

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
905**

Première édition
First edition
1987

Le contenu du corrigendum d'avril 1991 a été incorporé dans cette réimpression
The contents of the corrigendum of April 1991 has been included in this reprint

**Guide de charge pour transformateurs
de puissance du type sec**

Loading guide for dry-type power transformers



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 905: 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.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
905**

Première édition
First edition
1987

Le contenu du corrigendum d'avril 1991 a été incorporé dans cette réimpression
The contents of the corrigendum of April 1991 has been included in this reprint

**Guide de charge pour transformateurs
de puissance du type sec**

Loading guide for dry-type power transformers

© CEI 1995 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

Articles

1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Symboles	8

PREMIÈRE PARTIE

4. Bases du guide	10
5. Algorithme de calcul des «consommations de vie» de base	24
6. Limitations	28

DEUXIÈME PARTIE

7. Bases pour l'établissement des courbes de charge	28
8. Choix de la courbe de charge appropriée; exemples	28

Withholding

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. Symbols	9
PART 1	
4. Basis of guide	11
5. Algorithm for basic 'use of life' calculations	26
6. Limitations	29
PART 2	
7. Basis of establishing load curves	29
8. Selection of appropriate load curve with examples	29

Witholdrwn

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**GUIDE DE CHARGE POUR TRANSFORMATEURS
DE PUISSANCE DU TYPE SEC**

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 guide a été établi par le Comité d'Etudes n° 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Le texte de ce guide est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
14(BC)60	14(BC)63

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

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

Publications n° 76-1 (1976): Transformateurs de puissance, Première partie: Généralités.

726 (1982): Transformateurs de puissance de type sec.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**LOADING GUIDE
FOR DRY-TYPE POWER TRANSFORMERS**

FOREWORD

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

PREFACE

This guide has been prepared by IEC Technical Committee No. 14: Power transformers.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
14(CO)60	14(CO)63

Full information on the voting for the approval of this guide can be found in the Voting Report indicated in the above table.

The following IEC Publications are quoted in this guide:

Publications Nos. 76-1 (1976): Power transformers, Part 1: General.

726 (1982): Dry-type power transformers.

GUIDE DE CHARGE POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE DU TYPE SEC

1. Domaine d'application

Le présent guide est applicable aux transformateurs du type sec à refroidissement par circulation naturelle d'air, répondant à la Publication 726 de la CEI et fonctionnant dans les limites mentionnées à l'article 6. Six systèmes d'isolation différents, identifiés par leur température, sont considérés.

En raison des multiples combinaisons de différents systèmes d'isolation et de technologies, les recommandations relatives aux régimes de charge ne peuvent être que d'ordre général. Pour cette raison, le guide est en deux parties:

- la première partie ne donne pas de recommandations relatives aux régimes de charge, mais indique la méthode pour calculer les conditions de charge quand on connaît les paramètres variables à la suite d'essais de type concernant des technologies et/ou des systèmes d'isolation particuliers. Les calculs sont donnés sous forme d'un algorithme à partir duquel des programmes informatiques peuvent être écrits;
- dans la seconde partie, on suppose des valeurs constantes pour les paramètres variables, à l'exception des limites de température des isolants (tableau I) et de la température de l'air de refroidissement extérieur, indépendamment du système d'isolation ou de la technologie, ce qui rend ainsi possible l'établissement de courbes de charge.

Le guide précise de quelle façon peuvent fonctionner des transformateurs du type sec sans dépasser les limites acceptables pour la dégradation thermique de l'isolant. Les limites acceptables de dégradation de l'isolant correspondent à un fonctionnement du transformateur du type sec aux conditions assignées, à la température de base de l'air de refroidissement extérieur.

2. Objet

L'objet de ce guide est de permettre le calcul de la charge admissible, et de l'indiquer, dans certaines conditions bien définies en fonction du courant assigné, afin de guider les utilisateurs et d'aider les concepteurs à choisir la puissance assignée des transformateurs requis pour de nouvelles installations.

La température de base de l'air de refroidissement extérieur est supposée égale à 20 °C. Le guide est établi pour cette température et aussi pour des températures d'air de refroidissement extérieur de 10 °C et 30 °C. Des écarts par rapport à ces températures sont acceptables, pourvu que la consommation de vie supplémentaire, résultant d'un fonctionnement avec une température d'air de refroidissement extérieur plus élevée, soit compensée par une consommation de vie réduite résultant d'une température d'air de refroidissement extérieur plus faible.

En pratique, un fonctionnement continu ininterrompu pour la pleine valeur du courant assigné est inhabituel et ce guide donne quelques indications concernant des charges journalières cycliques en tenant compte des variations saisonnières de la température ambiante. Les consommations de vie journalières dues aux effets thermiques sont comparées avec la consommation de vie journalière normale obtenue quand le transformateur du type sec fonctionne aux tensions et courant assignés, avec une température d'air de refroidissement extérieur de 20 °C.

LOADING GUIDE FOR DRY-TYPE POWER TRANSFORMERS

1. Scope

This guide is applicable to naturally cooled dry-type power transformers complying with IEC Publication 726 and operated within the limitations referred to in Clause 6. Six different insulation systems are taken into account, identified by their system temperatures.

Because there are numerous combinations of different insulation systems and constructions it is possible to make loading recommendations only of a general nature. For this reason the guide is in two parts:

- the first part makes no loading recommendations, but gives the method of calculating loading conditions when the variable parameters are known as the result of prototype testing of a particular construction and/or insulation system. The calculations are given in the form of an algorithm from which computer programs can be written;
- the second part assumes constant values for the variable parameters, with the exception of the insulation temperature limits (Table 1) and the temperature of external cooling air, irrespective of insulation system or construction, thereby enabling load curves to be produced.

The guide indicates how dry-type transformers may be operated without exceeding the acceptable limit of deterioration of insulation through thermal effects. The acceptable limit of deterioration of insulation is defined as that which occurs when the dry-type transformer is operating under rated conditions at the basic temperature of the external cooling air.

2. Object

The object of this guide is to permit the calculation of, and to indicate the permissible loading under certain defined conditions in terms of rated current, for the guidance of users and to help planners to choose the rated power of transformers required for new installations.

The basic temperature of the external cooling air is assumed to be 20 °C. Guidance is given for this temperature, and also for external cooling air temperatures of 10 °C and 30 °C. Deviations from these temperatures are provided for in such a way that the increased use of life when operated with a higher external cooling air temperature is balanced by a reduced use of life with a lower external cooling air temperature.

In practice, uninterrupted continuous operation at full rated current is unusual, and this guide gives recommendations for cyclic daily loads, taking into account seasonal variations of ambient temperature. The daily use of life due to thermal effects is compared with normal daily use of life which results when the dry-type transformer is operating at rated voltage and current, with an external cooling air temperature of 20 °C.

Les courbes des figures 5 (1) à 5 (12), pages 32 à 43, indiquent le courant de charge admissible qui conduira à une consommation de vie journalière normale pour des systèmes d'isolation d'enroulement prévus pour les températures de 105, 120, 130, 155, 180 et 220 °C dans les conditions suivantes:

- a) service continu à différentes températures d'air de refroidissement extérieur,
- b) service cyclique à différentes températures d'air de refroidissement extérieur.

Note. – On suppose que le transformateur est convenablement ventilé et que les pertes supplémentaires résultant d'une surcharge ne modifient pas de manière significative la température de l'air de refroidissement.

3. Symboles

Les symboles suivants sont utilisés dans ce guide:

- a = indice se rapportant à l'«ambiante» (air de refroidissement extérieur)
- c = indice se rapportant au «point chaud de l'enroulement» au courant assigné et à la température de base de l'air de refroidissement extérieur
- cc = indice se rapportant au «point chaud de l'enroulement» dans les conditions maximales admises par le guide
- d = indice se rapportant au doublement de la vitesse de consommation de vie
- e = indice se rapportant à la valeur «moyenne d'enroulement» finale pour une valeur quelconque du courant de charge
- i = indice se rapportant à la valeur «moyenne d'enroulement» initiale pour une valeur quelconque du courant de charge
- j = nombre entier représentant le numéro du jour dans l'année (compris entre 1 et 365)
- $K_1, K_2, \dots, K_n, \dots, K_N$ = courants de charge exprimés en fraction du courant assigné
- m = indice se rapportant à la valeur «moyenne d'enroulement» maximale. (Ainsi, pour un fonctionnement continu au courant assigné on a $\Delta\theta_{mr} = \Delta\theta_c/Z$, et pour un fonctionnement pendant une courte période au-delà du courant assigné conduisant à une vitesse de consommation de vie supérieure à la normale pendant cette période, on a: $\Delta\theta_m = \Delta\theta_{cc}/Z$)
- n = indice se rapportant à une période quelconque du cycle de charge journalier
- q = exposant de K faisant varier l'échauffement moyen avec le courant de charge
- r = indice se rapportant à la valeur assignée
- t = temps
- t_b = durée, en heures, pour un courant de charge donné K_1 ($t_b \geq 24 - t_p$)
- t_p = durée maximale admissible, en heures, pour un courant de charge donné K_2
- $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N$ = durée de chaque régime de charge
- w = indice se rapportant à l'enroulement
- wh = indice se rapportant au «point chaud de l'enroulement»
- A = amplitude des variations annuelles de la température ambiante moyenne journalière (on suppose une variation sinusoïdale)
- B = amplitude des variations journalières de la température ambiante (on suppose une variation sinusoïdale)
- I = courant de charge en ampères (valeur quelconque); I_r = courant assigné
- k = indice se rapportant à une quelconque période individuelle de charge, préliminaire au démarrage de la période de charge t_n , pour laquelle est effectuée la détermination par le calcul

Load curves, Figures 5 (1) to 5 (12) on pages 32 to 43, show the permissible load current which will result in a normal daily use of life for winding insulation systems having insulation system temperatures of 105, 120, 130, 155, 180 and 220 °C in the following two sets of conditions:

- a) continuous duty with different temperatures of external cooling air,
- b) cyclic duty with different temperatures of external cooling air.

