

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**

479-2

Deuxième édition
Second edition
1987

Effets du courant passant par le corps humain

Deuxième partie: Aspects particuliers

Chapitre 4: Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz

Chapitre 5: Effets des courants de formes d'onde spéciales

Chapitre 6: Effets des courants d'impulsion unique de courte durée

Effects of current passing through the human body

Part 2: Special aspects

Chapter 4: Effects of alternating current with frequencies above 100 Hz

Chapter 5: Effects of special waveforms of current

Chapter 6: Effects of unidirectional single impulse currents of short duration



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 479-2: 1987

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.

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**
479-2

Deuxième édition
Second edition
1987

Effets du courant passant par le corps humain

Deuxième partie: Aspects particuliers

Chapitre 4: Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz

Chapitre 5: Effets des courants de formes d'onde spéciales

Chapitre 6: Effets des courants d'impulsion unique de courte durée

Effects of current passing through the human body

Part 2: Special aspects

Chapter 4: Effects of alternating current with frequencies above 100 Hz

Chapter 5: Effects of special waveforms of current

Chapter 6: Effects of unidirectional single impulse currents of short duration

© CEI 1987 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

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

S

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4

CHAPITRE 4: EFFETS DU COURANT ALTERNATIF DE FRÉQUENCE SUPÉRIEURE À 100 Hz

Articles

1. Généralités	6
2. Domaine d'application	6
3. Définitions	6
4. Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 100 Hz et 1 000 Hz inclus	6
5. Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 1 000 Hz et 10 000 Hz inclus	8
6. Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 10 000 Hz	8

CHAPITRE 5: EFFETS DES COURANTS DE FORMES D'ONDE SPÉCIALES

1. Généralités	14
2. Domaine d'application	14
3. Définitions	14
4. Effets du courant alternatif avec composante continue	14
5. Effets du courant alternatif avec contrôle de l'angle de phase	18
6. Effets du courant alternatif avec commande synchrone par trains d'alternance	20

CHAPITRE 6: EFFETS DES COURANTS D'IMPULSION UNIQUE DE COURTE DURÉE

1. Généralités	28
2. Domaine d'application	28
3. Définitions	28
4. Effets des courants d'impulsion de courte durée	30

BIBLIOGRAPHIE	44
-------------------------	----

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5

CHAPTER 4: EFFECTS OF ALTERNATING CURRENT WITH FREQUENCIES ABOVE 100 Hz

Clause		
1. General		7
2. Scope		7
3. Definitions		7
4. Effects of alternating current in the frequency range above 100 Hz up to and including 1000 Hz		7
5. Effects of alternating current in the frequency range above 1000 Hz up to and including 10000 Hz		9
6. Effects of alternating current in the frequency range above 10000 Hz		9

CHAPTER 5: EFFECTS OF SPECIAL WAVEFORMS OF CURRENT

1. General	15
2. Scope	15
3. Definitions	15
4. Effects of alternating current with d. c. components	15
5. Effects of alternating current with phase control	19
6. Effects of alternating current with multicycle control	21

CHAPTER 6: EFFECTS OF UNIDIRECTIONAL SINGLE IMPULSE CURRENTS OF SHORT DURATION

1. General	29
2. Scope	29
3. Definitions	29
4. Effects of unidirectional impulse currents of short duration	31

BIBLIOGRAPHY	44
------------------------	----

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

EFFETS DU COURANT PASSANT PAR LE CORPS HUMAIN**Deuxième partie: Aspects particuliers****Chapitre 4: Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz****Chapitre 5: Effets des courants de formes d'onde spéciales****Chapitre 6: Effets des courants d'impulsion unique de courte durée**

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Comité d'Etudes n° 64 de la CEI: Installations électriques des bâtiments.

Cette deuxième édition remplace la première édition de la Publication 479 de la CEI, parue en 1974.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapports de vote
64(BC)149	64(BC)157
64(BC)150	64(BC)158
64(BC)155	64(BC)163

Pour de plus amples renseignements, consulter les rapports de vote correspondants mentionnés dans le tableau ci-dessus.

La nouvelle version de la Publication 479 est divisée en deux parties, chacune divisée en trois chapitres.

Première partie: Aspects généraux:

Chapitre 1: Impédance électrique du corps humain.

Chapitre 2: Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 15 Hz et 100 Hz.

Chapitre 3: Effets du courant continu.

Deuxième partie: Aspects particuliers:

Chapitre 4: Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 100 Hz.

Chapitre 5: Effets des courants de formes d'onde spéciales.

Chapitre 6: Effets des courants d'impulsion unique de courte durée.

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans le présent rapport:

Publications n°s 50 (551) (1982): Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), Chapitre 551: Electronique de puissance.

50 (801) (1984): Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

EFFECTS OF CURRENT PASSING THROUGH THE HUMAN BODY**Part 2: Special aspects****Chapter 4: Effects of alternating current with frequencies above 100 Hz****Chapter 5: Effects of special waveforms of current****Chapter 6: Effects of unidirectional single impulse currents of short duration**

FOREWORD

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

PREFACE

This report has been prepared by IEC Technical Committee No. 64: Electrical Installations of Buildings.

This second edition replaces the first edition of IEC Publication 479, published in 1974.

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

Six Months' Rule	Reports on Voting
64(CO)149	64(CO)157
64(CO)150	64(CO)158
64(CO)155	64(CO)163

Further information can be found in the relevant Reports on Voting indicated in the table above.

The new edition of Publication 479 is divided into two parts each containing three chapters:

Part 1: General aspects:

Chapter 1: Electrical impedance of the human body.

Chapter 2: Effects of alternating current in the range of 15 Hz to 100 Hz.

Chapter 3: Effects of direct current.

Part 2: Special aspects:

Chapter 4: Effects of alternating current with frequencies above 100 Hz.

Chapter 5: Effects of special waveforms of current.

Chapter 6: Effects of unidirectional single impulse currents of short duration.

The following IEC publications are quoted in this report:

Publications Nos. 50(551) (1982): International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 551: Power Electronics.

50(801) (1984): Chapter 801: Acoustics and Electro-acoustics.

EFFETS DU COURANT PASSANT PAR LE CORPS HUMAIN

Deuxième partie: Aspects particuliers

CHAPITRE 4: EFFETS DU COURANT ALTERNATIF DE FRÉQUENCE SUPÉRIEURE À 100 Hz

1. Généralités

L'énergie électrique sous la forme de courant alternatif de fréquence supérieure à 50/60 Hz est de plus en plus utilisée dans les matériels électriques modernes, par exemple dans les avions (400 Hz), les outils portatifs et le soudage électrique (essentiellement jusqu'à 450 Hz), l'électrothérapie (essentiellement entre 4000 Hz et 5000 Hz), les alimentations de puissance (de 20 kHz à 1 MHz).

Peu de valeurs expérimentales sont disponibles pour ce chapitre, de sorte que les informations données sont à considérer seulement comme provisoires, mais elles peuvent être utilisées pour l'estimation des risques dans les plages des fréquences considérées (voir bibliographie, page 44). L'attention est également appelée sur le fait que l'impédance de la peau décroît sensiblement de façon inversement proportionnelle à la fréquence pour des tensions de contact de l'ordre de quelques dizaines de volts, de sorte que l'impédance de la peau à 500 Hz est environ le dixième de celle à 50 Hz et peut être négligée dans beaucoup de cas. Cela est encore plus vrai pour les fréquences supérieures. C'est ainsi que l'impédance du corps humain à de telles fréquences est limitée à son impédance interne Z_i (voir chapitre 1).

2. Domaine d'application

Le présent chapitre décrit les effets des courants alternatifs sinusoïdaux dans les plages de fréquence suivantes:

- supérieure à 100 Hz et inférieure ou égale à 1000 Hz (voir article 4);
- supérieure à 1000 Hz et inférieure ou égale à 10000 Hz (voir article 5);
- supérieure à 10000 Hz (voir article 6).

3. Définitions

En plus de celles qui sont données dans la première partie, la définition suivante s'applique dans le cadre du présent chapitre:

3.1 Facteur de fréquence F_f

Rapport du seuil à la fréquence f au seuil à la fréquence de 50/60 Hz pour les effets physiologiques considérés.

Note. – Les facteurs de fréquence pour la perception, le non-lâcher et la fibrillation ventriculaire sont différents.

4. Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 100 Hz et 1000 Hz inclus

4.1 Seuil de perception

Le facteur de fréquence pour le seuil de perception est indiqué sur la figure 9, page 10.

4.2 Seuil de non-lâcher

Le facteur de fréquence pour le seuil de non-lâcher est indiqué sur la figure 10, page 10.

EFFECTS OF CURRENT PASSING THROUGH THE HUMAN BODY

Part 2: Special aspects

CHAPTER 4: EFFECTS OF ALTERNATING CURRENT WITH FREQUENCIES ABOVE 100 Hz

1. General

Electric energy in the form of alternating current of higher frequencies than 50/60 Hz is increasingly used in modern electrical equipment, for example aircraft (400 Hz), power tools and electric welding (mostly up to 450 Hz), electrotherapy (using mostly 4000 Hz to 5000 Hz), switching mode power supplies (20 kHz to 1 MHz).

Little experimental data is available for this chapter, so that the information given herein should be considered as provisional only but may be used for the evaluation of risks in the ranges of frequencies concerned (see bibliography, page 44). Attention is also drawn to the fact, that the impedance of human skin decreases approximately inversely proportional to the frequency for touch voltages in the order of some tens of volts, so that the skin impedance at 500 Hz is only about one tenth of the skin impedance at 50 Hz and may be neglected in many cases. This holds even more true for higher frequencies. The impedance of the human body at such frequencies is therefore reduced to its internal impedance Z_i (see Chapter 1).

2. Scope

This chapter describes the effects of sinusoidal alternating current within the frequency ranges:

- above 100 Hz up to and including 1000 Hz (see Clause 4);
- above 1000 Hz up to and including 10000 Hz (see Clause 5);
- above 10000 Hz (see Clause 6).

3. Definitions

In addition to the definitions given in Part 1, the following definition applies:

3.1 Frequency factor F_f

Ratio of the threshold current for the relevant physiological effects at the frequency f to the threshold current at 50/60 Hz.

Note. - The frequency factor differs for perception, let-go and ventricular fibrillation.

4. Effects of alternating current in the frequency range above 100 Hz up to and including 1000 Hz

4.1 Threshold of perception

For the threshold of perception the frequency factor is given in Figure 9, page 11.

4.2 Threshold of let-go

For the threshold of let-go the frequency factor is given in Figure 10, page 11.

4.3 *Seuil de fibrillation ventriculaire*

Pour des durées de choc supérieures à celle du cycle cardiaque, le facteur de fréquence pour le seuil de fibrillation et des trajets de courant longitudinaux à travers le tronc du corps est indiqué sur la figure 11, page 12.

Pour des durées de choc inférieures à celle du cycle cardiaque, aucune valeur expérimentale n'est disponible.

5. **Effets du courant alternatif de fréquence comprise entre 1000 Hz et 10000 Hz inclus**

5.1 *Seuil de perception*

Le facteur de fréquence pour le seuil de perception est indiqué sur la figure 12, page 12.

5.2 *Seuil de non-lâcher*

Le facteur de fréquence pour le seuil de non-lâcher est indiqué sur la figure 13, page 12.

