} - \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2}}{\sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2}} \quad (\text{A.65})$$

$$M_1 = \left(a_{ix} + \frac{S_{xy}}{S_{xx}} a_{iy} + \frac{S_{xz}}{S_{xx}} a_{iz} \right) \quad (\text{A.66})$$

$$M_2 = \left(\frac{S_{yx}}{S_{yy}} a_{ix} + a_{iy} + \frac{S_{yz}}{S_{yy}} a_{iz} \right) \quad (\text{A.67})$$

$$M_3 = \left(\frac{S_{zx}}{S_{zz}} a_{ix} + \frac{S_{zy}}{S_{zz}} a_{iy} + a_{iz} \right) \quad (\text{A.68})$$

La prise en compte du cosinus directeur transforme les équations (A.65) à (A.68) comme suit:

$$Error_M = \sqrt{M_{1c}^2 + M_{2c}^2 + M_{3c}^2} - 1 \quad (\text{A.69})$$

$$M_{1c} = \left(\cos \alpha + \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \cos \beta + \frac{S_{xz}}{S_{xx}} \cos \gamma \right) \quad (\text{A.70})$$

$$M_{2c} = \left(\frac{S_{yx}}{S_{yy}} \cos \alpha + \cos \beta + \frac{S_{yz}}{S_{yy}} \cos \gamma \right) \quad (\text{A.71})$$

$$M_{3c} = \left(\frac{S_{zx}}{S_{zz}} \cos \alpha + \frac{S_{zy}}{S_{zz}} \cos \beta + \cos \gamma \right) \quad (\text{A.72})$$

L'équation (A.69) indique que l'erreur est fonction de la direction du mouvement.

A.4.4 Généralisation de la sensibilité transversale en utilisant le concept d'espace vectoriel

Comme le montre l'Article A.2, le nombre de colonnes de la matrice de sensibilité représente la dimension de l'espace vectoriel dans lequel l'accéléromètre est étalonné. D'autre part, le nombre de lignes de la matrice de sensibilité indique le nombre d'axes de sortie. Le présent paragraphe généralise la sensibilité transversale énoncée en A.4.2 et dans l'ISO 5347-11:1993.

Le Tableau A.5 donne d'une manière générale la définition d'un espace vectoriel et les symboles pour les sensibilités telles qu'elles sont reliées.

Tableau A.5 – Définition de l'espace vectoriel lié à la généralisation de la sensibilité transversale utilisant le concept d'espace vectoriel

Symbole		Définition
W_m		Dimension de l'espace vectoriel dans lequel l'accélération est définie comme une entrée à l'accéléromètre cible.
W_1		Espace vectoriel de l'accélération correspondant à l'axe de sortie spécifié de l'accéléromètre cible. Le rapport entre l'accélération dans cette espace et le signal de sortie provenant de l'axe de sortie spécifié est la sensibilité normale.
W_{m-1}		Espace vectoriel de l'accélération qui est orthogonal à W_1
$a_{o,W1} \times \exp(j\omega t)$		Signal de sortie provenant de l'axe de sortie spécifié induit par l'accélération $a_{in,1} \times \exp(j\omega t)$ comme un élément de l'espace W_1
$a_{o,w_{m-1}} \times \exp(j\omega t)$		Signal de sortie provenant de l'axe de sortie spécifié induit par l'accélération $a_{in,w_{m-1}} \times \exp(j\omega t)$ comme un élément de l'espace W_{m-1}
sensibilités	S_N	Sensibilité normale due à l'accélération d'entrée dans W_1
	S_C	Sensibilité transversale due à l'accélération d'entrée dans W_{m-1}
	S_T	Sensibilité transversale due à l'accélération d'entrée dans W_{m-1}

Les équations suivantes sont valides selon le Tableau A.5:

$$|S_N| = \frac{|a_{o,W1}|}{|a_{in,1}|} \quad (A.73)$$

$$|S_C| = \frac{|a_{o,W1}|}{|a_{in,w_{m-1}}|} \quad (A.74)$$

$$S_{T,max} = \frac{\max |S_C|_{input=a \in W_{m-1}}}{|S_N|} \quad (A.75)$$

$$S_{T,min} = \frac{\min |S_C|_{input=a \in W_{m-1}}}{|S_N|} \quad (A.76)$$

L'équation (A.73) correspond à la sensibilité définie le long de l'axe de sensibilité, comme la définition traditionnelle. L'équation (A.74) correspond à la définition de la sensibilité transversale, dans laquelle le plan normal à l'axe de sensibilité apparaissant dans la définition conventionnelle est généralisé à l'espace vectoriel W_{m-1} orthogonal à l'espace vectoriel W_1 . Les équations (A.75) et (A.76) sont la généralisation de la définition conventionnelle de la sensibilité transversale, parce que les valeurs maximale et minimale de la sensibilité transversale sont normalisées par la sensibilité normale due à l'accélération dans W_1 . La même idée peut être appliquée à la généralisation de la sensibilité transversale de choc par l'espace vectoriel.

A.5 Extension aux accéléromètres à six axes

A.5.1 Dimension de l'espace vectoriel pour l'étalonnage des accéléromètres

Un ensemble de mouvements générés par une machine pour l'étalonnage crée un espace vectoriel dans lequel un accéléromètre est étalonné. Dans la mesure où la dimension maximale de l'espace vectoriel en ingénierie est de six, il convient de considérer si les accéléromètres peuvent ou non être étalonnés dans l'espace vectoriel avec six dimensions. Lorsque la dimension de l'espace vectoriel d'étalonnage est supérieure à la dimension de l'espace vectoriel dans lequel l'accéléromètre cible est normalement utilisé, l'influence du mouvement qui n'est pas considérée en situation normale sur la sortie de l'accéléromètre peut être clarifiée. Il s'agit de la généralisation de la sensibilité transversale conventionnelle des accéléromètres piézoélectriques à un axe. Le présent article formalise l'étalonnage en utilisant la table vibrante à six dimensions.

A.5.2 Matrice de sensibilité des accéléromètres à un axe

La matrice de sensibilité S_{16} des accéléromètres à un axe définie dans l'espace vectoriel hexadimensionnel d'accélération d'étalonnage est exprimée comme suit:

$$S_{16} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} & S_{x\alpha} & S_{x\beta} & S_{x\gamma} \end{pmatrix} \quad (\text{A.77})$$

L'axe de sortie est supposé être l'axe X. X, Y et Z représentent temporairement les axes de coordonnées exprimant le mouvement de translation, α , β et γ représentent, temporairement également, les axes de coordonnées exprimant le mouvement de rotation. L'étalonnage des accéléromètres de niveau 4 consiste à dériver tous les composants de S_{16} en fonction de la fréquence. L'indice 1 de S_{16} moyenne qu'un accéléromètre cible est du type à un axe. L'indice 6 de S_{16} signifie que l'étalonnage est réalisé dans l'espace vectoriel de dimension six. Si la dimension de l'espace vectoriel d'accélération d'entrée est 4 avec trois degrés de liberté de mouvement de translation et un degré de liberté de mouvement de rotation le long de l'axe α , $S_{x\alpha}$ pourrait être désigné comme une sensibilité transversale explicite tandis que $S_{x\beta}$ et $S_{x\gamma}$ pourraient être désignés comme des sensibilités transversales implicites. Par conséquent, les accéléromètres à un axe définis dans l'espace vectoriel hexadimensionnel possèdent une sensibilité normale et cinq sensibilités transversales implicites. A la fréquence spécifiée f_i , six vecteurs d'accélération linéairement indépendants peuvent être générés:

$$\mathbf{a}_{i,1} = \begin{pmatrix} a_{i,1,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,1,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,1,x} \\ a_{i,1,y} \\ a_{i,1,z} \\ a_{i,1,\alpha} \\ a_{i,1,\beta} \\ a_{i,1,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,1}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.78})$$

$$\mathbf{a}_{i,2} = \begin{pmatrix} a_{i,2,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,2,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,2,x} \\ a_{i,2,y} \\ a_{i,2,z} \\ a_{i,2,\alpha} \\ a_{i,2,\beta} \\ a_{i,2,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,2}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.79})$$

$$\mathbf{a}_{i,3} = \begin{pmatrix} a_{i,3,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,3,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,3,x} \\ a_{i,3,y} \\ a_{i,3,z} \\ a_{i,3,\alpha} \\ a_{i,3,\beta} \\ a_{i,3,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,3}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.80})$$

$$\mathbf{a}_{i,4} = \begin{pmatrix} a_{i,4,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,4,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,4,x} \\ a_{i,4,y} \\ a_{i,4,z} \\ a_{i,4,\alpha} \\ a_{i,4,\beta} \\ a_{i,4,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,4}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.81})$$

$$\mathbf{a}_{i,5} = \begin{pmatrix} a_{i,5,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,5,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,5,x} \\ a_{i,5,y} \\ a_{i,5,z} \\ a_{i,5,\alpha} \\ a_{i,5,\beta} \\ a_{i,5,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,5}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.82})$$

$$\mathbf{a}_{i,6} = \begin{pmatrix} a_{i,6,x} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,y} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,z} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,\alpha} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,\beta} \exp(j2\pi f_i t) \\ a_{i,6,\gamma} \exp(j2\pi f_i t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,6,x} \\ a_{i,6,y} \\ a_{i,6,z} \\ a_{i,6,\alpha} \\ a_{i,6,\beta} \\ a_{i,6,\gamma} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = (\mathbf{a}_{i,6}^m)^T \exp(j2\pi f_i t) \quad (\text{A.83})$$

L'exposant, T , désigne une opération de transposition. Le vecteur colonne transposé est un vecteur ligne et le vecteur ligne transposé est un vecteur colonne.

Tableau A.6 – Relation entre l'accélération d'entrée et le signal de sortie pour l'étalonnage utilisant la table vibrante à six dimensions

Terme		Premier	Deuxième	Troisième	Quatrième	Cinquième	Sixième
Entrée		$\mathbf{a}_{i,1}$	$\mathbf{a}_{i,2}$	$\mathbf{a}_{i,3}$	$\mathbf{a}_{i,4}$	$\mathbf{a}_{i,5}$	$\mathbf{a}_{i,6}$
Symbole du signal de sortie et Nombre d'axes de sortie	1	$\mathbf{b}_{1,1}$	$\mathbf{b}_{1,2}$	$\mathbf{b}_{1,3}$	$\mathbf{b}_{1,4}$	$\mathbf{b}_{1,5}$	$\mathbf{b}_{1,6}$
	2	$\mathbf{b}_{2,1}$	$\mathbf{b}_{2,2}$	$\mathbf{b}_{2,3}$	$\mathbf{b}_{2,4}$	$\mathbf{b}_{2,5}$	$\mathbf{b}_{2,6}$
	3	$\mathbf{b}_{3,1}$	$\mathbf{b}_{3,2}$	$\mathbf{b}_{3,3}$	$\mathbf{b}_{3,4}$	$\mathbf{b}_{3,5}$	$\mathbf{b}_{3,6}$
	4	$\mathbf{b}_{4,1}$	$\mathbf{b}_{4,2}$	$\mathbf{b}_{4,3}$	$\mathbf{b}_{4,4}$	$\mathbf{b}_{4,5}$	$\mathbf{b}_{4,6}$
	5	$\mathbf{b}_{5,1}$	$\mathbf{b}_{5,2}$	$\mathbf{b}_{5,3}$	$\mathbf{b}_{5,4}$	$\mathbf{b}_{5,5}$	$\mathbf{b}_{5,6}$
	6	$\mathbf{b}_{6,1}$	$\mathbf{b}_{6,2}$	$\mathbf{b}_{6,3}$	$\mathbf{b}_{6,4}$	$\mathbf{b}_{6,5}$	$\mathbf{b}_{6,6}$

Les signaux de sortie provenant de l'accéléromètre cible dans l'espace vectoriel à six dimensions du Tableau A.6, à savoir $\mathbf{b}_{1,k}$, $\mathbf{b}_{2,k}$, $\mathbf{b}_{3,k}$, $\mathbf{b}_{4,k}$, $\mathbf{b}_{5,k}$ et $\mathbf{b}_{6,k}$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) sont exprimés comme indiqué ci-dessous. Il convient de noter que les vecteurs $\mathbf{b}_{1,k}^m$, $\mathbf{b}_{2,k}^m$, $\mathbf{b}_{3,k}^m$, $\mathbf{b}_{4,k}^m$, $\mathbf{b}_{5,k}^m$ et $\mathbf{b}_{6,k}^m$ ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) sont tous des vecteurs complexes pour les raisons suivantes:

- l'amplitude du signal de sortie de l'accéléromètre cible diminue lorsque la fréquence augmente;
- le retard de phase du signal de sortie provenant de l'accéléromètre cible augmente lorsque la fréquence augmente;
- la dépendance temporelle est seulement exprimée par le terme $\exp(j2\pi f_i t)$ et partagée en côté entrée et côté sortie.

$$\mathbf{b}_{1,k} = b_{1,1,k} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{1,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.84})$$

$$\mathbf{b}_{2,k} = \begin{pmatrix} b_{2,1,k} \\ b_{2,2,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{2,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.85})$$

$$\mathbf{b}_{3,k} = \begin{pmatrix} b_{3,1,k} \\ b_{3,2,k} \\ b_{3,3,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{3,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.86})$$

$$\mathbf{b}_{4,k} = \begin{pmatrix} b_{4,1,k} \\ b_{4,2,k} \\ b_{4,3,k} \\ b_{4,4,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{4,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.87})$$

$$\mathbf{b}_{5,k} = \begin{pmatrix} b_{5,1,k} \\ b_{5,2,k} \\ b_{5,3,k} \\ b_{5,4,k} \\ b_{5,5,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{5,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.88})$$

$$\mathbf{b}_{6,k} = \begin{pmatrix} b_{6,1,k} \\ b_{6,2,k} \\ b_{6,3,k} \\ b_{6,4,k} \\ b_{6,5,k} \\ b_{6,6,k} \end{pmatrix} \exp(j2\pi f_i t) = \mathbf{b}_{6,k}^m \exp(j2\pi f_i t) \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.89})$$

Les six équations suivantes sont dérivées de l'équation (A.77) et du Tableau A.6:

$$\mathbf{S}_{16} \mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{b}_{1,k} \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{A.90})$$

La suppression des termes exponentiels qui apparaissent des deux côtés de l'équation (A.90) conduit aux équations suivantes: