

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Test procedure for the determination of the temperature index of enamelled and tape wrapped winding wires

Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés et enveloppés de ruban



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 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
Fax: +41 22 919 03 00
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 corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 60 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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: csc@iec.ch.

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.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

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 aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 60 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Test procedure for the determination of the temperature index of enamelled and tape wrapped winding wires

Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés et enveloppés de ruban

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.060.10

ISBN 978-2-8322-2676-6

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Summary of procedure	7
5 Test specimens	7
5.1 Preparation.....	7
5.1.1 Enamelled round wire with a nominal conductor diameter of 0,224 mm up to and including 2,65 mm	7
5.1.2 Tape wrapped round wire and enamelled or tape wrapped rectangular wire	10
5.2 Varnish impregnation.....	12
5.3 Notes on number of test specimens	13
5.4 Specimen holder	13
5.4.1 For specimens according to 5.1.1	13
5.4.2 For specimens according to 5.1.2	14
6 Temperature exposure.....	14
7 Test voltage and its application	16
8 Calculations	16
8.1 Specimen failure time	16
8.2 Time to failure.....	17
8.3 Linearity of data	17
8.4 Calculating and plotting thermal endurance and temperature index	17
9 Report	18
Annex A (normative) Method for calculation of the regression line	19
Annex B (normative) Correlation coefficient	24
Bibliography.....	26
Figure 1 – Device used to form enamelled round wire test specimen	8
Figure 2 – Spacer	8
Figure 3 – Twist forming jig.....	9
Figure 4 – Test specimen set up in forming jig	9
Figure 5 – Test specimen formed with loop cut	10
Figure 6 – Jig for bending large magnet wire, dielectric test specimen	11
Figure 7 – Forming jig and test specimen.....	12
Figure 8 – Specimen holder	13
Figure 9 – Specimen holder and electrical connection fixture	14
Figure 10 – Thermal endurance graph – Temperature index	18
Figure A.1 – Plot of regression line based on sample calculation (Table A.2).....	23
Table 1 – Force and number of twists for specimens.....	8
Table 2 – Proof voltage for round enamelled wire	10
Table 3 – Recommended exposure times in days per cycle.....	15

Table 4 – Proof voltage for tape-wrapped round and for enamelled or tape-wrapped rectangular wire	16
Table A.1 – Commonly used test temperatures in degrees Celsius and the corresponding kelvins with its reciprocal and reciprocal squared values.....	21
Table A.2 – Sample calculation.....	22

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

TEST PROCEDURE FOR THE DETERMINATION OF THE TEMPERATURE INDEX OF ENAMELLED AND TAPE WRAPPED WINDING WIRES

FOREWORD

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

International Standard IEC 60172 has been prepared by IEC Technical Committee 55: Winding wires.

This fourth edition cancels and replaces the third edition published in 1987, Amendment 1:1997 and Amendment 2:2010. This edition constitutes a technical revision.

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

- Revision of Clause 1, Scope, to incorporate appropriate text from former Clause 2, Object;
- Deletion of Clause 2, Object, by placement of its text into existing clauses;
- New Clause 2, Normative references;
- Revision of 5.1.1, 5.3 and 5.4 with corrections to Amendment 2 to the third edition;
- Revision of Clause 7 as to clarify which specimens comply with Table 3 and Table 4;
- Revision of figures with high-resolution photos and graphs.

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

FDIS	Report on voting
55/1518/FDIS	55/1524/RVD

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

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

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

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

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

TEST PROCEDURE FOR THE DETERMINATION OF THE TEMPERATURE INDEX OF ENAMELLED AND TAPE WRAPPED WINDING WIRES

1 Scope

This International Standard specifies, in accordance with the provisions of IEC 60216-1, a method for evaluating the temperature index of enamelled wire, varnished or unvarnished with an impregnating agent, and of tape wrapped round and rectangular wire, in air at atmospheric pressure by periodically monitoring changes in response to AC proof voltage tests. This procedure does not apply to fibre-insulated wire or wire covered with tapes containing inorganic fibres.

NOTE The data obtained according to this test procedure provide the designer and development engineer with information for the selection of winding wire for further evaluation of insulation systems and equipment tests.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 60216-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 3: Instructions for calculating thermal endurance characteristics*

3 Terms and definitions

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

3.1 temperature index

TI

numerical value of the Celsius temperature expressed in degrees Celsius characterizing the thermal capability of an insulating material or an insulation system

Note 1 to entry: In case of insulating materials, the temperature index is derived from the thermal endurance relationship at a given time, normally 20 000 hours. It may be used as basis for determination of the material's temperature class.

Note 2 to entry: In case of insulation systems, the temperature index may be derived from known service experience or from a known comparative functional evaluation of an evaluated and established reference insulation system as basis.

[SOURCE: IEC 60050-212:2010, 212-12-11]

3.2 specimen failure time

number of hours at the exposure temperature that have elapsed at the time a specimen fails the proof test

3.3 time to failure

L

number of hours to failure calculated from the specimen failure times for a set of specimens at one exposure temperature

4 Summary of procedure

A set of specimens in accordance with Clause 5 is subjected to a testing cycle. This cycle consists of a heat-storing period at a temperature given in Clause 6, followed by a proof voltage test at room temperature in accordance with Clause 7.

This cycle is repeated until a sufficient number of specimens has failed. The time to failure is calculated in accordance with Clause 8. The test is carried out at three or more temperatures. A regression line is calculated in accordance with 8.4 and the time to failure values plotted on thermal endurance graph paper as a function of the exposure temperature.

The temperature in degrees Celsius, corresponding to the point of intersection of the regression line with the ordinate of 20 000 h endurance represents the temperature index of the winding wire under test.

5 Test specimens

5.1 Preparation

5.1.1 Enamelled round wire with a nominal conductor diameter of 0,224 mm up to and including 2,65 mm

The grade of insulation used for determining the thermal index shall be grade 2 or grade 2B for self-bonding winding wires.

Wire sizes 0,315 mm and 0,28 mm are permitted for use when the specification size range is limited to 0,50 mm and finer.

NOTE For round enamelled winding wires, in order to avoid undue fragility of the test specimen, experience has shown that nominal conductor diameters of 0,800 mm up to and including 2,65 mm are generally found convenient to handle and test.

Specimens shall be prepared as follows:

- a) A wire specimen approximately 400 mm in length shall be twisted together over a distance of 125 mm with a device as shown in Figure 1. The force (weight) applied to the wire pair while being twisted and the number of twists are specified in Table 1.

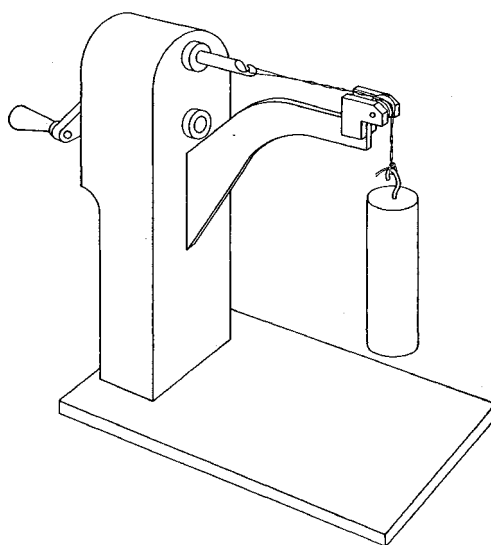
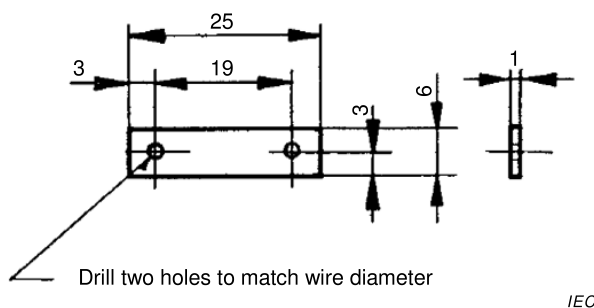


Figure 1 – Device used to form enamelled round wire test specimen

Table 1 – Force and number of twists for specimens

Nominal diameter mm		Force applied to wire pair N	Number of twists per 125 mm
Over	Up to and including		
0,224	0,25	0,85	33
0,25	0,35	1,7	23
0,35	0,50	3,4	16
0,50	0,75	7,0	12
0,75	1,05	13,5	8
1,05	1,50	27,0	6
1,50	2,15	54,0	4
2,15	3,50	108,0	3

- b) Spacers may be prepared as shown in Figure 2. Such thermally stable insulating materials as ceramic or silicone glass fibre laminate may be used. The spacers are marked with a suitable identifying letter or number.

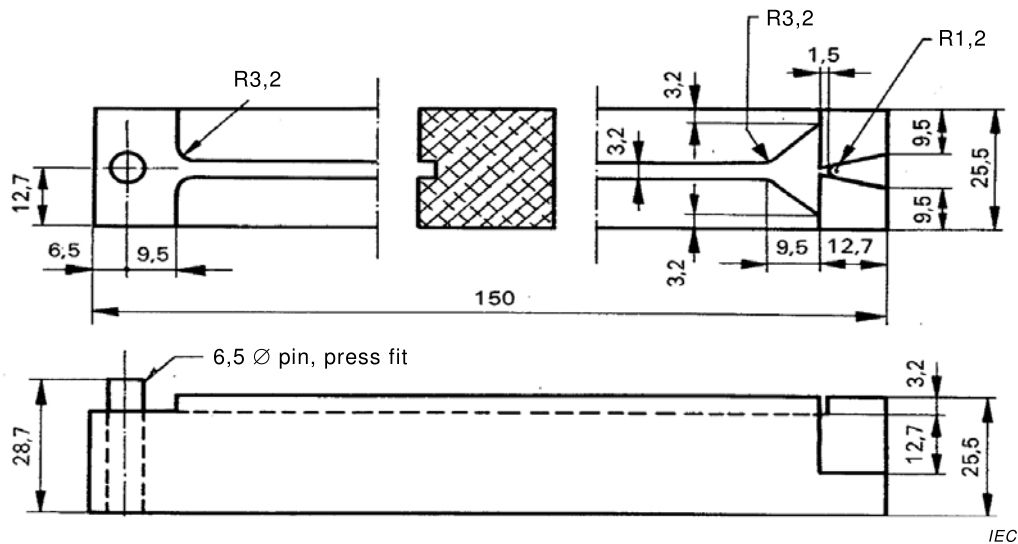


Material: Silicone glass laminate

Dimensions in millimetres

Figure 2 – Spacer

- c) The test specimens may be shaped in a jig, an engineering drawing of which is shown in Figure 3. A specimen is placed in the jig and a spacer, placed on the parallel leads of the twisted pair, is brought up to the face of the jig as shown in Figure 4. The leads are then bent parallel to hold the spacer in position. The forming jig provides more uniform test specimens. If a specimen holder is used, the spacers are unnecessary.



R = Radius of bend

Dimensions in millimetres

Figure 3 – Twist forming jig

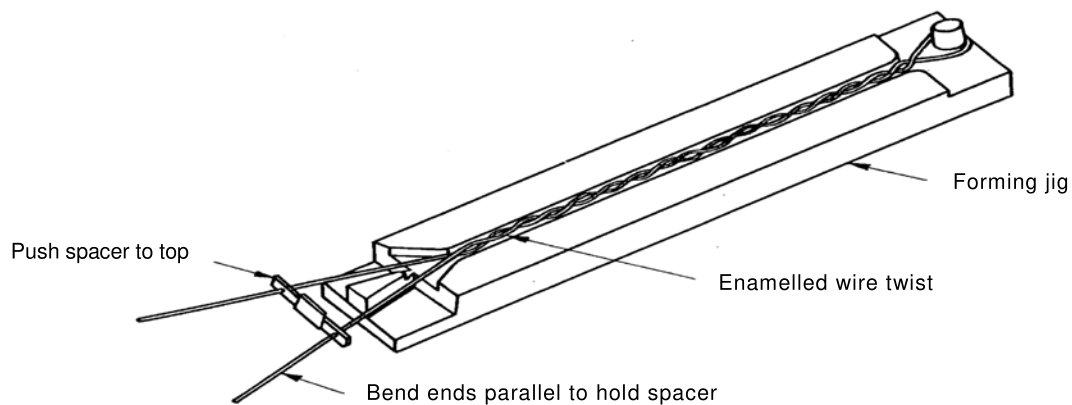


Figure 4 – Test specimen set up in forming jig

- d) The loop at the end of the twisted section shall be cut at two places (not one) to provide the maximum spacing between the cut ends as shown in Figure 5. Any bending of the wires, at this end or the other untwisted end, to ensure adequate separation between the wires shall avoid sharp bends or damage to the insulation.

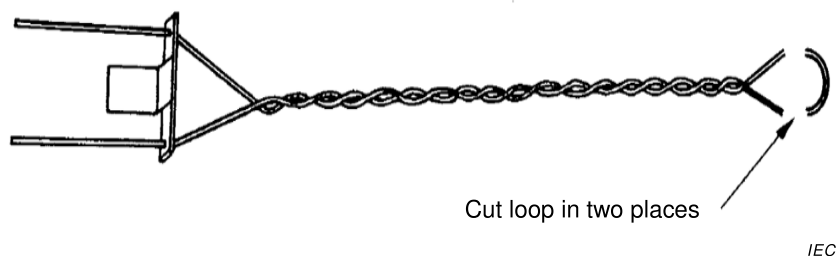


Figure 5 – Test specimen formed with loop cut

- e) In order to ensure homogeneity of the batch of test specimens, it is recommended that test specimens be subjected to a test voltage three times the value given in Table 2 for 1 s.

Table 2 – Proof voltage for round enamelled wire

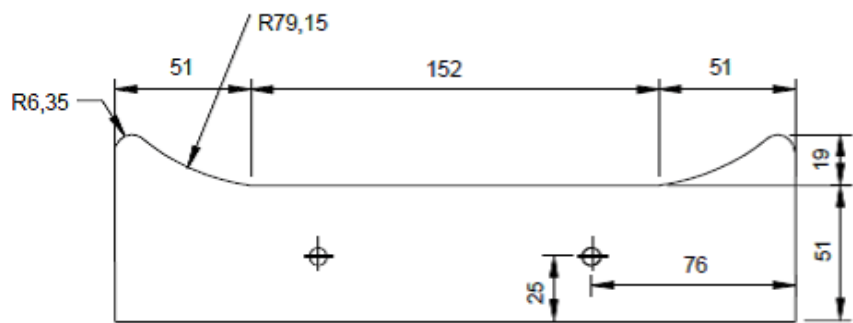
Increase in diameter due to the insulation (mm)		Voltage (rms)
Over	Up to and including	
–	0,015	300
0,015	0,024	300
0,024	0,035	400
0,035	0,050	500
0,050	0,070	700
0,070	0,090	1 000
0,090	0,130	1 200

5.1.2 Tape wrapped round wire and enamelled or tape wrapped rectangular wire

NOTE This procedure applies to any convenient dimension of round or rectangular wire. However, selecting wires having dimensions that minimize the bending force needed to shape the test specimen will make the procedure easier to perform. Wire with high stiffness will yield specimens with poor wire-to-wire contact areas.

Specimens shall be prepared as follows:

- Two straight specimens of wire each of 250 mm length shall be cut from the supply spool.
- 10 mm to 15 mm of the insulation shall be removed from one end of each piece of wire to provide for electrical connection.
- Each specimen shall be formed in a jig, as shown in Figure 6. This produces a straight centre section of about 150 mm with bent ends, which provide the necessary flare at both ends of the final specimen.

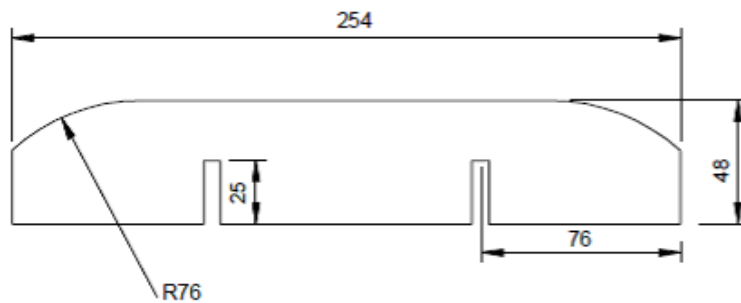


IEC

a) Fixed template

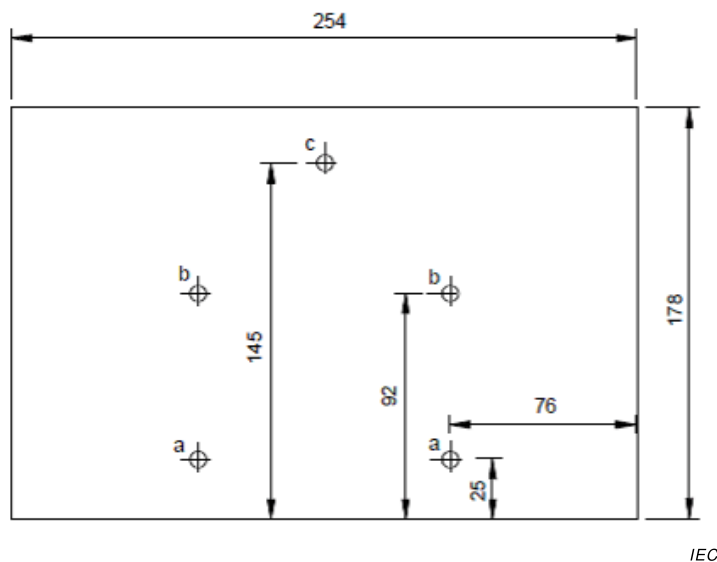
All parts 12,5 mm thick
compound plate stock

Phenolic impregnated fabric



IEC

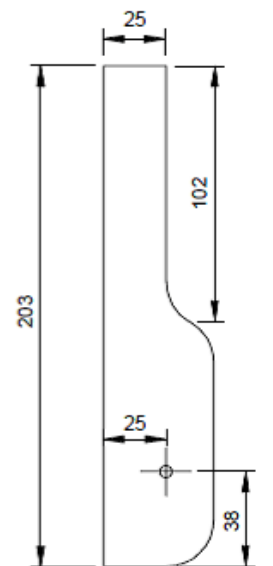
b) Movable template (same dimensions as a))



IEC

- a mounting screws for fixed template
- b mounting screws for movable template (template shall be free to slide)
- c mounting screw for clamping lever (lever shall be free to rotate)

c) Platine



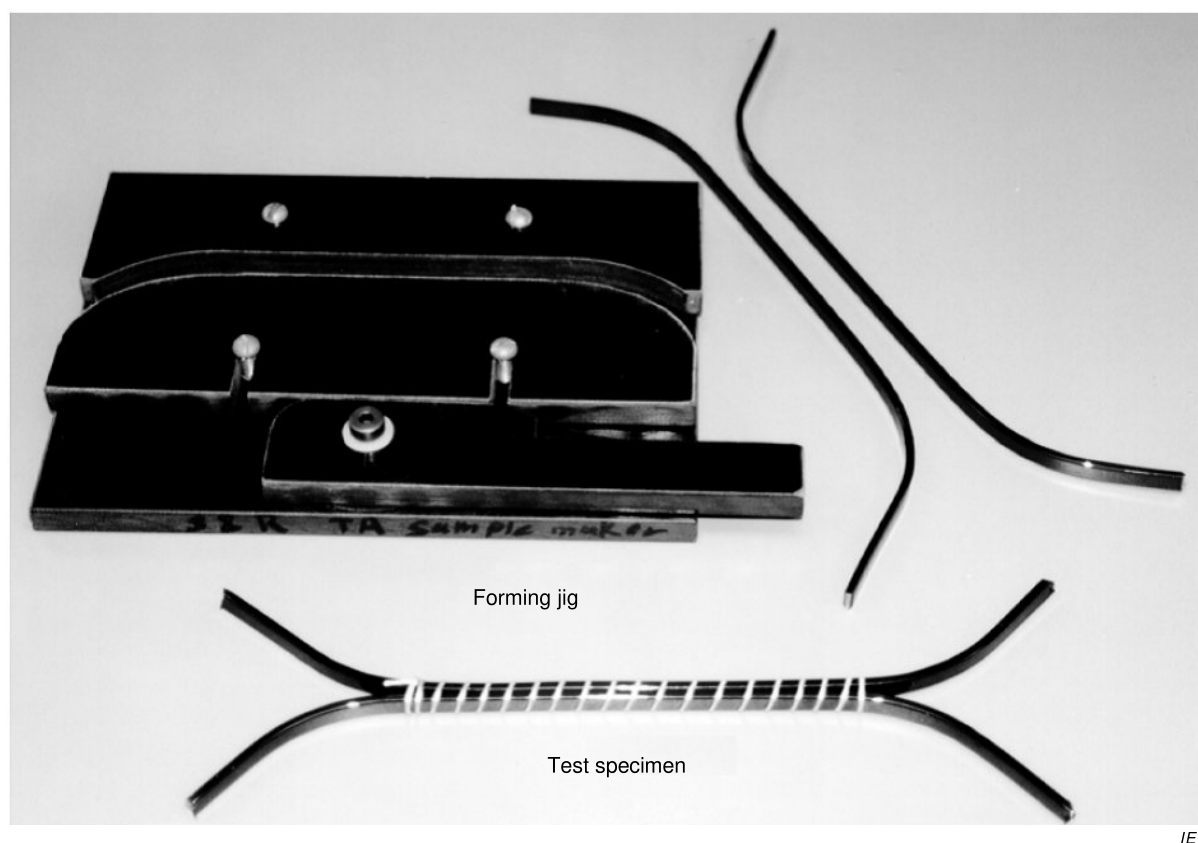
IEC

d) Clamping lever

Dimensions in millimetres

Figure 6 – Jig for bending large magnet wire, dielectric test specimen

- d) The two formed specimens shall be placed together back-to-back and tightly wrapped with glass yarn over the straight centre section of the specimen, as shown in Figure 7.



IEC

Figure 7 – Forming jig and test specimen

Care shall be taken that the centre section shows a close contact between the two pieces.

After tying, further bending of the ends shall be avoided. Pre-annealing of the specimen prior to testing or impregnating will remove stress and craze marks and therefore may be desirable with certain material.

e) Prior to testing the specimen shall be proof-tested at 1 000 V a.c.

5.2 Varnish impregnation

Experience has shown that insulated wire according to IEC 60317 and impregnating agents according to IEC 60455-3-5 or IEC 60464-3-2 can affect one another during the thermal ageing process.

NOTE 1 Testing varnished specimens will allow for evaluation of the compatibility of the wire insulation with an impregnating agent. Thus the temperature indices of different combinations can be compared.

Interaction between wire insulation and such agent may increase or decrease the relative thermal life of this combination compared with the life of the wire tested without impregnation. Therefore, with impregnated specimens, this test procedure may give an indication of the thermal endurance of a combination of wire insulation and impregnating agent.

If such impregnation is required, the following procedure shall be applied:

With the specimen in the vertical position, it shall be immersed in the impregnating agent for (60 ± 10) s (see note). It shall be removed slowly and uniformly at a rate of about 1 mm/s. It shall be drained horizontally for 10 min to 15 min and cured horizontally according to the manufacturer's recommendation or to an agreed schedule. If more than one treatment is to be given, immerse, drain and cure the specimen vertically reversing the specimen for each subsequent treatment.

NOTE 2 Some impregnating agents, such as high viscosity or thixotropic products require alternative processing methods.

5.3 Notes on number of test specimens

The accuracy of the test results depends largely upon the number of test specimens aged at each temperature. A greater number of test specimens is required to achieve an acceptable degree of accuracy if there is a wide spread in results among the specimens exposed at each temperature.

Experience has shown that twenty specimens without impregnation and ten specimens with impregnation give results with an acceptable tolerance. A minimum of ten specimens shall be used.

5.4 Specimen holder

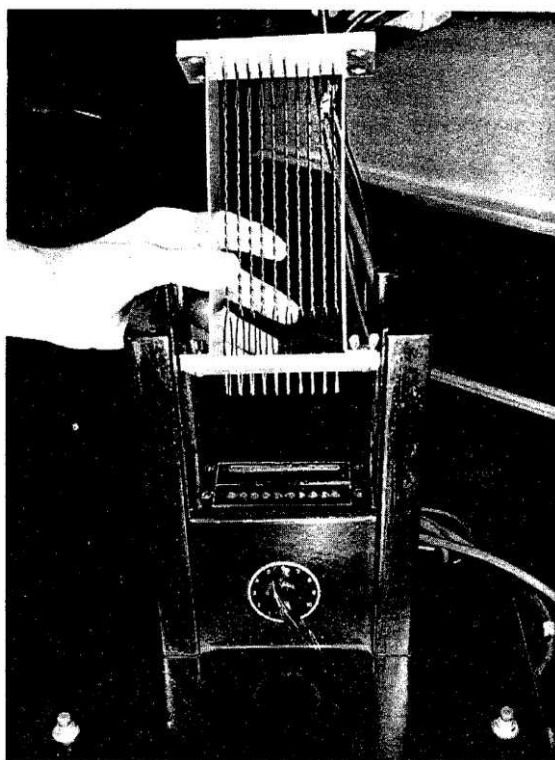
5.4.1 For specimens according to 5.1.1

Since individual handling of the twisted specimens may result in premature failures, it is recommended that the specimens be placed in a suitable holder, as shown in Figure 8. The holder should be designed in a manner that will protect the twisted specimens from external mechanical damage and warping. The holder will be so constructed as to allow the ends of the twist to protrude from the holder to make electrical connection for the proof testing as shown in Figure 9. The holder shall be designed for at least ten specimens to decrease handling time.



IEC

Figure 8 – Specimen holder



IEC

Figure 9 – Specimen holder and electrical connection fixture

5.4.2 For specimens according to 5.1.2

The specimen shall be hung in the oven. No special holder is required.

6 Temperature exposure

Recommended temperatures to which the test specimens are subjected are given in this Clause 6.

In Table 3, the recommended temperature and time of exposure in each cycle are given. A test cycle is defined as one exposure to a high temperature followed by one proof-voltage test at room temperature (20°C – 30°C). The test specimens shall be placed directly into and removed from the ageing ovens without controlling the heating or cooling rate.

The ovens should be heated to the proper temperature before the specimens are subjected to the exposure temperature.

The specimens should be aged in a forced air circulation oven which is capable of maintaining the temperature of the specimens under test within 2°C of the selected exposure temperature.

The exposure times are selected to subject the test specimens to approximately 10 cycles at each temperature before the time to failure is reached.