5.3 *Seuil de fibrillation ventriculaire*

A l'étude.

6. **Effets du courant alternatif de fréquence supérieure à 10000 Hz**

6.1 *Seuil de perception*

Pour les fréquences comprises entre 10 kHz et 100 kHz, le seuil de perception s'élève approximativement de 10 mA à 100 mA (valeurs efficaces).

Pour les fréquences supérieures à 100 kHz, la sensation de picotement caractéristique pour la perception aux fréquences inférieures devient une sensation de chaleur pour les courants de l'ordre de quelques centaines de milliampères.

6.2 *Seuil de non-lâcher*

Pour les fréquences supérieures à 100 kHz, aucune valeur expérimentale n'est disponible pour le seuil de non-lâcher et aucun incident n'est connu.

6.3 *Seuil de fibrillation ventriculaire*

Pour les fréquences supérieures à 100 kHz, aucune valeur expérimentale n'est disponible pour le seuil de fibrillation ventriculaire et aucun incident n'est connu.

6.4 *Autres effets*

Pour les fréquences supérieures à 100 kHz, des brûlures peuvent se produire pour des courants de quelques ampères selon la durée de passage du courant.

4.3 *Threshold of ventricular fibrillation*

For shock-durations longer than the cardiac cycle, the frequency factor for the threshold of fibrillation for longitudinal current paths through the trunk of the body is given in Figure 11, page 13.

For shock-durations shorter than the cardiac cycle no experimental data is available.

5. **Effects of alternating current in the frequency range above 1000 Hz up to and including 10000 Hz**

5.1 *Threshold of perception*

For the threshold of perception the frequency factor is given in Figure 12, page 13.

5.2 *Threshold of let-go*

For the threshold of let-go the frequency factor is given in Figure 13, page 13.

5.3 *Threshold of ventricular fibrillation*

Under consideration.

6. **Effects of alternating current in the frequency range above 10000 Hz**

6.1 *Threshold of perception*

For frequencies between 10 kHz and 100 kHz the threshold rises approximately from 10 mA to 100 mA (r. m. s. values).

For frequencies above 100 kHz the tingling sensation characteristic for the perception at lower frequencies changes into a sensation of warmth for current intensities in the order of some hundred milliamperes.

6.2 *Threshold of let-go*

For frequencies above 100 kHz there is neither experimental data nor reported incidents concerning the threshold of let-go.

6.3 *Threshold of ventricular fibrillation*

For frequencies above 100 kHz there is neither experimental data nor reported incidents concerning the threshold of ventricular fibrillation.

6.4 *Other effects*

Burns may occur at frequencies above 100 kHz and current magnitudes in the order of amperes depending on the duration of the current flow.

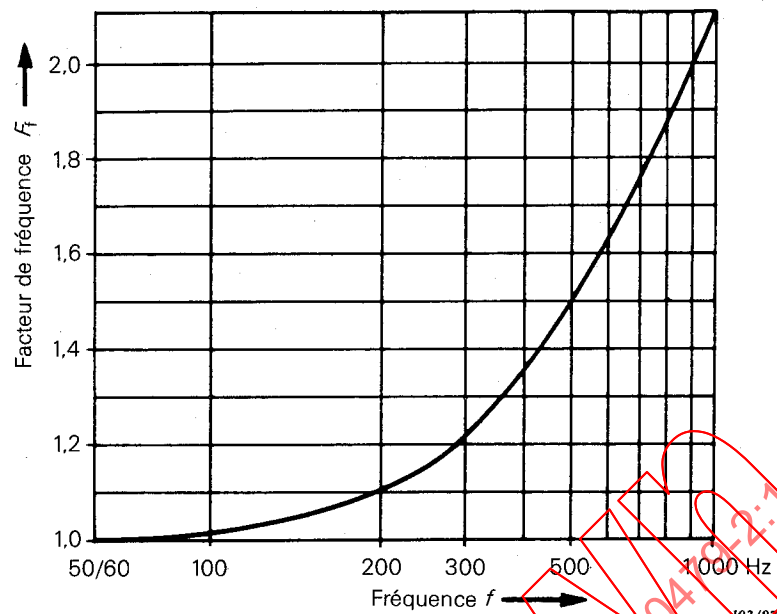


FIG. 9. – Variation du seuil de perception pour les fréquences comprises entre 50/60 Hz et 1000 Hz.

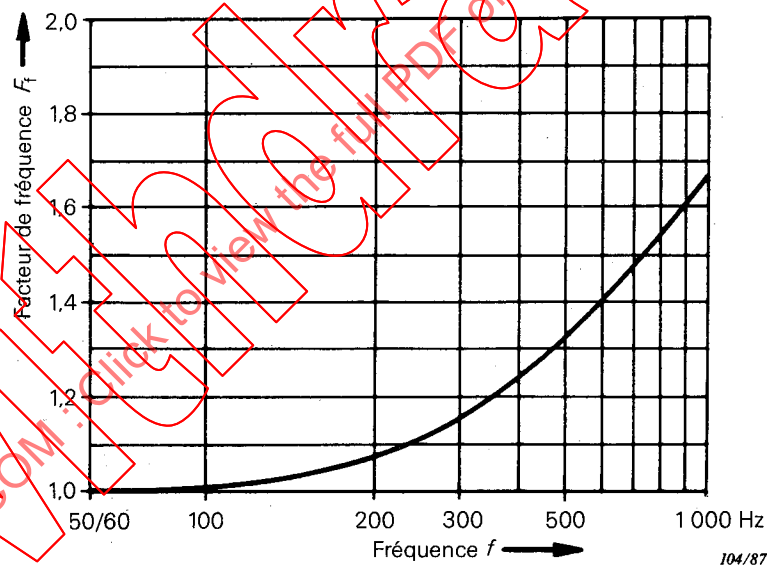


FIG. 10. – Variation du seuil de non-lâcher pour les fréquences comprises entre 50/60 Hz et 1000 Hz.

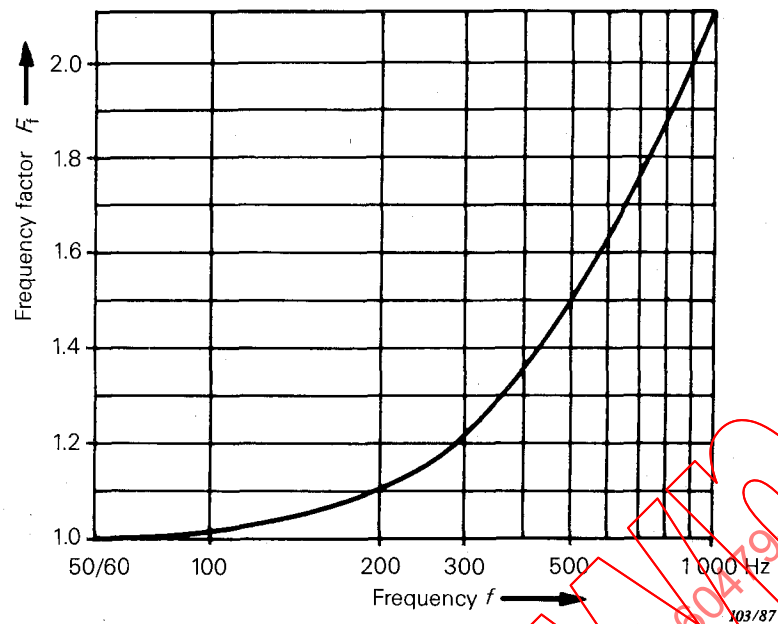


FIG. 9. — Variation of the threshold of perception within the frequency range 50/60 Hz to 1000 Hz.

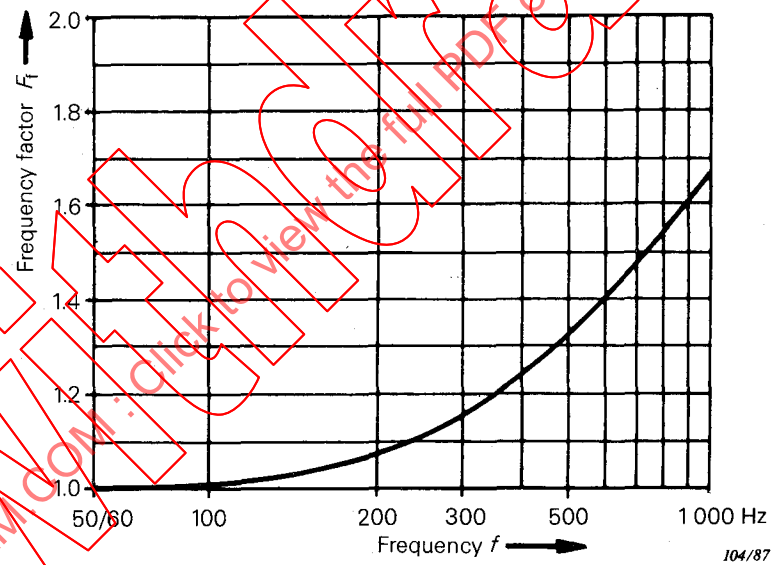


FIG. 10. — Variation of the threshold of let-go within the frequency range 50/60 Hz to 1000 Hz.

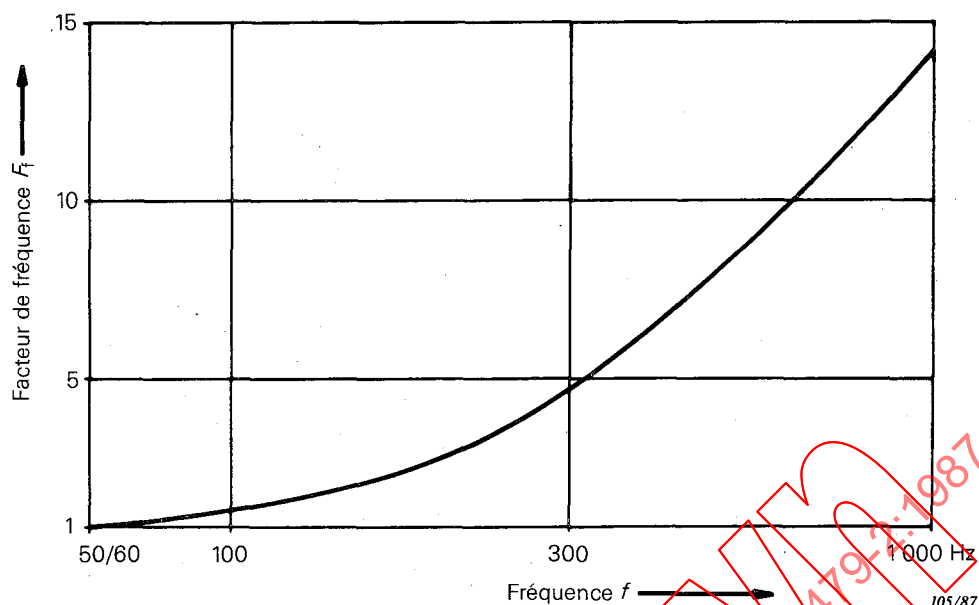


FIG. 11. — Variation du seuil de fibrillation ventriculaire pour les fréquences comprises entre 50/60 Hz et 1000 Hz, des durées de choc supérieures à celle d'un cycle cardiaque et des trajets de courant longitudinaux à travers le tronc du corps.

Note. — Pour des durées de choc inférieures à celle d'un cycle cardiaque, d'autres courbes sont à l'étude.

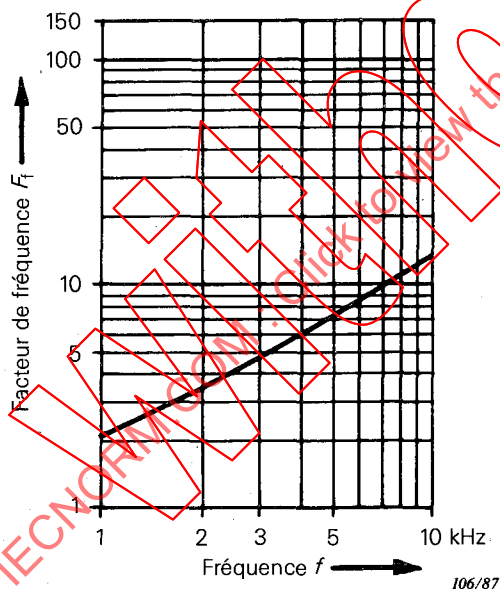


FIG. 12. — Variation du seuil de perception pour les fréquences comprises entre 1000 Hz et 10000 Hz.

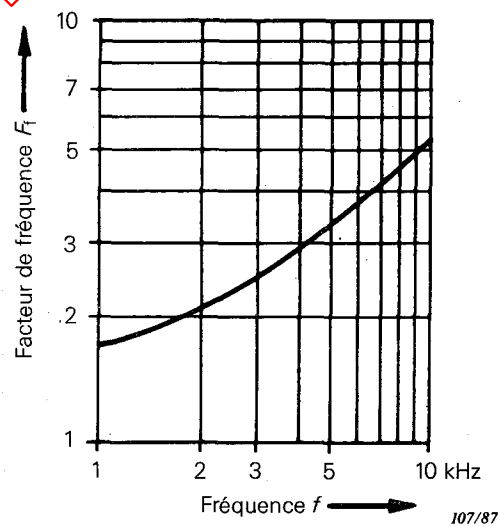


FIG. 13. — Variation du seuil de non-lâcher pour les fréquences comprises entre 1000 Hz et 10000 Hz.

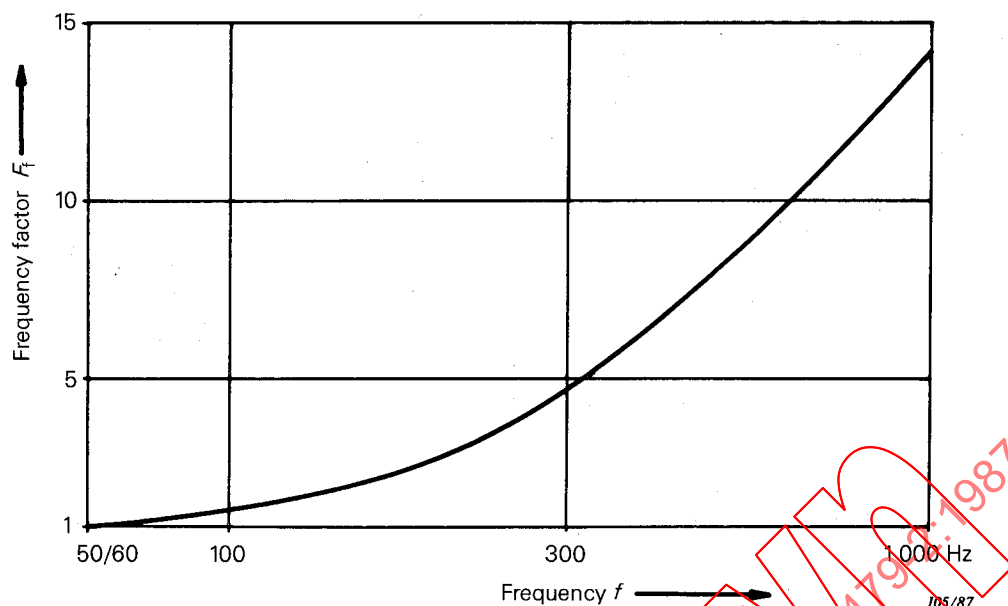


FIG. 11. — Variation of the threshold of ventricular fibrillation within the frequency range 50/60 Hz to 1000 Hz, shock-durations longer than one heart period and longitudinal current paths through the trunk of the body.

Note. — For shock-durations shorter than one heart period, other curves are under consideration.

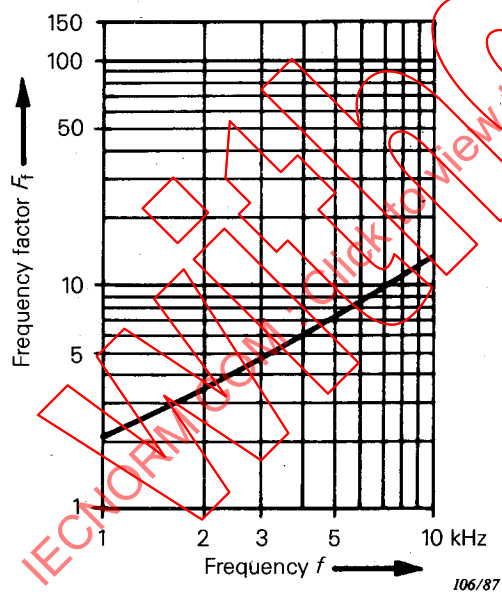


FIG. 12. — Variation of the threshold of perception within the frequency range 1000 Hz to 10000 Hz.

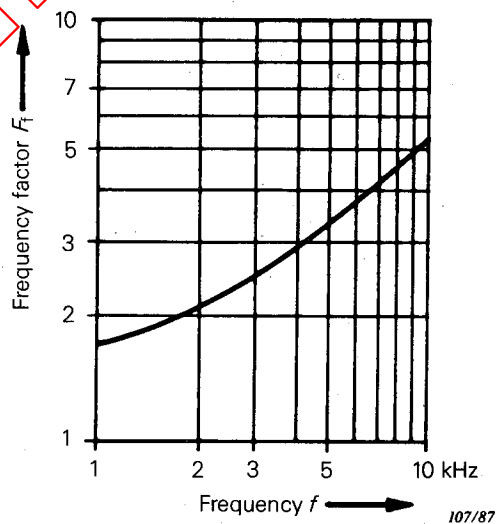


FIG. 13. — Variation of the threshold of let-go within the frequency range 1000 Hz to 10000 Hz.

CHAPITRE 5: EFFETS DES COURANTS DE FORMES D'ONDE SPÉCIALES

1. Généralités

L'intérêt croissant porté aux courants de formes d'onde spéciales constitués de courant alternatif avec composante continue s'explique par le développement des applications des commandes électroniques, commandes qui créent de tels types de courants, particulièrement en cas de défaut d'isolement. Cela est également le cas de matériels utilisant des courants alternatifs avec contrôle de l'angle de phase et commande synchrone par trains d'alternance.

Comme l'on peut s'y attendre, les effets de tels courants sur le corps humain sont intermédiaires entre ceux du courant alternatif et ceux de courant continu et il est possible de déterminer les valeurs de courant équivalentes du point de vue du risque de fibrillation ventriculaire.

2. Domaine d'application

Le présent chapitre décrit les effets du courant électrique passant par le corps humain:

- pour des courants alternatifs sinusoïdaux avec composante continue,
- pour des courants alternatifs sinusoïdaux avec contrôle de l'angle de phase,
- pour des courants alternatifs sinusoïdaux avec commande synchrone par trains d'alternance.

Note. – D'autres formes d'onde sont à l'étude.

Les informations indiquées sont valables pour les fréquences en courant alternatif comprises entre 15 Hz et 100 Hz.

3. Définitions

En plus de celles qui sont données dans la première partie, les définitions suivantes s'appliquent dans le cadre du présent chapitre:

3.1 Contrôle de phase

Procédé consistant à modifier l'instant de la période à partir duquel commence la conduction du courant.

3.2 Contrôle de l'angle de phase (angle de retard)

Intervalle de temps, exprimé en mesure angulaire, pendant lequel le point de départ de la conduction du courant est retardé par le réglage de phase.

3.3 Commande synchrone par trains d'alternance (réglage par trains d'ondes)

Opération consistant à faire varier le rapport entre le nombre de périodes pendant lesquelles il y a conduction de courant et le nombre de périodes pendant lesquelles il n'y a pas conduction de courant.

3.4 Facteur p de commande par trains d'alternance (facteur de réglage par trains d'ondes)

Rapport du nombre de périodes de conduction à la somme des nombres de périodes de conduction et de non-conduction (voir figure 17, page 24).

4. Effets du courant alternatif avec composante continue

4.1 Formes d'onde et fréquences

La figure 14, page 22, montre des formes d'onde caractéristiques dont traite le présent article. Le courant alternatif pur et le courant continu lisse sont représentés ainsi que les formes d'onde combinées des différents rapports du courant alternatif au courant continu. On distingue les courants suivants:

CHAPTER 5: EFFECTS OF SPECIAL WAVEFORMS OF CURRENT

1. General

The increasing interest in special waveforms of current derived from alternating current and direct current is evidenced by the rising number of applications of electronic controls causing such types of current particularly in the case of an insulation fault. This holds true also for equipment using alternating currents with phase control and multicycle control.

As is to be expected the effects of such currents on the human body are between those caused by direct and by alternating current; therefore equivalent current magnitudes with regard to ventricular fibrillation can be established.

2. Scope

This chapter describes the effects of current passing through the human body for:

- alternating sinusoidal current with d. c. components,
- alternating sinusoidal current with phase control,
- alternating sinusoidal current with multicycle control.

Note. – Other waveforms are under consideration.

The information given is deemed applicable for alternating current frequencies from 15 Hz up to 100 Hz.

3. Definitions

In addition to the definitions given in Part 1, the following ones apply for the purpose of this chapter:

3.1 Phase control

The process of varying the instant within the cycle at which current conduction begins.

3.2 Phase control angle (current delay angle)

The time expressed in angular measure by which the starting instant of current conduction is delayed by phase control.

3.3 Multicycle control

The process of varying the ratio of the number of cycles which include current conduction to the number of cycles in which no current conduction occurs.

3.4 Multicycle control factor p

The ratio between the number of conducting cycles and the sum of conducting and non-conducting cycles in the case of multicycle control (see Figure 17, page 25).

4. Effects of alternating current with d. c. components

4.1 Waveforms and frequencies

Figure 14, page 23, shows typical waveforms which are dealt with in this clause. Pure d. c. and pure a. c. are represented as well as combined waveforms of various ratios a. c. to d. c. The following current magnitudes have to be distinguished:

- I_{eff} = valeur efficace du courant de la forme d'onde résultante,
 I_p = valeur de crête du courant de la forme d'onde résultante,
 I_{pp} = valeur entre crêtes du courant de la forme d'onde résultante,
 I_{ev} = valeur efficace du courant sinusoïdal équivalent, du point de vue du risque de fibrillation ventriculaire, à la forme d'onde considérée.

Note. – Le courant I_{ev} est utilisé au lieu du courant I_p de la figure 5 du chapitre 2 pour estimer les risques de fibrillation ventriculaire.

