

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

GERARD BARTODZIEJ



P. 3347/93

**RESISTANCE ET L'ÉCHAUFFEMENT
DES RACCORDS ÉLECTRIQUES**

ELEKTRYKA

**Z. 133
Gliwice
1993**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1216

P.3347/93

GERARD BARTODZIEJ



RESISTANCE ET L'ÉCHAUFFEMENT DES RACCORDS ELECTRIQUES

**MONOGRAFIA OPRAWOWANA POD PATRONATEM KOMITETU ELEKTRONIKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Szczęsny Kujszczyk

Prof. dr hab. inż. Romuald Kosztaluk

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU - Doc. dr inż. Zofia Cichowska

SEKRETARZ REDAKCJI - Mgr Elżbieta Leško

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Monografia sponsorowana przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA

PL ISSN 0072-4688

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakład 150+53

Ark.wyd. 11.5

Ark.druk.12

Papier offset III x 80g

Oddano do druku 26.10.1993 r.

Druk ukończono w grudniu 1993 r.

Cena 40.000,-

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w SC "AMGraf", Gliwice, ul. Jasna 8

TABELE DE MATIERES

	str.
PREFACE	15
INTRODUCTION	17
NOTATIONS UTILISEES	21
CHAPITRE 1 MODELISATION DES RACCORDS DU POINT DE VUE ELECTRIQUE	27
1.1. Introduction	27
1.2. Modèle mathématique d'un raccord plan dont la répartition de la résistance de contact est discrète	31
1.3. Modèle mathématique d'un raccord linéaire dont la répartition de la résistance de contact est discrète	35
1.4. Modèles physiques des raccords linéaires dont la répartition de la résistance de contact est discrète	41
1.5. Modèle mathématique d'un raccord linéaire dont la répartition de la résistance de contact est continue	44
1.5.1. Généralités	44
1.5.2. Relations entre les résistances du raccord	46
1.5.3. Raccord homogène de dérivation	47
1.5.4. Raccords homogènes simples (I_{Ip} , I_{Iz} , I_o)	49
1.5.5. Vérification des modèles des raccords linéaires	52
1.6. Certaines possibilités d'application des modèles de raccords	59
1.6.1. Relation entre le type de raccord et la résistance	59
1.6.2. La longueur d'un raccord et la résistance	61
1.6.3. Influence de la forme de la surface d'un raccord sur leur résistance	63
1.6.4. Influence de la résistance d'une pièce de contact à la résistance du raccord	64

CHAPITRE 2 MODELISATION DES RACCORDS DU POINT DE VUE THERMIQUE - - ÉCHAUFFEMENT STATIONNAIRE	66
2.1. Généralités	66
2.2. Bilan des puissances thermiques	68
2.3. Description analytique de l'échauffement d'une structure thermocinétique linéaire	69
2.4. Méthode numérique de calcul de l'échauffement d'une structure linéaire quelconque	73
2.4.1. Principes de la méthode	73
2.4.2. Calcul de l'échauffement d'une structure linéaire dont les résistances thermiques dépendent de la température	77
2.4.3. Calcul de l'échauffement d'un raccord dont les résistances électriques et thermiques dépendent de l'échauffement	78
CHAPITRE 3 PARAMÈTRES EXTÉRIEURS D'UN RACCORD	83
3.1. Intensité admissible durable d'un raccord	83
3.2. Résistance admissible d'un raccord pour la charge durable	86
3.3. Capacité de vieillissement et la durée de vie d'un raccord	91
CHAPITRE 4 RACCORDS DE LIGNES AÉRIENNES	94
4.1. Introduction	94
4.2. Les raccords de conducteurs nus de lignes aériennes	96
4.3. Modèle électrique du raccord	98
4.4. L'échauffement de l'ensemble raccord - conducteur de lignes aériennes	108
4.4.1. Généralités	108
4.4.2. Vérification des formules de calcul de l'échauf- fement de l'ensemble raccord-conducteur	114
4.4.2.1. Vérification analytique	114
4.4.2.2. Vérification expérimentale	116
4.4.3. Méthode numérique de calcul de l'échauffement d'une structure thermocinétique unidimensionnelle	118
4.5. Résistance admissible d'un raccord de jonction	125

