NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
61151

Première édition
First edition
1992-08

Instrumentation nucléaire – Amplificateurs et préamplificateurs utilisés avec des détecteurs de rayonnements ionisants – Méthodes d'essais

Nuclear instrumentation – Amplifiers and preamplifiers used with detectors of ionizing radiation – Test procedures

© IEC 1992 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission 3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
Telefax: +41 22 919 0300 e-mail: inmail@iec.ch IEC web site http: //www.iec.ch

IEC Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE XC

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

SOMMAIRE

Pages

AVANT-PROPOS 10

INTRODUCTION 12

Articles

1 Généralités 14

1.1 Domaine d'application et objet 14
1.2 Références normatives 14
1.3 Définitions particulières 16
1.4 Symboles et abréviations 26
1.5 Constantes et facteurs de conversion 30

2 Spectromètre 32

2.1 Détecteurs 32
2.1.1 Signal du détecteur 34
2.1.2 Temps de montée et temps de descente 36
2.2 Préamplificateur 36
2.3 Amplificateur principal (amplificateur de mise en forme) 38
2.4 Amplificateur à seuil 40
2.5 Analyseur multicanal 40

3 Appareils d'essais 42

3.1 Montage d'essai 42
3.1.1 Précision des appareils d'essais 42
3.1.2 Précision des mesures 44
3.2 Générateurs d'impulsions 44
3.2.1 Générateur d'impulsions, essais du préamplificateur 44
3.2.2 Générateur d'impulsions, essais de l'amplificateur principal 46
3.3 Atténuateur à pas (à échelons) 46
3.3.1 Adaptation terminale de l'atténuateur 46
3.4 Boîtier de condensateur 48
3.5 Amplificateur de mise en forme 48
3.6 Voltmètre alternatif 48
3.7 Oscilloscope 48
3.8 Pont de non-linéarité 50
3.9 Etalonnage de l'oscilloscope par rapport au générateur 52

4 Mesures et spécifications relatives à l'amplificateur principal 52

4.1 Paramètres de mise en forme 52
4.1.1 Terminologie du panneau avant, mise en forme unipolaire 54

CONTENTS

Page

FOREWORD 11

INTRODUCTION 13

Clause

1 General 15

1.1 Scope and object 15
1.2 Normative references 15
1.3 Specialized definitions 17
1.4 Symbols and abbreviations 27
1.5 Constants and conversion factors 31

2 Spectrometer 33

2.1 Detectors 33
2.1.1 Detector signal 35
2.1.2 Rise time and fall time 37
2.2 Preamplifier 37
2.3 Main amplifier (shaping amplifier) 39
2.4 Biased amplifier 41
2.5 Multichannel analyzer 41

3 Test instruments 43

3.1 Test set-up 43
3.1.1 Test instrument accuracy 43
3.1.2 Measurement accuracy 45
3.2 Pulse generators 45
3.2.1 Pulse generator, preamplifier tests 45
3.2.2 Pulse generator, main amplifier tests 47
3.3 Step attenuator 47
3.3.1 Attenuator termination 47
3.4 Capacitor box 49
3.5 Shaping amplifier 49
3.6 A.C. voltmeter 49
3.7 Oscilloscope 49
3.8 Nonlinearity bridge 51
3.9 Oscilloscope/generator calibration 53

4 Main amplifier measurements and specifications 53

4.1 Pulse-shape parameters 53
4.1.1 Front panel nomenclature, unipolar shaping 55

4.1.2 Terminologie du panneau avant, mise en forme bipolaire 56
4.2 Largeur d'impulsion 56
4.3 Restitution après surcharge 56
4.3.1 Temps de restitution après surcharge, unipolaire 58
4.3.2 Temps de restitution après surcharge, bipolaire 60
4.3.3 Blocage (paralysie) 60
4.3.4 Artefacts de la ligne de base 62
4.4 Etalonnage de la commande de réglage du gain et mesure du gain de l'amplificateur principal 62
4.4.1 Etalonnage du gain principal (grossier) 62
4.4.2 Etalonnage du gain fin 64
4.5 Mesure du bruit 64
4.6 Gain de transition du bruit 64
4.7 Domaine de compensation pôle/zéro 66
4.8 Non-linéarité 66
4.9 Résistance interne 70
4.10 Sensibilité à la température 74
4.11 Sensibilité à la tension d'alimentation 74
4.12 Fluctuation du temps de recouvrement 74

