

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
287-1-2**

Première édition
First edition
1993-11

**Câbles électriques –
Calcul du courant admissible –**

Partie 1:

Equations de l'intensité du courant admissible
(facteur de charge 100 %) et calcul des pertes –

Section 2: Facteurs de pertes par courants de
Foucault dans les gaines dans le cas de deux
circuits disposés en nappe

**Electric cables –
Calculation of the current rating –**

Part 1:

Current rating equations (100 % load factor)
and calculation of losses –

Section 2: Sheath eddy current loss factors for
two circuits in flat formation



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 287-1-2: 1993

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 50: *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 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, 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 50: *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 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, 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
287-1-2**

Première édition
First edition
1993-11

**Câbles électriques –
Calcul du courant admissible –**

Partie 1:

Equations de l'intensité du courant admissible
(facteur de charge 100 %) et calcul des pertes –

Section 2: Facteurs de pertes par courants de
Foucault dans les gaines dans le cas de deux
circuits disposés en nappe

**Electric cables –
Calculation of the current rating –**

Part 1:

Current rating equations (100 % load factor)
and calculation of losses –

Section 2: Sheath eddy current loss factors for
two circuits in flat formation

© CEI 1993 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 pro-
cédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et
les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application	6
2 Références normatives	6
3 Symboles	8
4 Description de la méthode	10
4.1 Généralités	10
4.2 Grandes lignes de la méthode	10
4.3 Critères d'utilisation des formules et coefficients	14
5 Formules pour les facteurs de pertes dans les gaines de résistance élevée dans un circuit unique, λ_0	14
6 Calcul des coefficients H , N et J	14
6.1 Affectation des coefficients pour chaque câble, ordre de succession et identification des phases	14
6.2 Calcul des coefficients H (1, 2 et 3) tableau 1	18
6.3 Calcul des coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 et 6) tableau 2	20
6.4 Calcul des coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 et 6), tableaux 3 à 11	20
6.5 Calcul des coefficients G_s et g_s	24
7 Notes sur la transposition des câbles	24
8 Exemples de calcul des pertes par courants de Foucault	26
8.1 Introduction	26
8.2 Exemple 1	26
8.3 Exemple 2	28
Tableaux	38

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Scope	7
2 Normative references	7
3 Symbols	9
4 Description of method	11
4.1 General	11
4.2 Outline of method	11
4.3 Criteria for use of formulae and coefficients	15
5 Formulae for sheath loss factors for high-resistance sheaths in a single circuit, λ_0	15
6 Calculation of the coefficients H , N and J	15
6.1 Allocation of coefficients to each cable, time sequence and phase identification	15
6.2 Calculation of coefficients H (1, 2 and 3), table 1	19
6.3 Calculation of coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 and 6), table 2	21
6.4 Calculation of coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 and 6), tables 3 to 11	21
6.5 Calculation of coefficients G_s and g_s	25
7 Notes on transposition of cables	25
8 Worked examples of calculation of eddy current losses	27
8.1 Introduction	27
8.2 Example 1	27
8.3 Example 2	29
Tables	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes – Section 2: Facteurs de pertes par courants de Foucault dans les gaines dans le cas de deux circuits disposés en nappe

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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles 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.

La Norme internationale CEI 287-1-2 a été établie par le sous-comité 20A: Câbles de haute tension, du comité d'études 20 de la CEI: Câbles électriques.

La deuxième édition de la CEI 287 (1982) est en cours de révision et sera subdivisée en trois parties, chaque partie comprenant plusieurs sections publiées séparément. Au fur et à mesure que ces parties et ces sections seront publiées, elles annuleront et remplaceront les articles correspondants dans la deuxième édition de la CEI 287. Le nouveau titre de la CEI 287 est le suivant: Câbles électriques – Calcul du courant admissible.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
20A(BC)151	20A(BC)161

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRIC CABLES –
CALCULATION OF THE CURRENT RATING –****Part 1: Current rating equations
(100 % load factor) and calculation of losses –
Section 2: Sheath eddy current loss factors
for two circuits in flat formation**

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 cooperation 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, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use 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.

International Standard IEC 287-1-2 has been prepared by sub-committee 20A: High-voltage cables, of IEC technical committee 20: Electric cables.

The second edition of IEC 287 (1982) is being revised and will be sub-divided into parts, each part containing several sections and issued separately. As these parts and sections are published, they will supersede and replace the relevant clauses in the second edition of IEC 287. The new title of IEC 287 is: Electric cables – Calculation of the current rating.

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

DIS	Report on voting
20A(CO)151	20A(CO)161

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

CÂBLES ÉLECTRIQUES – CALCUL DU COURANT ADMISSIBLE –

Partie 1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calcul des pertes –

Section 2: Facteurs de pertes par courants de Foucault dans les gaines dans le cas de deux circuits disposés en nappe

1 Domaine d'application

La présente section de la CEI 287-1 présente une méthode de calcul des pertes par courants de Foucault dans les gaines métalliques dans le cas de câbles unipolaires disposés en nappe en double circuit triphasé. Les gaines sont court-circuitées en un point ou sont permutées de manière qu'il n'y ait pas de courants de circulation notables dans les gaines. Lorsque les gaines métalliques sont court-circuitées aux deux extrémités, il se produit des courants de circulation notables qui entraînent une réduction du courant permanent admissible. Une méthode de calcul des pertes par courants de circulation dans le cas d'un double circuit est à l'étude.

Cette méthode donne des coefficients de correction à appliquer aux facteurs de pertes dans le cas des gaines d'un circuit triphasé isolé. Ces corrections sont négligeables pour les câbles où le paramètre m est inférieur à environ 0,1 ($m = \omega/10^7 R_s$), ce qui correspond à une résistance longitudinale de la gaine supérieure à 314 $\mu\Omega/m$ à 50 Hz.

Par conséquent, il convient d'utiliser cette méthode pour la plupart des sections de câbles à gaine en aluminium, mais il n'est pas nécessaire de l'appliquer aux câbles à gaine de plomb, à moins qu'ils ne soient très gros.

Les coefficients sont donnés sous forme de tableaux et ont été calculés à partir de formules fondamentales pour les pertes dans les gaines, dont l'évaluation nécessite une compétence en matière de programmation sur ordinateur parfois difficile à obtenir dans des situations commerciales courantes. Le développement de formules simplifiées pour certains coefficients donnés sous forme de tableaux est à l'étude.

Les pertes dans le cas de câbles en circuit unique seront couvertes dans la CEI 287-1-1 (à l'étude).

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 section de la CEI 287-1. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente section de la CEI 287-1 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 287: 1982, *Calcul de courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100 %)*

ELECTRIC CABLES – CALCULATION OF THE CURRENT RATING –

Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 2: Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation

1 Scope

This section of IEC 287-1 provides a method for calculating the eddy current losses in the metallic sheaths of single-core cables arranged as a three-phase double circuit in flat formation. The sheaths are bonded at one point or are cross-bonded so that there are no significant sheath circulating currents. Where metallic sheaths are bonded at both ends there are significant circulating currents which result in a lower current-carrying capacity. A method of calculating circulating current losses for double circuits is under consideration.

The method provides coefficients which are applied as corrections to the loss factors for the sheaths of one isolated three-phase circuit. These corrections are negligible for cables where the parameter m is less than about 0,1 ($m = \omega/10^7 R_s$), which corresponds to a sheath longitudinal resistance higher than $314 \mu\Omega/\text{m}$ at 50 Hz.

Consequently the method should be used for most sizes of aluminium-sheathed cables, but is not required for lead-sheathed cables unless they are unusually large:

The coefficients are provided in tabular form and have been computed from fundamental formulae for sheath losses, the evaluation of which calls for expertise in computer programming which might not be readily available in general commercial situations. The development of simplified formulae for some of the tabulated coefficients is under consideration.

Losses for cables in a single circuit will be covered in IEC 287-1-1 (under consideration).

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this section of IEC 287-1. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this section of IEC 287-1 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 287: 1982, *Calculation of the continuous current rating of cables (100 % load factor)*

CEI 287-1-1: 199X, *Câbles électriques – Calcul du courant admissible – Partie 1: Equations de l'intensité du courant admissible (facteur de charge 100 %) et calculs des pertes – Section 1: (à l'étude)*

3 Symboles

Les symboles utilisés dans la présente section de la CEI 287-1 et les grandeurs qu'ils représentent sont donnés dans la liste suivante. Quelques-uns des symboles utilisés dans cette section peuvent être utilisés pour représenter des grandeurs différentes dans d'autres sections de la CEI 287.

A, B, C, D sont les coefficients utilisés dans le calcul par interpolation de H et J

D_s est le diamètre extérieur de la gaine métallique (mm)

D_{it} est le diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des creux (mm)

D_{oc} est le diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des crêtes (mm)

G_s est le coefficient représentant les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues au courant dans l'âme

R est la résistance électrique de l'âme en courant alternatif à sa température maximale de service (Ω/m)

R_s est la résistance de la gaine (Ω/m)

S, T, U, V sont les coefficients utilisés dans le calcul par interpolation de J

c est la distance entre les centres des câbles dans des circuits adjacents (voir figure 1) (mm)

d est le diamètre moyen de la gaine (mm)

f est la fréquence du réseau (Hz)

g_s est le coefficient représentant les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues au courant dans les câbles adjacents

m égale $\frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7}$

s est la distance entre les centres d'un câble d'un même circuit (mm)

t_s est l'épaisseur de la gaine (mm)

y égale $\frac{s}{c}$

z égale $\frac{d}{2s}$

β_1 est le coefficient utilisé en 6.5

λ_0 est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance élevée, dans un circuit unique

λ'_1 est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance faible, dans un circuit unique

λ'_{1d} est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance faible, dans un double circuit

IEC 287-1-1: 199X, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 1: (under consideration)*

3 Symbols

The symbols used in this section of IEC 287-1 and the quantities they represent are given in the following list. Some of the symbols used in this section may be used to represent different quantities in other section of IEC 287.

A, B, C, D are coefficients used to interpolate for H and J

D_s is the external diameter of the metal sheath (mm)

D_{it} is the diameter of the imaginary cylinder which just touches the inside surface of the troughs of a corrugated sheath (mm)

D_{oc} is the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the crests of a corrugated sheath (mm)

G_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath due to the current in the conductor

R is the alternating current resistance of the conductor at its maximum operating temperature (Ω/m)

R_s is the resistance of the sheath (Ω/m)

S, T, U, V are the coefficients used to interpolate for J

c is the distance between centres of cables in adjoining circuits (see figure 1) (mm)

d is the mean diameter of the sheath (mm)

f is the system frequency (Hz)

g_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath, due to currents in adjacent cables

m is equal to $\frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7}$

s is the distance between centres of cables in the same circuit (mm)

t_s is the thickness of the sheath (mm)

y is equal to $\frac{s}{c}$

z is equal to $\frac{d}{2s}$

β_1 is the coefficient used in 6.5

λ_0 is the sheath loss factor for a high-resistance sheath in a single circuit

λ_1'' is the sheath loss factor for a low-resistance sheath in a single circuit

λ_{1d}'' is the sheath loss factor for a low-resistance sheath in a double circuit

- ρ_s est la résistivité électrique du matériau de la gaine à la température de service ($\Omega \cdot m$)
- ω est la pulsation (fréquence angulaire $2\pi f$) (1/s)

4 Description de la méthode

4.1 Généralités

La méthode est utilisée de manière similaire à celle utilisée pour les circuits uniques dans la section 1 de la CEI 287-1-1. Là, les formules proposées pour les facteurs de pertes applicables à des gaines de résistance linéique longitudinale telle que m est inférieur à 0,1 ($R_s = 314 \mu\Omega/m$ à 50 Hz) sont données avec des formules empiriques permettant de calculer les coefficients de correction pour les gaines de résistance moins élevée.

Cependant, dans le cas d'un double circuit, ces formules empiriques précises, couvrant la gamme complète de coefficients, devraient contenir un si grand nombre de termes qu'elles ne présenteraient que peu ou pas d'avantage par rapport aux coefficients précis donnés sous forme de tableaux, avec possibilité d'interpolation. Cette dernière solution offre l'avantage que la précision des facteurs de pertes peut être sensiblement égale à celle des calculs d'origine et est supérieure à 1 %.

Le développement de formules empiriques pour une gamme limitée de coefficients est à l'étude.

Afin d'expliquer la méthode, celle-ci est décrite ci-après d'une manière adaptée à une réalisation manuelle des calculs. Mais, étant donné la longueur des calculs à effectuer pour obtenir les facteurs de pertes pour six câbles, ceux-ci seront généralement effectués par ordinateur. Dans ces conditions, il est tout à fait justifié d'interpoler (le cas échéant) entre les valeurs figurant dans les tableaux.

Cependant, dans bien des cas, les valeurs des paramètres correspondants seront telles que l'interpolation ne sera pas nécessaire ou sera réalisable avec une précision suffisante par simple examen.

Les mêmes formules que celles utilisées dans la CEI 287-1-1, peuvent servir à tenir compte de l'effet des courants de Foucault circulant dans l'épaisseur de la gaine.

4.2 Grandes lignes de la méthode

Le facteur de perte dans la gaine d'un câble donné, dans un circuit double posé en nappe (voir figure 1), est évalué comme suit:

$$\lambda''_{1d} = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ à } 3) \cdot N(1 \text{ à } 6) \cdot J(1 \text{ à } 6) \cdot g_s + G_s] \quad (1)$$

où

λ''_{1d} est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance faible, dans un double circuit;

λ_0 est le facteur de perte de la gaine pour une gaine à résistance élevée, dans un circuit unique;

ρ_s is the electrical resistivity of sheath material at operating temperature ($\Omega \cdot m$)

ω is the angular frequency of system ($2\pi f$) (1/s)

4 Description of method

4.1 General

The method proceeds in a way similar to that used for single circuits in IEC 287-1-1. There, formulae for loss factors applicable to sheaths having a longitudinal resistance such that m is less than 0,1 ($R_s = 314 \mu\Omega/m$ at 50 Hz) are given, together with empirical formulae to calculate the correction coefficient for lower resistance sheaths.

However, for double circuits, accurate empirical formulae covering the complete range of coefficients would need to contain so many terms that their use would show little or no advantage over the use of precise, tabulated coefficients with interpolation, as necessary. This latter course has the advantage that the accuracy of the loss factors can be closely equal to that of the original calculations and is better than 1 %.

The development of empirical formulae for a limited range of coefficients is under consideration.

In order to explain the method, it is described here in a way appropriate to manual evaluation of the arithmetic. However, because of the appreciable effort required to provide loss factors for six cables, it is to be expected that calculations will usually be effected by means of a computer. Under these circumstances, the decision to use interpolation (as necessary) between tabulated values is fully justified.

However, in many cases, values of the relevant parameters will be such that interpolation is unnecessary or may be accomplished with sufficient accuracy by inspection.

Corrections to cover the effect of eddy currents circulating within the thickness of a sheath are derived with the use of the same formulae as those used in IEC 287-1-1.

4.2 Outline of method

The loss factor for the sheath of a given cable in a double-circuit flat formation (see figure 1) is evaluated as follows:

$$\lambda''_{1d} = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ to } 3) \cdot N(1 \text{ to } 6) \cdot J(1 \text{ to } 6) \cdot g_s + G_s] \quad (1)$$

where

λ''_{1d} is the sheath loss factor for a low-resistance sheath in a double circuit;

λ_0 is the sheath loss factor for a high-resistance sheath in a single circuit;

- H (1 à 3) sont les coefficients de correction de la résistance de la gaine, se rapportant aux câbles 1, 2 ou 3 dans un circuit unique;
- N (1 à 6) sont les coefficients introduisant les influences mutuelles entre les circuits et dépendant de ce fait de l'ordre de succession des phases dans les câbles 1 à 3 et 4 à 6;
- J (1 à 6) sont les coefficients dépendant de la position des câbles 1 à 3 et 4 à 6, dans chaque circuit;
- g_s est le coefficient qui représente les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues aux courants dans les câbles adjacents;
- G_s est le coefficient qui représente les pertes par courants de Foucault dans l'épaisseur de la gaine, dues au courant dans l'âme.

Les rôles joués par les coefficients N et J ne sont pas directement liés à une fonction physique, mais ils ont été choisis pour simplifier la mise sous forme de tableaux. La nomenclature est arbitraire.

Les valeurs de H , N et J sont obtenues à partir des tableaux 1 à 11 et sont choisies en fonction des paramètres suivants, ainsi que de la position du câble et de l'ordre de succession des intensités de courant dans les âmes.

$$m = \frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7} \quad \omega = 2\pi f$$

où

f est la fréquence du réseau (Hz);

R_s est la résistance de la gaine à la température de fonctionnement (Ω/m);

$$z = \frac{d}{2s}$$

où

s est la distance entre les centres des câbles d'un même circuit (mm);

d est le diamètre moyen d'une gaine (mm);

$$y = \frac{s}{c}$$

où

c est la distance entre les centres des câbles dans des circuits adjacents (voir figure 1) (mm).

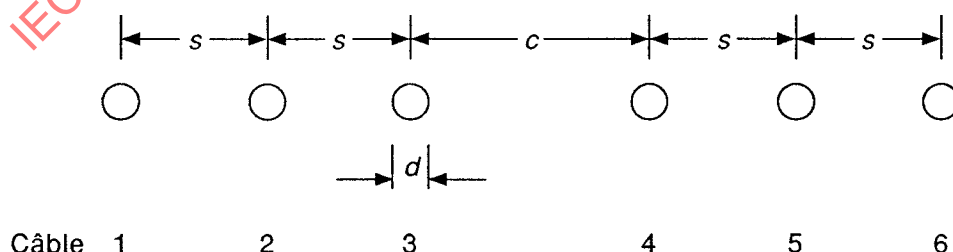


Figure 1 – Configuration de câbles

- H (1 to 3) are the coefficients which correct for sheath resistance, the values obtained relate to cables 1, 2 or 3 in a single circuit;
- N (1 to 6) are the coefficients which introduce the mutual influences between circuits and are therefore dependent on the relative phase sequences of cables 1 to 3 and 4 to 6;
- J (1 to 6) are the coefficients which depend on the cable positions 1 to 3 and 4 to 6 in each circuit;
- g_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath, due to currents in adjacent cables;
- G_s is the coefficient which accounts for losses due to eddy currents across the thickness of the sheath, due to the current in the conductor.

The tasks performed by coefficients N and J are not directly related to any physical function, but have been selected to simplify the tabulation. The nomenclature is arbitrary.

Values of H , N and J are obtained from tables 1 to 11 and are chosen according to the following parameters together with the position of the cable and the phase sequence of the currents in the conductors.

$$m = \frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7} \quad \omega = 2\pi f$$

where

f is the system frequency (Hz);

R_s is the sheath resistance at operating temperature (Ω/m);

$$z = \frac{d}{2s}$$

where

s is the distance between centres of cables in the same circuit (mm);

d is the mean diameter of a sheath (mm);

$$y = \frac{s}{c}$$

where

c is the distance between centres of cables in adjoining circuits (see figure 1) (mm).

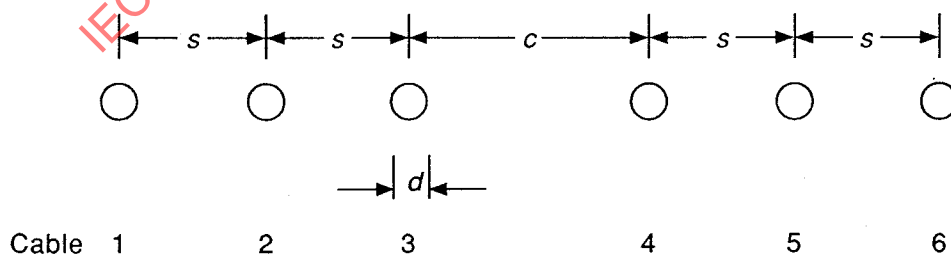


Figure 1 – Cable configuration

NOTE – Pour un circuit unique, avec des gaines de faibles résistances, les facteurs peuvent être obtenus en utilisant uniquement les coefficients H (1, 2 et 3), comme suit:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ à } 3) \cdot g_s + G_s]$$

4.3 Critères d'utilisation des formules et coefficients

Pour les gaines dont la valeur de m est inférieure à 0,1, ce qui est applicable à la plupart des câbles à gaine de plomb, on peut supposer les coefficients H , N , J et g_s égaux à l'unité et G_s égal à zéro. Dans ces conditions, λ_0 peut être utilisé sans correction pour les circuits doubles.

Lorsque la valeur de m est égale ou supérieure à 0,1, ce qui est généralement le cas de tous les câbles à l'exception des câbles de petites dimensions à gaine en aluminium, il faut calculer les valeurs de H , N , J et g_s . Le coefficient G_s n'est important que lorsque la valeur de m est égale ou supérieure à l'unité.

