

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61660-2

Première édition
First edition
1997-06

**Courants de court-circuit dans les installations
auxiliaires alimentées en courant continu
dans les centrales et les postes –**

**Partie 2:
Calcul des effets**

**Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations
in power plants and substations –**

**Part 2:
Calculation of effects**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61660-2 : 1997

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

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

- la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*;
- la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 60878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 60027, de la CEI 60417, de la CEI 60617 et/ou de la CEI 60878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

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

Graphical and letter symbols

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

- IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 60878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 60027, IEC 60417, IEC 60617 and/or IEC 60878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61660-2

Première édition
First edition
1997-06

**Courants de court-circuit dans les installations
auxiliaires alimentées en courant continu
dans les centrales et les postes –**

**Partie 2:
Calcul des effets**

**Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations
in power plants and substations –**

**Part 2:
Calculation of effects**

© IEC 1997 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

W

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Généralités.....	6
1.1 Domaine d'application.....	6
1.2 Références normatives	8
1.3 Symboles et unités	8
1.4 Définitions	14
2 Effet électromagnétique sur les conducteurs rigides.....	16
2.1 Généralités.....	16
2.2 Calcul des forces électromagnétiques.....	18
2.3 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides et les forces sur les supports	20
2.4 Charge de conception pour les isolateurs, leurs supports et connecteurs.....	32
3 Effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique	32
3.1 Généralités.....	32
3.2 Calcul de l'échauffement.....	34
Tableaux	38
Figures	46
Annexes	
A Equations pour la détermination des diagrammes	66
B Bibliographie	74

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 General	7
1.1 Scope	7
1.2 Normative references	9
1.3 Symbols and units	9
1.4 Definitions	15
2 Electromagnetic effect on rigid conductors	17
2.1 General	17
2.2 Calculation of electromagnetic forces	19
2.3 Calculation of stresses in rigid conductors and forces on supports	21
2.4 Design load for post insulators, their supports and connectors	33
3 Thermal effect on bare conductors and electrical equipment	33
3.1 General	33
3.2 Calculation of temperature rise	35
Tables	39
Figures	47
Annexes	
A Equations for calculations of diagrams	67
B Bibliography	74

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS AUXILIAIRES ALIMENTÉES EN COURANT CONTINU DANS LES CENTRALES ET LES POSTES –

Partie 2: Calcul des effets

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 61660-2 a été établie par le comité 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
73/85/FDIS	73/98/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.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

La CEI 61660 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: Courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes:

- Partie 1: 1997, Calcul des courants de court-circuit
- Partie 2: 1997, Calcul des effets
- Partie 3: 199X, Exemples de calcul (en préparation).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN DC AUXILIARY INSTALLATIONS
IN POWER PLANTS AND SUBSTATIONS –****Part 2: Calculation of effects**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61660-2 has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

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

FDIS	Report on voting
73/85/FDIS	73/98/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.

Annexes A and B are for information only.

IEC 61660 consists of the following parts, under the general title: Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations:

- Part 1: 1997: Calculation of short-circuit currents
- Part 2: 1997: Calculation of effects
- Part 3: 199X: Examples of calculations (in preparation)

COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS AUXILIAIRES ALIMENTÉES EN COURANT CONTINU DANS LES CENTRALES ET LES POSTES –

Partie 2: Calcul des effets

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61660 décrit une méthode de calcul des effets mécaniques et thermiques sur les conducteurs rigides dus aux courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes. De tels réseaux peuvent contenir les types suivants de matériel qui agissent aussi bien comme sources que comme contribution aux courants de court-circuit:

- redresseurs triphasés en courant alternatif, raccordement en pont pour 50 Hz;
- batteries fixes au plomb;
- condensateurs de lissage;
- moteurs à excitation indépendante à courant continu.

La présente norme donne une méthode généralement applicable et fournit des résultats d'une précision suffisante. La méthode de calcul est basée sur des fonctions de substitution produisant par approximation les mêmes contraintes maximales dans les conducteurs et les mêmes forces sur les supports que la force électromagnétique réelle.

Les procédures normalisées de calcul des articles 2 et 3 s'appliquent respectivement aux effets électromagnétiques sur les conducteurs rigides et aux effets thermiques sur les conducteurs nus et le matériel électrique.

Pour les câbles et les conducteurs isolés, il convient cependant de se référer par exemple à la CEI 60949 et à la CEI 60986.

Seules les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes sont traitées dans la présente norme.

En particulier, il convient de noter les points suivants:

- Il convient de se baser sur la CEI 61660-1 pour les calculs des courants de court-circuit.
- La durée de court-circuit utilisée dans la présente norme dépend du concept de la protection et il convient de la considérer dans ce sens.
- Ces procédures normalisées sont adaptées aux besoins pratiques et contiennent des simplifications avec des marges de sécurité. Des essais et/ou des méthodes de calcul plus détaillées peuvent être utilisées.
- Dans l'article 2 de la présente norme, seules les contraintes provoquées par les courants de court-circuit sont calculées. De plus, d'autres contraintes peuvent exister, par exemple celles causées par les poids morts, les forces de fonctionnement, les séismes. Il convient que la combinaison de ces charges avec celles provenant d'un court-circuit fasse partie d'un accord et/ou soit indiquée par des normes, par exemple des règles d'installation.

SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN DC AUXILIARY INSTALLATIONS IN POWER PLANTS AND SUBSTATIONS –

Part 2: Calculation of effects

1 General

1.1 Scope

This part of IEC 61660 describes a method for calculation of the mechanical and thermal effects on rigid conductors caused by short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations. Such systems may contain the following items of equipment which act as sources, as well as contributing to the short-circuit currents:

- rectifiers in three-phase a.c. bridge connection for 50 Hz;
- stationary lead-acid batteries;
- smoothing capacitors;
- d.c. motors with independent excitation.

This standard provides a method which has wide application, and which gives results of sufficient accuracy. The calculation method is based on substitute functions, which cause approximately the same maximum stresses in the conductors and the same forces on the supports as the actual electromagnetic force.

The standardized calculation procedures of clauses 2 and 3 are applicable for the electromagnetic effect on rigid conductors and the thermal effect on bare conductors and electrical equipment, respectively.

For cables and insulated conductors, however, reference is made to IEC 60949 and IEC 60986, for example.

Only d.c. auxiliary installations in power plants and substations are dealt with in this standard.

In particular, the following points should be noted:

- The calculation of short-circuit currents should be based on IEC 61660-1.
- Short-circuit duration used in this standard depends on the protection concept, and should be considered in that sense.
- These standardized procedures are adjusted to practical requirements, and contain simplifications with safety margins. Testing or more detailed methods of calculation or both may be used.
- In clause 2 of this standard, only the stresses caused by short-circuit currents are calculated. Furthermore, other stresses can exist, such as those caused by dead-load, operating forces, or earthquakes. The combination of these loads with the short-circuit loading should be part of an agreement and/or given by standards, for example erection codes.

1.2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 61660. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondées sur la présente partie de la CEI 61660 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60865-1: 1993, *Courants de court-circuit – Calcul des effets – Partie 1: Définitions et méthodes de calcul*

CEI 60865-2: 1994, *Courants de court-circuit – Calcul des effets – Partie 2: Exemples de calcul*

CEI 60949: 1988, *Calcul des courants de court-circuit admissibles au plan thermique, tenant compte des effets d'un échauffement non adiabatique*

CEI 60986: 1989, *Guide aux limites de température de court-circuit des câbles électriques de tension assignée de 1,8/3 (3,6) kV à 18/30 (36) kV*

CEI 61660-1: 1997, *Courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes – Partie 1: Calcul des courants de court-circuit*

1.3 Symboles et unités

Toutes les équations utilisées dans la présente norme sont des équations de quantité qui comportent des symboles représentant des quantités physiques avec à la fois des valeurs numériques et des dimensions.

Les symboles utilisés dans la présente norme et les unités SI sont donnés dans les listes ci-après.

1.3.1 Symboles relatifs à l'article 2: effets électromagnétiques

A_i	Impulsion pour déterminer les paramètres de la fonction rectangulaire de substitution	A^2s
A_s	Section d'un sous-conducteur	m^2
a	Entraxe des conducteurs	m
a_m	Distance équivalente entre conducteurs principaux adjacents	m
a_s	Distance équivalente entre sous-conducteurs	m
a_{1n}	Entraxe entre le sous-conducteur 1 et le sous-conducteur n	m
a_{1s}	Entraxe entre sous-conducteurs	m
b	Dimension d'un sous-conducteur perpendiculaire à la direction de la force	m
b_m	Dimension d'un conducteur principal perpendiculaire à la direction de la force	m
c	Facteur relatif à l'influence des pièces de liaison	1
D	Diamètre extérieur d'un conducteur tubulaire	m
d	Dimension d'un sous-conducteur dans la direction de la force	m

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text constitute provisions of this part of IEC 61660. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 61660 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60865-1: 1993, *Short-circuit currents — Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods*

IEC 60865-2: 1994, *Short-circuit currents — Calculation of effects – Part 2: Examples of calculation*

IEC 60949: 1988, *Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects*

IEC 60986: 1989, *Guide to the short-circuit temperature limits of electric cables with a rated voltage from 1,8/3 (3,6) kV to 18/30 (36) kV*

IEC 61660-1: 1997, *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 1: Calculation of short-circuit currents*

1.3 Symbols and units

All equations used in this standard are quantity equations in which quantity symbols represent physical quantities possessing both numerical values and dimensions.

The symbols used in this standard and their exemplary SI units are given in the following lists.

1.3.1 Symbols for clause 2: electromagnetic effects

A_i	Impulse for determining the parameters of the substitute rectangular function	A^2s
A_s	Cross-section of one subconductor	m^2
a	Centre line distance between conductors	m
a_m	Effective distance between neighbouring main conductors	m
a_s	Effective distance between subconductors	m
a_{1n}	Centre line distance between subconductor 1 and subconductor n	m
a_{1s}	Centre line distance between subconductors	m
b	Dimension of a subconductor perpendicular to the direction of the force	m
b_m	Dimension of a main conductor perpendicular to the direction of the force	m
c	Factor for the influence of connecting pieces	1
D	Outer diameter of tubular conductor	m
d	Dimension of a subconductor in the direction of the force	m

d_m	Dimension d'un conducteur principal dans la direction de la force	m
E	Module de Young	N/m ²
F	Force exercée entre deux conducteurs parallèles de grande longueur pendant un court-circuit	N
F_R	Force entre conducteurs principaux due à la fonction rectangulaire de substitution	N
F_{Rs}	Force entre sous-conducteurs due à la force rectangulaire de substitution	N
F_d	Force sur le support (valeur de crête)	N
F_m	Force entre conducteurs principaux pendant un court-circuit (valeur de crête)	N
F_s	Force entre sous-conducteurs pendant un court-circuit	N
f_c	Fréquence naturelle correspondante d'un conducteur principal	Hz
f_{cs}	Fréquence naturelle correspondante d'un sous-conducteur	Hz
g_n	Valeur de l'accélération de la pesanteur	m/s ²
l_g	Valeur pour la détermination des paramètres de la fonction rectangulaire de substitution	A ² s ³
I_R	Courant de la fonction rectangulaire de substitution pour le calcul de la force entre conducteurs principaux	A
I_{Rs}	Courant de la fonction rectangulaire de substitution pour le calcul de la force entre sous-conducteurs	A
I_k	Courant de court-circuit quasi permanent	A
i_p	Courant de court-circuit de crête	A
i_1, i_2	Valeurs instantanées des courants dans les conducteurs dans les sections de la fonction d'approximation normale	A
i_{L1}, i_{L2}	Valeurs instantanées des courants dans les conducteurs L1 et L2	A
J	Moment quadratique de la section d'un conducteur principal	m ⁴
J_s	Moment quadratique de la section d'un sous-conducteur	m ⁴
k	Nombre de jeux d'entretoises ou de raidisseurs	1
k_{1n}	Facteur relatif à la distance équivalente entre un sous-conducteur 1 et un sous-conducteur n	1
k_{1s}	Facteur relatif à la distance équivalente d'un conducteur	1
l	Entraxe entre supports	m
l_s	Entraxe entre pièces de liaison	m
m'	Masse par unité de longueur du conducteur principal	kg/m
m'_s	Masse par unité de longueur du sous-conducteur	kg/m
m_z	Masse totale d'un jeu de pièces de liaison	kg
$m_{g1}, m_{g2}, m_{lg1}, m_{lg2}, m_{\theta1}, m_{\theta2}$	Facteurs pour la détermination des paramètres de la fonction rectangulaire de substitution	1
n	Nombre de sous-conducteurs d'un conducteur principal	1
p	Rapport I_k/i_p	1
q	Facteur de plasticité	1
$R_{p0,2}$	Contrainte correspondant à la limite élastique	N/m ²
s	Épaisseur de la paroi d'un tube	m

d_m	Dimension of a main conductor in the direction of the force	m
E	Young's modulus	N/m ²
F	Force acting between two, parallel, long conductors during a short circuit	N
F_R	Force between main conductors caused by the substitute rectangular function	N
F_{Rs}	Force between subconductors caused by the substitute rectangular function	N
F_d	Force on support (peak value)	N
F_m	Force between main conductors during a short circuit (peak value)	N
F_s	Force between subconductors during a short circuit	N
f_c	Relevant natural frequency of a main conductor	Hz
f_{cs}	Relevant natural frequency of a subconductor	Hz
g_n	Value of acceleration of gravity	m/s ²
l_g	Value for determining of the parameters of the substitute rectangular function	A ² s ³
I_R	Current of the substitute rectangular function for the calculation of the force between main conductors	A
I_{Rs}	Current of the substitute rectangular function for the calculation of the force between subconductors	A
I_k	Quasi steady-state short-circuit current	A
i_p	Peak short-circuit current	A
i_1, i_2	Instantaneous values of current in conductors in the sections of the standard approximation function	A
i_{L1}, i_{L2}	Instantaneous values of currents in the conductors L1 and L2	A
J	Second moment of main conductor area	m ⁴
J_s	Second moment of subconductor area	m ⁴
k	Number of sets of spacers or stiffening elements	1
k_{1n}	Factor for effective conductor distance between subconductor 1 and subconductor n	1
k_{1s}	Factor for effective conductor distance	1
l	Centre line distance between supports	m
l_s	Centre line distance between connecting pieces	m
m'	Mass per unit length of main conductor	kg/m
m'_s	Mass per unit length of subconductor	kg/m
m_z	Total mass of one set of connecting pieces	kg
$m_{g1}, m_{g2}, m_{lg1}, m_{lg2}, m_{\theta1}, m_{\theta2}$	Factors for determining the parameters of the substitute rectangular function	1
n	Number of subconductors of a main conductor	1
p	Ratio I_k/i_p	1
q	Factor of plasticity	1
$R_{p0,2}$	Stress corresponding to the yield point	N/m ²
s	Wall thickness of tubes	m

T_k	Durée du court-circuit	s
T_{me}	Période d'oscillation du conducteur principal	s
T_{mes}	Période d'oscillation du sous-conducteur	s
t_p	Temps pour atteindre la crête	s
t_R	Temps de la fonction rectangulaire de substitution pour le calcul de la force entre conducteurs principaux	s
t_{RS}	Temps de la fonction rectangulaire de substitution pour le calcul de la force entre sous-conducteurs	s
V_F	Rapport entre les forces dynamique et statique sur les supports	1
V_σ	Rapport entre les contraintes dynamique et statique d'un conducteur principal	1
$V_{\sigma s}$	Rapport entre les contraintes dynamique et statique d'un sous-conducteur	1
Z	Module de section d'un conducteur principal	m ³
Z_s	Module de section d'un sous-conducteur	m ³
α	Facteur relatif à la force sur le support	1
β	Facteur relatif à la contrainte d'un conducteur principal	1
γ	Facteur relatif à l'évaluation de la fréquence propre appropriée	1
μ_0	Constante magnétique, perméabilité du vide	H/m
σ_m	Contraintes de flexion provoquée par les forces entre conducteurs principaux	N/m ²
σ_s	Contrainte de flexion provoquée par les forces entre sous-conducteurs	N/m ²
σ_{tot}	Contrainte résultante d'un conducteur	N/m ²
τ_1	Constante de temps de croissance	s
τ_2	Constante de temps de décroissance	s

1.3.2 Symboles pour l'article 3: effets thermiques

A	Section du conducteur principal	m ²
A_i	Impulsion pour la détermination des paramètres de la fonction rectangulaire de substitution	A ² s
I_{th}	Courant thermique équivalent de courte durée (valeur efficace)	A
I_{thr}	Courant de tenue de courte durée assigné (valeur efficace)	A
K	Facteur relatif au calcul de S_{thr}	As ^{0,5} /m ²
S_{th}	Densité du courant thermique équivalent de courte durée (valeur efficace)	A/m ²
S_{thr}	Densité du courant de tenue de courte durée assigné (valeur efficace)	A/m ²
T_k	Durée du courant de court-circuit	s
T_{kr}	Courte durée assignée	s
t_p	Temps pour atteindre la crête	s
θ_b	Température du conducteur au début du court-circuit	°C
θ_e	Température du conducteur à la fin du court-circuit	°C

T_k	Short-circuit duration	s
T_{me}	Vibration period of the main conductor	s
T_{mes}	Vibration period of the subconductor	s
t_p	Time to peak	s
t_R	Time of substitute rectangular function for the calculation of the force between main conductors	s
t_{Rs}	Time of the substitute rectangular function for the calculation of the force between subconductors	s
V_F	Ratio of dynamic and static force on supports	1
V_σ	Ratio of dynamic and static main conductor stress	1
$V_{\sigma s}$	Ratio of dynamic and static subconductor stress	1
Z	Section modulus of main conductor	m ³
Z_s	Section modulus of subconductor	m ³
α	Factor for force on support	1
β	Factor for main conductor stress	1
γ	Factor for relevant natural frequency estimation	1
μ_0	Magnetic constant, permeability of vacuum	H/m
σ_m	Bending stress caused by the forces between main conductors	N/m ²
σ_s	Bending stress caused by the forces between subconductors	N/m ²
σ_{tot}	Resulting conductor stress	N/m ²
τ_1	Rise-time constant	s
τ_2	Decay-time constant	s

1.3.2 Symbols for clause 3: Thermal effects

A	Main conductor cross-section	m ²
A_i	Impulse for determining of the parameters of the substitute rectangular function	A ² s
I_{th}	Thermal equivalent short-time current (r.m.s.)	A
I_{thr}	Rated short-time withstand current (r.m.s.)	A
K	Factor for calculating S_{thr}	As ^{0.5} /m ²
S_{th}	Thermal equivalent short-time current density (r.m.s.)	A/m ²
S_{thr}	Rated short-time withstand current density (r.m.s.)	A/m ²
T_k	Short-circuit duration	s
T_{kr}	Rated short-time	s
t_p	Time to peak	s
θ_b	Conductor temperature at the beginning of the short circuit	°C
θ_e	Conductor temperature at the end of the short circuit	°C

1.4 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61660, les définitions suivantes s'appliquent.