Table 3 – Recommended exposure times in days per cycle

Exposure or ageing temperature (°C)	Estimated temperature index						
	105-109	120-130	150-159	180-189	200-209	220-239	240-249
320	–	–	–	–	–	–	1
310	–	–	–	–	–	–	2
300	–	–	–	–	–	1	4
290	–	–	–	–	–	2	7
280	–	–	–	–	1	4	14
270	–	–	–	–	2	7	28
260	–	–	–	1	4	14	49
250	–	–	–	2	7	28	–
240	–	–	–	4	14	49	–
230	–	–	–	7	28	–	–
220	–	–	1	14	49	–	–
210	–	1	2	28	–	–	–
200	–	2	4	49	–	–	–
190	1	4	7	–	–	–	–
180	2	7	14	–	–	–	–
170	4	14	28	–	–	–	–
160	7	28	49	–	–	–	–
150	14	49	–	–	–	–	–
140	28	–	–	–	–	–	–
130	49	–	–	–	–	–	–
120	–	–	–	–	–	–	–

NOTE The recommendations in Table 3 differ from those in IEC 60216-3 but have been found to be more suitable for enamelled wires.

Thermal endurance values obtained from test specimens subjected to an average of less than eight or more than twenty cycles at the exposed temperature may not be reliable and should not be used to predict the temperature rating of the enamelled wire. Therefore, a shorter or longer cycle time than those given in Table 3 may be chosen for certain exposure temperatures, to ensure that the average number of cycles to failure falls within this range.

After the specimens have been subjected to a particular cycle, the time may be appropriately increased or decreased to control the number of cycles required to reach the time to failure.

Test specimens should be exposed to a minimum of three and preferably four exposure temperatures. The lowest temperature, recommended at 20 °C above the desired thermal class, should be one which results in a time frame to failure of more than 5 000 h. The highest exposure temperature shall have a value of at least 100 h to be considered a valid data point. Exposure temperatures should not be more than 20 °C apart. The accuracy of the temperature index predicted from the results will improve as the exposure temperature approaches the temperature to which the insulation is exposed in service.

7 Test voltage and its application

The voltage to be applied shall be an a.c. voltage and shall have a nominal frequency of 50 Hz or 60 Hz of an approximately sine-wave form, the peak factor being within the limits of $\sqrt{2} \pm 5\%$ (1,34 to 1,48). The test transformer shall have a rated power of at least 500 VA and shall provide a current of essentially undistorted waveform under test conditions.

To detect failure, the overcurrent indication device shall operate when a current of 5 mA or more flows through the high-voltage circuit. The test voltage source shall have a capacity to supply the detection current (5 mA or more) with a maximum voltage drop of 10 %.

The test specimens are removed from the ovens and cooled to room temperature. Each specimen shall be subjected to a proof voltage according to the increase in diameter due to insulation as specified in Table 3 for specimens according to 5.1.1 and in Table 4 for specimens according to 5.1.2. In the case of self-bonding wires, the self-bonding layer is included in the increase in diameter due to the insulation.

Table 4 – Proof voltage for tape-wrapped round and for enamelled or tape-wrapped rectangular wire

Increase in dimension due to the insulation (mm)		Voltage (rms)
Over	Up to and including	
0,035	0,050	300
0,050	0,065	375
0,065	0,080	450
0,080	0,090	550
0,090	0,100	650
0,100	0,115	700
0,115	0,130	750
0,130	0,140	800
0,140	0,150	850

The proof voltage shall be applied to the test specimens for approximately 1 s.

NOTE A relatively short time of application of the test voltage is desirable to minimize the effects of corona and dielectric fatigue.

Care shall be taken in all cases to avoid mechanical damage to the test specimens. The specimens that fail the proof test shall be discarded and the remaining specimens returned to the oven for another temperature exposure.

8 Calculations

8.1 Specimen failure time

The failure time of an individual specimen at one exposure temperature is determined by calculating the mid-point between the total hours of exposure temperature at which the specimen failed the proof voltage and the total hours of exposure of the previous cycles. This assumes that the specimen would probably have failed the proof voltage at some point in the middle of the last temperature exposure cycle. Thus, the specimen failure time is the sum of the total hours at the time to failure, minus half the hours of the last exposure cycle.

8.2 Time to failure

The time to failure of a set of specimens at one exposure temperature shall be calculated by using either the median value or the logarithmic mean value. For many materials, the median value is statistically valid. In most cases, use of the median will significantly reduce testing time, since the test ceases once the median value has been obtained.

When using the median value, the time to failure is calculated as follows:

Where there are a total number of n specimens in a set of specimens, the time to failure of the set equals:

- a) the specimen failure time of specimen number $(n + 1)/2$; if n is odd (see 8.1);
- b) the logarithmic mean value of the specimen failure times of specimens number $n/2$ and $(n + 2)/2$; if n is even (see 8.1).

For instance, if n is 12, the time to failure of the set would be the mean value of the specimen failure times of the sixth and the seventh specimen. For convenience, it is suggested that when the median value is used for calculating the time to failure of the set, the total number of specimens of a set be odd, thus simplifying calculation.

When using the logarithmic mean value, the time to failure is calculated by dividing the sum of the logarithms of the specimen failure times of the set (see 8.1) by the total number n of specimens in the set. The antilogarithm of this mean value is the time to failure of the set.

8.3 Linearity of data

To avoid misleading extrapolations (see 8.4), the correlation coefficient should be calculated as shown in Annex B, to provide a measure of linearity.

If the correlation coefficient r is equal to or greater than 0,95, the data are said to be linear and the data points will be reasonably close to a straight line. In the event that the correlation coefficient is less than 0,95, the data are said to be non-linear and an additional test should be performed at a temperature below the lowest previous temperature.

The new temperature point may be 10 °C below the previous lowest temperature point. When re-calculating the temperature index and correlation coefficient, one temperature point may be deleted, starting with the highest temperature, for each new temperature point obtained.

The data will be linear if the thermal deterioration of the enamelled wire or the varnished enamelled wire appears as one chemical reaction. Non-linearity may indicate that:

- a) two or more reactions which have different activation energies (slopes) are predominant at different temperatures within the testing range; or
- b) errors have been introduced through the sampling technique and/or the testing procedure.

Non-linear data should not be used for extrapolation.

8.4 Calculating and plotting thermal endurance and temperature index

Thermal endurance is graphically presented by plotting the time to failure (see 8.2) versus its respective exposure temperature on graph paper having a logarithmic time scale as the ordinate and the reciprocal of absolute temperature as the abscissa. The exposure temperatures at 2 000 h and 20 000 h are estimated based on the first order regression calculation presented in Annex A. A regression line is drawn through these two points on the graph, which represents the thermal endurance of the enamelled winding wire (see Figure 10).

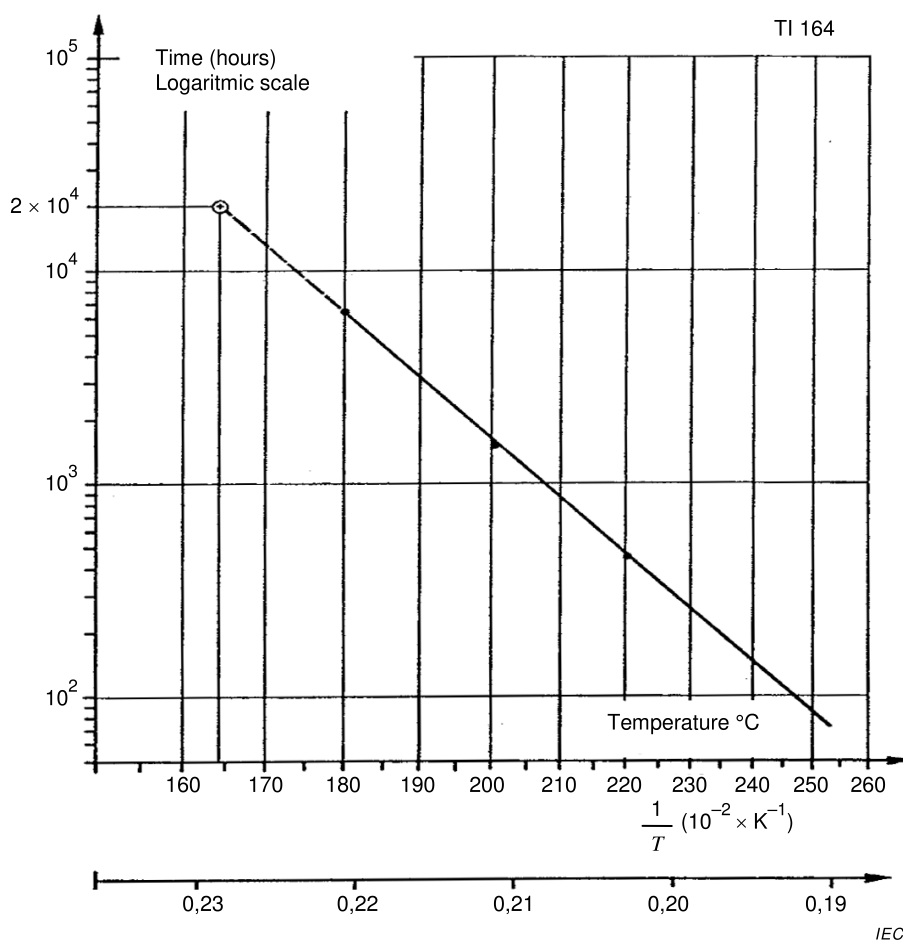


Figure 10 – Thermal endurance graph – Temperature index

The Temperature Index of the enamelled wire is the number corresponding to the temperature in degrees Celsius at which the regression line intersects the 20 000 h line. It is listed without reference to degrees Celsius.

If further statistical analysis of the data is necessary, reference may be made to IEC 60216-3.

9 Report

The report of the results shall contain the following information as a minimum:

- identification or description of the wire enamel, grade and the type of conductor (e.g. copper, aluminium, etc.);
- identification or description of the impregnating varnish and varnishing process;
- time to failure of each set of specimens at each exposure temperature;
- a graph of the first order regression line through the time to failure values;
- the temperature index (TI)

Annex A (normative)

Method for calculation of the regression line

This Annex A presents a method for quickly plotting the regression line for thermal endurance data. This method may be used for any number of measurements at various test temperatures. If information concerning the confidence limits is required, a more detailed analysis shall be made in accordance with IEC 60216-3.

It has been established that many insulations deteriorate in such a manner that the following equation applies:

$$L = Ae^{B/T} \quad (1)$$

where:

- L = insulation endurance in hours;
- T = absolute temperature in kelvins;
- A, B = constants for each insulation, and
- e = base of natural logarithms.

Equation (1) may be expressed as a linear function by taking logarithms:

$$\log_{10} L = \log_{10} A + (\log_{10} e) \cdot \frac{B}{T} \quad (2)$$

Let:

- Y = $\log_{10} L$
- a = $\log_{10} A$
- X = $1/T$
- b = $(\log_{10} e) B$

Then:

$$Y = a + bX \quad (3)$$

Thus, data from testing at higher temperatures may be plotted on $\log_{10} L$ versus $1/T$ graph paper and a straight line extrapolated to lower temperatures. However, since the nature of logarithmic plots does not allow accurate extrapolation by the method of drawing the best apparent straight line through the data points, a more rigorous method shall be used for greater accuracy and uniformity. By using the method of least squares, the constants a

and b may be derived in terms of the experimental data obtained. These equations are as follows:

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{N} \quad (4)$$

$$b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (5)$$

where:

- X = $1/T$ = reciprocal of the test temperature in kelvins ($\theta^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}$);
- N = number of test temperatures used;
- Y = $\log_{10} L$ = logarithm of time to failure;
- Σ = summation of N values.

Knowing the constant a , and the slope b of the regression line, the temperature at any required life value may be calculated as follows:

$$Y = a + bX$$

$$T = \frac{1}{X} = \frac{b}{Y - a} \quad (6)$$

$$\text{Temperature at 20 000 h in degrees Celsius} = \frac{b}{4,3010 - a} - 273 \quad (7)$$

(temperature index)

$$\text{Temperature at 2 000 h in degrees Celsius} = \frac{b}{3,3010 - a} - 273 \quad (8)$$

To simplify the handling of the test data used in Equations (4) to (8), it is suggested that the steps for a sample calculation be followed as outlined below (see Table A.1 and Table A.2):

- a) In column 1, list the temperatures in $^\circ\text{C}$, as illustrated in Table A.2, at which a set of specimens was tested.
- b) In columns 2 and 3, list the reciprocals ($X = 1/T$) and the reciprocals squared ($X^2 = 1/T^2$) of the above test temperatures converted to kelvins (see also Table A.1).
- c) In column 4, list the time to failure L , in hours, of each set of specimens, and in the column 5, list the $\log_{10}$ of the values in the fourth column ($Y = \log_{10} L$).
- d) In column 6, list the products of X and Y .
- e) Provide summation for columns 2, 3, 5 and 6 and enter the summation (indicated by Σ) at the bottom of the respective column.
- f) Indicate the number N of times to failure on the worksheet.
- g) Using the values obtained in steps e) and f), compute b (Equation 5) and a (Equation 4) in that order. The constant a will always be negative.

- h) Using constants a and b , calculate the temperature in degrees Celsius at 20 000 h (Equation 7) and at 2 000 h (Equation 8).
- i) Plot the above two temperature points from step h) on $\log_{10}L$ versus $1/T$ graph paper and draw the regression line through them (see Figure A.1).
- j) Plot the times to failure L at their respective temperatures on the same graph.

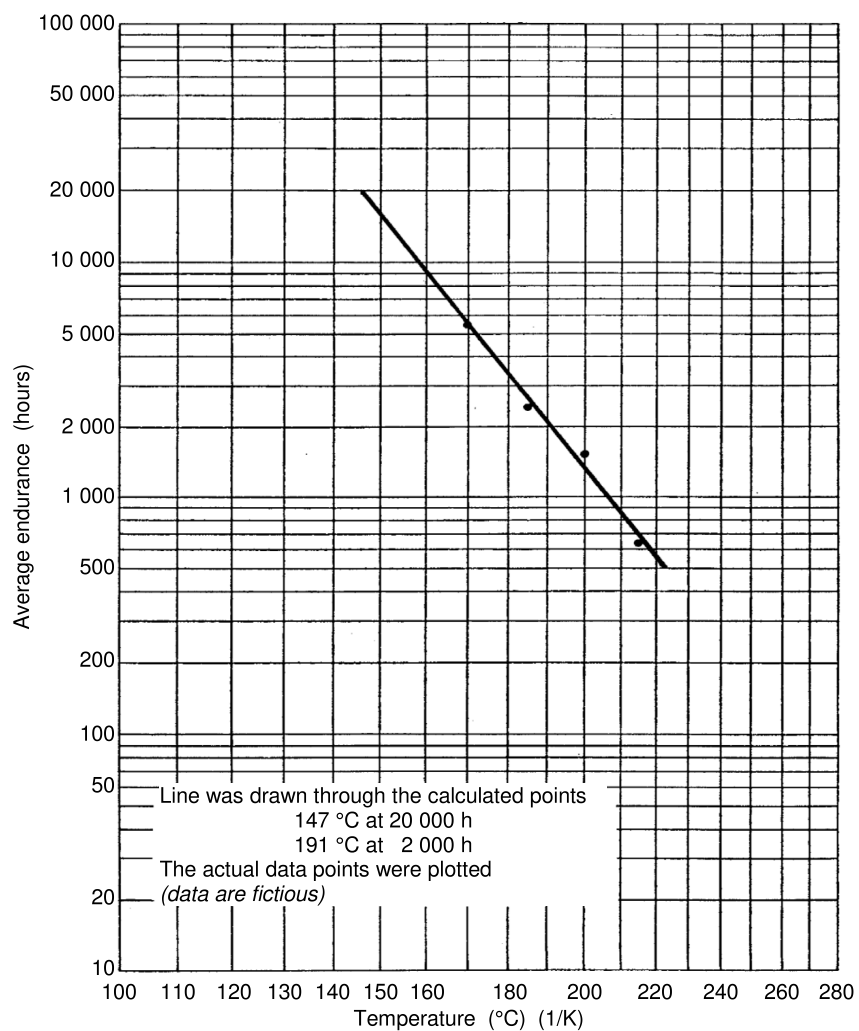
Table A.1 – Commonly used test temperatures in degrees Celsius and the corresponding kelvins with its reciprocal and reciprocal squared values

θ (°C)	T (K)	$X = 1/T$ (K ⁻¹)	$X^2 = 1/T^2$ (K ⁻²)
105	378	$2,646 \times 10^{-3}$	$6,999 \times 10^{-6}$
120	393	$2,545 \times 10^{-3}$	$6,475 \times 10^{-6}$
125	398	$2,513 \times 10^{-3}$	$6,313 \times 10^{-6}$
130	403	$2,481 \times 10^{-3}$	$6,157 \times 10^{-6}$
140	413	$2,421 \times 10^{-3}$	$5,863 \times 10^{-6}$
150	423	$2,364 \times 10^{-3}$	$5,589 \times 10^{-6}$
155	428	$2,336 \times 10^{-3}$	$5,459 \times 10^{-6}$
165	438	$2,283 \times 10^{-3}$	$5,212 \times 10^{-6}$
175	448	$2,232 \times 10^{-3}$	$4,982 \times 10^{-6}$
180	453	$2,208 \times 10^{-3}$	$4,873 \times 10^{-6}$
185	458	$2,183 \times 10^{-3}$	$4,767 \times 10^{-6}$
190	463	$2,160 \times 10^{-3}$	$4,665 \times 10^{-6}$
200	473	$2,114 \times 10^{-3}$	$4,470 \times 10^{-6}$
210	483	$2,070 \times 10^{-3}$	$4,287 \times 10^{-6}$
220	493	$2,028 \times 10^{-3}$	$4,114 \times 10^{-6}$
225	498	$2,008 \times 10^{-3}$	$4,032 \times 10^{-6}$
230	503	$1,988 \times 10^{-3}$	$3,952 \times 10^{-6}$
240	513	$1,949 \times 10^{-3}$	$3,800 \times 10^{-6}$
250	523	$1,912 \times 10^{-3}$	$3,656 \times 10^{-6}$
260	533	$1,876 \times 10^{-3}$	$3,520 \times 10^{-6}$
270	543	$1,842 \times 10^{-3}$	$3,392 \times 10^{-6}$
280	553	$1,808 \times 10^{-3}$	$3,270 \times 10^{-6}$
300	573	$1,745 \times 10^{-3}$	$3,048 \times 10^{-6}$
320	593	$1,686 \times 10^{-3}$	$2,844 \times 10^{-6}$
NOTE Calculations for X^2 are based on non-rounded values.			

Table A.2 – Sample calculation

Column 1 Temperature (°C)	Column 2 $X = 1/T$	Column 3 $X^2 = 1/T^2$	Column 4 L (h)	Column 5 $Y = \log_{10} L$	Column 6 $XY = (\log_{10} L)/T$
170	$2,257\,73 \times 10^{-3}$	$5,095\,57 \times 10^{-6}$	5 600	3,748 19	$8,460\,92 \times 10^{-3}$
185	$2,183\,41 \times 10^{-3}$	$4,767\,26 \times 10^{-6}$	2 600	3,414 97	$7,456\,27 \times 10^{-3}$
200	$2,114\,16 \times 10^{-3}$	$4,469\,69 \times 10^{-6}$	1 500	3,176 09	$6,714\,78 \times 10^{-3}$
215	$2,049\,18 \times 10^{-3}$	$4,199\,14 \times 10^{-6}$	640	2,806 18	$5,750\,37 \times 10^{-3}$
Σ	$8,604\,09 \times 10^{-3}$	$18,531\,66 \times 10^{-6}$		13,145 43	$28,382\,34 \times 10^{-3}$
$N = 4$ $b = \frac{N \Sigma XY - \Sigma X \Sigma Y}{N \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2} = \frac{4 \times 28,38234 \times 10^{-3} - 8,60409 \times 10^{-3} \times 13,14543}{4 \times 18,53166 \times 10^{-6} - 8,60409 \times 10^{-3} \times 8,60409 \times 10^{-3}} = 4\,413$ $a = \frac{\Sigma Y - b \Sigma X}{N} = \frac{13,14543 - 4\,413 \times 8,60409 \times 10^{-3}}{4} = -6,20610$ Temperature at 20 000 h in degrees Celsius = $\frac{b}{Y-a} - 273$ $\frac{4413}{4,3010 + 6,20610} - 273 = 147\,^{\circ}\text{C}$ Temperature at 2 000 h in degrees Celsius = $\frac{b}{Y-a} - 273$ $\frac{4413}{3,3010 + 6,20610} - 273 = 191\,^{\circ}\text{C}$					

This graph should contain all appropriate information regarding insulating materials and systems



IEC

Figure A.1 – Plot of regression line based on sample calculation (Table A.2)

Annex B (normative)

Correlation coefficient

The correlation coefficient r is a measure of the amount of relationship between variables.

When $r = 1,0$, a perfect association between the variable exists, and when $r = 0$, a completely random relation exists.

$$r = \sqrt{\frac{aY + bXY - N(\text{Avg } Y)^2}{Y^2 - N(\text{Avg } Y)^2}}$$

where:

- a = Y intercept of the regression line;
- b = slope of the regression line;
- X = $1/T$ = reciprocal of the test temperature in kelvins ($8\text{ }^{\circ}\text{C} + 273\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- N = number of test temperatures used;
- X, Y = the variables.

Using the example data in Table A.2 in Annex A, the correlation coefficient is calculated according to the following equation:

$$\sqrt{\frac{a\Sigma Y + b\Sigma XY - N(\text{Avg } Y)^2}{\Sigma Y^2 - N(\text{Avg } Y)^2}} = 0,996$$

If the correlation coefficient r is equal to or greater than 0,95, the data is said to be linear and the data points will be reasonably close to a straight line.

In the event that the correlation coefficient is less than 0,95, the data is said to be nonlinear and additional tests at other test temperatures are required. It is recommended that the new temperature point be $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ below the previous lowest temperature point.

When recalculating the temperature index and correlation coefficient, it is permissible for one temperature point to be deleted, starting with the highest temperature, provided that there are still three valid data points.

The data will be linear if the thermal deterioration of the film insulated wire or the varnished film insulated wire appears as one chemical reaction. Nonlinearity possibly indicates the following:

- a) Two or more reactions that have different activation energies (slopes) are predominant at different temperatures within the testing range; or
- b) Errors have been introduced through the sampling technique or the testing procedure, or both.

It shall be noted that nonlinear results provide useful engineering data when plotted on the thermal endurance graph even when the data cannot be extrapolated appropriately to give a temperature index (TI).

Bibliography

IEC 60317 (all parts), *Specifications for particular types of winding wires*

IEC 60455-3-5, *Resin based reactive compounds used for electrical insulation – Part 3: Specifications for individual materials – Sheet 5: Unsaturated polyester based impregnating resins*

IEC 60464-3-2, *Varnishes used for electrical insulation – Part 3: Specifications for individual materials – Sheet 2: Hot curing impregnating varnishes*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
1 Domaine d'application	32
2 Références normatives	32
3 Termes et définitions	32
4 Résumé du mode opératoire	33
5 Éprouvettes d'essai	33
5.1 Préparation	33
5.1.1 Fil de section circulaire émaillé de diamètre nominal du conducteur de 0,224 mm jusqu'à et y compris 2,65 mm	33
5.1.2 Fil de section circulaire enveloppé d'un ruban et fil de section rectangulaire émaillé ou enveloppé d'un ruban	36
5.2 Imprégnation	38
5.3 Notes sur le nombre d'éprouvettes	39
5.4 Porte-éprouvettes	39
5.4.1 Pour les éprouvettes conformes à 5.1.1	39
5.4.2 Pour les éprouvettes conformes à 5.1.2	40
6 Température d'exposition	40
7 Tension d'essai et son application	42
8 Calculs	42
8.1 Durée de vie de l'éprouvette	42
8.2 Durée de fonctionnement avant défaillance	43
8.3 Linéarité des données	43
8.4 Calcul et graphique de l'endurance thermique et de l'indice de température	44
9 Rapport	44
Annexe A (normative) Méthode pour le calcul de la droite de régression	46
Annexe B (normative) Coefficient de corrélation	51
Bibliographie	53
Figure 1 – Dispositif pour la réalisation des éprouvettes de fil émaillé de section circulaire	34
Figure 2 – Séparateur	34
Figure 3 – Gabarit pour la préparation des torsades	35
Figure 4 – Epreuve disposée dans le gabarit	35
Figure 5 – Epreuve réalisée, boucle coupée	36
Figure 6 – Gabarit pour le formage d'un gros fil de bobinage, essai diélectrique	37
Figure 7 – Gabarit de formage et éprouvette d'essai	38
Figure 8 – Porte-éprouvettes	39
Figure 9 – Porte-éprouvettes et dispositif de connexion électrique	40
Figure 10 – Graphique d'endurance thermique – Indice de température	44
Figure A.1 – Tracé de la droite de régression fondé sur un exemple de calcul (Tableau A.2)	50
Tableau 1 – Force et nombre de tours des éprouvettes	34
Tableau 2 – Tension d'essai pour le fil émaillé de section circulaire	36

Tableau 3 – Valeurs recommandées pour les durées d'exposition en jours par cycle	41
Tableau 4 – Tension d'essai pour le fil de section circulaire enveloppé d'un ruban et pour le fil de section rectangulaire émaillé ou enveloppé d'un ruban	42
Tableau A1 – Températures d'essai habituelles en degrés Celsius et en kelvins correspondants, avec valeurs inverses et inverses au carré.....	48
Tableau A.2 – Exemple de calcul	49

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MÉTHODE D'ESSAI POUR LA DÉTERMINATION DE L'INDICE DE TEMPÉRATURE DES FILS DE BOBINAGE ÉMAILLÉS ET ENVELOPPÉS DE RUBAN

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique 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. A 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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60172 a été établie par le comité d'études 55 de l'IEC: Fils de bobinage.

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition parue en 1987, l'Amendement 1:1997 et l'Amendement 2:2010. Cette édition constitue une révision technique.

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

- Révision de l'Article 1 (Domaine d'application): intégration du texte approprié issu de l'ancien Article 2 (Objet);
- Suppression de l'Article 2 (Objet): texte correspondant reporté dans les articles existants;

- Nouvel Article 2 (Références normatives);
- Révision de 5.1.1, 5.3 et 5.4 avec corrections apportées à l'Amendement 2 à la troisième édition;
- Révision de l'Article 7 de manière à préciser les éprouvettes qui répondent aux exigences du Tableau 3 et du Tableau 4;
- Révision des figures avec photos et graphiques haute résolution.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
55/1518/FDIS	55/1524/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

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

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

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

MÉTHODE D'ESSAI POUR LA DÉTERMINATION DE L'INDICE DE TEMPÉRATURE DES FILS DE BOBINAGE ÉMAILLÉS ET ENVELOPPÉS DE RUBAN

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale spécifie, conformément aux dispositions de l'IEC 60216-1, une méthode pour l'évaluation de l'indice de température du fil émaillé, imprégné ou non imprégné avec un matériau d'imprégnation, et du fil de section circulaire ou rectangulaire, enveloppé de ruban, dans l'air à la pression atmosphérique, en contrôlant périodiquement les variations de réponse aux essais de tension d'épreuve en courant alternatif. Cette méthode ne concerne pas le fil avec revêtement fibreux ou le fil recouvert de rubans contenant des fibres non organiques.

