

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Superconductivity –
Part 22-2: Normal state resistance and critical current measurement –
High- T_C Josephson junction:**

**Supraconductivité –
Partie 22-2: Mesurage de la résistance à l'état normal et du courant critique –
Jonction Josephson à T_C élevée**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2021 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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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.

IEC online collection - oc.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 18 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

IEC online collection - oc.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

**Part 22-2: Normal state resistance and critical current measurement –
High- T_C Josephson junction:**

Supraconductivité –

**Partie 22-2: Mesurage de la résistance à l'état normal et du courant critique –
Jonction Josephson à T_C élevée**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.050

ISBN 978-2-8322-1039-7

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Symbols	8
5 Principle of measurement method.....	9
6 Apparatus.....	9
6.1 General.....	9
6.2 Cryogenic system	9
6.3 Electrical measurement system.....	10
6.4 Circuitry	10
7 Estimation of normal state resistance (R_n) and intrinsic critical current (I_{ci}).....	11
7.1 Calculation method	11
7.2 Geometric mean criterion for hyperbolic function fitting.....	12
8 Standard uncertainty	12
8.1 General.....	12
8.2 Type A uncertainty.....	12
8.3 Type B uncertainty.....	14
8.3.1 General	14
8.3.2 Temperature.....	14
8.3.3 Voltage measurement.....	16
8.3.4 Current measurement	16
8.4 Budget table	17
8.5 Uncertainty requirement.....	18
9 Test report.....	18
9.1 Identification of test device	18
9.2 R_n value.....	18
9.3 I_{ci} value.....	18
9.4 Standard uncertainty.....	18
9.5 Atmospheric pressure	18
9.6 Miscellaneous optional report	18
Annex A (informative) Calculation technique and practical application to high- T_c Josephson junctions	20
A.1 General.....	20
A.2 Hyperbolic function fitting method	20
A.3 Geometric mean method	21
A.4 Combined method.....	22
A.5 Estimation of R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$	23
A.5.1 General	23
A.5.2 High- T_c Josephson junction (JL350)	23
A.5.3 High- T_c Josephson junction (JL351)	25
A.5.4 High- T_c Josephson junction (TUT).....	27
Annex B (informative) Practical application to low- T_c Josephson junctions.....	30

B.1	General.....	30
B.2	Estimation of R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$	30
B.2.1	General	30
B.2.2	Low- T_C Josephson junction (IU1)	30
B.2.3	Low- T_C Josephson junction (IU2)	31
B.2.4	Low- T_C Josephson junction (IU3)	32
B.2.5	Low- T_C Josephson junction (IU4)	34
	Bibliography.....	35
	Figure 1 – Typical circuitry for voltage-current (U – I) characteristic curve measurement	10
	Figure 2 – Ideal U – I characteristic curve (red line) and hyperbolic function (RSJ) model curve (dotted line).....	11
	Figure 3 – Geometric mean criterion and RSJ model fitting for TUT-JJ05 at 75,8 K.....	15
	Figure 4 – Geometric mean criterion and RSJ model fitting for TUT-JJ05 at 76,3 K.....	16
	Figure A.1 – U – I curve based on resistively shunted junction (RSJ) model	21
	Figure A.2 – U – I curve affected by noise-rounding and self-heating.....	21
	Figure A.3 – Application of geometric mean method to ideal U – I in Figure A.1.....	22
	Figure A.4 – Application of geometric mean method to U – I with noise-rounding and self-heating effects in Figure A.2.....	23
	Figure A.5 – U – I curve of JL350	24
	Figure A.6 – Application of geometric mean method to Figure A.5	24
	Figure A.7 – Result of RSJ model fitting for JL350	25
	Figure A.8 – U – I curve of JL351	26
	Figure A.9 – Application of geometric mean method to Figure A.8	26
	Figure A.10 – Result of RSJ model fitting for JL351	27
	Figure A.11 – U – I curve of TUT with a small I_m	28
	Figure A.12 – Application of geometric mean method to TUT	28
	Figure A.13 – Application of adjusted geometrical mean method to TUT	29
	Figure A.14 – Result of RSJ model fitting for TUT	29
	Figure B.1 – Application of geometric mean method to IU1	31
	Figure B.2 – Result of RSJ model fitting for IU1	31
	Figure B.3 – Application of geometric mean method to IU2	32
	Figure B.4 – Result of RSJ model fitting for IU2	32
	Figure B.5 – Application of geometric mean method to IU3	33
	Figure B.6 – Result of RSJ model fitting for IU3	33
	Figure B.7 – Application of geometric mean method to IU4	34
	Figure B.8 – Result of RSJ model fitting for IU4	34
	Table 1 – Typical relative standard Type A uncertainty for high- T_C Josephson junctions	14
	Table 2 – Budget table for R_n	17
	Table 3 – Budget table for I_{ci}	17
	Table A.1 – R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ values of high- T_C Josephson junctions	23
	Table B.1 – R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ values of low- T_C Josephson junctions.....	30

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 22-2: Normal state resistance and critical current measurement – High- T_c Josephson junction

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.

IEC 61788-22-2 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity. It is an International Standard.

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

FDIS	Report on voting
90/484/FDIS	90/486/RVD

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

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

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

A list of all parts in the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-2:2021

INTRODUCTION

IEC 61788-22 (all parts) is a series of International Standards on superconductor electronic devices. Superconductivity offers various possibilities of realizing sensors and detectors for a variety of measurands. Several types of superconductor sensors and detectors have been developed, using such features as superconducting energy gaps, sharp normal-superconducting transition, nonlinear current-voltage characteristics, superconducting coherent states and quantization of magnetic flux. Superconductors are influenced by interaction with electromagnetic fields, photons, ions, etc. The superconductor sensors and detectors have extremely high performance in resolution, time response and sensitivity, which cannot be realized by any other sensors and detectors.

IEC 61788-22-1 lists various types of superconductor sensors and detectors. A key element of some sensors and detectors is Josephson junction. The superconductor material types used for Josephson junctions are divided into two categories: low- T_c superconductor (LTS) and high- T_c superconductor (HTS). This document (IEC 61788-22-2) defines a measurement method of normal state resistance (R_n) and intrinsic critical current (I_{ci}) of HTS Josephson junctions, which are used for magnetic measurement with superconductor quantum interference device (SQUID), detection of millimetre to terahertz band radiation and other applications.

The measurement method covered in this document is intended to give an appropriate and agreeable technical base for those engineers working in the field of superconductor technology. Although the mechanism of high- T_c superconductivity is under investigation, the occurrence of the Josephson effect in such weak link structures as bicrystal, step-edge and ramp edge is reliable, and characteristic parameters for conventional LTS Josephson junctions are valid also for HTS Josephson junctions. The important parameters of HTS Josephson junctions for designing superconductor devices are normal state resistance (R_n) and critical current (I_c), which are combined as $I_c R_n$ product that is obtained experimentally. At this moment, most HTS Josephson junctions exhibit a non-hysteretic characteristic voltage-current ($U-I$) curve, which is typical for superconductor/normal-conductor/superconductor (SNS) junctions. On $U-I$ curves, two types of distortions are often observed: noise-rounding and self-heating effects. Especially, maximum current values without voltage drop on the $U-I$ curves are often considerably reduced because of the noise-rounding effect, and therefore it is difficult to estimate an intrinsic critical current value. This document provides a method to obtain intrinsic values by selecting a data set range to eliminate the distortions and by fitting a model function even when two effects are present.

The critical current obtained by this standard method is therefore called intrinsic critical current with the variable symbol of I_{ci} , eliminating the noise-rounding effect on $U-I$ curves. On the other hand, the normal state resistance is insensitive to the noise rounding and it is possible to avoid the self-heating effect, so that the variable symbol R_n is used. The $I_{ci} R_n$ product is more essential for designing superconductor devices than the $I_c R_n$ product. I_{ci} values estimated by this document are usually higher than experimental I_c values.

Practical application of this document to HTS Josephson junctions is shown in Annex A. The estimation method in this document is applied to SNS-type LTS Josephson junctions to check universality in Annex B.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 22-2: Normal state resistance and critical current measurement – High- T_c Josephson junction

1 Scope

This part of IEC 61788 is applicable to high- T_c Josephson junctions. It specifies terms, definitions, symbols and the measurement and estimation method for normal state resistance (R_n) and intrinsic critical current (I_{ci}), based on a combination of selecting a data set from measured U - I curves with a geometric mean criterion and fitting a hyperbolic function to that data set.

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 61788-22-1, *Superconductivity – Part 22-1: Superconducting electronic devices – Generic specification for sensors and detectors*

IEC 60617, *Graphical symbols for diagrams*: available at <http://std.iec.ch/iec60617>

IEC 60050-815:2015, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity*: (available at <http://www.electropedia.org/>)

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions 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

U - I characteristic curve

V - I characteristic curve

I - V characteristic curve

data set of voltage drop between two superconductors of a Josephson junction and current applied to the junction

3.2

normal state resistance

R_n

normal resistance

resistance between two superconductors forming a Josephson junction in a normal-conducting state

Note 1 to entry: In a Josephson bridge junction, a normal state resistance is also defined as the resistance at a bias current that suppresses superconductivity well above critical current, when the self-heating effect is negligible.

Note 2 to entry: In a Josephson tunnel junction, a normal state resistance is also defined as the tunnelling resistance at a bias voltage well above $2\Delta/e$, where Δ is the energy gap and e is the elementary electric charge, when the self-heating effect is negligible.

3.3

intrinsic critical current

I_{ci}

maximum direct current that can be applied to a Josephson junction without causing a voltage drop across the junction in the absence of noise-rounding on a $U-I$ characteristic curve

Note 1 to entry: Critical current (I_c) is the maximum direct current value that can be applied to a Josephson junction experimentally so that it can be regarded as flowing without resistance (IEC 61788-22-1).

Note 2 to entry: The method described in this document estimates I_{ci} , the value of which is usually higher than I_c .

3.4

geometric mean

square root of the product of dU/dI and U/I obtained from a $U-I$ characteristic curve

3.5

noise-rounding effect

effect of noise on a $U-I$ characteristic curve

Note 1 to entry: The $U-I$ curve shape near I_{ci} is rounded from an ideal shape by the noise-rounding effect. Because of this, an I_c value is lower than the I_{ci} value.

3.6

self-heating effect

effect of power dissipation due to transport current applied to a Josephson junction on a $U-I$ characteristic curve

Note 1 to entry: The current generates heat, and a $U-I$ curve shape in a high current region well above I_{ci} deviates upward above a straight line corresponding to R_n .

4 Symbols

U voltage drop across two superconductors connected by a weak link

NOTE "V" can also be used.

I current flowing through two superconductors connected by a weak link

R_n normal state resistance

I_c experimental critical current

I_{ci} intrinsic critical current estimated by this document

$u_{A,R}$ type A standard uncertainty of R_n

$u_{A,I}$ type A standard uncertainty of I_{ci}

$u_{B,R}$ type B standard uncertainty of R_n

$u_{B,I}$ type B standard uncertainty of I_{ci}

5 Principle of measurement method

On $U-I$ curves, two types of distortions are often observed: noise-rounding and self-heating. When the noise-rounding effect is negligible, the I_{ci} value is the maximum current applied to the junction without resistance. When the self-heating effect and the nonlinear property due to superconductivity are negligible, the R_n value of the junction corresponds to a value of U/I at a current much higher than the critical current of the junction. Since a high probe current may cause damage to the junction, the determination of R_n may need to be based on a range of the $U-I$ characteristic curve obtained for moderate currents. The moderate currents are also effective in avoiding the self-heating effect. Here, a nonlinear least-squares fitting method with the hyperbolic function is practical to determine the values of R_n and I_{ci} . Even when these two types of the distortions exist, the combination of the geometric mean criterion and the hyperbolic function fitting gives proper R_n and I_{ci} values.

The R_n and I_{ci} values of a HTS Josephson junction are determined by selecting a data set from the whole data set of a $U-I$ characteristic curve with the geometric mean criterion, and then by fitting the hyperbolic function model (or resistively-shunted junction (RSJ) model) [1]¹ to that selected data set. This is called the combined method. The geometric mean criterion and the hyperbolic function fitting method are described in Clause 7.

6 Apparatus

6.1 General

The apparatus required for this measurement method includes a cryogenic system and an electrical measurement system.

6.2 Cryogenic system

An open cryostat with liquid nitrogen shall be used to cool Josephson junctions. The cryostat shall have an open structure so that the pressure of the bath is equal to atmospheric pressure. The atmospheric pressure on earth is normally between 950 hPa and 1 050 hPa, corresponding to a temperature range from 76,8 K to 77,7 K. Measurement during abnormal weather conditions shall be avoided. An atmospheric pressure value from a weather report source near the measurement site or measured locally shall be reported. The cryostat should be equipped with a magnetic shield with an attenuation factor of over 100 (–40 dB) and a RF shield with 1 000 (–60 dB) at 100 kHz. A specimen probe, which may consist of a junction or junctions, a specimen holder and a support structure, shall be cooled from room temperature to liquid nitrogen temperature over a time period of at least three minutes.

It is well known that I_c depends on flux trapping that occurs during cooling process from a normal-conducting state to a superconducting state. Therefore, the cooling process from a temperature above T_c to a base temperature of the liquid nitrogen bath and the R_n and I_{ci} estimation shall be repeated at least 10 times, and the R_n and I_{ci} values obtained from the $U-I$ data set showing the highest I_{ci} value shall be reported.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

6.3 Electrical measurement system

A measurement system for U – I characteristic curve data sets should consist of a waveform generator, a data acquisition system, differential amplifiers and other necessary instruments such as filters. A four terminal method shall be applied to measure voltage and current. The digital values of voltage and current shall be stored on the data acquisition system with an analogue-to-digital converter (ADC) having a resolution better than eight bits. The U – I data sets are transferred to a computer for estimating R_n and I_{ci} . Other equivalent measurement systems may also be used.

When a waveform generator is used, a current bias with a constant sweep rate shall be applied to the junction and corresponding voltage drop is measured. The current bias shall be triangularly swept from a minus value to a positive value or vice versa while the voltage is recorded. The time for the ramp from $-I_m$ to $+I_m$ shall be longer than 10 ms, where I_m is the maximum current. A sweep frequency (f_s) lower than 50 Hz ensures quasi-DC measurement, in which the effects of stray capacitance and junction capacitance are negligible. The data sampling number per second shall be between $100 \times f_s$ and $200 \times f_s$ to obtain enough data points. The U – I data in the first quadrant and the absolute value data in the third quadrant shall be used for the R_n and I_{ci} estimation described in Clause 7.

Differential amplifiers should be used to separate the grounds of the cryostat and the data acquisition system. The input resistance of differential amplifiers should be higher than 100 k Ω . The input resistance of the data acquisition system should be set at a high value, for example 1 M Ω . Low pass filters with a cutoff frequency of less than approximately 1 MHz should be used. The data measurement range should be approximately $I_m \approx 5 \times I_{ci}$ to avoid any damage to the junction and to obtain enough data points. The origin offset shall be minimized before the data acquisition.

6.4 Circuitry

An example of the equivalent circuit for the U – I characteristic curve measurement is shown in Figure 1. The Josephson junction indicated by IEC 60617-S01926:2017-10 and the surrounding wiring are in a superconducting state. The normal-superconducting boundaries indicated by IEC 60617-S01925:2017-10 distinguish the superconducting circuit and the normal-conducting one. The waveform generator, shunt resistor and data acquisition system may be placed at room temperature. The waveform generator and the digital oscilloscope may be replaced by equivalent instruments.

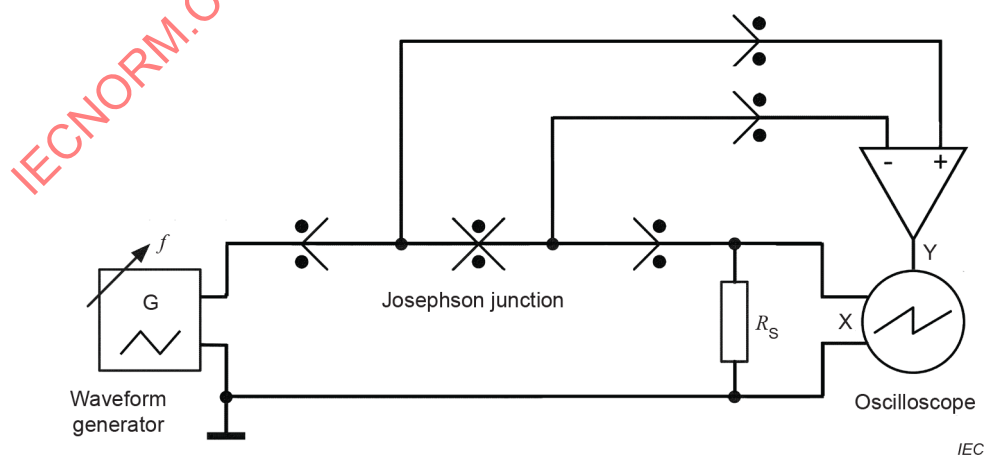


Figure 1 – Typical circuitry for voltage-current (U – I) characteristic curve measurement

The data acquisition system records the voltage (U_y) between two electrodes of the Josephson junction and the voltage (U_x) across the shunt resistor of resistance R_s . The current values should be obtained by dividing the U_x values by R_s . The R_s should be more than 1 000 times smaller than the input resistance of the oscilloscope or the differential amplifier. The tolerance of the shunt resistor should be better than $\pm 0,05$ %. When the oscilloscope is set at X-Y mode, $U-I$ characteristic curves can be seen on-screen to check the extent of the noise-rounding and self-heating effects, and the origin offset. $U-I$ curve data sets with considerably large effects of noise-rounding and self-heating cannot be used to estimate R_n and I_{ci} . In this case, the measurement apparatus or the junction structure shall be improved.

