

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60172:2020



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

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

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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 978-2-8322-9086-6

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 non-tape wrapped round wire	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	13
6 Temperature exposure	14
7 Test voltage and its application	15
8 Calculations	16
8.1 Specimen failure time	16
8.2 Time to failure	16
8.3 Linearity of data	16
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	25
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 – Thermal endurance graph – Temperature index	17
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	14
Table 4 – Proof voltage for tape-wrapped round and for enamelled or tape-wrapped rectangular wire	15

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60172:2020

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 fifth edition cancels and replaces the fourth edition published in 2015. This edition constitutes a technical revision.

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

- revision of 3.1, definition of thermal index;
- revision of 3.3, time to failure;
- revisions to 5.1.1 for clarity and to reduce the range wire size range to which the test applies;
- revisions to 5.1.2 for tape wrapped round and enamelled or tape wrapped rectangular wire for clarity;
- revision to Clause 9 to add the correlation coefficient, r to the report.

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

FDIS	Report on voting
55/1876/FDIS	55/1893/RVD

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

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

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

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

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 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 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.

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 temperature index TI

number which permits comparison of the temperature/time characteristics of an electrical insulating material, or a simple combination of materials, based on the temperature in degrees Celsius which is obtained by extrapolating the Arrhenius plot of life versus temperature to a lifetime of 20 000 h

Note 1 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] modified by merging Note 1 into the definition, and to specify a lifetime of 20 000 h.]

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

number of hours to failure calculated from the specimen mean value or logarithmic mean value failure times for a set of specimens at one exposure temperature, in accordance with 8.2

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-exposure 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 non-tape wrapped round wire

This procedure applies to enamelled round wires that are not tape wrapped. The thermal index can be determined by evaluating enamelled non-tape wrapped round wire with a nominal conductor diameter of 0,224 mm up to and including 2,65 mm.

NOTE For round enamelled winding wires, experience has shown that nominal conductor diameters of 0,800 mm up to and including 1,60 mm are generally found convenient to handle and test.

Wires with a nominal conductor diameter between 0,280 mm and 0,500 mm are permitted for use when the specification range of diameters is limited to 0,500 mm and finer.

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

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.

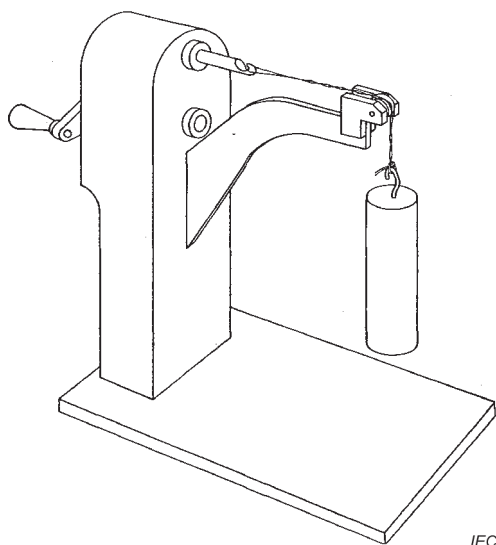


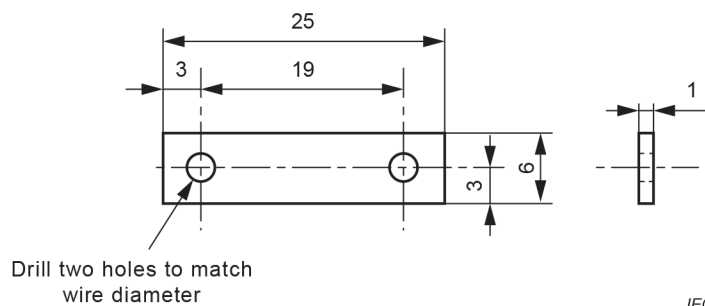
Figure 1 – Device used to form enamelled round wire test specimen

Table 1 – Force and number of twists for specimens

Nominal diameter mm		Force applied to wire pairs 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	2,65	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.

Dimensions in millimetres

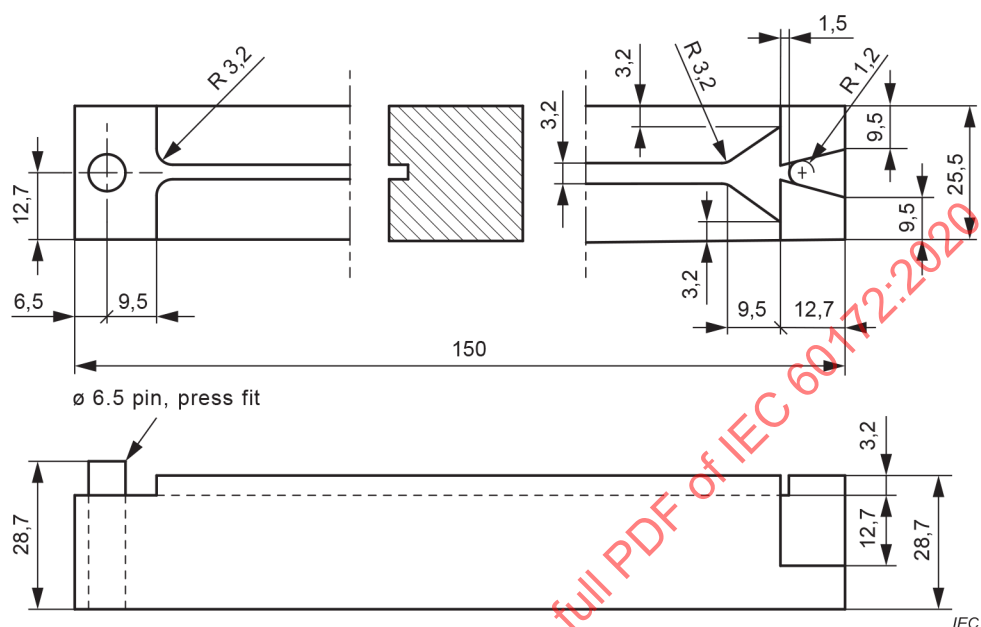


Material: Silicone glass laminate

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.

Dimensions in millimetres



R = Radius of bend

Figure 3 – Twist forming jig

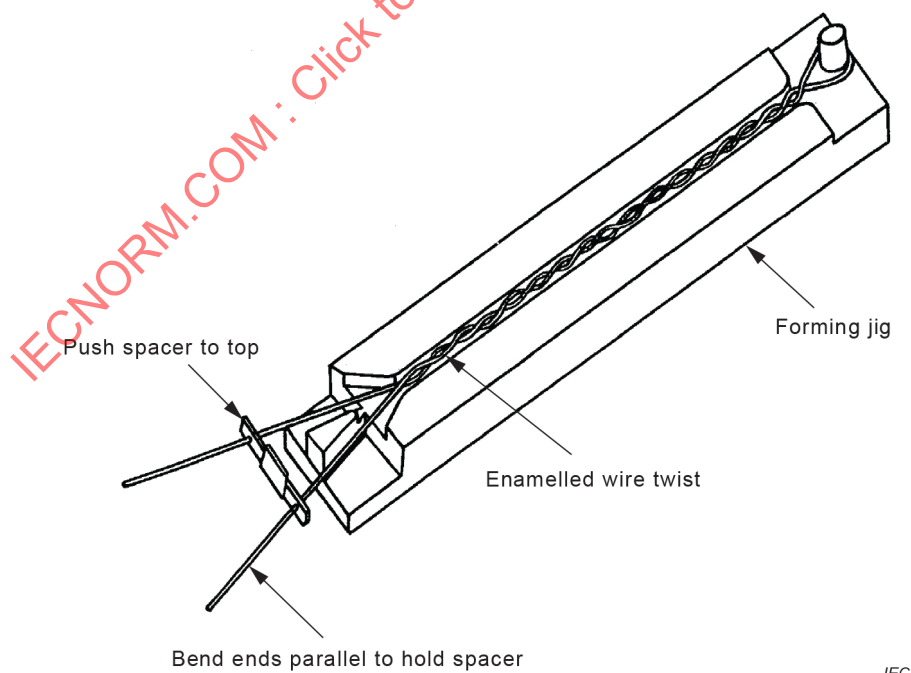


Figure 4 – Test specimen set up in forming jig

- 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.

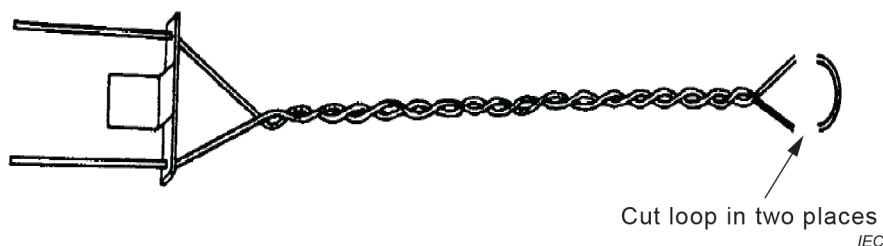


Figure 5 – Test specimen formed with loop cut

In order to ensure homogeneity of the set of test specimens, it is recommended that test specimens be subjected to, and withstand without breakdown, a test voltage three times the value given in Table 2 for 1 s prior to starting thermal exposure cycling.

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

This procedure applies to any convenient dimension of tape wrapped round or tape wrapped rectangular wire.

It is recommended to select a wire having dimensions that minimize the bending force necessary to shape the test specimen, since 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.

Dimensions in millimetres

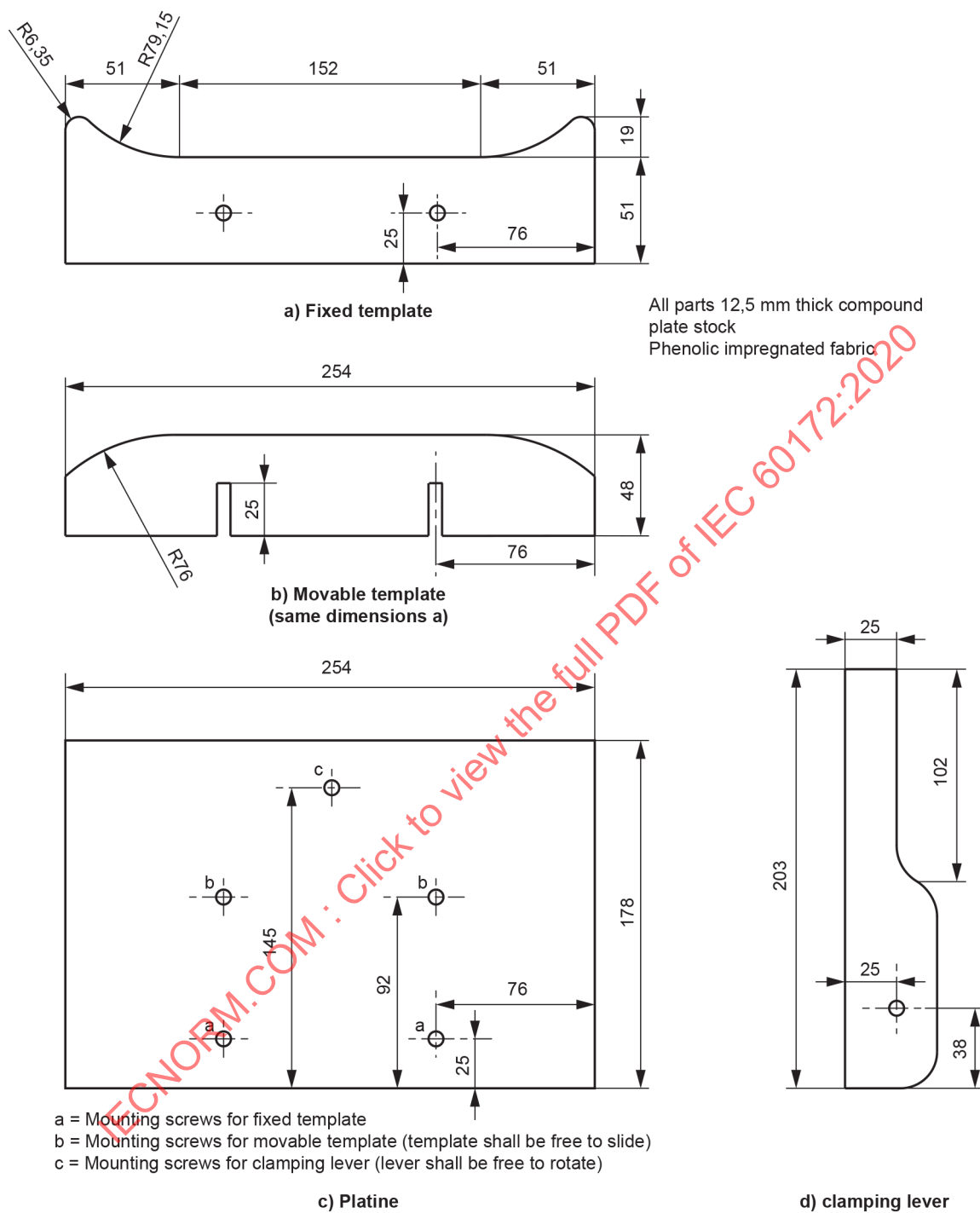
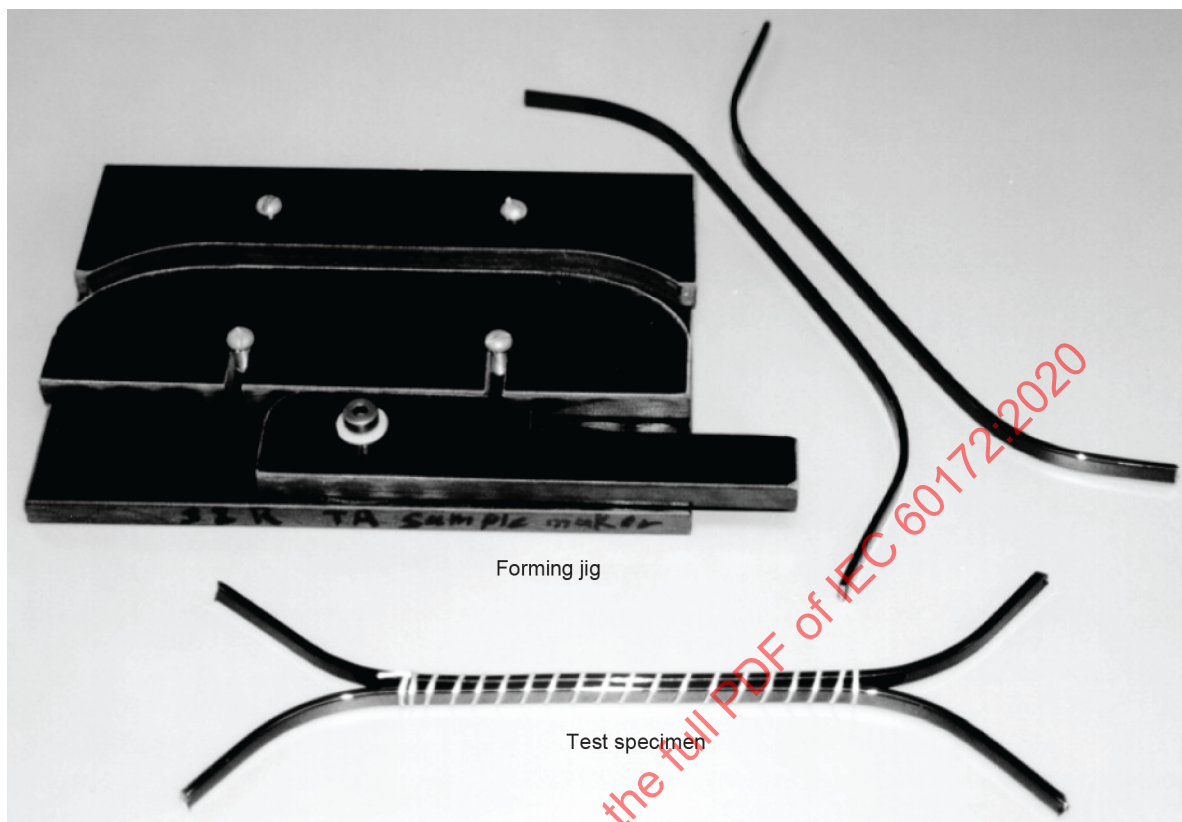


Figure 6 – Jig for bending large magnet wire, dielectric test specimen

- 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 starting the thermal exposure cycles, the specimen shall be proof-tested at 1 000 V AC.

5.2 Varnish impregnation

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. 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 connections for proof testing. The holder shall be designed for at least ten specimens to decrease handling time.



IEC

Figure 8 – Specimen holder

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

Test specimens shall be subjected to the temperatures given in this Clause 6.

The test temperature and time of exposure in each cycle are given in Table 3. A test cycle is defined as one exposure to a high temperature followed by one proof-voltage test at room temperature (20 – 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 shall be heated to the proper temperatures before the specimens are subjected to the exposure temperature.

The specimens shall 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	–	–	–	–	–	–	–

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 shall be exposed to a minimum of three and preferably four exposure temperatures. The lowest temperature, recommended at 20 °C above the desired thermal class, shall 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 AC 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 average thickness of the enamel 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 minimizes 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 can 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;
- b) the mean value of the specimen failure times of specimen number $n/2$ and $(n + 2)/2$; if n is even.

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 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 shall 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 shall 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 shall 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 9).

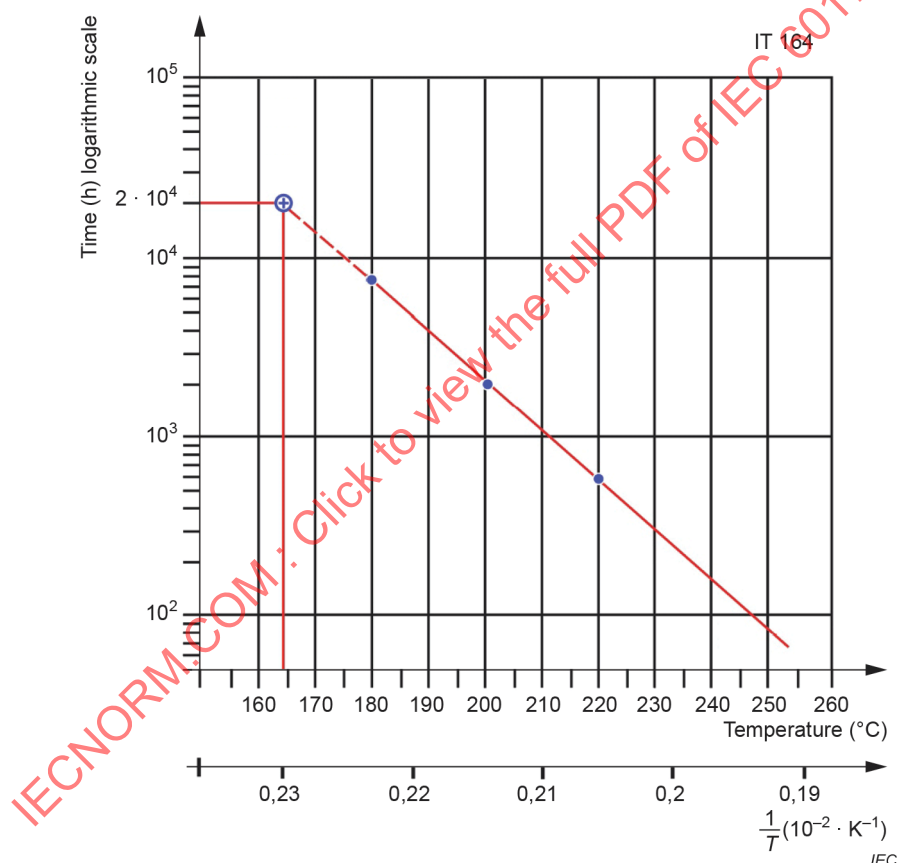


Figure 9 – Thermal endurance graph – Temperature index

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:

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60172:2020

Annex A (normative)

Method for calculation of the regression line

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 formula applies:

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

where:

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

Formula (A.1) may be expressed as a linear function by taking logarithms:

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

Let:

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

Then:

$$Y = a + bX \quad (\text{A.3})$$

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:

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

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

where:

- X = $1/T$ = reciprocal of the test temperature in kelvins (θ °C + 273 °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:

$$Y = a + bX$$

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

$$\text{Temperature at 20 000 h in } ^\circ\text{C} = \frac{b}{4,3010 - a} - 273 \quad (\text{A.7})$$

(temperature index)

$$\text{Temperature at 2 000 h in } ^\circ\text{C} = \frac{b}{3,3010 - a} - 273 \quad (\text{A.8})$$

To simplify the handling of the test data used in Formulae (A.4) to (A.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 °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 the 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 (Formula (A.5)) and a (Formula (A.4)) in that order. The constant a will always be negative;
- h) Using constants a and b , calculate the temperature in degrees °C at 20 000 h (Formula (A.7)) and at 2 000 h (Formula (A.8));
- i) Plot the above two temperature points from step h) on a $\log_{10} L$ versus $1/T$ graphing system and draw the regression line through them as shown in Figure A.1. It is recommended that this graph supplement the minimum test report information required in Clause 9;
- 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	$28,382\,34 \times 10^{-3}$
$N = 4$ $b = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{4 \times 28,38234 \times 10^{-3} - 8,60409 \times 10^{-3} \times 13,14543}{4 \times 18,53166 \times 10^{-6} - 8,60409 \times 10^{-3} \times 8,60409 \times 10^{-3}} = 4413$ $a = \frac{\sum Y - b \sum X}{N} = \frac{13,14543 - 4413 \times 8,60409 \times 10^{-3}}{4} = -6,20610$ Temperature at 20 000 h in degrees °C = $\frac{b}{Y-a} - 273$ $\frac{4413}{4,3010 + 6,20610} - 273 = 147 \text{ °C}$ Temperature at 2 000 h in degrees Celsius = $\frac{b}{Y-a} - 273$ $\frac{4413}{3,3010 + 6,20610} - 273 = 191 \text{ °C}$					

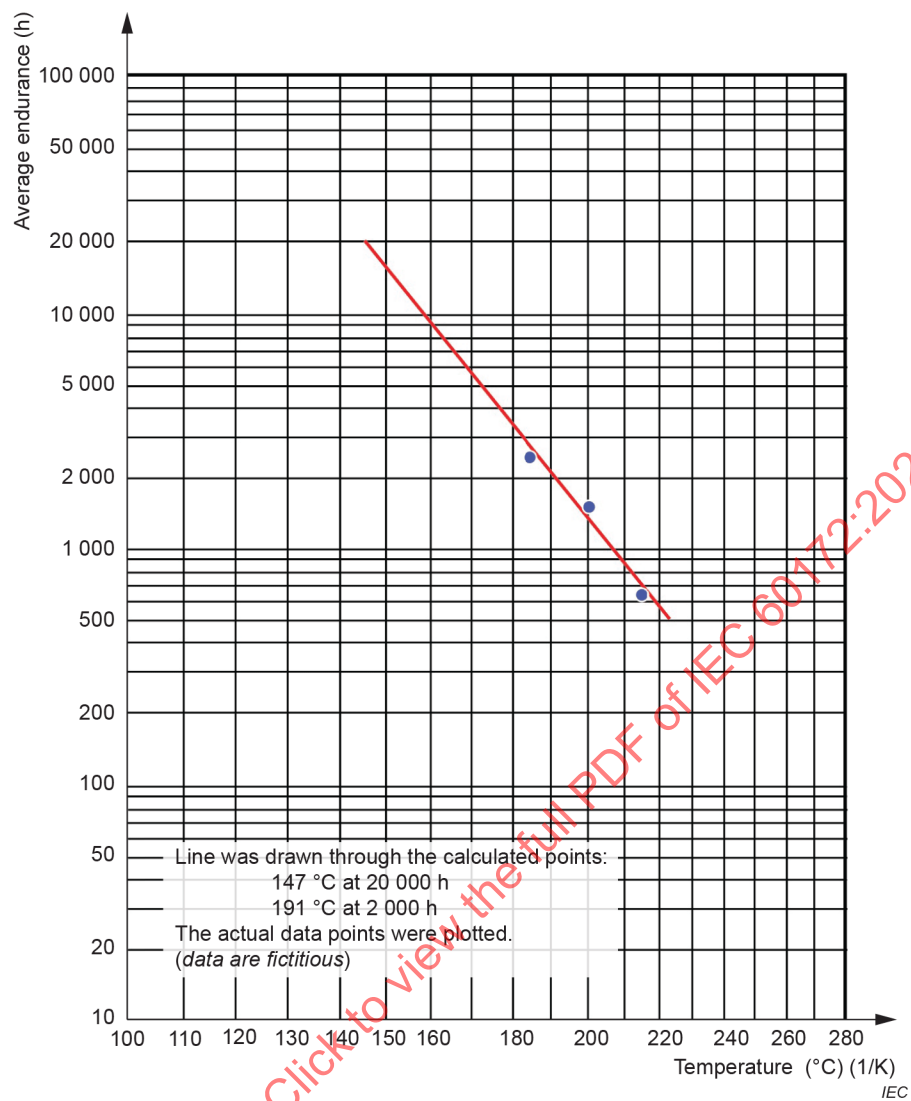


Figure A.1 – Plot of regression line based on sample calculation (Table A.2)

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.

$$r = \sqrt{\frac{aY + bXY - N(\text{Avg } Y)^2}{Y^2 - N(\text{Avg } Y)^2}} \quad (\text{B.1})$$

where:

- a = Y intercept of the regression line;
- b = Slope of the regression line;
- X = $1/T$ = reciprocal of the test temperature in kelvins ($8\text{ °C} + 273\text{ °C}$);
- 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 formula:

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

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 °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 wire*

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*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60172:2020

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	28
1 Domaine d'application	30
2 Références normatives	30
3 Termes et définitions	30
4 Résumé du mode opératoire	31
5 Éprouvettes d'essai	31
5.1 Préparation	31
5.1.1 Fil de section circulaire émaillé sans ruban	31
5.1.2 Fil de section circulaire enveloppé d'un ruban et fil de section rectangulaire émaillé ou enveloppé d'un ruban	34
5.2 Imprégnation	36
5.3 Notes sur le nombre d'éprouvettes	37
5.4 Porte-éprouvettes	37
5.4.1 Pour les éprouvettes conformes à 5.1.1	37
5.4.2 Pour les éprouvettes conformes à 5.1.2	38
6 Température d'exposition	38
7 Tension d'essai et son application	39
8 Calculs	40
8.1 Durée de vie de l'éprouvette	40
8.2 Durée de fonctionnement avant défaillance	40
8.3 Linéarité des données	41
8.4 Calcul et graphique de l'endurance thermique et de l'indice de température	41
9 Rapport	42
Annexe A (normative) Méthode pour le calcul de la droite de régression	43
Annexe B (normative) Coefficient de corrélation	48
Bibliographie	49
Figure 1 –Dispositif pour la réalisation des éprouvettes de fil émaillé de section circulaire	32
Figure 2 –Séparateur	32
Figure 3 – Gabarit pour la préparation des torsades	33
Figure 4 – Éprouvette disposée dans le gabarit de formage	33
Figure 5 – Éprouvette réalisée, boucle coupée	34
Figure 6 – Gabarit pour le formage d'un gros fil de bobinage, essai diélectrique	35
Figure 7 – Gabarit de formage et éprouvette d'essai	36
Figure 8 – Porte-éprouvettes	37
Figure 9 – Graphique d'endurance thermique – Indice de température	42
Figure A.1 – Tracé de la droite de régression fondé sur un exemple de calcul (Tableau A.2)	47
Tableau 1 – Force et nombre de tours des éprouvettes	32
Tableau 2 – Tension d'essai pour le fil émaillé de section circulaire	34
Tableau 3 – Durées d'exposition recommandées en jours par cycle	38

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	40
Tableau A.1 – Températures d'essai habituelles en degrés Celsius et en kelvins correspondants, avec valeurs inverses et inverses au carré.....	45
Tableau A.2 – Exemple de calcul	46

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60172:2020

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

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

Cette cinquième édition annule et remplace la quatrième édition parue en 2015. Cette édition constitue une révision technique.

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

- révision du 3.1, définition d'indice thermique;
- révision du 3.3, durée de fonctionnement avant défaillance;
- révisions du 5.1.1 à des fins de clarification et pour limiter la plage des dimensions de fils à laquelle l'essai s'applique;

- révisions à des fins de clarification du 5.1.2 relatif au fil de section circulaire enveloppé d'un ruban et au fil de section rectangulaire émaillé ou enveloppé d'un ruban;
- révision de l'Article 9 afin d'ajouter le coefficient de corrélation, r au rapport.

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

FDIS	Rapport de vote
55/1876/FDIS	55/1893/RVD

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

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

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

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

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 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 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.

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

indice de température

IT

nombre permettant la comparaison entre les caractéristiques de température et de temps d'un matériau isolant électrique ou d'une simple association de matériaux en fonction de la température en degrés Celsius obtenue par extrapolation du tracé d'Arrhenius de durée de vie en fonction de la température pour une durée de vie de 20 000 h

Note 1 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, modifiée – La Note 1 a été intégrée à la définition et une durée de vie de 20 000 h a été précisée.]

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

temps en nombre d'heures de fonctionnement avant défaillance calculé à partir de la valeur moyenne de l'éprouvette ou de la valeur moyenne logarithmique des durées de vie d'un groupe d'éprouvettes soumises à une température d'exposition, conformément au 8.2

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 d'exposition à la chaleur à une température indiquée à l'Article 6, suivie par une épreuve sous tension à la température ambiante conformément à l'Article 7.

Ce cycle est répété jusqu'à obtenir 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 au 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 en essai.

5 Éprouvettes d'essai

5.1 Préparation

5.1.1 Fil de section circulaire émaillé sans ruban

Cette méthode s'applique aux fils de section circulaire émaillés qui ne sont pas enveloppés d'un ruban. L'indice thermique peut être déterminé en évaluant un fil de section circulaire émaillé sans ruban d'un diamètre nominal du conducteur de 0,224 mm jusques et y compris 2,65 mm.

NOTE Pour les fils de bobinage émaillés de section circulaire, l'expérience a démontré que les diamètres nominaux de conducteurs de 0,800 mm jusques et y compris 1,60 mm conviennent généralement aux manipulations et à l'essai.

L'utilisation des fils dont le diamètre nominal du conducteur est compris entre 0,280 mm et 0,500 mm est admise lorsque la plage de dimensions spécifiée est limitée à 0,500 mm ou moins.

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

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 un appareil comme cela est représenté à la Figure 1. La force (poids) exercée sur les deux fils pendant la torsion et le nombre de tours sont spécifiés dans le Tableau 1.

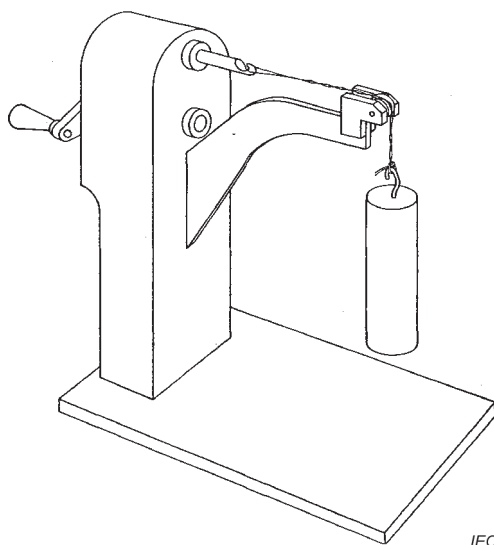


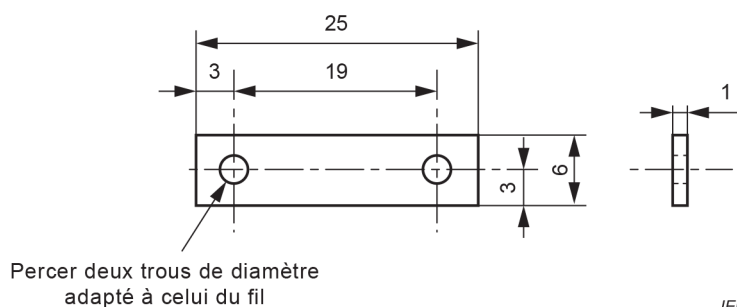
Figure 1 –Dispositif pour la réalisation des éprouvettes de fil émaillé de section circulaire

Tableau 1 – Force et nombre de tours des éprouvettes

Diamètre nominal mm		Force exercée sur les deux fils N	Nombre de tours par 125 mm
De	Jusques 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	2,65	108,0	3

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

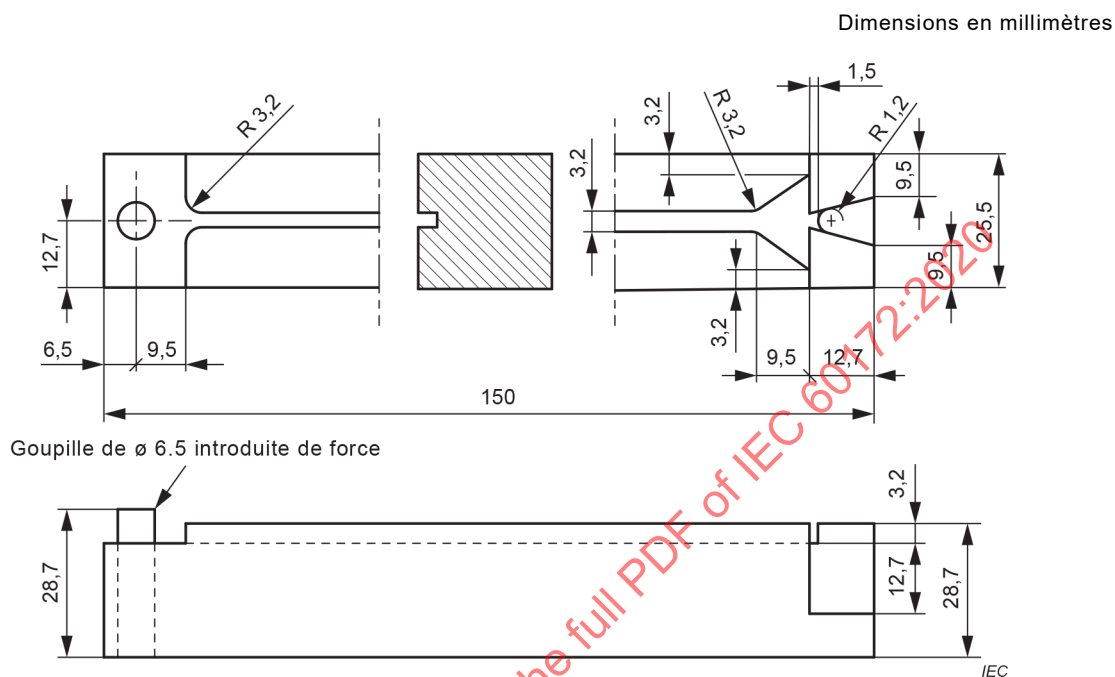
Dimensions en millimètres



Matériau: Stratifié silicone – fibre de verre

Figure 2 –Séparateur

- c) Les éprouvettes peuvent être mises en forme dans un gabarit dont un dessin est représenté 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 représenté 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-échantillon est utilisé.



R = Rayon de courbure

Figure 3 – Gabarit pour la préparation des torsades

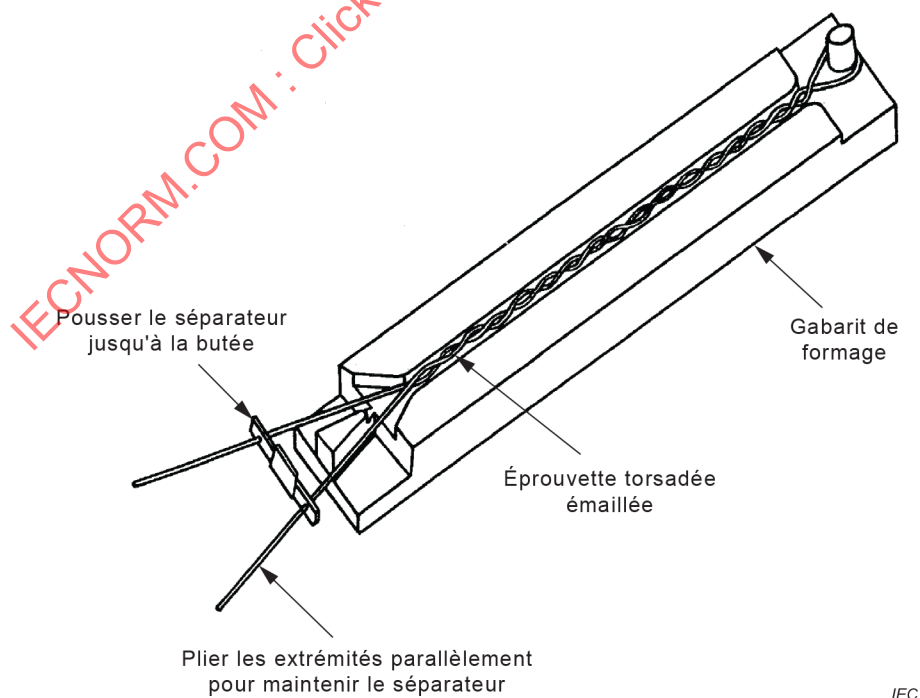


Figure 4 – Éprouvette disposée dans le gabarit de formage

- 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 cela est

représenté à 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.

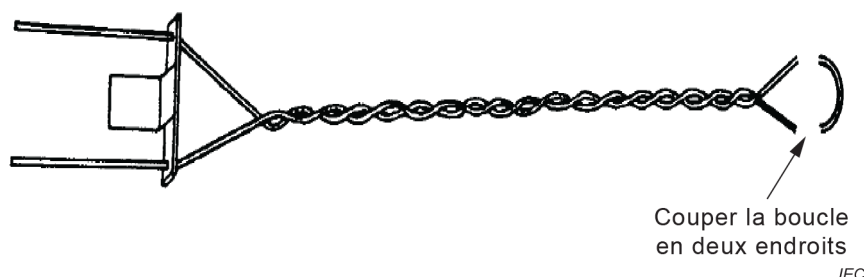


Figure 5 – Éprouvette réalisée, boucle coupée

Pour assurer l'homogénéité du groupe d'éprouvettes, il est recommandé de les soumettre, sans observer de claquage, à une tension d'essai qui correspond à trois fois la valeur indiquée dans le Tableau 2 pendant 1 s avant de démarrer le cycle d'exposition thermique.

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

Accroissement du diamètre dû à l'isolant (mm)		Tension (valeur efficace)
De	Jusques 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

Cette méthode s'applique à toute dimension appropriée de fil de section circulaire enveloppé d'un ruban ou rectangulaire émaillé enveloppé d'un ruban.

Il est recommandé de sélectionner un fil présentant des dimensions qui réduisent le plus possible la force de courbure nécessaire pour former l'éprouvette, car un fil de grande raideur donne 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 longueur 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 cela est représenté à la Figure 6. Cela produit au centre une partie droite de 150 mm environ avec des extrémités courbes, qui assurent l'écartement nécessaire aux deux extrémités de l'éprouvette finale.

Dimensions en millimètres

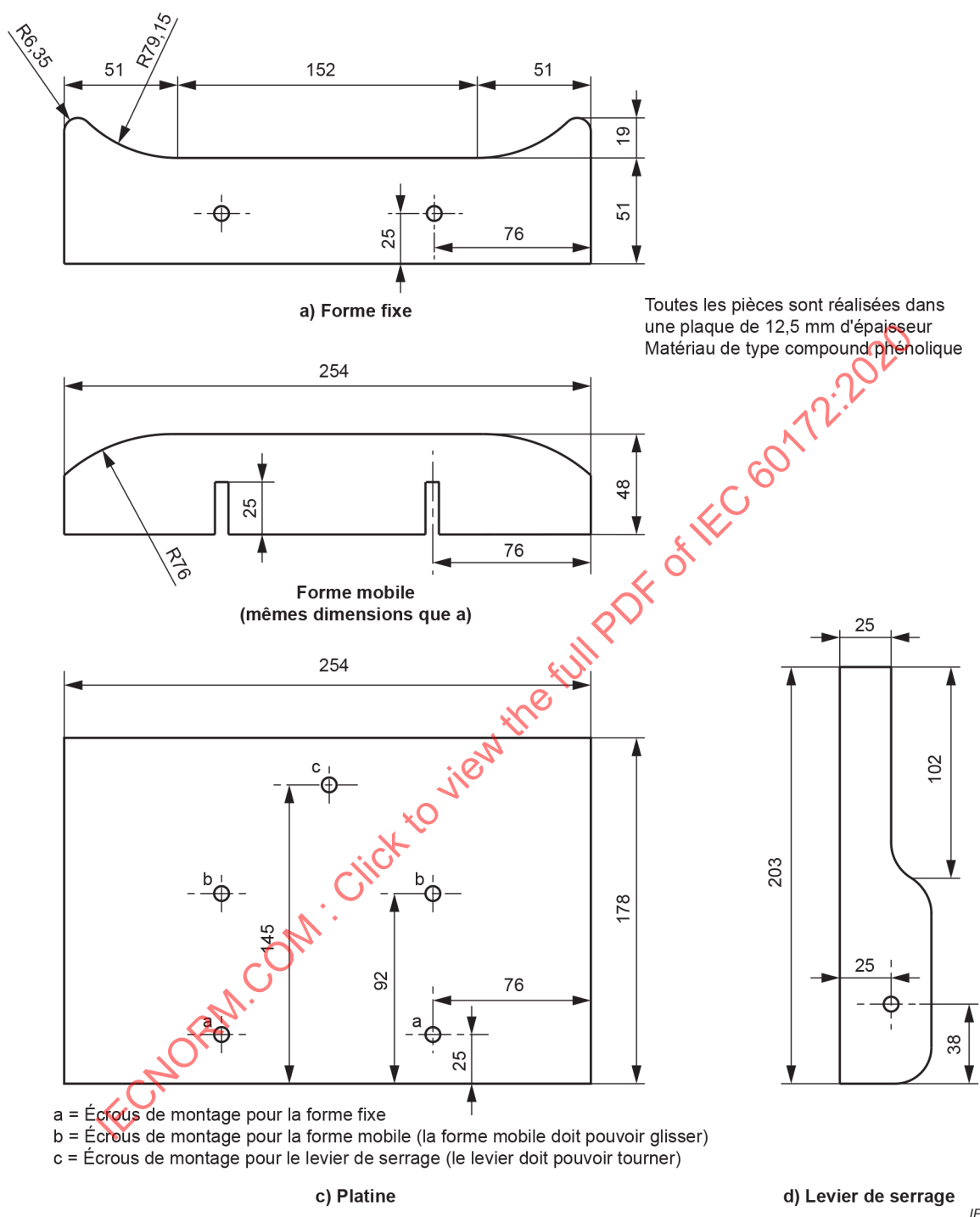
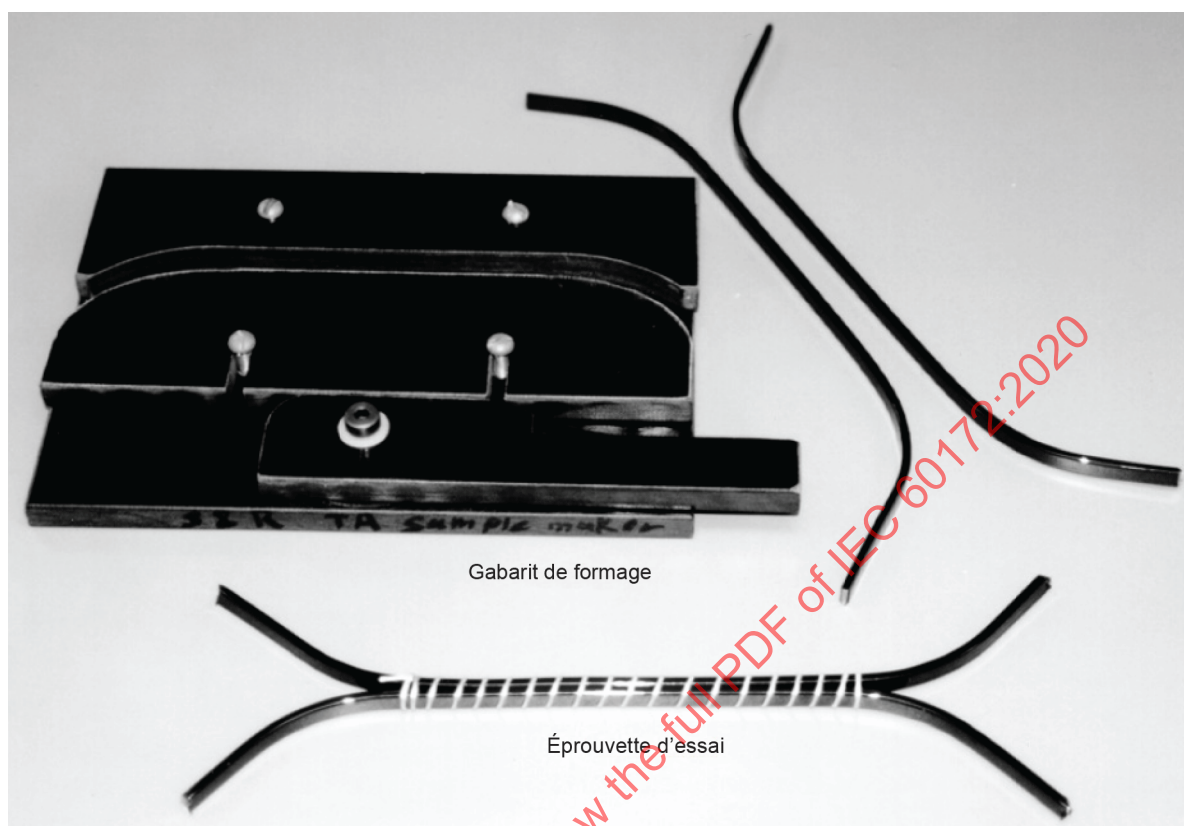


Figure 6 – Gabarit pour le formage d'un gros fil de bobinage, essai diélectrique

- 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 cela est représenté à la Figure 7.



IEC

Figure 7 – Gabarit de formage et éprouvette d'essai

Il faut veiller à ce 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 précuison de l'éprouvette avant l'essai ou l'imprégnation élimine les contraintes et le faïençage; elle peut donc être souhaitable pour certains matériaux.

- e) Avant de démarrer les cycles d'exposition thermique, l'éprouvette doit être soumise à l'essai de tension alternative de 1 000 V.

5.2 Imprégnation

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 l'essai sans imprégnation. Avec des éprouvettes imprégnées, cette méthode 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 méthode suivante doit s'appliquer:

L'éprouvette en position verticale doit être immergée dans le matériau d'imprégnation pendant (60 ± 10) s. 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 doit être appliqué, immerger, égoutter et étuver l'éprouvette verticalement en la retournant à chaque traitement successif.

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

5.3 Notes sur le nombre d'éprouvettes

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

L'expérience a démontré que vingt éprouvettes sans imprégnation et dix éprouvettes avec imprégnation donnent des résultats avec une tolérance acceptable. Au moins dix éprouvettes doivent être utilisées.

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 cela est représenté à 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 sorte que les extrémités des torsades le dépassent, pour réaliser les connexions électriques nécessaires à l'essai diélectrique. Le support doit être conçu pour au moins dix éprouvettes, pour réduire le temps des manipulations.



IEC

Figure 8 – Porte-éprouvettes

5.4.2 Pour les éprouvettes conformes à 5.1.2

L'éprouvette doit être suspendue dans l'étuve. Aucun porte-éprouvettes spécial n'est exigé.

6 Température d'exposition

Les éprouvettes doivent être soumises aux températures indiquées dans le présent Article 6.

Les températures d'essai et les durées des cycles d'exposition sont indiquées 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 éprouvettes doivent être placées directement dans les étuves de vieillissement et retirées sans modifier la température de réglage des étuves.

Les étuves doivent être chauffées à des températures appropriées avant de soumettre les éprouvettes à la température d'exposition.

Les éprouvettes doivent être vieilles dans une étuve à circulation d'air forcé capable de maintenir la température des éprouvettes en essai à la température d'exposition choisie à 2 °C près.

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

Tableau 3 – Durées d'exposition recommandées 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	–	–	–	–	–	–	–

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 peuvent ne pas être considérées comme fiables et il convient de ne pas les utiliser pour l'évaluation du comportement thermique assigné 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 plage.

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

Les éprouvettes doivent être exposées à au moins trois et de préférence à quatre températures d'exposition. La plus basse température, laquelle est recommandée supérieure de 20 °C à la classe thermique souhaitée, doit conduire 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. L'exactitude 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 dépend de l'épaisseur moyenne du vernis isolant, comme cela est 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	Jusques 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 réduit le plus possible l'effet corona et la fatigue du diélectrique.

Dans tous les cas, tout dommage mécanique sur les éprouvettes doit être évité. Les éprouvettes qui ne satisfont pas à l'essai diélectrique peuvent 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 satisfait à l'essai diélectrique et les heures totales d'exposition des cycles précédents. Cela implique que l'éprouvette n'a probablement pas satisfait à l'essai 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 la valeur médiane est utilisée, 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:

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

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 éprouvette et de la septième éprouvette. 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 la valeur moyenne logarithmique est utilisée, la durée de fonctionnement avant défaillance est calculée en divisant la somme des logarithmes des durées de vie des éprouvettes du groupe 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), le coefficient de corrélation doit être calculé 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 un essai supplémentaire doit être effectué 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 la plage d'essai; ou
- b) des erreurs ont été introduites par la technique d'échantillonnage et/ou par la méthode d'essai.

Des données non linéaires ne doivent pas être utilisées 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 ordonnée une échelle logarithmique des temps et en abscisse 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 la Figure 9).