

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 216-4
Deuxième édition — Second edition
1980

**Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique
de matériaux isolants électriques**

Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

**Guide for the determination of thermal endurance properties
of electrical insulating materials**

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Rapport d'activité de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du V.E.I., soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, symboles littéraux et signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 117 de la CEI: Symboles graphiques recommandés.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 117 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Autres publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur les pages 3 et 4 de la couverture, qui énumèrent les autres publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

Revision of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **Report on IEC Activities**
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the I.E.V. or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to:

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 117: Recommended graphical symbols.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 117, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Other IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to pages 3 and 4 of the cover, which list other IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 216-4

Deuxième édition — Second edition
1980

**Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique
de matériaux isolants électriques**

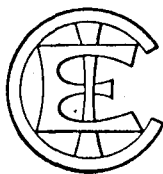
Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

**Guide for the determination of thermal endurance properties
of electrical insulating materials**

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile

Mots clés: matériaux isolants;
essais d'endurance thermique;
statistique mathématique.

Key words: insulating materials;
thermal endurance tests;
statistical mathematics.



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
INTRODUCTION	6
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Hypothèses	8
4. Méthodes et données d'essai	8
5. Calculs statistiques et décisions	10
6. Exemples	16
ANNEXE A — Fractiles d'ordre 0,95 des lois de χ^2 , de t et de F	48
ANNEXE B — Liste des symboles	50

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. Assumptions	9
4. Test procedures and data	9
5. Statistical calculations and decisions	11
6. Examples	17
APPENDIX A — 0.95 fractiles of the χ^2 , t and F distributions	49
APPENDIX B — List of symbols	51

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDE POUR LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS
D'ENDURANCE THERMIQUE DE MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES**

Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 15B: Essais d'endurance, du Comité d'Etudes N° 15 de la CEI: Matériaux isolants. Il constitue la quatrième partie de la deuxième édition de la Publication 216 de la CEI, qui est publiée en plusieurs parties.

Un premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Toronto en 1976. A la suite de cette réunion, un projet, document 15B(Central Office)37, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mai 1977.

Les Comités nationaux des pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')
Allemagne
Autriche
Belgique
Canada
Danemark
Egypte
Espagne
Finlande
France
Norvège

Portugal
Roumanie
Royaume-Uni
Suède
Suisse
Tchécoslovaquie
Turquie
Union des Républiques
Socialistes Soviétiques
Yougoslavie

Autres publications de la CEI citées dans le présent guide:

- Publications Nos 216-1: Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques, Première partie: Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique.
- 216-2: Deuxième partie: Liste des matériaux et des essais existants.
- 216-3: Troisième partie: Méthodes statistiques.
- 493-1: Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement, Première partie: Méthodes basées sur les valeurs moyennes de résultats d'essais normalement distribués.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**GUIDE FOR THE DETERMINATION OF THERMAL
ENDURANCE PROPERTIES OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS**

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by Sub-Committee 15B: Endurance Tests, of IEC Technical Committee No. 15: Insulating Materials. It constitutes Part 4 of the second edition of IEC Publication 216, which is published in several parts.

A first draft was discussed at the meeting held in Toronto in 1976. As a result of this meeting, a draft, Document 15B(Central Office)37, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in May 1977.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria
Belgium
Canada
Czechoslovakia
Denmark
Egypt
Finland
France
Germany
Norway
Portugal

Romania
South Africa (Republic of)
Spain
Sweden
Switzerland
Turkey
Union of Soviet
Socialist Republics
United Kingdom
Yugoslavia

Other IEC publications quoted in this guide:

Publications Nos. 216-1: Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials, Part 1: General procedures for the determination of thermal endurance properties, temperature indices and thermal endurance profiles.

216-2: Part 2: List of materials and available tests.

216-3: Statistical methods.

493-1: Guide for the statistical analysis of ageing test data, Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results.