7 Estimation of normal state resistance (R_n) and intrinsic critical current (I_{ci})

7.1 Calculation method

The R_n and I_{ci} values shall be estimated by optimizing the variables R_n and I_{ci} with the least-squares fitting method so that the hyperbolic function expressed by Formula (1) [1] fits best to a $U-I$ characteristic data set as shown in Figure 2 after selecting a data set range in accordance with the geometric mean criterion mentioned in 7.2.

$$U = R_n \sqrt{I^2 - I_{ci}^2} \text{ for } |I| > |I_{ci}|, \quad U = 0 \text{ for } |I| < |I_{ci}| \quad (1)$$

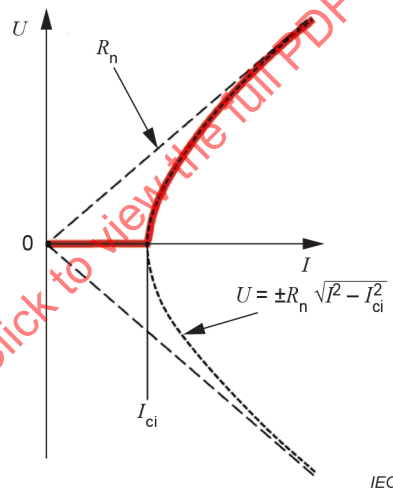


Figure 2 – Ideal $U-I$ characteristic curve (red line) and hyperbolic function (RSJ) model curve (dotted line)

In order to avoid the effects of the noise-rounding and self-heating, a data set range for fitting shall be determined by the geometric mean criterion, taking into account three curves of dU/dI , U/I and $(dU/dI \times U/I)^{0,5}$ plotted against I . The appropriate data set range shall be such that the geometric mean curve $(dU/dI \cdot U/I)^{0,5}$ against I has a plateau within 5 % deviation and dU/dI decreases monotonously. The geometric mean of R_n is expressed by Formula (2).

$$R_n = \sqrt{(dU/dI) \times (U/I)}, \quad (2)$$

where

$$dU/dI = IR_n / \sqrt{I^2 - I_{ci}^2} \quad (3)$$

and

$$U/I = (R_n/I) \times \sqrt{I^2 - I_{ci}^2}, \quad (4)$$

thus

$$(dU/dI) \times (U/I) = R_n^2. \quad (5)$$

The dU/dI and U/I values can be calculated by using a measured $U-I$ data set. By selecting a data set appropriate for the least-squares fitting from the whole $U-I$ characteristic curve, the effects of noise-rounding and self-heating are minimized.

The hyperbolic function nonlinear fitting method shall be applied to a data set selected by the geometric mean method. The convergence condition of fitting routine should be that the R_n and I_{ci} parameters are stationary at a digit position that corresponds to the rightmost digit of standard uncertainty values (standard deviation values) with two significant figures (see Table A.1 and Table B.1). For practical calculation, software packages with a function of nonlinear least-squares fitting can be used to estimate R_n and I_{ci} and corresponding standard deviation of these mean quantities. The software packages make no meaningful difference in estimation results. Actual estimation examples are found in 8.3.2 and Annex A.

7.2 Geometric mean criterion for hyperbolic function fitting

A data set range appropriate for the hyperbolic function fitting method shall be such that the geometric mean curve $(dU/dI \cdot U/I)^{0.5}$ against I has a plateau within 5 % deviation and dU/dI decreases monotonously as I increases.

8 Standard uncertainty

8.1 General

Type A uncertainty, which is the evaluation of a component of measurement uncertainty by a statistical analysis, is estimated by the standard deviations of R_n and I_{ci} when Formula (1) is fitted to the $U-I$ characteristic data set selected by the geometric mean criterion [2] [3]. The Type A uncertainty of this document is estimated by using the typical $U-I$ curve of JL350 in Annex A. Type B uncertainty, which is the evaluation of uncertainty by means other than the statistical analysis, includes uncertainty arising from variation in temperature and measurement of voltage and current [2] [3].

The total standard uncertainty of this measurement method is the sum of the Type A uncertainty and Type B uncertainty according to the propagation law. Actual application of this document requires the Type A uncertainty estimation from experimental data only. Taking into account the Type B uncertainty values tabulated in Table 2 and Table 3, the Type A uncertainty values shall be kept less than the values in 8.5.

8.2 Type A uncertainty

The mean quantities R_n and I_{ci} and their standard deviation values of $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ are obtained by minimizing the sum of

$$J = \sum_{j=1}^m \left[U_j - \left(R_n \sqrt{I_j^2 - I_{ci}^2} \right) \right]^2, \quad (6)$$

where, I_j and U_j ($j = 1, \dots, m$) are the data set selected by the geometrical mean criterion.

For uncertainty estimation, the sensitivity matrix $\mathbf{X}$ is expressed by Formula (7):

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial U}{\partial R_n} \right)_{j=1} & \left(\frac{\partial U}{\partial I_{ci}} \right)_{j=1} \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial U}{\partial R_n} \right)_{j=m} & \left(\frac{\partial U}{\partial I_{ci}} \right)_{j=m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

where

$$\frac{\partial U}{\partial R_n} = \sqrt{I_j^2 - I_{ci}^2} \quad (8)$$

and

$$\frac{\partial U}{\partial I_{ci}} = \frac{R_n I_{ci}}{\sqrt{I_j^2 - I_{ci}^2}} \quad (9)$$

Therefore, the uncertainty matrix of the parameter is expressed by Formula (10):

$$\mathbf{U} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \times \hat{\sigma}^2 = \begin{bmatrix} u^2(R_n) & u(R_n, I_{ci}) \\ u(R_n, I_{ci}) & u^2(I_{ci}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

where

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{J}{m-1} \quad (11)$$

For typical Type A uncertainty estimation, the U – I data set with the largest relative standard uncertainty (standard deviation divided by average) values is selected from the HTS junctions in Annex A. The data of the junction TUT in Table 1 are excluded, since the sinusoidal current scan does not meet this document. The largest relative uncertainty values are 0,029 % for R_n and 0,33 % for I_{ci} for the junction JL350, and the corresponding standard deviation values are 0,003 8 Ω and 0,21 μA in Table 1.

**Table 1 – Typical relative standard Type A uncertainty
for high- T_c Josephson junctions**

Junction (type)	Estimation by combined method					
	R_n	$u_{A,R}$	Relative standard uncertainty	I_{ci}	$u_{A,I}$	Relative standard uncertainty
	Ω	Ω	%	μA	μA	%
JL350 (YBCO step-edge)	12,934 0	0,003 8	0,029	63,33	0,21	0,33
JL351 (YBCO step-edge)	9,304 2	0,001 8	0,019	32,651	0,045	0,14
TUT (YBCO step-edge)	0,810 0	0,005 0	0,62	358,2	3,5	0,98

8.3 Type B uncertainty

8.3.1 General

The Type B uncertainty of the measurement of R_n and I_{ci} in this document is expressed by Formula (12) and Formula (13):

$$u_{B,R}^2 = \left(\frac{\partial R_n}{\partial T} \right)^2 \times u_T^2 + \left(\frac{\partial R_n}{\partial U} \right)^2 \times u_U^2 + \left(\frac{\partial R_n}{\partial I} \right)^2 \times u_I^2 \quad (12)$$

and

$$u_{B,I}^2 = \left(\frac{\partial I_{ci}}{\partial T} \right)^2 \times u_T^2 + \left(\frac{\partial I_{ci}}{\partial U} \right)^2 \times u_U^2 + \left(\frac{\partial I_{ci}}{\partial I} \right)^2 \times u_I^2 \quad (13)$$

where

$\partial R_n / \partial T$ is a sensitivity of R_n to a variation of temperature T ;

$\partial R_n / \partial U$ is a sensitivity of R_n to a variation of voltage U ;

$\partial R_n / \partial I$ is a sensitivity of R_n to a variation of current I ;

u_T , u_U and u_I are the standard deviation values for the measurement of temperature, voltage and current, respectively.

The notation for I_{ci} is the same as that for R_n .

8.3.2 Temperature

U – I curve measurement shall be carried out in a liquid nitrogen bath. The temperature variation between 76,8 K and 77,7 K is expected from the variation of atmospheric pressure on earth. The $\partial R_n / \partial T$ was approximated by obtaining R_n values at T_1 and T_2 by applying this document to experimental U – I curves, and then calculating $[R_n(T_2) - R_n(T_1)] / [T_2 - T_1]$. The same method was applied to I_{ci} . U – I curves of a bicrystal YBCO junction tagged as "TUT-JJ05" were measured at 75,8 K and 76,3 K. The data set range determined with the geometric mean criterion and the U – I curves with the hyperbolic function fitting results (RSJ model) are shown in Figure 3 and Figure 4 for 75,8 K and 76,3 K, respectively.

For 75,8 K a data set between 35 μA and 107 μA indicated by the arrow was selected for hyperbolic function fitting as shown in Figure 3 (a). The least-squares fitting with Formula (1) gives $R_n = 1,540\ 0\ (0,001\ 8)\ \Omega$ and $I_{ci} = 29,16\ (0,13)\ \mu\text{A}$ at 75,8 K. Figure 3 (b) shows a hyperbolic curve of $U = R_n \times (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ with the estimated values in red and an ohmic line (normal state resistance) of $U = R_n \times I$ in blue.

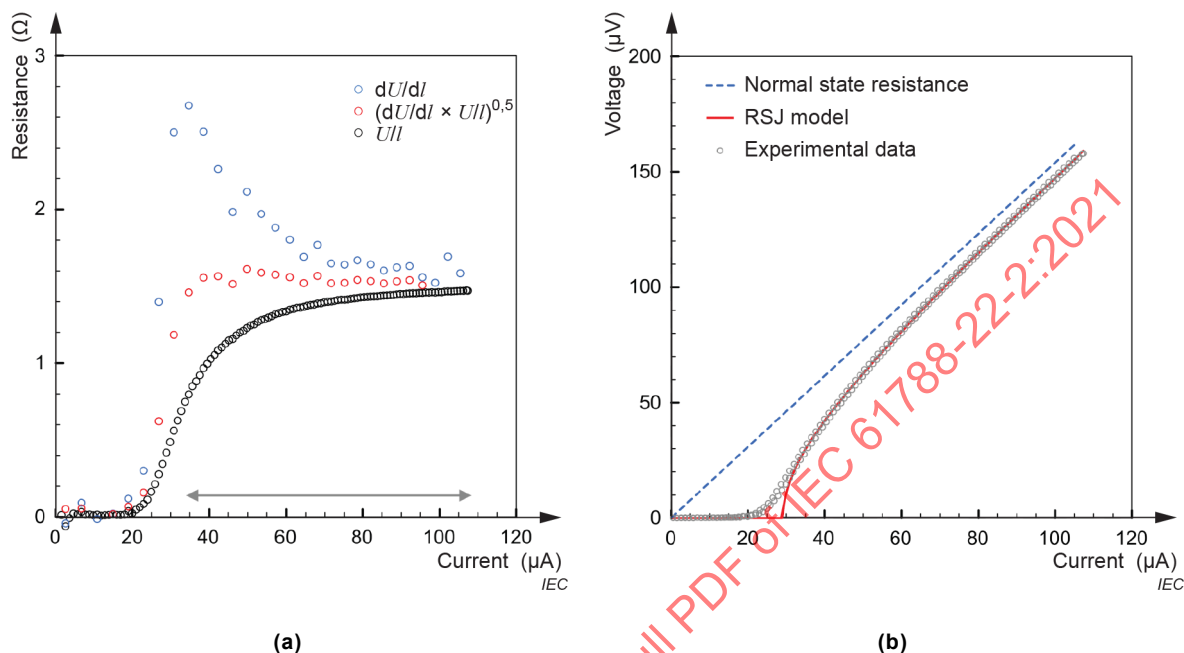


Figure 3 – Geometric mean criterion and RSJ model fitting for TUT-JJ05 at 75,8 K

For 76,3 K a data set between 31 μA and 98 μA indicated by the arrow was selected for hyperbolic function fitting as shown in Figure 4 (a). The least-squares fitting with Formula (1) gives $R_n = 1,539\ 6\ (0,001\ 8)\ \Omega$ and $I_{ci} = 26,32\ (0,11)\ \mu\text{A}$ at 76,3 K. Figure 4 (b) shows a hyperbolic curve of $U = R_n \times (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ with the estimated values and an ohmic line of $U = R_n \times I$.

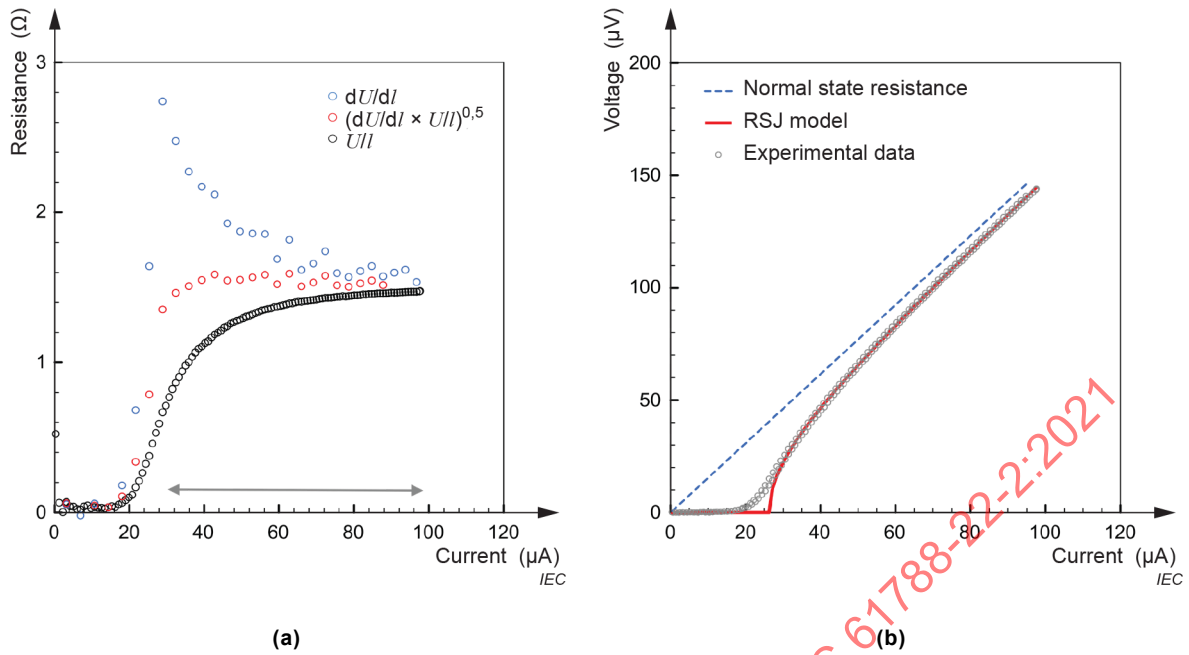


Figure 4 – Geometric mean criterion and RSJ model fitting for TUT-JJ05 at 76,3 K

Consequently, the temperature sensitivity coefficients are estimated at $\Delta R_n/\Delta T = -0,000\ 8\ \Omega/K$ and $\Delta I_{ci}/\Delta T = -5,68\ \mu A/K$. u_T is estimated by a standard deviation of $(77,7\ K - 76,8\ K) / 2\sqrt{3} = 0,26\ K$, providing a uniform probability density function for T .

8.3.3 Voltage measurement

For a voltage measurement using the data acquisition system, the signal should be measured with a relative standard uncertainty of 0,3 % that is typical in data acquisition systems with an amplifier, an ADC with a resolution of eight bits, and other necessary circuits.

The $\partial R_n/\partial U$ and $\partial I_{ci}/\partial U$ are estimated by using the combined method with a 1 μV bias added to the measured $U-I$ curve. Accordingly, the typical sensitivity coefficients of $\Delta R_n/\Delta U$ and $\Delta I_{ci}/\Delta U$ are calculated by using the $U-I$ data set of TUT-JJ05 at 76,3 K.

The original normal state resistance is 1,539 6 Ω, and the 1 μV bias results in 1,549 8 Ω. Therefore, the $\Delta R_n/\Delta U$ sensitivity is 0,010 2 Ω/μV.

The original intrinsic critical current I_{ci} is 26,32 μA, and the 1 μV bias results in 25,85 μA. Therefore, the $\Delta I_{ci}/\Delta U$ sensitivity is -0,47 μA/μV.

u_U is estimated by taking into account a full-scale range of 1 mV for an ADC system, which makes the standard deviation of 3 μV at the maximum.

8.3.4 Current measurement

For the current measurement using the data acquisition system, the voltage across a shunt resistance should be measured by an ADC with a relative standard uncertainty not exceeding 0,3 %.

The $\partial R_n/\partial I$ and $\partial I_{ci}/\partial I$ are estimated by using the combined method with a 1 μA bias added to the measured U – I curve. Accordingly, the typical sensitivity coefficients of $\Delta R_n/\Delta I$ and $\Delta I_{ci}/\Delta I$ are calculated by using the U – I data set of TUT-JJ05 at 76,3 K.

The original normal state resistance is 1,539 6 Ω , and the 1 μA bias results in 1,526 5 Ω . Therefore, the $\Delta R_n/\Delta I$ sensitivity is $-0,013 \Omega/\mu\text{A}$.

The original intrinsic critical current I_{ci} is 26,32 μA , and the 1 μA bias results in 27,50 μA . Therefore, the $\Delta I_{ci}/\Delta I$ sensitivity is 1,18 $\mu\text{A}/\mu\text{A}$.

u_I is estimated by taking into account a full-scale range of 10 mV for an ADC system divided by a shunt resistance R_s . The full-scale range is set at 10 times larger than that for the voltage measurement of Josephson junctions. The standard deviation of an ADC system at the 10 mV full scale is assumed to be 30 μV at the maximum. The R_s value is assumed to be 100 Ω , of which tolerance shall be better than $\pm 0,05 \%$, which makes a standard deviation value of $100 \Omega \times 0,000 5 / \sqrt{3} = 0,029 \Omega$ in a uniform probability density function. The variance of U/R_s is maximum at the full scale of 10 000 μV of the ADC: $(30 \mu\text{V} / 100 \Omega)^2 + (10\,000 \mu\text{V} / 100 \Omega^2 \times 0,029 \Omega)^2 = 0,090 8$ in a unit of $(\mu\text{A})^2$. This maximum standard deviation of 0,30 μA is used in the following estimation.