1.4.1 Définitions relatives à l'article 2: effets électromagnétiques

1.4.1.1 conducteur principal: Conducteur ou assemblage de plusieurs conducteurs parcouru par le courant total.

1.4.1.2 sous-conducteur: Conducteur unique parcouru par une partie du courant total et faisant partie du conducteur principal.

1.4.1.3 support encastré: Support d'un conducteur qui empêche tout déplacement angulaire de ce conducteur à l'emplacement de ce support.

1.4.1.4 support simple: Support d'un conducteur qui permet son déplacement angulaire à l'emplacement de ce support.

1.4.1.5 pièce de liaison: Toute masse additionnelle dans les limites d'une portée qui ne fait pas partie du conducteur proprement dit. Ceci inclut, entre autres, les entretoises, les raidisseurs, les recouvrements de barres, les dérivations, etc.

1.4.1.5.1 entretoise: Élément mécanique, placé entre les sous-conducteurs, qui, au point d'installation, maintient l'écartement entre les sous-conducteurs.

1.4.1.5.2 raidisseur: Entretoise spéciale destinée à réduire la contrainte mécanique.

1.4.1.6 durée de passage du courant de court-circuit, T_k : Intervalle de temps entre l'apparition du court-circuit et la coupure du courant.

1.4.1.7 fonction d'approximation normale: Courbes calculées selon la CEI 61660-1 décrivant la valeur instantanée du courant de court-circuit, y compris la valeur de la constante de temps de croissance τ_1 , la constante de temps de décroissance τ_2 , la durée de passage du courant de court-circuit T_k et le temps pour atteindre la crête t_p .

NOTE – Pour plus d'informations, voir CEI 61660-1.

1.4.1.8 carré de fonction d'approximation normale: Courbe représentant la valeur instantanée du carré de la fonction d'approximation normale. Elle représente la forme de la valeur instantanée de la force électromagnétique provoquée par les courants de court-circuit ainsi que l'enveloppe de l'intégrale de Joule.

NOTE – Pour plus d'informations voir [1]* dans lequel la figure 8 représente $i^2(t)$ multiplié par le facteur $\frac{\mu_0}{2\pi a}$ donnant $F'(t)$

1.4.1.9 fonction rectangulaire de substitution: Fonction avec une forme rectangulaire représentant un courant qui provoque les mêmes contraintes mécaniques et les mêmes forces que le carré de la fonction d'approximation normale.

NOTE – Pour plus d'informations, voir [1] dans lequel la figure 8 représente I_R^2 multiplié par le facteur $\frac{\mu_0}{2\pi a}$ donnant F'_R .

* Les chiffres entre crochets renvoient à l'annexe B, Bibliographie.

1.4 Definitions

For the purpose of this part of IEC 61660, the following definitions apply.

1.4.1 Definitions for clause 2: electromagnetic effects

1.4.1.1 main conductor: A conductor, or an arrangement composed of a number of conductors, which carries the total current.

1.4.1.2 subconductor: A single conductor which carries a certain part of the total current and is a part of the main conductor.

1.4.1.3 fixed support: A support of a conductor which does not permit the conductor to move angularly at the point of the support.

1.4.1.4 simple support: A support of a conductor which permits angular movement at the point of support.

1.4.1.5 connecting piece: Any additional mass within a span which does not belong to the uniform conductor material. This includes among others: spacers, stiffening elements, bar overlappings, branchings, etc.

1.4.1.5.1 spacer: A mechanical element between subconductors which, at the point of installation, maintains the clearance between subconductors.

1.4.1.5.2 stiffening element: A special spacer intended to reduce the mechanical stress.

1.4.1.6 short-circuit duration, T_k : The time interval between the initiation of the short circuit and the breaking of the current.

1.4.1.7 standard approximation function: A curve, calculated according to IEC 61660-1, describing the momentary value of the short-circuit current, including the value of rise-time constant τ_1 , decay-time constant τ_2 , duration of the short-circuit current flow T_k and the time to peak t_p .

NOTE — For further information, see IEC 61660-1.

1.4.1.8 squared standard approximation function: A curve representing the momentary value of the square of the standard approximation function. It represents the form of the momentary value of the electromagnetic force caused by the short-circuit current as well as the envelope for the Joule integral.

NOTE — For further information, see [1]*, in which figure 8 also represents $i^2(t)$ multiplied by the factor $\frac{\mu_0}{2\pi a}$ giving $F(t)$.

1.4.1.9 substitute rectangular function: A function with rectangular form representing a current that causes the same mechanical stresses and forces as the squared standard approximation function.

NOTE — For further information, see [1] in which figure 8 also represents I_R^2 multiplied by the factor $\frac{\mu_0}{2\pi a}$ giving F_R .

* Figures in square brackets refer to the bibliography given in annex B.

1.4.2 Définitions relatives à l'article 3: effets thermiques

1.4.2.1 **courant thermique équivalent de courte durée, I_{th}** : Courant, en valeur efficace, ayant le même effet thermique et la même durée que le courant de court-circuit réel.

1.4.2.2 **courant de tenue de courte durée assignée, I_{thr}** : Courant, en valeur efficace, que le matériel électrique peut supporter pendant une courte durée assignée, dans des conditions prescrites d'utilisation et de comportement.

NOTES

1 Il est possible d'indiquer plusieurs couples de valeurs du courant de tenue de courte durée assigné et de la courte durée assignée; pour l'effet thermique ; la valeur de 1 s est utilisée dans la plupart des spécifications de la CEI.

2 Le courant de tenue de courte durée assigné, ainsi que la courte durée assignée correspondante, sont indiqués par le constructeur du matériel.

1.4.2.3 **densité du courant thermique équivalent de courte durée, S_{th}** : Rapport entre le courant thermique équivalent de courte durée et la section du conducteur.

1.4.2.4 **densité du courant de tenue de courte durée assigné, S_{thr} pour les conducteurs**: Densité de courant, en valeur efficace, qu'un conducteur peut supporter pendant la courte durée assignée.

NOTE – La densité du courant de tenue de courte durée assigné est déterminée conformément à 3.2.

1.4.2.5 **durée de passage du courant de court-circuit, T_k** : Intervalle de temps entre l'apparition du premier court-circuit et la coupure du courant.

1.4.2.6 **courte durée assignée, T_{kr}** : Durée pendant laquelle:

- un matériel électrique peut transporter un courant égal à son courant de tenue de courte durée assigné;
- un conducteur peut supporter une densité de courant égale à sa densité du courant de tenue de courte durée assigné.

2 Effet électromagnétique sur les conducteurs rigides

2.1 Généralités

Les modèles de courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu sont variés. Une fonction d'approximation normale est définie dans la CEI 61660-1 par six paramètres: i_p , I_k , t_p , τ_1 , τ_2 , T_k (voir figure 4a). D'une variation de l'un des paramètres résultera une variation des contraintes. Pour des raisons pratiques l'emploi d'une fonction rectangulaire de substitution est introduite pour le carré du courant et en conséquence pour la force électromagnétique, qui conduit aux mêmes forces et contraintes mécaniques que le courant de court-circuit réel. La figure 4b montre la fonction représentant le carré de la fonction d'approximation normale du courant de court-circuit et sa fonction rectangulaire de substitution qui est définie par les deux paramètres: I_R^2 et t_R .

Avec la méthode de calcul présentée dans le présent article

- les contraintes dans les conducteurs rigides, et
- les forces sur les isolateurs et les infrastructures , qui peuvent exposer ces éléments à des flexions, à des tensions et/ou à des compressions,

peuvent être estimées.

1.4.2 Definitions for clause 3: thermal effects

1.4.2.1 thermal equivalent short-time current, I_{th} : The r.m.s. value of current having the same thermal effect and the same duration as the actual short-circuit current.

1.4.2.2 rated short-time withstand current, I_{thr} : The r.m.s. value of current that the electrical equipment can carry during a rated short time under prescribed conditions of use and behaviour.

NOTES

1 It is possible to state several pairs of values of rated short-time withstand current and rated short time; for thermal effect 1 s is used in most IEC specifications.

2 The rated short-time withstand current, as well as the corresponding rated short time, are stated by the manufacturer of the equipment.

1.4.2.3 thermal equivalent short-time current density, S_{th} : The ratio of the thermal equivalent short-time current and the cross-section area of the conductor.

1.4.2.4 rated short-time withstand current density, S_{thr} for conductors: The r.m.s. value of the current density which a conductor is able to withstand for the rated short time.

NOTE — The rated short-time withstand current density is determined according to 3.2.

1.4.2.5 short-circuit duration, T_k : The time interval between the initiation of the short circuit and the breaking of the current.

1.4.2.6 rated short time, T_{kr} : The time duration for which

- an electrical equipment can withstand a current equal to its rated short-time withstand current;
- a conductor can withstand a current density equal to its rated short-time withstand current density.

2 Electromagnetic effect on rigid conductors

2.1 General

The time patterns of short-circuit currents in d.c. auxiliary installations are manifold. A standard approximation function is defined in IEC 61660-1 by six parameters: i_p , I_k , t_p , τ_1 , τ_2 , T_k (see figure 4a). A variation of any parameter will result in a variation of stress. For practical use, a substitute rectangular function is introduced for the square of the current, and therefore for the electromagnetic force, which leads to the same mechanical stresses and forces as the real short-circuit current. Figure 4b shows the square of the standard approximation function of the short-circuit current and its substitute rectangular function which is defined by two parameters: I_R^2 and t_R .

With the calculation method presented in this clause

- stresses in rigid conductors, and
- forces on insulators and substructures, which result in bending, tension and/or compression,

can be estimated.

Les forces électromagnétiques sont induites dans les conducteurs par les courants qui les parcourent. Lorsque de telles forces électromagnétiques agissent sur des conducteurs parallèles, elles provoquent des contraintes qui doivent être prises en compte dans les postes. Pour cette raison:

- les forces entre conducteurs parallèles sont exposées dans les paragraphes ci-après,
- les composantes de la force électromagnétique qui s'établit dans les conducteurs avec des courbures et/ou des croisements peuvent être normalement négligées.

Lorsque les conducteurs parallèles L1 et L2 sont longs par rapport à la distance qui les sépare, les forces seront régulièrement réparties le long des conducteurs et sont données par l'équation:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{L1} i_{L2} \frac{l}{a} \quad (1)$$

où

- i_{L1} et i_{L2} sont les valeurs instantanées des courants dans les conducteurs L1 et L2 ;
- l est l'entraxe des supports;
- a est l'entraxe des conducteurs.

Lors du calcul de la valeur maximale possible du courant de court-circuit, des détails complémentaires d'autres normes de la CEI peuvent être pris en considération s'il en résulte une réduction des contraintes.

2.2 Calcul des forces électromagnétiques

2.2.1 Calcul de la valeur de crête des forces entre les conducteurs principaux

La force maximale est donnée par:

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

où

- i_p est la valeur de crête du courant de court-circuit;
- l est l'entraxe maximal des supports;
- a_m est la distance équivalente entre conducteurs principaux selon 2.2.3.

2.2.2 Calcul de la valeur de crête des forces entre sous-conducteurs coplanaires

La force maximale provoquée par les courants dans les sous-conducteurs s'exerce sur les sous-conducteurs extérieurs. Cette force maximale entre deux pièces de liaison voisines est donnée par:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (3)$$

où

- n est le nombre de sous-conducteurs;
- l_s est l'entraxe maximal entre deux pièces de liaison voisines;
- a_s est la distance équivalente entre sous-conducteurs selon 2.2.3.

Electromagnetic forces are induced in conductors by the currents flowing through them. Where such electromagnetic forces interact on parallel conductors, they cause stresses which have to be taken into account at the auxiliary installations. For this reason:

- the forces between parallel conductors are set forth in the following subclauses,
- the electromagnetic force components set up in conductors with bends and/or crossovers may normally be disregarded.

When parallel conductors L1 and L2 are long compared to the distance between them, the forces will be evenly distributed along the conductors and are given by the equation:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{L1} i_{L2} \frac{l}{a} \quad (1)$$

where

i_{L1} and i_{L2} are the instantaneous values of the currents in the conductors L1 and L2;

l is the centre line distance between the supports;

a is the centre line distance between the conductors.

When calculating the maximum possible short-circuit current, additional details from other IEC standards may be considered if these result in stress reduction.

2.2 Calculation of electromagnetic forces

2.2.1 Calculation of peak value of forces between the main conductors

The maximum force is given by:

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

where

i_p is the peak short-circuit current;

l is the maximum centre line distance between supports;

a_m is the effective distance between main conductors according to 2.2.3.

2.2.2 Calculation of peak value of forces between coplanar subconductors

The maximum force due to the currents in the subconductors acts on the outer subconductors. This maximum between two adjacent connecting pieces is given by:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (3)$$

where

n is the number of subconductors;

l_s is the maximum existing centre line distance between two adjacent connecting pieces;

a_s is the effective distance between subconductors according to 2.2.3.

2.2.3 Distances équivalentes entre conducteurs principaux et entre sous-conducteurs

Les forces entre les conducteurs parcourus par des courants de court-circuit dépendent de la configuration géométrique et du profil des conducteurs. Pour cette raison, la distance équivalente a_m entre conducteurs principaux a été introduite en 2.2.1 et la distance équivalente a_s entre sous-conducteurs a été introduite en 2.2.2. Elles doivent être prises comme suit:

Distance équivalente a_m entre conducteurs principaux coplanaires avec un entraxe a :

- conducteurs principaux constitués par des sections circulaires simples:

$$a_m = a \quad (4)$$

- conducteurs principaux constitués par des sections rectangulaires simples et conducteurs principaux composés de sous-conducteurs avec des sections rectangulaires:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (5)$$

k_{12} doit être pris de la figure 1 avec, avec $a_{1s} = a$, $b = b_m$ et $d = d_m$ selon la figure 2.

Distance équivalente a_s entre les n sous-conducteurs coplanaires du conducteur principal:

- sous-conducteurs avec des sections circulaires:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (6)$$

- sous-conducteurs avec des sections rectangulaires:

Quelques valeurs pour a_s sont données dans le tableau 1. Pour d'autres distances et dimensions de sous-conducteur l'équation

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (7)$$

peut être utilisée. Les valeurs pour $k_{12}, \dots, k_{1n}$ doivent être prises de la figure 1.

2.3 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides et les forces sur les supports

2.3.1 Généralités

Les conducteurs peuvent être supportés de différentes façons, soit par des supports encastrés, soit par des supports simples, ou par une combinaison de ces deux types. Selon le type de support et le nombre de supports, les contraintes dans les conducteurs et les forces sur les supports seront différentes pour le même courant de court-circuit. Les équations données tiennent également compte de l'élasticité des supports.

Les contraintes dans les conducteurs et les forces sur les supports dépendent également de la fréquence propre correspondante du système mécanique et de la durée du court-circuit.

2.3.2 Calcul des contraintes dans les conditions rigides

Un conducteur est présumé rigide lorsque les forces axiales sont négligées. Dans cette hypothèse, les forces exercées sont les forces de flexion et l'équation générale pour la contrainte de flexion provoquée par les forces entre les conducteurs principaux est donnée par:

$$\sigma_m = V_\sigma \beta \frac{F_m l}{8Z} \quad (8)$$

2.2.3 Effective distances between main conductors and between subconductors

The forces between conductors carrying short-circuit currents depend on the geometrical configuration and the profile of the conductors. For this reason the effective distance a_m between main conductors has been introduced in 2.2.1, and the effective distance a_s between subconductors in 2.2.2. They shall be taken as follows.

Effective distance a_m between coplanar main conductors with the centre line distance a :

- main conductors consisting of single circular cross-sections:

$$a_m = a \quad (4)$$

- main conductors consisting of single rectangular cross-sections and main conductors composed of subconductors with rectangular cross-sections:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (5)$$

k_{12} shall be taken from figure 1, with $a_{1s} = a$, $b = b_m$ and $d = d_m$ according to figure 2.

Effective distance a_s between the n coplanar subconductors of a main conductor:

- subconductors with circular cross-sections:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (6)$$

- subconductors with rectangular cross-sections:

Some values for a_s are given in table 1. For other distances and subconductor dimensions the equation

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (7)$$

can be used. The values for $k_{12}, \dots, k_{1n}$ shall be taken from figure 1.

2.3 Calculation of stresses in rigid conductors and forces on supports

2.3.1 General

The conductors may be supported in different ways, either by fixed or simple supports, or by a combination of both. Depending on the type of support and the number of supports, the stresses in the conductors, and the forces on the supports will be different for the same short-circuit current. The equations given also include the elasticity of the supports.

The stresses in the conductors and the forces on the supports also depend on the relevant natural frequency of the mechanical system and the short-circuit duration.

2.3.2 Calculation of stresses in rigid conductors

The assumption that the conductor is rigid means that the axial forces are disregarded. Under this assumption, the acting forces are bending forces, and the general equation for the bending stress caused by the forces between main conductors is given by:

$$\sigma_m = V_\sigma \beta \frac{F_m l}{8Z} \quad (8)$$

où

F_m selon l'équation (2) doit être utilisée.

Z est le module de section du conducteur principal et doit être calculé selon la direction des forces entre conducteurs principaux.

V_σ est le facteur qui tient compte du phénomène dynamique; la valeur maximum possible doit être prise dans le tableau 2.

β est un facteur dépendant du type et du nombre de supports et doit être pris dans le tableau 3.

La contrainte de flexion provoquée par les forces entre les sous-conducteurs est donnée par:

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \frac{F_s l_s}{16 Z_s} \quad (9)$$

où

F_s selon l'équation (3) doit être utilisée.

Z_s est le module de section de sous-conducteur et doit être calculé selon la direction des forces entre sous-conducteurs.

$V_{\sigma s}$ est le facteur qui tient compte du phénomène dynamique; la valeur maximum possible doit être prise dans le tableau 2.

NOTE – Pour les poutres du tableau 3 (sauf pour la poutre à une seule portée avec des supports simples) les charges finales réalistes sont calculées avec les facteurs donnés au tableau 3 et q au tableau 4.

Les portées non uniformes des poutres continues peuvent être traitées avec un degré suffisant de précision en supposant que la portée maximale est appliquée partout. Ceci signifie que:

- les supports d'extrémité ne sont pas soumis à une contrainte supérieure à celle des supports intérieurs;
- les longueurs de portée inférieures à 20 % de celles des portées adjacentes doivent être évitées. Si cela s'avère impossible, les conducteurs doivent être découplés à l'aide de joints flexibles à l'emplacement des supports; s'il y a un joint flexible dans une portée, il convient que la longueur de cette portée soit inférieure à 70 % de celles des portées adjacentes.

S'il n'est pas évident que la poutre soit supportée ou encastrée, le cas le plus défavorable doit être retenu.

Pour un examen plus approfondi, voir 2.3.6.

2.3.3 Module de section et facteur q des conducteurs principaux composés de sous-conducteurs

La contrainte de flexion, et par conséquent la tenue mécanique du conducteur, dépendent du module de section.

Si la contrainte se produit comme indiqué à la figure 2a, le module de section Z est indépendant du nombre de pièces de liaison et est égal à la somme des modules de section Z_s des sous-conducteurs (Z_s par rapport à l'axe $x - x$). Le facteur q a alors une valeur de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,19 pour les sections en U et en I.

where

F_m according to equation (2) shall be used.

Z is the section modulus of the main conductor, and shall be calculated with respect to the direction of forces between main conductors.

V_σ is the factor which takes into account the dynamic phenomena; the maximum possible value shall be taken from table 2.

β is a factor depending on the type and the number of supports and shall be taken from table 3.

The bending stress caused by the forces between subconductors is given by:

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \frac{F_s l_s}{16 Z_s} \quad (9)$$

where

F_s according to equation (3) shall be used.

Z_s is the section modulus of the subconductor, and shall be calculated with respect to the direction of forces between subconductors.

$V_{\sigma s}$ is the factor which takes into account the dynamic phenomena; the maximum possible value shall be taken from table 2.

NOTE – For the beams in table 3 (except the single span beam with simple supports), the realistic ultimate loads are calculated with the factors β given in table 3, and q given in table 4.

Non-uniform spans in continuous beams may be treated, with a sufficient degree of accuracy, by assuming the maximum span is applied throughout. This means that:

- the end supports are not subjected to greater stress than the inner ones;
- span lengths less than 20 % of the adjacent ones shall be avoided. If this does not prove to be possible, the conductors shall be decoupled using flexible joints at the supports. If there is a flexible joint within a span, the length of that span should be less than 70 % of the lengths of the adjacent spans.

If it is not clear that a beam is supported or fixed, the worst case shall be taken into account.

For further consideration, see 2.3.6.

2.3.3 Section modulus and factor q of main conductors composed of subconductors

The bending stress, and consequently the mechanical withstand of the conductor, depend on the section modulus.

If the stress occurs in accordance with figure 2a, the section modulus Z is independent of the number of connecting pieces and is equal to the sum of the section moduli Z_s of the subconductors (Z_s with respect to the axis $x - x$). The factor q has then the value 1,5 for rectangular cross-sections, and 1,19 for U and I sections.

Si la contrainte se produit comme indiqué par la figure 2b et s'il n'y a qu'un seul raidisseur ou pas de raidisseurs entre deux supports consécutifs, le module de section Z est égal à la somme des modules de section Z_s des sous-conducteurs (Z_s par rapport à l'axe $y - y$). Le facteur q a alors une valeur de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,83 pour les sections en U et en I.

Lorsque entre deux supports consécutifs, il y a deux raidisseurs ou plus, il est possible d'utiliser des valeurs de modules de section plus élevées:

- dans le cas de conducteurs principaux composés de sous-conducteurs de section rectangulaire, avec un espace entre barres correspondant à l'épaisseur de celles-ci, les modules de section sont indiqués dans le tableau 5 ;
- dans le cas des groupes de conducteurs avec des sections en U et en I, il convient d'utiliser des modules de section égaux à 50 % des modules de section par rapport à l'axe 0 – 0 semblables à ceux de la figure 2b.

Le facteur q a alors une valeur de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,83 pour les sections en U et en I.

2.3.4 Contrainte admissible dans un conducteur

Un conducteur unique est supposé capable de supporter les forces de court-circuit lorsque:

$$\sigma_m \leq q R_{p\ 0,2} \quad (10)$$

où $R_{p\ 0,2}$ est la contrainte correspondant à la limite élastique.

Le facteur q doit être pris dans le tableau 4 (voir également 2.3.3).

Dans le cas d'un conducteur principal constitué de deux sous-conducteurs ou plus, la contrainte totale dans le conducteur est donnée par:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s \quad (11)$$

NOTE – Pour les sections rectangulaires, σ_{tot} est la somme algébrique de σ_m et de σ_s indépendamment des directions de charge (voir figure 2).

Le conducteur est supposé supporter les forces de court-circuit lorsque:

$$\sigma_{tot} \leq q R_{p\ 0,2} \quad (12)$$

Il est nécessaire de vérifier que le court-circuit n'affecte pas trop la distance entre sous-conducteurs; pour cette raison une valeur

$$\sigma_s \leq R_{p\ 0,2} \quad (13)$$

est recommandée.

Le tableau 4 indique les valeurs admissibles les plus élevées de q pour différentes sections. Pour $\sigma_m = q R_{p\ 0,2}$ et $\sigma_{tot} = q R_{p\ 0,2}$, de petites déformations permanentes peuvent se produire, de l'ordre de 1 % de la distance entre supports pour les valeurs de q indiquées par le tableau 4; elles ne mettent pas la sécurité en cause pourvu que dans ce cas les distances minimales entre les conducteurs principaux ou entre un conducteur principal et la structure reliée à la terre ne soient pas, de ce fait, transgressées.

NOTE – Les normes indiquent souvent pour la limite élastique des matériaux conducteurs, $R_{p\ 0,2}$, des plages entre des valeurs minimales et maximales. Si seules de telles valeurs limites sont disponibles au lieu des valeurs réelles, il convient d'utiliser la valeur minimale en 2.3.4 et la valeur maximale dans le tableau 2.

If the stress occurs in accordance with figure 2b, and in case there is only one or no stiffening element within a supported distance, the section modulus Z is equal to the sum of the section moduli Z_s of the subconductors (Z_s with respect to the axis $y - y$). The factor q has then the value 1,5 for rectangular cross-sections, and 1,83 for U and I sections.

When, within a supported distance, there are two or more stiffening elements, higher values of section moduli may be used:

- for main conductors composed of subconductors of rectangular cross-sections with a space between the bars equal to the bar thickness, the section moduli are given in table 5;
- for conductor groups having U and I cross-sections, 50 % of the section moduli with respect to the axis $0 - 0$, similar to figure 2b, should be used.

The factor q then has a value of 1,5 for rectangular cross-sections, and 1,83 for U and I sections.

2.3.4 Permitted conductor stress

A single conductor is assumed to withstand the short-circuit forces when:

$$\sigma_m \leq q R_{p0,2} \quad (10)$$

where $R_{p0,2}$ is the stress corresponding to the yield point.

The factor q shall be taken from table 4 (see also 2.3.3).

When a main conductor consists of two or more subconductors, the total stress in the conductor is given by:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s \quad (11)$$

NOTE — For rectangular cross-sections, σ_{tot} is the algebraic sum of σ_m and σ_s , independent of the loading directions (see figure 2).

The conductor is assumed to withstand the short-circuit forces when:

$$\sigma_{tot} \leq q R_{p0,2} \quad (12)$$

It is necessary to verify that the short circuit does not affect the distance between subconductors too much, therefore a value

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (13)$$

is recommended.

Table 4 gives the highest acceptable values for q for different cross-sections. For $\sigma_m = q R_{p0,2}$ respectively $\sigma_{tot} = q R_{p0,2}$, small permanent deformations may occur, approximately 1 % of the distance between supports for q values according to table 4, which do not jeopardize the safety of operation, as long as in this way the minimum clearances between main conductors, or between a main conductor and the earthed structure, are not violated.

NOTE — For the yield point of conductor materials, $R_{p0,2}$, the standards often state ranges with minimum and maximum values. If only such limit values rather than actual readings are available, the minimum value should be used in 2.3.4, and the maximum value in table 2.

2.3.5 Calcul des forces exercées sur les supports de conducteurs rigides

La force dynamique F_d doit être calculée à partir de:

$$F_d = V_F \alpha F_m \quad (14)$$

où F_m selon l'équation (2) doit être utilisée.

Les valeurs maximales possibles de V_F doivent être prises dans le tableau 2.

Le facteur α dépend du type et du nombre de supports et doit être pris dans le tableau 3. En ce qui concerne la charge de conception pour les supports isolants et les connecteurs, voir 2.4.

Pour un examen plus approfondi, voir 2.3.6.

2.3.6 Calcul tenant compte de l'oscillation des conducteurs

Les équations en 2.3.2 et 2.3.5 contiennent des facteurs V_σ , $V_{\sigma s}$ et V_F qui tiennent compte de la nature oscillatoire des contraintes et des forces.

Les limites supérieures de ces facteurs sont indiquées dans le tableau 2. Le calcul avec ces limites supérieures peut donner des résultats plutôt par excès. Des valeurs inférieures à celles-ci sont autorisées si elles sont déterminées à l'aide du présent paragraphe 2.3.6. Dans ce but il est nécessaire de calculer la fréquence propre appropriée f_c et f_{cs} en tenant compte de la précision des données et des paramètres de la fonction rectangulaire de substitution.

2.3.6.1 Calcul de la fréquence propre appropriée

La fréquence propre correspondant à un conducteur peut être calculée à partir de:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J}{m'}} \quad (15)$$

L'équation (15) est directement applicable aux conducteurs principaux constitués par des sections uniques.

Le facteur γ dépend du type et du nombre de supports et est indiqué dans le tableau 3.

Pour un conducteur principal composé de sous-conducteurs de section rectangulaire, la fréquence propre correspondant au conducteur principal doit être calculée à partir de:

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (16)$$

Le facteur c doit être pris sur les figures 3b ou 3c. Dans le cas où il n'y a pas de pièces de liaison, c est égal à 1.

La fréquence f_c correspond à la période

$$T_{me} = \frac{1}{f_c} \quad (17)$$

Pour un conducteur principal composé de sous-conducteurs de sections en U ou en I, f_c est calculée à partir de l'équation (15): J et m' doivent s'appliquer à la conception du conducteur principal.

2.3.5 Calculation of forces on supports of rigid conductors

The dynamic force F_d shall be calculated from:

$$F_d = V_F \alpha F_m \quad (14)$$

where F_m according to equation (2) shall be used.

The maximum possible values of V_F shall be taken from table 2.

The factor α is dependent on the type and the number of supports, and shall be taken from table 3. Regarding the design load on post insulators and connectors, see 2.4.

For further consideration, see 2.3.6.

2.3.6 Calculation with special regard to conductor oscillation

The equations in 2.3.2 and 2.3.5 contain factors V_σ , $V_{\sigma s}$ and V_F , which take into account the oscillatory nature of the stresses and forces.

The upper limits of these factors are given in table 2. The calculation with these upper limits can give rather conservative results. Lower values than these are permitted, if determined according to this subclause 2.3.6. For this purpose it is necessary to calculate the relevant natural frequencies f_c and f_{cs} , taking into account the accuracy of the data, and the substitute rectangular function parameters.

2.3.6.1 Calculation of relevant natural frequency

The relevant natural frequency of a conductor can be calculated from:

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J}{m'}} \quad (15)$$

Equation (15) is directly applicable to main conductors of single cross-sections.

The factor γ is dependent on the type and number of supports, and is given in table 3.

If the main conductor is composed of subconductors of rectangular cross-section, the relevant natural frequency of the main conductor shall be calculated from:

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (16)$$

The factor c shall be taken from figures 3b or 3c. In the case of no connecting pieces, $c = 1$.

The frequency f_c corresponds to the period

$$T_{me} = \frac{1}{f_c} \quad (17)$$

For a main conductor composed of subconductors of U or I sections, f_c is calculated from equation (15): J and m' shall apply to the main conductor design.

Pour le calcul de la contrainte dans un sous-conducteur, en tenant compte de la fréquence propre correspondante, l'équation

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (18)$$

doit être utilisée.

La fréquence f_{cs} correspond à la période

$$T_{mes} = \frac{1}{f_{cs}} \quad (19)$$

NOTE – Les moments quadratiques J et J_s sont calculés selon les figures 2a ou 2b.

2.3.6.2 Calcul des paramètres de la fonction rectangulaire de substitution

La figure 4a montre la fonction d'approximation normale pour le courant défini dans la CEI 61660-1 et la figure 4b sa fonction au carré qui est décrite par l'équation (20).

$$i_1^2(t) = i_p^2 \frac{(1 - e^{-t/\tau_1})^2}{(1 - e^{-t_p/\tau_1})^2} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (20a)$$

$$i_2^2(t) = i_p^2 \left[(1 - p) e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p \right]^2 \quad t > t_p \quad (20b)$$

$$p = \frac{l_k}{i_p} \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (20c)$$

où

i_p est la valeur de crête du courant de court-circuit;

l_k est le courant de court-circuit quasi permanent;

τ_1 est la constante du temps de croissance;

τ_2 est la constante de temps de décroissance;

t_p est le temps pour atteindre la crête;

et la fonction d'approximation normale pour la force est

$$F_1(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1^2(t) \frac{l}{a} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (21a)$$

$$F_2(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_2^2(t) \frac{l}{a} \quad t > t_p \quad (21b)$$

L'équation (20c) doit être utilisée dans le calcul pour cette norme. Les équations (20a), (20b) et (21) sont données seulement à titre d'information.

La figure 4b montre également la fonction rectangulaire de substitution qui, pour la durée de court-circuit $T_k \leq 0,5 T_{me}$ a le même effet dynamique que la fonction d'origine T_{me} , selon l'équation (17). Pour la contrainte du sous-conducteur, la fonction rectangulaire de substitution est valable pour $T_k \leq 0,5 T_{mes}$, T_{mes} selon l'équation (19).

For the calculation of subconductor stress, taking the relevant natural frequency into account, the equation

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (18)$$

shall be used.

The frequency f_{cs} corresponds to the period

$$T_{mes} = \frac{1}{f_{cs}} \quad (19)$$

NOTE — The second moments of area J and J_s are calculated according to figures 2a or 2b.

2.3.6.2 Calculation of the substitute rectangular function parameters

Figure 4a shows the standard approximation function for the current defined in IEC 61660-1 and figure 4b its square which is described by equation (20):

$$i_1^2(t) = i_p^2 \frac{(1 - e^{-t/\tau_1})^2}{(1 - e^{-t_p/\tau_1})^2} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (20a)$$

$$i_2^2(t) = i_p^2 \left[(1 - p) e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p \right]^2 \quad t > t_p \quad (20b)$$

$$p = \frac{i_k}{i_p} \quad 0 \leq p \leq 1 \quad (20c)$$

where

- i_p is the peak short-circuit current;
- i_k is the quasi steady-state short-circuit current;
- τ_1 is the rise-time constant;
- τ_2 is the decay-time constant;
- t_p is the time to peak;

and the standard approximation function for the force is

$$F_1(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1^2(t) \frac{l}{a} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (21a)$$

$$F_2(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i_2^2(t) \frac{l}{a} \quad t > t_p \quad (21b)$$

The equation (20c) shall be used in the calculation according to this standard. The equations (20a), (20b) and (21) are for information only.

Figure 4b shows also the substitute rectangular function, which for the short-circuit duration $T_k \leq 0,5 T_{me}$ has the same dynamic effect as the original function, T_{me} according to equation (17). For the subconductor stress, the substitute rectangular function is valid for $T_k \leq 0,5 T_{mes}$, T_{mes} according to equation (19).

Les paramètres pour la fonction rectangulaire de substitution sont:

$$t_R = 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{I_g}{A_i}} = 3,464 \sqrt{\frac{I_g}{A_i}} \quad (22)$$

$$I_R^2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{A_i^3}{I_g}} = 0,2887 \sqrt{\frac{A_i^3}{I_g}} \quad (23)$$

$$\text{où } A_i = I_p^2 \left[t_p m_{\theta 1} + (T_k - t_p) m_{\theta 2} \right] \quad (24)$$

$$\text{et } I_g = I_p^2 \left\{ \frac{t_p^3}{12} m_{lg1} + \frac{(T_k - t_p)^3}{12} m_{lg2} + m_{\theta 1} t_p (t_g - m_{g1} t_p)^2 + m_{\theta 2} (T_k - t_p) [t_p + m_{g2} (T_k - t_p) - t_g]^2 \right\} \quad (25)$$

$$\text{où } t_g = \frac{m_{\theta 1} m_{g1} t_p^2 + m_{\theta 2} (T_k - t_p) [t_p + m_{g2} (T_k - t_p)]}{m_{\theta 1} t_p + m_{\theta 2} (T_k - t_p)} \quad (26)$$

Les facteurs $m_{\theta 1}$, $m_{\theta 2}$ doivent être pris de la figure 5, m_{g1} et m_{g2} de la figure 6, et m_{lg1} , m_{lg2} de la figure 7.

Dans les cas où la caractéristique du courant peut être décrite seulement par une fonction croissant de façon exponentielle, ce qui signifie $T_k = t_p$, les paramètres t_R et I_R^2 doivent être pris directement de la figure 8.

Pour le calcul des paramètres t_R et I_R^2 les points suivants doivent être notés:

- Pour la durée de court-circuit $T_k \leq 0,5 T_{me}$, la fonction rectangulaire de substitution doit être déterminée pour toute la durée T_k .
- Pour la durée de court-circuit $T_k > 0,5 T_{me}$, la fonction rectangulaire de substitution doit être déterminée pour la durée de court-circuit équivalente $T_{ke} < T_k$. Dans ce cas, prendre $T_{ke} = \max \{0,5 T_{me}, 1,5 t_p\}$.
- Si la fonction temporelle du courant de court-circuit est seulement croissante, c'est-à-dire, $T_k = t_p$, la fonction rectangulaire de substitution doit être déterminée pour toute la durée T_k indépendamment du rapport $T_k / (0,5 T_{me})$.
- Pour estimer la fonction rectangulaire de substitution pour la contrainte des sous-conducteurs, les conditions données ci-dessus doivent être appliquées avec T_{mes} au lieu de T_{me} .

Les contraintes dues à la fonction rectangulaire de substitution sont

- entre les conducteurs principaux:

$$F_R = \frac{\mu_0}{2\pi} I_R^2 \frac{l}{a_m} \quad (27)$$

The parameters for the substitute rectangular function are:

$$t_R = 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{I_g}{A_i}} = 3,464 \sqrt{\frac{I_g}{A_i}} \quad (22)$$

$$I_R^2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{A_i^3}{I_g}} = 0,2887 \sqrt{\frac{A_i^3}{I_g}} \quad (23)$$

$$\text{where } A_i = I_p^2 [t_p m_{\theta 1} + (T_k - t_p) m_{\theta 2}] \quad (24)$$

and

$$I_g = I_p^2 \left\{ \frac{t_p^3}{12} m_{g1} + \frac{(T_k - t_p)^3}{12} m_{g2} + m_{\theta 1} t_p (t_g - m_{g1} t_p)^2 + m_{\theta 2} (T_k - t_p) [t_p + m_{g2} (T_k - t_p) - t_g]^2 \right\} \quad (25)$$

$$\text{where } t_g = \frac{m_{\theta 1} m_{g1} t_p^2 + m_{\theta 2} (T_k - t_p) [t_p + m_{g2} (T_k - t_p)]}{m_{\theta 1} t_p + m_{\theta 2} (T_k - t_p)} \quad (26)$$

The factors $m_{\theta 1}$, $m_{\theta 2}$ shall be taken from figure 5, m_{g1} , m_{g2} from figure 6, and m_{lg1} , m_{lg2} from figure 7.

When the current characteristic can be described solely by an exponentially rising function, implying $T_k = t_p$, the parameters t_R and I_R^2 shall be taken directly from figure 8.

For the calculation of the parameters t_R and I_R^2 the following points shall be noted:

- For the short-circuit duration $T_k \leq 0,5 T_{me}$, the substitute rectangular function shall be determined for the duration T_k .
- For the short-circuit duration $T_k > 0,5 T_{me}$, the substitute rectangular function shall be determined for the equivalent short-circuit duration $T_{ke} < T_k$. In this case, take $T_{ke} = \max \{0,5 T_{me}, 1,5 t_p\}$.
- If the time function of the short-circuit current is only increasing, that is $T_k = t_p$, the substitute rectangular function shall be determined for the duration T_k independently from the ratio $T_k / (0,5 T_{me})$.
- To estimate the substitute rectangular function for the forces between the subconductors, the conditions given above shall be established with T_{mes} instead of T_{me} .

The forces caused by the substitute rectangular function are

- between the main conductors:

$$F_R = \frac{\mu_0}{2\pi} I_R^2 \frac{l}{a_m} \quad (27)$$

– et entre les sous-conducteurs:

$$F_{Rs} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{Rs}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (28)$$

a_m et a_s sont les distances équivalentes selon 2.2.3.

2.3.6.3 Calcul des contraintes sur les conducteurs rigides et les forces sur les supports

L'équation (8) pour le calcul de la contrainte de flexion causée par les forces entre conducteurs principaux doit être remplacée par:

$$\sigma_m = V_\sigma \beta \frac{F_R l}{8 Z} \quad (29)$$

où F_R selon l'équation (27) doit être utilisée.

L'équation (9) pour le calcul de la contrainte de flexion causée par les forces entre sous-conducteurs doit être remplacée par:

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \frac{F_{Rs} l_s}{16 Z_s} \quad (30)$$

où F_{Rs} selon l'équation (28) doit être utilisée.

L'équation (14) pour le calcul de la force dynamique F_d doit être remplacée par

$$F_d = V_F \alpha F_R \quad (31)$$

où F_R selon l'équation (27) doit être utilisée.

Les facteurs V_F , V_σ et $V_{\sigma s}$ comme fonction des rapports t_R/T_{me} et t_{Rs}/T_{mes} doivent être pris de la figure 9.

Pour d'autres études, voir 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 et 2.3.5.

2.4 Charge de conception pour les isolateurs, leurs supports et connecteurs

La force F_d ne doit pas être supérieure à la valeur assignée de tenue donnée par le constructeur des supports et des isolateurs. Pour un isolateur subissant une contrainte due à une force de flexion, la valeur assignée de tenue est donnée comme une force agissant à la tête de l'isolateur. Pour une force agissant à un point plus haut que la tête de l'isolateur, une valeur de tenue inférieure à la valeur assignée de tenue doit être utilisée, et elle est basée sur le moment de flexion de tenue à la section critique de l'isolateur.

Les connecteurs pour les conducteurs rigides doivent avoir des caractéristiques assignées basées sur F_d .

3 Effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique

3.1 Généralités

Le présent article donne des méthodes de calcul des effets thermiques sur les conducteurs nus et sur le matériel électrique.

L'échauffement des conducteurs résultant des courants de court-circuit met en jeu plusieurs phénomènes de caractère non linéaire et d'autres facteurs qui ont été soit négligés, soit établis approximativement, afin de permettre une approche mathématique.

– and between the subconductors:

$$F_{Rs} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_{Rs}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (28)$$

a_m and a_s are the effective distances according to 2.2.3.

2.3.6.3 Calculation of stresses in rigid conductors and forces on supports

Equation (8) for the calculation of the bending stress caused by the forces between main conductors shall be replaced by:

$$\sigma_m = V_\sigma \beta \frac{F_R l}{8 Z} \quad (29)$$

where F_R according to equation (27) shall be used.

Equation (9) for the calculation of the bending stress caused by the forces between subconductors shall be replaced by:

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \frac{F_{Rs} l_s}{16 Z_s} \quad (30)$$

where F_{Rs} according to equation (28) shall be used.

Equation (14) for the calculation of the dynamic force F_d shall be replaced by:

$$F_d = V_F \alpha F_R \quad (31)$$

where F_R according to equation (27) shall be used.

The factors V_F , V_σ and $V_{\sigma s}$ as functions of the ratio t_R/T_{me} and t_{Rs}/T_{mes} shall be taken from figure 9.

For further considerations see 2.3.2, 2.3.3, 2.3.4 and 2.3.5.

2.4 Design load for post insulators, their supports and connectors

The force F_d shall not be greater than the rated withstand value given by the manufacturer of supports and insulators. For an insulator stressed by a bending force, the rated withstand value is given as a force acting at the insulator head. For a force, acting at a point higher than the insulator head, a withstand value lower than the rated withstand value shall be used, based on the withstand bending moment at the critical insulator cross-section.

Connectors for rigid conductors shall be rated on the basis of F_d .

3 Thermal effect on bare conductors and electrical equipment

3.1 General

This clause gives calculation methods for the thermal effect on bare conductors and electrical equipment.

The heating of conductors due to short-circuit currents involves several phenomena of a non-linear character, and other factors that have been either neglected or approximated in order to make the mathematical approach possible.

Pour les besoins du présent article, les hypothèses suivantes ont été faites:

- l'effet pelliculaire (influence magnétique d'un conducteur sur lui-même) et l'effet de proximité (influence magnétique entre conducteurs parallèles proches) sont négligés;
- la relation entre la résistance et la température est supposée linéaire;
- la chaleur spécifique du conducteur est considérée comme constante;
- l'échauffement est considéré comme adiabatique.

3.2 Calcul de l'échauffement

3.2.1 Généralités

La perte de chaleur par un conducteur pendant un court-circuit est très faible, et l'échauffement est considéré comme adiabatique. Les calculs dans le présent article sont basés sur des conditions adiabatiques.

3.2.2 Calcul du courant thermique équivalent de courte durée

Le courant thermique équivalent de courte durée doit être exprimé selon:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{A_i}{T_k}} \quad (32)$$

où A_i doit être déterminé selon 2.3.6.2 pour la durée de passage du courant de court-circuit T_k .

En ce qui concerne les dispositifs limiteurs de courant, le courant thermique équivalent de courte durée I_{th} et la durée associée du courant de court-circuit T_k sont indiqués par le constructeur.

Si on peut accepter un résultat par défaut, une limite supérieure pour I_{th} peut être estimée par:

$$I_{th} = I_p \quad (33)$$

3.2.3 Calcul de l'échauffement et de la densité du courant de tenue de courte durée assigné des conducteurs

L'échauffement d'un conducteur résultant d'un court-circuit est fonction de la durée du courant de court-circuit, du courant thermique équivalent de courte durée et du matériau constitutif du conducteur.

En utilisant les diagrammes de la figure 10, l'échauffement d'un conducteur peut être calculé lorsque la densité du courant de tenue de courte durée assigné est connue, ou vice versa.

Les températures de courte durée les plus élevées recommandées pour différents conducteurs sont indiquées par le tableau 6. Si ces températures sont atteintes, une diminution négligeable de la résistance mécanique peut se produire, qui selon l'expérience acquise, ne met pas en cause la sécurité. On doit également faire la preuve que la température maximale admissible des fixations du conducteur ou des bornes n'est pas dépassée par suite du transfert de chaleur venant du conducteur.

3.2.4 Détermination de la résistance thermique au court-circuit

3.2.4.1 Matériel électrique

Le matériel électrique a une résistance thermique au court-circuit suffisante pourvu que le courant thermique équivalent de courte durée I_{th} satisfasse aux relations suivantes:

For the purpose of this clause, the following assumptions have been made:

- skin effect (magnetic influence of a conductor on itself) and proximity effect (magnetic influence of nearby parallel conductors) are disregarded;
- resistance temperature characteristic is assumed to be linear;
- the specific heat of the conductor is considered constant;
- the heating is considered adiabatic.

3.2 Calculation of temperature rise

3.2.1 General

The loss of heat from a conductor during the short circuit is very low, and the heating is considered adiabatic. Calculation in this clause is based on adiabatic conditions.

3.2.2 Calculation of thermal equivalent short-time current

The thermal equivalent short-time current can be expressed by:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{A_i}{T_k}} \quad (32)$$

where A_i shall be determined according to 2.3.6.2 for the short-circuit duration T_k .

For current limiting devices, the thermal equivalent short-time current I_{th} and the associated duration of short-circuit current T_k are given by the manufacturer.

If conservative results are accepted, an upper limit for I_{th} can be estimated by:

$$I_{th} = i_p \quad (33)$$

3.2.3 Calculation of temperature rise and rated short-time withstand current density for conductors

The temperature rise of a conductor caused by a short circuit is a function of the duration of the short-circuit current, the thermal equivalent short-time current, and the conductor material.

By use of the graphs in figure 10, it is possible to calculate the temperature rise of a conductor when the rated short-time withstand current density is known, or vice versa.

The highest recommended short-time temperatures for different conductors are given in table 6. If they are reached, a negligible decrease in mechanical strength can occur, which does not empirically jeopardise the safety in operation. It is also necessary to establish that the maximum permitted temperature of the conductor clamps or terminals is not exceeded by the heat transfer from the conductor.

3.2.4 Calculation of the thermal short-circuit strength

3.2.4.1 Electrical equipment

Electrical equipment has sufficient thermal short-circuit strength as long as the following relations hold for the thermal equivalent short-time current I_{th} :

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad \text{pour } T_k \leq T_{kr} \quad (34a)$$

ou

$$I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad \text{pour } T_k \geq T_{kr} \quad (34b)$$

où

I_{thr} est le courant de tenue de courte durée assigné;

T_{kr} est la courte durée assignée.

3.2.4.2 Conducteurs

Les conducteurs nus ont une résistance thermique au court-circuit suffisante, pourvu que la densité du courant thermique équivalent de courte durée S_{th} satisfasse à la relation suivante:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (35)$$

pour toutes les valeurs de T_k .

La densité du courant de tenue de courte durée assigné S_{thr} est indiquée à la figure 10, pour $T_{kr} = 1$ s.

Dans certains pays, l'équation suivante (intégrale de Joule) est utilisée au lieu de l'équation (35):

$$\int i^2 dt = I_{th}^2 T_k \leq K^2 A^2 \quad (36)$$

où

I_{th} doit être obtenu par l'équation (32) ou (33), et

$$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}} \quad (37)$$

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad \text{for } T_k \leq T_{kr} \quad (34a)$$

$$\text{or} \quad I_{th} \leq I_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad \text{for } T_k \geq T_{kr} \quad (34b)$$

where

I_{thr} is the rated short-time withstand current;

T_{kr} is the rated short-time.

3.2.4.2 Conductors

Bare conductors have sufficient thermal short-circuit strength as long as the following relation holds for the thermal equivalent short-time current density S_{th} :

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (35)$$

for all T_k values.

The rated short-time withstand current density S_{thr} is shown in figure 10, for $T_{kr} = 1$ s.

In some countries, instead of equation (35) the following equation (Joule integral) is used:

$$\int i^2 dt = I_{th}^2 T_k \leq K^2 A^2 \quad (36)$$

where

I_{th} shall be taken from equation (32) or (33), and

$$K = S_{thr} \sqrt{T_{kr}} \quad (37)$$

Tableau 1 – Distance équivalente a_s entre sous-conducteurs, en mètres, pour des sections rectangulaires

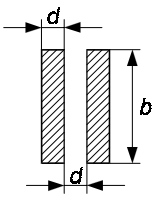
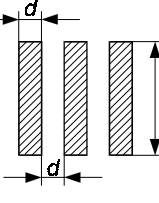
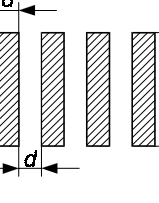
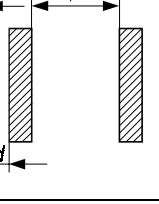
Sections rectangulaires	$\begin{matrix} b \\ d \end{matrix}$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	—	—	—
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	—	0,013	0,015	0,018	0,022	—	—	—
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	—	0,014	0,015	0,018	0,020	—	—	—
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	—

Table 1 – Effective distance a_s between subconductors in metres, for rectangular cross-section dimensions

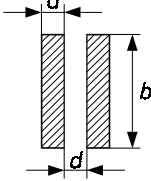
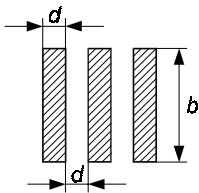
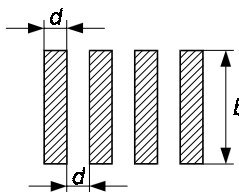
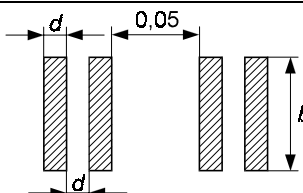
Rectangular cross-sections	$b \backslash d$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	—	—	—
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	—	0,013	0,015	0,018	0,022	—	—	—
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	—	0,014	0,015	0,018	0,020	—	—	—
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	—

Tableau 2 – Valeurs maximales possibles de V_{σ} , $V_{\sigma S}$ and V_F

V_{σ} , $V_{\sigma S}$	V_F			Domaine
1,0	2,0	pour	$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$	①
	$\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{\text{tot}}}$	pour	$0,5 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$	②
	1,0	pour	$1,0 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}}$	③

The graph illustrates the relationship between the factor V_F and the normalized total stress $\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}}$. The y-axis represents V_F with values 0, 1, and 2. The x-axis represents the normalized stress with values 0, 0,5, 1, and 2. The graph is divided into three regions: ① where $V_F = 2$ for $x \leq 0,5$; ② where V_F decreases from 2 to 1 as x increases from 0,5 to 1; and ③ where $V_F = 1$ for $x > 1$. Dashed lines at $x = 0,5$ and $x = 1$ and a dashed line at $y = 1$ define these regions.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61660-2:1997

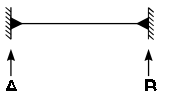
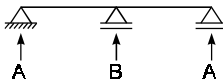
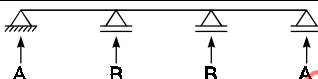
Table 2 – Maximum possible values of V_{σ} , $V_{\sigma s}$ and V_F

V_{σ} , $V_{\sigma s}$	V_F		Range
1,0	2,0	for $\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 0,5$	①
	$\frac{0,8 R_{p0,2}}{\sigma_{\text{tot}}}$	for $0,5 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}} \leq 1,0$	②
	1,0	for $1,0 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}}$	③

The graph shows the relationship between the maximum possible value of V_F and the normalized total stress ratio $\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 R_{p0,2}}$. The curve is defined by three regions: Region 1 (constant $V_F = 2$), Region 2 (decreasing curve from $V_F = 2$ to $V_F = 1$), and Region 3 (constant $V_F = 1$).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61660-2:1997

Tableau 3 – Facteurs α , β et γ pour différentes dispositions de supports de jeux de barres

Type de poutre et de support		Facteur α	Facteur β *	Facteur γ
Poutre à une seule portée	A et B: supports simples 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: support encastré B: support simple 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A et B: supports encastrés 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Poutre continue avec des supports simples équidistants	Deux portées 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	Trois ou plus de trois portées 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56

* Effets de plasticité inclus.

Tableau 4 – Facteur q

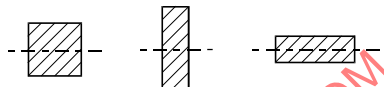
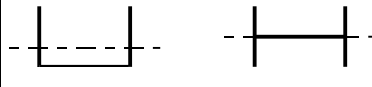
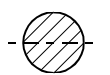
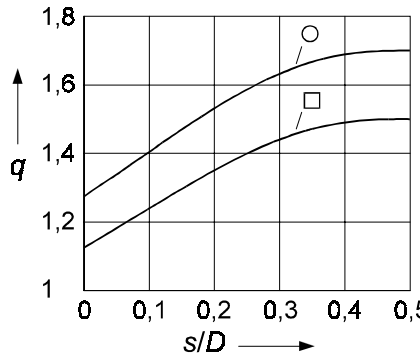
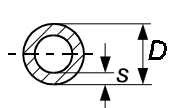
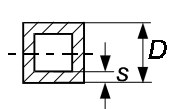
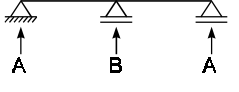
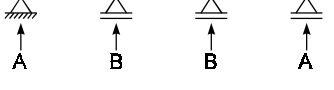
Section	Section
 $q = 1,5$	 $q = 1,83$
	 $q = 1,19$
 $q = 1,7$	
 $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
 $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$	
NOTE – q est valable pour l'axe de flexion en pointillé. Les forces sont perpendiculaires à celui-ci.	

Table 3 – Factors α , β and γ for different busbar support arrangements

Type of beam and support		Factor α	Factor β *	Factor γ
Single span beam	A and B: simple supports 	A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: fixed support B: simple support 	A: 0,625 B: 0,375	0,73	2,45
	A and B: fixed supports 	A: 0,5 B: 0,5	0,5	3,56
Continuous beam with equidistant simple supports	Two spans 	A: 0,375 B: 1,25	0,73	2,45
	Three or more spans 	A: 0,4 B: 1,1	0,73	3,56

* Plasticity effects included.

Table 4 – Factor q

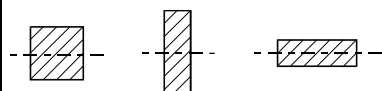
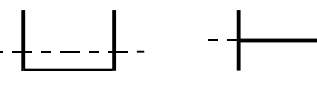
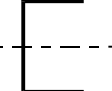
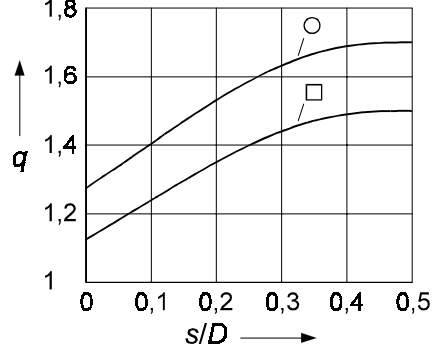
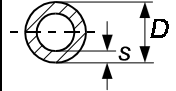
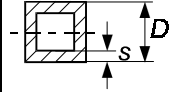
Cross-section		Cross-section	
 $q = 1,5$		 $q = 1,83$	
		 $q = 1,19$	
 $q = 1,7$			
 $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$			
 $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4}$			
NOTE – q is valid for the dotted bending axis. The forces are perpendicular to it.			

Tableau 5 – Modules de section Z de conducteurs principaux avec deux raidisseurs ou plus entre deux supports adjacents

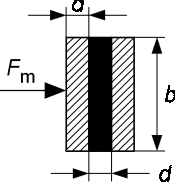
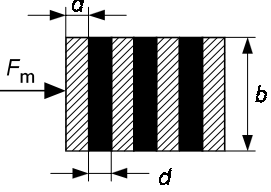
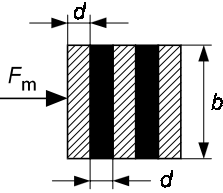
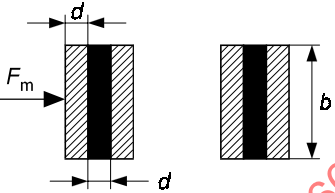
Sections rectangulaires	Z	Sections rectangulaires	Z
	$0,867 d^2 b$		$3,48 d^2 b$
	$1,98 d^2 b$		$1,73 d^2 b$
NOTE – Les raidisseurs sont représentés en noir.			

Tableau 6 – Températures maximales recommandées pour des conducteurs contraints mécaniquement pendant un court-circuit

Type de conducteur	Température maximale recommandée du conducteur pendant un court-circuit
Conducteur nu, massif: Cu, Al ou alliage d'aluminium	200 °C
Conducteur nu, massif: acier	300 °C

Table 5 – Section moduli Z of main conductors with two or more stiffening elements between two adjacent supports

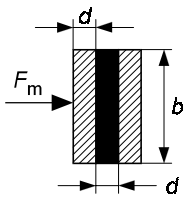
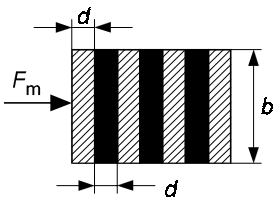
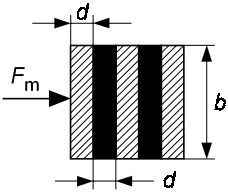
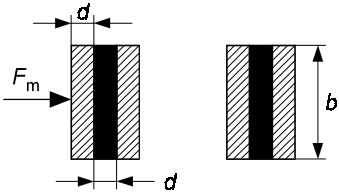
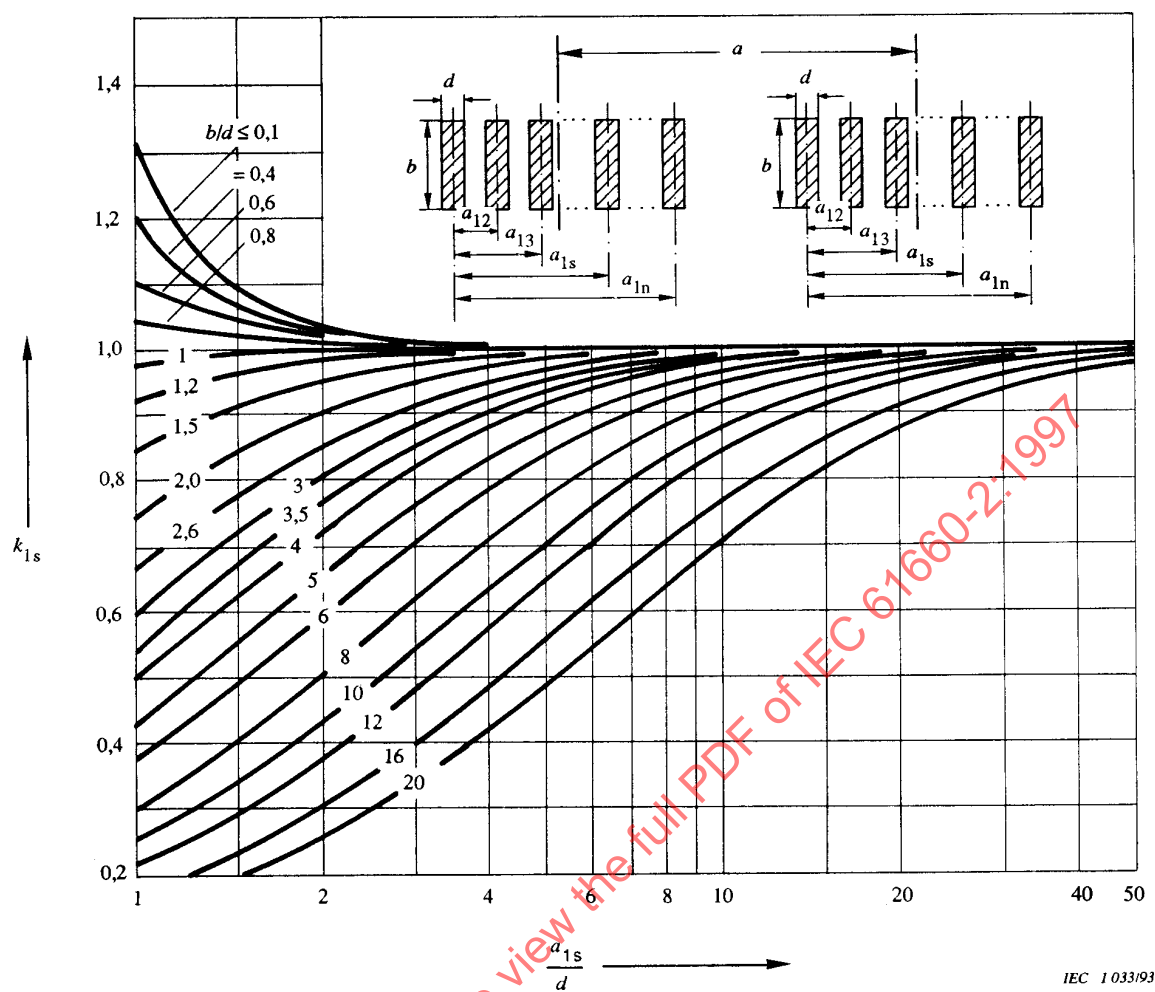
Rectangular sections	Z	Rectangular sections	Z
	$0,867 d^2 b$		$3,48 d^2 b$
	$1,98 d^2 b$		$1,73 d^2 b$
NOTE – Stiffening elements are shown in black.			

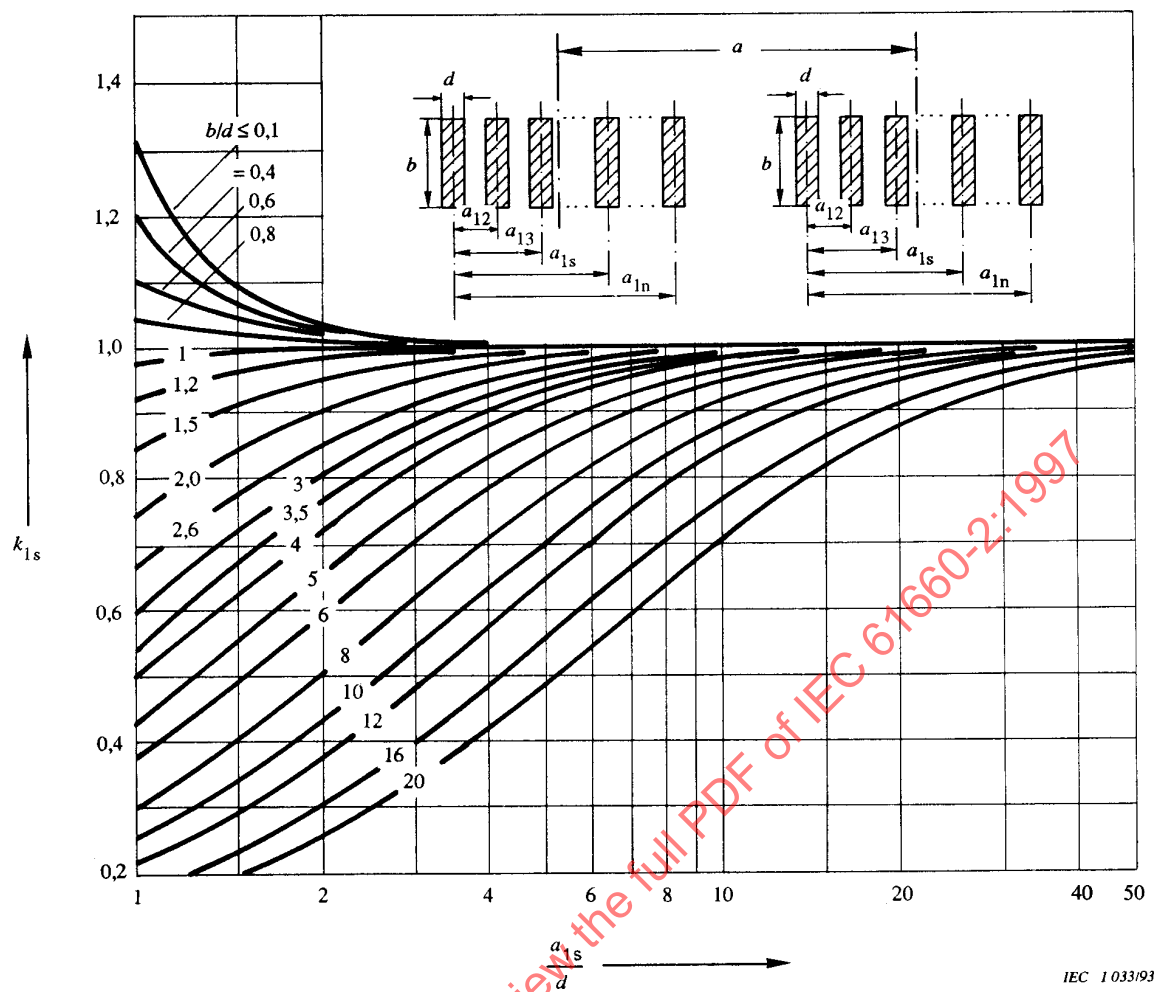
Table 6 – Recommended highest temperatures for mechanically stressed conductors during a short circuit

Type of conductor	Maximum recommended conductor temperature during a short circuit
Bare conductors, solid: Cu, Al or Al alloy	200 °C
Bare conductors, solid: steel	300 °C



NOTE – L'équation pour la programmation est donnée à l'annexe A.

Figure 1 – Facteur k_{1s} pour le calcul de la distance équivalente des conducteurs



IEC 1033/93

NOTE – For programming, the equation is given in annex A.

Figure 1 – Factor k_{1s} for calculating the effective conductor distance

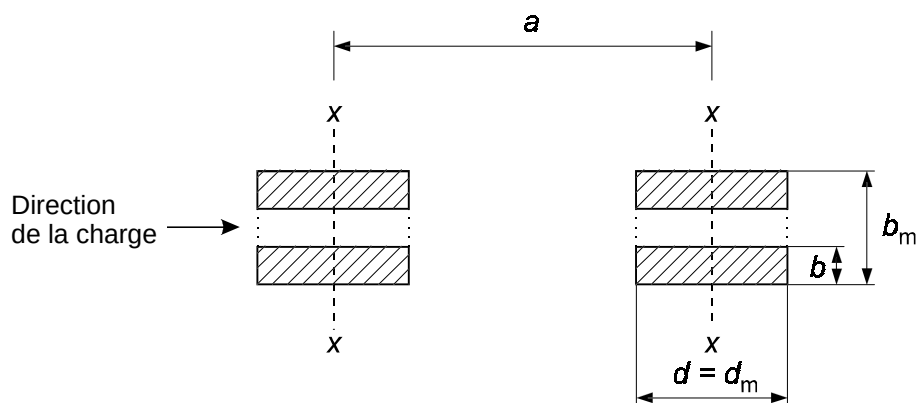


Figure 2a

IEC 736/97

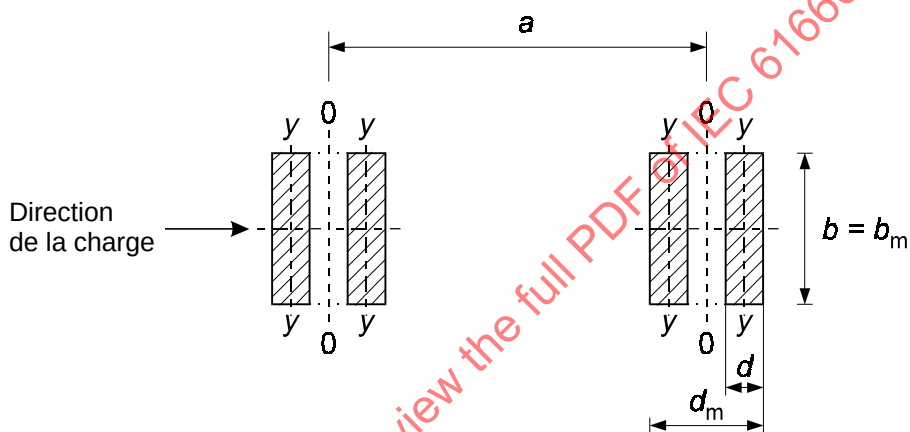


Figure 2b

IEC 737/97

Figure 2 – Direction de la charge et axe de flexion dans le cas de dispositions à conducteurs multiples

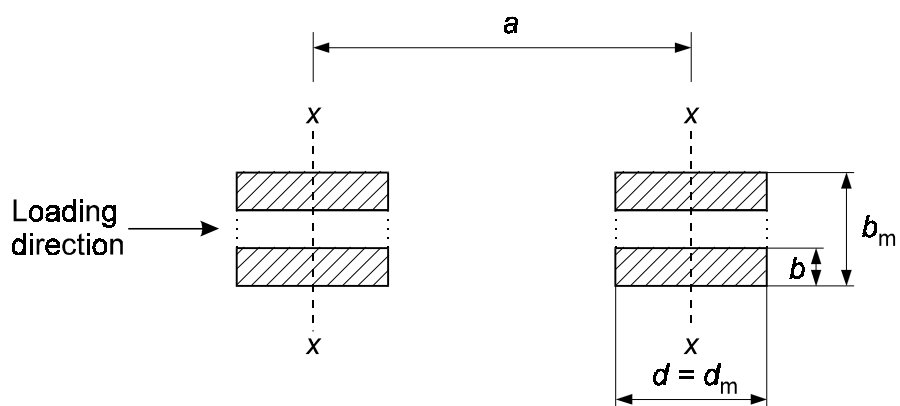


Figure 2a

IEC 736/97

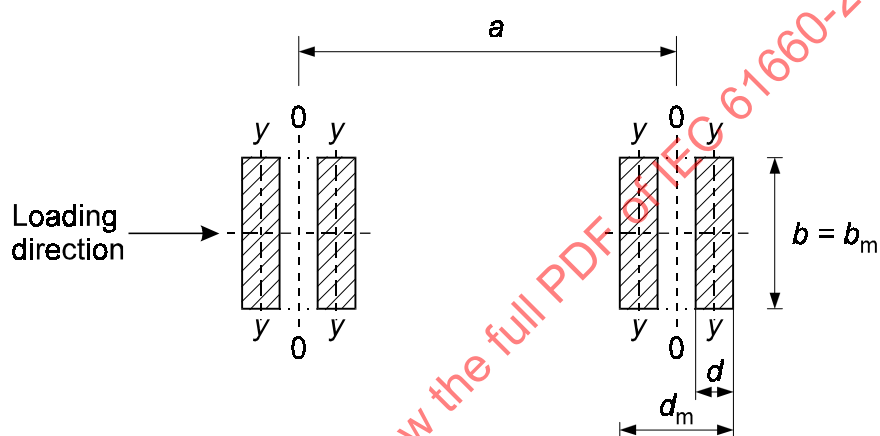


Figure 2b

IEC 737/97

Figure 2 – Loading direction and bending axis for multiple conductor arrangements

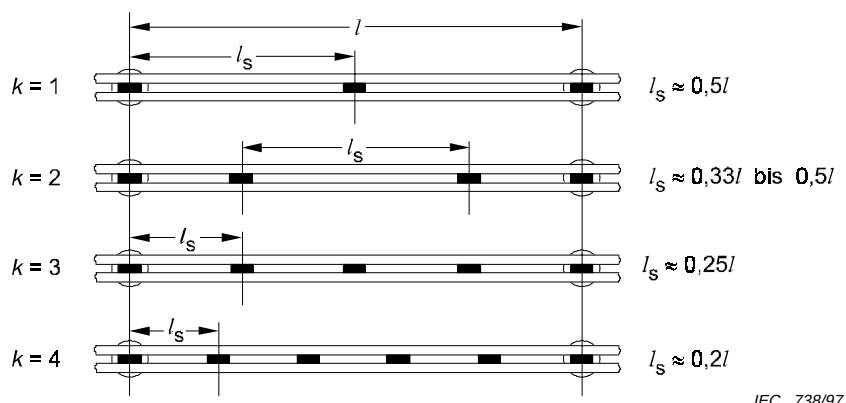


Figure 3a – Disposition des pièces de liaison dans la portée

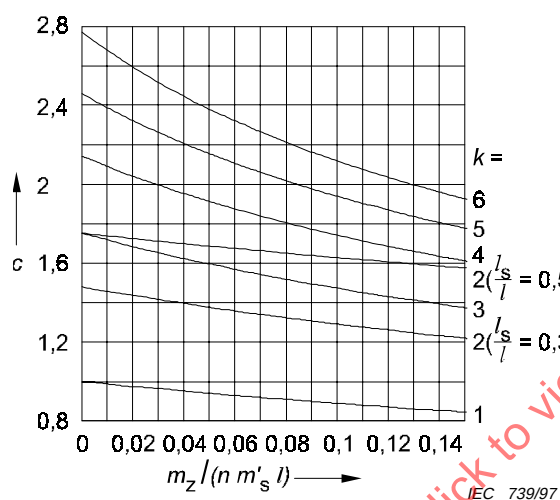


Figure 3b – Pièces de liaison constituées de raidisseurs

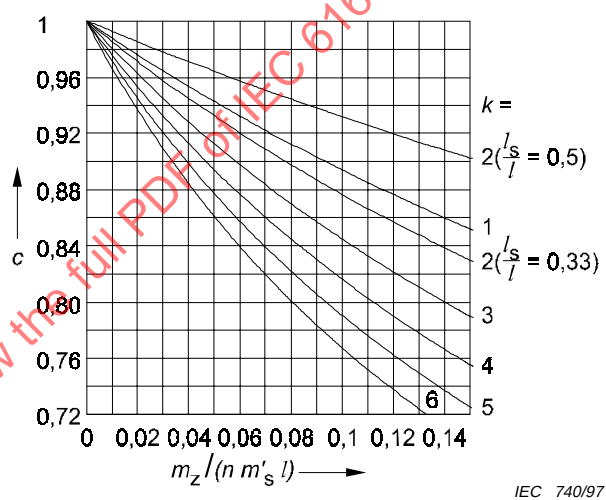


Figure 3c – Pièces de liaison constituées d'entretoises ou fonctionnant comme des entretoises

Le facteur c doit être pris sur les figures 3b ou 3c comme indiqué ci-après:

		Dans une portée, il y a:	
		k raidisseurs	k entretoises
Direction de l'oscillation perpendiculaire à la surface		Facteur c à prendre de la figure 3b	Facteur c à prendre de la figure 3c
Direction de l'oscillation parallèle à la surface		Facteur c à prendre de la figure 3c	Facteur c à prendre de la figure 3c

NOTE – L'équation pour la programmation est donnée à l'annexe A.

Figure 3 – Facteur c pour l'influence des pièces de liaison dans l'équation (16)

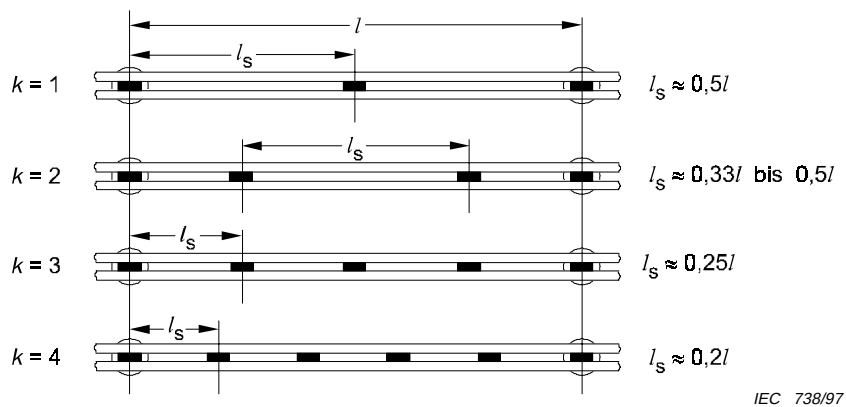


Figure 3a – Arrangement of connecting pieces within the span

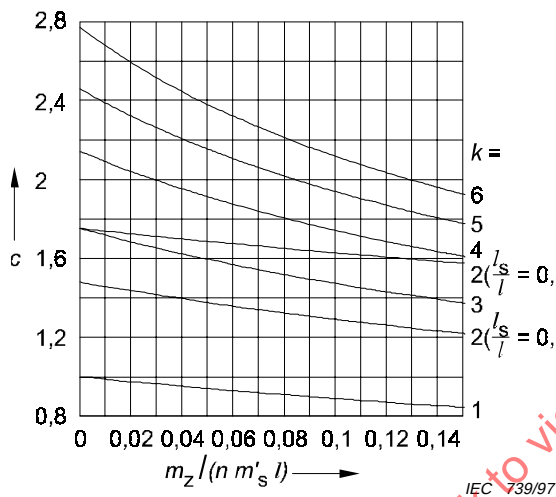


Figure 3b – Connecting pieces made up of stiffening elements

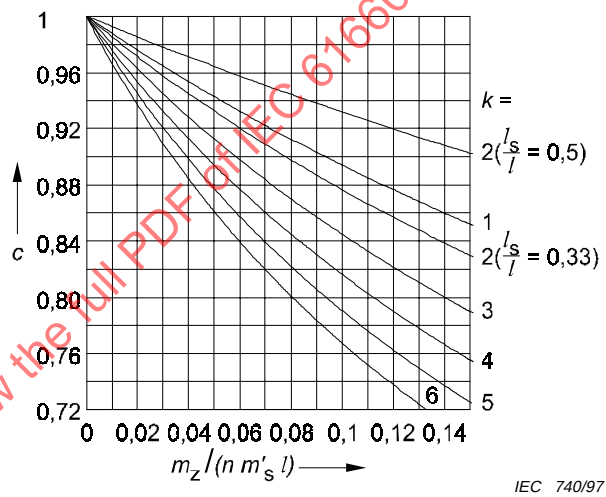


Figure 3c – Connecting pieces made up from, or operating as, spacers

Factor *c* shall be taken from figure 3b or figure 3c as shown:

		Within a span there are	
		<i>k</i> stiffening elements	<i>k</i> spacers
Direction of oscillation perpendicular to the surface		Factor <i>c</i> from figure 3b	Factor <i>c</i> from figure 3c
Direction of oscillation along the surface		Factor <i>c</i> from figure 3c	Factor <i>c</i> from figure 3c

NOTE – For programming, the equation is given in annex A.

Figure 3 – Factor *c* for the influence of connecting pieces in equation (16)

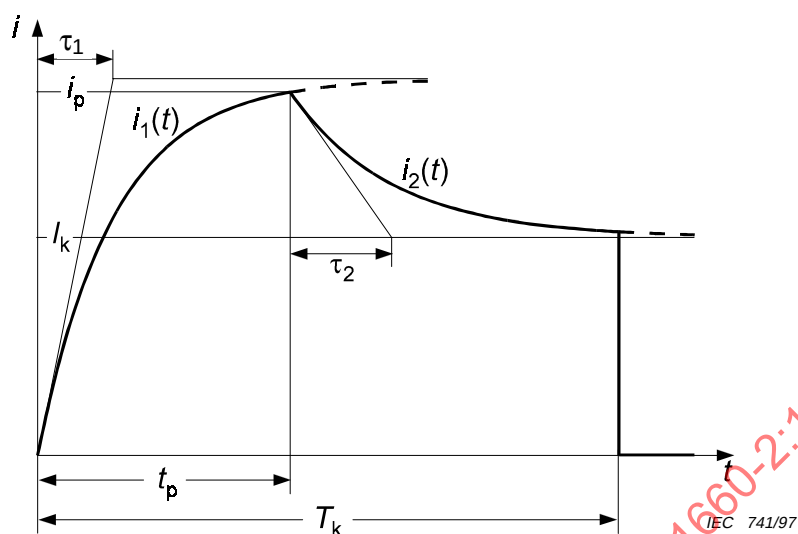


Figure 4a – Fonction d'approximation normale pour le courant défini dans la CEI 61660-1

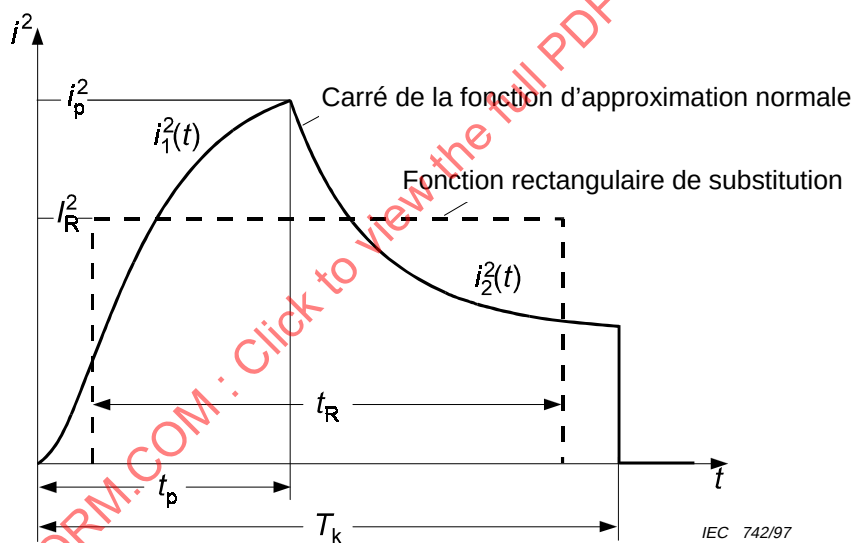


Figure 4b – Carré de la fonction d'approximation normale pour le courant défini et la fonction rectangulaire de substitution

Figure 4 – Fonction d'approximation normale pour le courant défini et la fonction rectangulaire de substitution

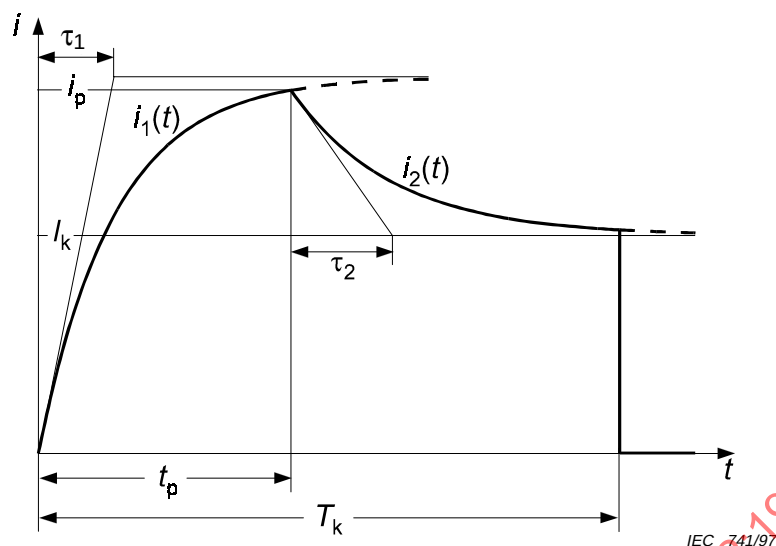


Figure 4a – Standard approximation function for the current defined in IEC 61660-1

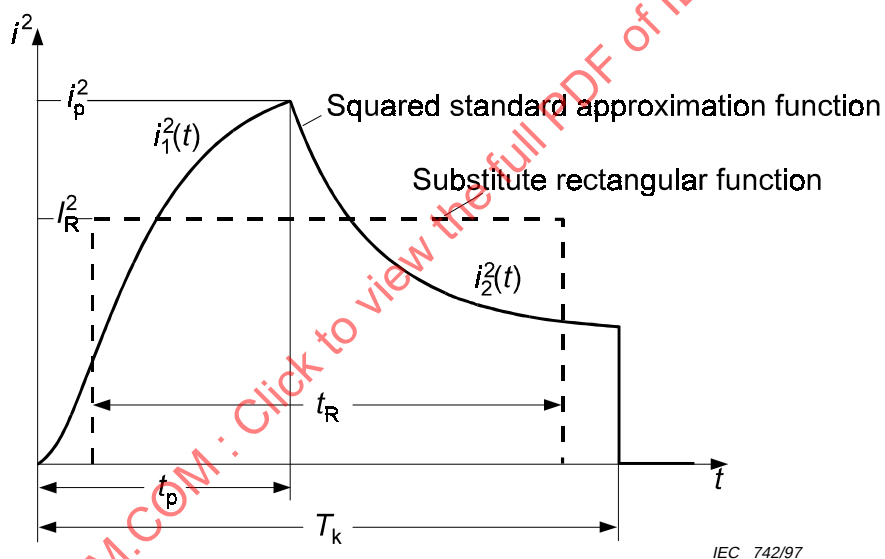
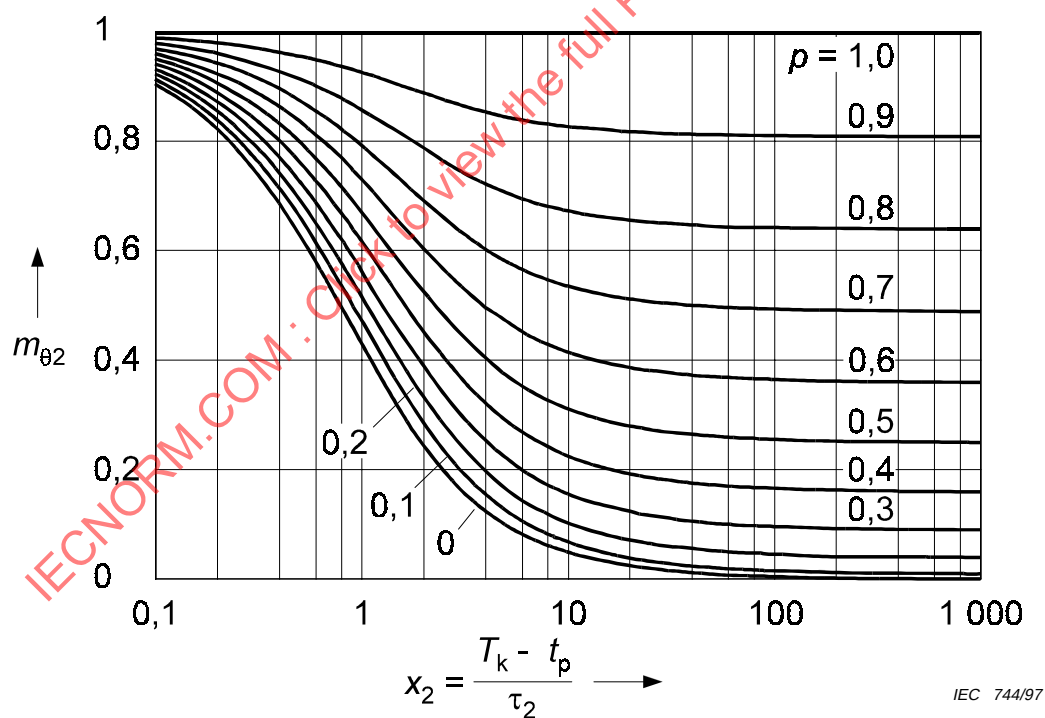
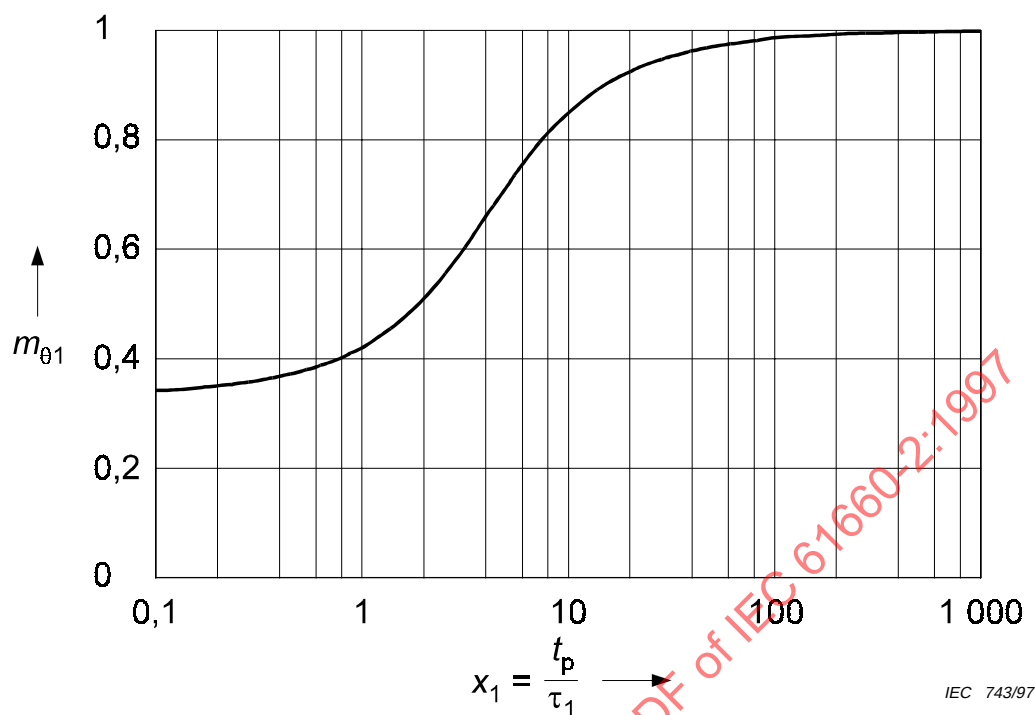


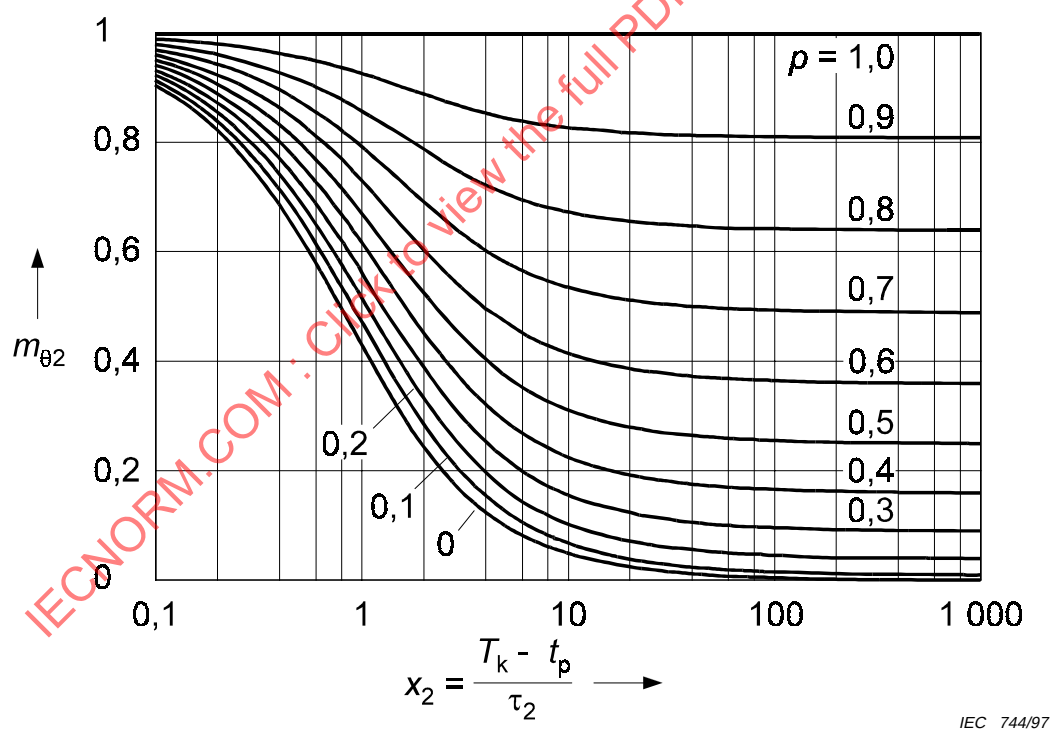
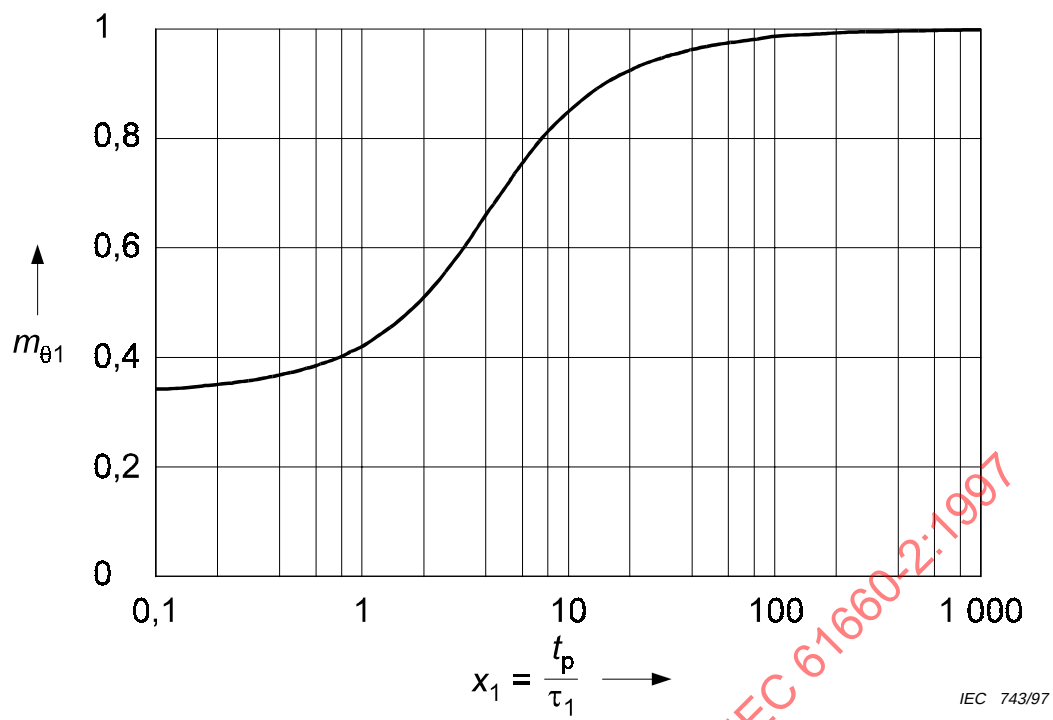
Figure 4b – Squared standard approximation function for the current defined and substitute rectangular function

Figure 4 – Standard approximation function for the current defined and substitute rectangular function



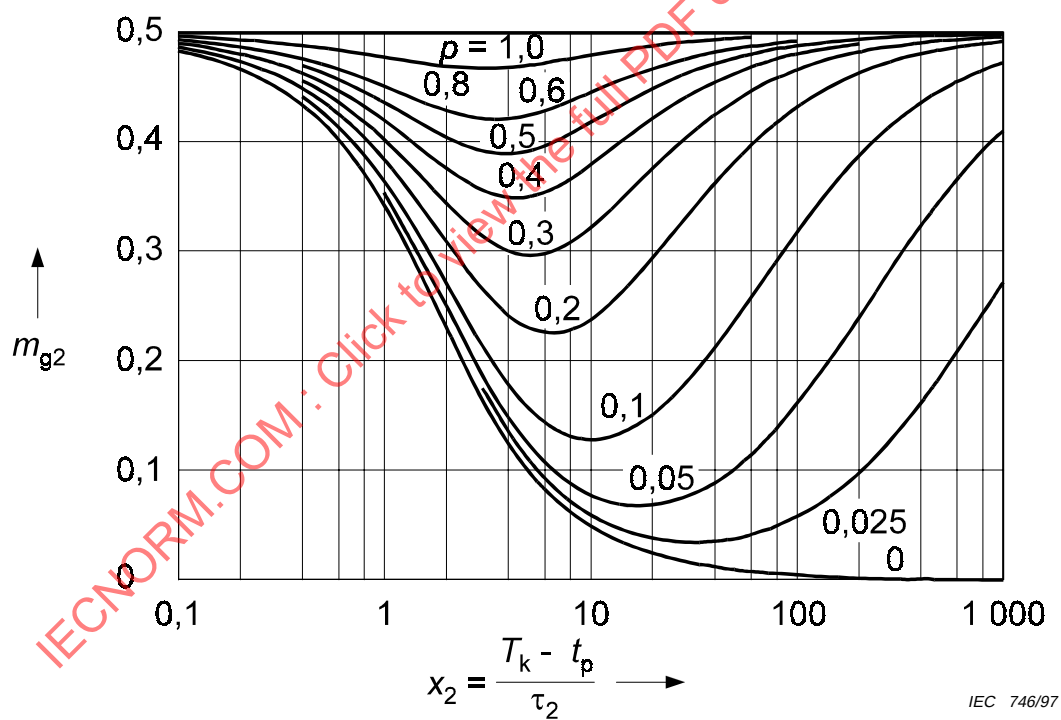
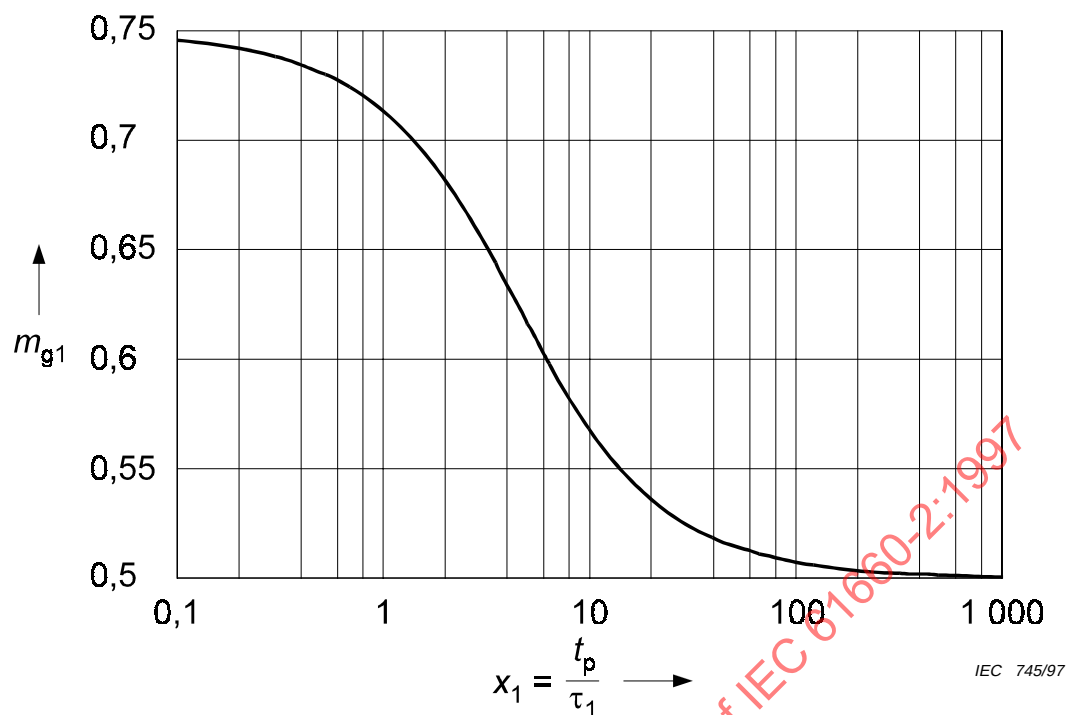
NOTE – Pour la programmation, les équations sont données à l'annexe A.