Note. – It is assumed that the transformer is adequately ventilated and the increased losses resulting from an overload do not significantly change the temperature of the cooling air.

3. Symbols

The following symbols are used in this guide:

- a = subscript representing “ambient” (external cooling air)
- c = subscript representing the “hot spot of the winding” at rated current and basic temperature of external cooling air
- cc = subscript representing the highest permissible “hot spot of the winding” according to this guide
- d = subscript representing the doubling of the rate of using life
- e = subscript representing the final “average of winding” for any value of load current
- i = subscript representing the initial “average of winding” for any value of load current
- j = integer variable representing the number of the day in the year ($1 \leq j \leq 365$)
- $K_1, K_2, \dots, K_n, \dots, K_N$ = load currents as fractions of rated currents
- m = subscript representing maximum “average of winding”. (Thus for continuous rated current, $\Delta\theta_{mr} = \Delta\theta_c/Z$, and for a short time in excess of rated current, $\Delta\theta_m = \Delta\theta_{cc}/Z$, resulting in a greater than normal rate of using life during this period)
- n = subscript representing any one period during the daily load cycle
- q = exponent of K by which the average temperature rise varies with load current
- r = subscript representing rated value
- t = time
- t_b = duration, in hours, at any load current K_1 ($t_b \geq 24 - t_p$)
- t_p = maximum permissible duration, in hours, at any load current K_2
- $t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N$ = duration of each load condition period
- w = subscript representing the winding
- wh = subscript representing the “hot spot of winding”
- A = amplitude of annual variations in the daily average ambient temperature (sinusoidal variation is assumed)
- B = amplitude of daily variations in the ambient temperature (sinusoidal variation is assumed)
- I = load current in amperes (any value); I_r = rated current
- k = subscript representing any individual load period prior to the start of the load period t_n for which the calculation is being made

L	=	consommation de vie en heures
L_{an}	=	vieillessement annuel calculé
L_R	=	vitesse relative de vieillissement
N	=	nombre de périodes de charge quotidiennes différentes
T	=	somme des périodes individuelles de charge t_k , préliminaires au démarrage de la période de charge t_n pour laquelle est effectuée la détermination par le calcul
Z	=	rapport entre l'échauffement du point et l'échauffement moyen de l'enroulement (voir aussi les explications relatives à l'indice m)
α	=	variable arbitraire utilisée dans la détermination du taux relatif de vieillissement
$\Delta\theta$	=	échauffement en kelvins
ε	=	facteur de précision pour l'estimation de la température du point chaud au début de la période de 24 h
θ	=	température en degrés Celsius
θ_{ad}	=	température ambiante moyenne journalière
θ_{ay}	=	température ambiante moyenne annuelle
τ	=	constante de temps thermique des enroulements au courant assigné, en heures

PREMIÈRE PARTIE

4. Bases du guide

4.1. Introduction

La vie d'un transformateur du type sec dépend de la dégradation des isolants résultant de leur vieillissement thermique. L'expérience montre qu'une vie normale s'étend sur quelques dizaines d'années. On ne peut pas préciser ce chiffre, car il peut même être différent pour deux unités identiques du fait, notamment, de facteurs d'exploitation pouvant différer d'un transformateur à un autre.

En pratique, un fonctionnement continu ininterrompu à la pleine valeur du courant de charge assigné est inhabituel et il convient de tenir compte des diverses conditions de fonctionnement et de la fluctuation de la vitesse de dégradation thermique des isolants du transformateur qui en découle.

Il est nécessaire par conséquent:

- De définir l'espérance de vie «normale» en fonction du courant de charge assigné et de la température assignée du point chaud de l'isolation de l'enroulement.
- De relier l'accroissement de la température du point chaud de l'enroulement à l'accroissement de la vitesse de dégradation des isolants.
- D'imaginer une méthode pour calculer l'influence nette, sur le vieillissement thermique des isolants, de la variation de la température du point chaud de l'enroulement résultant de changements de la période de charge, du courant de charge et de la température ambiante.
- De comparer alors la «consommation de vie» nette due à la somme des différents facteurs du cycle de charge avec la définition de la consommation de vie normale. De là, un paramètre quelconque du cycle de charge peut être ajusté pour donner une espérance normale de vie du transformateur.

- L = life consumption in hours
 L_{an} = calculated annual use of life
 L_R = relative rate of using life
 N = number of different load periods for a day
 T = sum of the individual load periods t_k prior to the start of the load period t_n for which the calculation is being made
 Z = ratio between hot spot and average winding temperature rises (see also explanations to subscript m)
 α = arbitrary variable used in determining the relative rate of using life
 $\Delta\theta$ = temperature rise in kelvins
 ε = accuracy factor for estimation of the hot-spot temperature at the beginning of the 24 h period
 θ = temperature in degrees Celsius
 θ_{ad} = daily average ambient temperature
 θ_{ay} = annual average ambient temperature
 τ = thermal time constant of windings at rated current, in hours

PART 1

4. Basis of guide

4.1. Introduction

The life of a dry-type transformer is related to the deterioration of its insulation through thermal ageing. Experience indicates that the normal life of a transformer is some tens of years. It cannot be stated more precisely, because it may vary even between identical units, owing in particular to operating factors which may differ from one transformer to another.

In practice, uninterrupted continuous operation at full load current is unusual and so account should be taken of the various operating conditions and the subsequent fluctuation of the rate of thermal deterioration of the transformer insulation.

It is necessary therefore:

- To define "normal" expectation of life as a function of the rated load current and the rated hot spot temperature of the winding insulation.
- To relate the increase in hot spot winding temperature to the increase in the rate of insulation deterioration.
- To devise a method of calculating the net effect of variation in the winding hot spot temperature due to changes in load period, load current and ambient temperature, on the thermal ageing of the insulation.
- To then compare the net "use of life" due to the sum of the different factors in the load cycle, with the definition of "normal use of life". Hence, any of the parameters in the load cycle can be adjusted to give a normal expectation of transformer life.

4.2 Paramètres utilisés dans les calculs

4.2.1 Limites de température

TABLEAU I

Limites de température

Température du système d'isolation (Publication 726 de la CEI) (°C)	Température du point chaud de l'enroulement (°C)		Limites d'échauffement moyen de l'enroulement au courant assigné (K) (Publication 726 de la CEI) ($\Delta\theta_{wr}$)
	assignée (θ_c)	maximale admissible (θ_{cc})	
105 (A)	95	140	60
120 (E)	110	155	75
130 (B)	120	165	80
155 (F)	145	190	100
180 (H)	175	220	125
220 (C)	210	250	150

4.2.2 Le paramètre θ_c est utilisé pour calculer la consommation de vie normale. Dans certaines conditions de fonctionnement pour lesquelles il est admissible de dépasser ce niveau normal de consommation, de fortes surcharges peuvent être appliquées, conduisant à une température de point chaud beaucoup plus grande que θ_c . Par conséquent, un paramètre θ_{cc} représentant la limite absolue de la température du point chaud a été introduit. Cette température est celle au-delà de laquelle la vitesse de détérioration de l'isolation devient inadmissible. (Voir tableau I pour les valeurs de θ_c et θ_{cc} .)

4.2.3 La valeur du paramètre θ_d correspond à l'accroissement de la température du point chaud qui double la vitesse de vieillissement.

4.2.4 La grandeur fondamentale nécessaire au calcul de la consommation de vie est la température du point le plus chaud. Elle nécessite la connaissance de l'échauffement de ce point pour chaque régime de charge et de la température ambiante. Il existe au moins deux méthodes pour obtenir l'échauffement du point chaud:

- $\Delta\theta_{whn}$ peut être déterminé par des essais d'échauffement avec des charges différentes K_n ;
- en utilisant la formule:

$$\Delta\theta_{whn} = Z \cdot \Delta\theta_{wr} \cdot K_n^q \quad (1)$$

Dans ce cas, il est nécessaire de connaître les valeurs de Z , $\Delta\theta_{wr}$ et q .

Il est préférable d'utiliser, chaque fois que cela est possible, les résultats d'essais donnant $\Delta\theta_{whn}$: ceci élimine ainsi toute incertitude sur la validité du facteur Z et sur la valeur de q . L'expérience montre que q et Z prennent des valeurs différentes suivant le type de transformateur et le niveau de charge auquel il fonctionne.

Note. – Avec plusieurs types de construction d'enroulement, la détermination de $\Delta\theta_{whn}$ peut être seulement possible sur des transformateurs prototypes.

A partir des résultats d'essais, on peut tracer une courbe $\Delta\theta_{wh} = f(K)$, qui peut être utilisée pour déterminer pour chaque valeur de K_n nécessaire au calcul la valeur $\Delta\theta_{whn}$ correspondante.