8.4 Budget table

Typical estimation of standard uncertainty in this document is summarized in Table 2 and Table 3. The total standard uncertainty value of $u_{\text{total},R}$ is calculated by summing the Type A uncertainty $u_{A,R}$ and the Type B uncertainty $u_{B,R}$ according to the propagation law.

Table 2 – Budget table for R_n

Factor	Parameter symbol	Symbol of standard deviation and type	Sensitivity coefficient	Standard deviation of parameter	Contribution to $u_{\text{total},R}$
U – I measurement	–	$u_{A,R}$, A	–	–	0,001 8 Ω
Temperature	T	u_T , B	–0,000 8 Ω/K	0,26 K	0,000 2 Ω
Voltage	U	u_U , B	0,010 $\Omega/\mu\text{V}$	3,0 μV	0,030 Ω
Current	I	u_I , B	–0,013 $\Omega/\mu\text{A}$	0,30 μA	0,003 9 Ω
Combined standard uncertainty		$u_{\text{total},R}$	0,030 Ω		
Relative standard uncertainty		1,9 %			
$R_n \pm$ expanded uncertainty (coverage factor $k = 2$)		1,540 $\Omega \pm 0,060 \Omega$			

The total standard uncertainty value of $u_{\text{total},I}$ is calculated by summing the Type A uncertainty $u_{A,I}$ and the Type B uncertainty $u_{B,I}$ according to the propagation law.

Table 3 – Budget table for I_{ci}

Factor	Parameter symbol	Symbol of standard deviation and type	Sensitivity coefficient	Standard deviation of parameter	Contribution to $u_{\text{total},I}$
U – I measurement	–	$u_{A,I}$, A	–	–	0,11 μA

Temperature	T	u_T , B	−5,7 μA/K	0,26 K	1,5 μA
Voltage	U	u_U , B	−0,47 μA/μV	3,0 μV	1,4 μA
Current	I	u_I , B	1,2 μA/μA	0,30 μA	0,36 μA
Combined standard uncertainty		$u_{total,I}$	2,1 μA		
Relative standard uncertainty		8,0 %			
$I_{ci} \pm$ expanded uncertainty (coverage factor $k = 2$)		26,3 μA ± 4,2 μA			

8.5 Uncertainty requirement

As shown in the typical uncertainty in Table 2 and Table 3, the voltage measurement uncertainty considerably influences the total uncertainty $u_{total,R}$ and $u_{total,I}$. In addition, the $u_{total,I}$ is dominated by the temperature variation, which is physically reasonable. In order not to significantly exceed the level of the standard uncertainty in Table 2 and Table 3, the values of $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$, which are the standard deviation values of the least-squares fitting, shall be less than $2 \times u_{A,R}$ or $2 \times u_{A,I}$. The corresponding relative standard uncertainty of $u_{A,R}/R_n$ and $u_{A,I}/I_{ci}$ shall be less than 0,2 % and 0,8 %, respectively. When either $u_{A,R}/R_n$ or $u_{A,I}/I_{ci}$ exceeds these values, the measurement apparatus shall be improved.

9 Test report

9.1 Identification of test device

The test device shall be identified by the following:

- name of the manufacturer;
- device serial number or equivalent identification;
- Type of Josephson junction,

9.2 R_n value

R_n value obtained by this document

9.3 I_{ci} value

I_{ci} value obtained by this document

9.4 Standard uncertainty

Relative standard uncertainty values of $u_{A,R}/R_n$ and $u_{A,I}/I_{ci}$ in Type A uncertainty

9.5 Atmospheric pressure

Atmospheric pressure value obtained from the nearest meteorological station or local measurement.

9.6 Miscellaneous optional report

The following data may be reported optionally:

- R_n value by geometric mean method;
- R_n value in each measurement run;

- I_{ci} value in each measurement run;
- raw $U-I$ curve;
- temperature converted from an atmospheric pressure value;
- temperature measured by a sensor;
- structure of cryostat, magnetic shield and RF shield;
- configuration of electric measurement system;
- chemical composition of the thin film and the substrate material.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-2:2021

Annex A (informative)

Calculation technique and practical application to high- T_c Josephson junctions

A.1 General

Annex A gives informative reference on calculation of R_n , I_{ci} and Type A standard uncertainty. The combination of the geometric mean method and the hyperbolic function fitting method is applied to artificially-produced $U-I$ curves and experimental $U-I$ curves of HTS Josephson junctions. It is possible to evaluate R_n and I_{ci} properly even when noise-rounding and self-heating effects are non-negligible.

A.2 Hyperbolic function fitting method

$U-I$ characteristics curves of high- T_c Josephson junctions are explained by the hyperbolic function of Formula (1) [1]. Figure A.1 is an ideal $U-I$ characteristic curve of a junction with $R_n = 10 \, \Omega$ and $I_{ci} = I_c = 30 \, \mu A$, where the data sets of U_j and I_j are artificially produced. The U_j and I_j express j -th data of U and I . The R_n and I_{ci} values and the corresponding uncertainty (standard deviation) values of $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$, which are called Type A uncertainty deduced by statistical analysis, are estimated by optimizing the R_n and I_{ci} parameters in such a way that the sum of the squares of difference between the measured data and Formula (1) is minimized, which is nonlinear least-squares fitting. The nonlinear least-squares fitting can be performed using regression analysis function of commercial software packages. In addition, a solver procedure file for estimating R_n , I_{ci} and corresponding standard uncertainty values is available at: <https://www.iec.ch/tc90/supportingdocuments>.

In reality, deviation from the hyperbolic curve is observed in many cases. Two major causes for the deviation are noise-rounding and self-heating. Figure A.2 shows a $U-I$ curve of a junction that suffers a noise-rounding deviation in a current range less than $30 \, \mu A$ and a self-heating deviation in a current range larger than $150 \, \mu A$, where the data sets of U_j and I_j are artificially produced. Hyperbolic curve fitting using the whole data set gives an unreliable estimation. A practical solution is to select a proper data set in a range that is not affected by the two effects. The geometric mean method in Clause A.3 provides a good criterion for selecting the data set.

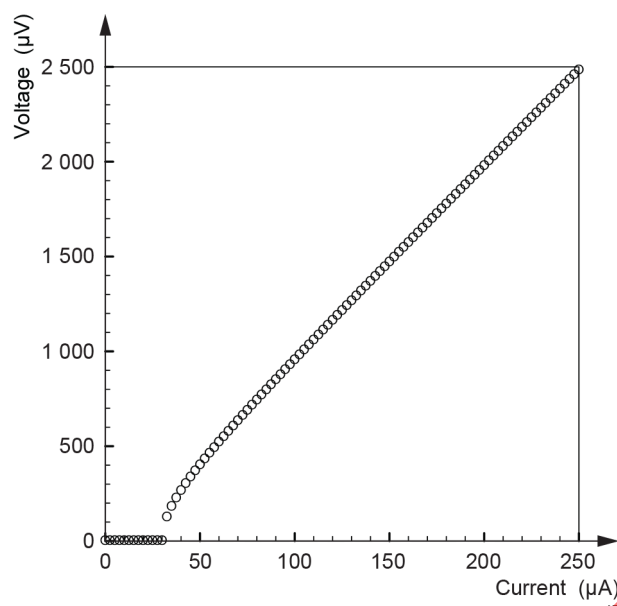


Figure A.1 – U – I curve based on resistively shunted junction (RSJ) model

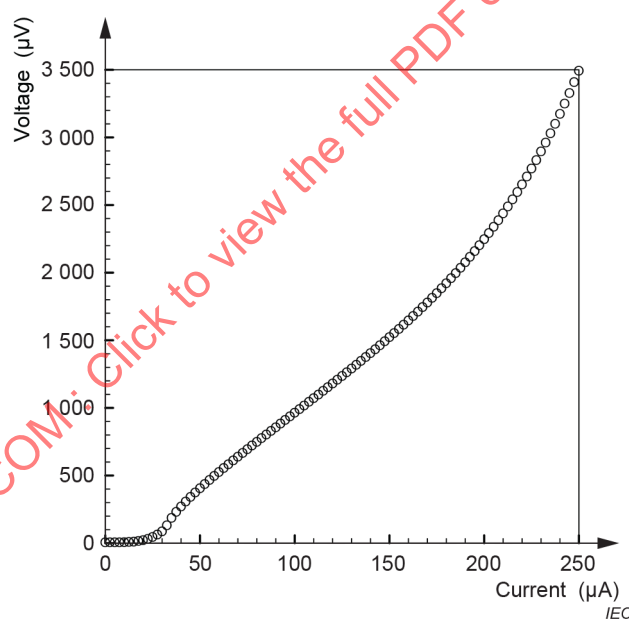


Figure A.2 – U – I curve affected by noise-rounding and self-heating

A.3 Geometric mean method

The geometric mean method is an approach to calculate R_n with the geometric mean of a derivative of voltage with respect to current, dU/dI , and a voltage/current ratio, U/I , from a measured U – I data set by using Formula (2) to Formula (5).

For the calculation of dU/dI and U/I , $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ and U_j/I_j are used incrementally. The value of R_n is calculated by $[(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)]^{0,5} \times (U_j/I_j)^{0,5}$.

The merit of this method is that one can directly obtain the value of R_n without performing regression analysis. The demerit is that the value of $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ sometimes fluctuates to a great extent due to the nature of numerical differentiation as observed in Figure A.12. It cannot give an estimation of I_{ci} .

A.4 Combined method

The geometric mean method is applied to the $U-I$ curve in Figure A.1 and the result is shown in Figure A.3. The geometric mean values jump abruptly from 0 to 10 at 30 μA , and keep a plateau in a range higher than 30 μA . This perfect plateau is observed in the ideal $U-I$ curves. The values of dU/dI decrease monotonously, which is an important requirement for selecting a data set range for fitting. The resistance of the plateau region is 10 Ω , which agrees with the R_n value in Figure A.1. It validates the geometric mean method for estimating R_n .

The geometric mean method is also applied to the $U-I$ curve in Figure A.2 with the noise-rounding and self-heating effects. In Figure A.4, the geometric mean increases gradually until the current reaches 50 μA without a sharp jump. The dU/dI decreases in a range between 34 μA and 100 μA , and then increases in a region over 100 μA . Since there is no perfect plateau and the geometric mean increases gradually with increasing current, it is difficult to estimate R_n . This observation is typical in $U-I$ curves distorted by the noise-rounding and self-heating effects. Nevertheless, in a range between 50 μA and 100 μA , the geometric mean exhibits an imperfect plateau within a deviation of 5 % while dU/dI decreases with increasing current. This meets the criterion in 7.2 to select a data set for the hyperbolic function fitting method. The noise-rounding and self-heating effects are not significant in that region. The hyperbolic function fitting should be performed by one of the regression analysis software packages or a solver file available at: <https://www.iec.ch/tc90/supportingdocuments>. It was confirmed that the different software packages made the same results on R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ for experimental $U-I$ curves in Clause A.5.

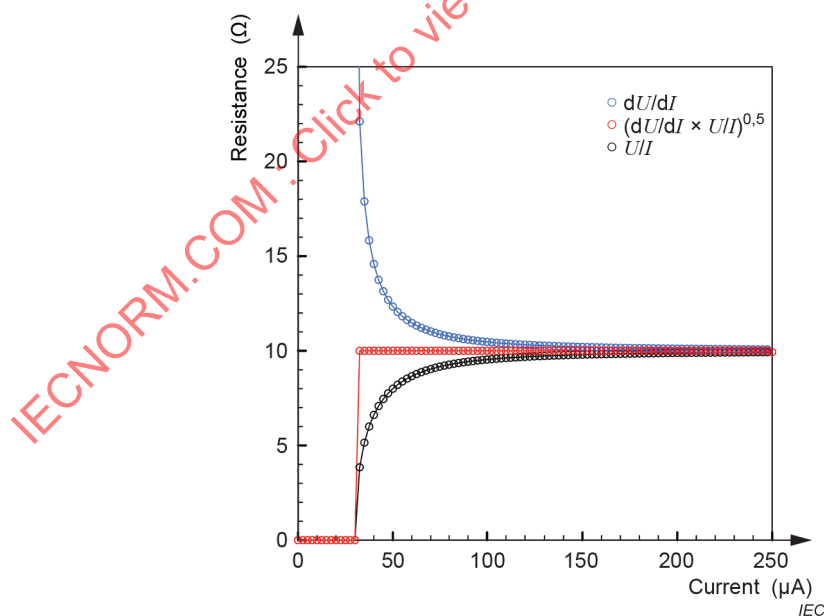


Figure A.3 – Application of geometric mean method to ideal $U-I$ in Figure A.1

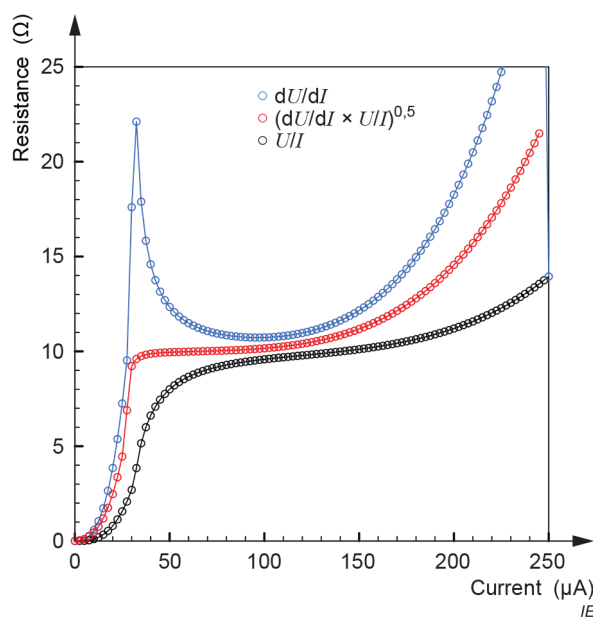


Figure A.4 – Application of geometric mean method to $U-I$ with noise-rounding and self-heating effects in Figure A.2

A.5 Estimation of R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$

A.5.1 General

The combined method is applied to three high- T_c Josephson junctions tagged as JL350, JL351 and TUT.

The estimation results for the three junctions are summarized in Table A.1, which shows good agreement on R_n between the geometric mean method and the hyperbolic function fitting method. The hyperbolic function fitting method gives Type A standard uncertainty $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ in addition to R_n and I_{ci} .

Table A.1 – R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ values of high- T_c Josephson junctions

Junction	Geometric mean	Hyperbolic function fitting after geometric mean			
	R_n [Ω]	R_n [Ω]	$u_{A,R}$	I_{ci} [μA]	$u_{A,I}$
JL350 (YBCO step-edge)	12,925	12,934 0	0,003 8	63,33	0,21
JL351 (YBCO step-edge)	9,293	9,304 2	0,001 8	32,651	0,045
TUT (YBCO step-edge)	0,815	0,810 0	0,005 0	358,2	3,5

A.5.2 High- T_c Josephson junction (JL350)

Figure A.5 shows the $U-I$ curve of the YBCO step-edge junction tagged as "JL350," which was fabricated and measured in Sydney (Australia). The noise-rounding effect is noticeable around 50 μA with no self-heating effect. The geometric mean method is applied to the whole data set in Figure A.5 and the result is shown in Figure A.6. The noise-rounding effect is observed in a range lower than 150 μA more clearly than in Figure A.5.

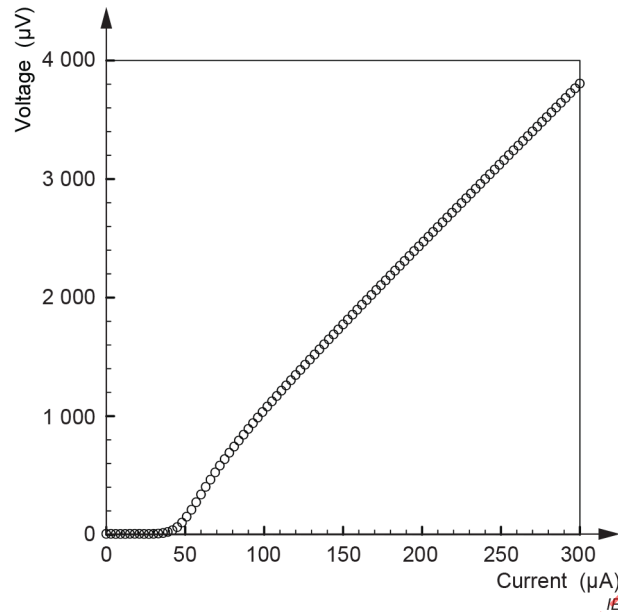


Figure A.5 – U – I curve of JL350

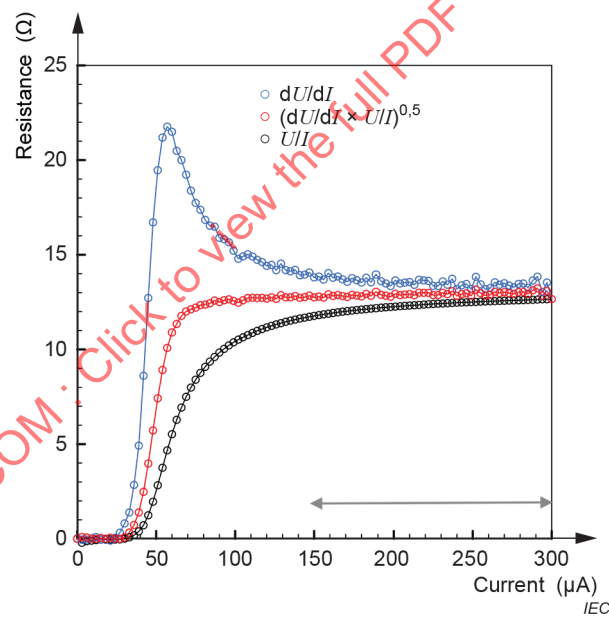


Figure A.6 – Application of geometric mean method to Figure A.5

The range between 150 μA and 300 μA indicated by the arrow meets the criterion for the hyperbolic function fitting. The fitting to find the optimum values of R_n and I_{ci} with $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ is conducted by using the data set in that range. The result is $R_n = 12,934\ 0\ (0,003\ 8)\ \Omega$ and $I_{ci} = 63,33\ (0,21)\ \mu\text{A}$, which minimizes the summation of $[U_j - R_n \times (I_j^2 - I_{ci}^2)^{0,5}]^2$ over j . The numbers in parentheses are the standard deviation values. The iteration of the nonlinear fitting routine is performed until the R_n and I_{ci} parameters converged into the stationary values showing no meaningful change at the rightmost digit in Table A.1. Typical iteration number is, for example, 7 with an initial value set of $R_n = I_{ci} = 10$. Figure A.7 shows a hyperbolic curve of $U = R_n (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ using the estimated values, as well as an ohmic line of $U = R_n \times I$ as a visual guide to check the validity of the fitting result. The fitting curve is appropriate except the noise-rounding region around 50 μA . Figure A.7 displays how I_c is reduced from I_{ci} by the noise-rounding effect.