5 Formules pour les facteurs de pertes dans les gaines de résistance élevée dans un circuit unique, λ_0

Le facteur de pertes dans les gaines λ_0 est donné par

$$\lambda_0 = C \frac{m^2}{(1 + m^2)} \left[\frac{d}{2s} \right]^2 \quad (2)$$

Pour trois câbles unipolaires posés en nappe, le coefficient C est donné par:

Câble	Coefficient C
Câble central	6
Câbles extérieurs	1,5

6 Calcul des coefficients H , N et J

6.1 Affectation des coefficients pour chaque câble, ordre de succession et identification des phases

Il est important de noter la façon dont les coefficients H , N et J dépendent de l'ordre de succession des intensités de courant et de la position physique des âmes.

Les câbles doivent être numérotés selon la figure 1.

Les coefficients H (1, 2 et 3), tableau 1, sont affectés en fonction de l'ordre de succession des intensités et associés à la position des câbles, de sorte que les dispositions de circuit unique suivantes aient la même séquence temporelle:

Numéro de câble	1	2	3
Séquence	R	S	T
ou	S	T	R
ou	T	R	S
avec les coefficients	H_1	H_2	H_3

NOTE – The factors for a single circuit having low-resistance sheaths can be obtained by using the coefficients H (1, 2 and 3) only, as follows:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} [\lambda_0 \cdot H(1 \text{ to } 3) \cdot g_s + G_s]$$

4.3 Criteria for use of formulae and coefficients

For sheaths for which the value of m is less than 0,1, which includes most lead-sheathed cables, it may be assumed that the coefficients H , N , J and g_s are unity and G_s is zero. In such circumstances, λ_0 may be used for twin circuits without correction.

When the value of m is equal to 0,1 or greater, which is generally the case for all but the smaller aluminium-sheathed cables, values for H , N , J and g_s shall be calculated. The coefficient G_s is important only when the value of m is 1,0 or higher.

5 Formulae for sheath loss factors for high-resistance sheaths in a single circuit, λ_0

The sheath loss factor λ_0 is given by

$$\lambda_0 = C \frac{m^2}{(1 + m^2)} \left[\frac{d}{2s} \right]^2 \quad (2)$$

For three single-core cables in flat formation, the coefficient C is given by:

Cable	Coefficient C
Centre cable	6
Outer cables	1,5

6 Calculation of the coefficients H , N and J

6.1 Allocation of coefficients to each cable, time sequence and phase identification

It is important to note the way in which the coefficients H , N and J are dependent on the time sequence of the currents and the physical position of the conductors.

The cables shall be numbered according to figure 1.

The coefficients H (1, 2 and 3), table 1, are allocated on a basis of time sequence associated with the positions of the cables, so that the following single-circuit arrangements have the same time sequence:

Cable number	1	2	3
Sequence	R	S	T
or	S	T	R
or	T	R	S
with coefficients	H_1	H_2	H_3

Dans l'exemple ci-dessus, le câble 1 est toujours le conducteur extérieur d'une phase en avance et correspond au coefficient H_1 . Le câble 3 est le conducteur extérieur d'une phase en retard et correspond au coefficient H_3 .

Dans les cas ci-dessus, on notera que l'identification des phases indiquée par les symboles R, S et T* n'est pas importante, tandis que seul, l'ordre de succession est important.

Dans des doubles circuits, si l'un ou l'autre des circuits a un ordre de succession inverse, les valeurs de H doivent être attribuées au câble selon un ordre inversé. L'affectation du coefficient H dépend de l'ordre de succession dans chaque circuit.

Dans une configuration en double circuit, l'identification des phases indiquée par les symboles est importante dans la mesure où cette identification par rapport à la position des câbles dans un circuit unique doit être dans l'autre circuit soit identique, séquence directe, soit être une image obtenue par réflexion dans un miroir, séquence inverse.

Deux jeux de coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 et 6) correspondant aux séquences directe et inverse sont donnés dans le tableau 2. Si les positions des câbles sont repérées de façon séquentielle et si l'on se conforme aux règles d'identification des phases, les coefficients sont affectés sur la même base que le coefficient H . Il convient de noter que les valeurs pour les câbles 4, 5 et 6 dans la séquence inverse constituent la réflexion des valeurs pour les câbles 1, 2 et 3.

Le nombre de paramètres d'entrée impliqués pour les coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 et 6) nécessite l'utilisation de plusieurs tableaux. Les tableaux 3 à 8 concernent l'installation en séquence directe pour chaque câble. Les tableaux 9 à 11 concernent la séquence inverse et les coefficients pour les câbles 1 à 3 sont également utilisés pour les câbles 6 à 4, dans cet ordre. L'affectation des coefficients figure sur les mêmes lignes que pour le coefficient N .

Les tableaux suivants donnent des exemples pour quatre cas courants:

Séquence directe

Numéro de câble	1	2	3	4	5	6	
Ordre de succession	R	S	T	R	S	T	
Affectation H	H_1	H_2	H_3	H_1	H_2	H_3	tableau 1
Affectation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	tableau 2/directe
Affectation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tableaux 3 à 8/directe

Séquence inverse

Numéro de câble	1	2	3	4	5	6	
Ordre de succession	T	S	R	T	S	R	
Affectation H	H_3	H_2	H_1	H_3	H_2	H_1	tableau 1
Affectation N	N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	tableau 2/directe
Affectation J	J_6	J_5	J_4	J_3	J_2	J_1	tableaux 3 à 8/directe

* Les lettres R, S, T sont utilisées ici par commodité et sont équivalentes à d'autres jeux de symboles connus pour indiquer l'ordre de succession et l'identification des phases, tels que L_1, L_2, L_3 ; a, b, c; R, Y, B; etc.

In the above example, cable 1 is always the outer conductor on a leading phase and takes coefficient H_1 . Cable 3 is the outer conductor on a lagging phase and takes coefficient H_3 .

It will be seen that, for these cases, the phase identification implied by the symbols R, S and T* is not important, it is only the time sequence which is of significance.

In double circuits, if either circuit has a reversed sequence, the values of H must be allocated to the cables in the reverse order. The allocation of coefficient H is dependent on the time sequence within each circuit.

In a double-circuit configuration, the phase identification implied by the symbols is significant to the extent that the phase identification in relation to cable position in one circuit must be either the same as, in the forward sequence, or a mirror image of, in the reverse sequence, that in the other.

Two sets of coefficients N (1, 2, 3, 4, and 6) are given in table 2 corresponding to the forward and reverse sequences. If the cable positions are labelled sequentially and the phase identification rules are adhered to, the coefficients are allocated on the same basis as coefficient H . Note that the values for cables 4, 5 and 6 in the reversed sequence are a reflection of the values for cables 1, 2 and 3.

The number of input parameters involved for the coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 and 6) makes it desirable to use several tables. Tables 3 to 8 are for each cable for the forward sequence installation. For the reverse sequence, tables 9 to 11 are provided and the coefficients for cables 1 to 3 are also used for cables 6 to 4, in that order. The allocation is on the same lines as those for coefficient N .

The following tables give examples of four common cases:

Forward sequence

Cable number	1	2	3	4	5	6	
Sequence	R	S	T	R	S	T	
Allocation H	H_1	H_2	H_3	H_1	H_2	H_3	table 1
Allocation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	table 2, forward
Allocation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tables 3 to 8, forward

Forward sequence

Cable number	1	2	3	4	5	6	
Sequence	T	S	R	T	S	R	
Allocation H	H_3	H_2	H_1	H_3	H_2	H_1	table 1
Allocation N	N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	table 2, forward
Allocation J	J_6	J_5	J_4	J_3	J_2	J_1	tables 3 to 8, forward

* The letters R, S, T are used here for convenience and are equivalent to other well-known sets of symbols to denote time sequence and phase identification, such as L_1, L_2, L_3 ; a, b, c; R, Y, B; etc.

Séquence inverse

Numéro de câble	1	2	3	4	5	6	
Ordre de succession	R	S	T	T	S	R	
Affectation H	H_1	H_2	H_3	H_3	H_2	H_1	tableau 1
Affectation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	tableau 2/inverse
Affectation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tableaux 9 à 11/inverse

Séquence inverse

Numéro de câble	1	2	3	4	5	6	
Ordre de succession	T	S	R	R	S	T	
Affectation H	H_1	H_2	H_3	H_3	H_2	H_1	tableau 1
Affectation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	tableau 2/inverse
Affectation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tableaux 9 à 11/inverse

6.2 Calcul des coefficients H (1, 2 et 3) tableau 1

Chacun des coefficients H est obtenu à partir du tableau 1 en utilisant les paramètres m et z et la position de chaque câble (voir 6.1).

Lorsque les valeurs de m et z nécessitent une interpolation entre les valeurs du tableau 1, on peut utiliser la procédure suivante, dans les cas où l'interpolation par examen n'est pas souhaitable.

Les valeurs H (a, b, c, d) sont obtenues à partir de la partie appropriée du tableau 1, comme l'indique le tableau suivant:

	z_0	z	z_1
m_0	H_a		H_c
m		H	
m_1	H_b		H_d

où m_0 , m_1 , z_0 et z_1 sont des valeurs du tableau inférieures et supérieures aux valeurs de m et z .

Mettre sous forme de tableau:

m_0	
m_1	$M = (m_1 - m_0)$
z_0	
z_1	$Z = (z_1 - z_0)$
H_a	
H_b	
H_c	
H_d	

Reverse sequence

Cable number	1	2	3	4	5	6	
Sequence	R	S	T	T	S	R	
Allocation H	H_1	H_2	H_3	H_3	H_2	H_1	table 1
Allocation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	table 2, reverse
Allocation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tables 9 to 11, reverse

Reverse sequence

Cable number	1	2	3	4	5	6	
Sequence	T	S	R	R	S	T	
Allocation H	H_1	H_2	H_3	H_3	H_2	H_1	table 1
Allocation N	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	table 2, reverse
Allocation J	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	tables 9 to 11, reverse

6.2 Calculation of coefficients H (1, 2 and 3), table 1

Each coefficient H is obtained from table 1 using the parameters m and z as well as the position of each cable (see 6.1).

When values of m and z involve interpolation between values in table 1, the following procedure may be used where interpolation by inspection is not desired.

From the relevant part of table 1, values for H (a, b, c, d) are obtained as shown in the following diagram:

	z_0	z	z_1
m_0	H_a		H_c
m		H	
m_1	H_b		H_d

where m_0 , m_1 , z_0 and z_1 are tabulated values smaller and larger than the values of m and z .

Tabulate:

m_0

m_1

z_0

z_1

H_a

H_b

H_c

H_d

$$M = (m_1 - m_0) \dots\dots\dots$$

$$Z = (z_1 - z_0) \dots\dots\dots$$

On a alors:

$$A = H_a = \dots\dots\dots$$

$$B = (H_b - H_a)/M = \dots\dots\dots$$

$$C = (H_c - H_a)/Z = \dots\dots\dots$$

$$D = (H_d + H_a - H_c - H_b)/M.Z = \dots\dots\dots$$

Faire le total de:

$$A = \dots\dots\dots$$

$$+ B \cdot (m - m_0) = \dots\dots\dots$$

$$+ C \cdot (z - z_0) = \dots\dots\dots$$

$$+ D \cdot (m - m_0) \cdot (z - z_0) = \dots\dots\dots$$

$$\text{Coefficient } H = \text{total} = \dots\dots\dots$$

Ce processus peut être répété pour chacun des trois câbles d'un circuit pour obtenir H_1 , H_2 et H_3 .

6.3 Calcul des coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 et 6), tableau 2

Les valeurs du coefficient N sont obtenues à partir du tableau 2, en utilisant le paramètre y pour chaque câble. Le tableau indique des valeurs pour les ordres de succession directe et inverse. On notera que dans ce dernier cas les coefficients pour les câbles 4, 5 et 6 forment une image inverse de ceux des câbles 1 à 3.

Si une interpolation s'avère nécessaire, on utilisera une interpolation linéaire unidimensionnelle.

6.4 Calcul des coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 et 6), tableaux 3 à 11

Les valeurs du coefficient J pour chaque câble sont obtenues à partir des tableaux 3 à 11, suivant l'ordre de succession des intensités et les paramètres m , z et y .

Les tableaux 3 à 8 sont applicables aux six câbles lorsque les intensités de courant dans les âmes suivent l'ordre de succession direct. Mais, dans un ordre de succession inverse les tableaux 9 à 11 sont applicables aux câbles 1 à 3 et aux câbles 6 à 4, dans cet ordre.

L'interpolation entre les trois paramètres d'entrée peut s'avérer nécessaire et on peut utiliser le schéma suivant pour une interpolation tridimensionnelle.

Les tableaux concernant chaque câble sont disposés en groupes, un pour chaque valeur du paramètre y . On peut choisir deux groupes, l'un pour une valeur de y plus petite que la valeur d'entrée et l'autre, pour une valeur plus grande. Pour chaque groupe, des valeurs de J (a à d) et J (e à f) sont nécessaires (de façon similaire à l'interpolation faite pour H) ainsi qu'il est indiqué dans les tableaux suivants.

	z_0	z	z_1
m_0	J_a		J_c
m		*	
m_1	J_b		J_d

Groupe pour y_0

	z_0	z	z_1
m_0	J_e		J_g
m		*	
m_1	J_f		J_h

Groupe pour y_1

Then:

$$A = H_a = \dots\dots\dots$$

$$B = (H_b - H_a)/M = \dots\dots\dots$$

$$C = (H_c - H_a)/Z = \dots\dots\dots$$

$$D = (H_d + H_a - H_c - H_b)/M.Z = \dots\dots\dots$$

Add together:

$$A = \dots\dots\dots$$

$$+ B \cdot (m - m_0) = \dots\dots\dots$$

$$+ C \cdot (z - z_0) = \dots\dots\dots$$

$$+ D \cdot (m - m_0) \cdot (z - z_0) = \dots\dots\dots$$

$$\text{Coefficient } H = \text{total} = \dots\dots\dots$$

This process is to be repeated for each of the three cables in a circuit to obtain H_1 , H_2 and H_3 .

6.3 Calculation of coefficients N (1, 2, 3, 4, 5 and 6), table 2

Values of coefficient N are obtained from table 2, using parameter y for each cable. The table has values for the forward and reverse sequences. Note that in the latter case the coefficients for cables 4, 5 and 6 form a mirror image of those for cables 1 to 3.

Where interpolation is required, a linear one-dimensional interpolation is adequate.

6.4 Calculation of coefficients J (1, 2, 3, 4, 5 and 6), tables 3 to 11

Values of coefficient J for each cable are obtained from tables 3 to 11, according to the sequence of the currents and the parameters m , z and y .

Tables 3 to 8 apply to the six cables when the currents in the conductors follow the forward sequence. But, in a reversed sequence, tables 9 to 11 apply to cables 1 to 3 and also to cables 6 to 4, in that order.

It may be that interpolation between all three input parameters is necessary and the following scheme for a three-dimensional interpolation may be used.

The tables for each cable are arranged in groups, one for each value of the parameter y . Two groups can be chosen, one for a value of y smaller, and one for a value larger, than the input value. For each group, values of J (a to d) and J (e to h) are required (in a similar way to the interpolation for H), as shown in the following diagrams.

	z_0	z	z_1
m_0	J_a		J_c
m		*	
m_1	J_b		J_d

Group for y_0

	z_0	z	z_1
m_0	J_e		J_g
m		*	
m_1	J_f		J_h

Group for y_1

Une interpolation entre les valeurs marquées * donne la valeur requise de J pour chaque câble.

Les calculs peuvent se formuler comme suit:

y_0	z_0	m_0	J_a
		m_1	J_b
	z_1	m_0	J_c
		m_1	J_d
y_1	z_0	m_0	J_e
		m_1	J_f
	z_1	m_0	J_g
		m_1	J_h

$$M = (m_1 - m_0) \dots\dots\dots Z = (z_1 - z_0) \dots\dots\dots Y = (y_1 - y_0) \dots\dots\dots$$

$$m' = (m - m_0) \dots\dots\dots z' = (z - z_0) \dots\dots\dots y' = (y - y_0) \dots\dots\dots$$

Calculer:

$$A = J_a \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$B = (J_b - J_a) / M \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$C = (J_c - J_a) / Z \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$D = (J_e - J_a) / Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$S = [(J_a + J_d) - (J_b + J_c)] / M \cdot Z \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$T = [(J_a + J_g) - (J_c + J_e)] / Z \cdot Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$U = [(J_a + J_f) - (J_b + J_e)] / M \cdot Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$V = [(J_b + J_c + J_e + J_h) - (J_a + J_d + J_f + J_g)] / M \cdot Z \cdot Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

Ajouter ensuite ce qui suit:

$$A \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$B \cdot m' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$C \cdot z' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$D \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$S \cdot m' \cdot z' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$T \cdot z' \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$U \cdot m' \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$V \cdot m' \cdot z' \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$J = \text{total} \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

Les valeurs J pour chacun des cinq autres câbles s'obtiennent de la même manière.

Interpolation between the values marked * gives the required value of J for each cable.

The arithmetic may be tabulated as follows:

y_0	z_0	m_0	J_a
		m_1	J_b
	z_1	m_0	J_c
		m_1	J_d
y_1	z_0	m_0	J_e
		m_1	J_f
	z_1	m_0	J_g
		m_1	J_h

$$M = (m_1 - m_0) \dots\dots\dots Z = (z_1 - z_0) \dots\dots\dots Y = (y_1 - y_0) \dots\dots\dots$$

$$m' = (m - m_0) \dots\dots\dots z' = (z - z_0) \dots\dots\dots y' = (y - y_0) \dots\dots\dots$$

Calculate:

$$A = J_a \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$B = (J_b - J_a) / M \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$C = (J_c - J_a) / Z \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$D = (J_e - J_a) / Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$S = [(J_a + J_d) - (J_b + J_c)] / M \cdot Z \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$T = [(J_a + J_g) - (J_c + J_e)] / Z \cdot Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$U = [(J_a + J_f) - (J_b + J_e)] / M \cdot Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$V = [(J_b + J_c + J_e + J_h) - (J_a + J_d + J_f + J_g)] / M \cdot Z \cdot Y \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

Then add up the following:

$$A \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$B \cdot m' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$C \cdot z' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$D \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$S \cdot m' \cdot z' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$T \cdot z' \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$U \cdot m' \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$V \cdot m' \cdot z' \cdot y' \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$J = \text{total} \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

Values of J for each of the other five cables are found in the same way.

6.5 Calcul des coefficients G_s et g_s

$$G_s = \frac{(\beta_1 \times t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \pi \omega}{10^7 \times \rho_s}}$$

$$g_s = 1 + \left[\frac{t_s}{D_s} \right]^{1,74} \times (\beta_1 \times D_s \times 10^{-3} - 1,6) \quad (4)$$

où

ρ_s est la résistivité électrique du matériau de la gaine à la température de service ($\Omega.m$)

D_s est le diamètre extérieur de la gaine (mm);

NOTE – Pour les gaines ondulées, le diamètre extérieur moyen $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ doit être utilisé au lieu de D_s ,

où

D_{oc} est le diamètre de cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface extérieure des crêtes de cette gaine (mm);

D_{it} est le diamètre du cylindre imaginaire coaxial à la gaine ondulée et tangent à la surface intérieure des creux de cette gaine (mm);

t_s est l'épaisseur de la gaine (mm).

7 Notes sur la transposition des câbles

L'effet général de la transposition est de faire tourner progressivement soit toutes les âmes ou toutes les gaines, soit les deux, d'une sous-section à l'autre. Ces changements n'influencent pas sur l'ordre de succession des intensités de l'âme et, sous réserve que les transpositions soient réalisées de la même façon dans chaque circuit pour l'ordre de succession des phases (c'est-à-dire que les prescriptions concernant la séquence temporelle et la position des câbles données en 6.1 soient appliquées de la même façon pour toutes les sous-sections), la transposition n'affectera pas l'application de la méthode.

La transposition peut s'effectuer soit dans la même direction soit dans la direction opposée à l'ordre de succession des phases. La direction n'affecte pas les pertes par courants de Foucault sous réserve que la direction relative à l'ordre des phases soit la même pour les deux circuits à chaque transposition. Il en résulte que, si les circuits ont des ordres de succession des intensités d'âme inversées, la direction physique de la transposition dans un des circuits sera opposée à celle dans l'autre circuit.

Les valeurs des pertes par courants de Foucault dans les gaines dépendent uniquement de la position dans l'arrangement des câbles et, après calcul, sont applicables à n'importe quelle gaine dans une certaine position, quelle que soit la sous-section.

6.5 Calculation of coefficients G_s and g_s

$$G_s = \frac{(\beta_1 \times t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \quad (3)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \pi \omega}{10^7 \times \rho_s}}$$

$$g_s = 1 + \left[\frac{t_s}{D_s} \right]^{1,74} \times (\beta_1 \times D_s \times 10^{-3} - 1,6) \quad (4)$$

where

ρ_s is the electrical resistivity of sheath material at operating temperature ($\Omega \cdot m$)

D_s is the external diameter of sheath (mm);

NOTE – For corrugated sheaths, the mean outside diameter $\frac{D_{oc} + D_{it}}{2} + t_s$ shall be used in place of D_s .
where

D_{oc} is the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the outside surface of the crests of a corrugated sheath (mm);

D_{it} is the diameter of the imaginary coaxial cylinder which just touches the inside surface of the troughs of a corrugated sheath (mm);

t_s is the sheath thickness (mm).

7 Notes on transposition of cables

The general effect of transposition is to rotate either all of the conductors or all of the sheaths, or both, progressively from sub-section to sub-section. Such changes do not affect the sequence of the conductor currents and, provided that the transpositions in each circuit are effected in the same way with respect to the phase sequence (that is, the requirements for time sequence and sheath position given in 6.1 are observed in the same way for all sub-sections), transposition will not affect the application.

Transposition can take place either in the same direction or in the opposite direction to that of the phase sequence. The direction does not affect the eddy current losses, provided that for both circuits the direction at each transposition, relative to the phase sequence, is the same. It follows that, if the circuits have reversed conductor current sequences, the physical direction of transposition in one circuit will be opposite to that in the other.

Values of sheath eddy current losses are dependent only on position in the cable arrangement and, once calculated, apply to any sheath in a certain position, irrespective of the sub-section.

8 Exemples de calcul des pertes par courants de Foucault

8.1 Introduction

Les dimensions des câbles utilisées dans les exemples suivants sont arbitraires et ne représentent aucun type de câble particulier.

Dans la plupart des cas, il n'y a pas besoin d'interpoler, ou bien les paramètres font appel à certaines parties des tableaux où l'interpolation par examen des valeurs convient.

Cependant, lorsque les intervalles dans les tableaux sont trop importants pour permettre une interpolation par examen ou lorsque les calculs sont faits par ordinateur, les interpolations en série sont utiles et faciles à utiliser manuellement ou à programmer sur un ordinateur.

8.2 Exemple 1

Dans cet exemple, les paramètres d'installation coïncident avec les entrées dans les tableaux et aucune interpolation n'est nécessaire.

Soit:

diamètre moyen de la gaine,	$d = 90 \text{ mm}$
épaisseur de la gaine en aluminium,	$t_s = 3,18 \text{ mm}$
résistance de la gaine,	$R_s = 62,9 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
résistance de l'âme,	$R = 11,3 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
résistivité de la gaine, (voir tableau I, CEI 287 (1982))	$\rho_s = 2,8264 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
séparation axiale des câbles, dans les circuits,	$s = 150 \text{ mm}$
entre les circuits,	$c = 375 \text{ mm}$

On a alors:

$$m = \frac{314 \times 10^{-7}}{62,9 \times 10^{-6}} = 0,5$$

$$z = \frac{90}{2 \times 150} = 0,3$$

$$y = \frac{150}{375} = 0,4$$

$$\lambda_0 = C \times \frac{0,5^2}{1 + 0,5^2} \left[\frac{90}{300} \right]^2$$

$$= C \times 0,0180$$

$$\frac{R_s}{R} = \frac{62,9 \times 10^{-6}}{11,3 \times 10^{-6}} = 5,57$$

8 Worked examples of calculation of eddy current losses

8.1 Introduction

The cable dimensions used in the following examples are arbitrary and do not represent any particular type of cable.

In many cases there is no need for interpolation, or the parameters use parts of the tables where interpolation by inspection is adequate.

However, where the intervals in the tables are too large for interpolation by inspection or when calculation is made by computer, the interpolation routines are useful and are not difficult to use manually or to program on a computer.

8.2 Example 1

In this example, the installation parameters coincide with entries in the tables and no interpolation is needed.

Let:

the mean diameter of the sheath,	$d = 90 \text{ mm}$
aluminium sheath thickness,	$t_s = 3,18 \text{ mm}$
sheath resistance,	$R_s = 62,9 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
conductor resistance,	$R = 11,3 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
sheath resistivity, (see table I, IEC 287 (1982)).	$\rho_s = 2,8264 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
axial cable spacing within circuits	$s = 150 \text{ mm}$
between circuits	$c = 375 \text{ mm}$

then:

$$m = \frac{314 \times 10^{-7}}{62,9 \times 10^{-6}} = 0,5$$

$$z = \frac{90}{2 \times 150} = 0,3$$

$$y = \frac{150}{375} = 0,4$$

$$\lambda_0 = C \times \frac{0,5^2}{1 + 0,5^2} \left[\frac{90}{300} \right]^2$$

$$= C \times 0,0180$$

$$\frac{R_s}{R} = \frac{62,9 \times 10^{-6}}{11,3 \times 10^{-6}} = 5,57$$

Corrections pour l'épaisseur:

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \times \pi \times 314}{2,8264 \times 10^{-8} \times 10^7}} = 118,2$$

$$g_s = 1 + \left[\frac{3,18}{93,18} \right]^{1,74} (118,2 \times 93,18 \times 10^{-3} - 1,6) = 1,026$$

$$G_s = \frac{(118,2 \times 3,18)^4}{12 \times 10^{12}} = 0,0017$$

Supposons les âmes connectées en séquence inverse.

Câble	1	2	3	4	5	6
Ordre de succession	R	S	T	T	S	R
<i>C</i>	1,5	6,0	1,5	1,5	6,0	1,5
λ_0	0,0270	0,1080	0,0270	0,0270	0,1080	0,0270
<i>H</i> (<i>m</i> = 0,5 <i>z</i> = 0,3)	1,2200	1,0250	0,9190	0,9190	1,0250	1,2200
<i>N</i> (<i>y</i> = 0,4)	1,0605	1,1066	1,2593	1,2593	1,1066	1,0605
<i>J</i> (<i>m</i> = 0,5 <i>z</i> = 0,3 <i>y</i> = 0,4)	1,0100	1,0000	0,9650	0,9650	1,0000	1,0100
<i>g_s</i>	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026
<i>G_s</i>	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017
<i>R_s/R</i>	5,57	5,57	5,57	5,57	5,57	5,57

En remplaçant ces valeurs dans l'équation (1)

$$\lambda''_{1d} = 0,211 \quad 0,710 \quad 0,182 \quad 0,182 \quad 0,710 \quad 0,211$$

Pour le câble 1, le calcul donne:

$$\begin{aligned} \lambda''_{1d} &= 5,57 [(0,0270 \times 1,2200 \times 1,0605 \times 1,0100 \times 1,026) + 0,0017] \\ &= 0,211 \end{aligned}$$

8.3 Exemple 2

Dans cet exemple, les paramètres arbitraires choisis nécessitent une interpolation entre les valeurs figurant dans les tableaux.

Corrections for thickness:

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \times \pi \times 314}{2,8264 \times 10^{-8} \times 10^7}} = 118,2$$

$$g_s = 1 + \left[\frac{3,18}{93,18} \right]^{1,74} (118,2 \times 93,18 \times 10^{-3} - 1,6) = 1,026$$

$$G_s = \frac{(118,2 \times 3,18)^4}{12 \times 10^{12}} = 0,0017$$

Assume conductors are connected in a reversed sequence.

Cable	1	2	3	4	5	6
Sequence	R	S	T	T	S	R
C	1,5	6,0	1,5	1,5	6,0	1,5
λ_0	0,0270	0,1080	0,0270	0,0270	0,1080	0,0270
H ($m = 0,5$ $z = 0,3$)	1,2200	1,0250	0,9190	0,9190	1,0250	1,2200
N ($y = 0,4$)	1,0605	1,1066	1,2593	1,2593	1,1066	1,0605
J ($m = 0,5$ $z = 0,3$ $y = 0,4$)	1,0100	1,0000	0,9650	0,9650	1,0000	1,0100
g_s	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026	1,026
G_s	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017
R_s/R	5,57	5,57	5,57	5,57	5,57	5,57

Substitute these quantities in equation (1)

$$\lambda''_{1d} = 0,211 \quad 0,710 \quad 0,182 \quad 0,182 \quad 0,710 \quad 0,211$$

For cable 1, the arithmetic is:

$$\begin{aligned} \lambda''_{1d} &= 5,57 [(0,0270 \times 1,2200 \times 1,0605 \times 1,0100 \times 1,026) + 0,0017] \\ &= 0,211 \end{aligned}$$

8.3 Example 2

In this example, the arbitrary parameters have been selected so that interpolation between tabulated values is required.

Soit:

diamètre moyen de la gaine,	$d = 100 \text{ mm}$
épaisseur de la gaine en aluminium,	$t_s = 2,6 \text{ mm}$
résistance de la gaine,	$R_s = 35 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
résistance de l'âme,	$R = 9 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
résistivité de la gaine, (voir tableau I, CEI 287 (1982)),	$\rho_s = 2,8264 \times 10^{-8} \Omega.\text{m}$
séparation axiale des câbles, dans les circuits,	$s = 150 \text{ mm}$
entre les circuits,	$c = 400 \text{ mm}$

On a alors:

$$m = \frac{314 \times 10^{-7}}{35 \times 10^{-6}} = 0,897$$

$$z = \frac{100}{2 \times 150} = 0,333$$

$$y = \frac{150}{400} = 0,375$$

$$\lambda_0 = C \frac{0,897^2}{1 + 0,897^2} \left[\frac{100}{2 \times 150} \right]^2$$

$$= C \times 0,0495$$

$$\frac{R_s}{R} = \frac{35 \times 10^{-6}}{9 \times 10^{-6}} = 3,89$$

Prendre le câble 1 et une séquence directe de courants:

$$C = 1,5 \quad \lambda_0 = 1,5 \times 0,0495 = 0,0743$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \times \pi \times 314}{2,8264 \times 10^{-8} \times 10^7}} = 118,2$$

$$g_s = 1 + \left[\frac{2,6}{102,6} \right]^{1,74} (118,2 \times 102,6 \times 10^{-3} - 1,6)$$

$$= 1,018$$

$$G_s = \frac{(118,2 \times 2,6)^4}{12 \times 10^{12}} = 0,0007$$

Let:

the mean sheath diameter,	$d = 100 \text{ mm}$
aluminium sheath thickness,	$t_s = 2,6 \text{ mm}$
sheath resistance,	$R_s = 35 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
conductor resistance,	$R = 9 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$
sheath resistivity, (see table I, IEC 287 (1982)),	$\rho_s = 2,8264 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
axial cable spacing within circuits	$s = 150 \text{ mm}$
between circuits	$c = 400 \text{ mm}$

then:

$$m = \frac{314 \times 10^{-7}}{35 \times 10^{-6}} = 0,897$$

$$z = \frac{100}{2 \times 150} = 0,333$$

$$y = \frac{150}{400} = 0,375$$

$$\lambda_0 = C \frac{0,897^2}{1 + 0,897^2} \left[\frac{100}{2 \times 150} \right]^2$$

$$= C \times 0,0495$$

$$\frac{R_s}{R} = \frac{35 \times 10^{-6}}{9 \times 10^{-6}} = 3,89$$

Take cable number 1, and a forward sequence of currents:

$$C = 1,5 \quad \lambda_0 = 1,5 \times 0,0495 = 0,0743$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \times \pi \times 314}{2,8264 \times 10^{-8} \times 10^7}} = 118,2$$

$$g_s = 1 + \left[\frac{2,6}{102,6} \right]^{1,74} (118,2 \times 102,6 \times 10^{-3} - 1,6)$$

$$= 1,018$$

$$G_s = \frac{(118,2 \times 2,6)^4}{12 \times 10^{12}} = 0,0007$$

a) interpoler pour le calcul de H :

$$m = 0,897 \quad z = 0,333$$

à partir du tableau des coefficients H :

$$m_0 = 0,500$$

$$m_1 = 1,000 \quad M = (m_1 - m_0) = 0,500$$

$$z_0 = 0,300$$

$$z_1 = 0,350 \quad Z = (z_1 - z_0) = 0,050$$

$$(m - m_0) = (0,897 - 0,500) = 0,397$$

$$(z - z_0) = (0,333 - 0,300) = 0,033$$

$$H_a = 1,220$$

$$H_b = 1,347$$

$$H_c = 1,309$$

$$H_d = 1,503$$

$$A = 1,220$$

$$B = (1,347 - 1,220)/0,5 = 0,254$$

$$C = (1,309 - 1,220)/0,05 = 1,780$$

$$D = (1,503 + 1,220 - 1,309 - 1,347)/(0,5 \times 0,05) = 2,680$$

Faire la somme:

$$A = 1,2200$$

$$B \cdot (m - m_0) = 0,254 \times 0,397 = 0,1008$$

$$C \cdot (z - z_0) = 1,780 \times 0,033 = 0,0587$$

$$D \cdot (m - m_0) \cdot (z - z_0) = 2,68 \times 0,397 \times 0,033 = 0,0351$$

$$H = \underline{1,4146}$$

b) interpoler pour le calcul de N

$$y = 0,375$$

à partir du tableau des coefficients N :

$$y_0 = 0,3 \quad y_1 = 0,4$$

$$(y - y_0) = 0,375 - 0,3 = 0,075$$

$$N_a = 0,9432 \quad N_b = 0,9238$$

$$N = 0,9432 + \frac{(0,9238 - 0,9432)}{(0,4 - 0,3)} \times 0,075 = 0,929$$

a) interpolate for H :

$$m = 0,897 \quad z = 0,333$$

from the table of H coefficients:

$$m_0 = 0,500$$

$$m_1 = 1,000 \quad M = (m_1 - m_0) = 0,500$$

$$z_0 = 0,300$$

$$z_1 = 0,350 \quad Z = (z_1 - z_0) = 0,050$$

$$(m - m_0) = (0,897 - 0,500) = 0,397$$

$$(z - z_0) = (0,333 - 0,300) = 0,033$$

$$H_a = 1,220$$

$$H_b = 1,347$$

$$H_c = 1,309$$

$$H_d = 1,503$$

$$A = 1,220$$

$$B = (1,347 - 1,220)/0,5 = 0,254$$

$$C = (1,309 - 1,220)/0,05 = 1,780$$

$$D = (1,503 + 1,220 - 1,309 - 1,347)/(0,5 \times 0,05) = 2,680$$

Add together:

$$A = 1,2200$$

$$B \cdot (m - m_0) = 0,254 \times 0,397 = 0,1008$$

$$C \cdot (z - z_0) = 1,780 \times 0,033 = 0,0587$$

$$D \cdot (m - m_0) \cdot (z - z_0) = 2,68 \times 0,397 \times 0,033 = 0,0351$$

$$H = \underline{1,4146}$$

b) interpolate for N :

$$y = 0,375$$

from the table of N coefficients:

$$y_0 = 0,3 \quad y_1 = 0,4$$

$$(y - y_0) = 0,375 - 0,3 = 0,075$$

$$N_a = 0,9432 \quad N_b = 0,9238$$

$$N = 0,9432 + \frac{(0,9238 - 0,9432)}{(0,4 - 0,3)} \times 0,075 = 0,929$$

c) interpoler pour le calcul de J

$$\begin{array}{llll} m = 0,897 & z = 0,333 & y = 0,375 & \\ y_0 = 0,200 & z_0 = 0,300 & m_0 = 0,500 & J_a = 0,995 \\ & & m_1 = 1,000 & J_b = 0,992 \\ & z_1 = 0,400 & & J_c = 0,991 \\ & & & J_d = 0,984 \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} y_1 = 0,400 & & & J_e = 0,991 \\ & & & J_f = 0,983 \\ & & & J_g = 0,982 \\ & & & J_h = 0,964 \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} M = 0,5 & Z = 0,1 & Y = 0,2 & \\ m' = 0,397 & z' = 0,033 & y' = 0,175 & \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} A = & 0,995 \\ B = (0,992 - 0,995) / 0,5 = & -0,006 \\ C = (0,991 - 0,995) / 0,1 = & -0,040 \\ D = (0,991 - 0,995) / 0,2 = & -0,020 \\ Q = [(0,995 + 0,984) - (0,992 + 0,991)] / (0,5 \times 0,1) = & -0,080 \\ R = [(0,995 + 0,982) - (0,991 + 0,991)] / (0,1 \times 0,2) = & -0,250 \\ S = [(0,995 + 0,983) - (0,992 + 0,991)] / (0,5 \times 0,2) = & -0,050 \\ T = [(0,992 + 0,991 + 0,991 + 0,964) - (0,995 + 0,984 + 0,983 + 0,982)] / (0,5 \times 0,1 \times 0,2) = & -0,600 \end{array}$$

Faire la somme de:

$$\begin{array}{llll} A & = & 0,9950 \\ B \cdot m' & = & -0,006 \times 0,397 = -0,0024 \\ C \cdot z' & = & -0,04 \times 0,033 = -0,0013 \\ D \cdot y' & = & -0,02 \times 0,175 = -0,0035 \\ Q \cdot m' \cdot z' & = & -0,080 \times 0,397 \times 0,033 = -0,0011 \\ R \cdot z' \cdot y' & = & -0,25 \times 0,033 \times 0,175 = -0,0014 \\ S \cdot m' \cdot y' & = & -0,05 \times 0,397 \times 0,175 = -0,0035 \\ T \cdot m' \cdot z' \cdot y' & = & -0,6 \times 0,397 \times 0,033 \times 0,175 = -0,0014 \\ J = & \underline{0,9804} \end{array}$$

Le report dans l'équation (1) donne:

$$\begin{aligned} \lambda''_{1d} &= 3,89 [(0,0743 \times 1,4146 \times 0,929 \times 0,9804 \times 1,018) + 0,0007] \\ &= 0,382 \end{aligned}$$

c) interpolate for J

$$\begin{array}{llll}
 m = 0,897 & z = 0,333 & y = 0,375 & \\
 y_0 = 0,200 & z_0 = 0,300 & m_0 = 0,500 & J_a = 0,995 \\
 & & m_1 = 1,000 & J_b = 0,992 \\
 & z_1 = 0,400 & & J_c = 0,991 \\
 & & & J_d = 0,984
 \end{array}$$

$$\begin{array}{llll}
 y_1 = 0,400 & & & J_e = 0,991 \\
 & & & J_f = 0,983 \\
 & & & J_g = 0,982 \\
 & & & J_h = 0,964
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
 M = 0,5 & Z = 0,1 & Y = 0,2 \\
 m' = 0,397 & z' = 0,033 & y' = 0,175
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
 A = & 0,995 \\
 B = (0,992 - 0,995) / 0,5 = & -0,006 \\
 C = (0,991 - 0,995) / 0,1 = & -0,040 \\
 D = (0,991 - 0,995) / 0,2 = & -0,020 \\
 Q = [(0,995 + 0,984) - (0,992 + 0,991)] / (0,5 \times 0,1) = & -0,080 \\
 R = [(0,995 + 0,982) - (0,991 + 0,991)] / (0,1 \times 0,2) = & -0,250 \\
 S = [(0,995 + 0,983) - (0,992 + 0,991)] / (0,5 \times 0,2) = & -0,050 \\
 T = [(0,992 + 0,991 + 0,991 + 0,964) - (0,995 + 0,984 + 0,983 + 0,982)] / (0,5 \times 0,1 \times 0,2) = & -0,600
 \end{array}$$

Add together:

$$\begin{array}{llll}
 A & = & & 0,9950 \\
 B \cdot m' & = & -0,006 \times 0,397 = & -0,0024 \\
 C \cdot z' & = & -0,04 \times 0,033 = & -0,0013 \\
 D \cdot y' & = & -0,02 \times 0,175 = & -0,0035 \\
 Q \cdot m' \cdot z' & = & -0,080 \times 0,397 \times 0,033 = & -0,0011 \\
 R \cdot z' \cdot y' & = & -0,25 \times 0,033 \times 0,175 = & -0,0014 \\
 S \cdot m' \cdot y' & = & -0,05 \times 0,397 \times 0,175 = & -0,0035 \\
 T \cdot m' \cdot z' \cdot y' & = & -0,6 \times 0,397 \times 0,033 \times 0,175 = & -0,0014 \\
 J = & & & \underline{0,9804}
 \end{array}$$

Substitution in equation (1) gives:

$$\begin{aligned}
 \lambda''_{1d} &= 3,89 [(0,0743 \times 1,4146 \times 0,929 \times 0,9804 \times 1,018) + 0,0007] \\
 &= 0,382
 \end{aligned}$$

Un résumé des facteurs de pertes dans les gaines pour les six câbles ainsi que les facteurs correspondant à des plus petites valeurs de séparation entre les circuits c et à une installation d'un circuit unique (correspondant à une très grande séparation entre les circuits) sont donnés ci-après:

Séparation c mm	150	300	400	Circuit unique
N° câble	Facteurs de pertes dans les gaines			
1	0,346	0,373	0,382	0,419
2	0,955	1,100	1,151	1,262
3	0,274	0,250	0,256	0,276
4	0,402	0,336	0,356	0,419
5	0,943	1,094	1,142	1,262
6	0,230	0,251	0,258	0,276

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-2:1993

A summary of the sheath loss factors for all six cables, together with the corresponding factors for smaller values of the circuit separation c and for a single-circuit installation (corresponding to a very large circuit spacing) are as follows:

Spacing c mm	150	300	400	Single circuit
Cable no.	Sheath loss factors			
1	0,346	0,373	0,382	0,419
2	0,955	1,100	1,151	1,262
3	0,274	0,250	0,256	0,276
4	0,402	0,336	0,356	0,419
5	0,943	1,094	1,142	1,262
6	0,230	0,251	0,258	0,276

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-2:1993

Tableau 1 – Coefficients H

		$z = \frac{d}{2s}$									
m		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	
Câble 1	0,1	1,007	1,015	1,028	1,044	1,064	1,089	1,118	1,154	1,197	
	0,5	1,023	1,051	1,093	1,148	1,220	1,309	1,420	1,554	1,714	
	1,0	1,033	1,076	1,140	1,228	1,347	1,503	1,706	1,970	2,299	
	1,5	1,037	1,085	1,158	1,261	1,405	1,606	1,887	2,284	2,826	
	2,0	1,037	1,087	1,163	1,274	1,432	1,662	2,003	2,527	3,321	
	2,5	1,037	1,087	1,164	1,278	1,444	1,693	2,081	2,720	3,792	
	3,0	1,037	1,087	1,164	1,279	1,449	1,711	2,135	2,876	4,244	
Câble 2	0,1	1,001	1,002	1,004	1,006	1,009	1,013	1,017	1,022	1,028	
	0,5	1,003	1,007	1,012	1,018	1,025	1,033	1,040	1,047	1,050	
	1,0	1,006	1,015	1,027	1,043	1,064	1,090	1,121	1,157	1,193	
	1,5	1,009	1,021	1,039	1,065	1,101	1,150	1,218	1,306	1,413	
	2,0	1,010	1,025	1,047	1,080	1,128	1,198	1,301	1,450	1,654	
	2,5	1,011	1,027	1,052	1,091	1,148	1,234	1,366	1,575	1,892	
	3,0	1,012	1,029	1,056	1,098	1,161	1,260	1,417	1,681	2,123	
Câble 3	0,1	0,999	0,998	0,996	0,994	0,991	0,988	0,984	0,979	0,973	
	0,5	0,991	0,980	0,964	0,944	0,919	0,889	0,853	0,812	0,766	
	1,0	0,994	0,986	0,975	0,962	0,947	0,931	0,915	0,900	0,891	
	1,5	1,000	1,001	1,002	1,007	1,017	1,036	1,068	1,124	1,214	
	2,0	1,006	1,013	1,027	1,048	1,082	1,137	1,226	1,374	1,608	
	2,5	1,010	1,023	1,045	1,080	1,134	1,220	1,364	1,608	2,017	
	3,0	1,013	1,031	1,060	1,104	1,174	1,287	1,477	1,816	2,422	

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-2:1993

Table 1 – H coefficients

		$z = \frac{d}{2s}$								
m		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
Cable 1	0,1	1,007	1,015	1,028	1,044	1,064	1,089	1,118	1,154	1,197
	0,5	1,023	1,051	1,093	1,148	1,220	1,309	1,420	1,554	1,714
	1,0	1,033	1,076	1,140	1,228	1,347	1,503	1,706	1,970	2,299
	1,5	1,037	1,085	1,158	1,261	1,405	1,606	1,887	2,284	2,826
	2,0	1,037	1,087	1,163	1,274	1,432	1,662	2,003	2,527	3,321
	2,5	1,037	1,087	1,164	1,278	1,444	1,693	2,081	2,720	3,792
	3,0	1,037	1,087	1,164	1,279	1,449	1,711	2,135	2,876	4,244
Cable 2	0,1	1,001	1,002	1,004	1,006	1,009	1,013	1,017	1,022	1,028
	0,5	1,003	1,007	1,012	1,018	1,025	1,033	1,040	1,047	1,050
	1,0	1,006	1,015	1,027	1,043	1,064	1,090	1,121	1,157	1,193
	1,5	1,009	1,021	1,039	1,065	1,101	1,150	1,218	1,306	1,413
	2,0	1,010	1,025	1,047	1,080	1,128	1,198	1,301	1,450	1,654
	2,5	1,011	1,027	1,052	1,091	1,148	1,234	1,366	1,575	1,892
	3,0	1,012	1,029	1,056	1,098	1,161	1,260	1,417	1,681	2,123
Cable 3	0,1	0,999	0,998	0,996	0,994	0,991	0,988	0,984	0,979	0,973
	0,5	0,991	0,980	0,964	0,944	0,919	0,889	0,853	0,812	0,766
	1,0	0,994	0,986	0,975	0,962	0,947	0,931	0,915	0,900	0,891
	1,5	1,000	1,001	1,002	1,007	1,017	1,036	1,068	1,124	1,214
	2,0	1,006	1,013	1,027	1,048	1,082	1,137	1,226	1,374	1,608
	2,5	1,010	1,023	1,045	1,080	1,134	1,220	1,364	1,608	2,017
	3,0	1,013	1,031	1,060	1,104	1,174	1,287	1,477	1,816	2,422

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-2:1993

Tableau 2 – Coefficients N

Câble directe						
$Y = \frac{s}{c}$	1	2	3	4	5	6
0,1	0,9871	0,9861	0,9854	0,9849	0,9861	0,9875
0,2	0,9651	0,9588	0,9562	0,9554	0,9588	0,9656
0,3	0,9432	0,9286	0,9271	0,9259	0,9286	0,9438
0,4	0,9238	0,8990	0,9065	0,9049	0,8990	0,9243
0,5	0,9069	0,8714	0,8993	0,8974	0,8713	0,9075
0,6	0,8924	0,8461	0,9089	0,9067	0,8461	0,8929
0,7	0,8800	0,8232	0,9372	0,9351	0,8231	0,8804
0,8	0,8692	0,8024	0,9859	0,9842	0,8023	0,8696
0,9	0,8598	0,7836	1,0562	1,0552	0,7835	0,8601
1,0	0,8516	0,7665	1,1487	1,1490	0,7665	0,8517
Câble inverse						
$Y = \frac{s}{c}$	1	2	3	4	5	6
0,1	1,0110	1,0141	1,0185	1,0185	1,0141	1,0110
0,2	1,0286	1,0421	1,0696	1,0696	1,0421	1,0286
0,3	1,0456	1,0742	1,1504	1,1504	1,0742	1,0456
0,4	1,0605	1,1066	1,2593	1,2593	1,1066	1,0605
0,5	1,0736	1,1378	1,3953	1,3953	1,1378	1,0736
0,6	1,0849	1,1673	1,5580	1,5580	1,1673	1,0849
0,7	1,0948	1,1948	1,7471	1,7471	1,1948	1,0948
0,8	1,1035	1,2204	1,9623	1,9623	1,2204	1,1035
0,9	1,1111	1,2441	2,2037	2,2037	1,2441	1,1111
1,0	1,1180	1,2662	2,4711	2,4711	1,2662	1,1180

Table 2 – N coefficients

Cable forward						
$Y = \frac{s}{c}$	1	2	3	4	5	6
0,1	0,9871	0,9861	0,9854	0,9849	0,9861	0,9875
0,2	0,9651	0,9588	0,9562	0,9554	0,9588	0,9656
0,3	0,9432	0,9286	0,9271	0,9259	0,9286	0,9438
0,4	0,9238	0,8990	0,9065	0,9049	0,8990	0,9243
0,5	0,9069	0,8714	0,8993	0,8974	0,8713	0,9075
0,6	0,8924	0,8461	0,9089	0,9067	0,8461	0,8929
0,7	0,8800	0,8232	0,9372	0,9351	0,8231	0,8804
0,8	0,8692	0,8024	0,9859	0,9842	0,8023	0,8696
0,9	0,8598	0,7836	1,0562	1,0552	0,7835	0,8601
1,0	0,8516	0,7665	1,1487	1,1490	0,7665	0,8517
Cable reverse						
$Y = \frac{s}{c}$	1	2	3	4	5	6
0,1	1,0110	1,0141	1,0185	1,0185	1,0141	1,0110
0,2	1,0286	1,0421	1,0696	1,0696	1,0421	1,0286
0,3	1,0456	1,0742	1,1504	1,1504	1,0742	1,0456
0,4	1,0605	1,1066	1,2593	1,2593	1,1066	1,0605
0,5	1,0736	1,1378	1,3953	1,3953	1,1378	1,0736
0,6	1,0849	1,1673	1,5580	1,5580	1,1673	1,0849
0,7	1,0948	1,1948	1,7471	1,7471	1,1948	1,0948
0,8	1,1035	1,2204	1,9623	1,9623	1,2204	1,1035
0,9	1,1111	1,2441	2,2037	2,2037	1,2441	1,1111
1,0	1,1180	1,2662	2,4711	2,4711	1,2662	1,1180

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60287-1-2:1993

Tableau 3 – Coefficients J

Câble 1 / directe $z = \frac{d}{2s}$						
$Y = \frac{s}{c}$	m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,5	1,000	0,998	0,995	0,991	0,982
	1,0	0,999	0,997	0,992	0,984	0,970
	1,5	1,000	0,997	0,992	0,984	0,974
	2,0	0,999	0,997	0,992	0,987	0,980
	2,5	0,999	0,997	0,994	0,989	0,987
	3,0	1,000	0,997	0,994	0,992	0,993
0,4	0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,5	0,999	0,997	0,991	0,982	0,965
	1,0	0,999	0,994	0,983	0,964	0,931
	1,5	0,999	0,992	0,981	0,962	0,933
	2,0	0,998	0,992	0,982	0,966	0,946
	2,5	0,998	0,992	0,983	0,971	0,959
	3,0	0,999	0,993	0,984	0,975	0,971
0,6	0,1	1,000	1,000	1,001	1,001	1,002
	0,5	0,999	0,996	0,990	0,978	0,955
	1,0	0,998	0,991	0,977	0,949	0,900
	1,5	0,998	0,989	0,972	0,942	0,894
	2,0	0,997	0,989	0,972	0,945	0,907
	2,5	0,997	0,988	0,973	0,951	0,925
	3,0	0,998	0,989	0,974	0,956	0,941
0,8	0,1	1,000	1,001	1,002	1,003	1,004
	0,5	0,999	0,996	0,990	0,978	0,955
	1,0	0,998	0,990	0,974	0,941	0,881
	1,5	0,997	0,987	0,966	0,927	0,860
	2,0	0,996	0,985	0,963	0,927	0,869
	2,5	0,996	0,985	0,963	0,931	0,886
	3,0	0,996	0,985	0,964	0,937	0,904
1,0	0,1	1,000	1,001	1,003	1,005	1,007
	0,5	0,999	0,997	0,992	0,983	0,962
	1,0	0,998	0,990	0,973	0,939	0,877
	1,5	0,997	0,985	0,962	0,918	0,842
	2,0	0,995	0,983	0,957	0,913	0,840
	2,5	0,995	0,982	0,956	0,915	0,852
	3,0	0,996	0,981	0,956	0,919	0,866