Figure 5 – Facteurs $m_{\theta 1}$ et $m_{\theta 2}$



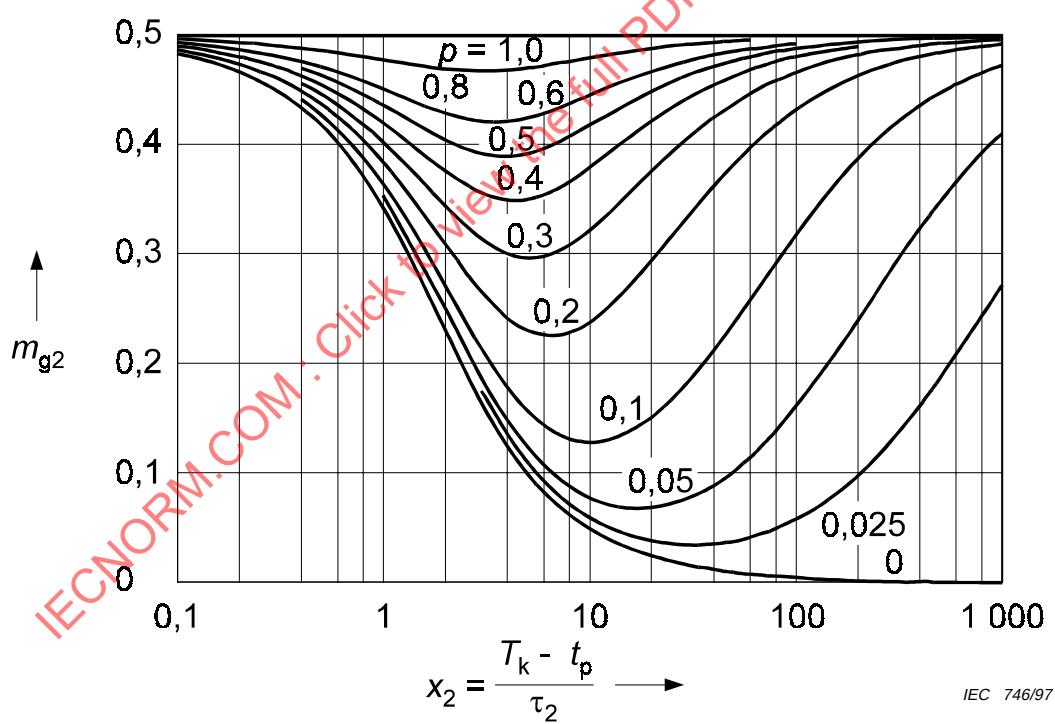
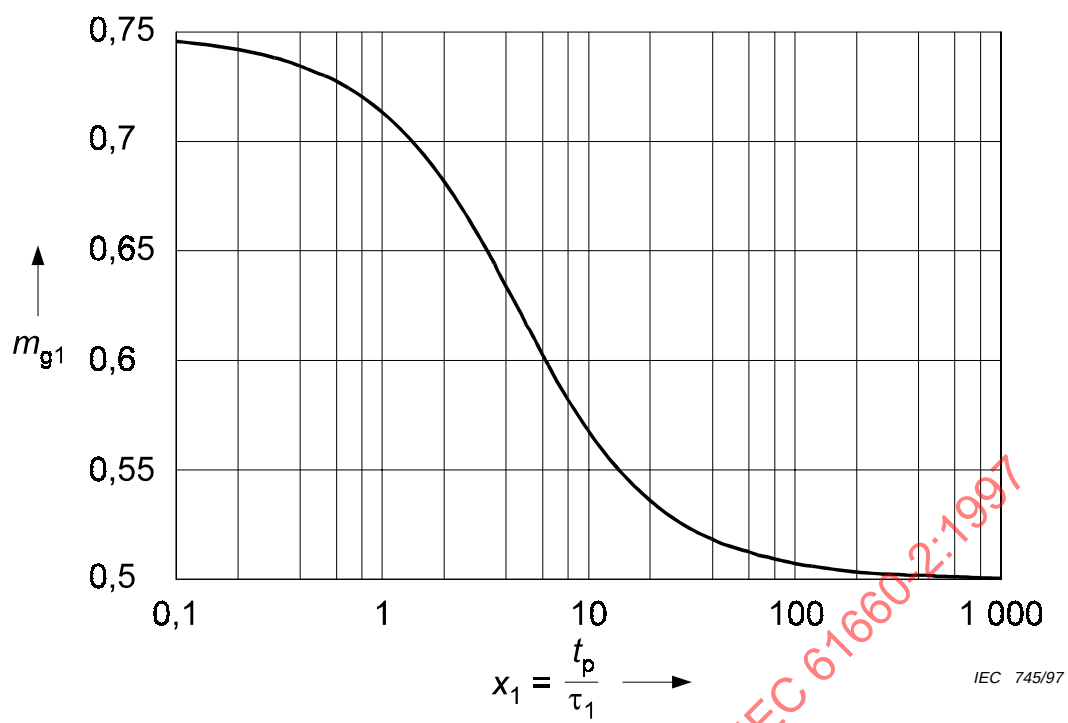
NOTE – For programming, the equations are given in annex A.

Figure 5 – Factors $m_{\theta 1}$ and $m_{\theta 2}$



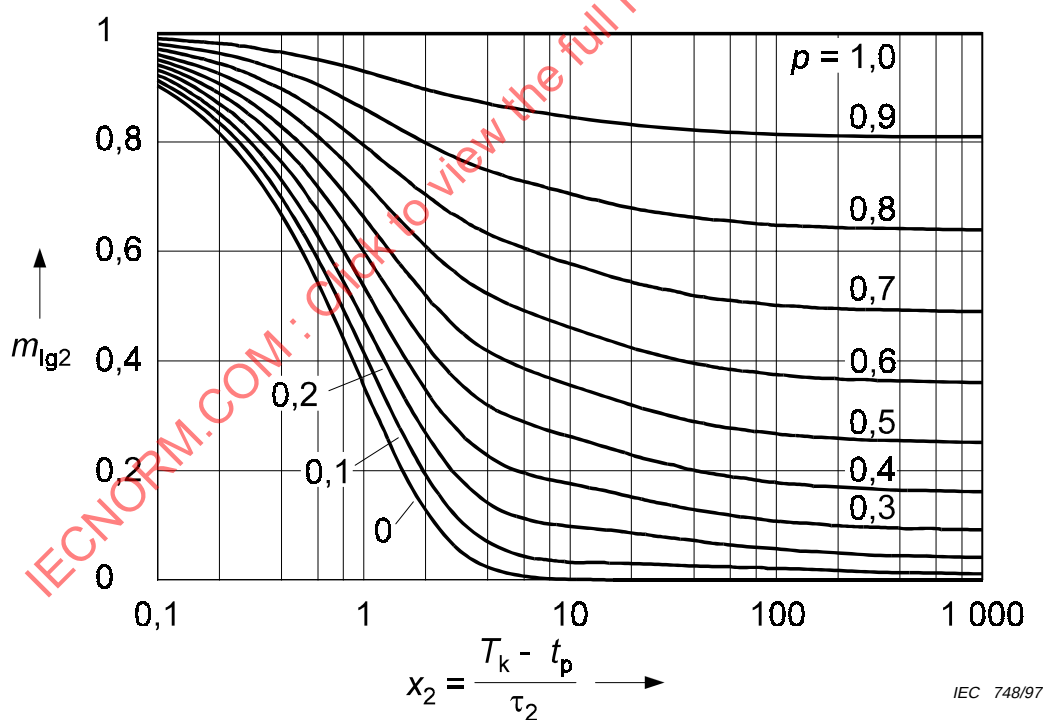
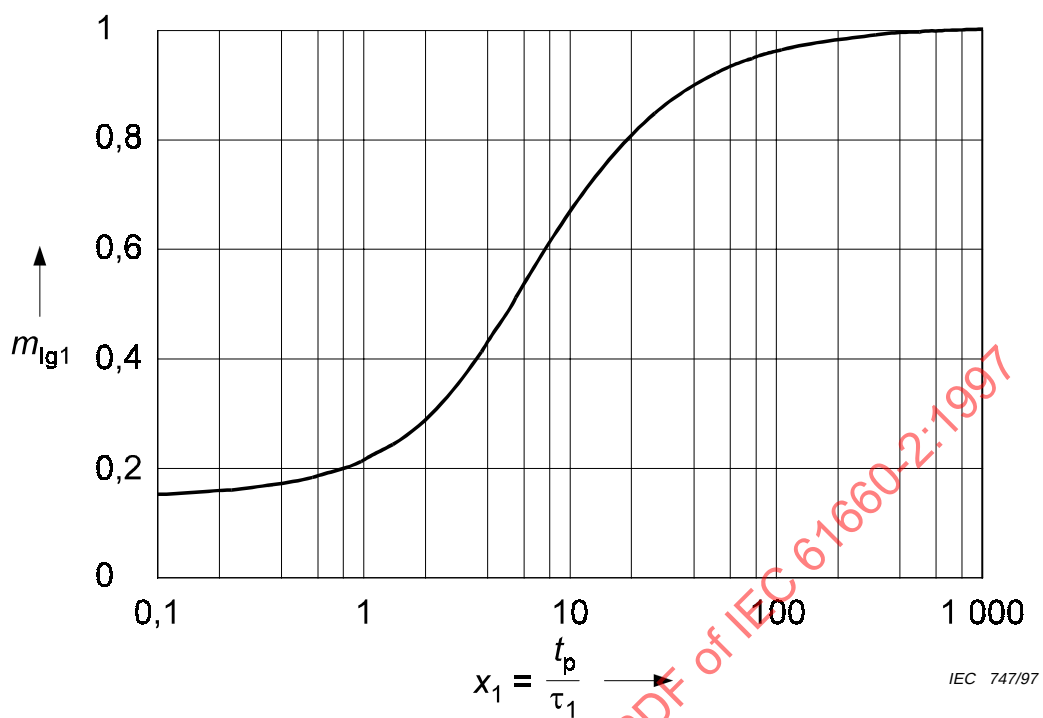
NOTE – Pour la programmation, les équations sont données à l'annexe A.

Figure 6 – Facteurs m_{g1} et m_{g2}



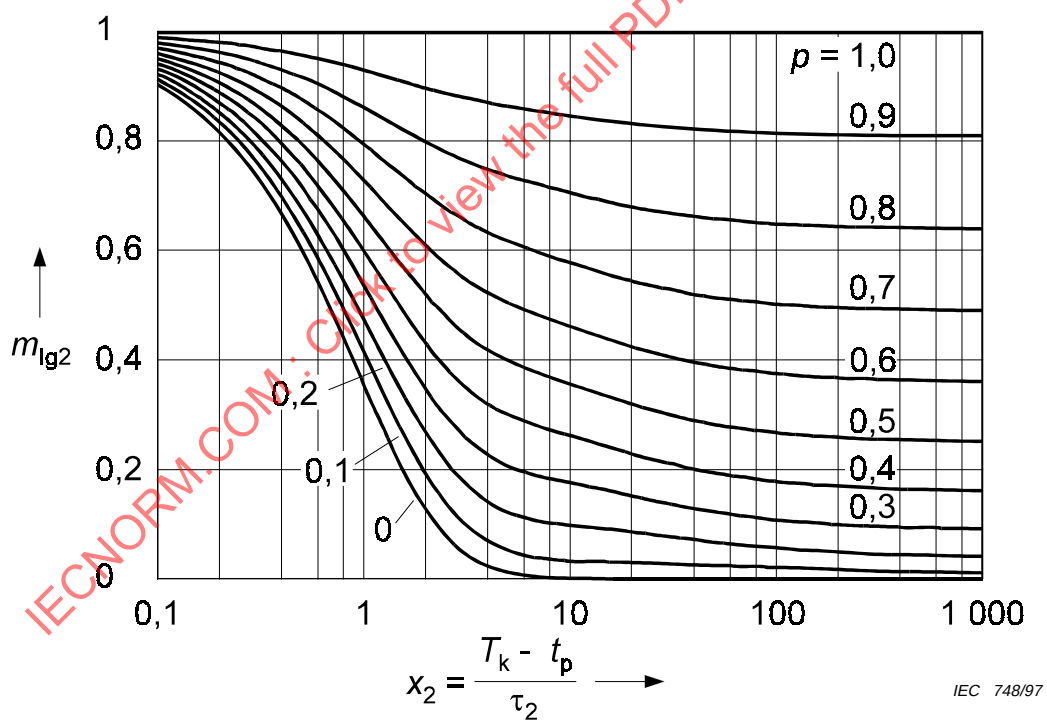
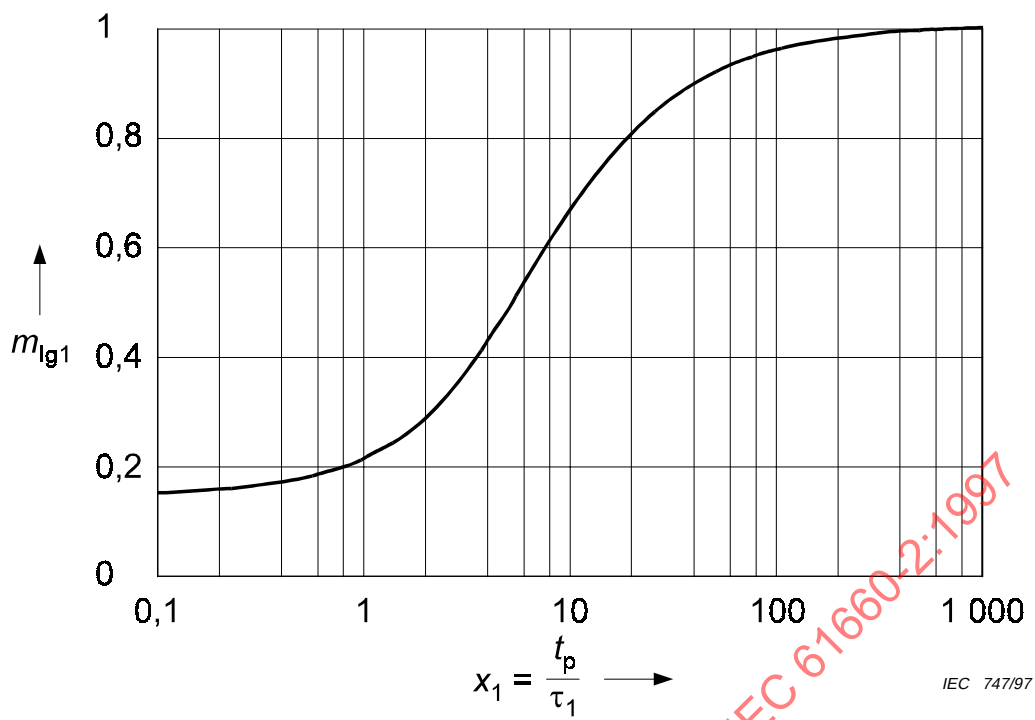
NOTE – For programming, the equations are given in annex A.

Figure 6 – Factors m_{g1} and m_{g2}



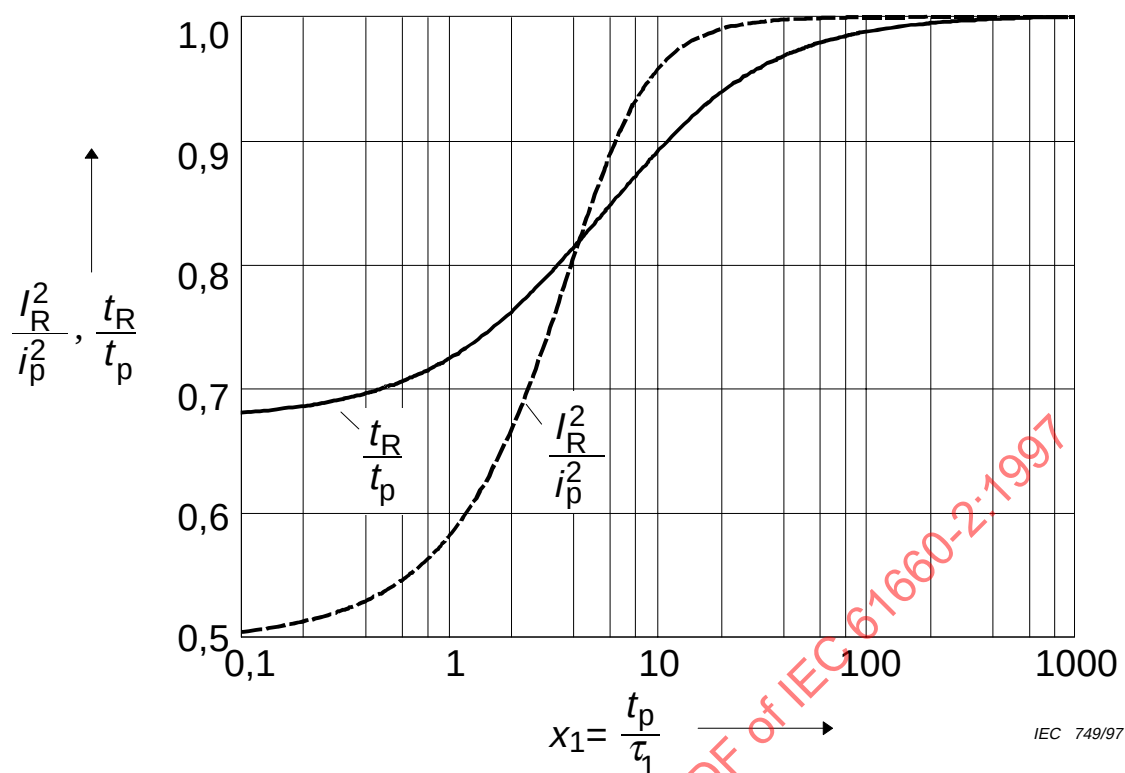
NOTE – Pour la programmation, les équations sont données à l'annexe A.

Figure 7 – Facteurs m_{lg1} et m_{lg2}



NOTE – For programming, the equations are given in annex A.

Figure 7 – Factors m_{lg1} and m_{lg2}



NOTE – Pour la programmation, les équations sont données à l'annexe A.

Figure 8 – Paramètres de la fonction de substitution rectangulaire pour le carré du courant prenant comme base un courant croissant de façon exponentielle