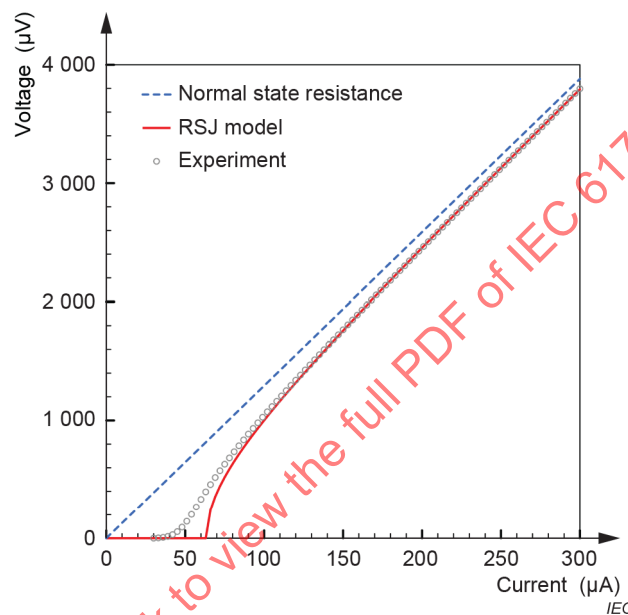


Figure A.7 – Result of RSJ model fitting for JL350

The value of R_n is also calculated with the geometric mean method by averaging the data in the range between 150 μA and 300 μA . The geometric mean method gives $R_n = 12,925\ \Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly lower than the value obtained by the curve fitting 12,934 0 (0,003 8) Ω .

A.5.3 High- T_c Josephson junction (JL351)

Figure A.8 shows the U – I curve of the YBCO step-edge junction tagged as "JL351," which was fabricated and measured in Sydney (Australia). The noise-rounding effect is clearly observed, while the self-heating effect is unclear. The geometric mean method is applied to the whole data set, and the result is shown in Figure A.9. The effect of noise-rounding can be seen more clearly than in Figure A.8 in a range lower than 55 μA . In addition, the self-heating effect can be recognized clearly, because the dU/dI increases in a current range over 140 μA . The range between 55 μA and 140 μA indicated by the arrow meets the criterion for the hyperbolic function fitting. It is shown that the geometric mean method is effective in selecting a data set for fitting even in U – I curves with both of the noise-rounding and self-heating effects.

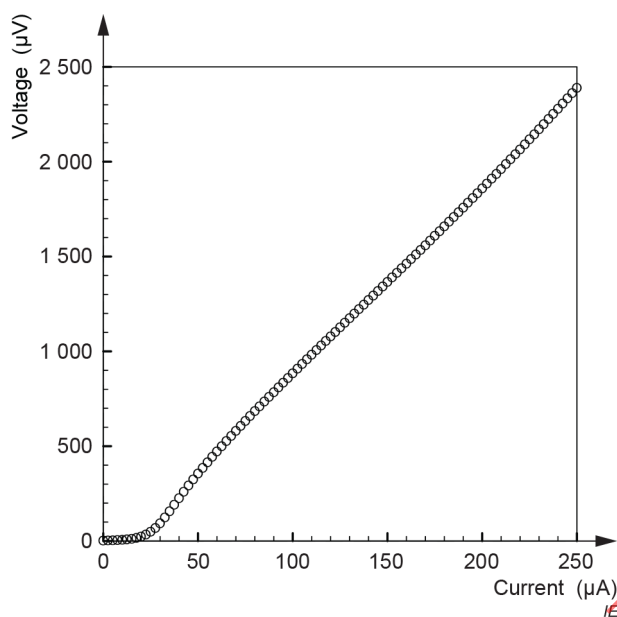


Figure A.8 – U – I curve of JL351

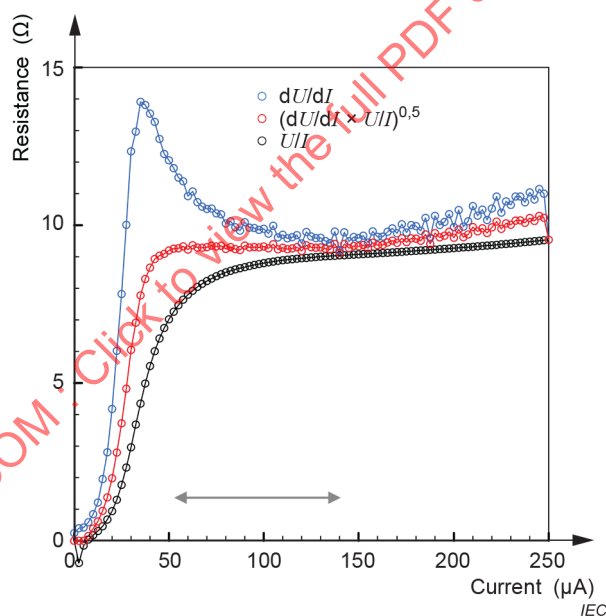


Figure A.9 – Application of geometric mean method to Figure A.8

The fitting method gives $R_n = 9,304\ 2\ (0,001\ 8)\ \Omega$ and $I_{ci} = 32,651\ (0,045)\ \mu\text{A}$. Figure A.10 shows a hyperbolic curve of $U = R_n \times (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ with the estimated values, as well as an ohmic line of $U = R_n \times I$.

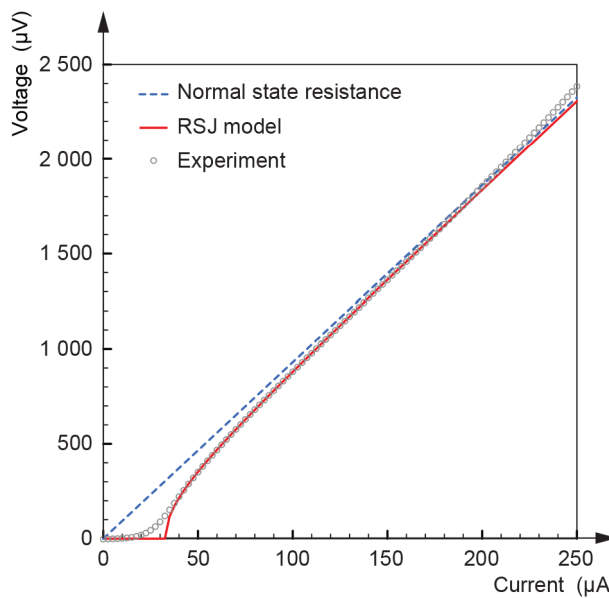


Figure A.10 – Result of RSJ model fitting for JL351

The value of R_n is also calculated with the geometric mean method by averaging the data in the range between 55 μA and 140 μA . The geometric mean method gives $R_n = 9,293 \, \Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly lower than the value obtained by the curve fitting 9,304 2 (0,001 8) Ω .

A.5.4 High- T_c Josephson junction (TUT)

Figure A.11 shows the $U-I$ curve of the YBCO step-edge junction tagged as "TUT," which was fabricated in Sydney (Australia) and measured at Toyohashi (Japan). No noise-rounding effect is recognized on the curve in this measurement. The maximum current was kept less than $I_m < 2 \times I_{ci}$ to ensure that the junction suffered no damage. No self-heating effect is observed. The value of 2 is considerably lower than $I_m \approx 5 \times I_{ci}$ of other $U-I$ curves. This data set is suitable to test whether the combined method can treat $U-I$ curves with narrow current scan range. In addition, although the current scan wave form shall be triangular in this document, it was sinusoidal. It can also be used to test a tolerance for measurement conditions.

Figure A.12 shows the result of geometric mean calculation. Since the dU/dI values are scattered, it is impossible to find a region appropriate to fitting. In order to reduce the scattering, the calculation of dU/dI is changed from $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ to $(U_{j+30} - U_j) / (I_{j+30} - I_j)$ and the result is shown in Figure A.13. The current range indicated by the grey arrow between 500 μA and 650 μA is selected for fitting.

The fitting method gives $R_n = 0,810 \, 0$ (0,005 0) Ω and $I_{ci} = 0,358 \, 2$ (0,0035) mA. Figure A.14 shows a hyperbolic curve of $U = R_n \times (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ with the estimated values, as well as an ohmic line of $U = R_n \times I$. The I_{ci} value is close to I_c compared with previous two $U-I$ curves, which indicates that the noise-rounding effect is almost negligible. The geometric mean method gives $R_n = 0,815 \, \Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly higher than the value obtained by the curve fitting 0,810 0 (0,005 0) Ω .

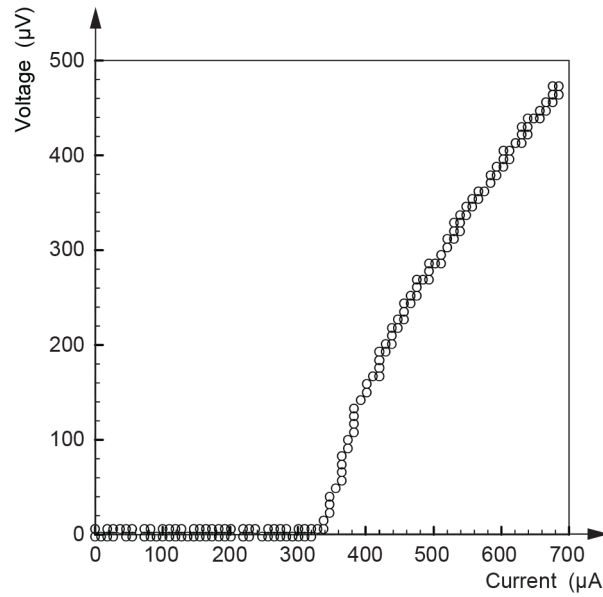


Figure A.11 – U - I curve of TUT with a small I_m

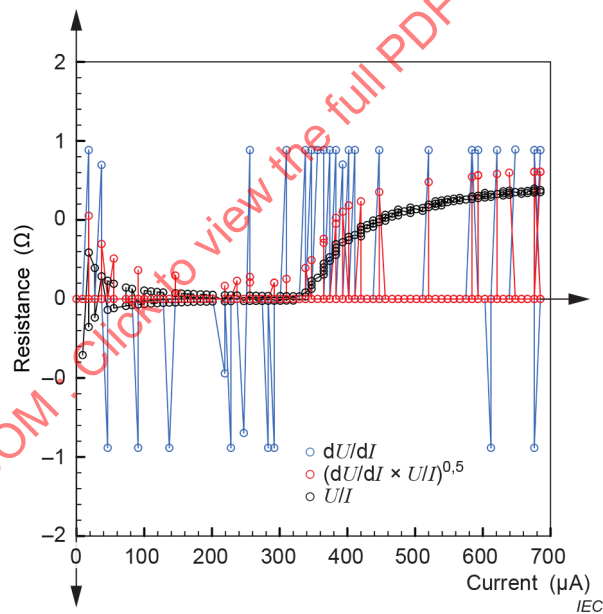


Figure A.12 – Application of geometric mean method to TUT

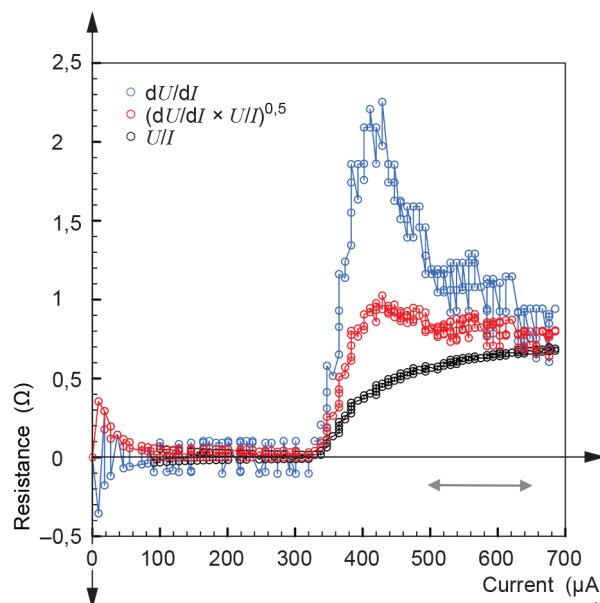


Figure A.13 – Application of adjusted geometrical mean method to TUT

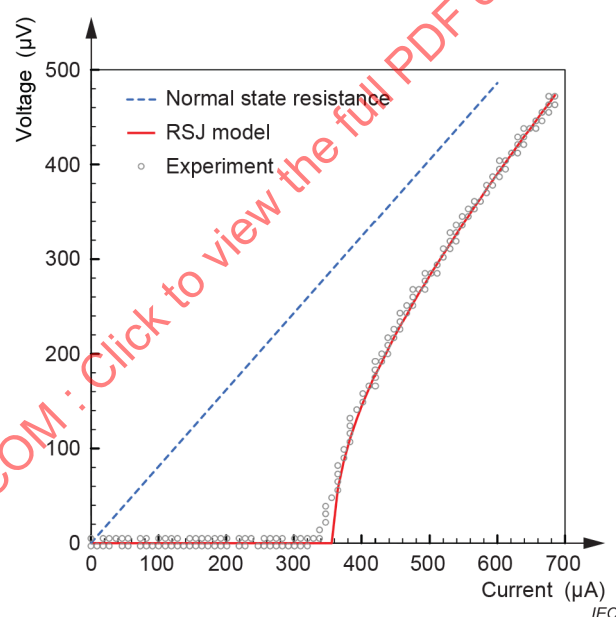


Figure A.14 – Result of RSJ model fitting for TUT

It is possible to estimate R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ even in the narrow current scan range, which shows the versatility of the combined method. Furthermore, it has been shown that large scattering of dU/dI can be reduced by adjusting the calculation increment. Nevertheless, the current scan wave form shall be triangular rather than sinusoidal. Therefore, this measurement is not used for the estimation of combined standard uncertainty of this document.

Annex B (informative)

Practical application to low- T_c Josephson junctions

B.1 General

The combined method is applied to low- T_c junctions to check universality of this document.

B.2 Estimation of R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$

B.2.1 General

The combined method is applied to four low- T_c Nb/Hf/Ti/Nb SNS junctions (IU1, IU2, IU3, IU4), which were fabricated and measured in Berlin (Germany). The estimation results for the four junctions are summarized in Table B.1. The geometric mean method is used to select $U-I$ data set regions for fitting. The hyperbolic function fitting method gives R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$.

Table B.1 – R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ and $u_{A,I}$ values of low- T_c Josephson junctions

Junction	Geometric mean	Hyperbolic function fitting after geometric mean			
	R_n [Ω]	R_n [Ω]	$u_{A,R}$	I_{ci} [μA]	$u_{A,I}$
IU1	0,600	0,603 68	0,000 96	109,24	0,25
IU2	1,016	1,018 73	0,000 28	37,050	0,039
IU3	5,017	5,034 3	0,002 0	5,480	0,029
IU4	3,556	3,569 0	0,005 6	18,706	0,098

B.2.2 Low- T_c Josephson junction (IU1)

Figure B.1 shows the result of the geometric mean method to select an optimum data set for fitting. The grey arrow shows that range. Figure B.2 shows the curve fitting result with $R_n = 0,603\ 68\ (0,000\ 96)\ \Omega$ and $I_{ci} = 109,24\ (0,25)\ \mu A$. The geometric mean method gives $R_n = 0,600\ \Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly lower than the value obtained by the curve fitting. Neither noise-rounding nor self-heating is observed.