NOTE Les données obtenues au moyen de cette méthode d'essai fournissent à l'ingénieur d'étude et de développement les informations pour sélectionner le fil de bobinage et obtenir une meilleure évaluation des systèmes isolants et des essais d'équipement.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

IEC 60216-3, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 3: Instructions pour le calcul des caractéristiques d'endurance thermique*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1 indice de température IT

valeur numérique de la température en degrés Celsius caractérisant la capacité thermique d'un matériau isolant ou d'un système d'isolation

Note 1 à l'article: Dans le cas de matériaux isolants, l'indice de température est déduit de la relation d'endurance thermique pour un temps donné, normalement égal à 20 000 heures. Il peut être utilisé comme base pour la détermination de la classe de température du matériau.

Note 2 à l'article: Dans le cas de systèmes d'isolation, l'indice de température peut être déduit de l'expérience en service connue ou d'une évaluation fonctionnelle comparative connue d'un système d'isolation de référence évalué et établi en tant que base.

[SOURCE: IEC 60050-212:2010, 212-12-11]

3.2

durée de vie de l'éprouvette

temps en nombre d'heures à la température d'exposition pendant lequel une éprouvette résiste à l'essai diélectrique

3.3

durée de fonctionnement avant défaillance

L

temps en nombre d'heures de fonctionnement avant défaillance calculé d'après les durées de vie d'un groupe d'éprouvettes soumises à une température d'exposition

4 Résumé du mode opératoire

Un groupe d'éprouvettes conformes à l'Article 5 est soumis à un cycle d'essais. Ce cycle comprend une période de maintien à la chaleur à une température donnée dans l'Article 6, suivie par une épreuve sous tension à la température ambiante conformément à l'Article 7.

On répète ce cycle jusqu'à ce qu'on obtienne un nombre suffisant d'éprouvettes défaillantes. La durée de fonctionnement avant défaillance est calculée conformément à l'Article 8. L'essai est réalisé à trois températures ou plus. Une droite de régression est calculée conformément à 8.4 et les valeurs de durée de fonctionnement avant défaillance sont reportées sur un graphique d'endurance thermique en fonction de la température d'exposition.

La température, en degrés Celsius, correspondant au point d'intersection de la droite de régression avec l'ordonnée d'endurance à 20 000 h représente l'indice de température du fil de bobinage soumis à essai.

5 Éprouvettes d'essai

5.1 Préparation

5.1.1 Fil de section circulaire émaillé de diamètre nominal du conducteur de 0,224 mm jusqu'à et y compris 2,65 mm

Le grade de l'isolant utilisé pour la détermination de l'indice de température doit être le grade 2 ou grade 2B pour les fils de bobinage avec une couche thermoadhérente.

Les dimensions de fil 0,315 mm et 0,28 mm peuvent être utilisées lorsque la gamme de dimensions spécifiée est limitée à 0,50 mm ou inférieur.

NOTE Pour les fils de bobinage émaillés de section circulaire, afin d'éviter une fragilité excessive de l'éprouvette, l'expérience a montré que les diamètres nominaux de conducteurs de 0,800 mm jusqu'à et y compris 2,65 mm conviennent généralement aux manipulations et à l'essai.

Les éprouvettes doivent être préparées de la façon suivante:

- a) Une éprouvette de fil d'environ 400 mm de long doit être torsadée sur elle-même, sur une distance de 125 mm avec l'appareil indiqué à la Figure 1. La force exercée sur les deux fils pendant la torsion et le nombre de tours sont spécifiés dans le Tableau 1.

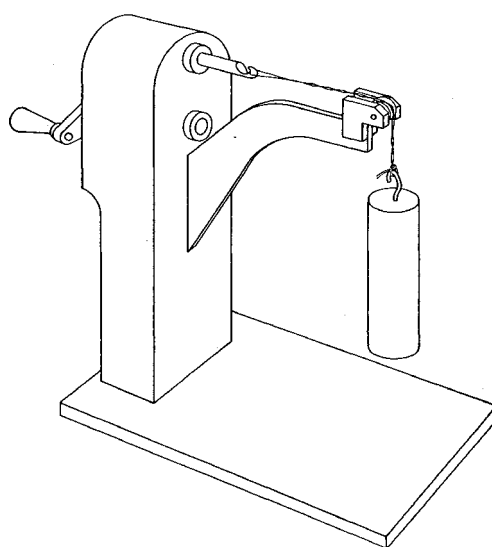
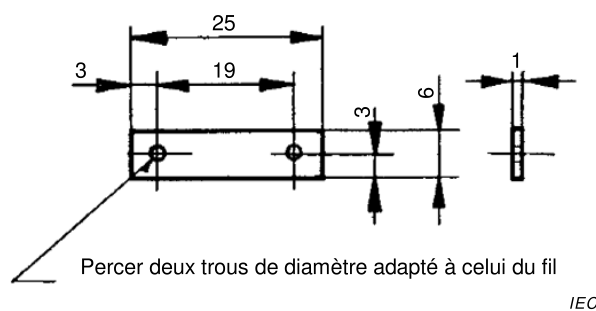


Figure 1 – Dispositif pour la réalisation des éprouvettes de fil émaillé de section circulaire

Tableau 1 – Force et nombre de tours des éprouvettes

Diamètre nominal mm		Force appliquée sur les deux fils N	Nombre de tours par 125 mm
De	Jusqu'à et y compris		
0,224	0,25	0,85	33
0,25	0,35	1,7	23
0,35	0,50	3,4	16
0,50	0,75	7,0	12
0,75	1,05	13,5	8
1,05	1,50	27,0	6
1,50	2,15	54,0	4
2,15	3,50	108,0	3

- b) Les séparateurs peuvent être préparés suivant la Figure 2. On peut utiliser des matériaux isolants, thermiquement stables, tels que la céramique ou les stratifiés silicone – fibre de verre. Les séparateurs sont marqués d'une lettre ou d'un numéro d'identification approprié(e).

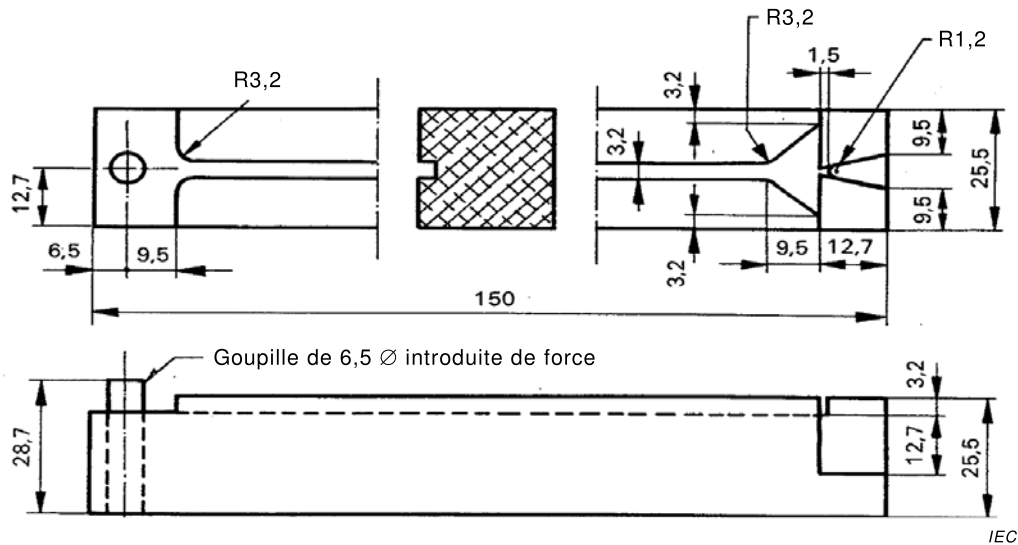


Matériau: Stratifié verre silicone

Dimensions en millimètres

Figure 2 – Séparateur

- c) Les éprouvettes peuvent être mises en forme dans un gabarit dont un dessin est donné à la Figure 3. Une éprouvette est placée dans le gabarit et un séparateur est placé entre les fils de sortie de la torsade et poussé jusqu'à la butée, comme cela est montré à la Figure 4. Les fils de sortie sont ensuite repliés parallèlement entre eux de façon à maintenir le séparateur en place. Le gabarit permet d'obtenir des éprouvettes plus uniformes. Les séparateurs ne sont pas nécessaires si un porte-éprouvettes est utilisé.



R = Rayon de courbure

Dimensions en millimètres

Figure 3 – Gabarit pour la préparation des torsades

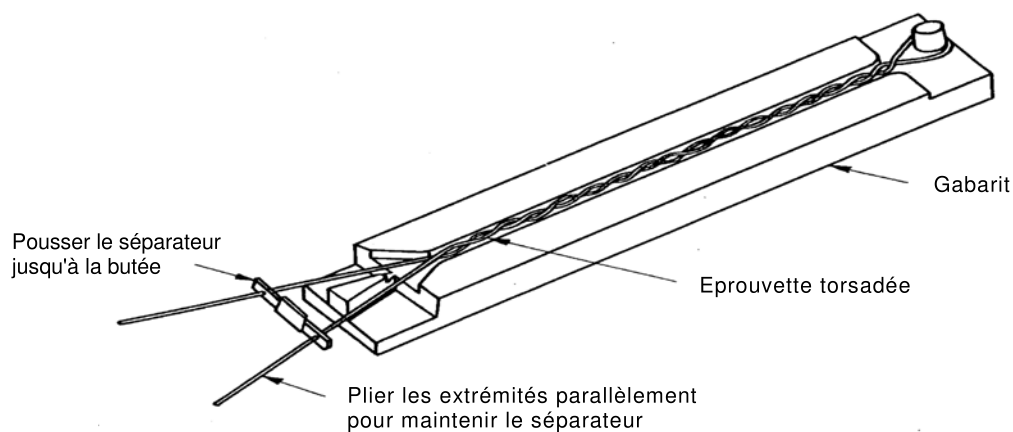


Figure 4 – Epreuve disposée dans le gabarit

- d) La boucle à l'extrémité de la section torsadée doit être coupée en deux endroits (et non un seul) afin d'obtenir un espacement maximal entre les extrémités coupées comme le montre la Figure 5. À cette extrémité ou à l'extrémité non torsadée, tout formage réalisé sur les fils de manière à assurer un écartement approprié entre eux doit éviter toute courbure aiguë ou détérioration de l'isolation.

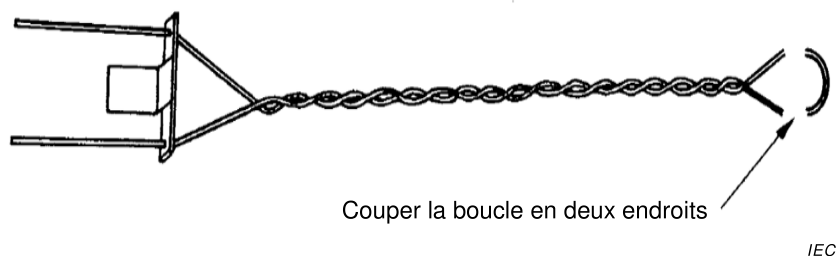


Figure 5 – Epreuve réalisée, boucle coupée

- e) Pour assurer l'homogénéité du lot d'éprouvettes, il est recommandé de les soumettre à une tension d'essai qui correspond à trois fois la valeur donnée dans le Tableau 2 pendant 1 s.

Tableau 2 – Tension d'essai pour le fil émaillé de section circulaire

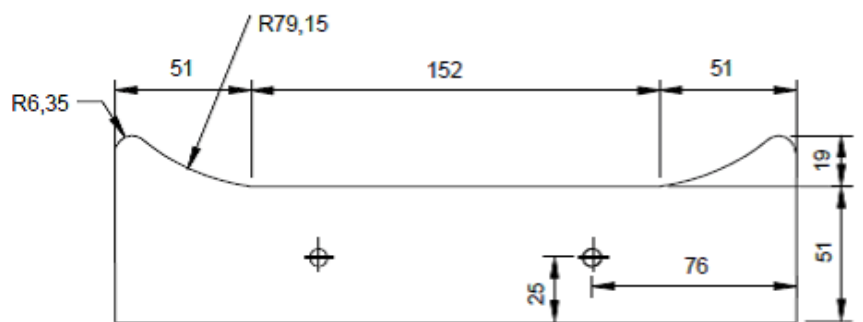
Accroissement du diamètre dû à l'isolant (mm)		Tension (valeur efficace)
De	Jusqu'à et y compris	
–	0,015	300
0,015	0,024	300
0,024	0,035	400
0,035	0,050	500
0,050	0,070	700
0,070	0,090	1 000
0,090	0,130	1 200

5.1.2 Fil de section circulaire enveloppé d'un ruban et fil de section rectangulaire émaillé ou enveloppé d'un ruban

NOTE Cette méthode s'applique à toute dimension de fil de section circulaire ou rectangulaire qui convient. Cependant, le fait de choisir des fils ayant des dimensions qui réduisent la force de courbure nécessaire pour former l'éprouvette facilitera la méthode. Un fil de grande raideur donnera des éprouvettes avec de faibles surfaces de contact fil-à-fil.