GUIDE POUR LA DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS D'ENDURANCE THERMIQUE DE MATÉRIAUX ISOLANTS ÉLECTRIQUES

Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique

INTRODUCTION

La deuxième édition de la Publication 216 de la CEI: Guide pour la préparation des méthodes d'essai pour l'évaluation de la stabilité thermique de matériaux isolants électriques, comportera plusieurs parties:

- Première partie: Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique.
- Deuxième partie: Liste des matériaux et des essais existants.
- Troisième partie: Méthodes statistiques.
- Quatrième partie: Instructions pour le calcul du profil d'endurance thermique.
- Cinquième partie: Instructions pour des essais d'endurance thermique et le calcul de l'indice de température. (A l'étude.)
- Sixième partie: Procédures de détermination des indices de température relatifs. (A l'étude.)

1. Domaine d'application

La présente partie donne des instructions détaillées pour le calcul du profil d'endurance thermique des matériaux isolants électriques à partir des résultats des essais d'endurance thermique conformément à la Publication 216-3 de la CEI, Troisième partie: Méthodes statistiques.

2. Objet

Les méthodes statistiques pour la détermination du profil d'endurance thermique des matériaux isolants électriques sont décrites dans la Publication 216-3.

La présente partie donne des instructions détaillées pour effectuer les calculs conformément à ces méthodes. Ces instructions sont illustrées par des exemples numériques montrant les calculs de proche en proche.

Au cours des calculs, on compare les variables des tests statistiques aux valeurs du tableau de l'annexe A. Il est fait référence à des tableaux plus complets dans la Publication 493-1 de la CEI: Guide pour l'analyse statistique de données d'essais de vieillissement, Première partie: Méthodes basées sur les valeurs moyennes des résultats d'essais normalement distribués.

Les exemples portent sur trois cas:

Exemple 1. Mesures continues.

Exemple 2. Application cyclique de l'essai d'épreuve.

Exemple 3. Mesures destructives

GUIDE FOR THE DETERMINATION OF THERMAL ENDURANCE PROPERTIES OF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS

Part 4: Instructions for calculating the thermal endurance profile

INTRODUCTION

The second edition of IEC Publication 216, Guide for the Preparation of Test Procedures for Evaluating the Thermal Endurance of Electric Insulating Materials, is composed of several parts:

- Part 1: General Procedures for the Determination of Thermal Endurance Properties, Temperature Indices and Thermal Endurance Profiles.
- Part 2: List of Materials and Available Tests.
- Part 3: Statistical Methods.
- Part 4: Instructions for Calculating the Thermal Endurance Profile.
- Part 5: Instructions for Making Thermal Endurance Tests and Obtaining the Temperature Index. (Under consideration.)
- Part 6: Procedures for the Determination of Relative Temperature Indices. (Under consideration.)

1. Scope

This part gives detailed instructions for calculating the thermal endurance profile of electrical insulating materials from thermal endurance test results, according to IEC Publication 216-3, Part 3: Statistical Methods.

2. Object

Statistical methods for determination of the thermal endurance profile of electrical insulating materials are described in Publication 216-3.

In this part, detailed instructions are given for making the calculations according to these methods. The instructions are illustrated by means of numerical examples showing the calculations step by step.

During the calculation, the statistical test variables are compared with the values tabulated in Appendix A. More comprehensive tables are referenced in IEC Publication 493-1, Guide for the Statistical Analysis of Ageing Test Data; Part 1: Methods Based on Mean Values of Normally Distributed Test Results.

The examples comprise three cases:

Example 1. Continuous measurements.

Example 2. Cyclic application of proof test.

Example 3. Destructive measurements.

Les exemples 1 et 2 montrent les calculs tels qu'ils sont effectués à l'aide d'une simple calculatrice de bureau. L'exemple 3 suppose l'emploi d'une calculatrice électronique de bureau avec des programmes statistiques incorporés. Les calculs se présentent ainsi sous une forme assez différente et beaucoup plus courte, mais il serait facile de les reprendre sous la forme des exemples 1 et 2 (et réciproquement).

3. Hypothèses

Les hypothèses à la base des méthodes statistiques ci-après sont les suivantes:

- 1) Les valeurs observées du temps jusqu'à dégradation sont *stochastiquement indépendantes*. Les éprouvettes employées pour l'essai de vieillissement constituent un échantillon prélevé au hasard sur la population étudiée et ont été traitées uniformément.
- 2) Le logarithme du temps jusqu'à dégradation suit une *loi normale* avec la *même variance* à toutes les températures.
- 3) Le logarithme du temps jusqu'à dégradation est une fonction linéaire de l'inverse de la température thermodynamique de vieillissement (équation d'Arrhenius), du moins dans une gamme comprenant tous les points d'essai et points extrapolés.
- 4) L'erreur sur la température d'exposition est négligeable et est la même pour les éprouvettes exposées simultanément.

4. Méthodes et données d'essai

Pour déterminer le profil d'endurance thermique (PET) d'un matériau isolant électrique conformément à un critère de dégradation prescrit, on expose un nombre spécifié d'éprouvettes à chacune des températures d'une série choisie et on détermine les temps jusqu'à dégradation.

Les températures sont choisies conformément à la Publication 216-1 de la CIE et un groupe d'éprouvettes est soumis à un vieillissement à chaque température, soit par cycles, soit de façon continue. La détermination des temps jusqu'à dégradation, c'est-à-dire le temps auquel une propriété spécifiée dépasse un critère de dégradation donné, dépend de la méthode d'essai.

4.1 Essais répétitifs

Chaque éprouvette est essayée à plusieurs reprises au cours du vieillissement, soit par mesure continue de la propriété spécifiée, soit à des temps fixes par mesure ou application d'une contrainte d'épreuve spécifiée.

Si la mesure de la propriété est continue, le temps jusqu'à dégradation pour chaque éprouvette s'obtient directement des valeurs enregistrées sous forme du temps auquel la propriété atteint le critère de dégradation.

Cela s'applique à tous les cas où la propriété est mesurée de façon continue ou par des relevés fréquents au cours du vieillissement par des mesures non destructives.

Si la propriété est mesurée à des temps fixes pendant le vieillissement, la propriété (ou une fonction prédéterminée de la propriété) est portée sur un graphique en fonction du temps (ou d'une fonction du temps) et on détermine sur le graphique les temps individuels jusqu'à dégradation comme les temps auxquels la propriété des éprouvettes individuelles atteint le critère de dégradation.

In examples 1 and 2, the calculations are shown as carried out using a simple desk calculator. In example 3 the use of an electronic desk calculator with built-in statistical programmes is assumed. The calculations therefore present themselves in a somewhat different and much shorter form, but could easily be transformed to the format of examples 1 and 2 (and vice versa).

3. Assumptions

The assumptions underlying the following statistical procedures are:

- 1) The observed values of time to failure are *stochastically independent*. The specimens used for the ageing test constitute a random sample from the population investigated, and were treated uniformly.
- 2) The logarithm of time to failure is *normally distributed* with the *same variance* at all temperatures.
- 3) The logarithm of time to failure depends linearly on the reciprocal thermodynamic ageing temperature (Arrhenius' equation) at least over a range including all test points and extrapolated points.
- 4) The exposure temperature has negligible error, and is the same for all specimens exposed together.

4. Test procedures and data

In order to determine the thermal endurance profile (TEP) of an electrical insulating material according to a prescribed end-point criterion, a specified number of specimens are exposed to each of a series of selected temperatures, and the times to failure determined.

The temperatures are selected in accordance with IEC Publication 216-1, and a group of specimens is aged at each temperature either by cyclic or by continuous ageing. The determination of the times to failure, that is the time when a specified property passes a given end-point criterion, depends on the test procedure.

4.1 Repeated tests

Each specimen is tested repeatedly during ageing, either by continuous measurement of the specified property, or at fixed times by measurement or application of a specified proof stress.

If the property is measured continuously, the time to failure for each specimen is obtained directly from the recorded values as the time when the property passes the end-point criterion.

This applies to all cases where a property is monitored continuously or by frequent scanning during ageing by non-destructive measurements.

If the property is measured at fixed times during ageing, the property (or a predetermined function of the property) is plotted versus time (or a function of the time), and the individual times to failure determined from the graph as the time when the property of the individual specimens passes the end-point criterion.

Cette méthode s'applique aux essais de vieillissement continu et cycliques lorsque la propriété est mesurée à des intervalles peu fréquents (par exemple à la fin de cycles de vieillissement) par des mesures non destructives. Dans certains cas, il peut suffire de considérer le critère de dégradation comme une valeur d'épreuve et d'employer la méthode ci-dessous.

Si une contrainte d'épreuve est appliquée à des temps fixés pendant le vieillissement, le temps jusqu'à dégradation est pris égal à la moyenne du temps auquel l'éprouvette pour la première fois ne satisfait plus à l'épreuve, et du temps de mesure immédiatement antérieur, c'est-à-dire que l'on prend comme temps jusqu'à dégradation le point milieu du dernier cycle auquel l'éprouvette est exposée.

Cette méthode s'applique aux essais cycliques dans lesquels toutes les éprouvettes sont soumises à une contrainte d'épreuve à la fin de chaque cycle, puis exposées à un nouveau cycle tant que l'éprouvette satisfait à l'épreuve.

4.2 Essai unique de chaque éprouvette

Dans chaque cas, on porte les valeurs de la propriété en fonction du temps sur un graphique pour chaque température et on trace la courbe s'ajustant le mieux sur les points. Aux quatre temps de mesure les plus proches de l'intersection de la courbe donnant la meilleure représentation et de la droite représentant le critère de dégradation, on trace des courbes parallèles à celle donnant la meilleure représentation et passant par les points de mesure individuels. Les points où ces courbes coupent la droite du critère de dégradation sont pris comme temps individuels jusqu'à dégradation.

Cette méthode est appliquée dans les cas où la propriété est déterminée par des mesures destructives et ceux de vieillissement continu où, à des temps fixés, on ne retire de l'étuve et rejette après mesure qu'un nombre spécifié d'éprouvettes.

5. Calculs statistiques et décisions

Pour chaque valeur des k températures différentes θ_i °C ($i = 1, 2, \dots, k$), calculer l'inverse de la température thermodynamique

$$x_i = \frac{1}{\theta_i + 273},$$

et le logarithme décimal des temps jusqu'à dégradation

$$y_{ij} = \lg t_{ij},$$

où t_{ij} est le temps jusqu'à dégradation de l'éprouvette n° j à la température θ_i °C ($j = 1, 2, \dots, n_i$), n_i étant le nombre d'éprouvettes exposées à θ_i °C. Le nombre total d'éprouvettes est $N = \sum n_i$.

5.1 Test d'égalité des variances de y_{ij}

Calculer les variances s_{ii}^2 aux différentes valeurs de x_i

$$s_{ii}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i} \quad f_i = n_i - 1$$

et la variance pondérée

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{ii}^2}{\sum f_i} \quad f_1 = \sum f_i = N - k$$

This procedure applies to continuous and cyclic ageing tests, where a property is measured at infrequent intervals (e.g. at the end of ageing cycles) by non-destructive measurements. In some cases it may be sufficient to consider the end-point criterion as a proof value, and use the procedure below.

If a proof stress is applied at fixed times during ageing, the time to failure for each specimen is determined as the mean of the time when the specimen first failed to pass the proof test and the immediately preceding measuring time, i.e. the time to failure is taken as the midpoint of the last cycle to which the specimen is exposed.

This procedure applies to cyclic tests where all specimens are tested by proof stress at the end of each cycle, and then exposed to a new cycle, as long as they pass the proof test.

4.2 Single test on each specimen

In each case the property values are plotted versus time in a graph for each temperature, and a curve making the best fit of the points is drawn. At the four measuring times nearest to the crossing point of the best fitting curve and the line representing the end-point criterion, curves are drawn parallel to the best fitting curve through the individual measured points. The points where these curves cross the end-point line are taken as the individual times to failure.

This procedure is used in cases where the property is determined by destructive measurements, and cases of continuous ageing where at fixed times only a specified number of specimens are removed from the oven and discarded after measurement.

5. Statistical calculations and decisions

For each value of the k different temperatures θ_i °C ($i = 1, 2, \dots k$), calculate the reciprocal value of the thermodynamic temperature

$$x_i = \frac{1}{\theta_i + 273},$$

and the common (Briggsian) logarithm (i.e. the logarithm to the base of 10) of the times to failure

$$y_{ij} = \lg t_{ij}.$$

Here t_{ij} is the time to failure of specimen No. j at temperature θ_i °C ($j = 1, 2, \dots n_i$), where n_i is the number of specimens exposed at θ_i °C. The total number of specimens equals $N = \sum n_i$.

5.1 Testing the equality of the variances of y_{ij}

Calculate the variances s_{ii}^2 at the different values of x_i

$$s_{ii}^2 = \frac{n_i \sum y_{ij}^2 - (\sum y_{ij})^2}{n_i f_i} \quad f_i = n_i - 1$$

and the pooled variance

$$s_1^2 = \frac{\sum f_i s_{ii}^2}{\sum f_i} \quad f_1 = \sum f_i = N - k$$

On compare ces variances par le test de Bartlett. On calcule

$$c = 1 + \frac{\left(\sum \frac{1}{f_i} \right) - \frac{1}{f_1}}{3(k-1)},$$

et la variable de test

$$\chi^2 = 2,3 \cdot \frac{f_1 \cdot \lg s_1^2 - \sum (f_i \cdot \lg s_{1i}^2)}{c}.$$

On compare la variable de test χ^2 à la valeur tabulaire $\chi^2(0,95, k-1)$ de l'annexe A.

Si $\chi^2 > \chi^2(0,95, k-1)$, la valeur de χ^2 doit être notée en liaison avec le profil d'endurance thermique.

5.2 Coefficients de régression

Calculer les coefficients de l'équation de régression

$$y = a + bx$$

à partir de

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{N}$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{ij}}{n_i}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{N}$$

sous la forme

$$b = - \frac{N \sum (x_i \sum y_{ij}) - (\sum n_i x_i) (\sum \sum y_{ij})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2}$$

et

$$a = \bar{y} - b\bar{x}.$$

Tracer la droite de régression sur un graphique d'endurance thermique (voir figure 1, page 23).

5.3 Test de linéarité

Calculer

$$s_2^2 = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N\bar{y}^2) - b (\sum n_i x_i \bar{y}_i - N\bar{x}\bar{y})}{f_2}$$

où

$$f_2 = k - 2,$$

et le rapport de s_2^2 à s_1^2 obtenu à partir du paragraphe 5.1

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$$

These variances are compared by Bartlett's test. One calculates

$$c = 1 + \frac{\left(\sum \frac{1}{f_i} \right) - \frac{1}{f_1}}{3(k-1)},$$

and the test variable

$$\chi^2 = 2.3 \cdot \frac{f_1 \cdot \lg s_1^2 - \sum (f_i \cdot \lg s_{ii}^2)}{c}.$$

The test variable χ^2 is compared with the tabulated value $\chi^2(0.95, k-1)$ from Appendix A.

If $\chi^2 > \chi^2(0.95, k-1)$, the value of χ^2 shall be reported in connection with the thermal endurance profile.

5.2 Regression coefficients

Calculate the coefficients of the regression equation

$$y = a + bx$$

from

$$\bar{x} = \frac{\sum n_i x_i}{N}$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum y_{ij}}{n_i}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum n_i \bar{y}_i}{N}$$

as

$$b = \frac{N \sum (x_i \sum y_{ij}) - (\sum n_i x_i) (\sum \sum y_{ij})}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2}$$

and

$$a = \bar{y} - b\bar{x}.$$

Draw the regression line on a thermal endurance graph (see Figure 1, page 23).

5.3 Test for linearity

Calculate

$$s_2^2 = \frac{(\sum n_i \bar{y}_i^2 - N\bar{y}^2) - b(\sum n_i x_i \bar{y}_i - N\bar{x}\bar{y})}{f_2}$$

where

$$f_2 = k - 2,$$

and the ratio of s_2^2 and s_1^2 from Sub-clause 5.1

$$F = \frac{s_2^2}{s_1^2}$$

On compare la variable d'essai F à la valeur classifiée $F(0,95, f_n, f_d)$ de l'annexe A avec $f_n = f_2$ et $f_d = f_1$.

Si $F > F(0,95, f_n, f_d)$, on note au procès-verbal la valeur de F en liaison avec le profil d'endurance thermique.

L'estimateur pondéré de la variance se calcule comme

$$s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f}$$

avec

$$f = N - 2$$

5.4 Limite de confiance sur y

Pour des valeurs choisies de X , calculer

$$Y = a + bX,$$

et

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right].$$

Déterminer $t = t(0,95, f)$ dans l'annexe A et calculer la limite de confiance unilatérale inférieure sur y comme:

$$Y_c = Y - t s_y,$$

où s_y est la racine carrée de la variance s_y^2 .

On porte les valeurs associées de X et Y_c sur le graphique d'endurance thermique (voir paragraphe 5.2) et on trace sur le graphique une courbe passant par les points (X, Y_c) qui donne la limite de confiance unilatérale inférieure à 95% sur la valeur vraie de y à une valeur donnée de x .

5.5 Coefficient de variation

A partir de l'équation de régression, on calcule la valeur X_5 correspondant à $Y_5 = 3,7$ (temps jusqu'à dégradation 5 000 h)

$$X_5 = \frac{Y_5 - a}{b},$$

et la variance correspondante sur Y_5

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right].$$

Si le coefficient de variation

$$CV = \frac{s_y}{3,7}$$

est supérieur à 0,015, on arrête les calculs et on ne note au procès-verbal que le graphique d'endurance thermique.

The test variable F is compared with the tabulated value $F(0.95, f_n, f_d)$ from Appendix A with $f_n = f_2$ and $f_d = f_1$.

If $F > F(0.95, f_n, f_d)$, the value of F shall be reported in connection with the thermal endurance profile.

A pooled estimate of the variance is calculated as

$$s^2 = \frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f}$$

where

$$f = N - 2$$

5.4 Confidence limit on y

For selected values of X calculate

$$Y = a + bX,$$

and

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right].$$

Determine $t = t(0.95, f)$ from Appendix A, and calculate the lower unilateral confidence limit on y as

$$Y_c = Y - t s_y,$$

where s_y is the square root of the variance s_y^2 .

The connected values of X and Y_c are plotted on the thermal endurance graph (see Sub-clause 5.2) and a curve drawn through the points (X, Y_c) on the graph, giving the lower unilateral 95% confidence limit on the true value of y at a given value of x .

5.5 The coefficient of variation

From the regression equation one calculates the value X_5 corresponding to $Y_5 = 3.7$ (time to failure 5 000 h)

$$X_5 = \frac{Y_5 - a}{b},$$

and the corresponding variance on Y_5

$$s_y^2 = s^2 \left[\frac{1}{N} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right].$$

If the coefficient of variation

$$CV = \frac{s_y}{3.7}$$

is greater than 0.015 the calculations are stopped and only the thermal endurance graph reported.

5.6 Températures correspondant à 20 kh et 5 kh jusqu'à dégradation

Calculer

$$X_{20} = \frac{4,3 - a}{b}$$

et

$$\theta_{20} = \frac{1}{X_{20}} - 273$$

$$\theta_5 = \frac{1}{X_5} - 273 \quad (\text{à partir du paragraphe 5.5}).$$

5.7 Limite de confiance sur θ_5

Calculer

$$b_r = b - \frac{t^2 s^2}{b \sum n_i (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s_r^2 = s^2 \left[\frac{b_r}{Nb} + \frac{(X_5 - \bar{x})^2 N}{N \sum n_i x_i^2 - (\sum n_i x_i)^2} \right]$$

et

$$X_c = \bar{x} + \frac{Y_5 - \bar{y}}{b_r} + \frac{t s_r}{b_r}$$

où $t = t(0,95, f)$ comme dans le paragraphe 5.4,

$$\theta_c = \frac{1}{X_c} - 273.$$

5.8 Profil d'endurance thermique

On note au procès-verbal le PET sous la forme:

$$\theta_{20}/\theta_5 (\theta_c).$$

6. Exemples

Dans le texte qui suit, les calculs sont illustrés par des exemples numériques et effectués de proche en proche à l'aide d'une simple calculatrice de bureau et éventuellement d'une règle à calcul et d'une table de logarithmes. Pour plus de commodité on a employé les abréviations suivantes:

S = somme	P = produit	V = variance
D = différence	M = moyenne	R = inverse
Q = carré		

de sorte que, par exemple, SQD signifie la somme des carrés des différences. Les indices sont placés entre parenthèses. L'emploi des symboles ressort des tableaux.