Table 3 – J coefficients

Table 1 / Forward $z = \frac{d}{2s}$						
$Y = \frac{s}{c}$	m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,5	1,000	0,998	0,995	0,991	0,982
	1,0	0,999	0,997	0,992	0,984	0,970
	1,5	1,000	0,997	0,992	0,984	0,974
	2,0	0,999	0,997	0,992	0,987	0,980
	2,5	0,999	0,997	0,994	0,989	0,987
	3,0	1,000	0,997	0,994	0,992	0,993
0,4	0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	0,5	0,999	0,997	0,991	0,982	0,965
	1,0	0,999	0,994	0,983	0,964	0,931
	1,5	0,999	0,992	0,981	0,962	0,933
	2,0	0,998	0,992	0,982	0,966	0,946
	2,5	0,998	0,992	0,983	0,971	0,959
	3,0	0,999	0,993	0,984	0,975	0,971
0,6	0,1	1,000	1,000	1,001	1,001	1,002
	0,5	0,999	0,996	0,990	0,978	0,955
	1,0	0,998	0,991	0,977	0,949	0,900
	1,5	0,998	0,989	0,972	0,942	0,894
	2,0	0,997	0,989	0,972	0,945	0,907
	2,5	0,997	0,988	0,973	0,951	0,925
	3,0	0,998	0,989	0,974	0,956	0,941
0,8	0,1	1,000	1,001	1,002	1,003	1,004
	0,5	0,999	0,996	0,990	0,978	0,955
	1,0	0,998	0,990	0,974	0,941	0,881
	1,5	0,997	0,987	0,966	0,927	0,860
	2,0	0,996	0,985	0,963	0,927	0,869
	2,5	0,996	0,985	0,963	0,931	0,886
	3,0	0,996	0,985	0,964	0,937	0,904
1,0	0,1	1,000	1,001	1,003	1,005	1,007
	0,5	0,999	0,997	0,992	0,983	0,962
	1,0	0,998	0,990	0,973	0,939	0,877
	1,5	0,997	0,985	0,962	0,918	0,842
	2,0	0,995	0,983	0,957	0,913	0,840
	2,5	0,995	0,982	0,956	0,915	0,852
	3,0	0,996	0,981	0,956	0,919	0,866

Tableau 4 – Coefficients J

Câble 2 / directe $z = \frac{d}{2s}$						
$Y = \frac{s}{c}$	m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,1	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001
	0,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	1,0	1,000	1,000	1,001	1,001	1,002
	1,5	1,000	1,000	1,001	1,003	1,006
	2,0	1,000	1,001	1,002	1,005	1,011
	2,5	1,000	1,001	1,002	1,007	1,014
	3,0	1,000	1,001	1,003	1,008	1,018
0,4	0,1	1,000	1,001	1,001	1,002	1,003
	0,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	1,0	1,000	1,000	1,000	1,002	1,003
	1,5	1,000	1,000	1,002	1,007	1,014
	2,0	1,000	1,000	1,003	1,011	1,026
	2,5	1,000	1,000	1,004	1,015	1,036
	3,0	1,000	1,000	1,005	1,017	1,043
0,6	0,1	1,000	1,001	1,002	1,003	1,006
	0,5	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998
	1,0	0,999	0,998	0,998	0,999	1,000
	1,5	0,999	0,998	0,999	1,005	1,016
	2,0	0,999	0,998	1,001	1,012	1,034
	2,5	0,999	0,998	1,002	1,018	1,049
	3,0	0,999	0,998	1,003	1,022	1,062
0,8	0,1	1,000	1,001	1,002	1,004	1,008
	0,5	0,999	0,999	0,998	0,996	0,995
	1,0	0,999	0,996	0,993	0,992	0,991
	1,5	0,998	0,995	0,993	0,998	1,007
	2,0	0,998	0,995	0,994	1,006	1,029
	2,5	0,998	0,995	0,996	1,013	1,049
	3,0	0,998	0,994	0,997	1,017	1,065
1,0	0,1	1,000	1,001	1,003	1,006	1,010
	0,5	0,999	0,997	0,995	0,993	0,993
	1,0	0,998	0,992	0,987	0,982	0,978
	1,5	0,997	0,990	0,984	0,984	0,988
	2,0	0,996	0,989	0,984	0,991	1,006
	2,5	0,996	0,989	0,985	0,997	1,027
	3,0	0,996	0,988	0,986	1,002	1,044

Table 4 – J coefficients

Cable 2 / Forward $z = \frac{d}{2s}$						
$Y = \frac{s}{c}$	m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,1	1,000	1,000	1,000	1,001	1,001
	0,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	1,0	1,000	1,000	1,001	1,001	1,002
	1,5	1,000	1,000	1,001	1,003	1,006
	2,0	1,000	1,001	1,002	1,005	1,011
	2,5	1,000	1,001	1,002	1,007	1,014
	3,0	1,000	1,001	1,003	1,008	1,018
0,4	0,1	1,000	1,001	1,001	1,002	1,003
	0,5	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	1,0	1,000	1,000	1,000	1,002	1,003
	1,5	1,000	1,000	1,002	1,007	1,014
	2,0	1,000	1,000	1,003	1,011	1,026
	2,5	1,000	1,000	1,004	1,015	1,036
	3,0	1,000	1,000	1,005	1,017	1,043
0,6	0,1	1,000	1,001	1,002	1,003	1,006
	0,5	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998
	1,0	0,999	0,998	0,998	0,999	1,000
	1,5	0,999	0,998	0,999	1,005	1,016
	2,0	0,999	0,998	1,001	1,012	1,034
	2,5	0,999	0,998	1,002	1,018	1,049
	3,0	0,999	0,998	1,003	1,022	1,062
0,8	0,1	1,000	1,001	1,002	1,004	1,008
	0,5	0,999	0,999	0,998	0,996	0,995
	1,0	0,999	0,996	0,993	0,992	0,991
	1,5	0,998	0,995	0,993	0,998	1,007
	2,0	0,998	0,995	0,994	1,006	1,029
	2,5	0,998	0,995	0,996	1,013	1,049
	3,0	0,998	0,994	0,997	1,017	1,065
1,0	0,1	1,000	1,001	1,003	1,006	1,010
	0,5	0,999	0,997	0,995	0,993	0,993
	1,0	0,998	0,992	0,987	0,982	0,978
	1,5	0,997	0,990	0,984	0,984	0,988
	2,0	0,996	0,989	0,984	0,991	1,006
	2,5	0,996	0,989	0,985	0,997	1,027
	3,0	0,996	0,988	0,986	1,002	1,044

Tableau 5 – Coefficients J

Câble 3 / directe $z = \frac{d}{2s}$						
$Y = \frac{s}{c}$	m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,1	1,000	1,001	1,003	1,005	1,008
	0,5	1,000	1,003	1,007	1,012	1,017
	1,0	1,000	1,002	1,007	1,014	1,022
	1,5	1,000	1,001	1,006	1,014	1,025
	2,0	0,999	1,001	1,005	1,014	1,028
	2,5	1,000	1,000	1,003	1,014	1,030
	3,0	0,999	0,999	1,003	1,013	1,032
0,4	0,1	1,000	1,003	1,007	1,013	1,021
	0,5	1,001	1,006	1,015	1,028	1,041
	1,0	0,999	1,002	1,011	1,026	1,047
	1,5	0,998	0,997	1,005	1,023	1,053
	2,0	0,997	0,994	1,000	1,021	1,058
	2,5	0,996	0,992	0,995	1,018	1,063
	3,0	0,995	0,990	0,993	1,016	1,067
0,6	0,1	1,000	1,003	1,009	1,017	1,026
	0,5	0,999	1,003	1,010	1,021	1,033
	1,0	0,995	0,990	0,990	1,002	1,024
	1,5	0,992	0,978	0,973	0,989	1,026
	2,0	0,989	0,971	0,962	0,980	1,031
	2,5	0,988	0,966	0,954	0,974	1,037
	3,0	0,987	0,963	0,948	0,969	1,042
0,8	0,1	1,000	1,003	1,007	1,012	1,018
	0,5	0,996	0,990	0,982	0,977	0,972
	1,0	0,988	0,962	0,937	0,927	0,933
	1,5	0,983	0,943	0,908	0,901	0,925
	2,0	0,979	0,932	0,891	0,886	0,929
	2,5	0,977	0,925	0,879	0,876	0,934
	3,0	0,975	0,921	0,872	0,869	0,939
1,0	0,1	1,000	1,001	1,002	1,003	1,002
	0,5	0,990	0,968	0,936	0,900	0,863
	1,0	0,978	0,925	0,864	0,816	0,790
	1,5	0,971	0,901	0,826	0,781	0,778
	2,0	0,967	0,888	0,806	0,765	0,783
	2,5	0,965	0,882	0,796	0,756	0,790
	3,0	0,963	0,877	0,790	0,751	0,797

Table 5 – J coefficients

Table 3 / Forward $z = \frac{d}{2s}$						
$Y = \frac{s}{c}$	m	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,2	0,1	1,000	1,001	1,003	1,005	1,008
	0,5	1,000	1,003	1,007	1,012	1,017
	1,0	1,000	1,002	1,007	1,014	1,022
	1,5	1,000	1,001	1,006	1,014	1,025
	2,0	0,999	1,001	1,005	1,014	1,028
	2,5	1,000	1,000	1,003	1,014	1,030
	3,0	0,999	0,999	1,003	1,013	1,032
0,4	0,1	1,000	1,003	1,007	1,013	1,021
	0,5	1,001	1,006	1,015	1,028	1,041
	1,0	0,999	1,002	1,011	1,026	1,047
	1,5	0,998	0,997	1,005	1,023	1,053
	2,0	0,997	0,994	1,000	1,021	1,058
	2,5	0,996	0,992	0,995	1,018	1,063
	3,0	0,995	0,990	0,993	1,016	1,067
0,6	0,1	1,000	1,003	1,009	1,017	1,026
	0,5	0,999	1,003	1,010	1,021	1,033
	1,0	0,995	0,990	0,990	1,002	1,024
	1,5	0,992	0,978	0,973	0,989	1,026
	2,0	0,989	0,971	0,962	0,980	1,031
	2,5	0,988	0,966	0,954	0,974	1,037
	3,0	0,987	0,963	0,948	0,969	1,042
0,8	0,1	1,000	1,003	1,007	1,012	1,018
	0,5	0,996	0,990	0,982	0,977	0,972
	1,0	0,988	0,962	0,937	0,927	0,933
	1,5	0,983	0,943	0,908	0,901	0,925
	2,0	0,979	0,932	0,891	0,886	0,929
	2,5	0,977	0,925	0,879	0,876	0,934
	3,0	0,975	0,921	0,872	0,869	0,939
1,0	0,1	1,000	1,001	1,002	1,003	1,002
	0,5	0,990	0,968	0,936	0,900	0,863
	1,0	0,978	0,925	0,864	0,816	0,790
	1,5	0,971	0,901	0,826	0,781	0,778
	2,0	0,967	0,888	0,806	0,765	0,783
	2,5	0,965	0,882	0,796	0,756	0,790
	3,0	0,963	0,877	0,790	0,751	0,797