Les éprouvettes doivent être préparées de la façon suivante:

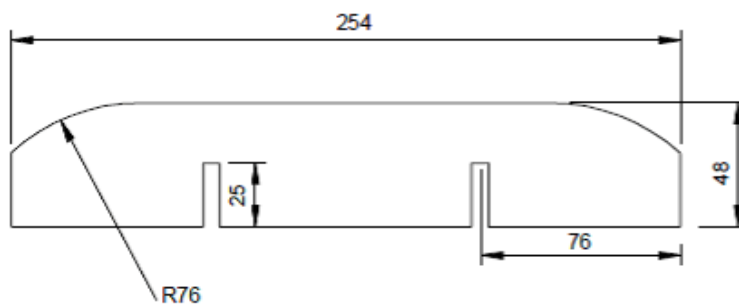
- Deux éprouvettes droites de fil de 250 mm de long chacune doivent être prélevées de la bobine de livraison.
- 10 mm à 15 mm d'isolant doivent être retirés sur l'une des extrémités de chaque éprouvette afin d'assurer un contact électrique.
- Chaque éprouvette doit être formée dans un gabarit, comme montré à la Figure 6. Cela produit au centre une partie droite de 150 mm environ avec des extrémités courbes, qui fournissent l'écartement nécessaire aux deux extrémités de l'éprouvette finale.



a) Forme fixe

IEC

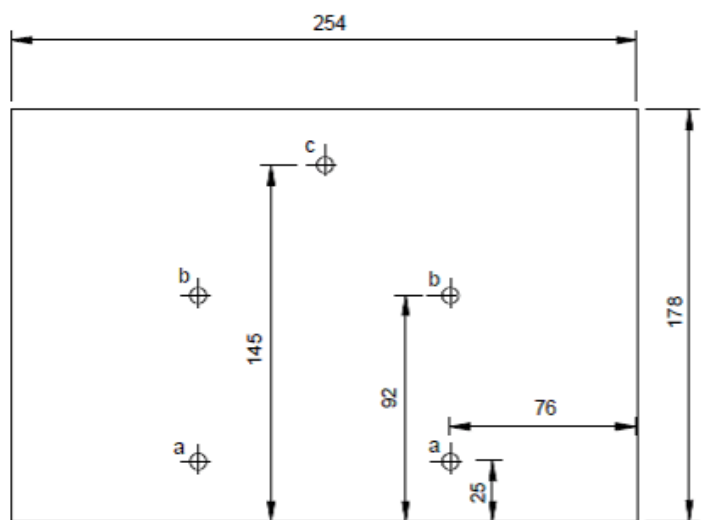
Toutes les pièces sont réalisées dans une plaque de 12,5 mm d'épaisseur



IEC

Matériau de type compound phénolique

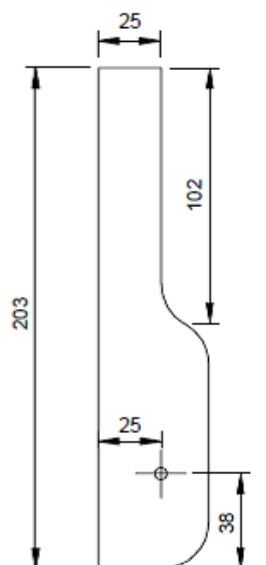
b) Forme mobile (mêmes dimensions que a))



IEC

- a écrous de montage pour la forme fixe
- b écrous de montage pour la forme mobile (la forme mobile doit pouvoir glisser)
- c écrous de montage pour le levier de serrage (le levier doit pouvoir tourner)

c) Platine



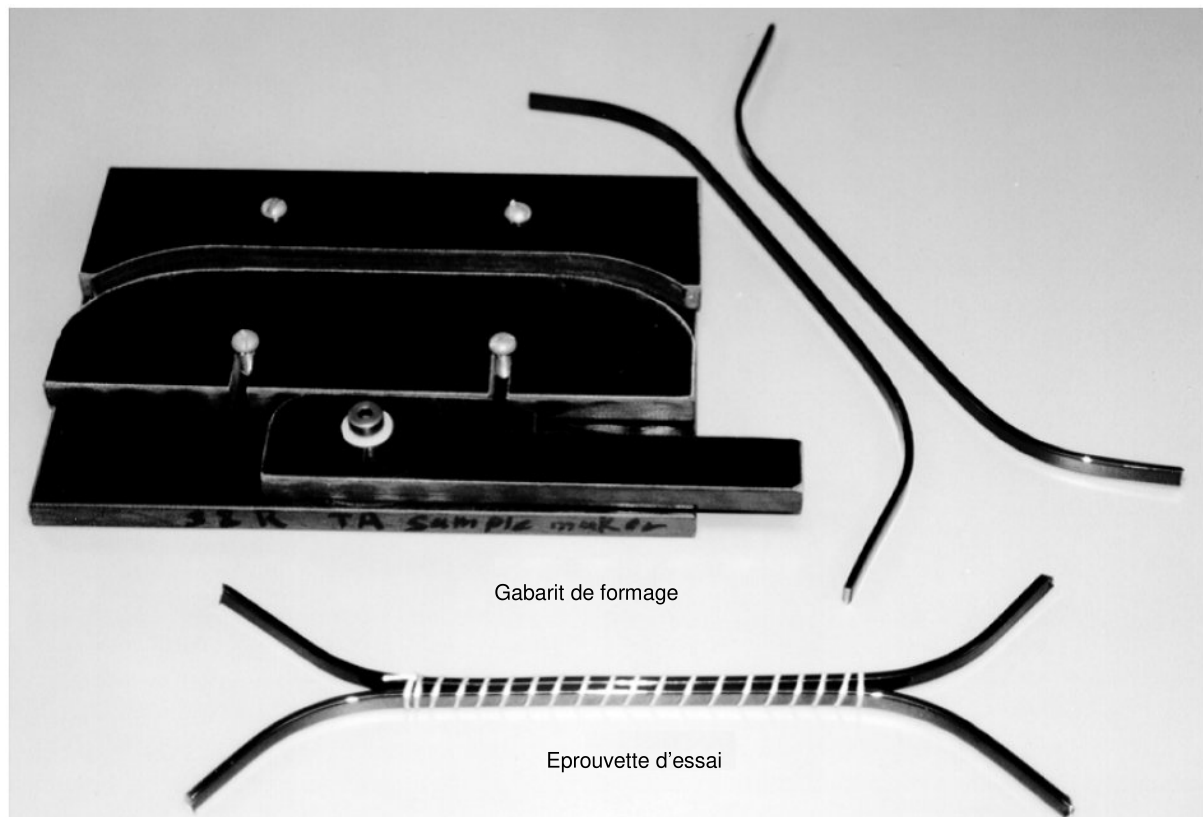
IEC

d) Levier de serrage

Dimensions en millimètres

Figure 6 – Gabarit pour le formage d'un gros fil de bobinage, essai diélectrique

- d) Les deux éprouvettes formées doivent être placées dos-à-dos et enveloppées fortement serrées avec de la fibre de verre sur la partie droite centrale de l'éprouvette, comme montré à la Figure 7.



IEC

Figure 7 – Gabarit de formage et éprouvette d'essai

On doit s'assurer que la partie droite centrale présente un contact très serré entre les deux éprouvettes.

Après ligature, l'accentuation des courbures des extrémités doit être évitée. Une pré cuisson de l'éprouvette avant l'essai ou l'imprégnation élimine les contraintes et le faïencage; elle peut donc être souhaitable pour certains matériaux.

- e) Avant de réaliser l'essai, l'éprouvette doit être contrôlée sous tension alternative de 1 000 V.

5.2 Imprégnation

L'expérience a montré que le fil isolé conforme à l'IEC 60317 et les matériaux d'imprégnation conformes à l'IEC 60455-3-5 ou à l'IEC 60464-3-2 peuvent réagir l'un sur l'autre pendant le processus de vieillissement thermique.

NOTE 1 L'essai d'éprouvettes imprégnées permet d'évaluer la compatibilité de l'isolant du fil avec un matériau d'imprégnation. Les indices de température de différentes combinaisons peuvent ainsi être comparés.

L'interaction entre l'isolant du fil et le matériau d'imprégnation peut augmenter ou réduire la vie thermique relative quand cette combinaison est comparée à la vie du fil soumis à essai sans imprégnation. Avec des éprouvettes imprégnées, cette procédure d'essai peut donc donner une indication de l'endurance thermique d'une combinaison d'isolant de fil et de matériau d'imprégnation.

Si une imprégnation est exigée, la procédure suivante doit s'appliquer:

L'éprouvette en position verticale doit être immergée dans le matériau d'imprégnation pendant (60 ± 10) s (voir note). Elle doit être retirée lentement et sans à-coups à la vitesse d'environ 1 mm/s. Elle doit être égouttée horizontalement pendant 10 min à 15 min et étuvée

horizontalement conformément aux recommandations du fabricant ou conformément à un programme convenu. Si plus d'un traitement est à appliquer, immerger, égoutter et étuver l'éprouvette verticalement en la retournant à chaque traitement successif.

NOTE 2 Certains matériaux d'imprégnation, tels ceux à forte viscosité ou des produits thixotropes nécessitent des méthodes de traitement différentes.

5.3 Notes sur le nombre d'éprouvettes

La précision des résultats d'essai dépend largement du nombre d'éprouvettes vieilles à chaque température. Un nombre plus grand d'éprouvettes est nécessaire pour obtenir un degré de précision acceptable s'il y a une grande dispersion des résultats pour un groupe d'éprouvettes exposées à chaque température.

L'expérience a montré que vingt éprouvettes sans imprégnation et dix éprouvettes avec imprégnation donnent des résultats avec une tolérance acceptable. Un minimum de dix éprouvettes doit être utilisé.

5.4 Porte-éprouvettes

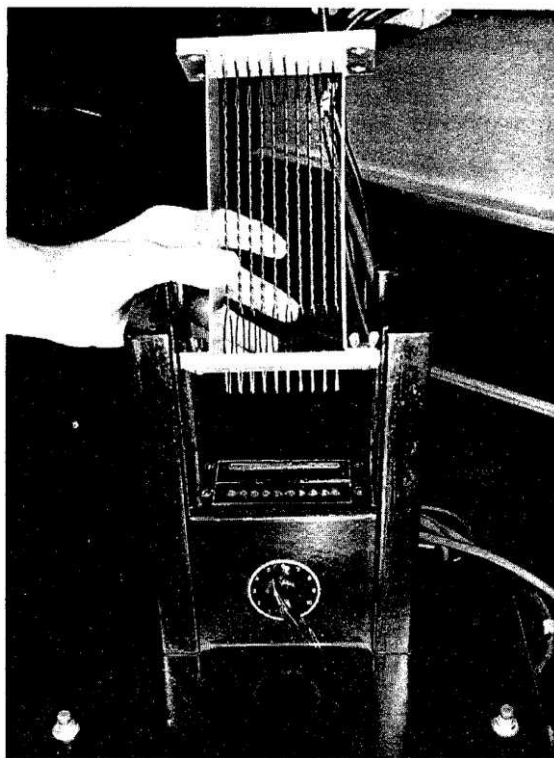
5.4.1 Pour les éprouvettes conformes à 5.1.1

Dans la mesure où la manipulation individuelle des éprouvettes torsadées peut occasionner des défaillances prématurées, il est recommandé de placer les éprouvettes sur un support approprié comme le montre la Figure 8. Il convient de concevoir le support de manière à protéger les éprouvettes torsadées contre des dommages mécaniques externes et des déformations. Le support est construit de façon que les extrémités des torsades le dépassent, pour réaliser les connexions électriques nécessaires à l'essai diélectrique comme le montre la Figure 9. Le support doit être conçu pour au moins dix éprouvettes, pour réduire le temps des manipulations.



IEC

Figure 8 – Porte-éprouvettes



IEC

Figure 9 – Porte-échantillons et dispositif de connexion électrique

5.4.2 Pour les échantillons conformes à 5.1.2

L'échantillon doit être suspendu dans l'étuve. Aucun porte-échantillon spécial n'est exigé.

6 Température d'exposition

Les températures auxquelles il est recommandé de soumettre les échantillons sont données dans le présent Article 6.

Les valeurs recommandées pour les températures et les durées des cycles d'exposition sont données dans le Tableau 3. Un cycle d'essai est défini comme une exposition à température élevée suivie d'un essai diélectrique à température ambiante (20 °C à 30 °C). Les échantillons doivent être placés directement dans les étuves de vieillissement et retirés sans modifier la température de réglage des étuves.

Il convient de chauffer les étuves à la température appropriée avant de soumettre les échantillons à la température d'exposition.

Il convient de vieillir les échantillons dans une étuve à circulation d'air forcé capable de maintenir la température des échantillons en essai à la température d'exposition choisie à + 2°C près.

Les durées d'exposition sont choisies de manière à soumettre les échantillons à environ 10 cycles à chaque température avant d'obtenir la durée de fonctionnement avant défaillance.

Tableau 3 – Valeurs recommandées pour les durées d'exposition en jours par cycle

Température d'exposition ou de vieillissement (°C)	Indice de température estimé						
	105-109	120-130	150-159	180-189	200-209	220-239	240-249
320	–	–	–	–	–	–	1
310	–	–	–	–	–	–	2
300	–	–	–	–	–	1	4
290	–	–	–	–	–	2	7
280	–	–	–	–	1	4	14
270	–	–	–	–	2	7	28
260	–	–	–	1	4	14	49
250	–	–	–	2	7	28	–
240	–	–	–	4	14	49	–
230	–	–	–	7	28	–	–
220	–	–	1	14	49	–	–
210	–	1	2	28	–	–	–
200	–	2	4	49	–	–	–
190	1	4	7	–	–	–	–
180	2	7	14	–	–	–	–
170	4	14	28	–	–	–	–
160	7	28	49	–	–	–	–
150	14	49	–	–	–	–	–
140	28	–	–	–	–	–	–
130	49	–	–	–	–	–	–
120	–	–	–	–	–	–	–

NOTE Les valeurs recommandées dans le Tableau 3 diffèrent de celles de l'IEC 60216-3, mais ont été jugées mieux adaptées aux fils émaillés.

Des valeurs d'endurance thermique obtenues sur des éprouvettes soumises en moyenne à moins de huit ou à plus de vingt cycles à la température d'exposition, ne peuvent pas être considérées comme fiables et il convient de ne pas les utiliser pour l'évaluation du comportement thermique du fil émaillé. Par conséquent, une durée de cycle plus courte ou plus longue que celles indiquées dans le Tableau 3 peut être choisie pour certaines températures d'exposition, pour assurer que le nombre moyen de cycles avant défaillance s'inscrit dans cette gamme.

Après avoir soumis les éprouvettes à un cycle particulier, la durée peut être augmentée ou réduite de façon à ajuster le nombre de cycles nécessaires pour obtenir la durée de fonctionnement avant défaillance.

Il convient d'exposer les éprouvettes à au moins trois et de préférence à quatre températures d'exposition. Il convient que la plus basse température, laquelle est recommandée supérieure de 20°C à la classe thermique souhaitée, conduise à une durée de fonctionnement avant défaillance de plus de 5 000 h. La plus haute température d'exposition doit avoir une valeur d'au moins 100 h pour être considérée comme une donnée valide. Il convient que les températures d'exposition ne diffèrent pas de plus de 20°C les unes des autres. La précision de l'indice de température déduit des résultats s'améliore au fur et à mesure que la température d'exposition se rapproche de la température à laquelle l'isolation est exposée en service.

7 Tension d'essai et son application

La tension à appliquer doit être une tension alternative et doit présenter une fréquence nominale de 50 Hz ou 60 Hz de forme sensiblement sinusoïdale, le facteur de crête restant dans les limites de $\sqrt{2} \pm 5\%$ (1,34 à 1,48). Le transformateur d'essai doit avoir une puissance assignée d'au moins 500 VA et le courant fourni doit avoir une forme d'onde essentiellement non déformée dans les conditions d'essai.

Pour déceler les défauts, le dispositif d'indication de protection contre les surintensités doit fonctionner lorsqu'une intensité de 5 mA ou plus passe dans le circuit à haute tension. L'alimentation en tension d'essai doit pouvoir fournir un courant de détection de 5 mA ou plus sans présenter une chute de tension supérieure à 10 %.

Les éprouvettes sont retirées des étuves et refroidies à la température ambiante. Chaque éprouvette doit être soumise à une tension d'essai qui est fonction de l'accroissement du diamètre dû à l'isolant, comme spécifié dans le Tableau 3 pour les éprouvettes conformes à 5.1.1, et dans le Tableau 4 pour les éprouvettes conformes à 5.1.2. Dans le cas des fils avec une couche thermoadhérente, la couche thermoadhérente est comprise dans l'accroissement du diamètre dû à l'isolant.

Tableau 4 – Tension d'essai pour le fil de section circulaire enveloppé d'un ruban et pour le fil de section rectangulaire émaillé ou enveloppé d'un ruban

Accroissement de dimension dû à l'isolant (mm)		Tension (valeur efficace)
De	Jusqu'à et y compris	
0,035	0,050	300
0,050	0,065	375
0,065	0,080	450
0,080	0,090	550
0,090	0,100	650
0,100	0,115	700
0,115	0,130	750
0,130	0,140	800
0,140	0,150	850

La tension d'essai doit être appliquée aux éprouvettes pendant environ 1 s.

NOTE Un temps d'application relativement court de la tension d'essai est souhaitable pour réduire l'effet corona et la fatigue du diélectrique.

Dans tous les cas, on doit veiller à éviter des dommages mécaniques sur les éprouvettes. Les éprouvettes qui ne satisfont pas à l'essai diélectrique doivent être éliminées et les éprouvettes restantes remises à l'étuve pour une autre exposition à la température.

8 Calculs

8.1 Durée de vie de l'éprouvette

La durée de vie d'une éprouvette particulière à une seule température d'exposition est déterminée en calculant le point milieu entre les heures totales d'exposition à la température à l'issue desquelles l'éprouvette n'a pas tenu l'épreuve diélectrique et les heures totales d'exposition des cycles précédents. Cela suppose que l'éprouvette aurait probablement failli à l'épreuve diélectrique à un moment ou un autre au milieu du cycle d'exposition thermique.

précédent. La durée de vie d'une éprouvette est donc la somme de toutes les heures jusqu'à défaillance, moins la moitié des heures du dernier cycle d'exposition.

8.2 Durée de fonctionnement avant défaillance

La durée de fonctionnement avant défaillance d'un groupe d'éprouvettes à une seule température d'exposition doit être calculée à l'aide de la valeur médiane ou de la valeur moyenne logarithmique. Pour de nombreux matériaux, la valeur médiane est statistiquement valable. Dans la plupart des cas, l'utilisation de la médiane réduit notablement la durée de l'essai car l'essai s'interrompt dès l'obtention de la valeur médiane.

Lorsque l'on utilise la valeur médiane, la durée de fonctionnement avant défaillance est calculée comme suit:

Lorsqu'un groupe d'éprouvettes comporte un nombre total de n éprouvettes, la durée de fonctionnement avant défaillance du groupe est égale à:

- a) la durée de vie de l'éprouvette de rang $(n + 1)/2$ si n est impair (voir 8.1);
- b) la valeur moyenne logarithmique des durées de vie des éprouvettes de rang $n/2$ et $(n + 2)/2$, si n est pair (voir 8.1).

Par exemple, si n vaut 12, la durée de fonctionnement avant défaillance du groupe sera la valeur moyenne des durées de vie de la sixième et de la septième éprouvettes. Pour des raisons pratiques, il est suggéré que, lorsque la valeur médiane est utilisée pour calculer la durée de fonctionnement avant défaillance du groupe, le nombre total d'éprouvettes du groupe soit impair pour simplifier les calculs.

Lorsque l'on utilise la valeur moyenne logarithmique, la durée de fonctionnement avant défaillance est calculée en divisant la somme des logarithmes des durées de vie des éprouvettes du groupe (voir 8.1) par le nombre total n d'éprouvettes dans le groupe. L'antilogarithme de cette valeur moyenne est la durée de fonctionnement avant défaillance du groupe.

8.3 Linéarité des données

Pour éviter des extrapolations erronées (voir 8.4), il convient de calculer le coefficient de corrélation conformément à l'Annexe B, afin d'obtenir une mesure de la linéarité.

Si le coefficient de corrélation r est égal ou supérieur à 0,95, les données sont considérées comme étant linéaires et les points de mesure sont pratiquement alignés. Si le coefficient de corrélation est inférieur à 0,95, les données sont considérées comme étant non linéaires et il convient d'effectuer un essai supplémentaire à une température inférieure à la température précédente la plus basse.

Le nouveau point de température peut être de 10 °C inférieur au précédent point de température le plus bas. Lors du nouveau calcul de l'indice de température et du coefficient de corrélation, un seul point de température peut être supprimé, en commençant par la plus haute température, pour chaque nouveau point de température obtenu.

Les données sont linéaires si la dégradation thermique du fil émaillé ou du fil émaillé verni paraît résulter d'une seule réaction chimique. La non-linéarité peut indiquer que:

- a) deux réactions ou plus ayant des énergies d'activation (pentes) différentes prédominent à des températures différentes dans le domaine d'essai; ou
- b) des erreurs ont été introduites par la technique d'échantillonnage et/ou par la méthode d'essai.

Il convient de ne pas utiliser des données non linéaires pour les extrapolations.

8.4 Calcul et graphique de l'endurance thermique et de l'indice de température

L'endurance thermique est représentée graphiquement en reportant la durée de fonctionnement avant défaillance (voir 8.2) en fonction de la température d'exposition correspondante, sur du papier millimétré ayant en ordonnées une échelle logarithmique des temps et en abscisses l'inverse des températures absolues. Les températures d'exposition à 2 000 h et 20 000 h sont considérées comme étant déduites de la droite de régression de premier ordre calculée conformément à l'Annexe A. Une droite de régression est tracée entre les deux points sur le graphique pour représenter l'endurance thermique du fil de bobinage émaillé (voir Figure 10).

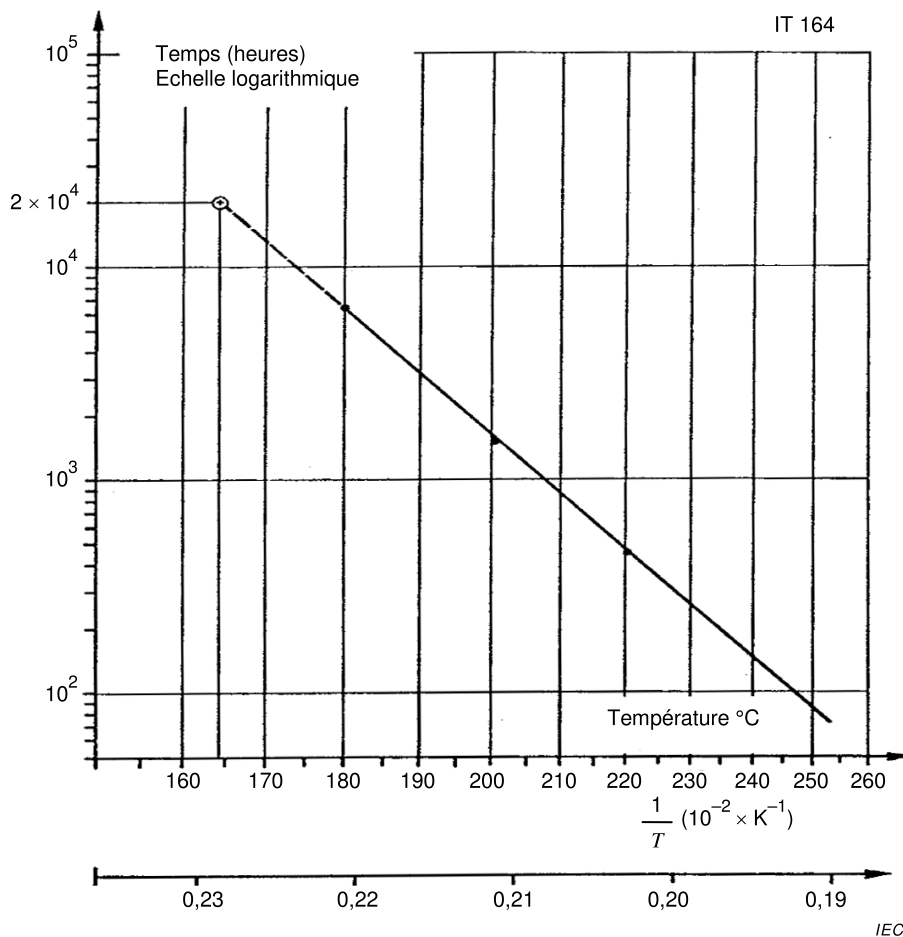


Figure 10 – Graphique d'endurance thermique – Indice de température

L'indice de température du fil émaillé est le nombre correspondant à la température en degrés Celsius à laquelle la droite de régression coupe la ligne des 20 000 h. L'indice est exprimé sans référence aux degrés Celsius.

S'il est nécessaire d'entreprendre une analyse statistique plus approfondie, l'IEC 60216-3 peut être consultée.

9 Rapport

Le rapport des résultats doit comprendre au moins les informations suivantes:

- L'identification ou la description de l'émail, le grade et le type du conducteur (par exemple: cuivre, aluminium, etc.);

- b) L'identification ou la description du vernis d'imprégnation et le mode d'imprégnation utilisé;
- c) La durée de fonctionnement avant défaillance de chaque groupe d'éprouvettes à chaque température d'exposition;
- d) Un graphique indiquant la droite de régression de premier ordre passant par les valeurs de durée de fonctionnement avant défaillance;
- e) L'indice de température (IT).

Annexe A (normative)

Méthode pour le calcul de la droite de régression

La présente annexe présente une méthode rapide pour tracer la droite de régression pour les données d'endurance thermique. Cette méthode peut être utilisée pour un nombre quelconque de mesurages à diverses températures d'essai. Si des informations concernant l'intervalle de confiance sont requises, une analyse plus détaillée doit être effectuée conformément à l'IEC 60216-3.

Il a été établi que bon nombre d'isolations se détériorent d'une manière telle que l'équation suivante s'applique:

$$L = Ae^{B/T} \quad (1)$$

où:

- L = endurance de l'isolation en heures;
- T = température absolue en kelvins;
- A, B = constantes pour chaque isolation, et
- e = base des logarithmes naturels.

L'équation (1) peut s'exprimer sous forme linéaire en prenant les logarithmes:

$$\log_{10} L = \log_{10} A + (\log_{10} e) \cdot \frac{B}{T} \quad (2)$$

soit:

- Y = $\log_{10} L$
- a = $\log_{10} A$
- X = $1/T$
- b = $(\log_{10} e) B$

alors:

$$Y = a + bX \quad (3)$$

Ainsi les données résultant des essais à températures plus élevées peuvent être portées et tracées sur un graphique $\log_{10} L$ en fonction de $1/T$ et la droite peut être extrapolée aux températures plus basses. Cependant, comme la nature des indications logarithmiques ne permet pas une extrapolation précise pour tracer la meilleure droite passant par les points de mesure par la méthode graphique, une méthode plus rigoureuse doit être utilisée pour obtenir plus de précision et d'uniformité. En appliquant la méthode des moindres carrés, les constantes a et b peuvent être déduites des données expérimentales obtenues. Ces équations sont les suivantes:

$$a = \frac{\sum Y - b \sum X}{N} \quad (4)$$

$$b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (5)$$

où:

- X = $1/T$ = inverse de la température d'essai en kelvins ($\theta^\circ\text{C} + 273^\circ\text{C}$);
- N = nombre de températures d'essai utilisées;
- Y = $\log_{10} L$ = logarithme de durée de fonctionnement avant défaillance;
- $\sum$ = somme des valeurs N .

Connaissant les constantes a et la pente b de la droite de régression, la température, pour une valeur de vie donnée, peut être calculée comme suit:

$$Y = a + bX$$

$$T = \frac{1}{X} = \frac{b}{Y - a} \quad (6)$$

$$\text{Température à 20 000 h en degrés Celsius} = \frac{b}{4,3010 - a} - 273 \quad (7)$$

(indice de temperature)

$$\text{Température à 2 000 h en degrés Celsius} = \frac{b}{3,3010 - a} - 273 \quad (8)$$

Pour simplifier le traitement des données d'essai utilisées dans les Equations (4) à (8), il est suggéré de suivre les étapes de l'exemple de calcul indiquées ci-après (voir Tableau A1 et Tableau A.2):

- a) Dans la colonne 1, répertorier les températures en $^\circ\text{C}$, comme illustré dans le Tableau A.2, auxquelles un groupe d'éprouvettes a été soumis à essai.
- b) Dans les colonnes 2 et 3, répertorier les valeurs inverses ($X = 1/T$) et inverses au carré (X^2 $1/T^2$) des températures d'essai ci-dessus converties en kelvins (voir aussi Tableau A1).
- c) Dans la colonne 4, répertorier les durées de fonctionnement avant défaillance L , en heures, pour chaque groupe d'éprouvettes, et dans la colonne 5, les $\log_{10}$ des valeurs de la quatrième colonne ($Y = \log_{10} L$).
- d) Dans la colonne 6, répertorier les produits de X et Y .
- e) Faire la somme des colonnes 2, 3, 5 et 6 et inscrire la somme (indiquée par $\sum$) respectivement au bas de chaque colonne.
- f) Indiquer le nombre N d'heures de fonctionnement avant défaillance sur la feuille de travail.
- g) En utilisant les valeurs obtenues aux étapes e) et f), calculer b (Equation 5) et a (Equation 4) dans cet ordre. La constante a est toujours négative.
- h) En utilisant les constantes a et b , calculer la température en degrés Celsius correspondant à 20 000 h (Equation 7) et à 2 000 h (Equation 8).

- i) Porter sur le graphique les deux points de température ci-dessus calculés à l'étape h, sur papier log10L en fonction de $1/T$ et tracer la droite de régression (voir Figure A.1).
- j) Porter les durées de fonctionnement avant défaillance L à leur température respective sur le même graphique.

Tableau A1 – Températures d'essai habituelles en degrés Celsius et en kelvins correspondants, avec valeurs inverses et inverses au carré

θ (°C)	T (K)	$X = 1/T$ (K ⁻¹)	$X^2 = 1/T^2$ (K ⁻²)
105	378	$2,646 \times 10^{-3}$	$6,999 \times 10^{-6}$
120	393	$2,545 \times 10^{-3}$	$6,475 \times 10^{-6}$
125	398	$2,513 \times 10^{-3}$	$6,313 \times 10^{-6}$
130	403	$2,481 \times 10^{-3}$	$6,157 \times 10^{-6}$
140	413	$2,421 \times 10^{-3}$	$5,863 \times 10^{-6}$
150	423	$2,364 \times 10^{-3}$	$5,589 \times 10^{-6}$
155	428	$2,336 \times 10^{-3}$	$5,459 \times 10^{-6}$
165	438	$2,283 \times 10^{-3}$	$5,212 \times 10^{-6}$
175	448	$2,232 \times 10^{-3}$	$4,982 \times 10^{-6}$
180	453	$2,208 \times 10^{-3}$	$4,873 \times 10^{-6}$
185	458	$2,183 \times 10^{-3}$	$4,767 \times 10^{-6}$
190	463	$2,160 \times 10^{-3}$	$4,665 \times 10^{-6}$
200	473	$2,114 \times 10^{-3}$	$4,470 \times 10^{-6}$
210	483	$2,070 \times 10^{-3}$	$4,287 \times 10^{-6}$
220	493	$2,028 \times 10^{-3}$	$4,114 \times 10^{-6}$
225	498	$2,008 \times 10^{-3}$	$4,032 \times 10^{-6}$
230	503	$1,988 \times 10^{-3}$	$3,952 \times 10^{-6}$
240	513	$1,949 \times 10^{-3}$	$3,800 \times 10^{-6}$
250	523	$1,912 \times 10^{-3}$	$3,656 \times 10^{-6}$
260	533	$1,876 \times 10^{-3}$	$3,520 \times 10^{-6}$
270	543	$1,842 \times 10^{-3}$	$3,392 \times 10^{-6}$
280	553	$1,808 \times 10^{-3}$	$3,270 \times 10^{-6}$
300	573	$1,745 \times 10^{-3}$	$3,048 \times 10^{-6}$
320	593	$1,686 \times 10^{-3}$	$2,844 \times 10^{-6}$
NOTE Les calculs pour X^2 sont basés sur les valeurs non arrondies.			

Tableau A.2 – Exemple de calcul

Colonne 1 Température (°C)	Colonne 2 $X = 1/T$	Colonne 3 $X^2 = 1/T^2$	Colonne 4 L (h)	Colonne 5 $Y = \log_{10} L$	Colonne 6 $XY = (\log_{10} L)/T$
170	$2,257\,73 \times 10^{-3}$	$5,095\,57 \times 10^{-6}$	5 600	3,748 19	$8,460\,92 \times 10^{-3}$
185	$2,183\,41 \times 10^{-3}$	$4,767\,26 \times 10^{-6}$	2 600	3,414 97	$7,456\,27 \times 10^{-3}$
200	$2,114\,16 \times 10^{-3}$	$4,469\,69 \times 10^{-6}$	1 500	3,176 09	$6,714\,78 \times 10^{-3}$
215	$2,049\,18 \times 10^{-3}$	$4,199\,14 \times 10^{-6}$	640	2,806 18	$5,750\,37 \times 10^{-3}$
Σ	$8,604\,09 \times 10^{-3}$	$18,531\,66 \times 10^{-6}$		13,145 43	$28,382\,34 \times 10^{-3}$

$$N = 4$$

$$b = \frac{N \Sigma XY - \Sigma X \Sigma Y}{N \Sigma X^2 - (\Sigma X)^2} = \frac{4 \times 28,38234 \times 10^{-3} - 8,60409 \times 10^{-3} \times 13,14543}{4 \times 18,53166 \times 10^{-6} - 8,60409 \times 10^{-3} \times 8,60409 \times 10^{-3}} = 4\,413$$

$$a = \frac{\Sigma Y - b \Sigma X}{N} = \frac{13,14543 - 4\,413 \times 8,60409 \times 10^{-3}}{4} = -6,20610$$

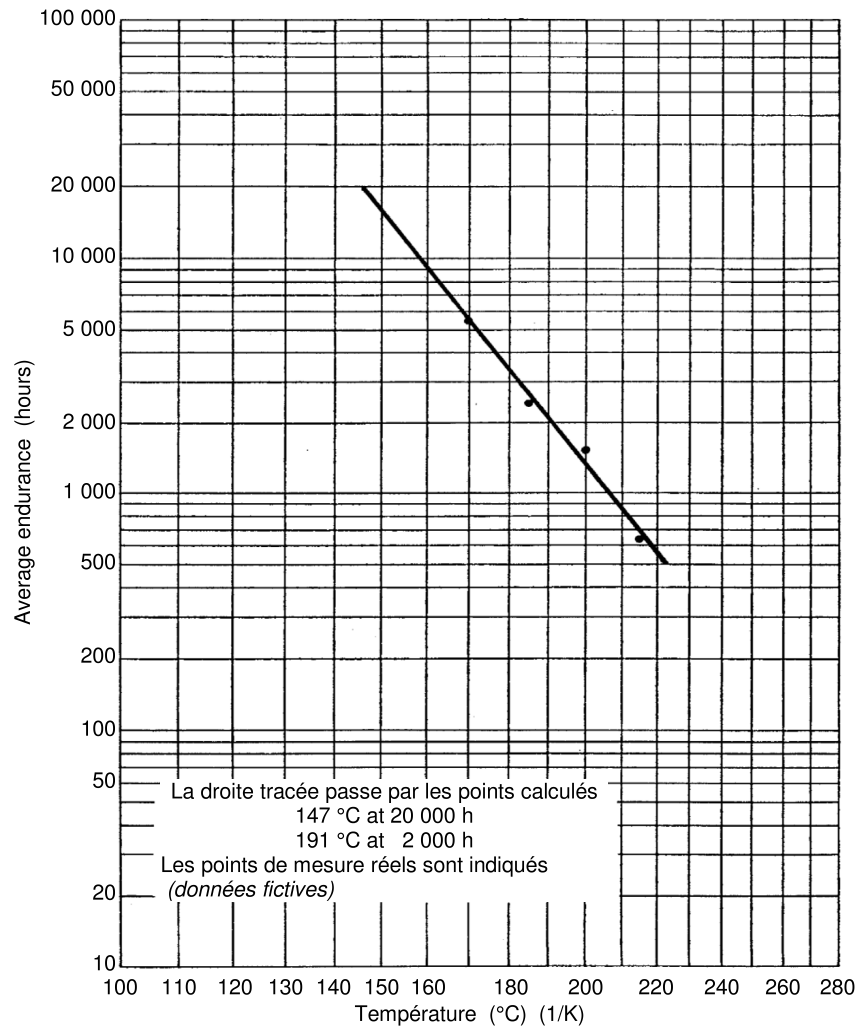
$$\text{Température à 20 000 h en degrés Celsius} = \frac{b}{Y - a} - 273$$

$$\frac{4413}{4,301\,0 + 6,20610} - 273 = 147\,^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Température à 2 000 h en degrés Celsius} = \frac{b}{Y - a} - 273$$

$$\frac{4413}{3,301\,0 + 6,20610} - 273 = 191\,^{\circ}\text{C}$$

Il convient que ce graphique comprenne toutes les informations nécessaires concernant les matériaux isolants et les systèmes d'isolation considérés



IEC

Figure A.1 – Tracé de la droite de régression fondé sur un exemple de calcul (Tableau A.2)

Annexe B (normative)

Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation r est la mesure du rapport entre les variables.

Quand $r = 1,0$, il existe une corrélation parfaite entre les variables et quand $r = 0$, il n'existe pas de corrélation.

$$r = \sqrt{\frac{aY + bXY - N(\text{Avg } Y)^2}{Y^2 - N(\text{Avg } Y)^2}}$$

où:

- a = intersection Y de la droite de régression;
- b = pente de la droite de régression;
- X = $1/T$ = inverse de la température d'essai en kelvins ($8\text{ °C} + 273\text{ °C}$);
- N = nombre de températures d'essai utilisées;
- X, Y = les variables.

En utilisant les données d'exemple dans le Tableau A.2 de l'Annexe A, le coefficient de corrélation est calculé conformément à l'équation suivante:

$$\sqrt{\frac{a\Sigma Y + b\Sigma XY - N(\text{Avg } Y)^2}{\Sigma Y^2 - N(\text{Avg } Y)^2}} = 0,996$$

Si le coefficient de corrélation r est égal ou supérieur à 0,95, les données sont considérées comme étant linéaires et les points de mesure sont pratiquement alignés.

Si le coefficient de corrélation est inférieur à 0,95, les données sont considérées comme étant non linéaires et des essais supplémentaires à d'autres températures d'essai sont nécessaires. Il est recommandé que le nouveau point de température soit inférieur de 10 °C au point de température précédent le plus bas.

Lors du nouveau calcul de l'indice de température et du coefficient de corrélation, il est admis de supprimer un point de température, en partant de la température la plus haute, pourvu qu'il reste trois points de mesure valides.

Les données sont linéaires si la dégradation thermique d'un fil recouvert d'un film isolant ou d'un fil recouvert d'un vernis isolant paraît résulter d'une seule réaction chimique. La non-linéarité peut indiquer ce qui suit:

- f) Deux réactions ou plus ayant des énergies d'activation (pentes) différentes sont prédominantes à des températures différentes dans le domaine d'essai; ou
- g) Des erreurs ont été introduites par la technique d'échantillonnage ou par la méthode d'essai, ou par les deux à la fois.

Il doit être noté que les résultats non linéaires fournissent des données utiles lorsqu'elles sont reportées sur le graphique de l'endurance thermique, même si elles ne peuvent pas être extrapolées de manière à donner un indice de température (IT).

Bibliographie

IEC 60317 (toutes les parties), *Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage*

IEC 60455-3-5, *Composés réactifs à base de résines utilisés comme isolants électriques – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers – Feuille 5: Résines d'imprégnation à base de polyester insaturé*

IEC 60464-3-2, *Vernis utilisés pour l'isolation électrique – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers – Feuille 2: Vernis d'imprégnation durcissant à chaud*

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch