

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

**Power transformers –  
Part 12: Loading guide for dry-type power transformers**

**Transformateurs de puissance –  
Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland  
Email: [inmail@iec.ch](mailto:inmail@iec.ch)  
Web: [www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

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

### About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: [www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: [www.iec.ch/webstore/custserv](http://www.iec.ch/webstore/custserv)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch)

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

### A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: [www.iec.ch/searchpub/cur\\_fut-f.htm](http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm)

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: [www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: [www.iec.ch/webstore/custserv/custserv\\_entry-f.htm](http://www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch)

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE

---

**Power transformers –  
Part 12: Loading guide for dry-type power transformers**

**Transformateurs de puissance –  
Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

PRICE CODE  
CODE PRIX

V

ICS 29.180

ISBN 978-2-88910-041-5

## CONTENTS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD.....                                                                          | 4  |
| INTRODUCTION.....                                                                      | 6  |
| 1 Scope.....                                                                           | 7  |
| 2 Normative references .....                                                           | 7  |
| 3 Terms and definitions .....                                                          | 7  |
| 4 Effect of loading beyond nameplate rating .....                                      | 8  |
| 4.1 General.....                                                                       | 8  |
| 4.2 General consequences.....                                                          | 8  |
| 4.3 Effects and hazards of short-time emergency loading.....                           | 8  |
| 4.4 Effects of long-time emergency loading .....                                       | 9  |
| 5 Ageing and transformer insulation lifetime .....                                     | 9  |
| 5.1 General.....                                                                       | 9  |
| 5.2 Lifetime .....                                                                     | 9  |
| 5.3 Relation between constant continuous load and temperature .....                    | 10 |
| 5.4 Ageing rate.....                                                                   | 11 |
| 5.5 Lifetime consumption .....                                                         | 11 |
| 5.6 Hot-spot temperature in steady state.....                                          | 11 |
| 5.7 Assumed hot-spot factor.....                                                       | 12 |
| 5.8 Hot-spot temperature rises at varying ambient temperature and load conditions..... | 12 |
| 5.9 Loading equations .....                                                            | 12 |
| 5.9.1 Continuous loading.....                                                          | 12 |
| 5.9.2 Transient loading.....                                                           | 13 |
| 5.10 Determination of winding time constant .....                                      | 14 |
| 5.10.1 General .....                                                                   | 14 |
| 5.10.2 Time constant calculation method.....                                           | 14 |
| 5.10.3 Time constant test method.....                                                  | 15 |
| 5.11 Determination of winding time constant according to empirical constant .....      | 15 |
| 5.12 Calculation of loading capability .....                                           | 15 |
| 6 Limitations.....                                                                     | 17 |
| 6.1 Current and temperature limitations.....                                           | 17 |
| 6.2 Other limitations .....                                                            | 17 |
| 6.2.1 Magnetic leakage field in structural metallic parts.....                         | 17 |
| 6.2.2 Accessories and other considerations.....                                        | 17 |
| 6.2.3 Transformers in an enclosure .....                                               | 18 |
| 6.2.4 Outdoor ambient conditions .....                                                 | 18 |
| Annex A (informative) Ageing rate .....                                                | 19 |
| Annex B (informative) Examples of lifetime consumptions for 3 load regimes.....        | 24 |
| Annex C (informative) List of symbols .....                                            | 33 |
| Bibliography.....                                                                      | 35 |
| Figure A.1 – Molecule structure of an epoxy .....                                      | 19 |
| Figure A.2 – Thermal endurance graph .....                                             | 22 |
| Figure B.1 – Step change loading curve.....                                            | 25 |
| Figure B.2 – Hot-spot temperature rise and life consumption .....                      | 27 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure B.3 – Load current and winding hot-spot temperature rise.....                         | 30 |
| Figure B.4 – Ageing rate versus time .....                                                   | 30 |
| Table 1 – Constants for lifetime equation .....                                              | 10 |
| Table 2 – Maximum hot-spot winding temperature .....                                         | 16 |
| Table 3 – Current and temperature limits applicable to loading beyond nameplate rating ..... | 17 |
| Table B.1 – Lifetime consumption calculations .....                                          | 26 |
| Table B.2 – Life consumption calculations for varying load .....                             | 29 |
| Table B.3 – Life consumption calculation .....                                               | 31 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## POWER TRANSFORMERS –

## Part 12: Loading guide for dry-type power transformers

## 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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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 60076-12 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This standard cancels and replaces IEC 60905 (1987). This first edition constitutes a technical revision.

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

| FDIS        | Report on voting |
|-------------|------------------|
| 14/584/FDIS | 14/590/RVD       |

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

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

A list of all parts of IEC 60076 series, under the general title *Power transformers*, can be found on the IEC website.

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## INTRODUCTION

This part of IEC 60076 provides guidance for the specification and loading of dry type power transformers from the point of view of operating temperatures and thermal ageing. It provides the consequence of loading above the nameplate rating and guidance for the planner to choose appropriate rated quantities and loading conditions for new installations.

IEC 60076-11 is the basis for contractual agreements and it contains the requirements and tests relating to temperature-rise figures for dry type power transformers during continuous rated loading. It should be noted that IEC 60076-11 refers to the average winding temperature rise while this part of IEC 60076 refers mainly to the hot-spot temperature and the latter stated values are provided only for guidance.

This part of IEC 60076 gives mathematical models for judging the consequence of different loading, with different temperatures of the cooling medium, and with transient or cyclical variation with time. The models provide for the calculation of operating temperatures in the transformer, particularly the temperature of the hottest part of the winding. This hot-spot temperature is used for estimation of the number of hours of life time consumed during a particular time period.

This part of IEC 60076 further presents recommendations for limitations of permissible loading according to the results of temperature calculations or measurements. These recommendations refer to different types of loading duty – continuous loading, short-time and long time emergency loading. An explanation of ageing fundamentals is given in Annex A.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## POWER TRANSFORMERS –

### Part 12: Loading guide for dry-type power transformers

#### 1 Scope

This part of IEC 60076 is applicable to dry-type transformers according to the scope of IEC 60076-11. It provides the means to estimate ageing rate and consumption of lifetime of the transformer insulation as a function of the operating temperature, time and the loading of the transformer.

NOTE For special applications such as wind turbine application transformers, furnace transformers, welding machine transformers, and others, the manufacturer should be consulted regarding the particular loading profile.

#### 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application 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 60076-11, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

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

IEC 61378-1:1997, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

#### 3 Terms and definitions

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

##### 3.1

##### **long-time emergency loading**

loading resulting from the prolonged outage of some system elements that will not be reconnected before the transformer reaches a new and higher steady state temperature

##### 3.2

##### **short-time emergency loading**

unusually heavy loading of a transient nature (less than one time constant of the coil) due to the occurrence of one or more unlikely events which seriously disturb normal system loading

##### 3.3

##### **hot-spot**

if not specifically defined, “hot-spot” means the hottest-spot of the winding

##### 3.4

##### **relative thermal ageing rate**

for a given hot-spot temperature, the rate at which transformer insulation ageing is reduced or accelerated compared with the ageing rate at a reference hot-spot temperature

### 3.5

#### **transformer insulation life time**

the total time between the initial state for which the normal transformer insulation life time is considered new and the final state when due to thermal ageing, dielectric stress, short-circuit stress, or mechanical movement, which could occur in normal service and result in a high risk of electrical failure

### 3.6

#### **AN cooling**

cooling by natural air ventilation

### 3.7

#### **AF cooling**

method of cooling to increase the rated power of the transformer with fan cooling

## 4 Effect of loading beyond nameplate rating

### 4.1 General

Normal life expectancy is a conventional reference basis for continuous duty under design ambient temperature and rated operating conditions. The application of a load in excess of nameplate rating and/or an ambient temperature higher than specified ambient temperatures involves a degree of risk and accelerated ageing. It is the purpose of this part of IEC 60076 to identify such risks and to indicate how, within limitations, transformers may be loaded in excess of the nameplate rating.

### 4.2 General consequences

The consequences of loading a transformer beyond its nameplate rating are as follows:

- the temperatures of windings, terminals, leads, tap changer and insulation increase, and can reach unacceptable levels;
- enclosure cooling is more sensitive to overload leading to a more rapid increase in insulation temperature to unacceptable levels;
- as a consequence, there will be a risk of premature failure associated with the increased currents and temperatures. This risk may be of an immediate short-term character or may come from the cumulative effect of thermal ageing of the insulation in the transformer over many years.

NOTE Another consequence of overload is an increased voltage drop in the transformer.

### 4.3 Effects and hazards of short-time emergency loading

The main risks, for short-time emergency loading over the specified limits, are

- critical mechanical stresses due to increased temperature, which can reach an unacceptable level causing cracks in the insulation of a cast resin transformer;
- mechanical damage in the winding due to short and repetitive current above rated current;
- mechanical damage in the winding due to short and repetitive current combined with ambient temperature higher than specified;
- deterioration of mechanical properties at higher temperature could reduce the short-circuit strength;
- reduction of dielectric strength due to elevated temperature.

As a result the maximum overcurrent is limited to 50 % over the rated nominal current.

The agreement of the manufacturer is necessary in case of overloading in excess of 50 % to assess the consequences of such overloading. In any case the duration of such overloading should be kept as short as possible.

#### 4.4 Effects of long-time emergency loading

The effects of long-time emergency loading are the following:

- cumulative thermal deterioration of the mechanical and dielectric properties of the conductor insulation will accelerate at higher temperatures. If this deterioration proceeds far enough, it reduces the lifetime of the transformer, particularly if the apparatus is subjected to system short-circuits;
- other insulation materials, as well as structural parts and the conductors, suffer increased ageing rate at higher temperature;
- the calculation rules for ageing rate and consumption of lifetime are based on considerations of loading.

### 5 Ageing and transformer insulation lifetime

#### 5.1 General

Experience indicates that the normal lifetime of a transformer is some tens of years. It cannot be stated more precisely, because it may vary even between identical units, owing in particular to operating factors, which may differ from one transformer to another. With few exceptions a transformer rarely operates at 100 % of rated current throughout its lifetime. Other heating factors such as insufficient cooling, harmonics, over fluxing and/or unusual conditions as described in 60076-11 could also affect the life of the transformer.

When heat, which is mainly due to the transformer losses, is transferred to the insulation system, a chemical process begins. This process changes the molecular structure of the materials which form the insulation system. The ageing rate increases with the amount of heat transferred to the system. This process is cumulative and irreversible, which means that the materials do not regain their original molecular structure when the heat supply stops and the temperature decreases. The thermal index of the insulation system is stated in the manufacturer's documentation and is also written on the rating plate. It is assumed that failing insulation due to ageing is one of the causes of end of lifetime of the transformer.

Further it is assumed that the ageing rate varies with temperature according to the Arrhenius' equation. See Annex A for additional background information. The two constants in Arrhenius' equation should ideally be determined by means of thermal endurance testing. In cases where data from such testing is missing, this guide provides estimated constants, which are calculated on the basis of the following assumptions:

- a temperature increase of 6 K doubles the ageing rate. 6 K is an estimated value for the whole winding linked with the value of specific materials used in the winding;
- another value for this doubling rate should be used when supported by thermal endurance tests on the complete electrical insulation system (EIS), according to IEC 60216-1;
- insulation failures are the cause of end of life of the transformer.

#### 5.2 Lifetime

The expected lifetime  $L$  of a transformer at a constant hot-spot thermodynamic temperature  $T$  in Kelvin (K) can be calculated by means of the equation:

$$L = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (1)$$

This equation can be written more conveniently as:

$$L = a \times \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (2)$$

Although any time unit may be used in these formulas, the hour is used in this guide. The constant  $a$ , given in Table 1 for the different insulation system temperatures, is based on this time unit.

NOTE 1 The expected lifetime calculated according to this equation should not be perceived in a too literal sense. The ability of the transformer to withstand high over-currents due to short-circuits in the power system and over-voltages is, after this theoretically calculated lifetime, certainly weakened compared to a new transformer. In the absence of such disturbances the transformer may still operate satisfactorily for many years. Taking precaution to avoid short-circuit and installing adequate over-voltage protection may extend the transformer lifetime.

**Table 1 – Constants for lifetime equation**

| Insulation system temperature (thermal class ) | Arrhenius' equation constants |        | Rated hot spot winding temperature $\vartheta_{HS,r}$ |
|------------------------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|
|                                                | $a$                           | $b$    |                                                       |
| °C                                             | h                             | K      | °C                                                    |
| 105 (A)                                        | 3,10E-14                      | 15 900 | 95                                                    |
| 120 (E)                                        | 5,48E-15                      | 17 212 | 110                                                   |
| 130 (B)                                        | 1,72E-15                      | 18 115 | 120                                                   |
| 155 (F)                                        | 9,60E-17                      | 20 475 | 145                                                   |
| 180 (H)                                        | 5,35E-18                      | 22 979 | 170                                                   |
| 200                                            | 5,31E-19                      | 25 086 | 190                                                   |
| 220                                            | 5,26E-20                      | 27 285 | 210                                                   |

NOTE 2 The following formulas are used to determine the coefficients  $a$  and  $b$  for the rated hot-spot temperature in the winding:

$$\ln(180\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 273} + \ln(a)$$

$$\ln(90\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 6 + 273} + \ln(a)$$

$\vartheta_{HS,r}$  is the winding rated hot-spot temperature;

$T_i$  is insulation system temperature (thermal index  $T_i$ ).

The Table 1 is calculated by doubling the ageing for each 6 K.

NOTE 3 Most power transformers operate well below full load most of their actual lifetime. Since a hot-spot temperature of as little as 6 °C below rated values results in half the rated loss of life, the actual lifetime of a transformer typically exceeds 20 years. Accordingly, the constants in Table 1 were developed based on 180 000 h using a halving constant of 6 K.

### 5.3 Relation between constant continuous load and temperature

The constant hot-spot thermodynamic temperature  $T$ , in Kelvin (K), of the winding is given by:

$$T = 273 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HSn} \quad (3)$$

where

$\vartheta_a$  is the ambient temperature in degrees Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{\text{HSn}}$  is the winding hot-spot temperature rise above the ambient temperature at the considered load.

Note that the ambient temperature may not be independent of the loading, but may be a function of the loading :

$$\vartheta_a = f(\text{current}) \quad (4)$$

This function may vary from one site to another. Knowledge of this correlation for the particular site is necessary to make relevant estimates of the ageing rate and consumption of lifetime. The correlation may be found by measurement at the specific site. If no such information is available, indications regarding ageing rate and lifetime consumption can be obtained by making alternative calculations at different ambient temperatures, for example within the range 10 °C to 40 °C.

The formulas given in this standard consider eddy losses as ohmic losses in the windings. Test data indicates that the formulas show higher loss of lifetime than expected. If harmonic currents are present, the increased eddy losses during overloading may need additional consideration in accordance with Annex A of IEC 61378-1.

#### 5.4 Ageing rate

The normal lifetime of a transformer is in practice at least 180 000 h. In order to express the ageing rate  $k$  as consumption of lifetime-hours per hour of operation time at a temperature  $T$  in Kelvins (K), 180 000 h is used as a conservative reference in the following equation:

$$k = 180\,000 \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (5)$$

The relative ageing rate  $kr$  at constant hot-spot temperature  $T$ , in Kelvins (K), expressed as a percentage of the ageing rate that gives 180 000 h lifetime is calculated according to the equation:

$$kr = 100 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (6)$$

$a$  and  $b$  are to be taken from Table 1.

#### 5.5 Lifetime consumption

The lifetime consumption  $L_c$ , expressed in hours (h), at a constant hot-spot temperature  $T$ , in Kelvins (K), during a time  $t$  in hours (h) is calculated according to the equation:

$$L_c = 180\,000 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (7)$$

$a$  and  $b$  are taken from Table 1.

#### 5.6 Hot-spot temperature in steady state

For most transformers in service, the hot-spot temperature inside a winding is not precisely known. For most of these units, the hot-spot temperature can be assessed by calculation.

The calculation rules in this document are based on the following:

$\vartheta_{HS}$  is the hot-spot temperature, in degrees Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), at rated conditions (rated current, rated ambient temperature, rated voltage, rated frequency...).

The parameter  $\vartheta_{HS}$  can be found by calculation method or by test.

NOTE Although there is no standard test to determine the hot-spot temperature, if the manufacturer demonstrates other values by test, the manufacturer can use these values to carry out calculation of the life consumption of the transformer.

## 5.7 Assumed hot-spot factor

For the following consideration, the assumed hot-spot factor  $Z$  is 1,25:

$$\Delta\vartheta_{HS,r} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \quad (8)$$

where

$\Delta\vartheta_{HS,r}$  is the hot-spot temperature rise, in Kelvin (K);

$\Delta\vartheta_{Wr}$  is average winding temperature rise at rated load, in Kelvin (K).

## 5.8 Hot-spot temperature rises at varying ambient temperature and load conditions

The basic value required for calculating the life consumption is the temperature at the hot-spot. For this purpose, it is necessary to know the temperature rise at this position for each load condition as well as the ambient temperature.

$$\Delta\vartheta_{HSn} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \times I_n^q \quad (9)$$

where

$\Delta\vartheta_{HSn}$  is the hot-spot temperature rise at the considered load;

$I_n$  is the loading factor per unit;

$q$  is equal to 1,6 for air natural cooling (AN) ; or

is equal to 2 for AF cooled transformers (AF);

$Z$  is assumed to be 1,25.

Whenever possible it is preferable to use test results for  $\Delta\vartheta_{Wr}$ , to limit the uncertainty regarding the validity of the factor  $Z$  and the value of  $q$ . Experience shows that  $q$  and  $Z$  assume different values depending on the type of transformer and the level of the load current at which it operates.

NOTE With some types of winding constructions, determination of  $\Delta\vartheta_{Wr}$  may be possible only on prototype transformers.

## 5.9 Loading equations

### 5.9.1 Continuous loading

The hot-spot temperature  $\vartheta_{HS}$  as a function of load for steady-state conditions should be calculated by the following equations:

$$\vartheta_{HS} = \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HS} \quad (10)$$

For AN cooling the following equation applies:

$$\Delta\vartheta_{\text{HS}} = \Delta\vartheta_{\text{HS},r} [I]^{2m} \quad (11)$$

For AF cooling the following equation applies:

$$\Delta\vartheta_{\text{HS}} = \Delta\vartheta_{\text{HS},r} [I^2 C_T]^X \quad (12)$$

$$C_T = \frac{T_k + \vartheta_{\text{HS}}}{T_k + \vartheta_{\text{HS},r}} \quad (13)$$

where

- $\Delta\vartheta_{\text{HS}}$  is the hot-spot temperature rise at per unit load  $I$ , in Kelvins (K);
- $\vartheta_{\text{HS},r}$  is the rated or tested hot-spot temperature at 1,0 per unit load, in degrees Celsius (°C) [tested values for self-cooled operation for use in Equation (11) may be different than tested values for fan-cooled operation for use in Equation (12)];
- $I$  is loading factor per unit (ratio between load current and rated current);
- $C_T$  is the temperature correction for resistance change with temperature;
- $m$  is an empirical constant, which is equal to 0,8 (suggested unless test data is available);
- $\vartheta_a$  is the ambient temperature, in degrees Celsius (°C);
- $\vartheta_{\text{HS}}$  is the hot-spot temperature at load  $I$ , in degrees Celsius (°C);
- $T_k$  is the temperature constant for conductor, which is 225 for aluminium and 235 for copper;
- $X$  is an empirical constant used in forced-air calculation, which is 1 (suggested unless test data available).

Test data indicates that the above equations should result in conservative predictions of the hot-spot temperature.

The  $m$  exponent of 0,8 for self-cooled operation and the  $X$  exponent of 1 for forced-air operation are derived from heat transfer correlation for natural and forced convection. Test data indicates that a temperature correction for resistance given by Equation (13) is required to predict hot-spot temperatures rise during forced-air loading due to the higher losses present at forced-cooled operation.

Equation (11) and Equation (12) ignore eddy losses in the windings, which vary inversely with temperature. The formula provides a conservative result since Eddy losses are usually low unless harmonic currents are present.

Equation (11) and Equation (12) require an iterative calculation procedure. Using the suggested exponents and considering the resistance change with temperature for fan-cooled operation should result in conservative calculations of the hot-spot temperature rise, even when eddy losses are ignored. If harmonic currents are present, the increased eddy losses during overloading may need consideration in accordance with Annex A of IEC 61378-1.

### 5.9.2 Transient loading

The hot-spot temperature rise due to transient overloading should be determined by the following equations:

$$\Delta \vartheta_t = (\Delta \vartheta_U - \Delta \vartheta_i) \left[ 1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right] + \Delta \vartheta_i \quad (14)$$

$$\vartheta_{HS} = \Delta \vartheta_t + \vartheta_a \quad (15)$$

where

- $\Delta \vartheta_i$  is the initial hot-spot temperature rise at some prior load  $I_n$ , expressed in Kelvins (K);
- $\Delta \vartheta_t$  is the hot-spot temperature rise in Kelvins (K) at time  $t$  after changing the load;
- $\Delta \vartheta_U$  is the ultimate hot-spot temperature rise in Kelvins (K) if the per unit overload  $I_U$  continued until the hot-spot temperature rise stabilised;
- $t$  is the time, in minutes (min);
- $\tau_R$  is the time constant in minutes (min) for the transformer at rated load;
- $\tau$  is the time constant in minutes (min) for the transformer at a given load;
- $\vartheta_{HS}$  is the hot-spot temperature in degrees Celsius (°C);
- $\vartheta_a$  is the ambient temperature in degrees Celsius (°C).

## 5.10 Determination of winding time constant

### 5.10.1 General

The concept of a transformer time constant is based on the assumption that a single heat source supplies heat to a single heat sink and that the temperature rise of the sink is an exponential function of the heat input. The time constant is defined as the time for the temperature rise over ambient to change 63,2 % after a step change in load. Typically the temperature stabilises after 5 time constants. Hot-spot temperature calculations for loading should be made on both the low-voltage and high-voltage windings since published test data indicates that the time constants may be different. Insulation system temperature classes for the two windings may also be different.

The time constant should be calculated or determined by test on the transformer after agreement between supplier and purchaser.

### 5.10.2 Time constant calculation method

The time constant of a winding at rated load,  $\tau_R$ , is:

$$\tau_R = \frac{C(\Delta \vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (16)$$

where

- $C$  is the effective thermal capacity of winding, in watt-minutes per K (Wmin/K),
- =  $(15,0 \times \text{mass of aluminium conductor in kilograms (kg)}) + (24,5 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$ , or
- =  $(6,42 \times \text{mass of copper conductor in kilograms (kg)}) + (24,5 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$ ;

or

- $C$  is the effective thermal capacity of winding, in watt-hours per K (Wh/K),
- =  $(0,25 \times \text{mass of aluminium conductor in kilograms (kg)}) + (0,408 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$ , or
- =  $(0,107 \times \text{mass of copper conductor in kilograms (kg)}) + (0,408 \times \text{mass of epoxy and other winding insulation in kilograms (kg)})$ ;
- $P_r$  is the winding total losses (resistive losses + eddy losses) at rated load and rated temperature rise, in watts (W);
- $\Delta\vartheta_{HS,r}$  is the winding hot-spot temperature rise at rated load, in Kelvin (K);
- $\vartheta_e$  is the core contribution to winding hot-spot temperature rise at no load. This value should be the value given below or the value measured by the manufacturer during the temperature rise test on the transformer.
- = 5 K for outer winding (usually HV)
- = 25 K for inner winding (usually LV less than 1 kV).

NOTE 1 The core contribution values above are based on manufacturers' experience.

NOTE 2 Other winding insulation material and kind of epoxy material can be used. For such transformers the correspondent specific heat values of 24,5 Wmin/K and /kg (or 0,408 Wh/K and per kg) can be replaced by the values based on the manufacturer's experience.

### 5.10.3 Time constant test method

Time constants may also be estimated from the hot resistance cooling curve obtained during thermal tests.

### 5.11 Determination of winding time constant according to empirical constant

When the temperature rise changes, the time constant varies according to the empirical constant  $m$ .

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (17)$$

If  $m$  is equal to 1, Equation (17) is correct for any load and any starting temperature. If  $m$  is not equal to 1, the time constant for any load and for any starting temperature for either a heating cycle or a cooling cycle is given by Equation (18).

$$\tau = \tau_R \frac{\left( \frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right) - \left( \frac{\Delta\vartheta_I}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)}{\left( \frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}} - \left( \frac{\Delta\vartheta_I}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (18)$$

### 5.12 Calculation of loading capability

Equations (10) through (18) should be used to determine hot-spot temperatures during a load cycle. They should also be used to determine the short-time or continuous loading, which results in the maximum temperatures given in Table 1 or any other limiting temperatures.

The initial hot-spot temperature rise for the initial loading factor  $I_i$  should be obtained from Equation (11) and is determined as follows:

$$\Delta\vartheta_i = \Delta\vartheta_{HS,r} [I_i]^{2m} \quad (19)$$

where

$I_i$  is the initial loading factor (ratio between load current and rated current).

From Table 2, select the limiting hot-spot temperature  $\vartheta_{HS}$ . For the ambient temperature, determine the permissible hot-spot temperature rise at time  $t$  from Equation (10).

**Table 2 – Maximum hot-spot winding temperature**

| Insulation system temperature<br>(IEC 60076-11)<br>°C | Maximum hot-spot winding<br>temperature<br>°C |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 105 (A)                                               | 130                                           |
| 120 (E)                                               | 145                                           |
| 130 (B)                                               | 155                                           |
| 155 (F)                                               | 180                                           |
| 180 (H)                                               | 205                                           |
| 200                                                   | 225                                           |
| 220                                                   | 245                                           |

Calculation of the lifetime is not practical for hot-spot temperature over the maximum hot-spot winding temperature indicated in the Table 2 because the winding material composition may change. Transformer loading that results in temperatures that exceed the limits in Table 2 risks transformer failures in an unpredictably short period of time.

$$\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS} + \vartheta_a \quad (20)$$

where

$\vartheta_{HS}$  is the hot-spot temperature in degrees Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{HS}$  is the hot-spot temperature rise in Kelvin (K);

$\vartheta_a$  is the ambient temperature in degrees Celsius (°C).

$$\Delta\vartheta_t = \vartheta_{HS} - \vartheta_a \quad (21)$$

where

$\Delta\vartheta_t$  is the hot-spot temperature rise in Kelvin (K) at time  $t$  after changing the load.

Determine the ultimate hot-spot temperature rise from Equation (14).

$$\Delta\vartheta_U = \left[ \frac{\Delta\vartheta_t - \Delta\vartheta_i}{1 - \exp(-t/\tau)} \right] + \Delta\vartheta_i \quad (22)$$

where

$\Delta\vartheta_U$  is the ultimate hot spot temperature rise in Kelvin (K).

The time constant  $\tau$  should be obtained from 5.9. Select a time  $t$  for the duration of the load cycle to substitute in the above equation. From Equation (11) the overload corresponding to these conditions may be obtained as follows:

$$I_U = \left[ \frac{\Delta \vartheta_U}{\Delta \vartheta_{HS,r}} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (23)$$

where

$I_U$  is the ultimate loading factor.

The determination of the time constant should be done by an iteration process.

## 6 Limitations

### 6.1 Current and temperature limitations

With loading values beyond the nameplate rating, the hot-spot winding temperature shown in Table 3 shall not be exceeded and the specific limitations given in 4.3 and 5.12 shall be taken into account.

The current magnitude is limited to  $1,5 I_r$  especially when the cycle is short and repeated to avoid mechanical damage in the winding. Values over  $1,5 I_r$  shall be specified at the enquiry stage and shall be agreed upon between purchaser and manufacturer. For all other types of cycles the current is limited to  $1,5 I_r$ .

**Table 3 – Current and temperature limits applicable to loading beyond nameplate rating**

| Insulation system temperature (°C)                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 105<br>(A) | 120<br>(E) | 130<br>(B) | 155<br>(F) | 180<br>(H) | 200 | 220 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|-----|
| Maximum current (p.u.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5 | 1,5 |
| Highest temperature for hot-spot (°C)                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 130        | 145        | 155        | 180        | 205        | 225 | 245 |
| NOTE 1 The temperature and current limits are not intended to be valid simultaneously. The current may be limited to a lower value than shown in order to meet the temperature limitation requirement. Conversely, the temperature may be limited to a lower value than shown in order to meet the current limitation requirement. |            |            |            |            |            |     |     |
| NOTE 2 The calculation shows that at the highest hot-spot temperature shown in the table the lifetime of a new transformer is only few thousand hours.                                                                                                                                                                             |            |            |            |            |            |     |     |

### 6.2 Other limitations

#### 6.2.1 Magnetic leakage field in structural metallic parts

The magnetic leakage field increases with increasing current. This field may cause excessive temperatures in structural metallic parts that may restrict the overloading. The limits on load current, hot-spot temperature and temperature of structural metallic parts other than windings and leads stated in Table 2 should not be exceeded. It should be noted that when the hot-spot temperature exceeds the highest temperature in Table 2 according to the insulation classes of the transformer, the characteristics of the insulation system decrease to a level below the minimum value for the dielectric withstand of the transformer.

#### 6.2.2 Accessories and other considerations

Aside from the windings, other parts of the transformer, such as bushings, cable-end connections, tap-changing devices, tap changer, temperature measurement devices, surge arresters and leads may restrict the operation at 1,5 times the rated current.

### **6.2.3 Transformers in an enclosure**

Consumption of life time due to overload is higher when the transformer is in an enclosure.

When transformers are used indoors, a correction should be made to the rated hot-spot temperature rise to account for the enclosure.

### **6.2.4 Outdoor ambient conditions**

In many parts of the world, direct sunshine may increase the transformer temperature drastically, which should be taken into account when loading beyond rated current is considered.

Wind may improve the cooling of the transformer, but its unpredictable nature makes it impractical to take into account.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## Annex A (informative)

### Ageing rate

#### A.1 Loading capability

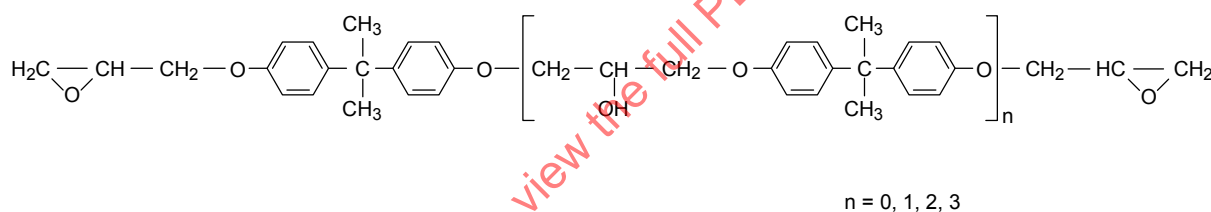
The loading capability of transformers is related to properties of the insulating materials and insulation systems. While the dominant solid insulating materials of oil-immersed transformers are cellulose products, a larger variety of different insulating materials are used in dry-type transformers.

#### A.2 Molecule structure

##### A.2.1 General

One common feature of the solid insulating materials is the molecule structure, which consists of long chains of smaller molecules linked together. The chains may contain branches, hexagonal rings and cross-links between chains.

Figure A.1 shows an example of such a molecule structure of an epoxy.



IEC 2001/08

**Figure A.1 – Molecule structure of an epoxy**

The molecules move. In a solid material, these movements have the character of oscillations. When heat due to the losses in the winding conductor (or other sources of heat) is transferred to the insulation material, the heat energy is converted to kinetic energy in the material. Due to the increased kinetic energy, the movements of the molecules become faster and with larger amplitudes, in other words, more violent. The probability that molecules break into smaller molecules when they collide with each other increases. This kind of chemical process where heat is supplied to the material is called an endothermic process.

##### A.2.2 Oxidation

Other mechanisms may occur, such as oxidation.

The rate of this chemical reaction is temperature dependent, which in turn depends on the amount of heat transferred to the insulation material.

Insulation materials are developed to achieve optimum properties for their application. The change in the material molecular structure during the endothermic process causes also changes in important properties of the material, like mechanical and dielectric strength, thermal shock resistance and sealing performance. Usually a decline in these properties takes place. The decline in different properties may not happen at the same rate. The word ageing is commonly used for this chemical process and the consequential decline in the various material properties.

### A.2.3 Thermal endurance properties

#### A.2.3.1 General

Thermal index (TI) and the halving interval (HIC) are two terms used to characterise the thermal endurance properties of an insulating material or system. TI is the numerical value of the temperature in degrees Celsius derived from the thermal endurance relationship at a certain time. In relevant IEC standards this time is 20 000 h, but other times can in principle also be specified. HIC is the numerical value of the temperature interval in Kelvins, which expresses the halving of the chosen time to end-point taken at the temperature equal to TI. See Figure A.2.

TI and HIC are found experimentally in accelerated tests at elevated temperatures, and the method is based on the validity of Arrhenius' equation.

#### A.2.3.2 Arrhenius' law

The chemist and physicist Svante Arrhenius (winner of the Nobel price in chemistry 1903) launched the following general correlation between temperature and chemical reaction rate:

$$k = A \times e^{-\left(\frac{E_a}{R \times T}\right)} \quad (\text{A.1})$$

where

- $k$  is the reaction rate coefficient;
- $A$  is a constant;
- $E_a$  is the activation energy related to the specific material;
- $R$  is the universal gas constant;
- $T$  is the temperature in Kelvins (K); and
- $e$  is the base number of the natural logarithm system (2,718 28...).

Equation (A.1) is known as Arrhenius' equation or Arrhenius' law.

$R$  has the value of  $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ . The activation energy  $E_a$  is the amount of energy needed for a reaction to happen to the specific material under consideration, and it is assumed that  $E_a$  does not vary with the temperature.  $E_a$  has the unit  $\text{kJ mol}^{-1}$ .

$A$  and  $k$  have basically the unit  $\text{second}^{-1} (\text{s}^{-1})$ , but other time units can also be used when suitable, for example hour.  $k$  indicates how rapidly the chemical reaction in the material or in the combination of materials proceeds.

The inverse of (A.1) becomes:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} \times e^{\frac{E_a}{R \times T}} \quad (\text{A.2})$$

The unit of  $1/k$  is the second (s), and it indicates the time elapsed to the chemical reaction has proceeded to a certain stage.

Equation (A.2) can also be written:

$$h = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (\text{A.3})$$

where

$$h = 1/k;$$

$$a = 1/A; \text{ and}$$

$$b = E_a / R.$$

The natural logarithm is taken on both sides of the equal sign:

$$\ln h = \ln a + b \times \frac{1}{T} \quad (\text{A.4})$$

### A.2.3.3 Thermal endurance graph

When corresponding values of  $\ln h$  and  $1/T$  are plotted in a Cartesian diagram, the points will be situated on a straight line. Such a graph is called a thermal endurance graph. An example is shown in Figure A.2.

The experiments are made at higher temperatures than the expected temperature of the temperature index (TI). In the example in Figure A.2 the experiments are made at four different temperatures, 170 °C, 160 °C, 150 °C and 140 °C.

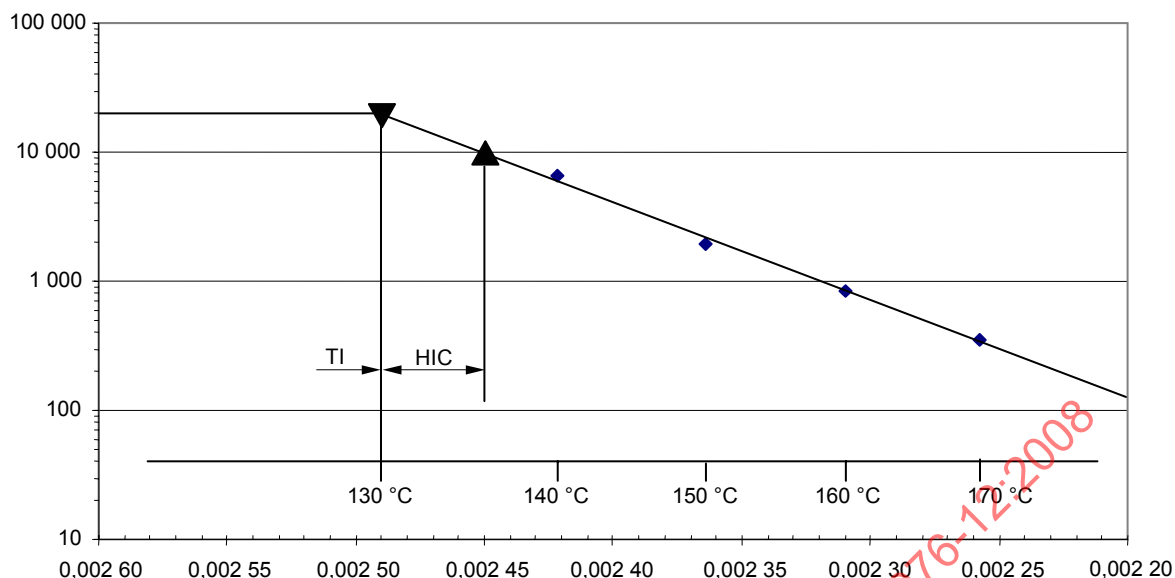
In the experiments an end-point of the material property under investigation (for example the a.c. breakdown voltage) must be defined. The end-point may be defined as a minimum absolute value (e.g. in kV/mm) or a percentual remaining value of the property before the experiment started. Such end-points are suggested in IEC standards for some materials and properties but not for all. IEC 60216-2 contains some suggestions for a number of material properties. In other cases the definition of end-points may be subject to agreement between supplier and purchaser of the material.

An end-point defined as for example 50 % remaining value could be perceived as 'end of life' for the insulation. However, this should not be taken too literally. Definition of end-points in IEC is mainly conventional and is not functional. The deterioration of the material happens gradually. The end-point represents no sharp limit between 'life' and 'death' of the transformer. Reaching the end-point means only that the particular material property has been reduced to a certain percentage of its original value, and that the safety margins and consequently the service reliability of the transformer have been reduced in relation to a new transformer. With respect to for example dielectric properties, the transformer may still perform well for many years if no serious over voltages occur.

Likewise, if no high over currents occur due to short-circuits in the power system, the transformer may operate well in spite of degraded mechanical properties.

In Figure A.2 the four dots indicate the time in hours needed to reach the defined end-point at the four different temperatures 170 °C, 160 °C, 150 °C and 140 °C according to the thermal endurance test. A regression line is drawn between the four points and extended to intersect the 20 000 h ordinate. The intersection takes place at a temperature of 130 °C.

Consequently the material TI for this particular property is 130. Further the regression line shows that the estimated temperature increase that would bring the material to the endpoint after 10 000 h is about 5 °C. The halving interval HIC is then 5.



IEC 2002/08

### Key

Y-axis: time (logarithmic scale) in hours (h)

X-axis: reciprocal thermodynamic temperature (linear scale) in Kelvins ( $K^{-1}$ )

additional temperature axis: Celsius temperature ( $^{\circ}C$ ) (nonlinear scale)

▼ estimated temperature at 20 000 h

▲ estimated temperature at 10 000 h

TI thermal index

HIC halving interval

**Figure A.2 – Thermal endurance graph**

Because different material properties may decline at different rates, it may be necessary to assign several temperature indexes and halving intervals to one and the same material.

Detailed descriptions regarding the experimental procedures are given in IEC 60216-1 to IEC 60216-6. Figure A.2 shows a simplified and idealised picture that just demonstrates the principle. In reality there will be dispersion in the results from the material samples, partly due to real variations in the material, partly due to measurement uncertainty.

Detailed instructions for calculating thermal endurance characteristics from large bodies of experimental data are provided in IEC 60216-3, including statistical test to verify the validity of using Arrhenius' law. Materials containing substantial quantities of inorganic components may deviate considerably from Arrhenius' law.

This loading guide is based on Arrhenius' law.

The temperature within a transformer winding varies. Certain areas in a winding are exposed to higher temperatures than others. The material deterioration rate is highest in high temperature areas. These areas will reach the end-point first and determine the service reliability of the whole transformer.

The relation between the hot-spot temperature and the average temperature in the windings may vary from one design to another. The formulas for the hot-spot temperature are general and may imply an uncertainty that makes the prediction of lifetime consumption correspondingly uncertain. Manufacturers may be able to provide more precise information on hot-spot temperatures for their particular design.

When assessing the load capability of a transformer, the ambient temperature as a function of the load must be taken into consideration.

### **A.3 Reference documents**

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

IEC 60216-2, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 2: Determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials – Choice of test criteria*

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

IEC 60216-4-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens*

IEC 60216-4-2, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-2: Ageing ovens – Precision ovens for use up to 300 °C*

IEC 60216-4-3, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-3: Ageing ovens – Multi-chamber ovens*

IEC 60216-5, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 5: Determination of relative thermal endurance index (RTE) of an insulating material*

IEC 60216-6, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 6: Determination of thermal endurance indices (TI and RTE) of an insulating material using the fixed time frame method*

## Annex B (informative)

### Examples of lifetime consumptions for 3 load regimes

#### B.1 Example 1: Loading at constant temperature

##### B.1.1 Assumptions

|                                          |                  |
|------------------------------------------|------------------|
| Hot-spot temperature rise above ambient: | 125 K            |
| Ambient temperature:                     | 30 °C = constant |
| Insulation system temperature:           | 130 °C (B)       |
| Loading time:                            | 1 week = 168 h   |

##### B.1.2 Calculation

According to Equation (3)

Hot-spot thermodynamic temperature:

$$273 + 30 + 125 = 428 \text{ K}$$

From Table 1

Coefficients  $a$  and  $b$  are:

$$a = 1,72 \text{ E} - 15 \text{ h}, b = 18 \text{ 115}$$

The ageing rate is calculated according to Equation (5)

$$k = 180 \text{ 000} \times (1,72 \text{ E} - 15)^{-1} \times \exp(-18 \text{ 115} / 428) = 43,48$$

Which means 43,48 h lifetime consumption per hour.

With a loading time of 168 h, the consumption of lifetime in the course of one week at this temperature becomes:

$$43,48 \times 168 = 7 \text{ 305 lifetime hours}$$

The expected lifetime at the rated hot-spot temperature, 120 °C, is 180 000 h. One week at a hot-spot temperature 155 °C consumes then:

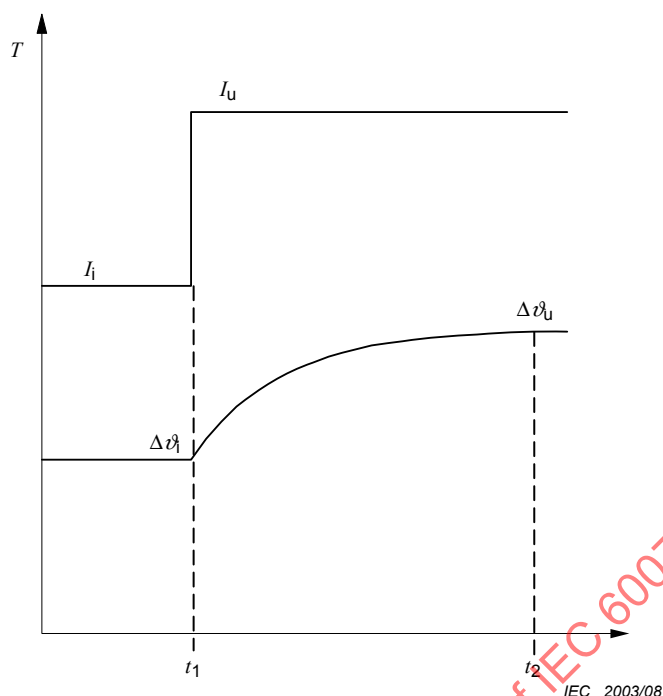
$$100 \times 7 \text{ 305} / 180 \text{ 000} = 4,06 \%$$

of the total expected lifetime of the transformer.

#### B.2 Example 2: Loading current $I_1$ for a time $t_1$ followed by loading current $I_u$ for a time $t_2$

##### B.2.1 General

When the load current suddenly changes from one level  $I_1$  to another  $I_2$  the hot-spot winding temperature is assumed to change from an initial temperature rise  $\Delta\vartheta_1$  to an  $\Delta\vartheta_2$  according to the exponential function (Equation 14) as shown in figure below.

**Key**

X-axis time

Y-axis Upper curve: initial and ultimate loading

Lower curve: temperature rise above ambient temperature

**Figure B.1 – Step change loading curve****B.2.2 Assumptions** $I_i = 0,8$  pu, time period  $t_1 = 10$  h $I_i$  initial load $I_u = 1,2$  pu, time period  $t_2 = 10$  h $I_u$  ultimate load ssRated time constant for the considered winding:  $\tau_r = 0,5$  h.

Ambient temperature: 30 °C constant (independent of the load current).

Insulation system temperature: 155 °C.

The hot-spot spot winding temperature at time = 0 is  $\Delta\theta_{HSi}$ .The average winding temperature rise at rated current  $\Delta\theta_{Wr} = 80$  K.

Self-cooled operation.

**B.2.3 Calculation**Equation (9) is used to calculate  $\Delta\theta_{HSi}$  and  $\Delta\theta_{HSu}$  :

$$\Delta\theta_{HSi} = 1,25 \times 80 \times 0,8^{1,6} = 70 \text{ K}$$

$$\Delta\theta_{HSu} = 1,25 \times 80 \times 1,2^{1,6} = 134 \text{ K}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{HS},r} = 1,25 \times 80 = 100 \text{ K}$$

Equation (18) is used to calculate the time constant for the change in the hot-spot winding temperature rise from 70 K to 134 K:

$$\tau = 0,5 \times \frac{\frac{134}{100} - \frac{70}{100}}{\left(\frac{134}{100}\right)^{1,25} - \left(\frac{70}{100}\right)^{1,25}} = 0,399$$

Equation (14) is used to calculate the momentary value of  $\Delta\vartheta_{\text{HS}}$  at any time  $t$  in the time interval when  $\Delta\vartheta_{\text{HS}}$  changes from  $\Delta\vartheta_{\text{HSi}}$  to  $\Delta\vartheta_{\text{HSu}}$  :

$$\Delta\vartheta_{\text{HSu}} = 70 + (134 - 70) \times (1 - \exp(-t / 0,399))$$

The ageing rate increases continuously as  $\Delta\vartheta_{\text{HS}}$  increases. See Figure B.2.

$$\Delta\vartheta_{\text{HS}} \approx \Delta\vartheta_{\text{HSu}} \text{ when } t \approx 5 \times \tau = 5 \times 0,399 = 1,995 \text{ h, say 2 h.}$$

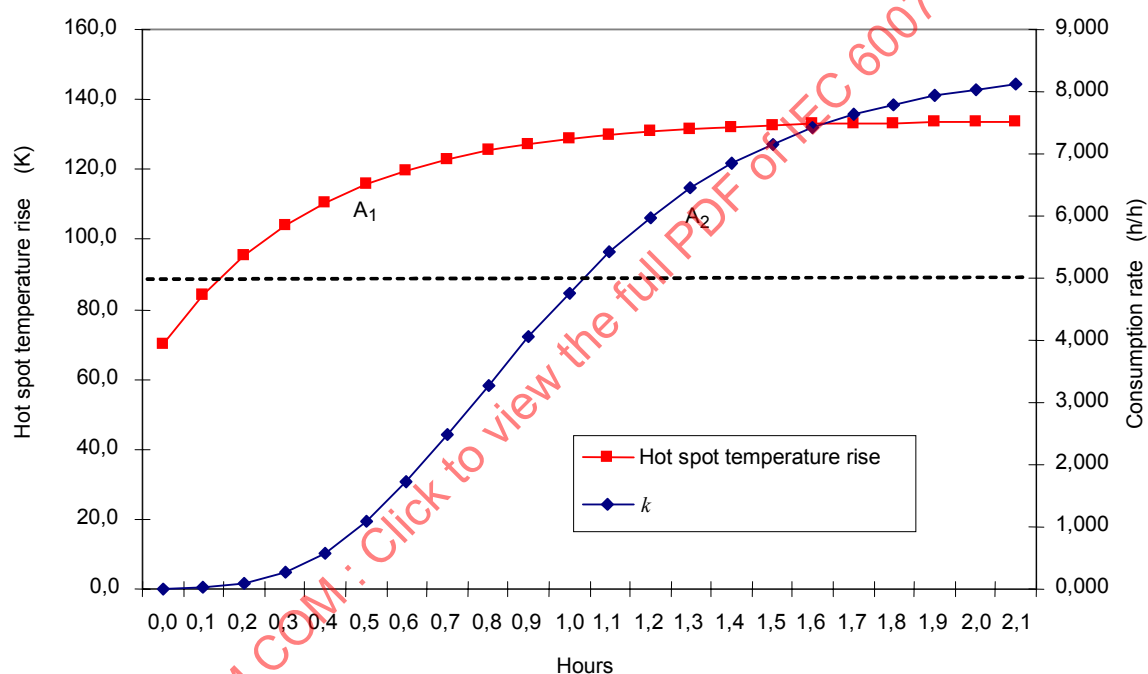
In order to calculate the lifetime consumption during the transition interval between  $\Delta\vartheta_{\text{HSi}}$  and  $\Delta\vartheta_{\text{HSu}}$  simultaneous values of time, hot-spot temperature rise  $\Delta\vartheta_{\text{HS}}$ , thermodynamic temperature  $T$  and ageing rate  $k$  are listed in Table B.1 for the time interval  $t - t_1 = 0$  to 2 h.

**Table B.1 – Lifetime consumption calculations**

| Time | Hot-spot temperature rise | Thermodynamic temperature | Ageing rate | Lifetime consumption |
|------|---------------------------|---------------------------|-------------|----------------------|
| (h)  | (K)                       | (K)                       | (h/h)       | (h)                  |
|      | Eq. 14                    | Eq. 3                     | Eq. 5       | Eq. 7                |
| 0    | 70,0                      | 373,0                     | 0,003       | 0,000 0              |
| 0,1  | 84,2                      | 387,2                     | 0,020       | 0,002 0              |
| 0,2  | 95,2                      | 398,2                     | 0,088       | 0,008 8              |
| 0,3  | 103,8                     | 406,8                     | 0,260       | 0,026 0              |
| 0,4  | 110,5                     | 413,5                     | 0,586       | 0,058 6              |
| 0,5  | 115,7                     | 418,7                     | 1,086       | 0,108 6              |
| 0,6  | 119,8                     | 422,8                     | 1,735       | 0,173 5              |
| 0,7  | 122,9                     | 425,9                     | 2,484       | 0,248 4              |
| 0,8  | 125,4                     | 428,4                     | 3,272       | 0,327 2              |
| 0,9  | 127,3                     | 430,3                     | 4,046       | 0,404 6              |
| 1    | 128,8                     | 431,8                     | 4,768       | 0,476 8              |
| 1,1  | 129,9                     | 432,9                     | 5,413       | 0,541 3              |
| 1,2  | 130,8                     | 433,8                     | 5,972       | 0,597 2              |
| 1,3  | 131,5                     | 434,5                     | 6,445       | 0,644 5              |
| 1,4  | 132,1                     | 435,1                     | 6,838       | 0,683 8              |
| 1,5  | 132,5                     | 435,5                     | 7,160       | 0,716 0              |
| 1,6  | 132,8                     | 435,8                     | 7,420       | 0,742 0              |

| Time | Hot-spot temperature rise | Thermodynamic temperature | Ageing rate | Lifetime consumption |
|------|---------------------------|---------------------------|-------------|----------------------|
| (h)  | (K)                       | (K)                       | (h/h)       | (h)                  |
|      | Eq. 14                    | Eq. 3                     | Eq. 5       | Eq. 7                |
| 1,7  | 133,1                     | 436,1                     | 7,629       | 0,762 9              |
| 1,8  | 133,3                     | 436,3                     | 7,796       | 0,779 6              |
| 1,9  | 133,5                     | 436,5                     | 7,928       | 0,792 8              |
| 2    | 133,6                     | 436,6                     | 8,032       | 0,803 2              |
| 2,1  | 133,7                     | 436,7                     | 8,114       | 0,811 4              |
|      |                           |                           | $L_C$ total | 9,709 3              |

Values of  $\Delta\vartheta_{HS}$  and  $k$  are plotted versus time in Figure B.2.



IEC 2004/08

### Key

X-axis: time after  $t_1$  in hours (h)

Y-axis: Left hot-spot temperature rise in Kelvin (K)

Right lifetime consumption rate  $k$  in hours per hour (h/h)

Upper red curve: hot-spot temperature rise in Kelvin (K)

Lower blue curve: lifetime consumption rate corresponding to the hot-spot temperature rise

**Figure B.2 – Hot-spot temperature rise and life consumption**

The lifetime consumption for the 2 h long period of transition from  $\Delta\vartheta_{HSi}$  to  $\Delta\vartheta_{HSu}$  is represented by the area below the lower solid curve. There are several ways to estimate this area. A simple way is to draw a horizontal straight line across the diagram. The line shall be situated at an ordinate that makes the size of the two areas  $A_1$  and  $A_2$  equal judged by the eye. The boundaries of the area  $A_1$  are the left ordinate axis, the horizontal line and the solid curve. The boundaries of the area  $A_2$  are the right ordinate axis, the horizontal line and the

solid curve. The ordinate on the right axis is read, and the area below the curve for  $k$  is equal to the product of this ordinate and the time at the right end of the X-axis. In this case:

$$5,0 \times 2 = 10 \text{ (h)}$$

This means that the lifetime consumption during the 2 h long time interval while the hot-spot temperature rise increases from 70 K to 134 K is 10 h.

In addition to these hours comes the lifetime consumption due to 10 h at 70 K hot-spot temperature rise and  $10 - 2 = 8$  h at 134 K. The two latter contributions can be calculated by Equation (7).

$$L_{c1} = 180\,000 \times 10 \times (9,60 \text{ E} - 17)^{-1} \times \exp(-20\,475 / (273+100)) = 0,03 \text{ h}$$

$$L_{c2} = 180\,000 \times 8 \times (9,60 \text{ E} - 17)^{-1} \times \exp(-20\,475 / (273+164)) = 67,28 \text{ h}$$

They are 0,03 h and 67,28 h respectively.

The total lifetime consumption during the total 20 h considered is then:

$$0,03 + 9,71 + 67,28 = 77,02 \text{ h.}$$

Other ways to determine the area below the curve for  $k$  in the transition interval are the numerical integration methods, the rectangular, trapezoidal or Simpson's rule.

The  $k$ -curve has a shape that can be described by a polynomial, which is easy to integrate to obtain the size of the area below the curve. By this method, the lifetime is 8,54 h if the step of calculation is 0,01 h.

### B.3 Example 3: Varying load current

#### B.3.1 Assumptions

Loading current varying between 0,7 p.u. and 1,2 p.u. during a 24 h period.

Rated time constant for the considered winding:  $\tau_r = 0,5$  h.

Ambient temperature: 30 °C constant (independent of the loading current).

Insulation system temperature: 180 °C.

The average winding temperature rise at rated current  $\Delta\vartheta_{Wr} = 100$  K.

Self-cooled operation.

#### B.3.2 Calculation

The load cycle is shown in the two left columns of Table B.2 and in Figure B.3. The load current is recorded once every hour.

In order to calculate the lifetime consumption during 24 h period simultaneous values of time, hot-spot temperature rise  $\Delta\vartheta_{HS}$ , thermodynamic temperature  $T$  and ageing rate  $k$  are listed in Table B.2.

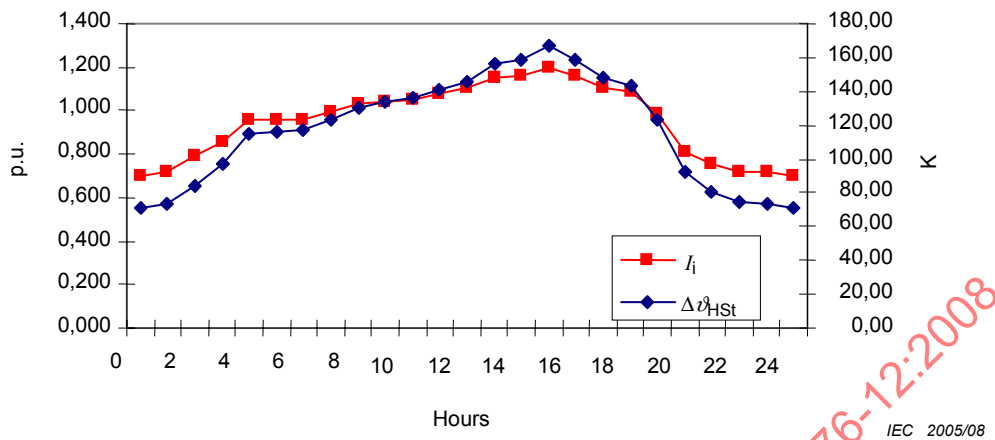
**Table B.2 – Life consumption calculations for varying load**

| Time | p.u.<br>Loading<br>factor | Ultimate hot<br>spot<br>temperature<br>rise | Time<br>constant | Hot spot<br>tempera-<br>ture rise | Thermodynamic<br>temperature | Ageing<br>rate $k$ | Time | Con-<br>sump-<br>tion of<br>life<br><br>$k$ | Factor | $k \times$<br>factor |
|------|---------------------------|---------------------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------|------|---------------------------------------------|--------|----------------------|
| (h)  |                           | (K)                                         | (h)              | (°C)                              | (K)                          | (h/h)              | (h)  | (h/h)                                       |        | (h)                  |
|      |                           | Eq. 9                                       | Eq. 18           | Eq. 14                            | Eq. 3                        | Eq. 5              |      |                                             |        |                      |
| 0    | 0,700                     | 70,64                                       |                  | 70,64                             | 373,6                        | 0,000              | 0    | 0,000                                       | 1      | 0,000                |
| 1    | 0,722                     | 74,23                                       | 0,458            | 73,82                             | 376,8                        | 0,000              | 1    | 0,000                                       | 4      | 0,000                |
| 2    | 0,788                     | 85,38                                       | 0,448            | 84,14                             | 387,1                        | 0,001              | 2    | 0,001                                       | 2      | 0,001                |
| 3    | 0,859                     | 98,02                                       | 0,432            | 96,64                             | 399,6                        | 0,004              | 3    | 0,004                                       | 4      | 0,014                |
| 4    | 0,956                     | 116,32                                      | 0,416            | 114,54                            | 417,5                        | 0,042              | 4    | 0,042                                       | 2      | 0,085                |
| 5    | 0,957                     | 116,51                                      | 0,407            | 116,34                            | 419,3                        | 0,054              | 5    | 0,054                                       | 4      | 0,214                |
| 6    | 0,962                     | 117,49                                      | 0,407            | 117,39                            | 420,4                        | 0,061              | 6    | 0,061                                       | 2      | 0,123                |
| 7    | 0,991                     | 123,20                                      | 0,404            | 122,72                            | 425,7                        | 0,122              | 7    | 0,122                                       | 4      | 0,486                |
| 8    | 1,029                     | 130,85                                      | 0,398            | 130,19                            | 433,2                        | 0,309              | 8    | 0,309                                       | 2      | 0,617                |
| 9    | 1,044                     | 133,92                                      | 0,394            | 133,62                            | 436,6                        | 0,468              | 9    | 0,468                                       | 4      | 1,872                |
| 10   | 1,054                     | 135,97                                      | 0,392            | 135,79                            | 438,8                        | 0,607              | 10   | 0,607                                       | 2      | 1,214                |
| 11   | 1,080                     | 141,38                                      | 0,390            | 140,95                            | 444,0                        | 1,116              | 11   | 1,116                                       | 4      | 4,464                |
| 12   | 1,104                     | 146,44                                      | 0,386            | 146,03                            | 449,0                        | 2,004              | 12   | 2,004                                       | 2      | 4,008                |
| 13   | 1,152                     | 156,76                                      | 0,381            | 155,98                            | 459,0                        | 6,079              | 13   | 6,079                                       | 4      | 24,317               |
| 14   | 1,163                     | 159,16                                      | 0,377            | 158,94                            | 461,9                        | 8,375              | 14   | 8,375                                       | 2      | 16,750               |
| 15   | 1,200                     | 167,34                                      | 0,374            | 166,76                            | 469,8                        | 19,176             | 15   | 19,176                                      | 4      | 76,702               |
| 16   | 1,159                     | 158,29                                      | 0,374            | 158,87                            | 461,9                        | 8,317              | 16   | 8,317                                       | 2      | 16,635               |
| 17   | 1,109                     | 147,50                                      | 0,380            | 148,32                            | 451,3                        | 2,600              | 17   | 2,600                                       | 4      | 10,399               |
| 18   | 1,087                     | 142,85                                      | 0,385            | 143,26                            | 446,3                        | 1,459              | 18   | 1,459                                       | 2      | 2,917                |
| 19   | 0,982                     | 121,42                                      | 0,395            | 123,15                            | 426,2                        | 0,128              | 19   | 0,128                                       | 4      | 0,514                |
| 20   | 0,810                     | 89,22                                       | 0,418            | 92,32                             | 395,3                        | 0,002              | 20   | 0,002                                       | 2      | 0,004                |
| 21   | 0,751                     | 79,06                                       | 0,442            | 80,43                             | 383,4                        | 0,000              | 21   | 0,000                                       | 4      | 0,001                |
| 22   | 0,720                     | 73,90                                       | 0,452            | 74,62                             | 377,6                        | 0,000              | 22   | 0,000                                       | 2      | 0,000                |
| 23   | 0,719                     | 73,74                                       | 0,456            | 73,83                             | 376,8                        | 0,000              | 23   | 0,000                                       | 4      | 0,000                |
| 24   | 0,700                     | 70,64                                       | 0,459            | 71,00                             | 374,0                        | 0,000              | 24   | 0,000                                       | 1      | 0,000                |

161,34

53,78

Notice that there is some variation in the time constant during the cycle.



#### Key

X-axis time in hours (h)

Y-axis left: load current (p.u.)

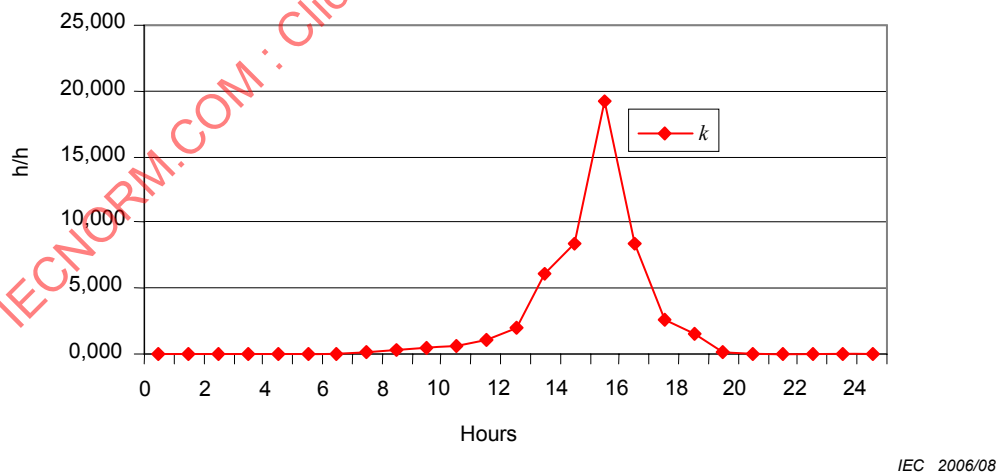
Y-axis right: winding hot-spot temperature rise in Kelvin (K)

Blue curve load current, corresponding to left Y-axis (p.u.) and corresponding to symbol  $I_l$

Red curve winding hot-spot temperature rise, corresponding to right Y-axis (K)

**Figure B.3 – Load current and winding hot-spot temperature rise**

The curve in Figure B.4 shows how the ageing rate varies with the time during the 24 h cycle. The lifetime consumption in the course of the cycle is the area below this curve.



#### Key

X-axis time in hours (h)

Y-axis ageing rate in hours per hour (h/h)

**Figure B.4 – Ageing rate versus time**

The area below the curve can be found by means of Simpson's rule of numerical integration, which says:

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{b-a}{6n} \times (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 4y_{2n-1} + y_{2n})$$

where  $2n$  is the number of equal subdivision intervals in the total interval from  $a$  to  $b$ .

In the present example  $2n = 24$  ( $n = 12$ ), and the ordinates  $y_0, y_1, y_2$  etc., are the values of  $k$ ,  $b = 24$  and  $a = 0$ .

The following table can be set up:

**Table B.3 – Life consumption calculation**

| Time | Consumption of life | Factor | $k \times \text{factor}$ |
|------|---------------------|--------|--------------------------|
| (h)  | (h/h)               | (h)    | (h)                      |
|      | Eq. 7               |        |                          |
| 0    | 0,000               | 1      | 0,000                    |
| 1    | 0,000               | 4      | 0,000                    |
| 2    | 0,001               | 2      | 0,001                    |
| 3    | 0,004               | 4      | 0,014                    |
| 4    | 0,042               | 2      | 0,085                    |
| 5    | 0,054               | 4      | 0,214                    |
| 6    | 0,061               | 2      | 0,123                    |
| 7    | 0,122               | 4      | 0,486                    |
| 8    | 0,309               | 2      | 0,617                    |
| 9    | 0,468               | 4      | 1,872                    |
| 10   | 0,607               | 2      | 1,214                    |
| 11   | 1,116               | 4      | 4,464                    |
| 12   | 2,004               | 2      | 4,008                    |
| 13   | 6,079               | 4      | 24,317                   |
| 14   | 8,375               | 2      | 16,750                   |
| 15   | 19,176              | 4      | 76,702                   |
| 16   | 8,317               | 2      | 16,635                   |
| 17   | 2,600               | 4      | 10,399                   |
| 18   | 1,459               | 2      | 2,917                    |
| 19   | 0,128               | 4      | 0,514                    |
| 20   | 0,002               | 2      | 0,004                    |
| 21   | 0,000               | 4      | 0,001                    |
| 22   | 0,000               | 2      | 0,000                    |
| 23   | 0,000               | 4      | 0,000                    |
| 24   | 0,000               | 1      | 0,000                    |

161,34

53,78

The area of below the curve in Figure B.4 is then:

$$\frac{24}{6 \times 12} \times 161,34 = 53,78 \text{ (h)}$$

This means that during the given 24 h loading cycle 53,78 lifetime hours is consumed of a total lifetime of 180 000 h, which is 0,029 9 % of the total lifetime.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## Annex C (informative)

### List of symbols

| Symbol             | Meaning                                                                                                                                              | Units                      | Subclause                   |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| $a$                | Arrhenius' equation constants                                                                                                                        | h                          | 5.2                         |
| $b$                | Arrhenius' equation constants                                                                                                                        | K                          | 5.2                         |
| $C$                | effective thermal capacity of winding                                                                                                                | W•min/<br>K<br>or<br>W•h/K | 5.10.2                      |
| $C_T$              | temperature correction for resistance change with temperature                                                                                        |                            | 5.9.1                       |
| $I$                | loading factor per unit                                                                                                                              |                            | 5.9.1                       |
| $I_i$              | initial loading factor                                                                                                                               |                            | 5.12                        |
| $I_n$              | loading factor $n$ per unit                                                                                                                          |                            | 5.8                         |
| $I_U$              | ultimate loading factor                                                                                                                              |                            | 5.12                        |
| $k$                | ageing rate as consumption of lifetime-hours per hour of operation time at a temperature                                                             | h/h                        | 5.4                         |
| $kr$               | relative ageing rate at constant hot-spot temperature $T$ (in Kelvin) expressed as a percentage of the ageing rate that gives 180 000 hours lifetime | %                          | 5.4                         |
| $L$                | life time                                                                                                                                            | h                          | 5.2                         |
| $L_c$              | lifetime consumption expressed in hours, at a constant hot-spot temperature $T$ (in Kelvin) during a time $t$ in hours                               | h                          | 5.5                         |
| $m$                | empirical constant, which is equal to 0,8                                                                                                            |                            | 5.9.1                       |
| $P_r$              | winding total losses (resistive losses+ eddy losses) at rated load and rated temperature rise                                                        | W                          | 5.10.2                      |
| $q$                | empirical constant for calculation of hot-spot temperature rise at a considered load                                                                 |                            | 5.8                         |
| $t$                | time                                                                                                                                                 | min                        | 5.9.2                       |
| $T$                | hot-spot thermodynamic temperature                                                                                                                   | K                          | 5.2                         |
| $T_i$              | insulation system temperature (thermal index $T_i$ )                                                                                                 | °C                         | 5.2                         |
| $T_k$              | temperature constant for conductor, which is 225 for aluminium and 235 for copper                                                                    |                            | 5.9.1                       |
| $X$                | empirical constant used in forced-air calculation, which is 1 (suggested unless test data available)                                                 |                            | 5.9.1                       |
| $Z$                | assumed hot-spot factor to be 1,25                                                                                                                   |                            | 5.7/5.8                     |
| $\vartheta_a$      | ambient temperature                                                                                                                                  | °C                         | 5.3 /5.9.1 /5.9.2 /5.12     |
| $\vartheta_e$      | core contribution to winding hot-spot temperature rise at no load                                                                                    | K                          | 5.10.2                      |
| $\vartheta_{HS}$   | hot-spot temperature at given conditions (load $I$ , ambient temperature...)                                                                         | °C                         | 5.6<br>5.9.1<br>5.9.2 /5.12 |
| $\vartheta_{HS,r}$ | winding rated hot-spot temperature<br>calculated or tested hot-spot temperature at 1,0 per unit                                                      | °C                         | 5.2<br>5.9.1                |

| Symbol                   | Meaning                                                                                                                                                       | Units | Subclause     |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------|
|                          | load                                                                                                                                                          |       |               |
| $\Delta\vartheta_{HS}$   | hot-spot temperature rise at per unit load $I$                                                                                                                | K     | 5.9.1<br>5.12 |
| $\Delta\vartheta_{HS,r}$ | hot-spot temperature rise at rated load                                                                                                                       | K     | 5.7           |
| $\Delta\vartheta_{HSn}$  | winding hot-spot temperature rise above the ambient temperature at the considered load<br>hot-spot temperature rise at the considered load                    | K     | 5.2<br>5.8    |
| $\Delta\vartheta_i$      | initial hot-spot temperature rise at some prior load $I_n$                                                                                                    | K     | 5.9.2         |
| $\Delta\vartheta_t$      | hot-spot temperature rise at time $t$ after changing the load                                                                                                 | K     | 5.9.2 / 5.12  |
| $\Delta\vartheta_U$      | ultimate hot-spot temperature rise if the per unit overload $I_U$ continued until the hot-spot temperature rise stabilized ultimate hot-spot temperature rise | K     | 5.9.2<br>5.12 |
| $\Delta\vartheta_{Wr}$   | average winding temperature rise at rated load                                                                                                                | K     | 5.7           |
| $\tau$                   | time constant for the transformer at a given load                                                                                                             | min   | 5.9.2         |
| $\tau_R$                 | time constant for the transformer at rated load                                                                                                               | min   | 5.9.2         |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## **Bibliography**

IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

---

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## SOMMAIRE

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS.....                                                                                                      | 38 |
| INTRODUCTION.....                                                                                                      | 40 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                                          | 41 |
| 2 Références normatives.....                                                                                           | 41 |
| 3 Termes et définitions .....                                                                                          | 41 |
| 4 Effet d'un régime de charge au-delà de la puissance assignée de la plaque<br>signalétique.....                       | 42 |
| 4.1 Généralités.....                                                                                                   | 42 |
| 4.2 Conséquences générales .....                                                                                       | 42 |
| 4.3 Effets et dangers d'un régime de charge de secours de courte durée.....                                            | 42 |
| 4.4 Effets d'un régime de charge de secours de longue durée.....                                                       | 43 |
| 5 Vieillessement et durée de vie de l'isolation du transformateur .....                                                | 43 |
| 5.1 Généralités.....                                                                                                   | 43 |
| 5.2 Durée de vie.....                                                                                                  | 44 |
| 5.3 Relation entre la charge continue constante et la température.....                                                 | 45 |
| 5.4 Vitesse de vieillissement .....                                                                                    | 45 |
| 5.5 Consommation de la durée de vie .....                                                                              | 46 |
| 5.6 Température du point chaud en régime permanent.....                                                                | 46 |
| 5.7 Facteur de point chaud supposé.....                                                                                | 46 |
| 5.8 Echauffements de point chaud pour des conditions variables de température<br>ambiante et de régime de charge ..... | 46 |
| 5.9 Equations de charge .....                                                                                          | 47 |
| 5.9.1 Charge continue .....                                                                                            | 47 |
| 5.9.2 Charge transitoire.....                                                                                          | 48 |
| 5.10 Détermination de la constante de temps de l'enroulement .....                                                     | 49 |
| 5.10.1 Généralités.....                                                                                                | 49 |
| 5.10.2 Méthode de calcul de la constante de temps .....                                                                | 49 |
| 5.10.3 Méthode d'essai de la constante de temps .....                                                                  | 50 |
| 5.11 Détermination de la constante de temps de l'enroulement conformément à la<br>constante empirique .....            | 50 |
| 5.12 Calcul de la capacité de charge.....                                                                              | 50 |
| 6 Limites .....                                                                                                        | 52 |
| 6.1 Limites de courant et de température .....                                                                         | 52 |
| 6.2 Autres limites .....                                                                                               | 52 |
| 6.2.1 Champ magnétique de fuite dans les parties métalliques de<br>construction.....                                   | 52 |
| 6.2.2 Accessoires et autres considérations.....                                                                        | 52 |
| 6.2.3 Transformateurs sous enveloppe .....                                                                             | 53 |
| 6.2.4 Conditions ambiantes extérieures.....                                                                            | 53 |
| Annexe A (informative) Vitesse de vieillissement .....                                                                 | 54 |
| Annexe B (informative) Exemples de consommation de durée de vie pour 3 régimes<br>de charge .....                      | 59 |
| Annexe C (informative) Liste de symboles .....                                                                         | 68 |
| Bibliographie.....                                                                                                     | 70 |
| Figure A.1 – Structure moléculaire d'une résine époxy.....                                                             | 54 |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure A.2 – Graphique d'endurance thermique .....                                                                                       | 57 |
| Figure B.1 – Courbe de charge variable par pas .....                                                                                     | 60 |
| Figure B.2 – Échauffement du point chaud et consommation de durée de vie .....                                                           | 62 |
| Figure B.3 – Courant de charge et échauffement du point chaud de l'enroulement.....                                                      | 65 |
| Figure B.4 – Taux de vieillissement en fonction du temps .....                                                                           | 65 |
| <br>                                                                                                                                     |    |
| Tableau 1 – Constantes pour équation de durée de vie.....                                                                                | 44 |
| Tableau 2 – Température maximale du point chaud de l'enroulement .....                                                                   | 51 |
| Tableau 3 – Limites de courant et de température applicables aux charges au-delà<br>des caractéristiques de la plaque signalétique ..... | 52 |
| Tableau B.1 – Calculs de consommation de durée de vie .....                                                                              | 61 |
| Tableau B.2 – Calculs de consommation de vie pour une charge variable.....                                                               | 64 |
| Tableau B.3 – Calcul de consommation de vie .....                                                                                        | 66 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

### Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60076-12 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

La présente norme annule et remplace la CEI 60905 (1987). Cette première édition constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

|             |                 |
|-------------|-----------------|
| FDIS        | Rapport de vote |
| 14/584/FDIS | 14/590/RVD      |

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

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60076, présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 60076 donne des lignes directrices pour la spécification et la charge des transformateurs de puissance de type sec, du point de vue des températures de fonctionnement et du vieillissement thermique. Elle indique les conséquences d'un fonctionnement à des régimes de charge supérieurs à la valeur assignée et fournit un guide pour le planificateur afin de choisir les grandeurs assignées et les conditions de charge appropriées pour de nouvelles installations.

La CEI 60076-11 constitue la base pour des ententes contractuelles et elle contient les exigences et les essais concernant les valeurs d'échauffement des transformateurs de puissance de type sec au cours d'une charge assignée continue. Il convient de noter que la CEI 60076-11 fait référence à l'échauffement moyen des enroulements, tandis que la présente partie de la CEI 60076 se réfère principalement à la température de point chaud, et les dernières valeurs indiquées sont données seulement à titre indicatif.

La présente partie de la CEI 60076 donne des modèles mathématiques pour juger la conséquence de différents régimes de charge, transitoires ou cycliques, pour différentes températures du fluide de refroidissement, et pour des variations transitoires ou cycliques au cours du temps. Les modèles donnent le calcul des températures de fonctionnement dans le transformateur, en particulier la température de la partie la plus chaude de l'enroulement. Cette température de point chaud est utilisée pour l'estimation du nombre d'heures de la durée de vie consommée au cours d'une période de temps particulière.

La présente partie de la CEI 60076 présente des recommandations supplémentaires concernant les limites de charge admissible selon les résultats des calculs ou des mesures de la température. Ces recommandations se réfèrent à différents types de régimes de charge – régime de charge continu, régime de charge de secours de courte durée et de longue durée. Une explication des principes essentiels du vieillissement est donnée en Annexe A.

## TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

### Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 s'applique aux transformateurs de type sec, conformément au domaine d'application de la CEI 60076-11. Elle fournit les moyens pour estimer la vitesse de vieillissement et la consommation de la durée de vie de l'isolation du transformateur en fonction de la température de fonctionnement, de la durée et de la charge du transformateur.

NOTE Pour les applications particulières telles que les transformateurs pour application dans les éoliennes, les transformateurs de fours, les transformateurs des machines à souder, et d'autres transformateurs, il convient de consulter le constructeur concernant le profil de charge particulier.

#### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application 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).

CEI 60076-11, *Transformateurs de puissance – Partie 11: Transformateurs de type sec*

CEI 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essai*

CEI 61378-1:1997, *Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles*

#### 3 Termes et définitions

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

##### 3.1

##### **régime de charge de secours de longue durée**

régime de charge résultant de la panne prolongée de certains éléments du système qui ne seront pas reconnectés avant que le transformateur atteigne, en régime permanent, une nouvelle température stabilisée plus élevée

##### 3.2

##### **régime de charge de secours de courte durée**

régime de charge exceptionnellement élevé à caractère transitoire (inférieure à une fois la constante de temps de la bobine) dû à l'apparition d'un ou plusieurs événements de faible probabilité qui perturbent sérieusement le régime de charge normal du système

##### 3.3

##### **point chaud**

en l'absence de définition spécifique, «point chaud» signifie le point le plus chaud de l'enroulement

### 3.4

#### **vitesse relative de vieillissement thermique**

pour une température de point chaud donnée, vitesse à laquelle le vieillissement de l'isolation du transformateur est réduit ou accéléré par rapport à la vitesse de vieillissement correspondant à une température de point chaud de référence

### 3.5

#### **durée de vie de l'isolation du transformateur**

durée totale entre l'état initial pour lequel la durée de vie de l'isolation d'un transformateur normal est considérée neuve et l'état final correspondant au moment où, en raison du vieillissement thermique, des contraintes diélectriques, des contraintes de court-circuit ou des mouvements mécaniques, qui pourraient se produire en service normal, conduisent à un risque élevé de défaillance électrique

### 3.6

#### **refroidissement AN**

refroidissement par ventilation naturelle de l'air

### 3.7

#### **refroidissement AF**

méthode de refroidissement pour augmenter la puissance assignée du transformateur avec un refroidissement par ventilateur

## **4 Effet d'un régime de charge au-delà de la puissance assignée de la plaque signalétique**

### **4.1 Généralités**

L'espérance de vie normale est une base de référence conventionnelle pour un service continu à la température ambiante de conception et aux conditions de fonctionnement assignées. L'application d'une charge supérieure à celle de la plaque signalétique et/ou d'une température ambiante plus élevée que les températures ambiantes spécifiées implique un degré de risque et un vieillissement accéléré. L'objet de la présente partie de la CEI 60076 consiste à identifier de tels risques et à indiquer comment, dans certaines limites, les transformateurs peuvent être chargés au-delà de la puissance assignée de la plaque signalétique.

### **4.2 Conséquences générales**

Un régime de charge d'un transformateur au-delà de la puissance assignée de sa plaque signalétique entraîne les conséquences suivantes:

- les températures des enroulements, des bornes, des connexions, des changeurs de prises et de l'isolation augmentent, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables;
- le refroidissement de l'enveloppe est plus sensible à la surcharge, entraînant une augmentation plus rapide de la température de l'isolation à des niveaux inacceptables;
- par conséquent, il y aura un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou peut résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses d'années.

NOTE Une autre conséquence de la surcharge est une augmentation de la chute de tension du transformateur.

### **4.3 Effets et dangers d'un régime de charge de secours de courte durée**

Les risques principaux, pour un régime de charge de secours de courte durée au-dessus des limites spécifiées, sont les suivantes:

- contraintes mécaniques critiques dues à l'augmentation de la température, qui peut atteindre un niveau inacceptable, provoquant des fissures dans l'isolation d'un transformateur en résine enrobés;
- dommages mécaniques dans l'enroulement dus à un courant court et répétitif supérieur au courant assigné;
- dommages mécaniques dans l'enroulement dus à un courant court et répétitif combiné à une température ambiante supérieure à la température spécifiée;
- une dégradation des propriétés mécaniques à une température plus élevée peut réduire la tenue au court-circuit;
- réduction de la tenue diélectrique à cause de la température élevée.

Par conséquent, la surintensité maximale est limitée à 50 % du courant nominal assigné.

L'accord du constructeur est nécessaire en cas de surcharge supérieure à 50 %, afin d'évaluer les conséquences d'une telle surcharge. Dans tous les cas, il convient que la durée d'une telle surcharge soit aussi courte que possible.

#### **4.4 Effets d'un régime de charge de secours de longue durée**

Les effets d'un régime de charge de secours de longue durée sont

- la détérioration thermique cumulée des propriétés mécaniques et diélectriques de l'isolation des conducteurs sera accélérée à des températures plus élevées. Si cette détérioration se poursuit suffisamment, elle réduit la durée de vie du transformateur, en particulier si l'appareil est soumis à des courts-circuits du réseau électrique;
- d'autres matériaux isolants, ainsi que les parties structurelles et les conducteurs, vieillissent davantage à des températures plus élevées;
- les règles de calcul pour la vitesse de vieillissement et la consommation de la durée de vie sont basées sur des considérations de charge.

### **5 Vieillissement et durée de vie de l'isolation du transformateur**

#### **5.1 Généralités**

L'expérience montre que la durée de vie normale d'un transformateur est de plusieurs dizaines d'années. Elle ne peut pas être indiquée plus précisément, parce qu'elle peut varier, même entre des unités identiques, en particulier à cause des facteurs de fonctionnement, qui peuvent différer d'un transformateur à l'autre. A quelques exceptions près, un transformateur fonctionne rarement à 100 % du courant assigné tout au long de sa durée de vie. D'autres facteurs d'échauffement tels qu'un refroidissement insuffisant, des harmoniques, une saturation et/ou des conditions inhabituelles telles que décrites dans la CEI 60076-11, peuvent également affecter la durée de vie du transformateur.

Lorsque la chaleur, qui est principalement due aux pertes du transformateur, est transférée au système d'isolation, un processus chimique commence. Ce processus modifie la structure moléculaire des matériaux qui constituent le système d'isolation. La vitesse de vieillissement augmente avec la quantité de chaleur transférée au système. Ce processus est cumulatif et irréversible, ce qui signifie que les matériaux ne retrouvent pas leur structure moléculaire d'origine lorsqu'il n'y a plus d'apport de chaleur et que la température diminue. L'indice thermique du système d'isolation est indiqué dans la documentation du constructeur et est également écrit sur la plaque signalétique. On suppose qu'une isolation défaillante due au vieillissement est l'une des causes de la fin de la durée de vie du transformateur.

De plus, on suppose que la vitesse de vieillissement varie en fonction de la température, conformément à l'équation d'Arrhenius. Se reporter à l'Annexe A pour des informations de base supplémentaires. Il convient que les deux constantes dans l'équation d'Arrhenius soient idéalement déterminées au moyen d'essais d'endurance thermique. Dans les cas où il n'y a

pas de données provenant d'essais de ce type, ce guide fournit des constantes estimées, qui sont calculées sur la base des hypothèses suivantes:

- une augmentation de la température de 6 K double la vitesse de vieillissement. 6 K est une valeur estimée pour l'ensemble de l'enroulement, liée à la valeur de matériaux spécifiques utilisés dans l'enroulement;
- il convient d'utiliser une autre valeur pour ce doublement de vitesse lorsqu'il est validé par les essais d'endurance thermique sur l'ensemble du système d'isolation électrique, d'après la CEI 60216-1;
- les défaillances de l'isolation provoquent la fin de vie du transformateur.

## 5.2 Durée de vie

La durée de vie prévue  $L$  d'un transformateur à une température thermodynamique constante de point chaud  $T$  en kelvins (K) peut être calculée à l'aide de l'équation:

$$L = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (1)$$

Cette équation peut être écrite de façon plus appropriée ainsi:

$$L = a \times \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (2)$$

Bien que toute unité de temps puisse être utilisée dans ces formules, l'heure est utilisée dans le présent guide. La constante  $a$ , donnée dans le Tableau 1 pour les différentes températures du système d'isolation, est basée sur cette unité de temps.

NOTE 1 Il convient que la durée de vie prévue calculée conformément à cette équation ne soit pas perçue dans un sens trop littéral. La capacité du transformateur à résister à des surintensités élevées dues à des courts-circuits dans le système d'alimentation et à des surtensions est, après cette durée de vie calculée théoriquement, certainement affaiblie par rapport à celle d'un nouveau transformateur. En l'absence de telles perturbations, le transformateur peut continuer à fonctionner de manière satisfaisante pendant de nombreuses années. Des précautions pour éviter les courts-circuits et des installations de protection adéquate contre les surtensions peuvent prolonger la durée de vie du transformateur.

**Tableau 1 – Constantes pour équation de durée de vie**

| Température du système d'isolation (classe thermique) | Constantes de l'équation d'Arrhenius |        | Température de point chaud nominale de l'enroulement $\vartheta_{HS,r}$ |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------|
|                                                       | $a$                                  | $b$    |                                                                         |
| °C                                                    | h                                    | K      | °C                                                                      |
| 105 (A)                                               | 3,10E-14                             | 15 900 | 95                                                                      |
| 120 (E)                                               | 5,48E-15                             | 17 212 | 110                                                                     |
| 130 (B)                                               | 1,72E-15                             | 18 115 | 120                                                                     |
| 155 (F)                                               | 9,60E-17                             | 20 475 | 145                                                                     |
| 180 (H)                                               | 5,35E-18                             | 22 979 | 170                                                                     |
| 200                                                   | 5,31E-19                             | 25 086 | 190                                                                     |
| 220                                                   | 5,26E-20                             | 27 285 | 210                                                                     |

NOTE 2 Les formules suivantes sont utilisées pour déterminer les coefficients  $a$  et  $b$  pour la température assignée du point chaud de l'enroulement:

$$\ln(180\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 273} + \ln(a)$$

$$\ln(90\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HS,r} + 6 + 273} + \ln(a)$$

$\vartheta_{HS,r}$  est la température nominale de point chaud de l'enroulement;

$T_i$  est la température du système d'isolation (classe thermique  $T_i$ ).

Le Tableau 1 est calculé en doublant le vieillissement pour chaque valeur de 6 K.

NOTE 3 La plupart des transformateurs de puissance fonctionnent bien en dessous de la pleine charge pour l'essentiel de leur durée de vie réelle. Puisque une température de point chaud d'une valeur aussi petite que 6 °C inférieure aux valeurs assignées a comme conséquence une réduction de moitié de la consommation de durée de vie assignée, la durée de vie réelle d'un transformateur excède typiquement 20 ans. En conséquence, les constantes du Tableau 1 ont été développées sur une base de 180 000 h en doublant le vieillissement 6 K.

### 5.3 Relation entre la charge continue constante et la température

La température thermodynamique constante de point chaud  $T$ , exprimée en kelvins (K) de l'enroulement est donnée par:

$$T = 273 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HSn} \quad (3)$$

où

$\vartheta_a$  est la température ambiante en degrés Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{HSn}$  est l'échauffement du point chaud de l'enroulement au-dessus de la température ambiante à la charge considérée.

Notez que la température ambiante peut ne pas être indépendante de la charge, mais peut être fonction de la charge:

$$\vartheta_a = f(\text{courant}) \quad (4)$$

Cette fonction peut varier d'un site à l'autre. La connaissance de cette corrélation pour le site particulier est nécessaire pour faire des estimations pertinentes de la vitesse de vieillissement et de la consommation de la durée de vie. La corrélation peut être trouvée par des mesures sur le site spécifique. Si aucune information de ce type n'est disponible, des indications concernant la vitesse de vieillissement et la consommation de la durée de vie peuvent être obtenues en effectuant des calculs alternatifs à différentes températures ambiantes, par exemple dans la plage comprise entre 10 °C et 40 °C.

Les formules données dans la présente norme considèrent les pertes par courants de Foucault comme des pertes ohmiques dans les enroulements. Les données d'essai indiquent que les formules montrent une perte de durée de vie plus élevée que prévu. Si des courants harmoniques sont présents, l'augmentation des pertes par courants de Foucault au cours de la surcharge peut nécessiter une prise en compte supplémentaire, conformément à l'Annexe A de la CEI 61378-1.

### 5.4 Vitesse de vieillissement

La durée de vie normale d'un transformateur est en pratique d'au moins 180 000 h. Afin d'exprimer la vitesse de vieillissement  $k$  comme une consommation de la durée de vie-heures par heure de durée de fonctionnement à une température  $T$ , exprimée en kelvins (K), une durée de 180 000 h est utilisée comme référence prudente dans l'équation suivante:

$$k = 180\,000 \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (5)$$

La vitesse de vieillissement relative  $kr$  à la température constante de point chaud  $T$ , exprimée en kelvins (K), exprimée en pourcentage de la vitesse de vieillissement qui donne une durée de vie de 180 000 h est calculée conformément à l'équation:

$$kr = 100 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (6)$$

$a$  et  $b$  doivent être extraits du Tableau 1.

### 5.5 Consommation de la durée de vie

La consommation de la durée de vie  $L_C$ , exprimée en heures (h), à une température constante de point chaud  $T$ , exprimée en kelvins (K), au cours d'un temps  $t$  en heures (h) est calculée conformément à l'équation:

$$L_C = 180\,000 \times t \times a^{-1} \times \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (7)$$

$a$  et  $b$  sont extraits du Tableau 1.

### 5.6 Température du point chaud en régime permanent

Pour la plupart des transformateurs en service, la température de point chaud à l'intérieur d'un enroulement n'est pas connue avec précision. Pour la plupart de ces unités, la température de point chaud peut être évaluée par calcul.

Les règles de calcul dans ce document sont basées sur les éléments suivants:

$\vartheta_{HS}$  est la température de point chaud, exprimée en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), aux conditions assignées (courant assigné, température ambiante assignée, tension assignée, fréquence assignée...).

Le paramètre  $\vartheta_{HS}$  peut être trouvé par une méthode de calcul ou par des essais.

NOTE Bien qu'il n'y ait pas d'essai normalisé pour déterminer la température de point chaud, si le constructeur démontre d'autres valeurs par des essais, il peut utiliser ces valeurs pour effectuer des calculs de la consommation de la durée de vie du transformateur.

### 5.7 Facteur de point chaud supposé

Pour la considération suivante, le facteur de point chaud supposé  $Z$  est de 1,25:

$$\Delta\vartheta_{HS,r} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \quad (8)$$

où

$\Delta\vartheta_{HS,r}$  est l'échauffement du point chaud, exprimé en kelvins (K);

$\Delta\vartheta_{Wr}$  est l'échauffement moyen de l'enroulement à la charge assignée, exprimé en kelvins (K).

### 5.8 Echauffements de point chaud pour des conditions variables de température ambiante et de régime de charge

La valeur de base requise pour le calcul de la consommation de la durée de vie est la température au point chaud. A cet effet, il est nécessaire de connaître l'échauffement à cet emplacement pour chaque régime de charge, ainsi que la température ambiante.

$$\Delta\vartheta_{HSn} = Z \times \Delta\vartheta_{Wr} \times I_n^q \quad (9)$$

où

$\Delta\vartheta_{HSn}$  est l'échauffement du point chaud à la charge considérée;

$I_n$  est le facteur de charge par unité;

$q$  est égal à 1,6 pour le refroidissement par ventilation naturelle (AN); ou  
est égal à 2 pour les transformateurs à refroidissement (AF);

$Z$  est supposé être égal à 1,25.

Chaque fois que cela est possible, il est préférable d'utiliser les résultats d'essais donnant  $\Delta\vartheta_{Wr}$ , afin de limiter l'incertitude concernant la validité du facteur  $Z$  et la valeur de  $q$ . L'expérience montre que  $q$  et  $Z$  prennent des valeurs différentes selon le type de transformateur et le niveau de courant de charge auquel il fonctionne.

NOTE Avec certains types de constructions d'enroulements, la détermination de  $\Delta\vartheta_{Wr}$  peut être possible uniquement sur des transformateurs prototypes.

## 5.9 Equations de charge

### 5.9.1 Charge continue

Il convient que la température du point chaud  $\vartheta_{HS}$  en fonction de la charge pour des conditions de régime permanent soit calculée par les équations suivantes:

$$\vartheta_{HS} = \vartheta_a + \Delta\vartheta_{HS} \quad (10)$$

Pour le refroidissement AN, l'équation suivante s'applique:

$$\Delta\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS,r} [I]^{2m} \quad (11)$$

Pour le refroidissement AF, l'équation suivante s'applique:

$$\Delta\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS,r} [I^2 C_T]^X \quad (12)$$

$$C_T = \frac{T_k + \vartheta_{HS}}{T_k + \vartheta_{HS,r}} \quad (13)$$

où

$\Delta\vartheta_{HS}$  est l'échauffement du point chaud par unité de charge  $I$ , exprimé en kelvins (K);

$\vartheta_{HS,r}$  est la température de point chaud assignée ou mesurée à 1,0 par unité de charge, exprimée en degrés Celsius (°C) [les valeurs mesurées pour un fonctionnement à refroidissement naturel utilisées dans l'Equation (11) peuvent être différentes des valeurs mesurées pour un fonctionnement à refroidissement par ventilateur utilisées dans l'Equation (12)];

$I$  est le facteur de charge par unité (rapport entre le courant de charge et le courant assigné);

$C_T$  est la correction de température pour la variation de la résistance en fonction de la température;

- $m$  est une constante empirique, qui est égale à 0,8 (suggérée, à moins que des données d'essai ne soient disponibles);
- $\vartheta_a$  est la température ambiante, exprimée en degrés Celsius (°C);
- $\vartheta_{HS}$  est la température de point chaud à la charge  $I$ , exprimée en degrés Celsius (°C);
- $T_k$  est la constante de température pour le conducteur, qui est de 225 pour l'aluminium et de 235 pour le cuivre;
- $X$  est une constante empirique utilisée dans le calcul de la ventilation forcée, qui est égale à 1 (suggérée, à moins que des données d'essai ne soient disponibles).

Les données d'essai indiquent qu'il convient que les équations ci-dessus donnent lieu à des prévisions satisfaisantes de la température de point chaud.

L'exposant  $m$  de 0,8 pour le fonctionnement à refroidissement naturel et l'exposant  $X$  de 1 pour le fonctionnement à ventilation forcée sont déduits de la corrélation de transfert thermique pour la convection naturelle et forcée. Les données d'essai indiquent qu'une correction de température pour la résistance donnée par l'Equation (13) est nécessaire pour prévoir que les températures de point chaud augmentent au cours d'une charge à ventilation forcée en raison des pertes plus élevées présentes lors d'un fonctionnement à refroidissement forcé.

L'Equation (11) et l'Equation (12) ne prennent pas en compte les pertes par courants de Foucault dans les enroulements, qui varient inversement avec la température. La formule fournit un résultat satisfaisant, étant donné que les pertes par courants de Foucault sont généralement faibles, à moins que des courants harmoniques ne soient présents.

L'Equation (11) et l'Equation (12) exigent une méthode de calcul itérative. Il convient que l'utilisation des exposants suggérés et la prise en compte de la variation de la résistance en fonction de la température pour un fonctionnement à refroidissement par ventilateur entraînent des calculs satisfaisants de l'échauffement du point chaud, même lorsque les pertes par courants de Foucault ne sont pas prises en compte. Si des courants harmoniques sont présents, il peut être nécessaire de prendre en compte l'augmentation des pertes par courants de Foucault au cours de la surcharge, conformément à l'Annexe A de la CEI 61378-1.

### 5.9.2 Charge transitoire

Il convient de déterminer l'échauffement du point chaud dû à une surcharge transitoire par les équations suivantes.

$$\Delta \vartheta_t = (\Delta \vartheta_U - \Delta \vartheta_i) \left[ 1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right] + \Delta \vartheta_i \quad (14)$$

$$\vartheta_{HS} = \Delta \vartheta_t + \vartheta_a \quad (15)$$

où

- $\Delta \vartheta_i$  est l'échauffement initial du point chaud à une certaine charge précédente  $I_n$ , exprimé en kelvins (K);
- $\Delta \vartheta_t$  est l'échauffement du point chaud, exprimé en kelvins (K) et au temps  $t$ , après la variation de la charge;
- $\Delta \vartheta_U$  est l'échauffement ultime du point chaud exprimé en kelvins (K) si la surcharge par unité  $I_U$  s'est poursuivie jusqu'à stabilisation de l'échauffement du point chaud;
- $t$  est le temps, exprimé en minutes (min);

- $\tau_R$  est la constante de temps, exprimée en minutes (min), pour le transformateur à la charge assignée;
- $\tau$  est la constante de temps, exprimée en minutes (min), pour le transformateur à une charge donnée;
- $\vartheta_{HS}$  est la température de point chaud, exprimée en degrés Celsius (°C);
- $\vartheta_a$  est la température ambiante, exprimée en degrés Celsius (°C).

## 5.10 Détermination de la constante de temps de l'enroulement

### 5.10.1 Généralités

Le concept de constante de temps d'un transformateur est fondé sur l'hypothèse qu'une seule source de chaleur fournit de la chaleur à un seul dissipateur thermique et que l'échauffement du dissipateur est une fonction exponentielle de la chaleur fournie. La constante de temps est définie comme la durée nécessaire pour que l'échauffement au-dessus de la température ambiante varie de 63,2 % après une variation par paliers de la charge. La température se stabilise généralement après 5 constantes de temps. Il convient d'effectuer les calculs de la température de point chaud pour la charge à la fois sur les enroulements à basse tension et à haute tension, étant donné que les données d'essai publiées indiquent que les constantes de temps peuvent être différentes. Les classes de températures du système d'isolation pour les deux enroulements peuvent également être différentes.

Il convient de calculer ou de déterminer la constante de temps par des essais sur le transformateur après accord entre le fournisseur et l'acheteur.

### 5.10.2 Méthode de calcul de la constante de temps

La constante de temps d'un enroulement à la charge assignée,  $\tau_R$ , est:

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_T} \quad (16)$$

où

- $C$  est la capacité thermique effective de l'enroulement, en watt-minutes par K (Wmin/K),
- =  $(15,0 \times \text{masse du conducteur en aluminium en kilogrammes (kg)}) + (24,5 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$ , ou
- =  $(6,42 \times \text{masse du conducteur en cuivre en kilogrammes (kg)}) + (24,5 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$ ;

ou

- $C$  est la capacité thermique effective de l'enroulement, en watt-heures par K (Wh/K),
- =  $(0,25 \times \text{masse du conducteur en aluminium en kilogrammes (kg)}) + (0,408 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$ , ou
- =  $(0,107 \times \text{masse du conducteur en cuivre en kilogrammes (kg)}) + (0,408 \times \text{masse de la résine époxy et d'une autre isolation de l'enroulement en kilogrammes (kg)})$ ;

- $P_T$  représente les pertes totales de l'enroulement (pertes résistives + pertes par courants de Foucault) à la charge assignée et à l'échauffement assigné, en watts (W);

- $\Delta\vartheta_{HS,r}$  est l'échauffement du point chaud de l'enroulement à la charge assignée, en kelvins (K);

- $\vartheta_e$  est la contribution du noyau à l'échauffement du point chaud de l'enroulement à vide. Il convient que cette valeur soit la valeur donnée ci-dessous ou la valeur mesurée par le fabricant au cours de l'essai d'échauffement sur le transformateur.

= 5 K pour l'enroulement extérieur (généralement HT)

= 25 K pour l'enroulement intérieur (généralement BT inférieure à 1 kV).

NOTE 1 Les valeurs de contribution du noyau magnétique ci-dessus sont basées sur l'expérience du constructeur

NOTE 2 Un autre matériau d'isolation de l'enroulement et type de matériau époxy peuvent être utilisés. Pour de tels transformateurs, les valeurs correspondantes de chaleur spécifique de 24,5 Wmin/K et /kg (ou 0,408 Wh/K et /kg) peuvent être remplacées par des valeurs basées sur l'expérience du constructeur.

### 5.10.3 Méthode d'essai de la constante de temps

Les constantes de temps peuvent également être estimées à partir de la courbe de refroidissement de résistance à chaud obtenue au cours des essais thermiques.

### 5.11 Détermination de la constante de temps de l'enroulement conformément à la constante empirique

Lorsque l'échauffement varie, la constante de temps varie conformément à la constante empirique  $m$ .

$$\tau_R = \frac{C(\Delta\vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (17)$$

Si  $m$  est égal à 1, l'Equation (17) est correcte pour toute charge et toute température de démarrage. Si  $m$  n'est pas égale à 1, la constante de temps pour toute charge et pour toute température de démarrage pour un cycle d'échauffement ou un cycle de refroidissement est donnée par l'Equation (18).

$$\tau = \tau_R \frac{\left( \frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right) - \left( \frac{\Delta\vartheta_l}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)}{\left( \frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}} - \left( \frac{\Delta\vartheta_l}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (18)$$

### 5.12 Calcul de la capacité de charge

Il convient d'utiliser les Equations (10) à (18) pour déterminer les températures de point chaud au cours d'un cycle de charge. Il convient aussi de les utiliser pour déterminer la charge de courte durée ou continue, qui entraîne les températures maximales données dans le Tableau 1 ou toutes les autres températures limites.

Il convient que l'échauffement initial du point chaud pour le facteur de charge initial  $I_i$  soit obtenu à partir de l'Equation (11) et il est déterminé de la façon suivante:

$$\Delta\vartheta_l = \Delta\vartheta_{HS,r} [I_i]^{2m} \quad (19)$$

où

$I_i$  est le facteur de charge initial (rapport entre le courant de charge et le courant assigné).

A partir du Tableau 2, choisir la température limite de point chaud  $\vartheta_{HS}$ . Pour la température ambiante, déterminer l'échauffement du point chaud admissible au temps  $t$  à partir de l'Equation (10).

**Tableau 2 – Température maximale du point chaud de l'enroulement**

| Température du système d'isolation<br>(CEI 60076-11) | Température maximale de point chaud<br>de l'enroulement |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| °C                                                   | °C                                                      |
| 105 (A)                                              | 130                                                     |
| 120 (E)                                              | 145                                                     |
| 130 (B)                                              | 155                                                     |
| 155 (F)                                              | 180                                                     |
| 180 (H)                                              | 205                                                     |
| 200                                                  | 225                                                     |
| 220                                                  | 245                                                     |

Le calcul de la durée de vie n'est pas pratique pour une température de point chaud supérieure à la température maximale de point chaud de l'enroulement indiquée dans le Tableau 2, parce que la composition des matériaux de l'enroulement peut varier. La charge du transformateur qui entraîne des températures dépassant les limites du Tableau 2 risque de donner lieu à des défaillances du transformateur dans une période de temps courte et imprévisible.

$$\vartheta_{HS} = \Delta\vartheta_{HS} + \vartheta_a \quad (20)$$

où

$\vartheta_{HS}$  est la température de point chaud en degrés Celsius (°C);

$\Delta\vartheta_{HS}$  est l'échauffement du point chaud en kelvins (K);

$\vartheta_a$  est la température ambiante en degrés Celsius (°C).

$$\Delta\vartheta_t = \vartheta_{HS} - \vartheta_a \quad (21)$$

où

$\Delta\vartheta_t$  est l'échauffement du point chaud, en kelvins (K) et au temps  $t$ , après la variation de la charge.

Déterminer l'échauffement ultime du point chaud à partir de l'Equation (14).

$$\Delta\vartheta_U = \left[ \frac{\Delta\vartheta_t - \Delta\vartheta}{1 - \exp(-t/\tau)} \right] + \Delta\vartheta \quad (22)$$

où

$\Delta\vartheta_U$  est l'échauffement ultime du point chaud en kelvins (K).

Il convient d'obtenir la constante de temps  $\tau$  à partir de 5.9. Choisir un temps  $t$  pour la durée du cycle de charge pour remplacer dans l'équation ci-dessus. A partir de l'Equation (11), la surcharge correspondant à ces conditions peut être obtenue comme suit:

$$I_U = \left[ \frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (23)$$

où

$I_U$  est le facteur de charge ultime.

Il convient d'effectuer la détermination de la constante de temps par un processus d'itération.

## 6 Limites

### 6.1 Limites de courant et de température

Avec des valeurs de charge au-delà des valeurs de la plaque signalétique, la température de point chaud de l'enroulement présentée au Tableau 3 ne doit pas être dépassée et les limites spécifiques données en 4.3 et 5.12 doivent être prises en compte.

L'amplitude du courant est limitée à  $1,5 I_r$ , en particulier lorsque le cycle est court et répété, afin d'éviter des dommages mécaniques dans l'enroulement. Des valeurs supérieures à  $1,5 I_r$  doivent être spécifiées au stade de l'enquête et doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant. Pour tous les autres types de cycles, le courant est limité à  $1,5 I_r$ .

**Tableau 3 – Limites de courant et de température applicables aux charges au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique**

| Température du système d'isolation (°C)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 105<br>(A) | 120<br>(E) | 130<br>(B) | 155<br>(F) | 180<br>(H) | 200 | 220 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|-----|
| Courant maximal (p.u.)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5 | 1,5 |
| Température la plus élevée de point chaud (°C)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 130        | 145        | 155        | 180        | 205        | 225 | 245 |
| <p>NOTE 1 Les limites de température et de courant ne sont pas destinées à être valables simultanément. Le courant peut être limité à une valeur inférieure à celle indiquée, afin de satisfaire à l'exigence de limite de température. Inversement, la température peut être limitée à une valeur inférieure à celle indiquée, afin de satisfaire à l'exigence de limite de courant.</p> <p>NOTE 2 Le calcul montre qu'à la température de point chaud la plus élevée présentée dans le tableau, la durée de vie, d'un nouveau transformateur n'est que de quelques milliers d'heures.</p> |            |            |            |            |            |     |     |

### 6.2 Autres limites

#### 6.2.1 Champ magnétique de fuite dans les parties métalliques de construction

Le champ de fuite magnétique augmente avec l'augmentation du courant. Ce champ peut provoquer des températures excessives dans les parties métalliques structurales, pouvant restreindre la surcharge. Il convient de ne pas dépasser les limites indiquées dans le Tableau 2 concernant le courant de charge, la température de point chaud et la température des parties métalliques structurales autres que les enroulements et les connexions. Il convient de noter que, lorsque la température de point chaud dépasse la température la plus élevée du Tableau 2, conformément aux classes d'isolation du transformateur, les caractéristiques du système d'isolation diminuent à un niveau inférieur à la valeur minimale pour la tenue diélectrique du transformateur.

#### 6.2.2 Accessoires et autres considérations

En dehors des enroulements, d'autres parties du transformateur, telles que les traversées, les connexions d'extrémité de câble, les accessoires de changement de prises, les changeurs de prises, les dispositifs de mesure de la température, les parafoudres et les connexions peuvent limiter le fonctionnement à 1,5 fois le courant assigné.

### **6.2.3 Transformateurs sous enveloppe**

La consommation de la durée de vie due à la surcharge est supérieure lorsque le transformateur se trouve dans une enveloppe.

Lorsque des transformateurs sont utilisés à l'intérieur, il convient de corriger l'échauffement assigné du point chaud, pour tenir compte de l'enveloppe.

### **6.2.4 Conditions ambiantes extérieures**

Dans de nombreuses régions du monde, l'ensoleillement direct peut augmenter la température du transformateur de façon considérable, ce qu'il convient de prendre en compte lorsqu'une charge au-delà du courant assigné est considérée.

Le vent peut améliorer le refroidissement du transformateur mais, de par sa nature imprévisible, il n'est pas pratique de prendre en compte ce facteur.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60076-12:2008

## Annexe A (informative)

### Vitesse de vieillissement

#### A.1 Capacité de charge

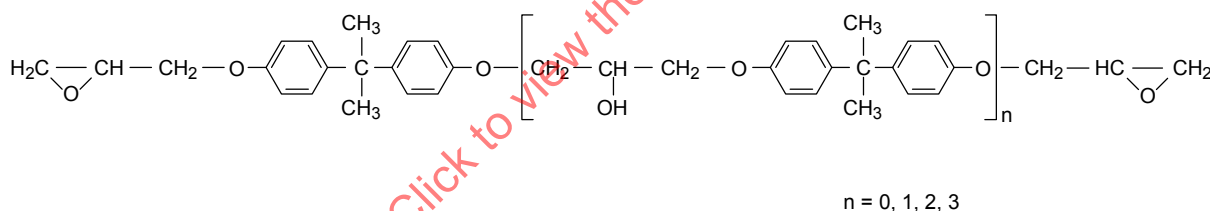
La capacité de charge des transformateurs est liée aux propriétés des matériaux isolants et des systèmes d'isolation. Tandis que les matériaux isolants solides dominants des transformateurs immergés dans l'huile sont les produits à base de cellulose, une variété plus grande de matériaux isolants différents est utilisée dans les transformateurs de type sec.

#### A.2 Structure moléculaire

##### A.2.1 Généralités

Une caractéristique commune des matériaux isolants solides est la structure moléculaire, qui se compose de longues chaînes de molécules plus petites reliées entre elles. Les chaînes peuvent contenir des branches, des anneaux hexagonaux et des liaisons réticulées entre chaînes.

La Figure A.1 montre un exemple d'une structure moléculaire de ce type d'une résine époxy.



IEC 2001/08

**Figure A.1 – Structure moléculaire d'une résine époxy**

Les molécules se déplacent. Dans un matériau solide, ces mouvements ressemblent à des oscillations. Lorsque la chaleur due aux pertes dans le conducteur de l'enroulement (ou d'autres sources de chaleur) est transférée au matériau isolant, l'énergie thermique est convertie en énergie cinétique dans le matériau. En raison de l'augmentation de l'énergie cinétique, les mouvements des molécules deviennent plus rapides et avec de plus grandes amplitudes, en d'autres termes, plus violents. La probabilité selon laquelle les molécules se dissocient en molécules plus petites lorsqu'elles entrent en collision augmente. Ce type de procédé chimique dans lequel la chaleur est fournie au matériau est appelé processus endothermique.

##### A.2.2 Oxydation

D'autres mécanismes peuvent se produire, tels que l'oxydation.

La vitesse de cette réaction chimique dépend de la température, qui dépend elle-même de la quantité de chaleur transférée au matériau isolant.

Les matériaux isolants sont élaborés afin d'obtenir des propriétés optimales pour leur application. La modification de la structure moléculaire du matériau au cours du processus endothermique provoque également des modifications des propriétés importantes du

matériau, telles que la résistance mécanique et la tenue diélectrique, la résistance aux chocs thermiques et la performance d'étanchéité. Une diminution de ces propriétés se produit généralement. La diminution des différentes propriétés peut ne pas se produire à la même vitesse. Le terme vieillissement est communément utilisé pour ce procédé chimique et la diminution consécutive pour les diverses propriétés des matériaux.

### A.2.3 Propriétés d'endurance thermiques

#### A.2.3.1 Généralités

L'indice thermique (TI) et l'intervalle de division par deux (HIC, *halving interval*) sont deux termes utilisés pour caractériser les propriétés d'endurance thermique d'un matériau isolant ou d'un système d'isolation. L'indice thermique est la valeur numérique de la température en degrés Celsius, déduite de la relation d'endurance thermique à un certain temps. Dans les normes CEI applicables, cette durée est de 20 000 h, mais d'autres durées peuvent aussi être spécifiées en principe. L'intervalle de division par deux est la valeur numérique de l'intervalle de température en Kelvins (K), qui exprime la réduction de moitié de la durée choisie par rapport au point limite pris à une température égale à l'indice thermique. Voir Figure A.2.

L'indice thermique et l'intervalle de division par deux sont trouvés expérimentalement au cours des essais accélérés à des températures élevées, et la méthode est fondée sur la validité de l'équation d'Arrhenius.

#### A.2.3.2 Loi d'Arrhenius

Svante Arrhenius, chimiste et physicien (lauréat du prix Nobel de chimie en 1903), est à l'origine de la corrélation générale suivante entre la température et la vitesse de réaction chimique:

$$k = A \times e^{-\left(\frac{E_a}{R \times T}\right)} \quad (\text{A.1})$$

où

$k$  est le coefficient de la vitesse de réaction;

$A$  est une constante;

$E_a$  est l'énergie d'activation liée au matériau spécifique;

$R$  est la constante de gaz universelle;

$T$  est la température en kelvins (K); et

$e$  est le nombre de base du système logarithmique naturel (2,718 28...).

L'Equation (A.1) est connue sous le nom d'équation d'Arrhenius ou de loi d'Arrhenius.

$R$  a la valeur de  $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ . L'énergie d'activation  $E_a$  est la quantité d'énergie nécessaire pour qu'une réaction se produise dans le matériau spécifique considéré, et on suppose que  $E_a$  ne varie pas avec la température.  $E_a$  s'exprime en  $\text{kJ mol}^{-1}$ .

$A$  et  $k$  s'expriment essentiellement en secondes<sup>-1</sup> ( $\text{s}^{-1}$ ), mais d'autres unités de temps peuvent également être utilisées lorsqu'elles sont adaptées, par exemple l'heure.  $k$  indique la rapidité avec laquelle la réaction chimique se déroule dans le matériau ou dans la combinaison de matériaux.

L'inverse de (A.1) devient

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A} \times e^{\frac{E_a}{R \times T}} \quad (\text{A.2})$$

L'unité de  $1/k$  est la seconde (s), et elle indique le temps écoulé pour que la réaction chimique arrive à un certain stade.

On peut également écrire l'Equation (A.2) de la façon suivante:

$$h = a \times e^{\frac{b}{T}} \quad (\text{A.3})$$

où

$$h = 1/k;$$

$$a = 1/A; \text{ et}$$

$$b = E_a / R.$$

Le logarithme naturel est pris de chaque côté du signe égal:

$$\ln h = \ln a + b \times \frac{1}{T} \quad (\text{A.4})$$

### A.2.3.3 Graphique d'endurance thermique

Lorsque les valeurs correspondantes de  $\ln h$  et  $1/T$  sont tracées sur un diagramme cartésien, les points seront situés sur une ligne droite. Un graphique de ce type est appelé graphique d'endurance thermique. Un exemple est donné sur la Figure A.2.

Les expériences sont effectuées à des températures supérieures à la température prévue de l'indice de température (TI). Dans l'exemple de la Figure A.2, les expériences sont réalisées à quatre températures différentes, 170 °C, 160 °C, 150 °C et 140 °C.

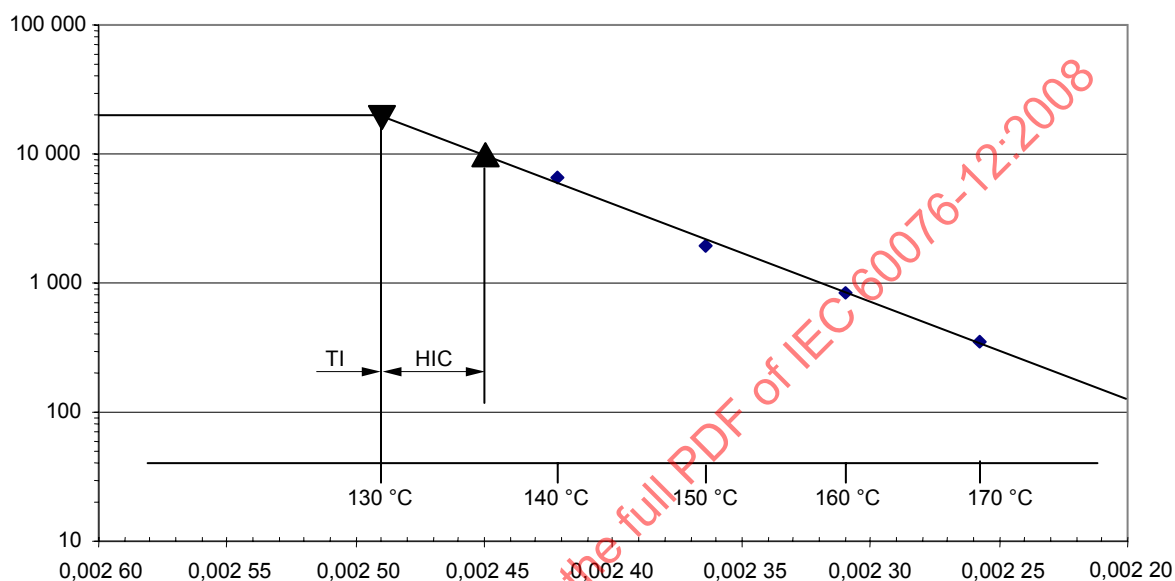
Dans les expériences, un point limite de la propriété du matériau étudiée (par exemple la tension alternative de claquage) doit être défini. Le point limite peut être défini comme une valeur absolue minimale (par exemple en kV/mm) ou une valeur restante procentuelle de la propriété avant le début de l'expérience. Des points limites de ce type sont suggérés dans les normes CEI pour certains matériaux et certaines propriétés, mais pas pour tous. La CEI 60216-2 comporte certaines suggestions pour un certain nombre de propriétés de matériaux. Dans d'autres cas, la définition des points limites peut être soumise à un accord entre le fournisseur et l'acheteur du matériau.

Un point limite défini comme par exemple à 50 % de la valeur restante peut être perçu comme « fin de vie » pour l'isolation. Toutefois, il convient de ne pas prendre ceci au sens trop littéral du terme. La définition des points limites dans la CEI est principalement conventionnelle et n'est pas fonctionnelle. La détérioration du matériau se produit progressivement. Le point limite ne représente pas de limite distincte entre la « vie » et la « mort » du transformateur. Le fait d'atteindre le point limite signifie uniquement que la propriété particulière du matériau a été réduite à un certain pourcentage de sa valeur d'origine, et que les marges de sécurité et par conséquent la fiabilité de fonctionnement du transformateur ont été réduites par rapport à un nouveau transformateur. En ce qui concerne par exemple les propriétés diélectriques, le transformateur peut continuer à bien fonctionner pendant de nombreuses années si aucune surtension importante ne se produit.

De même, si aucune surintensité élevée ne se produit à cause de courts-circuits dans le système d'alimentation, le transformateur peut bien fonctionner en dépit d'une dégradation de ses propriétés mécaniques.

Sur la Figure A.2, les quatre points indiquent la durée en heures nécessaire pour atteindre le point limite défini aux quatre températures différentes de 170 °C, 160 °C, 150 °C et 140 °C, conformément à l'essai d'endurance thermique. Une droite de régression est tracée entre les quatre points et prolongée pour couper l'axe des ordonnées au niveau de la valeur égale à 20 000 h. L'intersection se produit à une température de 130 °C.

Par conséquent, l'indice thermique du matériau pour cette propriété particulière est de 130. De plus, la droite de régression montre que l'augmentation de température estimée qui entraînerait le matériau au point limite après 10 000 h est d'environ 5 °C. L'intervalle de division par deux HIC est alors de 5.



IEC 2002/08

### Légende

axe Y: temps (échelle logarithmique) en heures (h)

axe X: température thermodynamique réciproque (échelle linéaire) en kelvins (K⁻¹)

axe de températures supplémentaire: température en degrés Celsius (°C) (échelle non linéaire)

▼ température estimée à 20 000 h

▲ température estimée à 10 000 h

TI indice thermique

HIC intervalle de division par deux

**Figure A.2 – Graphique d'endurance thermique**

Dans la mesure où différentes propriétés de matériaux peuvent diminuer à différentes vitesses, il peut être nécessaire d'attribuer plusieurs indices de températures et plusieurs intervalles de division par deux à un seul et même matériau.

Des descriptions détaillées concernant les procédures expérimentales sont données dans les CEI 60216-1 à 60216-6. La Figure A.2 montre une image simplifiée et idéalisée qui démontre simplement le principe. En réalité, il y aura une dispersion des résultats à partir des échantillons de matériaux, en partie à cause des variations réelles dans le matériau, et en partie à cause de l'incertitude de mesure.

Des instructions détaillées pour le calcul des caractéristiques d'endurance thermique à partir de grands ensembles de données expérimentales sont données dans la CEI 60216-3, y