5 Mesures relatives au préamplificateur 76

5.1 Sensibilité à la charge 78
5.1.1 Sensibilité à la charge en fonction de la capacité 78
5.1.2 Sensibilité à la charge en fonction de la capacité, méthode de l'AMC ... 78
5.1.3 Sensibilité à la charge en fonction de la capacité, méthode de l'équilibre de pont 80
5.1.4 Spécifications relatives à la sensibilité à la charge en fonction de la capacité 80
5.2 Valeur de la capacité d'injection-test interne 80
5.3 Temps de montée en fonction de la capacité 80
5.4 Bruit, préamplificateurs 82
5.4.1 Mesure du bruit, préamplificateurs pour détecteurs en germanium 82
5.4.2 Mesure du bruit, préamplificateurs pour détecteurs en silicium 84
5.4.3 Bruit, unités de charge équivalente efficace et nombre de paires d'ions équivalent efficace 84
5.4.4 Correction relative au bruit de l'amplificateur principal 84
5.5 Non-linéarité du préamplificateur 86
5.6 Produit énergie x taux de comptage (PETC) 88
5.6.1 Détermination de C_r 90
5.6.2 Détermination du produit R_rC_r 90
5.6.3 Limite du taux de comptage, préamplificateur à liaison continue 94
5.6.4 Limite du taux de comptage, préamplificateur à liaison capacitive 94

6 Mesures relatives à un amplificateur à seuil 98

6.1 Non-linéarité, amplificateur à seuil 98

4.1.2 Front panel nomenclature, bipolar shaping 57
4.2 Pulse width 57
4.3 Overload recovery 57
4.3.1 Overload recovery time, unipolar 59
4.3.2 Overload recovery time, bipolar 61
4.3.3 Blocking (paralysis) 61
4.3.4 Baseline artifacts 63
4.4 Gain control calibration and main amplifier gain measurement 63
4.4.1 Coarse gain calibration 63
4.4.2 Fine gain calibration 65
4.5 Noise measurement 65
4.6 Noise transition gain 65
4.7 Pole/zero range 67
4.8 Nonlinearity 67
4.9 Source resistance 71
4.10 Temperature sensitivity 75
4.11 Supply voltage sensitivity 75
4.12 Crossover walk 75

5 Preamplifier measurements 77

5.1 Charge sensitivity 79
5.1.1 Charge sensitivity versus capacitance 79
5.1.2 Charge sensitivity versus capacitance, MCA method 79
5.1.3 Charge sensitivity versus capacitance, bridge balance method 81
5.1.4 Charge sensitivity versus capacitance specifications 81
5.2 Size of the internal test capacitor 81
5.3 Rise time versus capacitance 81
5.4 Noise, preamplifiers 83
5.4.1 Noise, preamplifiers for germanium detectors 83
5.4.2 Noise, preamplifiers for silicon detectors 85
5.4.3 Noise, units of equivalent r.m.s., charge and equivalent r.m.s. ion pairs 85
5.4.4 Correction for main amplifier noise 85
5.5 Preamplifier nonlinearity 87
5.6 Energy x count-rate product (ECRP) 89
5.6.1 Determination of C_f 91
5.6.2 Determination of $R_f C_f$ 91
5.6.3 Count-rate limit, d.c.-coupled preamplifier 95
5.6.4 Count-rate limit, a.c.-coupled preamplifier 95

6 Biased amplifier measurements 99

6.1 Nonlinearity, biased amplifier 99

ANNEXES

A Spectromètre 104

B Appareils d'essais 116

C Mesures et spécifications relatives à l'amplificateur principal 132

D Mesures relatives au bruit du préamplificateur 146

E Mesures relatives à l'amplificateur à seuil 152

F Bibliographie 154

FIGURES

1 Spectromètre 32

2 Résolution en énergie en fonction de $t_{1/2}$ 38

3 Montage d'essai 42

4 Oscillogramme d'équilibre de pont 50

5 Impulsions unipolaires et bipolaires 54

6 Bruit à la sortie de l'amplificateur en fonction du réglage du gain 66

7 Caractéristique dynamique illustrant la non-linéarité intégrale 68

8 Mesure de la résistance interne r_o 72

9 Montage d'essai pour la mesure de la non-linéarité différentielle d'un préamplificateur 86

10 Courbes de décroissance exponentielle 92

11 Montage pour la mesure de la non-linéarité d'un amplificateur à seuil 100

A.1a Préamplificateur de tension 104

A.1b Préamplificateur sensible à la charge 104

A.2 Réponses à la fonction échelon des circuits de mise en forme, échelle linéaire 112

A.3 Réponses à la fonction échelon des circuits de mise en forme, échelle semi-logarithmique 114

B.1 Générateur d'impulsions à long front de descente, avec un relais comme élément de commutation 116

B.2 Pont de capacité 120

B.3 Montage d'essai pour étalonnage de C_c 120

B.4 Entrée test d'un préamplificateur 122

B.5 Pont de non-linéarité avec amplificateur 128

C.1 Influence de la compensation pôle/zéro sur la restitution du signal 132

C.2 Montage d'essai pour la mesure du déplacement dû à l'atténuateur 142

E.1 Amplificateur à seuil de référence pour mesure de la non-linéarité 152

ANNEXES

A Spectrometer 105
B Test instruments 117
C Main amplifier measurements and specifications 133
D Preamplifier noise measurements 147
E Reference biased amplifier 153
F Bibliography 154

FIGURES

1 Spectrometer 33
2 Energy resolution versus $t_{1/2}$ 39
3 Test set-up 43
4 Oscillogram of bridge balance 51
5 Unipolar and bipolar pulses 55
6 Output noise versus gain setting 67
7 Dynamic characteristic illustrating integral nonlinearity 69
8 Measurement of source resistance r_o 73
9 Test set-up for measuring preamplifier differential nonlinearity 87
10 Curves of exponential decay 93
11 Test set-up for measuring nonlinearity of a biased amplifier 101
A.1a Voltage-sensitive preamplifier 105
A.1b Charge-sensitive preamplifier 105
A.2 Step function responses of pulse shaping networks, linear scale 113
A.3 Step function responses of pulse shaping networks, semilog scale 115
B.1 Tail pulse generator with a relay as the switching element 117
B.2 Capacitance bridge 121
B.3 Test set-up for calibrating C_c 121
B.4 Test input to a preamplifier 123
B.5 Nonlinearity bridge with amplifier 129
C.1 Effect of pole/zero compensation on pulse recovery 133
C.2 Test set-up for measuring attenuator walk 143
E.1 Reference biased amplifier for nonlinearity measurement 153

TABLEAUX

A.1 Comparaison (approximative) des paramètres dans les préamplificateurs de tension et les préamplificateurs sensibles à la charge 106

A.2 Circuits de mise en forme, facteur de mérite et paramètres de durée d'impulsion 112

TABLES

A.1 Parameter proportionalities (approximate) in voltage-sensitive and charge-sensitive preamplifiers 107

A.2 Pulse shaping networks, figures of merit and pulse width parameters 113

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE – AMPLIFICATEURS ET PRÉAMPLIFICATEURS UTILISÉS AVEC DES DÉTECTEURS DE RAYONNEMENTS IONISANTS – MÉTHODES D'ESSAIS

AVANT-PROPOS

1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.

2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.

3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le voeu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

4) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand il est déclaré qu'un matériel est conforme à l'une de ses recommandations.

La présente Norme internationale a été établie par le Comité d'Etudes n° 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Cette norme annule et remplace la deuxième édition de la CEI 340, parue en 1979. Par rapport à la deuxième édition de la CEI 340, le titre a été modifié car les mêmes amplificateurs, utilisés pour les détecteurs semi-conducteurs, sont applicables à d'autres types de détecteurs.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
45(BC)206	45(BC)214

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

Les annexes A à E font partie intégrante de la présente Norme internationale.

L'annexe F est donnée uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

NUCLEAR INSTRUMENTATION – AMPLIFIERS AND PREAMPLIFIERS USED WITH DETECTORS OF IONIZING RADIATION – TEST PROCEDURES

FOREWORD

1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.

2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.

3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

4) The IEC has not laid down any procedure concerning marking as an indication of approval and has no responsibility when an item of equipment is declared to comply with one of its recommendations.

This International Standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 45: Nuclear instrumentation.

This standard cancels and replaces the second edition of IEC 340, issued in 1979. With respect to the second edition of IEC 340, the title has been changed because the amplifiers used for semiconductor detectors are also applicable to other types of detectors.

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

DIS	Report on Voting
45(CO)206	45(CO)214

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

Annexes A to E form an integral part of this International Standard.

Annex F is for information only.