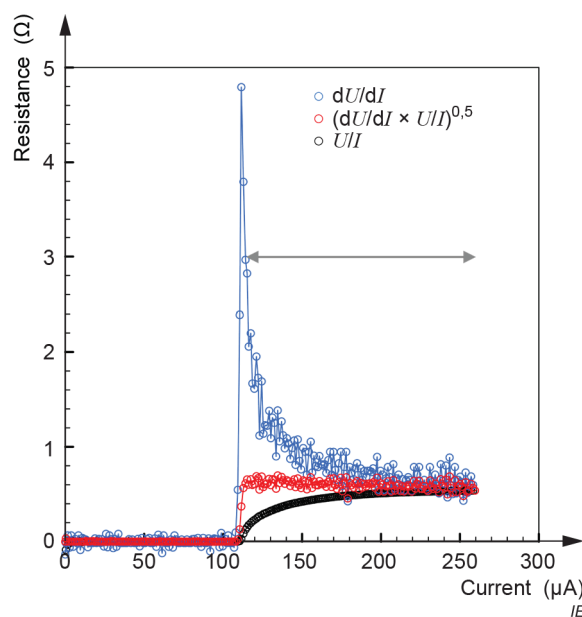


Figure B.1 – Application of geometric mean method to IU1

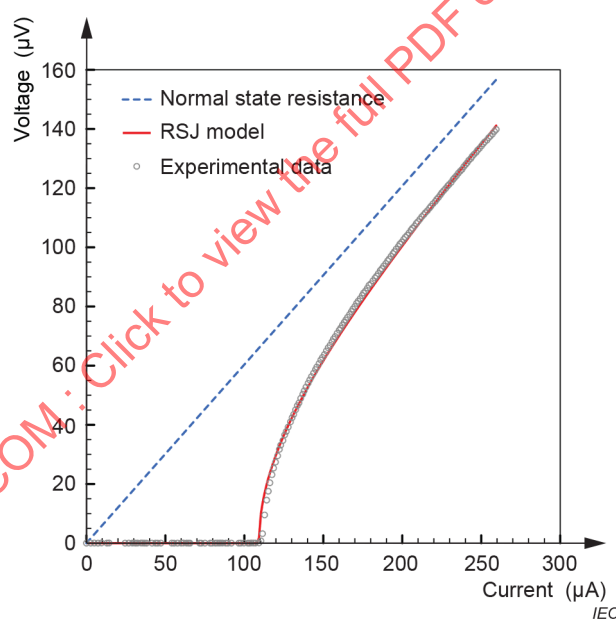


Figure B.2 – Result of RSJ model fitting for IU1

B.2.3 Low- T_c Josephson junction (IU2)

Figure B.3 shows the result of the geometric mean method to select an optimum data set for fitting. The grey arrow shows that range. Figure B.4 shows the curve fitting result with $R_n = 1,018\,73\,(0,000\,28)\,\Omega$ and $I_{ci} = 37,050\,(0,039)\,\mu\text{A}$. The geometric mean method gives $R_n = 1,016\,\Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly lower than the value obtained by the curve fitting. The noise-rounding effect is observed.

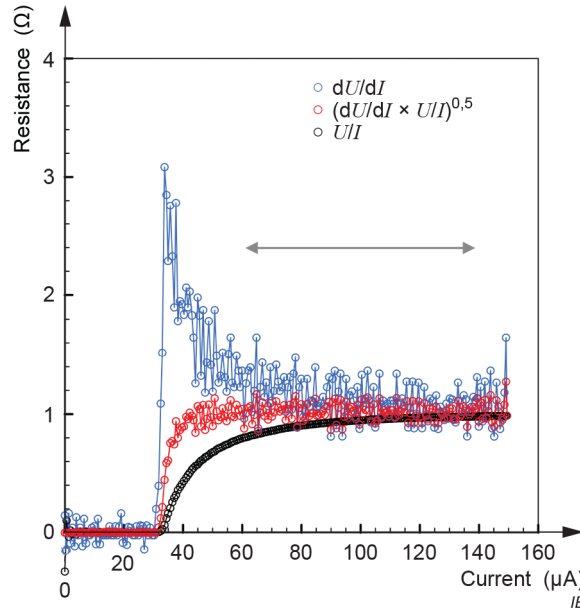


Figure B.3 – Application of geometric mean method to IU2

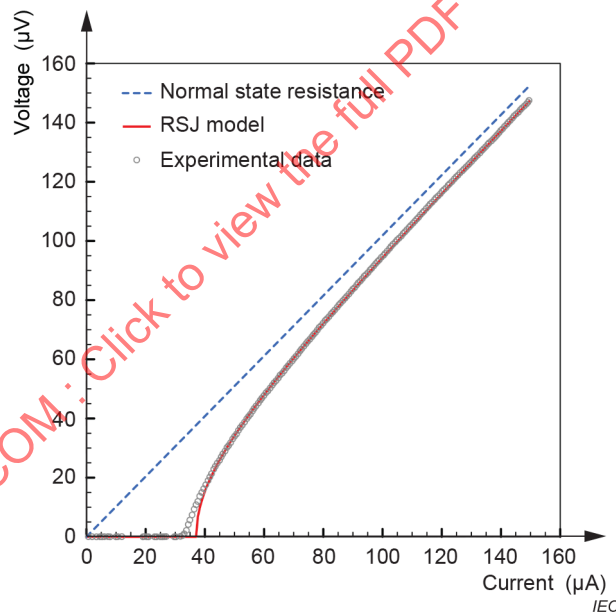


Figure B.4 – Result of RSJ model fitting for IU2

B.2.4 Low- T_c Josephson junction (IU3)

Figure B.5 shows the result of the geometric mean method to select an optimum data set for fitting. The grey arrow shows that range. Figure B.6 shows the curve fitting result with $R_n = 5,034\ 3\ (0,002\ 0)\ \Omega$ and $I_{ci} = 5,480\ (0,029)\ \mu A$. The geometric mean method gives $R_n = 5,017\ \Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly lower than the value obtained by the curve fitting. The noise-rounding effect is observed.

The number of data points in the U – I curve is 34, which is close to 25 that is the lowest number of data points for the condition of $100 \times f_s$. The combined method still gives appropriate estimation values.

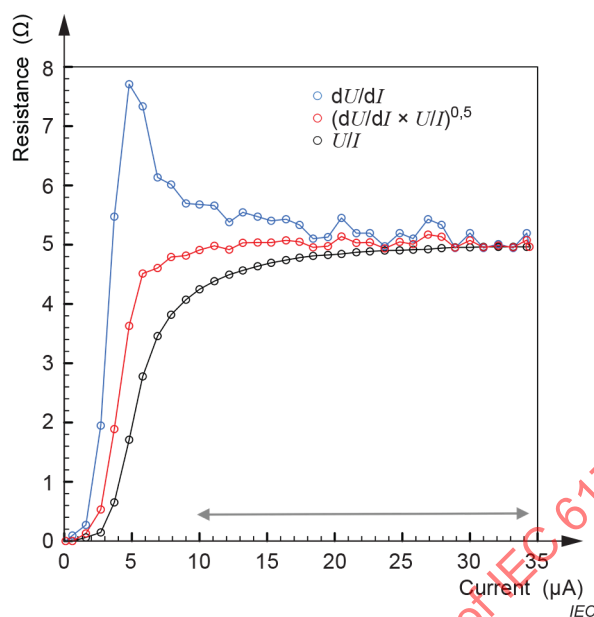


Figure B.5 – Application of geometric mean method to IU3

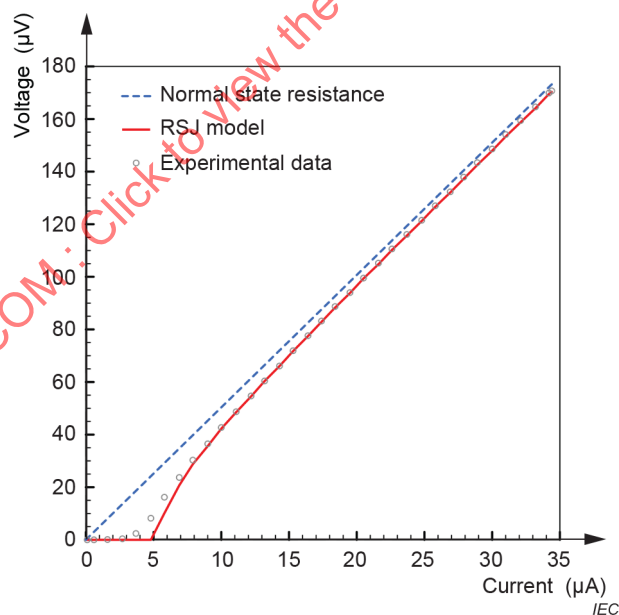


Figure B.6 – Result of RSJ model fitting for IU3

B.2.5 Low- T_c Josephson junction (IU4)

Figure B.7 shows the result of the geometric mean method to select an optimum data set for fitting. The grey arrow shows that range. Figure B.8 shows the curve fitting result with $R_n = 3,569\ 0\ (0,005\ 6)\ \Omega$ and $I_{ci} = 18,706\ (0,098)\ \mu\text{A}$. The geometric mean method gives $R_n = 3,556\ \Omega$, which is in good agreement with the fitting result and slightly lower than the value obtained by the curve fitting. The self-heating effect is observed over $65\ \mu\text{A}$.

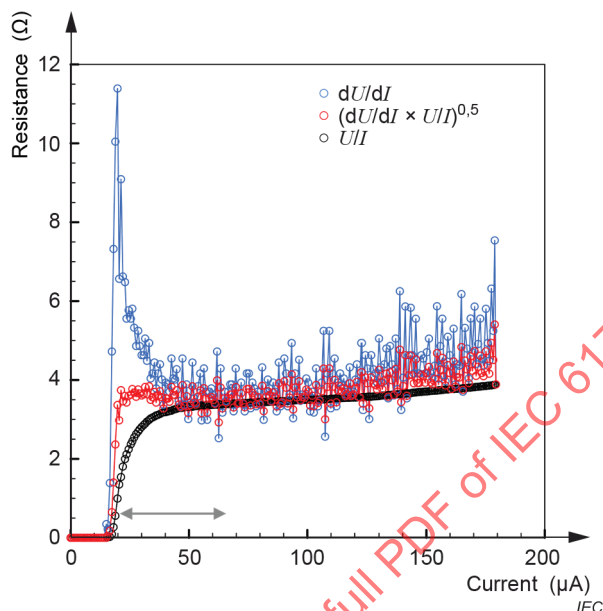


Figure B.7 – Application of geometric mean method to IU4

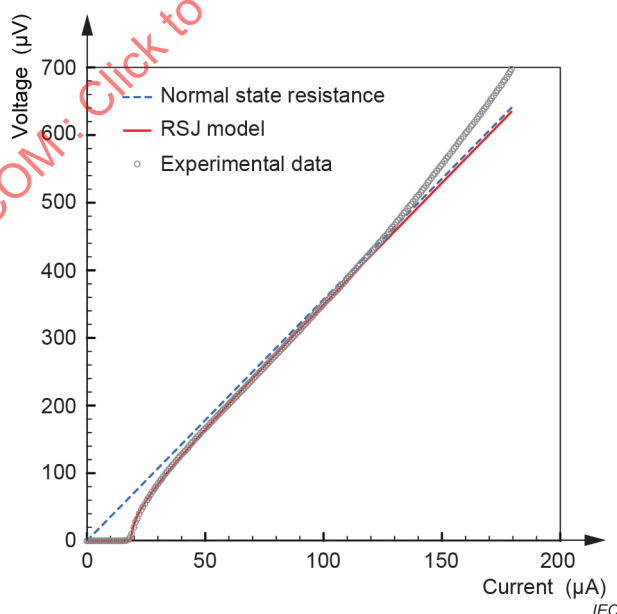


Figure B.8 – Result of RSJ model fitting for IU4

Bibliography

- [1] A. Barone and G. Paterno. *Physics and applications of the Josephson effect* (J. Wiley. New York. 1982) ISBN 0 471-01469-9
- [2] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:1995)
- [3] JCGM 102:2011, *Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Extension to any number of output quantities*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-2:2021

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	39
INTRODUCTION.....	41
1 Domaine d'application	42
2 Références normatives	42
3 Termes et définitions	42
4 Symboles	43
5 Principe de la méthode de mesure.....	44
6 Appareillage	44
6.1 Généralités	44
6.2 Système cryogénique.....	44
6.3 Système de mesure électrique	45
6.4 Circuits	45
7 Estimation de la résistance à l'état normal (R_n) et du courant critique intrinsèque (I_{ci})	46
7.1 Méthode de calcul.....	46
7.2 Critère de moyenne géométrique pour l'ajustement par la fonction hyperbolique	48
8 Incertitude type.....	48
8.1 Généralités	48
8.2 Incertitude de Type A.....	48
8.3 Incertitude de Type B.....	49
8.3.1 Généralités	49
8.3.2 Température	50
8.3.3 Mesurage de la tension	51
8.3.4 Mesurage du courant.....	52
8.4 Tableau-bilan.....	52
8.5 Exigence d'incertitude.....	53
9 Rapport d'essai	53
9.1 Identification du dispositif d'essai.....	53
9.2 Valeur R_n	53
9.3 Valeur I_{ci}	53
9.4 Incertitude type	53
9.5 Pression atmosphérique.....	54
9.6 Rapport facultatif divers	54
Annexe A (informative) Technique de calcul et application pratique aux jonctions Josephson à T_c élevée	55
A.1 Généralités	55
A.2 Méthode d'ajustement par la fonction hyperbolique	55
A.3 Méthode de la moyenne géométrique.....	56
A.4 Méthode combinée.....	57
A.5 Estimation de R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$	58
A.5.1 Généralités	58
A.5.2 Jonction Josephson à T_c élevée (JL350)	59
A.5.3 Jonction Josephson à T_c élevée (JL351)	61

A.5.4	Jonction Josephson à T_C élevée (TUT)	63
Annexe B (informative) Application pratique aux jonctions Josephson à faible T_C		66
B.1	Généralités	66
B.2	Estimation de R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$	66
B.2.1	Généralités	66
B.2.2	Jonction Josephson à faible T_C (IU1)	66
B.2.3	Jonction Josephson à faible T_C (IU2)	67
B.2.4	Jonction Josephson à faible T_C (IU3)	68
B.2.5	Jonction Josephson à faible T_C (IU4)	70
Bibliographie		71
Figure 1 – Circuits typiques pour le mesurage de la courbe caractéristique tension-courant ($U-I$)		46
Figure 2 – Courbe caractéristique $U-I$ théorique (trait rouge) et courbe de modèle de fonction hyperbolique (RSJ) (trait pointillé)		47
Figure 3 – Critère de moyenne géométrique et ajustement par le modèle RSJ pour une jonction TUT-JJ05 à 75,8 K		50
Figure 4 – Critère de moyenne géométrique et ajustement par le modèle RSJ pour une jonction TUT-JJ05 à 76,3 K		51
Figure A.1 – Courbe $U-I$ fondée sur un modèle de jonction court-circuitée à l'énergie du point zéro (RSJ)		56
Figure A.2 – Courbe $U-I$ altérée par l'arrondissement du bruit et l'autoéchauffement		56
Figure A.3 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à une courbe $U-I$ théorique représentée à la Figure A.1		58
Figure A.4 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à une courbe $U-I$ avec les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement représentés à la Figure A.2		58
Figure A.5 – Courbe $U-I$ d'une jonction JL350		59
Figure A.6 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à la Figure A.5		60
Figure A.7 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction JL350		61
Figure A.8 – Courbe $U-I$ d'une jonction JL351		62
Figure A.9 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à la Figure A.8		62
Figure A.10 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction JL351		63
Figure A.11 – Courbe $U-I$ d'une jonction TUT avec une valeur I_m		64
Figure A.12 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à une jonction TUT		64
Figure A.13 – Application de la méthode de la moyenne géométrique ajustée à une jonction TUT		65
Figure A.14 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction TUT		65
Figure B.1 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à la jonction IU1		67
Figure B.2 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction IU1		67
Figure B.3 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à la jonction IU2		68
Figure B.4 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction IU2		68
Figure B.5 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à la jonction IU3		69
Figure B.6 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction IU3		69
Figure B.7 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à la jonction IU4		70

Figure B.8 – Résultat de l'ajustement du modèle RSJ pour une jonction IU4 70

Tableau 1 – Incertitude type relative de Type A pour les jonctions Josephson à T_C élevée..... 49

Tableau 2 – Tableau-bilan pour R_n 52

Tableau 3 – Tableau-bilan pour I_{Cj} 53

Tableau A.1 – Valeurs R_n , I_{Cj} , $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$ des jonctions Josephson à T_C élevée 59

Tableau B.1 – Valeurs R_n , I_{Cj} , $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$ des jonctions Josephson à faible T_C 66

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-2:2021

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 22-2: Mesurage de la résistance à l'état normal
et du courant critique – Jonction Josephson à T_c élevée**

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.

L'IEC 61788-22-2 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité. Il s'agit d'une Norme internationale.

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

FDIS	Rapport de vote
90/484/FDIS	90/486/RVD

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

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61788, publiées sous le titre général *Supraconductivité*, 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 webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-2:2021

INTRODUCTION

L'IEC 61788-22 (toutes les parties) est une série de Normes internationales dédiées aux dispositifs électroniques supraconducteurs. La supraconductivité offre différentes possibilités de fabrication de capteurs et de détecteurs pour une grande variété de mesurandes. Plusieurs types de capteurs et détecteurs supraconducteurs ont été développés, qui utilisent des caractéristiques telles que les bandes d'énergie qui séparent l'état supraconducteur de l'état normal, la transition supraconductrice normale brusque, les caractéristiques non linéaires de courant-tension, les états cohérents supraconducteurs, et la quantification du flux magnétique. Les supraconducteurs sont influencés par l'interaction avec les champs électromagnétiques, les photons, les ions, etc. Les capteurs et détecteurs supraconducteurs présentent une performance extrêmement élevée pour la résolution, la réponse temporelle et la sensibilité, qui ne peuvent pas être réalisées par d'autres types de capteurs et de détecteurs.

L'IEC 61788-22-1 énumère les différents types de capteurs et détecteurs supraconducteurs. La jonction Josephson est un élément clé de certains capteurs et détecteurs. Les types de matériaux supraconducteurs utilisés pour les jonctions Josephson sont répartis en deux catégories: supraconducteur à faible T_c (LTS – *low- T_c superconductor*) et supraconducteur à T_c élevée (HTS – *high- T_c superconductor*). Le présent document (IEC 61788-22-2) définit une méthode de mesure de la résistance à l'état normal (R_n) et du courant critique intrinsèque (I_{ci}) des jonctions Josephson HTS qui permettent le mesurage magnétique à l'aide d'un interféromètre quantique supraconducteur (SQUID – *superconductor quantum interference device*), la détection des rayonnements de bandes de fréquence du millimètre au térahertz, ainsi que d'autres applications.

La méthode de mesure traitée dans le présent document est destinée à fournir une base technique acceptable appropriée aux ingénieurs qui travaillent dans le domaine de la technologie des supraconducteurs. Bien que le mécanisme de la supraconductivité à T_c élevée soit soumis à étude, l'effet Josephson observé dans les structures à faible cohésion telles que les structures bicristallines, à coin échelonné et de type rampe-bord, est fiable, et les paramètres caractéristiques pour les jonctions Josephson classiques LTS sont également valables pour les jonctions Josephson HTS. La résistance à l'état normal (R_n) et le courant critique (I_c), combinés sous la forme du produit $I_c R_n$ obtenu de manière expérimentale constituent les paramètres importants des jonctions Josephson HTS pour la conception des dispositifs supraconducteurs. Actuellement, la plupart des jonctions Josephson HTS présentent une courbe tension-courant ($U-I$) caractéristique non hystérétique, typique des jonctions supraconducteur-conducteur-normal-supraconducteur (SNS – *superconductor/normal-conductor/superconductor*). Deux types de déformations sont souvent observés sur les courbes $U-I$: les effets d'arrondissement du bruit et les effets de l'autoéchauffement. Plus particulièrement, l'effet d'arrondissement du bruit entraîne souvent une réduction considérable des valeurs maximales de courant sans chute de tension sur les courbes $U-I$, ce qui rend par conséquent difficile toute estimation d'une valeur de courant critique intrinsèque. Le présent document fournit une méthode qui permet d'obtenir des valeurs intrinsèques par la sélection d'une plage d'un ensemble de données afin d'éliminer les déformations et par l'ajustement d'une fonction modèle même lors de l'occurrence de deux effets.

Le courant critique obtenu par cette méthode normalisée est appelé par conséquent courant critique intrinsèque avec le symbole de I_{ci} variable, qui permet d'éliminer l'effet d'arrondissement du bruit sur les courbes $U-I$. D'autre part, la résistance à l'état normal n'est pas sensible à l'arrondissement du bruit et il est possible d'éviter l'effet d'autoéchauffement de manière à utiliser le symbole R_n variable. Le produit $I_{ci} R_n$ se révèle plus essentiel que le produit $I_c R_n$ pour la conception des dispositifs supraconducteurs. Les valeurs I_{ci} estimées par le présent document sont habituellement plus élevées que les valeurs I_c expérimentales.

Une application pratique du présent document aux jonctions Josephson HTS est présentée à l'Annexe A. La méthode d'estimation spécifiée dans le présent document s'applique aux jonctions Josephson LTS de type SNS pour en vérifier le caractère universel (voir l'Annexe B).

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 22-2: Mesurage de la résistance à l'état normal et du courant critique – Jonction Josephson à T_c élevée

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 est applicable aux jonctions Josephson à T_c élevée. Elle spécifie les termes, définitions et symboles, ainsi que la méthode de mesure et d'estimation de la résistance à l'état normal (R_n) et du courant critique intrinsèque (I_{ci}) fondée sur l'association de la sélection d'un ensemble de données à partir des courbes $U-I$ mesurées avec un critère de moyenne géométrique et de l'ajustement d'une fonction hyperbolique à cet ensemble de données.

2 Références normatives

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

IEC 61788-22-1, *Supraconductivité – Partie 22-1: Dispositifs électroniques supraconducteurs – Spécification générique pour les capteurs et détecteurs*

IEC 60617, *Symboles graphiques pour les diagrammes*: disponible à l'adresse <http://std.iec.ch/iec60617>

IEC 60050-815:2015, *Vocabulaire Electrotechnique International – Partie 815: Supraconductivité*: (disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>)

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions 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

courbe caractéristique $U-I$

courbe caractéristique $V-I$

courbe caractéristique $I-V$

ensemble de données de chute de tension entre deux supraconducteurs d'une jonction Josephson et de courant appliqué à la jonction

3.2**résistance à l'état normal** R_n

résistance normale

résistance entre deux supraconducteurs qui forme une jonction Josephson à l'état conducteur normal

Note 1 à l'article: Dans une jonction de pont Josephson, une résistance à l'état normal est également définie comme la résistance à un courant de polarisation qui supprime la supraconductivité bien au-delà du courant critique, lorsque l'effet d'autoéchauffement est négligeable.

Note 2 à l'article: Dans une jonction de tunnel Josephson, une résistance à l'état normal est également définie comme la résistance du tunnel à une tension de polarisation bien supérieure à $2\Delta/e$, où Δ est l'écart énergétique et e est la charge électrique élémentaire, lorsque l'effet d'autoéchauffement est négligeable.

3.3**courant critique intrinsèque** I_{ci} courant continu maximal qui peut être appliqué à une jonction Josephson sans provoquer de chute de tension dans ladite jonction en l'absence d'arrondissement du bruit sur une courbe caractéristique $U-I$

Note 1 à l'article: Le courant critique (I_c) est la valeur du courant continu maximal qui peut être appliqué à une jonction Josephson de manière expérimentale de sorte qu'il puisse être considéré comme passant sans résistance (IEC 61788-22-1).

Note 2 à l'article: La méthode décrite dans le présent document estime I_{ci} , dont la valeur est généralement plus élevée que I_c .

3.4**moyenne géométrique**racine carrée du produit de dU/dI et U/I obtenu à partir d'une courbe caractéristique $U-I$ **3.5****effet d'arrondissement du bruit**effet du bruit sur une courbe caractéristique $U-I$

Note 1 à l'article: L'effet d'arrondissement du bruit arrondit la forme de la courbe $U-I$ à proximité de I_{ci} à partir d'une forme théorique. De ce fait, une valeur I_c est inférieure à la valeur I_{ci} .

3.6**effet d'autoéchauffement**effet de la dissipation de puissance dû au courant de transport appliqué à une jonction Josephson sur une courbe caractéristique $U-I$

Note 1 à l'article: Le courant génère de la chaleur et une forme de courbe $U-I$ dans une région à courant élevé bien supérieure à la valeur I_{ci} s'écarte dans la direction ascendante au-dessus d'une droite correspondant à la valeur R_n .

4 Symboles U chute de tension dans deux supraconducteurs connectés par une faible cohésionNOTE Le symbole " I " peut également être utilisé. I courant passant à travers deux supraconducteurs connectés par une faible cohésion R_n résistance à l'état normal I_c courant critique expérimental I_{ci} courant critique intrinsèque estimé par le présent document $u_{A,R}$ incertitude type de Type A de la valeur R_n

$u_{A,I}$ incertitude type de Type A de la valeur I_{ci}

$u_{B,R}$ incertitude type de Type B de la valeur R_n

$u_{B,I}$ incertitude type de Type B de la valeur I_{ci}

5 Principe de la méthode de mesure

Deux types de déformations sont souvent observés sur les courbes $U-I$: l'arrondissement du bruit et l'autoéchauffement. Lorsque l'effet d'arrondissement du bruit est négligeable, la valeur I_{ci} est le courant maximal appliqué à la jonction sans résistance. Lorsque l'effet d'autoéchauffement et la propriété non linéaire dus à la supraconductivité sont négligeables, la valeur R_n de la jonction correspond à une valeur de U/I à un courant bien supérieur au courant critique de la jonction. Étant donné qu'un courant de sonde élevé peut endommager la jonction, il peut être nécessaire de fonder la détermination de R_n sur une plage de la courbe caractéristique $U-I$ obtenue pour des courants modérés. Les courants modérés s'avèrent aussi efficaces pour empêcher l'effet d'autoéchauffement. Dans le cas présent, une méthode d'ajustement non linéaire par les moindres carrés avec la fonction hyperbolique s'avère pratique pour déterminer les valeurs de R_n et I_{ci} . Même lorsque ces deux types de déformations existent, la combinaison du critère de la moyenne géométrique et de l'ajustement par la fonction hyperbolique donne des valeurs R_n et I_{ci} appropriées.

Les valeurs R_n et I_{ci} d'une jonction Josephson HTS sont déterminées par le choix d'un ensemble de données à partir de l'ensemble de données complet d'une courbe caractéristique $U-I$ avec le critère de moyenne géométrique, puis par l'ajustement du modèle de fonction hyperbolique (ou modèle de jonction court-circuitée à l'énergie du point zéro (RSJ – *resistively-shunted junction*)) [1]¹ sur cet ensemble de données sélectionné. Cette méthode est appelée méthode combinée. Le critère de la moyenne géométrique et la méthode d'ajustement par la fonction hyperbolique sont décrits à l'Article 7.

6 Appareillage

6.1 Généralités

L'appareillage exigé pour cette méthode de mesure comprend un système cryogénique et un système de mesure électrique.

6.2 Système cryogénique

Un cryostat ouvert avec azote liquide doit être utilisé pour refroidir les jonctions Josephson. La structure du cryostat doit être ouverte de sorte que la pression du bain soit égale à la pression atmosphérique. La pression atmosphérique terrestre est normalement comprise entre 950 hPa et 1 050 hPa, ce qui correspond à une plage de température comprise entre 76,8 K et 77,7 K. Le mesurage dans les conditions météorologiques anormales doit être évité. Une valeur de pression atmosphérique relevée par une source d'observation météorologique proche du site de mesure ou mesurée localement doit être consignée dans un rapport. Il convient que le cryostat soit équipé d'un blindage magnétique avec un facteur d'atténuation supérieur à 100 (–40 dB) et d'un blindage RF avec un facteur d'atténuation de 1 000 (–60 dB) à une fréquence de 100 kHz. Une sonde éprouvette, qui peut être composée d'une ou de plusieurs jonctions, d'un porte-éprouvette et d'une structure d'appui, doit être refroidie de la température ambiante à la température de l'azote liquide pendant au moins trois minutes.

Il est connu que la valeur I_c dépend du piégeage du flux qui se produit pendant le processus de refroidissement d'un état conducteur normal à un état supraconducteur. Par conséquent, le processus de refroidissement d'une température supérieure à T_c à une température de base du

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

bain d'azote liquide et l'estimation des valeurs R_n et I_{ci} doivent être répétés au moins 10 fois, et les valeurs R_n et I_{ci} obtenues à partir de l'ensemble de données $U-I$ qui présente la valeur I_{ci} la plus élevée doivent être consignées dans le rapport.

6.3 Système de mesure électrique

Il convient qu'un système de mesure des ensembles de données de courbes caractéristiques $U-I$ soit composé d'un générateur de formes d'onde, d'un système d'acquisition de données, d'amplificateurs différentiels et d'autres instruments nécessaires tels que des filtres. Une méthode à quatre bornes doit permettre de mesurer la tension et le courant. Les valeurs numériques de tension et de courant doivent être enregistrées dans le système d'acquisition de données au moyen d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) de résolution supérieure à huit bits. Les ensembles de données $U-I$ sont transférés vers un ordinateur pour l'estimation des valeurs R_n et I_{ci} . D'autres systèmes de mesure équivalents peuvent également être utilisés.

Lors de l'utilisation d'un générateur de formes d'onde, un courant de polarisation avec une vitesse de balayage constante doit être appliqué à la jonction, la chute de tension correspondante étant par ailleurs mesurée. Le courant de polarisation doit faire l'objet d'un balayage triangulaire qui passe d'une valeur négative à une valeur positive ou inversement, avec enregistrement simultané de la tension. Le temps de montée de $-I_m$ à $+I_m$ doit être supérieur à 10 ms, où I_m est le courant maximal. Une fréquence de balayage (f_s) inférieure à 50 Hz permet un mesurage de courant quasi continu, avec lequel les effets de capacité parasite et de capacité de jonction sont négligeables. Le nombre d'échantillons de données par seconde doit être compris entre $100 \times f_s$ et $200 \times f_s$ afin d'obtenir suffisamment de points de données. Les données $U-I$ dans le premier quadrant et les données en valeurs absolues dans le troisième quadrant doivent être utilisées pour l'estimation des valeurs R_n et I_{ci} décrite à l'Article 7.

Il convient d'utiliser les amplificateurs différentiels pour séparer les masses du cryostat du système d'acquisition de données. Il convient que la résistance d'entrée des amplificateurs différentiels soit supérieure à 100 k Ω . Il convient de régler la résistance d'entrée du système d'acquisition de données à une valeur élevée, par exemple, 1 M Ω . Il convient d'utiliser des filtres passe-bas avec une fréquence de coupure inférieure à 1 MHz environ. Il convient que l'étendue de mesure des données soit environ de $I_m \approx 5 \times I_{ci}$ afin d'éviter d'endommager la jonction et d'obtenir suffisamment de points de données. Le décalage d'origine doit être réduit le plus possible avant l'acquisition des données.

6.4 Circuits

Un exemple de circuit équivalent pour le mesurage de la courbe caractéristique $U-I$ est représenté à la Figure 1. L'état de la jonction Josephson indiquée dans l'IEC 60617-S01926:2017-10, ainsi que du câblage environnant est un état supraconducteur. Les limites supraconductrices normales indiquées par l'IEC 60617-S01925:2017-10 différencient le circuit supraconducteur du circuit conducteur normal. Le générateur de formes d'onde, la résistance de shuntage et le système d'acquisition de données peuvent être à la température ambiante. Le générateur de formes d'onde et l'oscilloscope numérique peuvent être remplacés par des instruments équivalents.

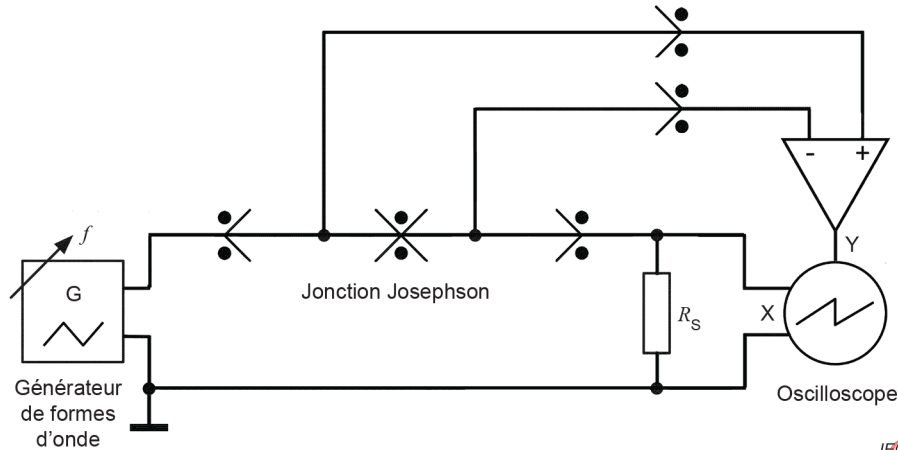


Figure 1 – Circuits typiques pour le mesurage de la courbe caractéristique tension-courant ($U-I$)

Le système d'acquisition de données enregistre la tension (U_y) entre deux électrodes de la jonction Josephson et la tension (U_x) qui traverse la résistance de shuntage de résistance R_s . Il convient d'obtenir les valeurs de courant en divisant les valeurs U_x par R_s . Il convient que la résistance R_s soit plus de 1 000 fois inférieure à la résistance d'entrée de l'oscilloscope ou de l'amplificateur différentiel. Il convient que la tolérance de la résistance de shuntage soit supérieure à $\pm 0,05\%$. Lorsque l'oscilloscope est réglé au mode X-Y, les courbes caractéristiques $U-I$ peuvent être observées à l'écran afin de vérifier l'étendue des effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement, ainsi que le décalage d'origine. Les ensembles de données des courbes $U-I$ avec des effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement extrêmement importants ne peuvent pas être utilisés pour estimer les valeurs R_n et I_{ci} . Dans ce cas, l'appareil de mesure ou la structure de jonction doit être amélioré.

7 Estimation de la résistance à l'état normal (R_n) et du courant critique intrinsèque (I_{ci})

7.1 Méthode de calcul

Les valeurs R_n et I_{ci} doivent être estimées par optimisation des variables R_n et I_{ci} à l'aide de la méthode d'ajustement par les moindres carrés de sorte que la fonction hyperbolique exprimée par la Formule (1) [1] soit la mieux adaptée à un ensemble de données de courbe caractéristique $U-I$ comme cela est représenté à la Figure 2 après sélection d'une plage d'ensembles de données selon le critère de moyenne géométrique mentionné en 7.2.

$$U = R_n \sqrt{I^2 - I_{ci}^2} \text{ pour } |I| > |I_{ci}|, \quad U = 0 \text{ pour } |I| < |I_{ci}| \quad (1)$$

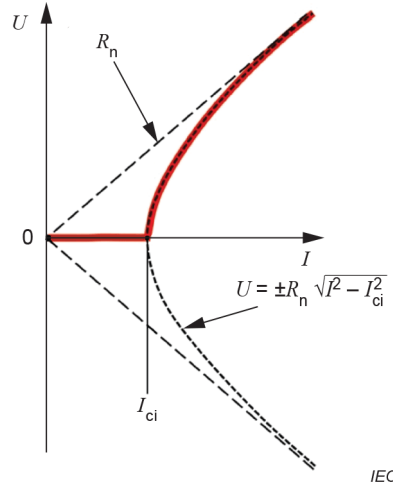


Figure 2 – Courbe caractéristique $U-I$ théorique (trait rouge) et courbe de modèle de fonction hyperbolique (RSJ) (trait pointillé)

Pour éviter les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement, le critère de moyenne géométrique doit permettre de déterminer une plage d'ensembles de données pour ajustement, compte tenu de trois courbes de dU/dI , U/I et $(dU/dI \times U/I)^{0,5}$ tracées par rapport à I . La plage d'ensembles de données appropriée doit être telle que la courbe de moyenne géométrique $(dU/dI \times U/I)^{0,5}$ par rapport à I présente un plateau avec un écart de 5 % et une diminution monotone du produit dU/dI . La moyenne géométrique de R_n est exprimée par la Formule (2).

$$R_n = \sqrt{(dU/dI) \times (U/I)}, \quad (2)$$

où

$$dU/dI = IR_n / \sqrt{I^2 - I_{ci}^2} \quad (3)$$

et

$$U/I = (R_n/I) \times \sqrt{I^2 - I_{ci}^2}, \quad (4)$$

ainsi

$$(dU/dI) \times (U/I) = R_n^2. \quad (5)$$

Les valeurs dU/dI et U/I peuvent être calculées au moyen d'un ensemble de données $U-I$ mesuré. La sélection, à partir de la courbe caractéristique $U-I$ complète, d'un ensemble de données approprié à l'ajustement par les moindres carrés permet de réduire le plus possible les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement.

La méthode d'ajustement non linéaire de la fonction hyperbolique doit être appliquée à un ensemble de données sélectionné par la méthode de la moyenne géométrique. Il convient que la condition de convergence de la méthode d'ajustement consiste à ce que les paramètres R_n et I_{ci} soient fixes à un rang qui correspond au chiffre de poids faible des valeurs d'incertitude type (valeurs d'écart-type) avec deux chiffres significatifs (voir le Tableau A.1 et le Tableau B.1).

Pour un calcul pratique, des progiciels avec une fonction d'ajustement non linéaire par les moindres carrés peuvent être utilisés pour l'estimation des valeurs R_n et I_{ci} et de l'écart-type correspondant de ces grandeurs de la moyenne. Les progiciels ne différencient pas les résultats d'estimation de manière significative. Des exemples d'estimation réels sont donnés en 8.3.2 et à l'Annexe A.

7.2 Critère de moyenne géométrique pour l'ajustement par la fonction hyperbolique

Une plage d'ensembles de données appropriée à la méthode d'ajustement par la fonction hyperbolique doit être telle que la courbe de moyenne géométrique $(dU/dI \cdot U/I)^{0,5}$ par rapport à I présente un plateau avec un écart de 5 % et une diminution monotone du produit dU/dI compte tenu de l'augmentation de I .

8 Incertitude type

8.1 Généralités

L'incertitude de Type A, qui constitue l'évaluation d'une composante de l'incertitude de mesure par une analyse statistique, est estimée par les écarts-types de R_n et I_{ci} lorsque la Formule (1) est adaptée à l'ensemble de données de la courbe caractéristique $U-I$ sélectionné par le critère de moyenne géométrique [2] [3]. L'incertitude de Type A définie dans le présent document est estimée au moyen de la courbe $U-I$ typique (jonction JL350) spécifiée à l'Annexe A. L'incertitude de Type B, qui constitue l'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique, comprend l'incertitude issue de la variation de température et du mesurage de la tension et du courant [2] [3].

La somme de l'incertitude de Type A et de l'incertitude de Type B, selon la loi de propagation permet d'obtenir l'incertitude type totale de cette méthode de mesure. L'application réelle du présent document exige l'estimation de l'incertitude de Type A à partir des données expérimentales uniquement. Lorsque les valeurs de l'incertitude de Type B présentées dans le Tableau 2 et dans le Tableau 3 sont prises en compte, les valeurs de l'incertitude de Type A doivent être inférieures aux valeurs spécifiées en 8.5.

8.2 Incertitude de Type A

Les grandeurs de la moyenne R_n et I_{ci} et leurs valeurs d'écart-type de $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$ sont obtenues en réduisant le plus possible la somme de

$$J = \sum_{j=1}^m \left[U_j - \left(R_n \sqrt{I_j^2 - I_{ci}^2} \right) \right]^2, \quad (6)$$

où, I_j et U_j ($j = 1, \dots, m$) sont les ensembles de données sélectionnés par le critère de moyenne géométrique.

Pour l'estimation de l'incertitude, la matrice de sensibilité $\mathbf{X}$ est exprimée par la Formule (7):

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial U}{\partial R_n} \right)_{j=1} & \left(\frac{\partial U}{\partial I_{ci}} \right)_{j=1} \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial U}{\partial R_n} \right)_{j=m} & \left(\frac{\partial U}{\partial I_{ci}} \right)_{j=m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

où

$$\frac{\partial U}{\partial R_n} = \sqrt{I_j^2 - I_{ci}^2} \quad (8)$$

et

$$\frac{\partial U}{\partial I_{ci}} = \frac{R_n I_{ci}}{\sqrt{I_j^2 - I_{ci}^2}} \quad (9)$$

Par conséquent, la matrice d'incertitude du paramètre est exprimée par la Formule (10):

$$\mathbf{U} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \times \hat{\sigma}^2 = \begin{bmatrix} u^2(R_n) & u(R_n, I_{ci}) \\ u(R_n, I_{ci}) & u^2(I_{ci}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

où

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{J}{m-1} \quad (11)$$

Pour l'estimation type de l'incertitude de Type A, l'ensemble de données $U-I$ qui comporte les valeurs d'incertitude type relatives les plus importantes (l'écart-type divisé par la moyenne) est sélectionné à partir des jonctions HTS spécifiées à l'Annexe A. Les données de la jonction TUT dans le Tableau 1 sont exclues, puisque le balayage du courant sinusoïdal ne satisfait pas au présent document. Les valeurs d'incertitude relatives les plus importantes sont de 0,029 % pour R_n et de 0,33 % pour I_{ci} pour la jonction JL350, et les valeurs d'écart-type correspondantes sont de 0,003 8 Ω et 0,21 μA (Tableau 1).

Tableau 1 – Incertitude type relative de Type A pour les jonctions Josephson à T_c élevée

Jonction (type)	Estimation par méthode combinée					
	R_n	$u_{A,R}$	Incrtitude type relative	I_{ci}	$u_{A,I}$	Incrtitude type relative
	Ω	Ω	%	μA	μA	%
JL350 (à coin échelonné YBCO)	12,934 0	0,003 8	0,029	63,33	0,21	0,33
JL351 (à coin échelonné YBCO)	9,304 2	0,001 8	0,019	32,651	0,045	0,14
TUT (à coin échelonné YBCO)	0,810 0	0,005 0	0,62	358,2	3,5	0,98

8.3 Incertitude de Type B

8.3.1 Généralités

L'incertitude de Type B du mesurage de R_n et I_{ci} spécifiée dans le présent document est exprimée par la Formule (12) et la Formule (13):

$$u_{B,R}^2 = \left(\frac{\partial R_n}{\partial T} \right)^2 \times u_T^2 + \left(\frac{\partial R_n}{\partial U} \right)^2 \times u_U^2 + \left(\frac{\partial R_n}{\partial I} \right)^2 \times u_I^2 \quad (12)$$

et

$$u_{B,I}^2 = \left(\frac{\partial I_{ci}}{\partial T} \right)^2 \times u_T^2 + \left(\frac{\partial I_{ci}}{\partial U} \right)^2 \times u_U^2 + \left(\frac{\partial I_{ci}}{\partial I} \right)^2 \times u_I^2 \quad (13)$$

où

$\partial R_n / \partial T$ est la sensibilité de R_n à une variation de température T ;

$\partial R_n / \partial U$ est la sensibilité de R_n à une variation de tension U ;

$\partial R_n / \partial I$ est la sensibilité de R_n à une variation de courant I ;

u_T , u_U et u_I constituant les valeurs d'écart-type pour le mesurage de la température, de la tension et du courant respectivement.

La notation applicable à I_{ci} est identique à celle applicable à R_n .

8.3.2 Température

La courbe $U-I$ doit être mesurée dans un bain d'azote liquide. La variation de la pression atmosphérique terrestre est à l'origine d'une variation de température entre 76,8 K et 77,7 K. Le rapport $\partial R_n / \partial T$ a été calculé de manière approchée par les valeurs R_n obtenues aux températures T_1 et T_2 , par application du présent document aux courbes $U-I$ expérimentales, puis par calcul de $[R_n(T_2) - R_n(T_1)] / [T_2 - T_1]$. La même méthode a été appliquée à I_{ci} . Les courbes $U-I$ d'une jonction YBCO bicristalline, étiquetée comme jonction "TUT-JJ05" ont été mesurées à 75,8 K et 76,3 K. La plage d'ensembles de données déterminée à l'aide du critère de moyenne géométrique et les courbes $U-I$ avec les résultats de l'ajustement par la fonction hyperbolique (modèle RSJ) sont représentées à la Figure 3 et à la Figure 4 pour 75,8 K et 76,3 K, respectivement.

Pour la valeur 75,8 K, un ensemble de données compris entre 35 μA et 107 μA et indiqué par la flèche, a été sélectionné pour l'ajustement par la fonction hyperbolique comme cela est représenté à la Figure 3 (a). L'ajustement par les moindres carrés avec la Formule (1) donne $R_n = 1,540\ 0\ (0,001\ 8)\ \Omega$ et $I_{ci} = 29,16\ (0,13)\ \mu A$ à 75,8 K. La Figure 3 (b) représente une courbe hyperbolique de $U = R_n \times (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ avec les valeurs estimées en rouge, et une droite ohmique (résistance à l'état normal) de $U = R_n \times I$ en bleu.

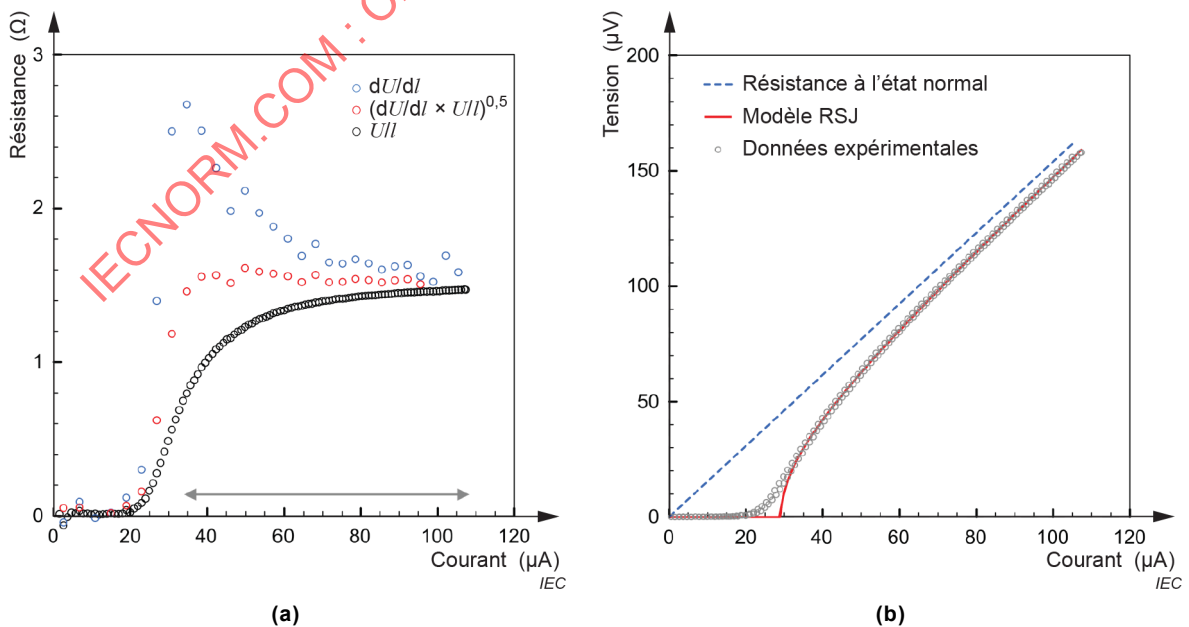


Figure 3 – Critère de moyenne géométrique et ajustement par le modèle RSJ pour une jonction TUT-JJ05 à 75,8 K

Pour la valeur 76,3 K, un ensemble de données compris entre 31 μA et 98 μA et indiqué par la flèche, a été sélectionné pour l'ajustement par la fonction hyperbolique comme cela est représenté à la Figure 4 (a). L'ajustement par les moindres carrés avec la Formule (1) donne $R_n = 1,539\,6\, (0,001\,8)\, \Omega$ et $I_{ci} = 26,32\, (0,11)\, \mu\text{A}$ à 76,3 K. La Figure 4 (b) représente une courbe hyperbolique de $U = R_n \times (I^2 - I_{ci}^2)^{0,5}$ avec les valeurs estimées et une droite ohmique de $U = R_n \times I$.

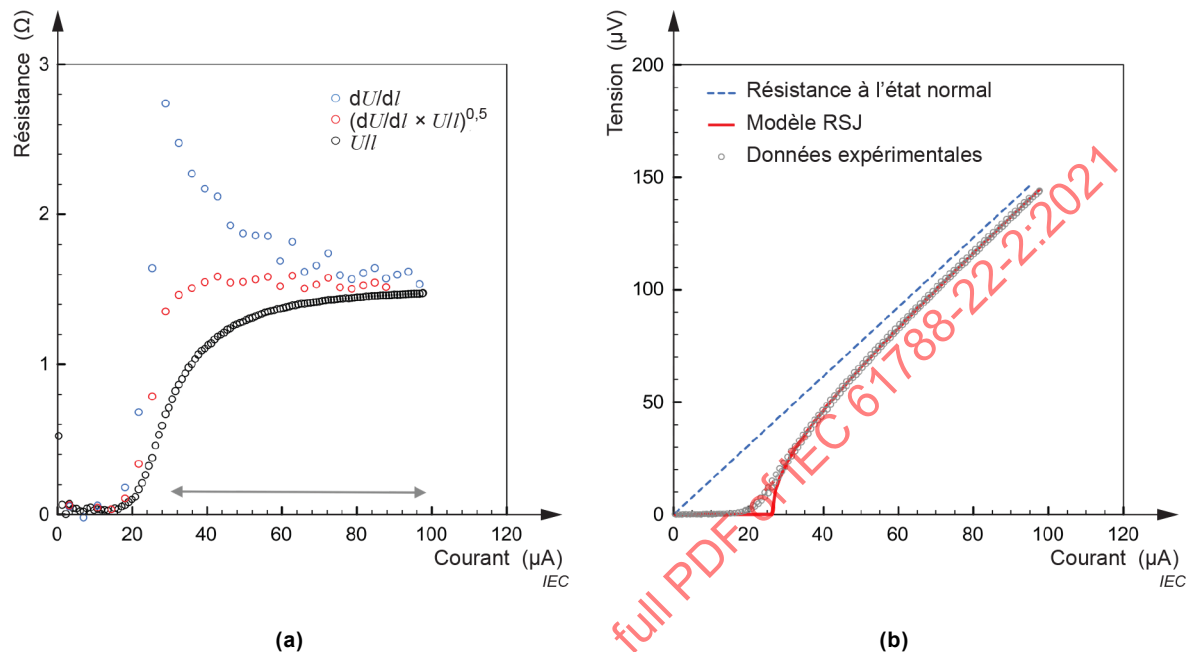


Figure 4 – Critère de moyenne géométrique et ajustement par le modèle RSJ pour une jonction TUT-JJ05 à 76,3 K

Par conséquent, les coefficients de sensibilité à la température sont estimés à $\Delta R_n/\Delta T = -0,000\,8\, \Omega/\text{K}$ et $\Delta I_{ci}/\Delta T = -5,68\, \mu\text{A}/\text{K}$. La valeur u_T est estimée par un écart-type de $(77,7\, \text{K} - 76,8\, \text{K}) / 2\sqrt{3} = 0,26\, \text{K}$, avec une fonction de densité de probabilité uniforme pour T .

8.3.3 Mesurage de la tension

Pour un mesurage de la tension au moyen du système d'acquisition de données, il convient de mesurer le signal avec une incertitude type relative de 0,3 % typique dans les systèmes d'acquisition de données avec un amplificateur, un CAN avec une résolution de huit bits et d'autres circuits nécessaires.

Les rapports $\partial R_n/\partial U$ et $\partial I_{ci}/\partial U$ sont estimés à l'aide de la méthode combinée avec une polarisation de 1 μV ajoutée à la courbe $U-I$ mesurée. En conséquence, les coefficients de sensibilité types de $\Delta R_n/\Delta U$ et $\Delta I_{ci}/\Delta U$ sont calculés en utilisant l'ensemble de données $U-I$ de la jonction TUT-JJ05 à 76,3 K.

La résistance à l'état normal d'origine est de 1,539 6 Ω , et la polarisation de 1 μV donne une résistance de 1,549 8 Ω . Par conséquent, la sensibilité $\Delta R_n/\Delta U$ est de 0,010 2 $\Omega/\mu\text{V}$.

Le courant critique intrinsèque d'origine I_{ci} est de 26,32 μA , et la polarisation de 1 μV donne un courant de 25,85 μA . Par conséquent, la sensibilité $\Delta I_{ci}/\Delta U$ est de $-0,47\, \mu\text{A}/\mu\text{V}$.

L'estimation de u_U tient compte d'une plage de pleine échelle de 1 mV pour un système CAN, ce qui produit l'écart-type de 3 μ V au maximum.

8.3.4 Mesurage du courant

Pour le mesurage du courant au moyen du système d'acquisition de données, il convient de mesurer la tension traversant une résistance de shuntage à l'aide d'un CAN avec une incertitude type relative ne dépassant pas 0,3 %.

Les rapports $\partial R_n / \partial I$ et $\partial I_{ci} / \partial I$ sont estimés à l'aide de la méthode combinée avec une polarisation de 1 μ A ajoutée à la courbe $U-I$ mesurée. En conséquence, les coefficients de sensibilité types de $\Delta R_n / \Delta I$ et $\Delta I_{ci} / \Delta I$ sont calculés en utilisant l'ensemble de données $U-I$ de la jonction TUT-JJ05 à 76,3 K.

La résistance à l'état normal d'origine est de 1,539 6 Ω , et la polarisation de 1 μ A donne une résistance de 1,526 5 Ω . Par conséquent, la sensibilité $\Delta R_n / \Delta I$ est de $-0,013 \Omega / \mu$ A.

