

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices –

Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

Dispositifs photovoltaïques –

Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-10:2020



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices –

Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

Dispositifs photovoltaïques –

Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-8802-3

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

CONTENTS

FOREWORD	3
INTRODUCTION	5
1 Scope	7
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 Device selection	9
5 Apparatus	10
5.1 General requirements common to all procedures	10
5.2 Apparatus for measurement of all linear dependences under natural sunlight or with a solar simulator	11
5.3 Apparatus for measurement of all linear dependences of short-circuit current by differential spectral responsivity measurements	12
5.4 Apparatus for linearity measurement of short-circuit current by two-lamp method	12
5.5 Apparatus for linearity measurement of short-circuit current by N-lamp method	12
6 Procedures to measure linearity and other linear dependences under natural sunlight or with a solar simulator	12
6.1 Additional general requirements for natural sunlight	12
6.2 Mounting under natural sunlight	13
6.3 Mounting with a solar simulator	13
6.4 Linear dependence measurements versus irradiance	13
6.5 Linear dependence measurements versus temperature	16
7 Procedures to measure linearity and other linear dependence of short-circuit current from differential spectral responsivity	17
7.1 Linearity measurements	17
7.2 Linear dependence measurements of short-circuit current versus temperature	18
8 Procedure for short-circuit current linearity measurement by the two-lamp or the N-lamp methods	18
8.1 Background	18
8.2 Measurement procedure by the two-lamp method	19
8.3 Measurement procedure by the N-lamp method	20
9 Calculation of linear dependence and linearity	21
9.1 General considerations	21
9.2 Measurement uncertainty evaluation	21
9.3 Determination of deviations from a generic linear dependence	22
9.3.1 Generic case	22
9.4 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance	22
9.5 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance using the two-lamp method	23
9.6 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance using the N-lamp method	24
9.7 Requirements for maximum deviations from the ideal linear function	25
10 Report	26
Bibliography	27

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60904-10 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 2009. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) Modification of title.
- b) Inclusion of an Introduction explanatory of the changes and the reasoning behind them.
- c) Inclusion of a new Clause Terms and Definitions (Clause 3), with distinction between generic linear dependence and linear dependence of short-circuit current versus irradiance (linearity).
- d) Explicit definition of equivalent sample (Clause 4).

- e) Technical revision of the apparatus (Clause 5), of the measurement procedures (Clause 6 to Clause 8) and of the data analysis (Clause 9), with separation of the data analysis for a generic linear dependence from the data analysis specific to linearity (i.e. short-circuit current dependence on irradiance) assessment. Additionally, inclusion of impact of spectral effects on both linearity and linear dependence assessment.
- f) Introduction of specific data analysis for two-lamp method, making it fully quantitative. Addition of extended version called N-lamp method.
- g) Modification of the linearity assessment criterion with inclusion of a formula that can be used to correct the irradiance reading of a PV reference device for non-linearity of its short-circuit current versus irradiance. A linearity factor is specifically newly defined for this purpose.
- h) Revision of the requirements for the report (Clause 10) in order to improve clearness about what information is always necessary and what is dependent on the procedure actually followed to measure the linear dependence, including the type of dependence measured (generic or linearity).

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

FDIS	Report on voting
82/1759/FDIS	82/1784/RVD

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

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

A list of all parts of the IEC 60904 series, under the general title *Photovoltaic devices*, can be found on the IEC website.

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

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

INTRODUCTION

IEC 60904-10 is the reference document for several IEC standards when the linear dependence of one or more electrical parameters of a photovoltaic (PV) device has to be assessed in relation to a test parameter. Test parameters are usually either the device temperature or the irradiance. In order to better reflect the different cases to be handled and the peculiarities of the linear dependence of the short-circuit current of a PV device on the irradiance, IEC 60904-10 has been extensively revised.

To avoid confusion, in this document the word “linearity” will be used only for the dependence of the short-circuit current (I_{SC}) on the irradiance (G), while all the other dependences will be referred to as generic linear dependence (when not explicitly described).

Three major technical changes have been included in this third edition compared to the second edition.

The first main change is the split of the data analysis for the linearity from the one to be used for a generic linear dependence (like for example $V_{OC}(T)$, which gives the open-circuit voltage as function of temperature). The latter keeps the same approach already included in the previous edition, i.e. the least squares fit method, with addition of the recommended use of the measurement uncertainties within the data analysis. The former applies the proportionality function that describes the dependence between I_{SC} and G for an ideal linear PV device. It also makes use of the calibration value of the I_{SC} to establish a reference point towards which the non-linearity is explicitly referred. Also, the impact of test spectra and spectral mismatch on both linearity and generic linear dependence is now considered.

Following this new approach for the linearity assessment, the second major change involves a modification of the definition of non-linearity (referred now explicitly to the calibration value) and the inclusion of a formula to correct the measured irradiance for the non-linearity of the PV device used to measure it. Such a PV device is usually a reference device. However, IEC 61853-1 explicitly considers the case of using the short-circuit current of the PV device itself to measure the irradiance when its linearity has been proved (Note in IEC 61853-1:2011: 8.1). A correction of the actual irradiance measurement to account for deviations of I_{SC} from linearity is therefore relevant when the irradiance is measured by a reference device as well as by the device under test itself. In principle, this can be extended to non-linear devices as well, provided that the non-linearity information is stated in addition to the calibration value of the PV device itself. The irradiance correction for non-linearity is made in this document by means of a multiplication factor, resembling the same approach used in the IEC 60904-7 for the spectral mismatch correction. This formula has been introduced in order to address the explicit reference of the other standards to IEC 60904-10 in terms of handling non-linear devices. However, this formula can be useful to correct deviations from linearity within the acceptance limits even in the case of reference devices classified as linear according to the previous edition of this standard.

The third main change is the revision of the two-lamp method approach. This is achieved first by the introduction of a specific data analysis for the two-lamp method, which was a simple pass/fail test in the second edition and gains now the status of a quantitative method. This change is crucial in order to have results, obtained by any procedure for linearity measurements allowed by this standard, to be fully comparable to each other within their stated measurement uncertainties. Thereby, the irradiance correction formula is also applicable to the results from the two-lamp method. With these additions, the two-lamp method becomes the simplest quantitative method to assess the linearity (i.e. dependence of short-circuit current I_{SC} on irradiance) of PV devices, not even requiring a reference device when devices under test are single PV cells. An extended version called N-lamp method has been included, which overcomes some limitations of the two-lamp method.

A secondary change, which was introduced to improve locating the necessary procedure within the document, is the distinction between the cases of irradiance and of temperature as test parameter, i.e. the parameter being varied and on which the dependence is checked.

Furthermore, when the linear dependence of a device parameter (e.g. I_{SC}) has to be assessed towards more than a single test parameter, intermediate steps applying the procedures described by this standard can be followed if the device under test is stable according to the criterion given in IEC 61215-1 and its relevant part. For example, the measurement of a power matrix as defined by IEC 61853-1 requires the measurement of the maximum power as a function of both irradiance and temperature. In this case, the most convenient way of performing the power matrix measurement is usually to vary one parameter (e.g. the temperature) while keeping the other (e.g. the irradiance) steady, and then to repeat this procedure at different levels of the second parameter until the full matrix is completed. In this view, the second parameter would be considered as the fixed one, and the first one would be the test parameter towards which the linear dependence is evaluated according to this standard. However, once the full power matrix has been measured, the subsequent data analysis of the maximum power (as well as of any other relevant electrical parameter) of the device under test can be done by considering either parameter as the test parameter as long as the other one is kept constant. Therefore, a linear dependence can be assessed with respect to one or the other parameter, independent of the measurement procedure used to obtain the data.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-10:2020

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

1 Scope

This part of IEC 60904 describes the procedures used to measure the dependence of any electrical parameter (Y) of a photovoltaic (PV) device with respect to a test parameter (X) and to determine the degree at which this dependence is close to an ideal linear (straight-line) function. It also gives guidance on how to consider deviations from the ideal linear dependence and in general on how to deal with non-linearities of PV device electrical parameters. Typical device parameters are the short-circuit current I_{SC} , the open-circuit voltage V_{OC} and the maximum power P_{max} . Typical test parameters are the temperature T and the irradiance G . However, the same principles described in this document can be applied to any other test parameter with proper adjustment of the procedure used to vary the parameter itself.

Performance evaluations of PV modules and systems, as well as performance translations from one set of temperature and irradiance to another, frequently rely on the use of linear equations (see for example IEC 60891, IEC 61853-1, IEC 61829 and IEC 61724-1). This document lays down the requirements for linear dependence test methods, data analysis and acceptance limits of results to ensure that these linear equations will give satisfactory results. Such requirements prescribe also the range of the temperature and irradiance over which the linear equations may be used. This document gives also a procedure on how to correct for deviations of the short-circuit current I_{SC} from the ideal linear dependence on irradiance (linearity) for PV devices, regardless of whether they are classified linear or non-linear according to the limits set in 9.7. The impact of spectral irradiance distribution and spectral mismatch is considered for measurements using solar simulators as well as under natural sunlight.

The measurement methods described herein apply to all PV devices, with some caution to be used for multi-junction PV devices, and are intended to be carried out on a device, or in some cases on an equivalent device of identical technology, that is stable according to the criteria set in the relevant part of IEC 61215. These measurements are meant to be performed prior to all measurements and correction procedures that require a linear device or that prescribe restrictions for non-linear devices.

The main methodology used in this document is based on a fitting procedure in which a linear (straight-line) function is fitted to a set of measured data points $\{X_i, Y_i\}$. The linear function uses a least-squares fit calculation routine, which in the most advanced analysis also accounts for the expanded combined uncertainty ($k=2$) of the measurements. The linear function crosses the origin in the case of short-circuit current data versus irradiance. The deviation of the measured data from the ideal linear function is also calculated and limits are prescribed for the permissible percentage deviation.

Procedures to determine the deviation of the $Y(X)$ dependence from the linear (straight-line) function are described in Clause 6 (measurements under natural sunlight and with solar simulator), Clause 7 (differential spectral responsivity measurements) and Clause 8 (measurements via two-lamp and N-lamp method). Data analyses to determine the deviations from the linear function are given in Clause 9.

A device is considered linear for the specific measured dependence $Y(X)$, when it meets the requirements of 9.7.

2 Normative references

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

IEC 60891, *Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*

IEC 60904-1, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*

IEC 60904-1-1, *Photovoltaic devices – Part 1-1: Measurement of current-voltage characteristics of multijunction photovoltaic (PV) devices*

IEC TS 60904-1-2, *Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices*

IEC 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices*

IEC 60904-3, *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

IEC 60904-8, *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device*

IEC 60904-8-1, *Photovoltaic devices – Part 8-1: Measurement of spectral responsivity of multijunction photovoltaic (PV) devices*

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

IEC 61215 (all parts), *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

IEC 61724-1, *Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring*

IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols*

ISO TS 28037, *Determination and use of straight-line calibration functions*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC TS 61836 and the following apply.

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

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

3.1

linear dependence

any generic linear (straight-line) dependence of a PV device parameter on a test parameter

EXAMPLE A common linear dependence for PV devices is the one between the open-circuit voltage and the temperature of the PV device.

Note 1 to entry: This term embraces all possible linear dependences based on a straight line. The linearity defined in the following item is only one special case of them.

3.2

linearity

linear dependence that describes the pure proportionality of the short-circuit current of the PV device to the irradiance that illuminates it

Note 1 to entry: The concept of linearity in physics, which is applicable also to PV devices, implies pure proportionality between the two variables involved in it.

Note 2 to entry: One of the major sources of observed non-linearity of solar PV cells is due to series resistance, which can cause the short-circuit current measured as output of the solar cell to be non-linear even when the photocurrent is linear. All methods included in this document address non-linearity of the short-circuit current, not of the photocurrent.

3.3

limiting junction

junction in a multi-junction photovoltaic device in which under given illumination conditions the lowest photocurrent is generated

[SOURCE: IEC 60904-1-1:2017, 3.1, modified – “photovoltaic current” has been replaced by “photocurrent”.]

4 Device selection

The measurement procedure shall be applied to a full-size device, if possible. If this is not possible, a small sample equivalent in construction and materials to the full-size device to be tested for linearity shall be used. The full-size device and the equivalent device should be stable according to the relevant part of IEC 61215. However, an equivalent sample shall not be used to measure the linearity of a reference device (as defined by IEC 60904-2).

A small sample is deemed to be equivalent to the full-size PV device under test (DUT) when its physical properties relevant to the linear dependence to be measured are the same as for the full-size PV device. This requirement applies to dependence versus irradiance as well as to dependence versus temperature. Also, the configuration of the electrical connections should be well represented.

In particular, when irradiance is the test parameter the relevant optical properties of the small device (including the packaging) shall be the same as for the represented device. This requirement includes for example the use of the same type of front glass (including texture and refraction index) and the same aperture angle that are used in the full-size device.

In the case of PV devices active on both sides (bifacial PV devices, which shall conform to IEC TS 60904-1-2), the above requirement applies to both front and rear sides of the device.

When the equivalence to the full-size device cannot be achieved with a small sample, the report of the measurement results shall state the limits of their validity.

5 Apparatus

5.1 General requirements common to all procedures

The following requirements and recommendations are valid for all linear dependences and for all measurement procedures, unless explicitly specified differently. Requirements and recommendations that are specific to the apparatuses used for each type of measurement are given in the following subclauses.

Light sources characterised by intense peaks over a broad continuum, like for example Xenon sources or some lamps based on light emitting diodes (LEDs), should be carefully evaluated before use. Indeed, for some PV devices and/or technologies the spectral responsivity can vary with temperature as well as with irradiance level. Therefore, it can pass through various emission lines in the lamp spectrum as temperature or irradiance varies. When this occurs, it can cause shifts in performance that are related mainly to a change in the interaction between the band gap region of the spectral responsivity and the actual spectral irradiance in the same wavelength range. If this possibility is not properly assessed in each specific case, such shifts could be misinterpreted as deviations from the linear dependence while they are not. However, based on the measured DUT spectral responsivity as a function of temperature or of irradiance (depending on what applies) and on the measured spectral irradiance, the magnitude of this effect can be calculated by performing a SMM calculation according to IEC 60904-7 as a function of temperature or of irradiance (depending on what applies). Some guidance on how to do this is reported in the Bibliography. The SMM calculation can then be applied as SMM correction to every single measurement at all temperatures different from 25 °C or irradiance levels other than 1 000 W/m² (depending on what applies). If the change in SMM is not larger than 1 % over the entire range of temperatures or than ±0,5 % for irradiances, it may alternatively be included as component of the SMM uncertainty in the measurement uncertainty calculation.

EXAMPLE Crystalline silicon's band gap is known to shift due to temperature changes.

When the test parameter is the irradiance, the equipment and procedure used to change irradiance are to be verified with a spectroradiometer. This applies to all measurement procedures other than the two-lamp and N-lamp methods both applied to single cells and other than the linearity measurement by means of differential spectral responsivity. A radiometer is allowed as alternative to the spectroradiometer only if the following conditions are both met:

- a) the reference device is spectrally-matched to the DUT, and
- b) the setup to measure the linearity is a solar simulator used only with filtering elements neutral with respect to the spectrum of the light.

To reduce the change in the heat load in all measurements where the irradiance is the test parameter, and therefore to improve the temperature stabilization of the DUT over the whole measurement sequence, it can be useful to reduce the infrared portion of the light whose energy is below the DUT's energy band gap by interposing suitable filters between the light beam and the test plane.

NOTE Meshes or light source's filters are believed to be the most suitable methods for changing irradiance on large surfaces.

In the case of linearity measurements of single PV cells by means of the two-lamp or N-lamp methods, the variation in spectral irradiance and the spatial non-uniformity of the light sources are not crucial and as such no restriction is given for them. Instead, when the PV devices are made of series-connected cells, the light sources in the two-lamp or N-lamp methods should conform to class BBA or better according to IEC 60904-9 over the area covered by the DUT. For both single-cells and series-connected PV devices, the short-term instability of the light (STI, defined in IEC 60904-9) shall be less than 0,5 % during the period necessary to measure each of the required triplets of signals (see 8.1). If this is not achievable, one photoactive monitoring device (e.g. a photodiode) shall be used to monitor individually each light source; its reading shall then be used to correct the short-circuit current signal of the DUT for the light's temporal instability. In any case, the variation of the irradiance not corrected for shall be included in the measurement uncertainty calculation.

Under specific conditions and for all affected measurement procedures, the change in the relative spectral irradiance distribution may be considered as an uncertainty contribution to the overall measurement uncertainty instead of being systematically corrected for. The condition to be met is that the change in the relative spectral irradiance distribution shall not result in more than $\pm 0,5$ % change in the spectral mismatch (SMM) of the DUT short-circuit current (refer to IEC 60904-7 for SMM calculation). With regard to spatial uniformity of the irradiance on the test plane (IEC 60904-9), any change to it due to the variation in the irradiance level should not result in more than $\pm 0,5$ % change in the DUT short-circuit current.

If the DUT is a multi-junction device, the spatial variation of the spectral irradiance on the test plane should be carefully considered while changing the irradiance level. In particular, it shall not cause a change of the limiting junction with respect to the one that is limiting under the relevant reference spectrum defined by IEC 60904-3. Also, accounting for the proper SMM at each irradiance level as required by Clause 7 of IEC 60904-1-1:2017 shall be done before calculating the linearity of the multi-junction device.

When the test parameter is the temperature, uniformity of the DUT temperature shall be considered in the uncertainty calculation of the measurement.

In general, an uncertainty calculation shall always be done by explicitly considering the specific setup under use and the measurement performed (see 9.2 for additional details).

5.2 Apparatus for measurement of all linear dependences under natural sunlight or with a solar simulator

The following equipment shall be used for any linear dependence. Where no specification is explicitly given, the listed item shall be considered as required for any test parameter.

- a) Equipment necessary to measure I - V curves of the DUT under natural or simulated sunlight, as listed in IEC 60904-1 or its relevant Part. The equipment may be limited to that necessary for the measurement of the short-circuit current (I_{SC}) in case the linear dependence measurements (versus irradiance or temperature) are of reference cells.
- b) Means for actively controlling the temperature of the DUT and of the reference device. Alternatively, means of limiting light exposure with a long-pulsed light source or a removable shade in the case of measurements under natural sunlight or with a steady-state solar simulator.
- c) If the test parameter is the irradiance (see 6.4), equipment necessary to change it over the range of interest without affecting the relative spectral irradiance distribution and the spatial uniformity.
- d) If the test parameter is the temperature (see 6.5), equipment or means necessary to change the DUT temperature over the range of interest.

5.3 Apparatus for measurement of all linear dependences of short-circuit current by differential spectral responsivity measurements

- a) Equipment to measure the differential spectral responsivity of the DUT in accordance with IEC 60904-8 (for single-junction devices) or IEC 60904-8-1 (for multi-junction devices) to a repeatability equal or less than $\pm 0,5$ % of the reading.
- b) If the test parameter is the temperature, equipment necessary to change the DUT temperature over the range of interest.

5.4 Apparatus for linearity measurement of short-circuit current by two-lamp method

No reference device is required. The following equipment is required:

- a) Two light sources A and B that can be controlled individually, with total in-plane irradiance achievable by the combined source A+B at least as high as the upper limit of the range of interest. The light sources A and B may be two individual lamps, two groups of lamps or a single lamp with suitable masking in front of it to simulate a double-lamp setup (see the Bibliography for examples). To facilitate the achievement of the starting irradiance level, it is recommended that the spectral distribution of the light sources extends over a wavelength range wide enough to cover at least two thirds of the wavelength range where the spectral responsivity of the DUT is more intense. Also, the influence of the infrared portion of the spectral distribution should be assessed in terms of its influence on the device temperature to be maintained according to 5.4 c).

NOTE 1 To reduce the change in the heat load, and therefore to improve the temperature stabilization of the DUT over the whole measurement sequence, it can be useful to reduce the infrared portion of the light whose energy is below the DUT's energy band gap by interposing suitable filters between the light beam and the test plane.

- b) Equipment necessary to measure the short-circuit current of the DUT with a repeatability of $\pm 0,1$ % or better of the reading.
- c) Equipment to control the temperature of the DUT, if necessary to keep it within ± 1 °C of the target temperature.

NOTE 2 The use of a reference device during the linearity measurement is not necessary for the two-lamp method, although it can be useful in order to immediately verify that the irradiance range of interest is fully covered. If a reference device is not used, an iterative approach can be followed to extend the irradiance range to the one of interest.

5.5 Apparatus for linearity measurement of short-circuit current by N-lamp method

The apparatus is the same as for the two-lamp method, with the difference that more than two light sources (1, ..., N) are required. The individual light sources shall produce about the same short-circuit current in the device under test.

6 Procedures to measure linearity and other linear dependences under natural sunlight or with a solar simulator

6.1 Additional general requirements for natural sunlight

Measurements under natural sunlight shall only be made when the following conditions are met, in addition to the general ones set in 5.1:

- The total in-plane irradiance is at least as high as the upper limit G_0 of the range of interest.
- The irradiance variation caused by short-term oscillations (e.g. due to clouds, haze, or smoke) is less than ± 2 % of the total in-plane irradiance as measured by the reference device. These variations shall be corrected for by using the reading of the reference device.
- The wind speed is less than 2 m/s.

6.2 Mounting under natural sunlight

6.2.1 Mount the reference device co-planar with the DUT within 2° so that both are normal to the direct solar beam within $\pm 5^\circ$. Connect to the necessary instrumentation. The measurements described in the following subclauses should be made as expeditiously as possible within a few hours on the same day to minimize the effect of changes in the spectral conditions. SMM calculation according to IEC 60904-7 is required if the reference device is not spectrally matched to the DUT or when the test parameter is the temperature.

6.2.2 If the DUT and the reference device are equipped with temperature controls, set the controls at the desired level. If temperature controls are not used and shading of the DUT from the sun is applied, allow the DUT to stabilize within $\pm 1^\circ\text{C}$ of the target temperature before starting the measurements. In order to bring the DUT temperature close to the target value, pre-cooling or pre-heating of the device is permitted as long as the shading/unshading operation allows to stabilize it within the limits. The reference device should also be stable within $\pm 1^\circ\text{C}$ of its equilibrium temperature before proceeding. For both DUT and reference device, temperature stabilization is considered achieved when for each device at least three consecutive temperature measurements are taken in at least 90 s and all the measured values remain inside the required temperature range.

6.3 Mounting with a solar simulator

6.3.1 Mount the DUT and the reference device co-planar to each other within 2° in the test plane of the solar simulator so that both are normal to the center line of the beam within $\pm 5^\circ$. Connect to the necessary instrumentation.

6.3.2 If the DUT and the reference device are equipped with temperature controls, set the controls at the desired level. If temperature controls are not used, allow the DUT and the reference device to stabilize in temperature within $\pm 1^\circ\text{C}$ of their equilibrium temperature, even if this means changing the room temperature if that is necessary and feasible. In the case of steady-state solar simulators, a removable shade may be used as under natural sunlight to control the temperature of the DUT and of the reference device. For both DUT and reference device, temperature stabilization is considered achieved when for each device at least three consecutive temperature measurements are taken in at least 90 s and all the measured values remain inside the required temperature range.

6.3.3 Set the irradiance at the test plane to the upper limit G_0 of the range of interest using the measured short-circuit current (I_{RC}) of the reference device and its calibration value ($I_{RC,STC}$) at Standard Test Conditions (STC) (see Formula (1)).

6.4 Linear dependence measurements versus irradiance

6.4.1 The initial irradiance G_0 shall be calculated from the measured short-circuit current (I_{RC}) of the reference device and its calibration value ($I_{RC,STC}$) at STC. A correction should be applied according to Formula (1) in order to account for the measured temperature of the reference device ($T_{m,RC}$) by using the relative temperature coefficient (α_{RC}) of the reference device short-circuit current.

$$G_0 = \frac{1\,000}{I_{RC,STC}} \times \frac{I_{RC}}{[1 + \alpha_{RC}(T_{m,RC} - 25)]} \times \frac{1}{R_{0,norm}} \quad (1)$$

where

$R_{0,norm}$ is the linearity factor determined according to this document and accounts for the non-linearity of the reference device at the irradiance G_0 ;

1 000 is the STC value of the total irradiance, given in W/m^2 ;

25 is the STC value of the junction temperature, given in $^\circ\text{C}$.

NOTE By definition, $R_{0,norm}$ equals 1 at the irradiance at which the PV device is calibrated.

6.4.2 Reduce the irradiance on the DUT to a value G_i without affecting the spatial uniformity and the spectral irradiance distribution (as required in 5.1). The irradiance on the DUT may be reduced by one of the following methods, which are alternative to each other; when no apparatus is explicitly mentioned, the method may be applied under natural sunlight as well as with solar simulators:

- a) By using calibrated, uniform-density mesh or neutral-density filters whose size is appropriate to fully cover the DUT. If this method is selected, the reference device shall remain uncovered by the filter to enable the measurement of the unfiltered incident irradiance. No unfiltered light should reach the DUT.

NOTE 1 If the calibration of the meshes or filters is believed to be affected by specific measurement conditions, they can be treated as uncalibrated and the relevant method described in the next item can be followed.

- b) By using uncalibrated, uniform-density mesh or neutral-density filters whose size is appropriate to fully cover, at least individually, the DUT and the reference device. Additionally, in the case the filtering element cannot cover concurrently both devices, the following conditions shall be met:
 - 1) the reference device shall be placed on the test plane nearby the device under test for measurements under natural sunlight and at the same position for measurements at solar simulators;
 - 2) for measurements under natural sunlight, this method is allowed only if the short-term variations of irradiance are smaller than 1 % of the total in-plane irradiance as measured by the reference device;
 - 3) for solar simulators, this method is allowed only when the solar simulator is at least class A for temporal stability according to IEC 60904-9;
 - 4) the irradiance level shall be measured by the reference device in sequence to the device under test, with the filtering element mounted on either device alternatively.

Unfiltered light should reach neither the DUT nor the reference device during the period in which their output is measured.

For both methods 6.4.2 a) and b), the maximum linear opening dimension of mesh filters should be less than 1 % of the minimum linear dimension of both the reference device and the DUT or a variable error can occur due to positioning. Also, for measurements on solar simulators the hole diameter of the mesh should be much larger than the thickness in order to limit possible spectral irradiance changes.

If one of the above methods that use neutral density filters is chosen and the filters are to be mounted on a holder that limits the front aperture angle of the PV device under test, the same holder should be used with the PV device, if the latter is subsequently used as reference device for irradiance measurement.

NOTE 2 The variation in transmittance of optical neutral density filters can typically reach 10 % over the specified wavelength region and can be even larger outside this region.

- c) With solar simulators provided with uniform-density filters in the lamp(s) housing (sometimes called masks), by the use of such filters. If this method is selected, the reference device shall receive the same filtered irradiance as the DUT.
- d) With solar simulators, by increasing the distance between the test plane and the light source while the reference device is maintained co-planar to the DUT.

NOTE 3 This method is considered practical only for a limited range of irradiances, as a variation of the irradiance from 1 100 W/m² to 100 W/m² (as required by IEC 61853-1) would imply to move the test plane to a distance equal to approximately three times the original one from the light source. That would be typically beyond 20 m on large-area solar simulators for module measurements and of the order of 30 cm or more at solar simulators for cells. In realistic conditions, though, this method can be adequate to test the linearity of the PV device within the irradiance range allowed by IEC 60904-1 for I - V curve measurements to be corrected to STC according to IEC 60891.

- e) By the use of one or more optical lenses. Care shall be taken to ensure that the additional optics does not significantly change the relative spectral irradiance in the wavelength range in which both the DUT and the reference device are responsive (as required in 5.1). Also, the introduction of the additional optics should not significantly alter the spatial uniformity of the irradiance; the latter is considered of minor importance when the reference device and the DUT are measured consecutively at the same position and they are equivalent PV devices in the sense of Clause 4.
- f) In the case of solar simulators with multiple equal light sources that can be blocked independently, by varying the number of sources that illuminate the test plane. Care shall be taken in order to avoid significant change of the spectral irradiance and of the spatial uniformity at the various irradiance levels (as required in 5.1).
- g) With solar simulators, by adjusting the intensity of the light source(s) if this complies with the general requirements set in 5.1. Care shall be taken in order to avoid significant change of the spectral irradiance and of the spatial uniformity at the various irradiance levels.

6.4.3 Calculate the irradiance level G_i on the device under test as follows:

6.4.3.1 For method 6.4.2 a), where the reference device is not used to measure the irradiance level G_i :

$$G_i = k_i \times G_0 \quad (2)$$

where G_0 is calculated by Formula (1) and k_i is the calibration parameter of the filtering element (i.e. the fraction of light transmitted).

6.4.3.2 For methods 6.4.2 b) to 6.4.2 g), where the reference device is used to measure the irradiance level G_i :

$$G_i = \frac{I_{RC,i}}{I_{RC,STC}} \times \frac{1}{[1 + \alpha_{RC,i}(T_{m,RC,i} - 25)] \times R_{i,norm}} \times 1\,000 \quad (3)$$

where:

- $I_{RC,i}$ is the measured short-circuit current of the reference device under irradiance G_i ;
- $I_{RC,STC}$ is the calibration value of the short-circuit current of the reference device at STC;
- $\alpha_{RC,i}$ is the relative temperature coefficient of the short-circuit current of the reference device at irradiance G_i , given in %/°C;
- $T_{m,RC,i}$ is the temperature of the reference device during the measurement at irradiance G_i ;
- 1 000 is the STC value for the total irradiance, given in W/m²;
- 25 is the STC value for the junction temperature, given in °C;
- $R_{i,norm}$ is the linearity factor that accounts for the non-linearity of the reference device at irradiance G_i , as calculated according to this document.