INTRODUCTION

La présente Norme internationale décrit les méthodes d'essais des amplificateurs et des préamplificateurs utilisés avec des détecteurs semi-conducteurs, des compteurs proportionnels et des détecteurs à scintillation, en spectrométrie des rayonnements ionisants.

La technologie des amplificateurs a évolué jusqu'au point où les performances des spectromètres peuvent être limitées aussi bien par l'analyseur multicanal (AMC) que par l'amplificateur. En raison de cela et en raison de l'impossibilité de normaliser un AMC donné, compte tenu du grand nombre existant sur le marché, les AMC, à quelques exceptions près, ne font pas partie de la méthode de mesure préconisée dans la présente norme.

Dans la présente norme, les méthodes de mesure sont décrites de façon plus détaillée que dans la CEI 340 qu'elle remplace, car avec les amplificateurs modernes, les performances obtenues dépendent souvent des détails de la mesure. Par conséquent, il est nécessaire de normaliser les détails des méthodes ainsi que les spécifications relatives aux amplificateurs.

Les essais spécifiques aux amplificateurs munis de filtres de mise en forme d'impulsions variant dans le temps ne sont pas inclus dans la présente norme; il en est de même pour les essais relatifs aux circuits de rejet d'empilements. Les filtres variant dans le temps permettent des temps de mise en forme plus courts que ceux permis par les filtres linéaires, pour le même rapport signal à bruit (RSB) et les circuits de rejet d'empilement, qui comme leur nom l'indique, arrêtent les impulsions qui chevauchent des impulsions précédentes, permettent des taux de comptage plus élevés pour une résolution spectrale donnée. Les deux techniques trouvent leur plus large application à des énergies extrêmes: à des énergies très faibles, car des impulsions de longue durée doivent être obligatoirement utilisées pour optimiser le rapport signal à bruit (RSB), et à des énergies élevées, où des artefacts des détecteurs provoquent un traînage sur le flanc basse énergie des raies spectrales. Le traînage perturbe les raies de faible intensité situées juste en dessous des raies d'énergies plus élevées, et le phénomène d'empilement entraîne l'apparition de pics fictifs à des énergies multiples de celles des raies spectrales.

Dans la présente norme, $t_{0,5}$ ou $t_{1/2}$ (la durée d'impulsion à 50 % de l'amplitude du pic) indique le temps de mise en forme à l'amplificateur principal, car ce paramètre constitue le meilleur moyen de comparer les caractéristiques de différents amplificateurs. En outre, comparé à d'autres paramètres, ce paramètre est celui qui se prête le plus facilement à une mesure précise au moyen d'un oscilloscope et d'un générateur d'impulsions.

INTRODUCTION

This International Standard describes test procedures for amplifiers and preamplifiers that are used with semiconductor, scintillation and proportional detectors in the spectrometry of ionizing radiation.

Amplifier technology has progressed to the point where the spectrometer performance may be limited as much by the multi-channel analyser (MCA) as by the amplifier. Because of this and because of the impracticality of standardizing on one MCA with so many on the market, MCAs, with minor exceptions, are not a part of the measurement procedure in this standard.

In this standard, measuring procedures are given in greater detail than in IEC 340, which it replaces, because with modern amplifiers, perceived performance often depends on the details of measurement. Thus, many of the details of the procedures need to be standardized as well as the amplifier specifications.

Tests that are specific to amplifiers with time-variant pulse-shaping filters are not included in this standard, nor are tests for pile-up rejectors. Time variant filters allow shorter pulse shaping times than linear filters for the same signal-to-noise ratio (SNR), and pile-up rejectors, as the name implies, block pulses that overlap earlier ones, allowing higher count rates for a given spectral-line resolution. Both techniques have the greatest application at the energy extremes: at very low energies because wide pulses need to be used to optimize the SNR, and at high energies where detector artifacts cause low-side tailing of spectrum lines. The tailing obscures low intensity lines falling just below higher energy ones and pile-up causes phantom peaks to appear at energy multiples of the spectrum lines.

In this standard, $t_{0,5}$ or $t_{1/2}$ (the pulse width at 50 % of peak amplitude) is the main amplifier indicator of shaping time because this parameter best enables a performance comparison among different amplifiers. Also, compared with other parameters, this one is the easiest to measure accurately with an oscilloscope and pulse generator.

INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE – AMPLIFICATEURS ET PRÉAMPLIFICATEURS UTILISÉS AVEC DES DÉTECTEURS DE RAYONNEMENTS IONISANTS – MÉTHODES D'ESSAIS

1 Généralités

1.1 *Domaine d'application et objet*

Les méthodes d'essais de cette Norme internationale concernent les systèmes d'amplificateurs et de préamplificateurs munis de circuits de mise en forme linéaire et destinés à être utilisés avec des détecteurs semi-conducteurs, des détecteurs à scintillation et des compteurs proportionnels, dans la spectrométrie des rayonnements ionisants. Le but est de fournir un langage commun et une méthodologie commune aux utilisateurs et aux fabricants de systèmes d'amplificateurs d'impulsions.

Les méthodes d'essais relatives aux détecteurs associés sont décrites dans la CEI 333, ainsi que dans la CEI 973.

Les essais décrits dans la présente norme ne sont pas tous obligatoires, mais ceux qui sont effectués dans le but de déterminer les spécifications relatives aux préamplificateurs et aux amplificateurs doivent être exécutés conformément aux prescriptions de la présente norme.

L'accent mis sur les méthodes de mesure a pour objet d'accroître la sensibilité et d'améliorer la précision en contournant les limitations des appareils d'essais, notamment les oscilloscopes qui ne disposent que d'un écran de visualisation pour la lecture. Une méthode de zéro est employée, autant que possible, ce qui permet de réduire les erreurs intrinsèques, à l'imprécision d'un couple de résistances de précision. Lorsque l'utilisation d'un pont n'est pas adaptée, comme dans le cas de mesures d'amplitude au moyen d'un oscilloscope, l'impulsion est générée de façon à avoir une amplitude et une position verticale fixes sur le tube cathodique. Certaines mesures nécessitent des appareils ou des montages d'essais qui ne sont pas encore disponibles dans le commerce, au moment de la rédaction de la présente norme; les schémas de circuits relatifs à leur construction sont présentés dans les annexes. L'utilisation d'un tiroir standard d'instrumentation nucléaire pour vérifier les performances d'un amplificateur n'est pas admise, à moins qu'il ne soit possible de corriger les erreurs introduites par ce tiroir ou de démontrer que ces erreurs sont inférieures à l'erreur engendrée par l'amplificateur. L'utilisation d'un module de détection de l'instant de passage pour mesurer le déplacement de cet instant dans un amplificateur bipolaire et celle d'un analyseur multicanal (AMC) pour mesurer la non-linéarité et le bruit en sont des exemples.

1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 313: 1983, *Connecteurs de câbles coaxiaux utilisés en instrumentation nucléaire.*

NUCLEAR INSTRUMENTATION – AMPLIFIERS AND PREAMPLIFIERS USED WITH DETECTORS OF IONIZING RADIATION – TEST PROCEDURES

1 General

1.1 *Scope and object*

The test procedures of this International Standard cover amplifier and preamplifier systems with linear pulse shaping networks for use with semiconductor, scintillation and proportional detectors in the spectrometry of ionizing radiation. The object is to provide a common language and methodology for users and manufacturers of pulse-amplifier systems.

Test procedures for associated detectors are described in IEC 333 and IEC 973.

Not all of the tests described in this standard are mandatory, but those that are performed to determine preamplifier and amplifier specifications shall conform to this standard.

The emphasis on the methods of measurement is to enhance sensitivity and improve accuracy by working around the limitations of the test instruments, particularly oscilloscopes which have only a visual display for read-out. A null technique is used where possible, thereby reducing basic errors to the inaccuracy of a pair of precision resistors. When use of a bridge is inappropriate, such as in measurements of pulse height with an oscilloscope, the pulse is made to occupy a fixed amplitude and vertical position on the face of the cathode ray tube. Some measurements require test instruments or fixtures not commercially available at this writing; circuit diagrams for their construction are given in the annexes. The use of a standard nuclear instrument module to test the performance of an amplifier is not acceptable unless the errors introduced by that module can be corrected for or shown to be less than the error caused by the amplifier. Examples are the use of a crossover pickoff module to measure crossover walk in a bipolar amplifier and an MCA to measure nonlinearity and noise.

1.2 *Normative references*

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 313: 1983, *Coaxial cable connectors used in nuclear instrumentation.*

CEI 333: 1983, *Méthodes d'essais des semicteurs pour particules chargées.*

CEI 973: 1989, *Méthodes d'essais de détecteurs gamma en germanium.*

IEC 333: 1983, *Test procedures for semiconductor charged particle detectors.*

IEC 973: 1989, *Test procedures for germanium gamma-ray detectors.*