4.2 Seuil de perception

Le seuil de perception dépend de plusieurs paramètres, tels que la surface du corps en contact avec une électrode (surface de contact), les conditions de contact (sèches, humides, pression, température), ainsi que des caractéristiques physiologiques de l'individu.

Les valeurs du seuil de perception sont à l'étude.

4.3 Seuil de non-lâcher

Le seuil de non-lâcher dépend de plusieurs paramètres, tels que la surface de contact, la forme et les dimensions des électrodes, ainsi que des caractéristiques physiologiques de l'individu.

Les valeurs du seuil de non-lâcher sont à l'étude.

4.4 Seuil de fibrillation ventriculaire

4.4.1 Formes d'onde avec des rapports spécifiques entre la composante alternative et la composante continue

Le risque de fibrillation est approximativement le même qu'avec un courant alternatif équivalent I_{ev} ayant les caractéristiques suivantes:

- a) Pour des durées de choc supérieures à environ 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, I_{ev} est la valeur efficace d'un courant ayant la même valeur entre crêtes I_{pp} que le courant de la forme d'onde considérée:

$$I_{\text{ev}} = \frac{I_{\text{pp}}}{2\sqrt{2}}$$

- b) Pour des durées de choc inférieures à environ 0,75 fois la durée du cycle cardiaque, I_{ev} est la valeur efficace d'un courant ayant la même valeur de crête I_p que le courant de la forme d'onde considérée:

$$I_{\text{ev}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Note. – Cette relation est de moins en moins applicable pour des rapports entre les composantes alternatives et continues de plus en plus petits. Pour des chocs en courant continu lisse d'une durée inférieure à 0,1 s, le seuil est égal à la valeur efficace correspondante du courant alternatif (voir figure 5 et figure 8, respectivement au chapitre 2 et au chapitre 3).

- c) Pour des durées de choc comprises entre 0,75 et 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, le paramètre de référence passe de la valeur de crête à la valeur entre crêtes.

Note. – Les détails sur la nature de ce passage feront l'objet d'études complémentaires.

4.4.2 Exemples de courant alternatif redressé

La figure 15, page 22, montre les formes d'onde pour des systèmes à simple ou double alternance. Pour ces formes d'onde, la valeur de crête du courant est identique à sa valeur entre crêtes.

- I_{rms} = r. m. s. value of the current of the resultant waveform,
 I_p = peak value of the current of the resultant waveform,
 I_{pp} = peak-to-peak value of the current of the resultant waveform,
 I_{ev} = r. m. s. value of a sinusoidal current presenting the same risk as regards ventricular fibrillation as the waveform concerned.

Note. — The current I_{ev} is used instead of the current I_B in Figure 5 of Chapter 2 to estimate the risk of ventricular fibrillation.

4.2 Threshold of perception

The threshold of perception depends on several parameters such as the area of the body in contact with an electrode (contact area), the conditions of contact (dry, wet, pressure, temperature) and also on physiological characteristics of the individual.

Values for the threshold of perception are under consideration.

4.3 Threshold of let-go

The threshold of let-go depends on several parameters, such as the contact area, the shape and size of the electrodes and also on the physiological characteristics of the individual.

Values for the threshold of let-go are under consideration.

4.4 Threshold of ventricular fibrillation

4.4.1 Waveforms consisting of specific ratios of alternating to direct current

The fibrillation hazard may be taken as being approximately the same as with an equivalent alternating current I_{ev} having the following characteristics:

- a) For shock durations longer than approximately 1.5 times the period of the cardiac cycle, I_{ev} is the r. m. s. value of a current having the same peak-to-peak value I_{pp} as the current of the waveform concerned:

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}}$$

- b) For shock durations shorter than approximately 0.75 times the period of the cardiac cycle, I_{ev} is the r. m. s. value of a current having the same peak value I_p as the current of the waveform concerned:

$$I_{ev} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Note. — This correlation is the less applicable the smaller the ratio a. c. to d. c. becomes. For pure d. c. shocks of a duration less than 0.1 s the threshold is equal to the corresponding r. m. s. value of the alternating current (see Figure 5 and Figure 8 in Chapter 2 and Chapter 3 respectively).

- c) In the duration range from 0.75 to 1.5 times the period of the cardiac cycle the amplitude parameter changes from peak value to peak-to-peak value.

Note. — The details of the nature of the transition that takes place are subject to further studies.

4.4.2 Examples of rectified alternating current

Figure 15, page 23, shows the waveforms for half wave and full wave rectification. For these waveforms the peak value of the current is identical with its peak-to-peak value.

Le courant alternatif équivalent I_{ev} est déterminé:

- a) Pour des durées supérieures à 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, par:

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}} = \frac{I_p}{2\sqrt{2}}$$

Ainsi, pour les systèmes à simple alternance, I_{ev} se rapporte à la valeur efficace du courant redressé I_{eff} par la relation:

$$I_{ev} = \frac{I_{eff}}{\sqrt{2}}$$

et, pour les systèmes à double alternance, par la relation:

$$I_{ev} = \frac{I_{eff}}{2}$$

- b) Pour des durées inférieures à 0,75 fois la durée du cycle cardiaque:

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{\sqrt{2}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Ainsi, pour les systèmes à simple alternance, I_{ev} se rapporte à la valeur efficace du courant redressé I_{eff} par la relation:

$$I_{ev} = \sqrt{2} I_{eff}$$

et, pour les systèmes à double alternance par la relation:

$$I_{ev} = I_{eff}$$

5. Effets du courant alternatif avec contrôle de l'angle de phase

5.1 Formes d'onde et fréquences

La figure 16, page 24, montre les formes d'onde pour des commandes symétriques et asymétriques.

5.2 Seuil de perception et seuil de non-lâcher

Comme décrit précédemment aux paragraphes 4.2 et 4.3, ces seuils dépendent de plusieurs paramètres.

Les valeurs de courant produisant une sensation ou empêchant le lâcher sont sensiblement les mêmes qu'en courant alternatif pour la même valeur de crête I_p . Lorsque l'angle de contrôle de phase est supérieur à 120°, les valeurs de crête augmentent du fait de la diminution du temps de passage du courant.

5.3 Seuil de fibrillation ventriculaire

Les seuils sont différents suivant que la commande est symétrique ou asymétrique.

5.3.1 Commande symétrique

Le risque de fibrillation est approximativement le même qu'avec un courant alternatif équivalent I_{ev} ayant les caractéristiques suivantes:

- a) pour des durées de choc supérieures à environ 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, I_{ev} a la même valeur efficace que le courant de la forme d'onde considérée;

The equivalent alternating current I_{ev} is determined:

- a) For durations longer than 1.5 times the period of the cardiac cycle by:

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}} = \frac{I_p}{2\sqrt{2}}$$

Hence for half wave rectification I_{ev} is related to the r. m. s. value of the rectified current I_{rms} by:

$$I_{ev} = \frac{I_{rms}}{\sqrt{2}}$$

and for full wave rectification by:

$$I_{ev} = \frac{I_{rms}}{2}$$

- b) For durations shorter than 0.75 times the period of the cardiac cycle:

$$I_{ev} = \frac{I_{pp}}{\sqrt{2}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

Hence for half wave rectification I_{ev} is related to the r. m. s. value of the rectified current I_{rms} by:

$$I_{ev} = \sqrt{2} I_{rms}$$

and for full wave rectification by:

$$I_{ev} = I_{rms}$$

5. Effects of alternating current with phase control

5.1 Waveforms and frequencies

Figure 16, page 25, shows the waveforms for symmetrical and asymmetrical control.

5.2 Threshold of perception and threshold of let-go

As described in the preceding Sub-clauses 4.2 and 4.3, these thresholds depend on different parameters.

The effect of the current in producing sensation or inhibiting let-go is about equal to a pure a. c. with the same peak value I_p . For phase control angles above 120° the peak values increase as a consequence of the decreasing duration of the current flow.

5.3 Threshold of ventricular fibrillation

The thresholds differ for symmetrical and asymmetrical waveforms.

5.3.1 Symmetrical control

The fibrillation hazard may be taken as being approximately the same as with equivalent alternating current I_{ev} having the following characteristics:

- a) for shock-durations longer than approximately 1.5 times the period of the cardiac cycle, I_{ev} has the same r. m. s. value as the current of the relevant waveform concerned;

- b) pour des durées de choc inférieures à environ 0,75 fois la durée du cycle cardiaque, I_{ev} est la valeur efficace d'un courant ayant la même valeur de crête que le courant de la forme d'onde considérée;

Note. – Lorsque l'angle de contrôle de phase est supérieur à 120° , il est possible que le seuil de fibrillation soit augmenté.

- c) pour les durées de choc comprises entre 0,75 et 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, le paramètre de référence passe de la valeur de crête à la valeur efficace.

Note. – Les détails sur la nature de cette variation feront l'objet d'études complémentaires.

5.3.2 Commande asymétrique

Le risque de fibrillation est approximativement le même qu'avec un courant alternatif équivalent I_{ev} ayant les caractéristiques suivantes:

- a) pour des durées de choc supérieures à environ 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, les valeurs sont à l'étude;
- b) pour des durées de choc inférieures à environ 0,75 fois la durée du cycle cardiaque, I_{ev} est la valeur efficace d'un courant ayant la même valeur de crête que le courant de la forme d'onde considérée.

Notes 1. – Lorsque l'angle de contrôle de phase est supérieur à 120° , il est possible que le seuil de fibrillation soit augmenté.

2. – Les courants dus à des commandes asymétriques (voir VEI 551-05-19)* peuvent comporter également des composantes continues.

6. Effets du courant alternatif avec commande synchrone par trains d'alternance

6.1 Formes d'onde et fréquences

La figure 17, page 24, montre les formes d'onde pour un facteur p égal à 0,67.

6.2 Seuil de perception et seuil de non-lâcher

Comme décrit précédemment aux paragraphes 4.2, 4.3, 5.2 et 5.3, ces seuils dépendent de plusieurs paramètres.

Les seuils de perception et de non-lâcher sont à l'étude.

6.3 Seuil de fibrillation ventriculaire

Suivant la durée du choc et le facteur de commande, les courants alternatifs avec commande par trains d'alternance sont aussi ou moins dangereux que les courants alternatifs de même durée de choc et de même intensité.

La figure 18, page 26, montre le seuil de fibrillation ventriculaire mesuré sur des porcs pour différents facteurs de commande.

- 6.3.1 Pour des durées de choc supérieures à environ 1,5 fois la durée du cycle cardiaque, le seuil dépend du facteur de commande p . Pour p voisin de 1, le seuil a la même valeur efficace que pour un courant alternatif sinusoïdal de même durée. Pour p voisin de 0,1, la valeur efficace du courant pendant la période de conduction $I_{1\text{eff}}$ a la même valeur que celle d'un courant alternatif d'une durée inférieure à 0,75 fois la durée du cycle cardiaque.

Note. – Pour des valeurs intermédiaires de p , le seuil de fibrillation augmente à partir du niveau inférieur indiqué sur la figure 5 de la première partie jusqu'au niveau supérieur indiqué pour des durées de choc inférieures à 0,1 s.

- 6.3.2 Pour des durées de choc inférieures à environ 0,75 fois la durée du cycle cardiaque, la valeur efficace du courant pendant la période de conduction $I_{1\text{eff}}$ a la même valeur que celle d'un courant alternatif sinusoïdal de même durée.

* Publication 50 (551) de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), Chapitre 551: Electronique de puissance.

- b) for shock-durations shorter than approximately 0.75 times the period of the cardiac cycle, I_{ev} is the r. m. s. value of a current having the same peak value as the current of the relevant waveform concerned;

Note. — For phase control angles above 120° a rise of the threshold of fibrillation is to be expected.

- c) in the duration range from 0.75 to 1.5 times the period of the cardiac cycle, the amplitude parameter changes from peak to r. m. s. value.

Note. — The details of the nature of the transition that takes place are subject to further studies.

5.3.2 Asymmetrical control

The fibrillation hazard may be taken as being approximately the same as with an equivalent alternating current I_{ev} having the following characteristics:

- a) for shock-durations longer than approximately 1.5 times the period of the cardiac cycle: Under consideration.
- b) for shock-durations shorter than approximately 0.75 times the period of the cardiac cycle, I_{ev} is the r. m. s. value of a current having the same peak value as the current of the relevant waveform concerned.

Notes 1. — For phase control angles above 120° a rise of the threshold of fibrillation is to be expected.

2. — Currents caused by asymmetrical control (see IEC 551-05-19)* may also have d. c. components.

6. Effects of alternating current with multicycle control

6.1 Waveforms and frequencies

Figure 17, page 25, shows the waveforms for a degree of power control of $p = 0.67$.

6.2 Threshold of perception and threshold of let-go

As described in the preceding Sub-clauses 4.2, 4.3, 5.2 and 5.3, these thresholds depend on different parameters.

The threshold of perception and threshold of let-go are under consideration.

6.3 Threshold of ventricular fibrillation

Depending on the duration of shock and on the degree of power control alternating currents with multicycle control are equally or less dangerous than a. c. of the same shock duration and current magnitude.

Figure 18, page 27, shows the threshold of ventricular fibrillation measured on pigs for various degrees of power control.

- 6.3.1 For shock-durations longer than approximately 1.5 times the period of the cardiac cycle, the threshold depends on the degree of power control p . For p near unity it has the same r. m. s. value as a sinusoidal alternating current of the same duration. For p near 0.1 the r. m. s. value of the current during current conduction $I_{1\text{rms}}$ is the same as the threshold for alternating current of a duration below 0.75 times the period of the cardiac cycle.

Note. — For intermediate values of p , the fibrillation threshold rises from the low level shown in Figure 5 of Part 1 to the high level indicated for shock-durations below 0.1 s.

- 6.3.2 For shock-durations shorter than approximately 0.75 times the period of the cardiac cycle the r. m. s. value of the current during current conduction $I_{1\text{rms}}$ is the same as that for a sinusoidal alternating current of the same duration.

* IEC Publication 50 (551): International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 551: Power Electronics.

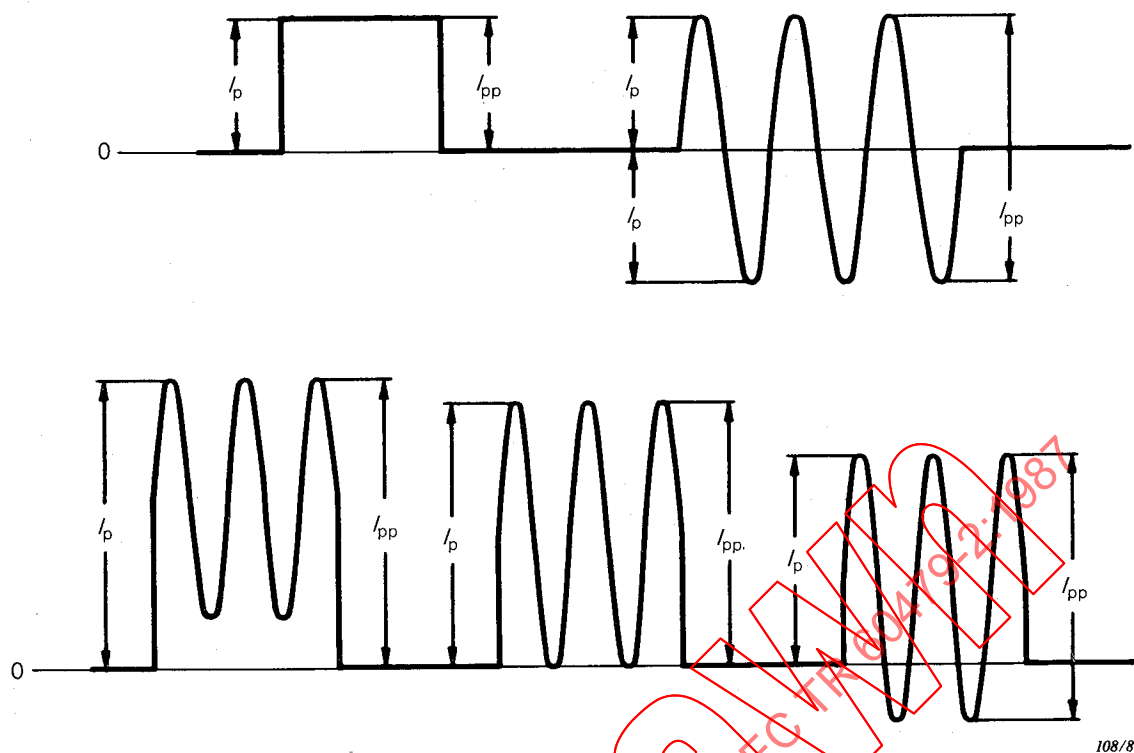
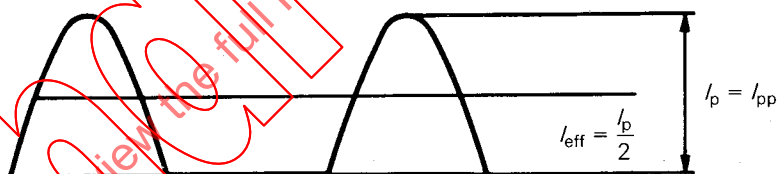


FIG. 14. — Formes d'onde de courant.

a) simple alternance



b) double alternance

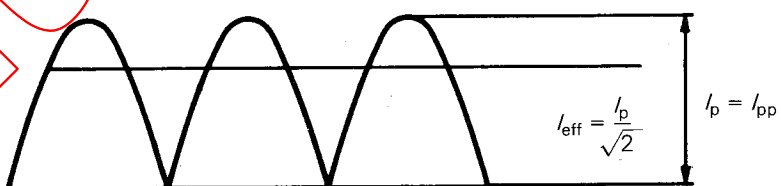


FIG. 15. — Formes d'onde de courant alternatif redressé.

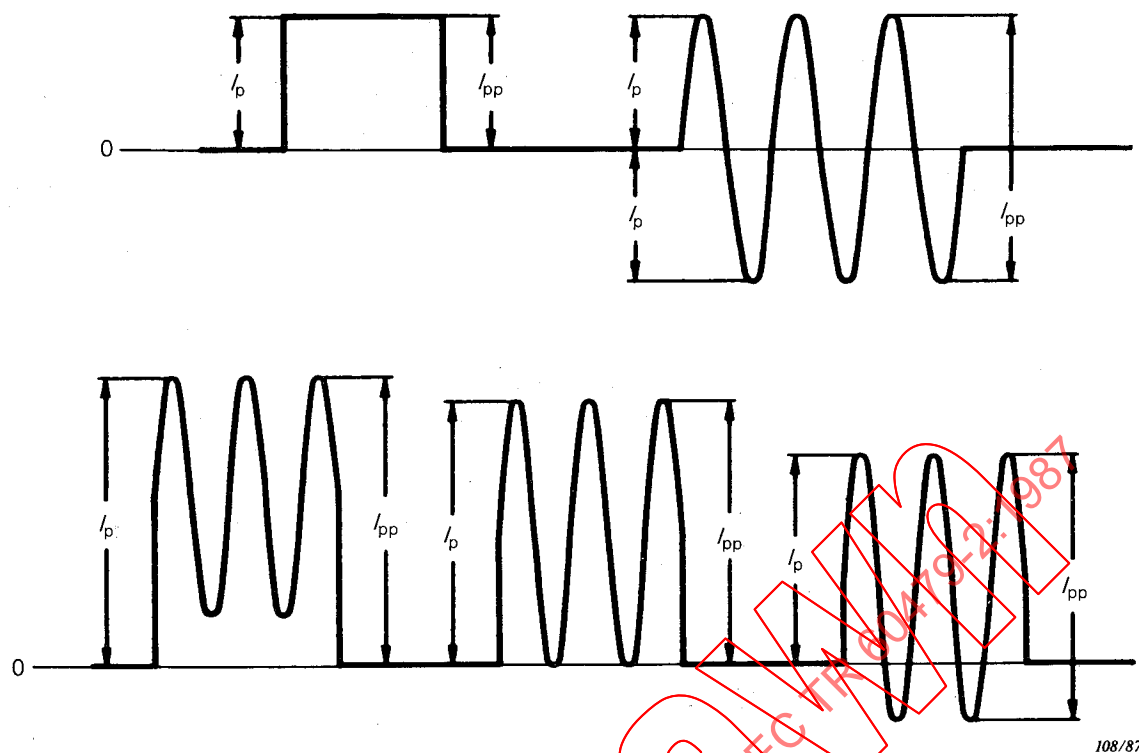
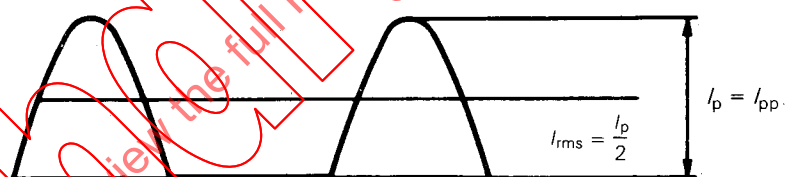
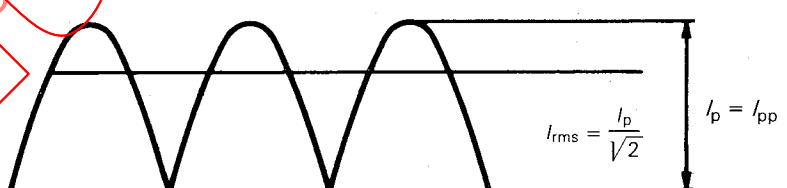


FIG. 14. — Waveforms of currents.

a) half wave rectification



b) full wave rectification



109/87

FIG. 15. — Waveforms of rectified alternating currents.

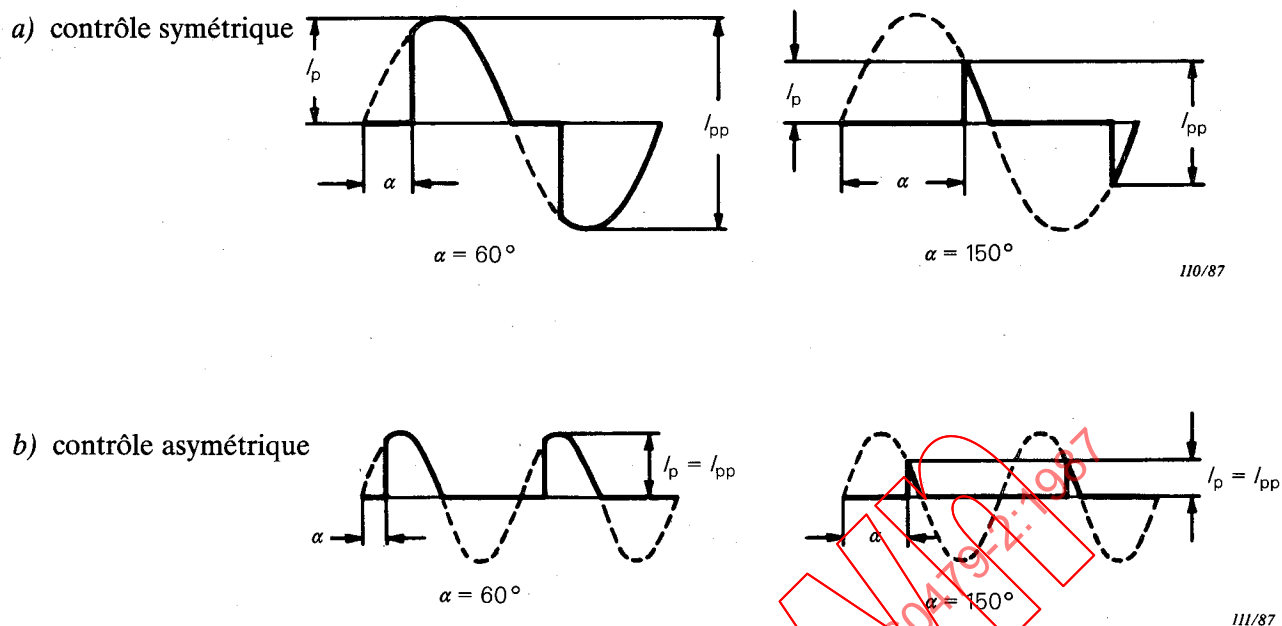


FIG. 16. – Formes d'onde de courant alternatif avec contrôle de l'angle de phase.

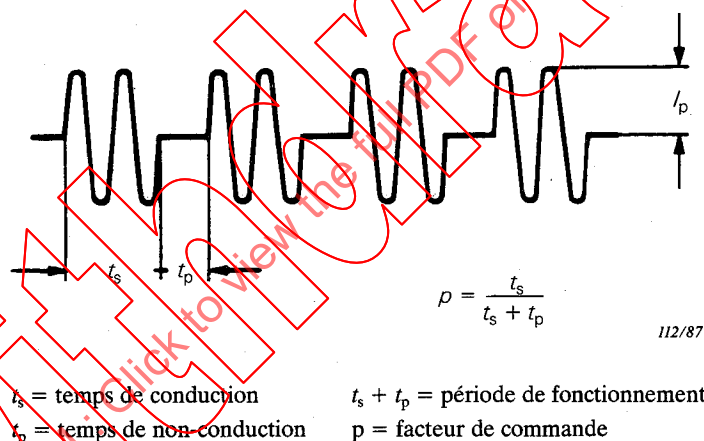
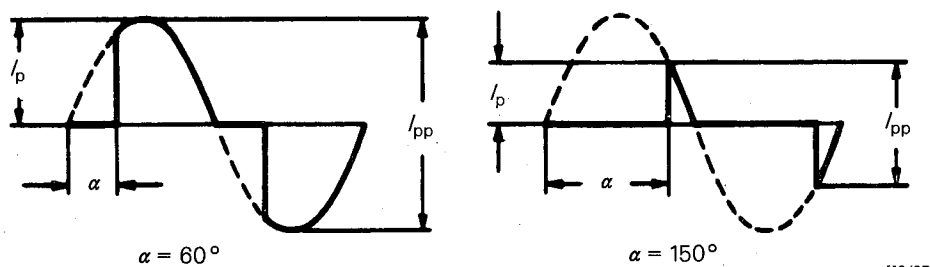


FIG. 17. – Formes d'onde de courant alternatif avec commande synchrone par trains d'alternance.

$$I_{1\text{ eff}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} = \text{valeur efficace du courant pendant la période de conduction}$$

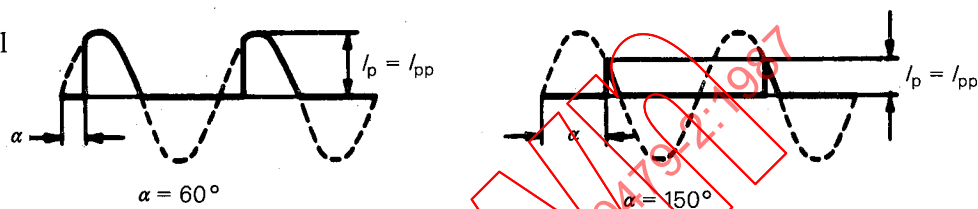
Note. – Le courant $I_{1\text{ eff}}$ ne doit pas être confondu avec la valeur efficace du courant pendant la période de fonctionnement $I_{2\text{ eff}} = I_{1\text{ eff}} \sqrt{p}$.

a) symmetrical control



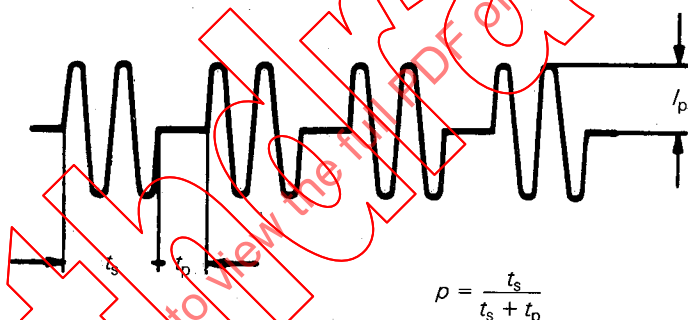
110/87

b) asymmetrical control



111/87

FIG. 16. — Waveforms of alternating currents with phase control.



112/87

t_s = conducting time
 t_p = non-conducting time

$t_s + t_p$ = working period
 p = degree of power control

FIG. 17. — Waveforms of alternating currents with multicycle control.

$$I_{1\text{rms}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} = \text{r. m. s. value of current during current conduction}$$

Note. — $I_{1\text{rms}}$ is not to be confused with the r. m. s. value of current during working period $I_{2\text{rms}} = I_{1\text{rms}} \sqrt{p}$.

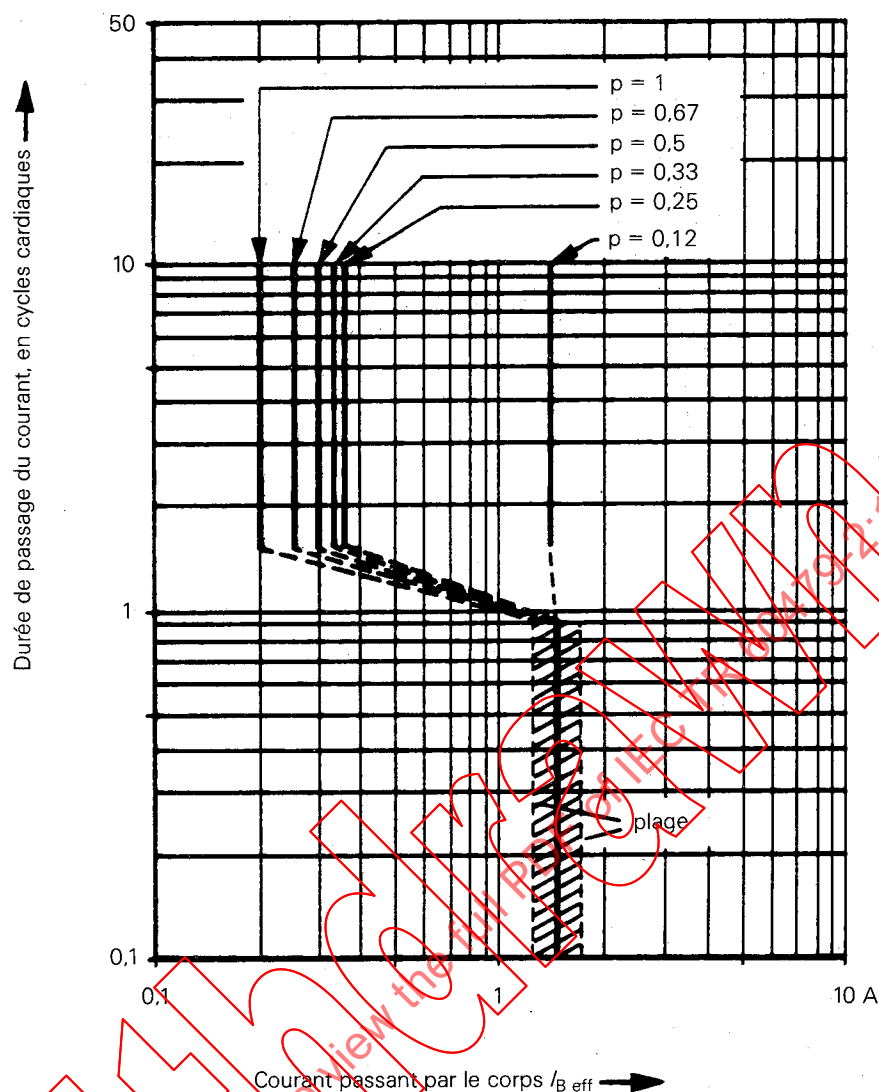


FIG. 18. — Seuil de fibrillation ventriculaire (valeurs moyennes) pour des courants alternatifs avec commande par trains d'alternance pour différents facteurs de commande (résultats d'expériences sur de jeunes porcs).

Note. — Le courant passant par le corps $I_{B\text{ eff}}$ est la valeur efficace du courant pendant la période de conduction t_{eff} .

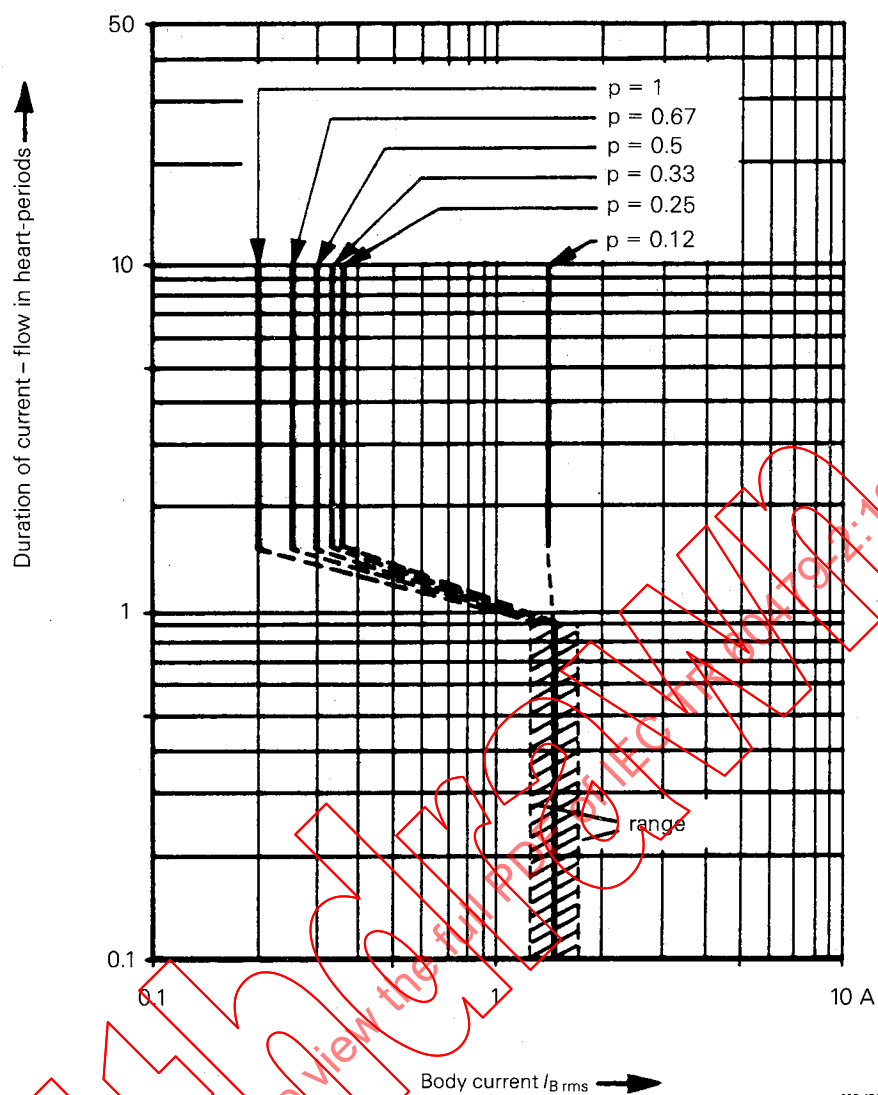


FIG. 18. - Threshold of ventricular fibrillation (average values) for alternating current with multicycle control for various degrees of power control (results of experiments with young pigs).

Note. - Body current $I_{B \text{ rms}}$ is the r. m. s. value of the current during current conduction $I_{1 \text{ rms}}$.

CHAPITRE 6: EFFETS DES COURANTS D'IMPULSION UNIQUE DE COURTE DURÉE

1. Généralités

Les courants d'impulsion unique de courte durée de forme rectangulaire ou sinusoïdale ou de décharges de condensateurs peuvent être une source de danger en cas de défaut d'isolement dans un appareil électrique contenant des composants électriques ou en cas de contact avec les parties actives de tels appareils. C'est pourquoi il est important de définir les limites de danger pour de tels courants.

Pour une durée de choc de 10 ms, les effets décrits dans ce chapitre correspondent à ceux qui sont indiqués dans les chapitres 2 à 5, de sorte que la Publication 479 traite de l'ensemble des durées de choc depuis 0,1 ms jusqu'à 10 s pour pratiquement toutes les formes d'onde de courant qui présentent un intérêt technique. Le contenu du présent chapitre est basé sur l'hypothèse déduite de recherches scientifiques, selon laquelle le facteur principal pour provoquer la fibrillation ventriculaire pour les différentes formes de courants d'impulsion est la valeur It ou I^2t pour des chocs de durée au plus égale à 10 ms (voir bibliographie, page 44).

2. Domaine d'application

Le présent chapitre décrit les effets du courant passant par le corps humain pour des courants d'impulsion unique de forme rectangulaire ou sinusoïdale ou résultant de décharges de condensateurs.

Note. — Les effets d'impulsions successives sont à l'étude.

Les valeurs indiquées sont applicables pour des durées d'impulsion de 0,1 ms jusqu'à et y compris 10 ms. Pour des durées d'impulsion supérieures à 10 ms, les valeurs indiquées sur la figure 5 du chapitre 2 sont applicables.

3. Définitions

En plus de celles qui sont données dans les chapitres 2 à 5, les définitions suivantes s'appliquent dans le cadre du présent chapitre:

3.1 Energie spécifique de fibrillation F_e (Ws/Ω ou A^2s)

Valeur minimale I^2t de l'impulsion de courte durée qui, dans des conditions données (trajet du courant, phase cardiaque), provoque avec une certaine probabilité la fibrillation ventriculaire.

Note. — F_e est déterminée par la forme de l'impulsion comme l'intégrale

$$\int_0^{t_i} i^2 dt.$$

F_e multipliée par la résistance du corps donne l'énergie dissipée dans le corps humain pendant l'impulsion.

3.2 Charge spécifique de fibrillation F_q (C ou As)

Valeur minimale It de l'impulsion de courte durée qui, dans des conditions données (trajet du courant, phase cardiaque) provoque avec une certaine probabilité la fibrillation ventriculaire.

Note. — F_q est déterminée par la forme de l'impulsion comme l'intégrale

$$\int_0^{t_i} i dt.$$

CHAPTER 6: EFFECTS OF UNIDIRECTIONAL SINGLE IMPULSE CURRENTS OF SHORT DURATION

1. General

Unidirectional single impulse currents of short duration in the form of rectangular and sinusoidal impulses or capacitor discharges may be a source of danger in the case of an insulation fault of an electric appliance containing electronic components or when touching live parts of such equipment. It is therefore important to establish the danger limits for these types of currents.

For a shock-duration of 10 ms the effects described in this chapter correspond to those given in Chapters 2 to 5 so that IEC Publication 479 covers the whole range of shock-durations from 0.1 ms to 10 s for nearly all current waveforms which are of technical interest. The content of this chapter is based on the assumption derived from scientific research that the principal factor for the initiation of ventricular fibrillation for the various forms of unidirectional impulse currents is the It or the I^2t value as for shocks of up to 10 ms duration (see Bibliography, page 44).

2. Scope

This chapter describes the effects of current passing through the human body in the form of single unidirectional rectangular impulses, sinusoidal impulses and impulses resulting from capacitor discharges.

Note. — The effects of sequences of impulses are under consideration.

The values specified are deemed to be applicable for impulse durations from 0.1 ms up to and including 10 ms. For impulse durations longer than 10 ms the values given in Figure 5 of Chapter 2 apply.

3. Definitions

In addition to the definitions given in Chapters 2 to 5, the following ones apply for the purpose of this chapter:

3.1 Specific fibrillating energy F_e (Ws/Ω or A²s)

The minimum I^2t value of a unidirectional impulse of short duration which under given conditions (current-path, heart-phase) causes ventricular fibrillation with a certain probability.

Note. — F_e is determined by the form of the impulse as the integral

$$\int_0^{t_i} i^2 dt.$$

F_e multiplied by the body resistance gives the energy dissipated in the human body during the impulse.

3.2 Specific fibrillating charge F_q (C or As)

The minimum It value of a unidirectional impulse of short duration which under given conditions (current-path, heart-phase) causes ventricular fibrillation with a certain probability.

Note. — F_q is determined by the form of the impulse as the integral

$$\int_0^{t_i} i dt.$$

3.3 Constante de temps

Temps nécessaire pour que l'amplitude initiale d'une grandeur d'un champ qui décroît selon une loi exponentielle soit multipliée par le facteur $\frac{1}{e} = 0,3679$ (VEI 801-01-44).*

3.4 Durée de choc d'une décharge de condensateur (t_i)

Temps séparant le début de la décharge du moment où le courant de décharge est descendu à 5% de sa valeur de crête.

Note. – Lorsque la constante de temps de la décharge d'un condensateur est égale à T , la durée de choc de la décharge est égale à $3 T$. L'énergie de l'impulsion est pratiquement entièrement dissipée pendant la durée de choc.

3.5 Seuil de perception

Valeur minimale de la quantité d'électricité qui, dans des conditions données, provoque une sensation dans la personne qu'elle traverse.

3.6 Seuil de douleur

Valeur maximale de la quantité d'électricité (It) ou de l'énergie spécifique (I^2t) qu'une personne peut supporter volontairement en tenant une grande électrode dans la main sans ressentir de douleur.

3.7 Douleur

Sensation suffisamment désagréable pour qu'elle ne soit pas acceptée une deuxième fois par la personne qui y est exposée.

Note. – Comme exemples de douleurs, on peut citer un choc électrique supérieur au seuil de douleur décrit au paragraphe 4.3, la piqûre d'une abeille ou la brûlure d'une cigarette.

4. Effets des courants d'impulsion de courte durée

4.1 Formes d'onde

La figure 19, page 38, montre la forme des courants d'impulsions rectangulaires, sinusoïdales ou de décharges de condensateurs. Il y a lieu de distinguer les courants suivants:

I_{DC} = intensité du courant d'impulsion rectangulaire,

$I_{AC\text{ eff}}$ = valeur efficace du courant d'impulsion sinusoïdale,

$I_{AC(p)}$ = valeur de crête du courant d'impulsion sinusoïdale,

$I_{C\text{ eff}}$ = valeur efficace du courant de décharge d'un condensateur pour une durée de $3 T$,

$I_{C(p)}$ = valeur de crête du courant de décharge d'un condensateur.

Note. – Si U_c est la tension du condensateur au début de la décharge à travers le corps humain et R_i la résistance initiale du corps, $I_{C(p)}$ est égal à:

$$I_{C(p)} = \frac{U_c}{R_i}$$

4.2 Evaluation de l'énergie spécifique de fibrillation F_e

Pour les formes d'impulsions prises en considération dans ce chapitre, l'énergie F_e est égale à:

a) Pour les impulsions rectangulaires, $F_e = I_{DC}^2 t_i$

b) Pour les impulsions sinusoïdales, $F_e = \frac{I_{AC(p)}^2}{2} t_i = I_{AC\text{ eff}}^2 t_i$

* Publication 50 (801) de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), Chapitre 801: Acoustique et électroacoustique.

3.3 Time constant

The time required for the amplitude of an exponentially decaying field quantity to decrease to $\frac{1}{e} = 0.3679$ times an initial amplitude (IEV 801-01-44). *

3.4 Shock-duration of a capacitor discharge (t_i)

The time interval from the beginning of the discharge to the time when the discharge current has fallen to 5% of its peak value.

Note. — When the time constant of the capacitor discharge is given by T the shock-duration of the capacitor discharge is equal to $3 T$. During the shock-duration of the capacitor discharge practically all the energy of the impulse is dissipated.

3.5 Threshold of perception

The minimum value for the charge of electricity which under given conditions causes any sensation to the person through whom it is flowing.

3.6 Threshold of pain

The maximum value of charge (It) or specific energy (I^2t) that can be applied as an impulse to a person holding a large electrode in the hand without causing pain.

3.7 Pain

An unpleasant experience such that it is not readily accepted a second time by the subject submitted to it.

Note. — Examples are an electric shock above the threshold of pain described in Sub-clause 4.3, the sting of a bee or burn of a cigarette.

4. Effects of unidirectional impulse currents of short duration

4.1 Waveforms

Figure 19, page 39, shows the forms of currents for rectangular impulses, sinusoidal impulses and for capacitor discharges. The following current magnitudes have to be distinguished:

I_{DC} = magnitude of the current of the rectangular impulse,

$I_{AC\ rms}$ = r. m. s. value of the current of the sinusoidal impulse,

$I_{AC\ (p)}$ = peak value of the current of the sinusoidal impulse,

$I_{C\ rms}$ = r. m. s. value of the current of the capacitor discharge for a duration of $3 T$,

$I_{C\ (p)}$ = peak value of the capacitor discharge.

Note. — If U_c is the voltage of the capacitor at the beginning of the discharge through the human body and R_i the initial body resistance, $I_{C\ (p)}$ is determined by:

$$I_{C\ (p)} = \frac{U_c}{R_i}$$

4.2 Determination of specific fibrillating energy F_e

The specific fibrillating energy F_e for the different forms of impulses dealt with in this chapter, is determined:

a) For rectangular impulses by $F_e = I_{DC}^2 t_i$

b) For sinusoidal impulses by $F_e = \frac{I_{AC\ (p)}^2}{2} t_i = I_{AC\ rms}^2 t_i$

* IEC Publication 50 (801): International Electrotechnical Vocabulary (IEV), Chapter 801: Acoustics and Electro-acoustics.

c) Pour une décharge de condensateur de constante de temps T :

$$F_e = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2} = I_{C\text{eff}}^2 t_i$$

A titre de comparaison, la figure 20, page 38, montre des courants pour des impulsions rectangulaire, sinusoïdale et une décharge de condensateur avec la constante de temps T pour une même énergie spécifique de fibrillation F_e et la même durée de choc t_i . Dans ce cas, les relations suivantes existent:

$$I_{DC} = \frac{I_{AC(p)}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$$

Note. – La relation $I_{DC} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$ est établie comme suit:

$$F_e = I_{C(p)}^2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{T}} dt = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2}$$

$$I_{C\text{eff}}^2 3 T = I_{DC}^2 3 T = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2}$$

$$I_{C\text{eff}} = I_{DC} = I_{C(p)} \frac{1}{\sqrt{6}}$$

4.3 Seuil de perception et seuil de douleur de décharges de condensateurs

Les seuils dépendent de la forme des électrodes, de la charge de l'impulsion et de sa valeur de crête. La figure 21, page 40, montre le seuil de perception et le seuil de douleur en fonction de la quantité d'électricité et de la tension de charge du condensateur pour une personne tenant de larges électrodes avec des mains sèches.

Le seuil de douleur est, en terme d'énergie spécifique, de l'ordre de 50 à $100 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2\text{s}$ pour des passages de courant à travers les extrémités et de grandes surfaces de contact.

4.4 Seuil de fibrillation ventriculaire

Le seuil de fibrillation ventriculaire dépend de la forme, de la durée et de l'intensité du courant de l'impulsion, de la phase cardiaque à laquelle l'impulsion commence, du trajet du courant dans le corps humain et des caractéristiques physiologiques de la personne.

Des expériences effectuées sur des animaux ont montré que:

- pour des impulsions de courte durée, la fibrillation ventriculaire ne se produit en général que si l'impulsion a lieu pendant la période vulnérable du cycle cardiaque;
- la charge spécifique de fibrillation F_q ou l'énergie spécifique de fibrillation F_e détermine le début de la fibrillation ventriculaire pour des impulsions unidirectionnelles de durée de choc inférieure à 10 ms.

Les seuils de fibrillation ventriculaire sont indiqués sur la figure 22, page 42. Pour une probabilité de fibrillation de 50%, F_q est de l'ordre de $0,005 \text{ As}$ et F_e passe d'environ $0,01 \text{ A}^2\text{s}$ pour une durée d'impulsion t_i de 4 ms à $0,02 \text{ A}^2\text{s}$ pour une durée d'impulsion t_i de 1 ms.

4.5 Exemples

Afin de montrer l'application pratique des relations décrites dans le présent chapitre, deux exemples sont donnés. Le premier concerne une décharge de condensateur avec une constante de temps $T = 1 \text{ ms}$ et une durée de choc t_i égale à $3 T$ soit 3 ms , c'est-à-dire dans le domaine d'application de cette partie. Dans le deuxième exemple, la constante de temps T est de 10 ms , soit une durée de choc t_i de 30 ms pour laquelle les limites de fibrillation ventriculaire sont celles de la figure 5 du chapitre 2.

c) For a capacitor discharge with a time-constant T by

$$F_e = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2} = I_{C_{rms}}^2 t_i$$

Figure 20, page 39, compares the current magnitudes for rectangular impulses, sinusoidal impulses and a capacitor discharge with the time constant T having the same specific fibrillating energy F_e and the same shock-duration t_i . In this case the following relationships exist:

$$I_{DC} = \frac{I_{AC(p)}}{\sqrt{2}} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$$

Note. — The relationship $I_{DC} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$ is derived as follows:

$$\begin{aligned} F_e &= I_{C(p)}^2 \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{T}} dt = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2} \\ I_{C_{rms}}^2 3 T &= I_{DC}^2 3 T = I_{C(p)}^2 \frac{T}{2} \\ I_{C_{rms}} &= I_{DC} = I_{C(p)} \frac{1}{\sqrt{6}} \end{aligned}$$

4.3 Threshold of perception and threshold of pain for capacitor discharge

The thresholds depend on the form of the electrodes, on the charge of the impulse and on its peak current value. Figure 21, page 41, shows the threshold of perception and the threshold of pain as a function of the charge and the charging voltage of the capacitor for a person holding large electrodes with dry hands.

The threshold of pain in terms of specific energy is in the order of 50 to $100 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2\text{s}$ for current paths through the extremities and large contact areas.

4.4 Threshold of ventricular fibrillation

The threshold of ventricular fibrillation depends on the form, duration and magnitude of the current of the impulse, the heart phase in which the impulse starts, the current path in the human body and on the physiological characteristics of the person.

Experiments on animals show:

- that for impulses of short duration ventricular fibrillation in general results only if the impulse falls within the vulnerable period of the cardiac cycle;
- that the specific fibrillating charge F_q or the specific fibrillating energy F_e determines the initiation of ventricular fibrillation for unidirectional impulses for shock-durations shorter than 10 ms.

Thresholds for ventricular fibrillation are shown in Figure 22, page 43. For 50% probability of fibrillation, F_q is of the order of 0.005 As and F_e rises from about $0.01 \text{ A}^2\text{s}$ at an impulse duration $t_i = 4 \text{ ms}$ to $0.02 \text{ A}^2\text{s}$ for $t_i = 1 \text{ ms}$.

4.5 Examples

In order to explain the practical application of the relationships described in this chapter, two examples are given. The first example deals with a capacitor discharge with a time constant of $T = 1 \text{ ms}$ and a shock-duration $t_i = 3 T = 3 \text{ ms}$ and is within the scope of this part. In the second example, the time constant is $T = 10 \text{ ms}$, i.e. $t_i = 30 \text{ ms}$ which means that the limits for ventricular fibrillation are those given in Figure 5 of Chapter 2.

Exemple 1

Effets de décharges de condensateur sur le corps humain:

Condensateur $C = 1 \mu\text{F}$, tensions de charge 10 V, 100 V, 1000 V et 10000 V.

Trajet du courant: main-pied, résistance initiale du corps humain R_i estimée à 1000Ω .*

Constante de temps $T = 1 \text{ ms}$, soit une durée de choc $t_i = 3 T = 3 \text{ ms}$.

$$\text{Energie spécifique de fibrillation } F_e = I_{C \text{ eff}}^2 t_i \approx \frac{W_C}{R_i}$$

Effets des chocs:

Tension de charge U_c (V)	10	100	1000	10000
Courant de décharge Valeur de crête $I_{C(p)}$ (A)	0,01	0,1	1	10
Courant de décharge Valeur efficace (A) $I_{C \text{ eff}} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$	0,004	0,04	0,4	4
Charge spécifique F_q (As)	$0,01 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$10 \cdot 10^{-3}$
Energie de décharge W_C (Ws)	$0,05 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0,5	50
Energie spécifique de fibrillation F_e ($R_i = 1000 \Omega$) (A^2s)	$0,048 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-3}$	$48 \cdot 10^{-3}$
Effets physiologiques	faibles	désagréables	douloureux	fibrillation ventriculaire possible

* La valeur de R_i de 1000Ω est choisie arbitrairement à des fins de calcul seulement pour cet exemple. A ne pas confondre avec la valeur de R_i correspondant à un pourcentage de probabilité de 5% indiquée dans l'article 6 du chapitre 1.

Example 1

Effects of capacitor discharge on the human body:

Capacitor $C = 1 \mu\text{F}$, charging voltages 10 V, 100 V, 1000 V and 10000 V.

Current-path: hand-foot, initial body resistance assumed to be $R_i = 1000 \Omega$.*

Time constant $T = 1 \text{ ms}$, i. e. shock-duration $t_i = 3 T = 3 \text{ ms}$.

$$\text{Specific fibrillating energy } F_e = I_{C \text{ rms}}^2 t_i \approx \frac{W_C}{R_i}$$

Effects of shocks:

Charging voltage U_c (V)	10	100	1000	10000
Discharge current Peak value $I_{C(p)}$ (A)	0.01	0.1	1	10
Discharge current r. m. s. value (A) $I_{C \text{ rms}} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$	0.004	0.04	0.4	4
Specific charge F_q (As)	$0.01 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$10 \cdot 10^{-3}$
Discharge energy W_C (Ws)	$0.05 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0.5	50
Specific fibrillating energy F_e ($R_i = 1000 \Omega$) (A^2s)	$0.048 \cdot 10^{-6}$	$4.8 \cdot 10^{-6}$	$0.48 \cdot 10^{-3}$	$48 \cdot 10^{-3}$
Physiological effects	slight	disagreeable	painful	ventricular fibrillation likely

* The value of R_i of 1000Ω has been arbitrarily chosen for the purpose of this example. Not to be confused with the value of R_i for 5% percentile rank of Clause 6 of Chapter 1.

Exemple 2

Effets de décharges de condensateur sur le corps humain:

Condensateur $C = 20 \mu\text{F}$, tensions de charge 10 V, 100 V, 1000 V et 10000 V.

Trajet du courant: main-tronc, résistance initiale du corps R_i estimée à 500Ω .*

Constante de temps $T = 10 \text{ ms}$, soit une durée de choc $t_i = 3 T = 30 \text{ ms}$.**

Effets des chocs:

Tension de charge U_c (V)	10	100	1000	10000
Courant de décharge Valeur de crête $I_{C(p)}$ (A)	0,02	0,2	2	20
Courant de décharge Valeur efficace (A) $I_{C \text{ eff}} = \frac{I_{C(p)}}{\sqrt{6}}$	0,008	0,08	0,8	8
Charge spécifique F_q (As)**	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$200 \cdot 10^{-3}$
Energie de décharge W_c (Ws)	$1 \cdot 10^{-3}$	0,1	10	1000
Energie spécifique de fibrillation F_e (A ² s)**	–	–	–	–
Effets physiologiques	faibles	douloureux	dangereux, mais fibrillation ventriculaire improbable	dangereux et fibrillation ventriculaire possible

* La valeur de R_i de 500Ω est choisie arbitrairement à des fins de calcul seulement pour cet exemple. A ne pas confondre avec la valeur de R_i correspondant à un pourcentage de probabilité de 5% indiquée dans l'article 6 du chapitre 1.

** Comme la durée de choc t_i est supérieure à 10 ms, les seuils de fibrillation sont à reprendre de la figure 5 du chapitre 2.