Le courant critique intrinsèque d'origine I_{ci} est de 26,32 μ A, et la polarisation de 1 μ A donne un courant de 27,50 μ A. Par conséquent, la sensibilité $\Delta I_{ci} / \Delta I$ est de 1,18 μ A/ μ A.

L'estimation de u_I tient compte d'une plage de pleine échelle de 10 mV pour un système CAN, divisée par une résistance de shuntage R_s . La plage de pleine échelle est réglée de sorte qu'elle soit 10 fois supérieure à celle du mesurage de la tension des jonctions de Josephson. Par hypothèse, l'écart-type d'un système CAN à la pleine échelle de 10 mV est de 30 μ V au maximum. Par hypothèse, la valeur R_s est de 100 Ω , et dont la tolérance doit être supérieure à $\pm 0,05$ %, ce qui produit un écart-type de $100 \Omega \times 0,000 5 / \sqrt{3} = 0,029 \Omega$ dans une fonction de densité de probabilité uniforme. La variance de U/R_s est maximale à la pleine échelle de 10 000 μ V du CAN: $(30 \mu\text{V} / 100 \Omega)^2 + (10\,000 \mu\text{V} / 100 \Omega^2 \times 0,029 \Omega)^2 = 0,090 8$ dans une unité de $(\mu\text{A})^2$. Cet écart-type maximal de 0,30 μ A est utilisé dans l'estimation suivante.

8.4 Tableau-bilan

Le Tableau 2 et le Tableau 3 résument l'estimation type de l'incertitude type spécifiée dans le présent document. L'addition de l'incertitude de Type A $u_{A,R}$ et de l'incertitude de Type B $u_{B,R}$ selon la loi de propagation permet de calculer les valeurs totales d'incertitude type de $u_{\text{total},R}$.

Tableau 2 – Tableau-bilan pour R_n

Facteur	Symbole de paramètre	Symbole d'écart-type et type	Coefficient de sensibilité	Écart-type de paramètre	Contribution à $u_{\text{total},R}$
Mesurage U – I	–	$u_{A,R}$, A	–	–	0,001 8 Ω
Température	T	u_T , B	–0,000 8 Ω /K	0,26 K	0,000 2 Ω
Tension	U	u_U , B	0,010 Ω /μV	3,0 μV	0,030 Ω
Courant	I	u_I , B	–0,013 Ω /μA	0,30 μA	0,003 9 Ω
Incrtitude type composée		$u_{\text{total},R}$	0,030 Ω		
Incrtitude type relative		1,9 %			
$R_n \pm$ incrtitude élargie (facteur d'élargissement $k = 2$)		1,540 $\Omega \pm 0,060 \Omega$			

L'addition de l'incertitude de Type A $u_{A,I}$ et de l'incertitude de Type B $u_{B,I}$ selon la loi de propagation permet de calculer les valeurs totales d'incertitude type de $u_{\text{total},I}$.

Tableau 3 – Tableau-bilan pour I_{ci}

Facteur	Symbole de paramètre	Symbole d'écart-type et type	Coefficient de sensibilité	Écart-type de paramètre	Contribution à $u_{\text{total},I}$
Mesurage $U-I$	–	$u_{A,I}$, A	–	–	0,11 μA
Température	T	u_T , B	–5,7 $\mu\text{A/K}$	0,26 K	1,5 μA
Tension	U	u_U , B	–0,47 $\mu\text{A}/\mu\text{V}$	3,0 μV	1,4 μA
Courant	I	u_I , B	1,2 $\mu\text{A}/\mu\text{A}$	0,30 μA	0,36 μA
Incertitude type composée		$u_{\text{total},I}$	2,1 μA		
Incertitude type relative		8,0 %			
ci $\pm$ incertitude élargie (facteur d'élargissement $k = 2$)		26,3 $\mu\text{A} \pm 4,2 \mu\text{A}$			

8.5 Exigence d'incertitude

Comme l'indique l'incertitude type indiquée dans le Tableau 2 et le Tableau 3, l'incertitude du mesurage de la tension influence de manière considérable l'incertitude totale $u_{\text{total},R}$ et $u_{\text{total},I}$. En outre, l'incertitude totale $u_{\text{total},I}$ est dominée par la variation de la température, qui est physiquement raisonnable. Afin de ne pas dépasser de manière significative le niveau de l'incertitude type indiquée dans le Tableau 2 et le Tableau 3, les valeurs de $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$, qui constituent les valeurs d'écart-type de l'ajustement par les moindres carrés, doivent être inférieures à $2 \times u_{A,R}$ ou $2 \times u_{A,I}$. L'incertitude type correspondante de $u_{A,R}/R_n$ et $u_{A,I}/I_{\text{ci}}$ doit être inférieure à 0,2 % et 0,8 %, respectivement. Lorsque $u_{A,R}/R_n$ ou $u_{A,I}/I_{\text{ci}}$ dépasse ces valeurs, l'appareil de mesure doit être amélioré.

9 Rapport d'essai

9.1 Identification du dispositif d'essai

Le dispositif d'essai doit être identifié par les informations suivantes:

- nom du fabricant;
- numéro de série ou identification équivalente du dispositif;
- type de jonction Josephson.

9.2 Valeur R_n

Valeur R_n obtenue par le présent document

9.3 Valeur I_{ci}

Valeur I_{ci} obtenue par le présent document

9.4 Incertitude type

Valeurs de l'incertitude type relative de $u_{A,R}/R_n$ and $u_{A,I}/I_{\text{ci}}$ dans l'incertitude de Type A

9.5 Pression atmosphérique

Valeur de pression atmosphérique obtenue de la station météorologique la plus proche ou par mesurage local.

9.6 Rapport facultatif divers

Les données suivantes peuvent être consignées dans le rapport de manière facultative:

- valeur R_n obtenue par la méthode de la moyenne géométrique;
- valeur R_n dans chaque séquence de mesure;
- valeur I_{ci} dans chaque séquence de mesure;
- courbe $U-I$ brute;
- température convertie à partir d'une valeur de pression atmosphérique;
- température mesurée par un capteur;
- structure du cryostat, du blindage magnétique et du blindage RF;
- configuration du système de mesure électrique;
- composition chimique du film mince et du matériau de substrat.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-22-2:2021

Annexe A (informative)

Technique de calcul et application pratique aux jonctions Josephson à T_c élevée

A.1 Généralités

L'Annexe A fournit des références informatives concernant le calcul de R_n , I_{ci} et de l'incertitude type de Type A. La combinaison de la méthode de la moyenne géométrique et de la méthode d'ajustement par la fonction hyperbolique est appliquée aux courbes $U-I$ produites de manière artificielle et aux courbes $U-I$ expérimentales des jonctions Josephson HTS. Il est possible d'évaluer R_n et I_{ci} correctement, même lorsque les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement ne sont pas négligeables.

A.2 Méthode d'ajustement par la fonction hyperbolique

La fonction hyperbolique spécifiée à la Formule (1) explique les courbes caractéristiques $U-I$ des jonctions Josephson à T_c élevée [1]. La Figure A.1 représente une courbe caractéristique $U-I$ théorique d'une jonction avec $R_n = 10 \, \Omega$ et $I_{ci} = I_c = 30 \, \mu A$, où les ensembles de données de U_j et I_j sont produits de manière artificielle. Les valeurs U_j et I_j expriment les j -e données de U et I . L'estimation des valeurs R_n et I_{ci} et des valeurs (d'écart-type) d'incertitude correspondantes de $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$, appelées incertitude de Type A déduite par analyse statistique, s'effectue par optimisation des paramètres R_n et I_{ci} de manière à réduire le plus possible la somme des carrés de différence entre les données mesurées et la Formule (1), ce qui constitue un ajustement non linéaire par les moindres carrés. L'ajustement non linéaire par les moindres carrés peut être effectué à l'aide de la fonction d'analyse par régression des progiciels du commerce. En outre, un fichier de procédure de résolution dédié à l'estimation de R_n , I_{ci} et des valeurs de l'incertitude type correspondantes est disponible à l'adresse; <https://www.iec.ch/tc90/supportingdocuments>.

En réalité, un écart par rapport à la courbe hyperbolique est observé dans de nombreux cas. L'arrondissement du bruit et l'autoéchauffement représentent deux causes principales de cet écart. La Figure A.2 représente une courbe $U-I$ d'une jonction qui subit un écart d'arrondissement du bruit dans une plage de courants inférieure à $30 \, \mu A$, ainsi qu'un écart d'autoéchauffement dans une plage de courants supérieure à $150 \, \mu A$, où les ensembles de données de U_j et I_j sont produits de manière artificielle. L'ajustement d'une courbe hyperbolique au moyen de l'ensemble de données complet donne une estimation non fiable. Une solution pratique consiste à sélectionner un ensemble de données correct dans une plage non altérée par les deux effets. La méthode de la moyenne géométrique décrite à l'Article A.3 fournit un bon critère de sélection de l'ensemble de données.

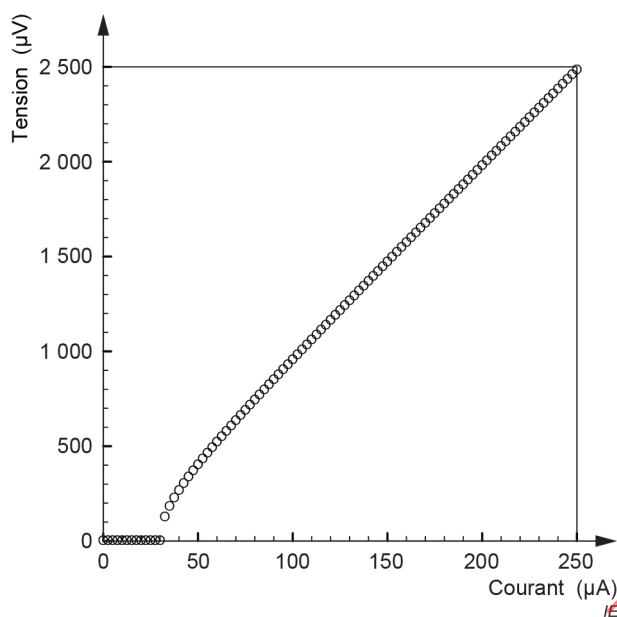


Figure A.1 – Courbe U – I fondée sur un modèle de jonction court-circuitée à l'énergie du point zéro (RSJ)

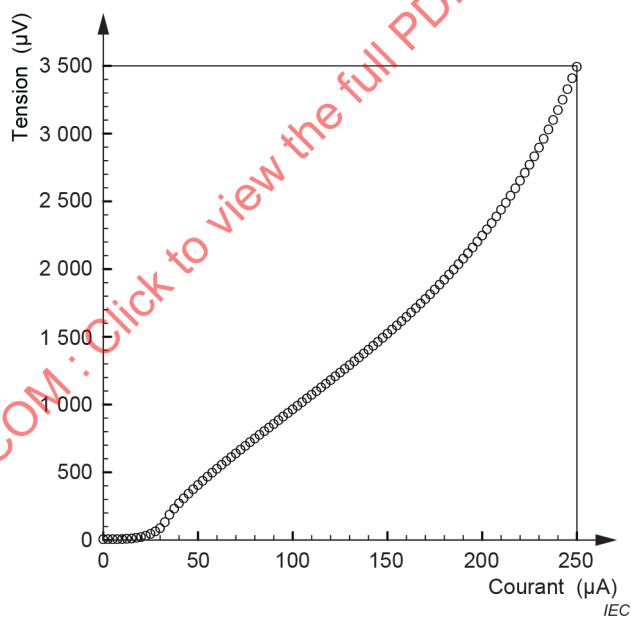


Figure A.2 – Courbe U – I altérée par l'arrondissement du bruit et l'autoéchauffement

A.3 Méthode de la moyenne géométrique

La méthode de la moyenne géométrique constitue une méthode de calcul de R_n avec la moyenne géométrique d'une dérivée de la tension par rapport au courant, dU/dI , et un rapport tension/courant, U/I , à partir d'un ensemble de données U – I mesuré (à l'aide des formules de la Formule (2) à la Formule (5)).

Le calcul de dU/dI et U/I utilise $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ et U_j/I_j de manière incrémentielle. La valeur de R_n est calculée par $[(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)]^{0,5} \times (U_j/I_j)^{0,5}$.

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir obtenir directement la valeur de R_n sans une analyse de régression. Le fait que la valeur de $(U_{j+1} - U_j) / (I_{j+1} - I_j)$ fluctue parfois de manière considérable en raison de la nature de la différenciation numérique comme cela est observé à la Figure A.12 constitue l'inconvénient de cette méthode. Une estimation de I_{ci} n'est pas possible.

A.4 Méthode combinée

La méthode de la moyenne géométrique est appliquée à la courbe $U-I$ de la Figure A.1 et le résultat est représenté à la Figure A.3. Les valeurs de la moyenne géométrique passent brusquement de 0 à 10 à un courant de 30 μA , et maintiennent un plateau dans une plage supérieure à 30 μA . Ce plateau parfait est observé dans les courbes $U-I$ théoriques. Les valeurs de dU/dI diminuent de façon monotone, ce qui constitue une exigence importante pour la sélection d'une plage d'ensembles de données pour ajustement. La région du plateau a une résistance de 10 Ω , en accord avec la valeur R_n à la Figure A.1. Cette résistance valide la méthode de la moyenne géométrique pour l'estimation de R_n .

La méthode de la moyenne géométrique est également appliquée à la courbe $U-I$ de la Figure A.2 avec les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement. La moyenne géométrique, représentée à la Figure A.4, augmente de manière progressive jusqu'à ce que le courant atteigne 50 μA sans une forte hausse. La diminution de dU/dI s'effectue dans une plage comprise entre 34 μA et 100 μA , suivie d'une augmentation supérieure à 100 μA . L'estimation de R_n s'avère difficile étant donné qu'il n'existe pas de plateau parfait et que la moyenne géométrique augmente de manière progressive simultanément à l'augmentation du courant. Cette observation est typique des courbes $U-I$ déformées par les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement. Néanmoins, dans une plage comprise entre 50 μA et 100 μA , la moyenne géométrique présente un plateau imparfait avec un écart de 5 % conjointement à une diminution de dU/dI simultanée à l'augmentation du courant. Cette configuration satisfait au critère défini en 7.2 afin de sélectionner un ensemble de données applicable à la méthode d'ajustement par la fonction hyperbolique. Les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement ne sont pas significatifs dans cette région. Il convient d'effectuer l'ajustement par la fonction hyperbolique au moyen d'un des progiciels d'analyse de régression ou d'un fichier de résolution disponible à l'adresse: <https://www.iec.ch/tc90/supportingdocuments>. Il a été confirmé que les différents progiciels ont produit les mêmes résultats avec R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$ pour les courbes $U-I$ expérimentales à l'Article A.5.

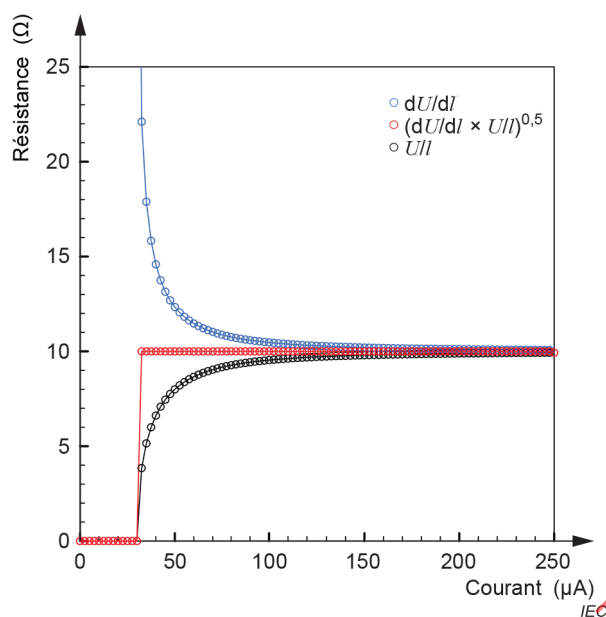


Figure A.3 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à une courbe $U-I$ théorique représentée à la Figure A.1

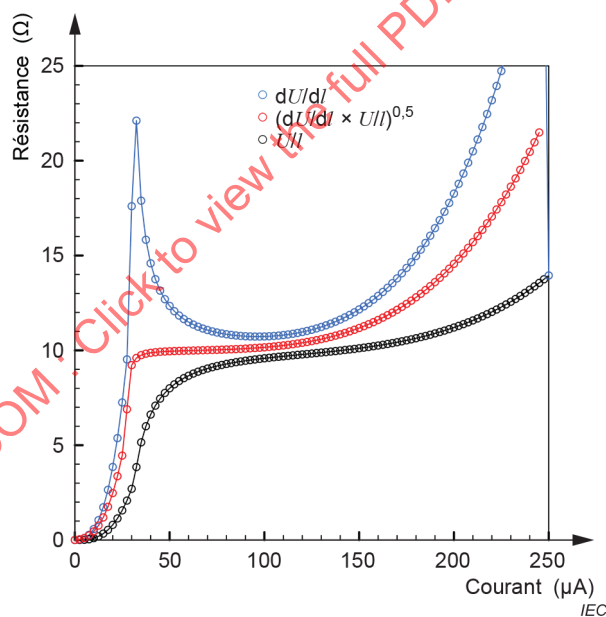


Figure A.4 – Application de la méthode de la moyenne géométrique à une courbe $U-I$ avec les effets d'arrondissement du bruit et d'autoéchauffement représentés à la Figure A.2

A.5 Estimation de R_n , I_{ci} , $u_{A,R}$ et $u_{A,I}$

A.5.1 Généralités

La méthode combinée est appliquée à trois jonctions Josephson à T_c élevée, étiquetées JL350, JL351 et TUT.