6.4.4 Ensure that the temperature of the DUT and of the reference device is stable within ± 1 °C, and that the total irradiance as measured by the reference device remains constant within ± 2 % (or, if applicable, the lower limit given in 6.4.2 b)) during the data recording periods.

6.4.5 For each irradiance level (including G_0), remove the shade (if used) and immediately take simultaneous readings of all the following:

- the temperature $T_{m,RC}$ and the short-circuit current I_{RC} of the reference device to calculate the irradiance X_i (equal to G_i) according to Formula (3),
- the electrical performance parameter Y_i and the temperature $T_{m,DUT}$ of the DUT.

NOTE 1 The parameter Y_i is typically the short-circuit current (I_{SC}) when X_i is the irradiance (G_i); it is the open-circuit voltage (V_{OC}) of the DUT when the linear dependence is assessed towards the natural logarithm of the irradiance ($\ln(G)$).

NOTE 2 The temperature coefficients of the short-circuit current (α), of the open-circuit voltage (β) and of the maximum power (δ) can show dependence on irradiance. When this occurs, the deviation of the functions $\alpha(G)$, $\beta(G)$ and $\delta(G)$ from an ideal linear (straight-line) function can be determined according to the procedures described in this document. In such a case, the temperature coefficients can be measured at different irradiance levels and the data analysis described in 9.3 can be applied to them with X_i equal to G_i and Y_i equal to the specific temperature coefficient at the various irradiances.

6.4.6 Repeat steps 6.4.2 to 6.4.5 in order to cover the entire irradiance range of interest. The data acquisition shall be performed with a periodicity that divides the entire irradiance range of interest in at least six intervals as equally spaced as possible. If corrections of the I - V curves to target conditions other than the total in-plane irradiance are necessary (e.g. for temperature), they shall be made according to IEC 60891 with SMM calculation according to IEC 60904-7.

6.5 Linear dependence measurements versus temperature

6.5.1 Change the temperature of the device under test by one of the following methods; when no apparatus is explicitly mentioned, the method may be applied under natural sunlight as well as with any type of solar simulator:

- use a temperature controller to adjust the DUT temperature to the desired value;
- under natural sunlight or with steady-state solar simulators, expose and shade the DUT towards the natural or simulated sunlight in order to achieve and maintain the desired temperature;
- under natural sunlight or with steady-state solar simulators, allow the DUT to warm up naturally. In this case, the data recording procedure of 6.5.3 is performed periodically during the warm-up and stabilization to the target temperature for each data acquisition may be ensured by simply conforming to requirement given in 6.5.2;
- for pulsed solar simulators, use any appropriate means capable of achieving and maintaining the temperature of the DUT at the target value.

6.5.2 Ensure that during each data acquisition period the temperature of the device under test and of the reference device are stable within ± 1 °C and that, under natural sunlight, the total in-plane irradiance as measured by the reference device remains constant within ± 2 %. If the method of the natural warm-up (see 6.5.1 c)) is followed, pre-cooling of the device under test to a temperature lower than the ambient air temperature is allowed in order to cover the required range of temperatures. The methods that use discrete temperature steps shall not be mixed with the natural warm-up method within a single sequence of measurements at varying temperature.

6.5.3 For each temperature level, remove the shade (if used) and take simultaneous readings of both the temperature X_i and the electrical performance parameter Y_i of the DUT, and of both the temperature $T_{m,RC}$ and the short-circuit current I_{RC} of the reference device.

6.5.4 Repeat steps 6.5.1 to 6.5.3. The temperature values shall be such that the range of interest is spanned in at least six approximately equal increments. A SMM correction shall be performed according to IEC 60904-7, even if the reference device is spectrally matched to the DUT. Only if the change in SMM is not larger than 1 % over the entire range of temperatures, it may be included as contribution to the measurement uncertainty calculation.

NOTE 1 The spectral match of a reference device to the device under test does not guarantee the absence of contribution of SMM to the measurement uncertainty (see IEC 60904-7), especially in the case of temperature-dependent measurements and PV technologies with spectral responsivity varying with temperature. The latter would indeed produce a SMM that in turn varies with temperature. A systematic correction for this temperature-dependent SMM can be done if the spectral responsivity of the device under test is available at several temperatures in the range of interest. Alternatively, a SMM uncertainty contribution can be included based on statistically representative data sets of the spectral responsivity of the same device type as well as of the spectrum (or spectra) under which the temperature-dependent measurements are performed.

NOTE 2 A temperature gradient between the temperature sensor and the PV device junction can exist for measurements using steady-state solar simulators as well as under natural sunlight. This gradient can change with temperature as well as under different irradiance levels.

7 Procedures to measure linearity and other linear dependence of short-circuit current from differential spectral responsivity

7.1 Linearity measurements

7.1.1 Following IEC 60904-8 for single-junction devices and IEC 60904-8-1 for multi-junction devices, measure the absolute differential spectral responsivity as a function of bias-light irradiance in at least six approximately equal increments over the irradiance range of interest. The absolute differential spectral responsivity is identified with the notation:

$$\tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b))$$

where λ is the wavelength and $I_{SC,bias}(G_b)$ is the short-circuit current of the DUT generated by the bias-light irradiance G_b .

7.1.2 Alternatively to point 7.1.1, measure the relative differential spectral responsivity $\tilde{s}_{rel}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b))$ and scale it to the absolute differential spectral responsivity by using the following formula:

$$\tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) = F \times \tilde{s}_{rel}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) \quad (4)$$

The scaling factor F is given by:

$$F = \frac{1}{G_{CAL}} \frac{I_{SC,CAL}}{\int_0^\infty \tilde{s}_{rel,AMx}(I_{SC,bias}(G_b)) \times E_{AMx}(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

where

$I_{SC,CAL}$ is the calibrated short-circuit current of the DUT, as determined under any required reference spectral irradiance by means of a calibration method that may be different from the one prescribed in IEC 60904-8;

$G_{CAL} = \int_0^\infty E_{AMx}(\lambda) d\lambda$ is the integral of the reference spectral irradiance at which the DUT was calibrated;

the relative spectral responsivity referred to the reference spectral irradiance AMx is given by:

$$\tilde{s}_{rel,AMx}(I_{SC,bias}(G_b)) = \frac{\int_0^\infty \tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) \times E_{AMx}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{AMx}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

7.1.3 Calculate the differential responsivity $\tilde{s}_{AMx}(I_{SC,bias}(G_b))$ by weighting the absolute differential spectral responsivity $\tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b))$ (from either 7.1.1 or 7.1.2) at each given bias current $I_{SC,bias}(G_b)$ with the reference spectrum AMx, according to the following formula:

$$\tilde{s}_{AMx}(I_{SC,bias}(G_b)) = \frac{\int_0^\infty \tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) \times E_{AMx}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{AMx}(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

where AMx is the relevant reference spectrum to be considered.

NOTE In case the relevant spectrum is one of those tabulated by IEC 60904-3, AMx is equal either to AM1.5 or to AM1.5D depending on whether the spectral irradiance is the global or the direct one as defined in IEC 60904-3.

7.1.4 The short-circuit current $I_{SC}(G)$ at a generic reference spectrum AMx and irradiance E can then be derived numerically by solving the following formula:

$$G = \int_0^{I_{SC}(G)} \frac{dI_{SC,bias}}{\tilde{s}_{AMx}(I_{SC,bias}(G_b))} \quad (8)$$

7.1.5 It is recommended to ensure that the relative spectral distribution of the bias light does not significantly change with the irradiance level. In case of multi-junction devices, also the balance between the spectral bands to which each junction is responsive should not significantly change and it should remain the same spectral balance corresponding to the relevant reference spectrum given in IEC 60904-3.

7.2 Linear dependence measurements of short-circuit current versus temperature

7.2.1 Following IEC 60904-8 for single-junction devices and IEC 60904-8-1 for multi-junction devices, measure the differential spectral responsivity as a function of temperature in at least three approximately equal increments over the temperature range of interest.

7.2.2 Alternatively to performing the full procedure described in 7.1 for each temperature value, the linear dependence of short-circuit current versus temperature may be measured by two successive steps:

7.2.2.1 Perform a standard measurement of the relative spectral responsivity $s_{rel,STC}(\lambda)$;

7.2.2.2 Perform a measurement of the relative differential spectral responsivity $\tilde{s}_{rel}(\lambda, T, I_{SC,bias}(G_b))$ as a function of the temperature T and at constant irradiance G_b of the bias light. The latter shall be intense enough to produce a short-circuit current $I_{SC,bias}$ at least equal to 30 % of the short-circuit current at STC, $I_{SC,STC}$.

7.2.2.3 Repeat the measurement at the previous point for at least three other values of temperature, so that the overall temperature range of interest is divided in at least three approximately equal intervals.

7.2.3 For temperature dependence measurements, bias-light sources with spectral emission characterised by intense peaks, like for example xenon sources or some LED lamps, should be carefully evaluated for photoactive materials with spectral responsivity varying with temperature. Indeed, these light sources could produce an artificial change in the bias light intensity as perceived by the DUT while the differential spectral responsivity crosses narrow bands of strong or poor emission. This effect should be considered even more carefully in the case of multi-junction devices, for which the short-circuit current condition of the junction under test is produced by applying an external bias voltage (see IEC 60904-8-1) to the whole DUT. Furthermore, as the bias voltage can strongly depend on the temperature of the junction(s) not under test, in the case of multi-junction devices the temperature dependence measurements should be performed after properly setting the bias voltage at each temperature level.

NOTE If the bias voltage is not reset at each temperature level, an artefact can arise in the measurement due to the different set-point of the junction under test, which can result to not be at short-circuit conditions contrary to what is required by IEC 60904-8-1.

8 Procedure for short-circuit current linearity measurement by the two-lamp or the N-lamp methods

8.1 Background

If a PV device is linear, then the short-circuit current produced in it when the device is illuminated by two light sources A and B equals the sum of the short-circuit currents generated by the individual light sources. In mathematical terms, this is expressed by the following Formula:

$$I_A + I_B = I_{A+B} \quad (9)$$

where:

I_{A+B} is the short-circuit current with both lamps A and B (i.e. with source A+B) illuminating the DUT,

I_A or I_B is the short-circuit current with one lamp (A or B) illuminating the DUT and the light from the other lamp blocked.

The advantage of this method is twofold: no reference device is needed and the requirements on the spatial non-uniformity of both total and spectral irradiances are given only for series-connected devices (see 5.1).

The drawback of this method is that it can only be applied to overall irradiance ranges strictly larger than a factor of two. Indeed, there is no information measurable through this method inside the range of irradiances (defined sub-range) included between the level produced by lamp A (or B) and the one produced by lamp A+B.

This method is also not recommended for multi-junction PV devices because of the possible effects that a variation in the spatial distribution of the spectral irradiance might have on the current balance between the junctions of the device under test. If this method is used to measure the linearity of multi-junction PV devices, care should be taken that no current-balance change is introduced during the measurement sequence.

8.2 Measurement procedure by the two-lamp method

8.2.1 Connect the DUT to the apparatus to measure I_{SC} .

8.2.2 If a temperature controller is used, set the temperature of the DUT to the value of interest and maintain it within ± 1 °C.

8.2.3 Prior to the start of the measurement, individually set the light sources A and B. In order to do so, monitor the short-circuit current I_{SC} of the DUT under illumination by source A+B and adjust the individual sources in any appropriate way until I_{SC} equals the calibration value $I_{SC,CAL}$. In this way, the combined source A+B gives the total in-plane irradiance (labelled $G_{DUT,CAL}$) that corresponds to the one at which the DUT was calibrated. Alternatively, set the irradiance equal to $G_{DUT,CAL}$ by use of an optional reference cell including correction for spectral mismatch.

NOTE The calibration value of the DUT is generically labelled $I_{SC,CAL}$ for the two-lamp method because it is not necessarily measured at 1 000 W/m².

8.2.4 Allow the light sources to stabilize before proceeding further and, if needed and possible, finely adjust their intensity so that I_{SC} measured with source A+B equals $I_{SC,CAL}$ within its uncertainty after the stabilization. In this case, if the short-circuit current measured after the adjustment deviates more than 1 % from the one measured before the adjustment, let the sources stabilize further. The best results will be obtained when the two light sources A and B produce approximately the same short-circuit current in the DUT, i.e. when:

$$I_A \cong I_B$$

NOTE This corresponds to half of $I_{SC,CAL}$ for an ideal linear device.

8.2.5 Measure the short-circuit currents I_{A+B}^* , I_A^* , I_B^* and I_{room} (i.e. the short-circuit current with both beams blocked). The first three quantities are the DUT short-circuit currents that include also the background current I_{room} . Calculate then the short-circuit currents purely produced by the light sources as:

$$I_{A+B} = I_{A+B}^* - I_{room} \quad (10)$$

$$I_A = I_A^* - I_{room} \quad (11)$$

$$I_B = I_B^* - I_{room} \quad (12)$$

8.2.6 Repeat step 8.2.5 after stabilizing the lamps at convenient values of total in-plane irradiance for the combined source A+B. These convenient values may be larger than $G_{DUT,CAL}$, depending on the overall irradiance range of interest. In any case, the irradiance $G_{DUT,CAL}$ shall be included in the overall range covered by the linearity measurements and all measured sub-ranges shall have at least one irradiance value in common with at least one other sub-range. The repeated measurement of I_{room} at every irradiance level is not required if the background conditions that define it are not changed (e.g. by changing a filtering mesh in front of the test plane).

8.2.7 The irradiance may be varied by using appropriate filters or masking elements, by changing the distance between the lamps and the test plane, by varying the light intensity from each lamp or by reducing the number of sources in A and B if the latter are groups of lamps. The variation of the light intensities is allowed for single-junction PV devices only and within the requirements set in 5.1, because it generally implies a shift in the spectral distribution of the emitted light that in some cases can alter the balance of the junctions within a multi-junction device compared to other intensities.

8.2.8 Continue the process (steps 8.2.5 to 8.2.7) until the full range of irradiances of interest has been spanned, including $G_{DUT,CAL}$.

8.3 Measurement procedure by the N-lamp method

8.3.1 Follow steps 8.2.1 to 8.2.4 for the two-lamp method, with appropriate modifications. For example, source A+B shall be meant as source $\tilde{N}$, defined as the sum of all the available individual sources (i.e. sources 1+2+...+N).

8.3.2 Measure the short-circuit currents produced by the combined and by all the individual sources on the example of 8.2.5, where A+B shall be meant as $\tilde{N}$ and the individual short-circuit currents are in total N. These short-circuit currents constitute one data set of measurements.

8.3.3 The I_{SC} produced by the overall combined source $\tilde{N}$ and those produced by the individual N sources shall be measured one after the other to minimise the effect of lamp instability.

8.3.4 Additionally, measure the short-circuit current produced by at least one combination of light sources for each of the other irradiance levels included between the individual lamp and all the N lamps together, i.e.:

- with two sources (e.g. 1+2);
- then with three sources (e.g. 1+2+3);
- etc. etc.
- finally with N-1 sources together.

If possible, the measurement of the individual short-circuit currents should be repeated for each additional irradiance level.

EXAMPLE When there are 5 lamps ($N=5$ and lamps are numbered from 1 to 5) and they give a combined irradiance of $1\,000\text{ W/m}^2$, the additional intermediate irradiance levels can be achieved by selecting:

- lamp 1 together with lamp 3, lamp 4 and lamp 5 to achieve 800 W/m^2 , i.e. $4/5$ of the overall irradiance reached with the five lamps together;
- lamp 2 together with lamp 3 and lamp 4 to achieve 600 W/m^2 , i.e. $3/5$ of the overall irradiance reached with the five lamps together;
- lamp 1 together with lamp 3 to achieve 400 W/m^2 , i.e. $2/5$ of the overall irradiance reached with the five lamps together.

9 Calculation of linear dependence and linearity

9.1 General considerations

Verify that any parameter other than the one being evaluated was held constant within the allowed limits during the measurements. When they are not the test parameter on which the dependence is measured, changes in temperature or irradiance within the limits set in this standard may be either analytically corrected to the target condition according to IEC 60891 and IEC 60904-7 or included in the overall uncertainty calculation of the linear dependence measurement as performed. This can be an iterative process, which should be updated when the deviation from the linear dependence is established and when more refined correction coefficients are determined.

The data analyses included here are based on the assumption that linear dependences are well described by a regression line based on the least squares linear fit method. For simplicity of description, the data analysis reported here shows the simplest case. An ordinary least squares straight line is fit to the data set $\{X_i, Y_i\}$ as measured and the measurement uncertainties are not considered as input to the fit calculation (see 5.8 of ISO TS 28037:2010). However, as the uncertainty calculations for the linear dependence measurements are required, it is recommended to apply the weighted least squares problem (see Clause 6 of ISO TS 28037:2010), where the standard uncertainties of Y_i are used as weights to calculate the weighted least squares straight-line calibration function.

NOTE Further methods that deal with more complex situations (e.g. correlated uncertainties between X_i and Y_i) are dealt with in ISO TS 28037, to which the user is invited to refer for more accurate and comprehensive estimate of the linear fit parameters.

9.2 Measurement uncertainty evaluation

An uncertainty calculation shall be done by explicitly considering the specific setup under use and the measurements performed. Accordingly, all apparatus modifications that produce an undesired change in the electrical performance parameter(s) under test shall be evaluated and either corrected for, if possible, or explicitly considered in the overall uncertainty calculation for each measurement. For guidance on how to carry out this task, refer to the Bibliography.

EXAMPLE 1 One example of such an undesired change is the possible variation that can affect linearity measurements if the irradiance uniformity on the test plane varies with the irradiance level. This can strongly depend on the specific method and the means chosen to vary it.

EXAMPLE 2 Another undesired change can be the variation of the temperature uniformity in the DUT when the operating temperature is varied during a sequence of temperature-dependence measurements.

In general, also the SMM as defined by the IEC 60904-7 shall be evaluated for the specific measurement and apparatus and either corrected for or included in the overall uncertainty calculation for the measurement. In the latter case and with the exception of linearity measurements, general considerations may be drawn from, and uncertainty contributions may be based on, statistically significant results that are representative of that type of device.

9.3 Determination of deviations from a generic linear dependence

9.3.1 Generic case

For performance characteristic slopes, such as those of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} versus temperature, the deviation of the measured function $Y(X)$ from the ideal linear dependence is calculated by applying the linear least squares fit method to the data points $\{X_i, Y_i\}$ as measured. The linear fit results in a set of predicted values, calculated as:

$$\hat{Y}_i = m \times X_i + b \quad (13)$$

where $\hat{Y}_i$ is the predicted value of the electrical parameter under test and is based on the linear least squares best fit of the data set $\{X_i, Y_i\}$; m is the calculated slope and b is the calculated intercept of the linear fit.

NOTE 1 Typical $\{X_i, Y_i\}$ pairs are $\{T, I_{SC}\}$, $\{T, V_{OC}\}$, $\{T, P_{max}\}$ and $\{\ln(G), V_{OC}\}$.

NOTE 2 The respective slope of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} versus temperature defines the corresponding temperature coefficient (see IEC TS 61836 or IEC 60891). This document can be used to analyse the data for temperature coefficients with respect to linear dependence.

The percentage variation NLD_i from the ideal linear dependence described by the regression line is calculated for each measured point as:

$$NLD_i = \text{Percentage deviation from linear function} = \left(\frac{Y_i}{\hat{Y}_i} - 1 \right) \times 100 \quad (14)$$

There is one value NLD_i for each value of the test parameter X_i .

9.4 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance

This calculation procedure applies to all measurement procedures of I_{SC} versus irradiance with exception of the two-lamp method, dealt with in 9.5, and of the N-lamp method, dealt with in 9.6.

The basis of this procedure is that the dependence on the irradiance for the short-circuit current of an ideal PV device is described by the proportionality:

$$I_{SC}(c \times G) = c \times I_{SC}(G) \quad (15)$$

where c is a proportionality constant. Based on the calibration measurement of the PV DUT (usually at STC), Formula (15) can be written as:

$$I_{SC} = \frac{G}{G_{DUT,CAL}} \times I_{SC,CAL} \quad (16)$$

where G is the irradiance at which the DUT short-circuit current I_{SC} is measured, $G_{DUT,CAL}$ is the irradiance at which the DUT has been calibrated (usually 1 000 W/m²) and $I_{SC,CAL}$ is the calibration value of the DUT short-circuit current.

The non-linearity NL of the short-circuit current versus irradiance is defined as the percentage deviation of the measured I_{SC} to the value expected from applying the proportionality in Formula (16). Hence, NL is first referred to as a function of the short-circuit current of the PV device and then transformed into a function of the irradiance by using the calibration value $I_{SC,CAL}$ as reference point.

The percentage deviation from linearity, NL_i , is calculated for each irradiance X_i as:

$$NL_i = \left(\frac{Y_i}{I_{SC,CAL}} \times \frac{G_{DUT,CAL}}{X_i} - 1 \right) \times 100 \quad (17)$$

where Y_i is the measured short-circuit current of the DUT, $I_{SC,CAL}$ is the calibration value of the short-circuit current, $G_{DUT,CAL}$ is the irradiance at which the DUT has been calibrated and $X_i = G_i$ is the irradiance at which Y_i has been measured.

Advanced analysis can be done on the basis of the procedures described in ISO TS 28037 with inclusion of the uncertainties of all the measured points, while always normalising towards the calibration value of the DUT in order to have NL_i equal to zero when I_{SC} equals $I_{SC,CAL}$.

The linearity factor $R_{i,norm}$ is defined as:

$$R_{i,norm} = 1 + \frac{NL_i}{100} \quad (18)$$

and by definition it equals 1 when I_{SC} equals $I_{SC,CAL}$.

The irradiance $G_{i,corr}$ corrected for the non-linearity of the PV device that measures it can be calculated by Formula (3).

9.5 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance using the two-lamp method

The following steps are necessary in order to obtain a deviation from linearity based on measurements with the two-lamp method. The procedure described herein is derived from data analysis commonly applied in photometry (see Bibliography for references) and adjusted in order to refer it to the irradiance at which the PV device is calibrated (usually 1 000 W/m²).

- 1) For each triplet of short-circuit currents I_{A+B}^i , I_A^i and I_B^i , which are defined by Formulae (10) to (12) respectively, calculate the ratio $R_{loc,i}$:

$$R_{loc,i} = \frac{I_A^i + I_B^i}{I_{A+B}^i} \quad (19)$$

- 2) Consider now the space of variables $\{I_{SC}, R\}$, where R is the ratio referred to the overall short-circuit current's (and therefore irradiance) range of interest.
- 3) Consider the measured sub-range k that contains the value $I_{SC,CAL}$ closest to its upper limit. Calculate the local ratio value $R_{loc,CAL}$ for the calibration value $I_{SC,CAL}$ by applying a linear fit through the points $\{I_{ave}^k, R_{loc,k}\}$ and $\{I_{A+B}^k, 1\}$, where I_{ave}^k is the average of the short-circuit currents I_A^k and I_B^k .
- 4) Transform the local ratio $R_{loc,k}$ of this sub-range to the global ratio R_k , by calculating the following:

$$R(I_{SC,CAL}) = 1 \quad (20)$$

$$R_k(I_{A+B}^k) = \frac{1}{R_{loc,CAL}} \quad (21)$$

$$R_k(I_{ave}^k) = m_k \times I_{ave}^k + b_k \quad (22)$$

where

$R(I_{SC,CAL})$ is the ratio of the calibration value referred to the overall range of interest. By definition it is set equal to 1;

- $R_k(I_{A+B}^k)$ is the ratio of the upper limit (I_{A+B}^k) of the short-circuit current's sub-range k , now related to the overall range of interest;
- m_k and b_k are, respectively, the slope and the intercept of the linear fit through the points $\{I_{SC,CAL}, 1\}$ and $\{I_{A+B}^k, 1/R_{loc,CAL}\}$ (as defined in Formulae (20) and (21), respectively).

- 5) Calculate the R_j values of the closest j -th sub-range (that should overlap to the k -th one at least for one point). To do this, first calculate with Formula (23) the interpolated value of the j -th sub-range's limit that is closest to the k -th sub-range:

$$R_j(I_{A+B}^j) = m_k \times I_{A+B}^j + b_k \quad (23)$$

where I_{A+B}^j is the upper limit of the j -th sub-range that is at lower irradiance compared to the k -th one; m_k and b_k are the same as in Formula (22). Formula (23) uses notation for the upper limit, but it may be applicable as well to those overlapping sub-ranges at higher irradiance compared to the initial k -th sub-range. In the latter case, the short-circuit current to be considered for the interpolation is I_{ave}^j , as defined at step 2) of this subclause, instead of the value I_{A+B}^j .

- 6) Then, combine the ratio just calculated for the interpolated point $\{I_{A+B}^j, R_j(I_{A+B}^j)\}$ with the local ratio of the j -th sub-range so that:

$$R_j(I_{ave}^j) = R_j(I_{A+B}^j) \times R_{loc,j}(I_{ave}^j) \quad (24)$$

- 7) Repeat steps 5) to 6) for all sub-ranges, always interpolating with Formula (23) either the upper limit of the next sub-range overlapping with the previous one for downwards irradiance levels or the lower limit in the case of upwards irradiance levels.
- 8) For each $R_j(I_{ave}^j)$ value, calculate the non-linearity NL_i as:

$$NL_i(I_{ave}^i) = [R_i - 1] \times 100 \quad (25)$$

NL_i is expressed as percentage and is associated to the short-circuit current value I_{ave}^i , which is the average of the short-circuit currents I_A^i and I_B^i .

- 9) For each $R_{i,norm}$, the irradiance $G_{i,corr}$, which is corrected for the non-linearity of the PV device characterised according to this standard, can then be calculated by Formula (3).

9.6 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance using the N-lamp method

The following steps are necessary in order to obtain a deviation from linearity based on measurements with the N-lamp method. The procedure here described is derived from data analysis commonly applied in photometry (see Bibliography for references) and adjusted in order to refer it to the irradiance at which the PV device is calibrated (usually 1 000 W/m²).

- 1) For each data set i obtained from measurements with a group of n lamps (with $n \leq N$), calculate the ratio:

$$R_i = \frac{I_{SC,\tilde{n}}}{\sum_{j=1}^n I_j} \quad (26)$$

where

- n is the total number of lamps used for the considered data set. Depending on the considered irradiance level (see 8.3), $n \leq N$;
- j is the index that counts the lamps used for the considered data set;
- $\tilde{n}$ is the combined light source obtained as the sum of all the n lamps used for the considered data set;
- $I_{SC,\tilde{n}}$ is the measured short-circuit current as produced by $\tilde{n}$, i.e. by all together the n lamps of the considered data set;

R_i is the linearity factor of the short-circuit current $I_{SC,\tilde{n}}$; it has its reference point in the average short-circuit current $I_{ave} = (\sum_{j=1}^n I_j)/n$ produced by the n lamps individually, so that $R_i(I_{ave})=1$.

- 2) Fit the points $R_i(I_{SC,\tilde{n}})$ with a polynomial function to calculate the value $R_i(I_{SC,CAL}) = R_{CAL}$.

NOTE 1 Usually, a polynomial of the second order gives satisfactory results for both linear and non-linear PV devices.

- 3) For each data set i , normalise the ratios R_i to R_{CAL} , as follows:

$$R_{i,norm} = \frac{R_i(I_{SC,\tilde{n}})}{R_{CAL}} \quad (27)$$

where R_i is the linearity factor corresponding to the short-circuit current $I_{i,\tilde{n}}$ and therefore to the irradiance G_i .

NOTE 2 The ratio $R_{i,norm}$ equals 1 for $I_{SC} = I_{SC,CAL}$.

- 4) The percentage deviation from linearity, NL_i , is then expressed as:

$$NL_i = (R_{i,norm} - 1) \times 100 \quad (28)$$

There is one value of NL_i for each ratio R_i .

- 5) The irradiance $G_{i,corr}$, which is corrected for the non-linearity of the PV device characterised according to this standard, can be calculated by Formula (3).

9.7 Requirements for maximum deviations from the ideal linear function

When a given device is claimed to have a linear dependence on a test parameter, and therefore it is classified as linear device with respect to that parameter, the applicable range of temperature, irradiance, voltage, or any other necessary condition to which this claim refers shall also be stated. The linear dependence shall therefore be intended to be assessed only for the specified range of the test parameter (e.g. temperature from 7 °C to 83 °C) and for the specified additional measurement conditions (e.g. irradiance of 850 W/m²) which were kept unvarying during the linear dependence measurement.

In order to claim a PV device linear with respect to a test parameter, the following acceptance limits of the deviation from the ideal linear dependence, including non-linearity, shall be fulfilled for that parameter disregarding the uncertainty of the final result:

- For the dependence of short-circuit current I_{SC} versus irradiance (i.e. linearity), the maximum percentage deviation NL_i from linearity shall be within $\pm 0,5$ %. Within these limits, the percentage deviation may be included as measurement uncertainty contribution when correcting an I - V curve to the target irradiance according to IEC 60891 or for an irradiance measurement by a PV device classified as reference device according to IEC 60904-2. Beyond these limits, the deviation from linearity is required to be corrected for according to subclause 9.4, 9.5 or 9.6, depending on which is applicable.
- For the dependence of open-circuit voltage V_{OC} versus the natural logarithm of irradiance, the maximum deviation from the ideal linear dependence shall be within ± 3 %.
- For the dependence of open-circuit voltage V_{OC} , short-circuit current I_{SC} and maximum power P_{max} versus temperature, and all other dependencies not explicitly mentioned, the maximum deviation from the ideal linear dependence shall be within ± 2 %. If the temperature coefficient of short-circuit current is less than 0,1 %/K, the device short-circuit current may be considered linear with respect to temperature.

10 Report

Following completion of the procedure, a report of the performance test with measured data shall be prepared by the test agency. Each report shall include at least the following information:

- a) A title.
- b) Name and address of the test laboratory and location where the calibration or test was carried out.
- c) Unique identification of the report and of each page.
- d) Name and address of client, where appropriate.
- e) Description and unique identification of the device under test.
- f) Condition of the device under test at the time of test, where appropriate.
- g) Date of receipt of the device to be calibrated or tested, where appropriate.
- h) Date(s) of calibration or test.
- i) Identification of calibration or test procedure used.
- j) Reference to sampling procedure, where relevant.
- k) Any deviations from, additions to or exclusions from the calibration or test procedure, and any other information relevant to a specific calibration or test (including setup), such as environmental conditions. The latter shall always include temperature of the device under test for measurements at varying irradiance and total in-plane irradiance for measurements at varying temperature.
- l) Where relevant, either the spectral mismatch factor applicable to the measured data or the matching factor between the spectrally-matched reference device and the device under test.
- m) Table(s) and graph(s) with the full data set(s) $\{X_i, Y_i\}$ used to determine the conformity to the requirements set in 9.7.
- n) The percentage deviation from the ideal linear function and the corresponding estimated uncertainty for each data point included in m).
- o) Where relevant to the procedure followed, measurement(s) and derived results of the spectral responsivity of the device under test.
- p) Where relevant to the procedure followed, the spectral irradiance under which the measurement was carried out.
- q) A signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of the report, and the date of issue.
- r) Where relevant, a statement to the effect that the results relate only to the PV device(s) calibrated or tested.
- s) Where relevant, a statement that the report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.
- t) A statement on whether the device under test passes or fails the linearity criteria set in 9.7, the straight-line function that describes the linear dependence (except for linearity) and the range of temperature, irradiance, voltage, or any other necessary condition to which the straight-line function can be applied.

Bibliography

PV standards

IEC 61829, *Photovoltaic (PV) array – On-site measurement of current-voltage characteristics*

IEC 61853-1, *Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating – Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating*

Guides for uncertainty calculation

JCGM 100, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*

Temperature-dependence of spectral mismatch

C.R. Osterwald, M. Campanelli, T. Moriarty, K.A. Emery, R. Williams, 2015, *Temperature-Dependent Spectral Mismatch Corrections*, IEEE J. Photovoltaics 5(6), 1692-1697

E. Salis, D. Pavanello, G. Trentadue, H. Müllejans, 2018, *Uncertainty budget assessment of temperature coefficient measurements performed via intra-laboratory comparison between various facilities for PV device calibration*, Sol. Energy 170, 293-300

Two-lamp and N-lamp methods

C. L. Sanders, 1962, *A Photocell Linearity Tester*, Applied Optics 1 207-211

L. P. Boivin, 1993, *Automated Absolute and Relative Spectral Linearity Measurements on Photovoltaic Detectors*, Metrologia 30 355

K. Emery, S. Winter, S. Pinegar, and D. Nalley, "Linearity Testing of Photovoltaic Cells", *Proc. IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 2177-2180, May 7-12, 2006 Waikoloa, HI

H. Müllejans and E. Salis, 2019, *Linearity of photovoltaic devices: quantitative assessment with N-lamp method*, Meas. Sci. Technol. 30 065008

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION	32
1 Domaine d'application	34
2 Références normatives	35
3 Termes et définitions	35
4 Sélection du dispositif	36
5 Équipement	37
5.1 Exigences générales communes à toutes les procédures	37
5.2 Équipement de mesure de toutes les dépendances linéaires sous éclairage solaire naturel ou avec un simulateur solaire	38
5.3 Équipement de mesure de toutes les dépendances linéaires du courant de court-circuit au moyen des mesurages de la sensibilité spectrale différentielle	39
5.4 Équipement de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à l'aide de la méthode à deux lampes	39
5.5 Équipement de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à l'aide de la méthode à N lampes	39
6 Procédures destinées à mesurer la linéarité et d'autres dépendances linéaires sous éclairage solaire naturel ou avec un simulateur solaire	40
6.1 Exigences générales supplémentaires relatives à l'éclairage solaire naturel	40
6.2 Montage sous éclairage solaire naturel	40
6.3 Montage avec un simulateur solaire	40
6.4 Mesurages de la dépendance linéaire en fonction de l'éclairement	41
6.5 Mesurages de la dépendance linéaire en fonction de la température	44
7 Procédures de mesure de la linéarité et autre dépendance linéaire du courant de court-circuit par rapport à la sensibilité spectrale différentielle	45
7.1 Mesurages de linéarité	45
7.2 Mesurages de la dépendance linéaire du courant de court-circuit en fonction de la température	46
8 Procédure de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à partir des méthodes à deux lampes ou à N lampes	47
8.1 Contexte	47
8.2 Procédure de mesure à partir de la méthode à deux lampes	47
8.3 Procédure de mesure à partir de la méthode à N lampes	48
9 Calcul de la dépendance linéaire et de la linéarité	49
9.1 Considérations générales	49
9.2 Évaluation de l'incertitude de mesure	50
9.3 Détermination des écarts par rapport à une dépendance linéaire générique	50
9.3.1 Cas générique	50
9.4 Détermination de la non-linéarité du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement	50
9.5 Détermination de la non-linéarité du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement avec la méthode à deux lampes	51
9.6 Détermination de la non-linéarité du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement avec la méthode à N lampes	53
9.7 Exigences relatives aux écarts maximaux par rapport à la fonction linéaire idéale	54

10 Rapport	54
Bibliographie.....	56

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-10:2020

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 60904-10 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2009. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) Modification du titre.
- b) Ajout d'une Introduction qui explique les modifications apportées et les raisons de ces modifications.

- c) Ajout d'un nouvel Article Termes et définitions (Article 3) qui fait la distinction entre la dépendance linéaire générique et la dépendance linéaire de courant de court-circuit en fonction de l'éclairement (linéarité).
- d) Définition explicite de l'échantillon équivalent (Article 4).
- e) Révision technique de l'équipement (Article 5), des procédures de mesure (Article 6 à Article 8) et de l'analyse des données (Article 9), avec distinction entre analyse des données relative à une dépendance linéaire générique et analyse des données spécifique à l'évaluation de la linéarité (c'est-à-dire la dépendance du courant de court-circuit sur l'éclairement). De plus, ajout de l'impact des effets spectraux sur l'évaluation de la linéarité et de la dépendance linéaire.
- f) Introduction d'une analyse de données spécifique à la méthode à deux lampes, rendant celle-ci entièrement quantitative. Ajout d'une version étendue appelée méthode à N lampes.
- g) Modification du critère d'évaluation de la linéarité avec ajout d'une formule qui peut être appliquée pour corriger le relevé d'éclairement d'un dispositif PV de référence pour la non-linéarité de son courant de court-circuit en fonction de l'éclairement. Un facteur de linéarité spécifique est nouvellement défini dans ce but.
- h) Révision des exigences relatives au rapport (Article 10) afin de préciser les informations qui sont toujours nécessaires et ce qui dépend de la procédure réellement suivie pour mesurer la dépendance linéaire, y compris le type de dépendance mesuré (générique ou linéarité).

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

FDIS	Rapport de vote
82/1759/FDIS	82/1784/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 internationale.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60904, sous le titre général *Dispositifs photovoltaïques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

INTRODUCTION

L'IEC 60904-10 constitue le document de référence pour plusieurs normes de l'IEC lorsque la dépendance linéaire d'un ou plusieurs paramètres électriques d'un dispositif photovoltaïque (PV – *photovoltaic*) doit être évaluée par rapport à un paramètre d'essai. Les paramètres d'essai sont généralement la température du dispositif ou l'éclairement. L'IEC 60904-10 a été largement révisée afin de mieux refléter les différents cas à traiter et les spécificités de la dépendance linéaire du courant de court-circuit d'un dispositif PV sur l'éclairement.

Pour éviter toute confusion, dans le présent document, le mot "linéarité" est utilisé uniquement pour la dépendance du courant de court-circuit (I_{SC}) sur l'éclairement (G), tandis que toutes les autres dépendances sont appelées "dépendance linéaire générique", quand elles ne sont pas décrites de manière explicite.

Trois modifications techniques de premier ordre ont été incluses dans cette troisième édition par rapport à l'édition précédente.

La première modification majeure est la distinction entre l'analyse des données relative à la linéarité et l'analyse des données relative à une dépendance linéaire générique (par exemple, $V_{OC}(T)$, qui donne la tension en circuit ouvert en fonction de la température). Cette dernière conserve une approche identique à celle incluse dans l'édition précédente, à savoir la méthode des moindres carrés et recommande en plus d'appliquer les incertitudes de mesure dans l'analyse des données. L'ancienne version applique la fonction de proportionnalité qui décrit la dépendance entre I_{SC} et G pour un dispositif PV linéaire idéal. Elle applique également la valeur d'étalonnage de I_{SC} pour établir un point de référence vers lequel la non-linéarité se réfère explicitement. En outre, l'impact des spectres d'essai et de la désadaptation spectrale (SMM – *spectral mismatch*) à la fois sur la linéarité et sur la dépendance linéaire générique est désormais pris en considération.

Suivant cette nouvelle approche relative à l'évaluation de la linéarité, la deuxième modification majeure implique une modification de la définition du terme "non-linéarité" (qui se réfère désormais de façon explicite à la valeur d'étalonnage) et l'ajout d'une formule afin de corriger l'éclairement mesuré pour la non-linéarité du dispositif PV utilisé pour mesurer l'éclairement. Ce dispositif PV est généralement un dispositif de référence. Néanmoins, l'IEC 61853-1 envisage explicitement l'utilisation d'un courant de court-circuit du dispositif PV lui-même pour mesurer l'éclairement quand sa linéarité a été prouvée (voir la Note en 8.1 de l'IEC 61853-1:2011). Une correction du mesurage de l'éclairement réel pour expliquer les écarts de I_{SC} de la linéarité est ainsi pertinente quand l'éclairement est mesuré par un dispositif de référence ainsi que par le dispositif en essai lui-même. En principe, ceci peut être étendu à des dispositifs non linéaires, à condition que les informations relatives à la non-linéarité soient indiquées en complément de la valeur d'étalonnage du dispositif PV lui-même. La correction de l'éclairement relative à la non-linéarité est effectuée dans le présent document au moyen d'un facteur de multiplication, selon une approche similaire à l'IEC 60904-7 relative à la correction de la désadaptation spectrale. Cette formule est présentée afin de traiter la référence explicite des autres normes à l'IEC 60904-10 en matière de traitement des dispositifs non linéaires. Toutefois, cette formule peut être utile pour corriger des écarts de linéarité dans les limites d'acceptation, y compris dans le cas de dispositifs de référence classés comme linéaires conformément à l'édition précédente de la présente norme.

La troisième modification majeure est la révision de l'approche avec la méthode à deux lampes, tout d'abord par l'introduction d'une analyse des données spécifique à cette méthode. Celle-ci consistait en un simple essai succès/échec dans la deuxième édition et acquiert désormais le statut de méthode quantitative. Cette modification est cruciale afin que les résultats obtenus avec n'importe quelle procédure de mesure de linéarité admise par la présente norme soient totalement comparables les uns aux autres dans les incertitudes de mesure indiquées. Ainsi, la formule de correction d'éclairement est également applicable aux résultats obtenus avec la méthode à deux lampes. Avec ces ajouts, la méthode à deux lampes devient la méthode quantitative la plus simple pour évaluer la linéarité (c'est-à-dire la dépendance du courant de

court-circuit I_{SC} sur l'éclairement) des dispositifs PV. Cette méthode n'exige pas de dispositif de référence lorsque les dispositifs en essai sont des cellules photovoltaïques uniques. Une version étendue appelée méthode à N lampe, qui contourne certaines limites de la méthode à deux lampes, a été incluse.

Une modification d'ordre secondaire apportée afin de mieux localiser la procédure nécessaire dans le document consiste en la distinction entre les cas d'éclairement et de température en tant que paramètres d'essai, c'est-à-dire les paramètres soumis à modification et à partir desquels la dépendance est vérifiée.

En outre, lorsque la dépendance linéaire d'un paramètre du dispositif (par exemple, I_{SC}) doit être évaluée vers davantage qu'un paramètre d'essai unique, des étapes intermédiaires qui appliquent les procédures décrites par la présente norme peuvent être suivies si le dispositif en essai est stable, conformément au critère présenté dans l'IEC 61215-1 et sa partie applicable. Par exemple, le mesurage de la matrice de puissance tel que cela est défini par l'IEC 61853-1 exige le mesurage de la puissance maximale en fonction de l'éclairement et de la température. Dans ce cas, la façon la plus pratique d'effectuer le mesurage de la matrice de puissance est généralement de modifier un paramètre (par exemple, la température) tout en conservant l'autre stable (par exemple, l'éclairement), puis de répéter cette procédure à différents niveaux du second paramètre jusqu'à ce que la matrice complète soit achevée. Dans ce but, le second paramètre est considéré comme le paramètre fixe et le premier est le paramètre d'essai vers lequel la dépendance linéaire est évaluée conformément à la présente norme. Néanmoins, dès lors que la matrice de puissance a été complètement mesurée, l'analyse ultérieure des données de puissance maximale (ainsi que de tout autre paramètre électrique pertinent) du dispositif en essai peut être effectuée en considérant l'un ou l'autre des paramètres comme paramètre de l'essai tant que l'autre reste constant. C'est pourquoi une dépendance linéaire peut être évaluée par rapport à l'un ou l'autre paramètre, indépendamment de la procédure de mesure utilisée pour obtenir les données.

IECNORM.COM : Click to view the full text of IEC 60904-10:2020

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60904 décrit les procédures utilisées pour mesurer la dépendance de tout paramètre électrique (Y) d'un dispositif photovoltaïque (PV) par rapport à un paramètre d'essai (X) et pour déterminer le degré de proximité de la dépendance par rapport à une fonction linéaire idéale (ligne droite). Elle fournit également des recommandations relatives à la prise en considération des écarts par rapport à la dépendance linéaire idéale et, de façon générale, sur le traitement des non-linéarités des paramètres électriques d'un dispositif PV. Les paramètres types d'un dispositif sont le courant de court-circuit I_{SC} , la tension en circuit ouvert V_{OC} et la puissance maximale P_{max} . Les paramètres d'essai types sont la température T et l'éclairement G . Néanmoins, les mêmes principes décrits dans le présent document peuvent être appliqués à tout autre paramètre d'essai avec un ajustement approprié de la procédure utilisée pour modifier le paramètre lui-même.

L'évaluation de la performance des modules et des systèmes photovoltaïques ainsi que la transposition des performances d'un ensemble de conditions de température et d'éclairement à un autre, reposent souvent sur l'application d'équations linéaires (voir par exemple l'IEC 60891, l'IEC 61853-1, l'IEC 61829 et l'IEC 61724-1). Le présent document établit les exigences relatives aux méthodes d'essai de la dépendance linéaire, à l'analyse des données et aux limites d'acceptation afin d'assurer que ces équations linéaires produisent des résultats concluants. Ces exigences indiquent également la plage de températures et d'éclairement sur laquelle les équations linéaires peuvent être appliquées. Le présent document présente également une procédure qui indique comment corriger les écarts de courant de court-circuit I_{SC} par rapport à la dépendance linéaire idéale de l'éclairement (linéarité) pour les dispositifs PV, sans se soucier qu'ils soient classés comme linéaires ou non linéaires conformément aux limites énoncées en 9.7. L'impact de la distribution spectrale de l'éclairement et de la désadaptation spectrale est pris en considération pour les mesurages qui utilisent aussi bien les simulateurs solaires que l'éclairage solaire naturel.

Les méthodes de mesure décrites ici s'appliquent à tous les dispositifs PV, à utiliser avec prudence pour des dispositifs PV multijonctions et sont destinées à être appliquées à un dispositif ou, dans certains cas, à un dispositif équivalent de technologie identique, qui est stable conformément aux critères énoncés dans la partie applicable de l'IEC 61215. Ces mesurages sont destinés à être effectués avant tout mesurage et toute procédure de correction qui exige un dispositif linéaire ou qui prescrit des restrictions pour les dispositifs non linéaires.

La principale méthodologie utilisée dans le présent document repose sur une procédure d'ajustement dans laquelle une fonction linéaire (ligne droite) est adaptée à un ensemble de points de données mesurés $\{X_i, Y_i\}$. La fonction linéaire utilise un sous-programme de calcul des moindres carrés qui, dans l'analyse la plus avancée, est également comptabilisé dans l'incertitude combinée étendue ($k=2$) des mesurages. La fonction linéaire croise l'origine dans le cas de données de courant de court-circuit en fonction de l'éclairement. L'écart des données mesurées par rapport à la fonction linéaire idéale est également calculé et des limites relatives à l'écart de pourcentage admissible sont prescrites.

Des procédures pour déterminer l'écart de la dépendance $Y(X)$ par rapport à la fonction linéaire (ligne droite) sont décrites dans l'Article 6 (mesurages sous éclairage solaire naturel et avec simulateur solaire), l'Article 7 (mesurages de la sensibilité spectrale différentielle) et l'Article 8 (mesurages au moyen des méthodes à deux lampes et à N lampes). Des analyses des données destinées à déterminer les écarts par rapport à la fonction linéaire sont données dans l'Article 9.

Un dispositif est considéré comme linéaire pour la dépendance mesurée spécifique $Y(X)$ lorsqu'il satisfait aux exigences de 9.7.

2 Références normatives

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

IEC 60891, *Dispositifs photovoltaïques – Procédures pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer aux caractéristiques I-V mesurées*

IEC 60904-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 1: Mesurage des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques*

IEC 60904-1-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 1-1: Mesurage des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions*

IEC TS 60904-1-2, *Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices* (disponible en anglais seulement)

IEC 60904-2, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 2: Exigences applicables aux dispositifs photovoltaïques de référence*

IEC 60904-3, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 3: Principes de mesure des dispositifs solaires photovoltaïques (PV) à usage terrestre incluant les données de l'éclairement énergétique spectral de référence*

IEC 60904-7, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 7: Calcul de la correction de désadaptation des réponses spectrales dans les mesures de dispositifs photovoltaïques*

IEC 60904-8, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)*

IEC 60904-8-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 8-1: Mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions*

IEC 60904-9, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 9: Exigences pour le fonctionnement des simulateurs solaires*

IEC 61215 (toutes les parties), *Modules photovoltaïques (PV) pour applications terrestres – Qualification de la conception et homologation*

IEC 61724-1, *Performances des systèmes photovoltaïques – Partie 1: Surveillance*

IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions and symbols* (disponible en anglais seulement)

ISO TS 28037, *Détermination et utilisation des fonctions d'étalonnage linéaire*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC TS 61836, ainsi que les suivants, s'appliquent.

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

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

3.1

dépendance linéaire

toute dépendance linéaire (ligne droite) générique d'un paramètre de dispositif (PV) sur un paramètre d'essai

EXEMPLE Une dépendance linéaire courante pour les dispositifs PV est celle entre la tension de circuit ouvert et la température du dispositif PV.

Note 1 à l'article: Ce terme comprend toutes les dépendances linéaires possibles fondées sur une ligne droite. La linéarité définie dans le point suivant ne constitue qu'un cas spécifique parmi d'autres.

3.2

linéarité

la dépendance linéaire qui décrit la proportionnalité pure du courant de court-circuit du dispositif PV par rapport à son éclairement

Note 1 à l'article: Le concept de linéarité en physique, également applicable aux dispositifs PV, implique une proportionnalité pure entre les deux variables concernées.

Note 2 à l'article: L'une des sources majeures de non-linéarité observée de cellules PV solaires est due à la résistance série qui peut provoquer la non-linéarité du courant de court-circuit mesuré en tant que rendement de la cellule solaire, même lorsque le photocourant est linéaire. Toutes les méthodes incluses dans le présent document traitent de la non-linéarité du courant de court-circuit, non du photocourant.

3.3

jonction à limitation

jonction d'un dispositif photovoltaïque multijonction dans laquelle le photocourant le plus faible est généré dans des conditions d'éclairage données

[SOURCE: IEC 60904-1-1:2017, 3.1, modifié – "courant photovoltaïque" a été remplacé par "photocourant".]

4 Sélection du dispositif

La procédure de mesure doit être appliquée, si cela est possible, à un dispositif grandeur nature. En cas d'impossibilité, un échantillon de petit format dont la construction et les matériaux sont équivalents au dispositif grandeur nature et dont la linéarité est soumise à l'essai doit être utilisé. Il convient que le dispositif grandeur nature et le dispositif équivalent soient stables conformément à la partie applicable de l'IEC 61215. Toutefois, un échantillon équivalent ne doit pas être utilisé pour mesurer la linéarité d'un dispositif de référence (tel que cela est défini par l'IEC 60904-2).

Un échantillon de petit format est estimé comme équivalent à un dispositif PV en essai (DUT – *device under test*) grandeur nature lorsque ses propriétés physiques relatives à la dépendance linéaire à mesurer sont similaires à celles du dispositif PV grandeur nature. Cette exigence s'applique à la dépendance en fonction de l'éclairement ainsi qu'à la dépendance en fonction de la température. Il convient également que la configuration des connexions électriques soit bien représentée.

En particulier, lorsque l'éclairement est le paramètre d'essai, les propriétés optiques pertinentes du dispositif petit format (emballage compris) doivent être similaires à celles du dispositif représenté. Cette exigence comprend par exemple l'utilisation du même type de verre avant (y compris la texture et l'indice de réfraction) et du même angle d'ouverture que ceux utilisés dans le dispositif grandeur nature.

Dans le cas de dispositifs actifs des deux côtés (dispositifs photovoltaïques bifaces, qui doivent se conformer à l'IEC TS 60904-1-2), l'exigence ci-dessus s'applique à la fois au côté avant et au côté arrière du dispositif.

Lorsqu'un modèle d'échantillon petit format équivalent au dispositif grandeur nature ne peut pas être obtenu, le rapport des résultats de mesure doit indiquer les limites de leur validité.

5 Équipement

5.1 Exigences générales communes à toutes les procédures

Les exigences et recommandations suivantes sont valables pour toutes les dépendances linéaires et pour toutes les procédures de mesure, sauf spécification contraire explicite. Les exigences et recommandations spécifiques aux équipements utilisés pour chaque type de mesurage sont indiquées dans les paragraphes suivants.

Il convient que les sources de lumière caractérisées par des crêtes intenses sur un continuum large, à l'instar des sources xénon ou des lampes à diodes électroluminescentes (LED – *light emitting diode*) soient évaluées avec soin avant utilisation. En effet, pour certains dispositifs et/ou technologies photovoltaïques, la sensibilité spectrale peut varier avec la température ainsi qu'avec le niveau d'éclairement. Elle peut donc passer par différentes lignes d'émission du spectre de la lampe lorsque la température ou l'éclairement varie. Lorsque cela se produit, cela peut entraîner des modifications de performance qui sont principalement liées à un changement dans l'interaction entre la région de la bande interdite de la sensibilité spectrale et l'éclairement spectral réel dans la même plage de longueurs d'onde. Si cette possibilité n'est pas correctement évaluée dans chaque cas spécifique, de telles variations peuvent être interprétées à tort comme des écarts par rapport à la dépendance linéaire alors qu'elles ne le sont pas. Néanmoins, sur la base de la sensibilité spectrale du DUT mesurée en fonction de la température ou de l'éclairement (selon ce qui s'applique) et sur l'éclairement spectral mesuré, la magnitude de cet effet peut être calculée en effectuant un calcul de la SMM conformément à l'IEC 60904-7 en fonction de la température ou de l'éclairement (selon ce qui s'applique). Des recommandations relatives à la manière de procéder sont données dans la Bibliographie. Le calcul de la SMM peut alors être appliqué en tant que correction de la SMM pour chaque mesurage à toutes les températures différentes de 25 °C ou à des niveaux d'éclairement autres que 1 000 W/m² (selon ce qui s'applique). Si la modification de la SMM est inférieure ou égale à 1 % sur la totalité de la plage de températures ou à ±0,5 % pour les éclairements, elle peut alternativement être incluse en tant que composant de l'incertitude de la SMM dans le calcul d'incertitude de mesure.

EXEMPLE La largeur de bande du silicium cristallin est connue pour varier en raison des changements de température.

Lorsque le paramètre d'essai est l'éclairement, l'équipement et la procédure utilisés pour modifier l'éclairement doivent être vérifiés au moyen d'un spectroradiomètre. Ceci s'applique à toutes les procédures de mesure autres que les méthodes à deux lampes et à N lampes appliquées aux cellules uniques et autres que le mesurage de linéarité au moyen de la sensibilité spectrale différentielle. Un radiomètre est admis comme alternative au spectroradiomètre uniquement si les deux conditions suivantes sont réunies:

- a) le spectre du dispositif de référence est adapté au DUT, et
- b) l'installation pour mesurer la linéarité consiste en un simulateur solaire utilisé uniquement avec des éléments de filtrage neutres par rapport au spectre de la lumière.

Afin de réduire la modification de la charge thermique dans tous les mesurages où l'éclairement est le paramètre d'essai, et ainsi améliorer la stabilisation en température du DUT lors de la séquence de mesure complète, il peut être utile de réduire la partie infrarouge de la lumière dont l'énergie est inférieure à la largeur de bande interdite du DUT en interposant des filtres appropriés entre le faisceau lumineux et le plan d'essai.

NOTE Des mailles ou des filtres de source de lumière sont considérés comme étant les méthodes les plus appropriées pour modifier l'éclairement sur de grandes surfaces.

Dans le cas de mesurages de linéarité de cellules photovoltaïques uniques au moyen des méthodes à deux lampes ou à N lampes, la variation de l'éclairement spectral et la non-uniformité spatiale des sources de lumière ne sont pas cruciales et en tant que tel, aucune restriction n'est formulée en ce qui les concerne. En lieu et place, quand les dispositifs PV sont constitués de cellules montées en séries, il convient que les sources de lumière utilisées dans les méthodes à deux lampes et à N lampes soient conformes à la classe BBA ou mieux, conformément à l'IEC 60904-9 sur la zone couverte par le DUT. À la fois pour les dispositifs PV à cellules uniques et pour ceux connectés en séries, l'instabilité à court terme de la lumière (STI, définie dans l'IEC 60904-9) doit être inférieure à 0,5 % pendant la période nécessaire pour mesurer chacun des triplets de signaux exigés (voir 8.1). Si cela n'est pas réalisable, un dispositif de contrôle photoactif (par exemple, une photodiode) doit être utilisé pour contrôler individuellement chaque source de lumière. Son relevé doit alors être utilisé pour corriger le signal du courant de court-circuit du DUT relatif à l'instabilité temporelle de la lumière. Quoi qu'il en soit, la variation de l'éclairement non corrigée doit être incluse dans le calcul de l'incertitude de mesure.

Sous des conditions spécifiques et pour toutes les procédures de mesure concernées, la modification de la distribution spectrale de l'éclairement relatif peut être considérée comme une contribution d'incertitude par rapport à l'incertitude de mesure globale, au lieu d'être systématiquement corrigée. La condition à remplir est que la modification de la distribution spectrale de l'éclairement relatif ne doit pas résulter par en une modification supérieure à $\pm 0,5$ % de la désadaptation spectrale (SMM) du courant de court-circuit du DUT (se référer à l'IEC 60904-7 pour le calcul de la SMM). Il convient que toute modification de l'uniformité spatiale de l'éclairement sur le plan d'essai (IEC 60904-9) causée par la variation du niveau d'éclairement n'entraîne pas de modification supérieure à $\pm 0,5$ % du courant de court-circuit du DUT.

Si le DUT est un dispositif multijonction, il convient que la variation spatiale de l'éclairement spectral sur le plan d'essai soit soigneusement prise en considération lors de la modification du niveau d'éclairement. En particulier, elle ne doit pas provoquer de modification de la jonction à limitation par rapport à celle qui limite dans le spectre de référence applicable défini par l'IEC 60904-3. En outre, une prise en considération de la désadaptation spectrale appropriée pour chaque niveau d'éclairement doit être effectuée avant de calculer la linéarité du dispositif multijonction, comme cela est exigé dans l'Article 7 de l'IEC 60904-1-1:2017.

Lorsque le paramètre d'essai est la température, l'uniformité de la température du DUT doit être prise en considération dans le calcul d'incertitude du mesurage.

Généralement, un calcul d'incertitude doit toujours être effectué en prenant explicitement en considération l'installation spécifique utilisée et le mesurage effectué (voir 9.2 pour plus d'informations).

5.2 Équipement de mesure de toutes les dépendances linéaires sous éclairage solaire naturel ou avec un simulateur solaire

L'équipement suivant doit être utilisé pour toute dépendance linéaire. Si aucune spécification n'est explicitement donnée, l'élément répertorié doit être considéré comme cela est exigé pour tout paramètre d'essai.

- a) Équipement nécessaire pour mesurer les courbes $I-V$ du DUT sous lumière solaire naturelle ou simulée, comme cela est répertorié dans l'IEC 60904-1 ou sa partie applicable. L'équipement peut être limité à l'équipement nécessaire au mesurage du courant de court-circuit (I_{SC}) dans le cas où les mesurages de dépendance linéaire (par rapport à l'éclairement ou à la température) sont ceux des cellules de référence.
- b) Moyens de contrôle actif de la température du dispositif à l'essai et du dispositif de référence. Sinon, moyens de limiter l'exposition à la lumière avec une source de lumière à

impulsion de longue durée ou un dispositif d'occultation amovible en cas de mesurages sous la lumière solaire naturelle ou avec un simulateur solaire stable.

- c) Si le paramètre d'essai est l'éclairement (voir 6.4), l'équipement nécessaire pour le modifier sur la plage concernée sans affecter la distribution d'éclairement spectral relative et l'uniformité spatiale.
- d) Si le paramètre d'essai est la température (voir 6.5), l'équipement ou les moyens nécessaires pour modifier la température du DUT sur la plage concernée.

5.3 Équipement de mesure de toutes les dépendances linéaires du courant de court-circuit au moyen des mesurages de la sensibilité spectrale différentielle

- a) Équipement destiné à mesurer la sensibilité spectrale différentielle du DUT conformément à l'IEC 60904-8 (pour les dispositifs à jonction unique) ou à l'IEC 60904-8-1 (pour les dispositifs multijonctions) jusqu'à une répétabilité inférieure ou égale à $\pm 0,5$ % du relevé.
- b) Si le paramètre d'essai est la température, l'équipement nécessaire pour modifier la température du DUT sur la plage concernée.

5.4 Équipement de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à l'aide de la méthode à deux lampes

Aucun dispositif de référence n'est exigé. L'équipement suivant est exigé:

- a) Deux sources de lumière A et B qui peuvent être contrôlées individuellement, avec un éclairement dans le plan total réalisable avec les sources associées A+B au moins aussi élevées que la limite supérieure de la plage concernée. Les sources de lumière A et B peuvent être deux lampes individuelles, deux groupes de lampes ou une seule lampe équipée d'un masquage approprié à l'avant pour simuler une installation à lampes doubles (voir les exemples présentés dans la Bibliographie). Pour faciliter l'obtention du niveau d'éclairement de départ, il est recommandé que la distribution spectrale des sources de lumière s'étende sur une plage de longueurs d'onde suffisamment large pour couvrir au moins les deux tiers de la plage de longueurs d'onde où la sensibilité spectrale du DUT est plus intense. De plus, il convient d'évaluer l'influence de la partie infrarouge de la distribution spectrale en fonction de son influence sur la température du dispositif à maintenir selon le point c) du 5.4.

NOTE 1 Afin de réduire la modification de la charge thermique, et ainsi améliorer la stabilisation en température du DUT lors de la séquence de mesure complète, il peut être utile de réduire la partie infrarouge de la lumière dont l'énergie est inférieure à la largeur de bande interdite du DUT en interposant des filtres appropriés entre le faisceau lumineux et le plan d'essai.

- b) Équipement nécessaire pour mesurer le courant de court-circuit du DUT avec une répétabilité du relevé de $\pm 0,1$ % ou mieux.
- c) Équipement pour contrôler la température du DUT, si cela est nécessaire, pour le maintenir à ± 1 °C de la température cible.

NOTE 2 L'utilisation d'un dispositif de référence lors du mesurage de linéarité n'est pas nécessaire pour la méthode à deux lampes bien que celui-ci puisse être utile pour vérifier immédiatement que la plage d'éclairement concernée est totalement couverte. Si un dispositif de référence n'est pas utilisé, une approche itérative peut être suivie afin d'étendre la plage d'éclairement à la plage concernée.

5.5 Équipement de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à l'aide de la méthode à N lampes

L'équipement est le même que pour la méthode à deux lampes, à la différence que plus de deux sources de lumière (1, ..., N) sont exigées. Les sources de lumière individuelles doivent produire quasiment le même courant de court-circuit dans le dispositif en essai.

6 Procédures destinées à mesurer la linéarité et d'autres dépendances linéaires sous éclairage solaire naturel ou avec un simulateur solaire

6.1 Exigences générales supplémentaires relatives à l'éclairage solaire naturel

Les mesurages sous éclairage solaire naturel doivent être effectués uniquement si les conditions suivantes sont satisfaites, en plus des conditions générales énoncées en 5.1:

- L'éclairement total dans le plan est au moins aussi élevé que la limite supérieure G_0 de la plage concernée.
- La variation d'éclairement due aux oscillations à court terme (par exemple, nuages, brume ou fumée) est inférieure à $\pm 2\%$ de l'éclairement total dans le plan mesuré par le dispositif de référence. Ces variations doivent être corrigées en utilisant le relevé du dispositif de référence.
- La vitesse du vent est inférieure à 2 m/s.

6.2 Montage sous éclairage solaire naturel

6.2.1 Installer le dispositif de référence dans le même plan que le DUT à 2° de telle sorte que tous les deux soient perpendiculaires au faisceau solaire direct à $\pm 5^\circ$. Les raccorder aux instruments nécessaires. Il convient d'effectuer les mesurages décrits dans les paragraphes suivants aussi rapidement que possible en quelques heures le même jour pour réduire le plus possible les effets des changements des conditions spectrales. Un calcul de la SMM conformément à l'IEC 60904-7 est exigé si le spectre du dispositif de référence n'est pas adapté au DUT ou quand le paramètre d'essai est la température.

6.2.2 Si le DUT et le dispositif de référence sont équipés de dispositifs de régulation thermique, régler les dispositifs de réglage au niveau désiré. Si les dispositifs de régulation thermique ne sont pas utilisés et que le DUT est abrité du soleil, laisser le DUT se stabiliser à $\pm 1^\circ\text{C}$ de la température cible avant de commencer les mesurages. Pour amener le DUT à une température proche de la valeur cible, un refroidissement préalable ou un préchauffage du dispositif est permis tant que l'opération d'occultation/exposition à la lumière solaire permet de stabiliser la température dans les limites. Il convient que le dispositif de référence se stabilise également à $\pm 1^\circ\text{C}$ de sa température d'équilibre avant de procéder au mesurage. Tant pour le DUT que pour le dispositif de référence, la stabilisation de la température est considérée comme atteinte lorsque, pour chaque dispositif, au moins trois mesurages de température consécutifs sont effectués en 90 s au moins et que toutes les valeurs mesurées restent dans la plage de températures exigée.

6.3 Montage avec un simulateur solaire

6.3.1 Monter le dispositif de référence dans le même plan que le DUT à 2° sur le plan d'essai du simulateur solaire de telle sorte que tous les deux soient perpendiculaires à la ligne centrale du faisceau à $\pm 5^\circ$. Les raccorder aux instruments nécessaires.

6.3.2 Si le DUT et le dispositif de référence sont équipés de dispositifs de régulation thermique, régler les dispositifs de réglage au niveau désiré. Si les dispositifs de régulation thermique ne sont pas utilisés, laisser le DUT et le dispositif de référence se stabiliser à $\pm 1^\circ\text{C}$ de leur température d'équilibre, même si cela revient à modifier la température ambiante, si cela est possible et nécessaire. Dans le cas de simulateurs solaires stables, un dispositif d'occultation amovible peut être utilisé, comme avec l'éclairage solaire naturel, afin de contrôler la température du DUT et du dispositif de référence. Tant pour le DUT que pour le dispositif de référence, la stabilisation de la température est considérée comme atteinte lorsque, pour chaque dispositif, au moins trois mesurages de température consécutifs sont effectués en 90 s au moins et que toutes les valeurs mesurées restent dans la plage de températures exigée.

6.3.3 Régler l'éclairement au plan d'essai sur la limite supérieure G_0 de la plage concernée en utilisant le courant de court-circuit mesuré (I_{RC}) du dispositif de référence et sa valeur

d'étalonnage ($I_{RC,STC}$) dans les conditions normales d'essai (STC - *standard test conditions*) (voir la Formule (1)).

6.4 Mesurages de la dépendance linéaire en fonction de l'éclairement

6.4.1 L'éclairement initial G_0 doit être calculé par rapport au courant de court-circuit mesuré (I_{RC}) du dispositif de référence et à sa valeur d'étalonnage ($I_{RC,STC}$) dans les conditions normales d'essai. Il convient d'appliquer une correction conformément à la Formule (1) afin de tenir compte de la température mesurée du dispositif de référence ($T_{m,RC}$) en utilisant le coefficient de température relative (α_{RC}) du courant de court-circuit du dispositif de référence.

$$G_0 = \frac{1\,000}{I_{RC,STC}} \times \frac{I_{RC}}{[1 + \alpha_{RC}(T_{m,RC} - 25)]} \times \frac{1}{R_{0,norm}} \quad (1)$$

où

- $R_{0,norm}$ est le facteur de linéarité déterminé conformément au présent document et représente la non-linéarité du dispositif de référence pour un éclairement G_0 ;
- 1 000 est la valeur de l'éclairement total dans les conditions normales d'essai, exprimée en W/m^2 ;
- 25 est la valeur de la température de jonction dans les conditions normales d'essai, donnée en °C.

NOTE Par définition, $R_{0,norm}$ est égal à 1 pour l'éclairement auquel le dispositif PV est étalonné.

6.4.2 Réduire l'éclairement sur le DUT à une valeur G_i sans affecter l'uniformité spatiale et la distribution spectrale de l'éclairement (comme cela est exigé en 5.1). L'éclairement du DUT peut être réduit au moyen de l'une des méthodes suivantes, qui se substituent l'une à l'autre. Si aucun équipement n'est explicitement mentionné, la méthode peut aussi bien être appliquée sous un éclairage solaire naturel qu'avec des simulateurs solaires:

- a) En utilisant des filtres à mailles de densité uniforme étalonnés ou des filtres à densité neutre dont la taille est appropriée pour couvrir le DUT complet. Si cette méthode est choisie, le dispositif de référence ne doit pas être recouvert par le filtre pour permettre de mesurer l'éclairement incident sans filtre. Il convient qu'aucune lumière non filtrée n'atteigne le DUT.

NOTE 1 Si l'étalonnage des mailles ou des filtres est estimé comme étant affecté par des conditions de mesure spécifiques, les mailles et les filtres peuvent être traités comme étant non étalonnés et la méthode pertinente décrite dans l'élément suivant peut être suivie.

- b) En utilisant des filtres à mailles de densité uniforme non étalonnés ou des filtres à densité neutre dont la taille est appropriée pour couvrir en totalité le DUT et le dispositif de référence, au moins individuellement. En outre, au cas où l'élément de filtrage ne peut pas recouvrir les deux dispositifs simultanément, les conditions suivantes doivent être satisfaites:
- 1) le dispositif de référence doit être placé sur le plan d'essai à proximité du dispositif en essai afin de procéder à des mesurages sous éclairage solaire naturel et, à la même position, à des mesurages avec simulateurs solaires;
 - 2) pour les mesurages sous éclairage solaire naturel, cette méthode est admise uniquement si les variations d'éclairement à court terme sont inférieures à 1 % de l'éclairement dans le plan total mesuré par le dispositif de référence;
 - 3) pour les simulateurs solaires, cette méthode est admise uniquement lorsque le simulateur solaire appartient au moins à la classe A relative à la stabilité temporelle conformément à l'IEC 60904-9;
 - 4) le niveau d'éclairement doit être mesuré par le dispositif de référence et le dispositif en essai, l'un après l'autre, avec l'élément de filtrage monté en alternance sur l'un ou l'autre des dispositifs.

Il convient qu'aucune lumière non filtrée n'atteigne ni le DUT, ni le dispositif de référence pendant la période où leur puissance est mesurée.

Pour les deux méthodes présentées en 6.4.2 a) et b), il convient que le diamètre d'ouverture maximal des filtres à mailles soit inférieur à 1 % de la dimension linéaire minimale du dispositif de référence et du DUT; sinon une erreur de variable peut se produire en raison du positionnement. En outre, pour les mesurages sur simulateurs solaires, il convient que le diamètre des mailles soit bien plus grand que l'épaisseur afin de limiter de possibles modifications de l'éclairement spectral.

Si l'une des méthodes énoncées ci-dessus qui utilisent des filtres à densité neutre est choisie et que les filtres doivent être montés sur un support qui limite l'angle d'ouverture avant du dispositif en essai, il convient que le même support soit utilisé avec le dispositif PV, si celui-ci est utilisé ultérieurement comme dispositif de référence pour le mesurage de l'éclairement.

NOTE 2 La variation d'admittance des filtres optiques à densité neutre peut normalement atteindre 10 % sur la région de longueurs d'onde spécifiée et peut même être plus importante en dehors de cette région.

- c) Avec les simulateurs solaires équipés de filtres de densité uniforme dans le ou les boîtiers de lampes (parfois appelés masques), par l'utilisation de ces filtres. Si cette méthode est choisie, le dispositif de référence doit recevoir un éclairement filtré identique à celui du DUT.
- d) Avec les simulateurs solaires, en augmentant la distance entre le plan d'essai et la source de lumière pendant que le dispositif de référence est maintenu dans le même plan que le DUT.

NOTE 3 Cette méthode est considérée comme pratique pour une plage d'éclairement limitée uniquement, étant donné qu'une variation d'éclairement de 1 100 W/m² à 100 W/m² (comme cela est exigé par l'IEC 61853-1) implique de déplacer le plan d'essai à une distance de la source de lumière approximativement égale à trois fois la distance d'origine. C'est normalement au-delà de 20 m sur des simulateurs solaires à grande superficie pour des mesurages de modules et de l'ordre de 30 cm ou plus pour des simulateurs solaires pour cellules. Néanmoins, en conditions réelles, cette méthode peut être adaptée pour soumettre à l'essai la linéarité du dispositif PV dans la plage d'éclairement admise par l'IEC 60904-1 pour les mesurages de courbe *I-V* à corriger dans les conditions normales d'utilisation conformément à l'IEC 60891.

- e) Par l'utilisation d'une ou plusieurs lentilles optiques. Un soin particulier doit être pris pour assurer que l'élément optique supplémentaire ne modifie pas de façon importante l'éclairement spectral relatif dans la plage de longueurs d'onde dans laquelle le DUT et le dispositif de référence sont réactifs (comme cela est exigé en 5.1). De plus, il convient que l'introduction d'un élément optique supplémentaire ne modifie pas de façon importante l'uniformité spatiale de l'éclairement; cette dernière est considérée comme étant d'une importance mineure quand le dispositif de référence et le DUT sont mesurés consécutivement suivant la même position et sont des dispositifs PV équivalents au sens de l'Article 4.
- f) Dans le cas de simulateurs solaires avec des sources multiples de lumière équivalente qui peuvent être bloquées indépendamment, en modifiant le nombre de sources qui éclairent le plan d'essai. Un soin particulier doit être pris pour prévenir toute modification importante de l'éclairement spectral et de l'uniformité spatiale aux différents niveaux d'éclairement (comme cela est exigé en 5.1).
- g) Avec les simulateurs solaires, en ajustant l'intensité de la ou des sources de lumière si cela est conforme aux exigences générales énoncées en 5.1. Un soin particulier doit être pris pour prévenir toute modification importante de l'éclairement spectral et de l'uniformité spatiale aux différents niveaux d'éclairement.

6.4.3 Calculer le niveau d'éclairement G_i sur le dispositif en essai comme suit:

6.4.3.1 Pour la méthode 6.4.2 a), où le dispositif de référence n'est pas utilisé pour mesurer le niveau d'éclairement G_i :

$$G_i = k_i \times G_0 \quad (2)$$

où G_0 est calculé avec la Formule (1) et k_i est le paramètre d'étalonnage de l'élément de filtrage (c'est-à-dire la fraction de lumière transmise).

6.4.3.2 Pour les méthodes 6.4.2 b) à 6.4.2 g), où le dispositif de référence est utilisé pour mesurer le niveau d'éclairement G_i :

$$G_i = \frac{I_{RC,i}}{I_{RC,STC}} \times \frac{1}{[1 + \alpha_{RC,i}(T_{m,RC,i} - 25)] \times R_{i,norm}} \times 1\,000 \quad (3)$$

où:

- $I_{RC,i}$ est le courant de court-circuit mesuré du dispositif de référence sous éclairement G_i ;
- $I_{RC,STC}$ est la valeur d'étalonnage du courant de court-circuit du dispositif de référence dans les conditions normales d'essai;
- $\alpha_{RC,i}$ est le coefficient de température relative du courant de court-circuit du dispositif de référence à un éclairement G_i , donné en $\%/^{\circ}\text{C}$;
- $T_{m,RC,i}$ est la température du dispositif de référence pendant le mesurage à un éclairement G_i ;
- 1 000 est la valeur de l'éclairement total dans les conditions normales d'essai, exprimée en W/m^2 ;
- 25 est la valeur de la température de jonction dans les conditions normales d'essai, donnée en $^{\circ}\text{C}$;
- $R_{i,norm}$ est le facteur de linéarité qui représente la non-linéarité du dispositif de référence à un éclairement G_i , calculé conformément au présent document.

6.4.4 Assurer que la température du DUT et du dispositif de référence soit stable à $\pm 1^{\circ}\text{C}$ et que l'éclairement total mesuré par le dispositif de référence reste constant à $\pm 2\%$ (ou, si applicable, à la limite inférieure donnée en 6.4.2 b)) pendant les périodes d'enregistrement des données.

6.4.5 Pour chaque niveau d'éclairement (y compris G_0), enlever le dispositif d'occultation (le cas échéant) et procéder immédiatement aux relevés simultanés de tous les éléments suivants:

- la température $T_{m,RC}$ et le courant de court-circuit I_{RC} du dispositif de référence pour calculer l'éclairement X_i (égal à G_i) conformément à la Formule (3),
- le paramètre de performance électrique Y_i et la température $T_{m,DUT}$ du DUT.

NOTE 1 Le paramètre Y_i est habituellement le courant de court-circuit (I_{SC}) lorsque X_i est l'éclairement (G_i); c'est la tension de circuit ouvert (V_{OC}) du DUT lorsque la dépendance linéaire est évaluée en relation avec le logarithme naturel de l'éclairement ($\ln(G)$).

NOTE 2 Les coefficients de température du courant de court-circuit (α), de la tension de circuit ouvert (β) et de la puissance maximale (δ) peuvent présenter une dépendance par rapport à l'éclairement. Si cela se produit, l'écart des fonctions $\alpha(G)$, $\beta(G)$ et $\delta(G)$ par rapport à une fonction linéaire (ligne droite) idéale peut être déterminé conformément aux procédures décrites dans le présent document. Dans un tel cas, les coefficients de température peuvent être mesurés à différents niveaux d'éclairement et l'analyse des données décrite en 9.3 peut leur être appliquée avec X_i égal à G_i et Y_i égal au coefficient de température spécifique pour différents éclairements.

6.4.6 Répéter les étapes 6.4.2 à 6.4.5 afin de couvrir la totalité de la plage d'éclairement concernée. L'acquisition des données doit être effectuée à une périodicité qui divise la totalité de la plage d'éclairement concernée au moins en six intervalles séparés par des espacements aussi réguliers que possible. Si des corrections des courbes $I-V$ selon des conditions cibles autres que l'éclairement total dans le plan sont nécessaires (par exemple, pour la température),

elles doivent être effectuées conformément à l'IEC 60891 avec calcul de la SMM conformément à l'IEC 60904-7.

6.5 Mesurages de la dépendance linéaire en fonction de la température

6.5.1 Modifier la température du dispositif en essai à l'aide de l'une des méthodes suivantes; si aucun équipement n'est explicitement mentionné, la méthode peut être appliquée aussi bien sous éclairage solaire naturel qu'avec tout type de simulateur:

- a) utiliser un régulateur thermique pour régler la température du DUT sur la valeur désirée;
- b) sous éclairage solaire naturel ou avec des simulateurs solaires stables, exposer le DUT à l'éclairage solaire naturel ou simulé ou l'abriter de cet éclairage afin d'atteindre et de conserver la température désirée;
- c) sous éclairage solaire naturel ou avec des simulateurs solaires stables, laisser le DUT se préchauffer naturellement. Dans ce cas, la procédure d'enregistrement des données indiquée en 6.5.3 est effectuée de manière périodique pendant le préchauffage et la stabilisation à la température cible pour chaque acquisition de données peut être assurée en se conformant simplement à l'exigence donnée en 6.5.2;
- d) pour les simulateurs solaires de lumière pulsée, utiliser tout moyen approprié capable d'atteindre et de conserver la température du DUT à la valeur cible.

6.5.2 Assurer que, pendant chaque période d'acquisition des données, la température du dispositif en essai et du dispositif de référence soit stable à $\pm 1^\circ\text{C}$ et que, sous éclairage solaire naturel, l'éclairement total dans le plan mesuré par le dispositif de référence reste constant à $\pm 2\%$. Si la méthode du préchauffage naturel (voir 6.5.1 c)) est suivie, le refroidissement préalable du dispositif en essai à une température inférieure à la température ambiante est admis afin de couvrir la plage de températures exigée. Les méthodes qui utilisent des étapes de température discontinues ne doivent pas être mélangées à la méthode de préchauffage naturel dans une même séquence de mesures à température variable.

6.5.3 Pour chaque niveau de température, enlever le dispositif d'occultation (le cas échéant) et procéder aux relevés simultanés à la fois de la température X_i et du paramètre de performance électrique Y_i du DUT, et à la fois de la température $T_{m,RC}$ et du courant de court-circuit I_{RC} du dispositif de référence.

6.5.4 Répéter les étapes 6.5.1 à 6.5.3. Les valeurs de température doivent être telles que la plage concernée est répartie sur au moins six incréments approximativement égaux. Une correction de la SMM doit être effectuée conformément à l'IEC 60904-7, même si le spectre du dispositif de référence est adapté au DUT. La modification de la SMM peut être incluse comme contribution dans le calcul d'incertitude de mesure uniquement si elle est inférieure ou égale à 1 % sur la totalité de la plage de températures.

NOTE 1 L'égalisation spectrale d'un dispositif de référence par rapport au dispositif en essai ne garantit pas l'absence de contribution de la SMM à l'incertitude de mesure (voir l'IEC 60904-7), particulièrement dans le cas de mesurages qui dépendent de la température et de technologies PV dont la sensibilité spectrale varie avec la température. Cette dernière produit en effet une SMM qui à son tour varie avec la température. Une correction systématique de cette SMM qui dépend de la température peut être effectuée si la sensibilité spectrale du dispositif en essai est disponible à plusieurs températures dans la plage concernée. Alternativement, une contribution d'incertitude de la SMM peut être incluse, sur la base des ensembles de données statistiquement représentatifs de la sensibilité spectrale du même type de dispositif ainsi que du ou des spectres sous lesquels les mesurages qui dépendent de la température sont effectués.

NOTE 2 Un gradient de température entre le capteur thermique et la jonction du dispositif PV peut exister pour les mesurages qui utilisent des simulateurs solaires stables ainsi que le sous éclairage solaire naturel. Ce gradient peut évoluer avec la température ainsi que sous différents niveaux d'éclairement.

7 Procédures de mesure de la linéarité et autre dépendance linéaire du courant de court-circuit par rapport à la sensibilité spectrale différentielle

7.1 Mesurages de linéarité

7.1.1 Conformément à l'IEC 60904-8 relative aux dispositifs à jonction unique et à l'IEC 60904-8-1 relative aux dispositifs multijonctions, mesurer la sensibilité spectrale différentielle absolue en fonction de l'éclairement de la lumière de polarisation d'au moins six incréments approximativement égaux pour la plage d'éclairement concernée. La sensibilité spectrale différentielle absolue est identifiée par la notation:

$$\tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b))$$

où λ est la longueur d'onde et $I_{SC,bias}(G_b)$ est le courant de court-circuit du DUT généré par l'éclairement de la lumière de polarisation G_b .

7.1.2 Alternativement à 7.1.1, mesurer la sensibilité spectrale différentielle relative $\tilde{s}_{rel}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b))$ et la mettre à l'échelle par rapport à la sensibilité spectrale différentielle absolue à l'aide de la formule suivante:

$$\tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) = F \times \tilde{s}_{rel}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) \quad (4)$$

Le facteur d'échelle F est donné par:

$$F = \frac{1}{G_{CAL}} \int_0^{I_{SC,CAL}} \frac{dI_{SC,bias}}{\tilde{s}_{rel,AMx}(I_{SC,bias}(G_b))} \quad (5)$$

où

$I_{SC,CAL}$ est le courant de court-circuit étalonné du DUT déterminé sous tout éclairement spectral de référence exigé au moyen d'une méthode d'étalonnage qui peut être différente de celle prescrite dans l'IEC 60904-8;

$G_{CAL} = \int_0^\infty E_{AMx}(\lambda) d\lambda$ est l'intégrale de l'éclairement spectral de référence à partir de laquelle le DUT a été étalonné;

la sensibilité spectrale relative à laquelle se réfère l'éclairement spectral de référence AMx est donnée par:

$$\tilde{s}_{rel,AMx}(I_{SC,bias}(G_b)) = \frac{\int_0^\infty \tilde{s}_{rel}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) \times E_{AMx}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{AMx}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

7.1.3 Calculer la réponse différentielle $\tilde{s}_{AMx}(I_{SC,bias}(G_b))$ en pondérant la sensibilité spectrale différentielle absolue $\tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b))$ (donnée en 7.1.1 ou 7.1.2) pour chaque courant de polarisation donné $I_{SC,bias}(G_b)$ avec le spectre de référence AMx, selon la formule suivante:

$$\tilde{s}_{AMx}(I_{SC,bias}(G_b)) = \frac{\int_0^\infty \tilde{s}(\lambda, I_{SC,bias}(G_b)) \times E_{AMx}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{AMx}(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

où AMx est le spectre de référence applicable à prendre en considération.

NOTE Dans le cas où le spectre correspondant est l'un de ceux compilés par l'IEC 60904-3, AMx est égal soit à AM1.5, soit à AM1.5D, selon que l'éclairement spectral est l'éclairement global ou l'éclairement direct tel que cela est défini dans l'IEC 60904-3.

7.1.4 Le courant de court-circuit $I_{SC}(G)$ à un spectre de référence générique AMx et l'éclairement E peuvent alors être dérivés numériquement en résolvant la formule suivante:

$$G = \int_0^{I_{SC}(G)} \frac{dI_{SC,bias}}{s_{AMx}(I_{SC,bias}(G_b))} \quad (8)$$

7.1.5 Il est recommandé d'assurer que la distribution spectrale relative de la lumière de polarisation ne varie pas de manière importante selon le niveau d'éclairement. Pour les dispositifs multijonctions, il convient également que l'équilibre entre les bandes spectrales auxquelles chaque jonction est réactive ne varie pas de façon importante et que l'équilibre spectral identique à celui qui correspond au spectre de référence applicable donné dans l'IEC 60904-3 soit conservé.

7.2 Mesurages de la dépendance linéaire du courant de court-circuit en fonction de la température

7.2.1 Conformément à l'IEC 60904-8 relative aux dispositifs à jonction unique et l'IEC 60904-8-1 relative aux dispositifs multijonctions, mesurer la sensibilité spectrale différentielle en fonction de la température d'au moins trois incréments approximativement égaux pour la plage de températures concernée.

7.2.2 À défaut d'effectuer la procédure complète décrite en 7.1 pour chaque valeur de température, la dépendance linéaire du courant de court-circuit en fonction de la température peut être mesurée en deux étapes successives:

7.2.2.1 Effectuer un mesurage standardisé de la sensibilité spectrale relative $s_{rel,STC}(\lambda)$;

7.2.2.2 Effectuer un mesurage de la sensibilité spectrale différentielle relative $s_{rel}(\lambda, T, I_{SC,bias}(G_b))$ en fonction de la température T et à éclairement constant G_b de la lumière de polarisation. Ce dernier doit être assez intense pour produire un courant de court-circuit $I_{SC,bias}$ au moins égal à 30 % du courant de court-circuit dans les conditions normales d'essai, $I_{SC,STC}$.

7.2.2.3 Répéter les mesurages du point précédent pour au moins trois autres valeurs de température afin que la plage totale de températures concernée soit divisée en au moins trois intervalles approximativement égaux.

7.2.3 En ce qui concerne les mesurages de la dépendance de température, il convient que les sources de lumière de polarisation dont l'émission spectrale est caractérisée par des valeurs de crête intenses, par exemple les sources xénon ou certaines lampes LED, soient évaluées avec soin par rapport aux matériaux photoactifs dont la sensibilité spectrale varie avec la température. En effet, ces sources de lumière sont susceptibles de produire une modification artificielle de l'intensité de la lumière de polarisation perçue par le DUT lorsque la sensibilité spectrale différentielle traverse des bandes étroites de forte ou faible émission. Il convient que cet effet soit pris en considération avec d'autant plus d'attention dans le cas de dispositifs multijonctions pour lesquels la condition de courant de court-circuit de la jonction en essai est produite en appliquant une tension de polarisation externe (voir l'IEC 60904-8-1) au DUT dans son intégralité. En outre, étant donné que la tension de polarisation peut fortement dépendre de la température de la ou des jonctions non soumises à l'essai, dans le cas de dispositifs multijonctions, il convient d'effectuer les mesurages de la dépendance de température après avoir correctement réglé la tension de polarisation pour chaque niveau de température.

NOTE Si la tension de polarisation n'est pas réinitialisée à chaque niveau de température, un artefact peut apparaître dans le mesurage en raison du différent point de consigne de la jonction en essai, ce qui peut entraîner que les conditions d'évaluation ne soient pas des conditions de court-circuit contrairement à ce qui est exigé dans l'IEC 60904-8-1.