4.5.1. Résistance relative admissible d'un raccord dans l'état thermique stationnaire	127
4.6. Vieillessement des raccords de conducteurs nus des lignes aériennes	131
4.6.1. Introduction	131
4.6.2. Modèle global de vieillissement	132
4.7. Méthodes d'évaluation de la qualité de raccords de lignes aériennes	137
4.7.1. Mesure de température le long d'un raccord	138
4.7.2. Mesure de la chute de tension le long d'un raccord	140
4.7.3. Mesure de la résistance électrique d'un raccord	142
4.7.3.1. Mesure de la résistance électrique des raccords des lignes hors tension	145
4.7.3.2. Mesure de la résistance électrique des raccords des lignes en service	151
4.7.3.2.1. Généralités	151
4.7.3.2.2. Valeurs numériques des paramètres mesurés	151
4.7.3.2.3. Mesure de la chute de tension sur un conducteur et un raccord	154
4.7.3.2.4. L'influence du champ électromagnétique des conducteurs voisins sur les résultats de mesure de la chute de tension	156
4.7.3.2.5. Essai de réduction de la composante selfique liée au champ magnétique d'un conducteur unique	158
4.7.3.2.6. Réduction de la composante selfique provoquée par le champ magnétique d'un conducteur voisin	161
4.7.3.2.7. Essai de compensation totale de la composante selfique de la chute de tension sur un conducteur appartenant au faisceau double	162
4.7.3.2.8. Réduction de la composante selfique de la chute de tension sur un conducteur appartenant au faisceau	163
4.7.3.2.9. Vérification expérimentale de possibilité de mesure de la chute de tension sur un conducteur avec une compensation de la composante selfique	164
4.7.3.2.10. Conception d'application pratique du principe de la compensation de la composante selfique de chute de tension	167

4.7.3.2.11. Structure d'un dispositif de mesure de la chute de tension sur un conducteur ou raccord de ligne aérienne	167
CHAPITRE 5 CHARGE ADMISSIBLE D'UNE LIGNE AÉRIENNE EN FONCTION DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION ÉLECTRIQUE DES RACCORDS	172
5.1. Introduction	172
5.2. Méthode de calcul	172
5.3. Exemple numérique	174
CONCLUSIONS	177
BIBLIOGRAPHIE	179
RÉSUMÉ	189

SPIS TREŚCI

	str.
PRZEDMOWA	15
WPROWADZENIE	17
WYKAZ OZNACZEŃ	21
ROZDZIAŁ 1 MODELOWANIE ZŁĄCZY STYKOWYCH Z PUNKTU WIDZENIA ELEKTRYCZNEGO	27
1.1. Wprowadzenie	27
1.2. Model matematyczny złącza płaskiego o dyskretnym rozkładzie rezystancji stykowej	31
1.3. Model matematyczny złącza linearnego o dyskretnym rozkładzie rezystancji stykowej	35
1.4. Model fizyczny złączy linearnych o dyskretnym rozkładzie rezystancji stykowej	41
1.5. Model matematyczny złącza linearnego o ciągłym rozkładzie rezystancji stykowej	44
1.5.1. Wstęp	44
1.5.2. Związki między rezystancjami złącza	46
1.5.3. Jednorodne złącze odgałęźne	47
1.5.4. Złącza jednorodne typu IIp, IIz, Io	49
1.5.5. Weryfikacja modeli złączy linearnych	52
1.6. Pewne możliwości zastosowań modeli złączy	59
1.6.1. Związek między typem złącza a rezystancją	59
1.6.2. Długość złącza i jego rezystancja	61
1.6.3. Wpływ kształtu powierzchni złącza na jego rezystancję	63
1.6.4. Wpływ rezystancji zestykowej na rezystancję złącza	64

ROZDZIAŁ 2	MODELOWANIE ZŁĄCZY Z PUNKTU WIDZENIA TERMICZNEGO -	
	- NAGRZEWANIE W STANIE USTALONYM	66
2.1.	Wstęp	66
2.2.	Bilans mocy cieplnych	68
2.3.	Opis analityczny nagrzewania struktury termokinetycznej	
	linearnej	69
2.4.	Metoda numeryczna obliczeń nagrzewania dowolnej struk-	
	tury linearnej	73
2.4.1.	Podstawy metody	73
2.4.2.	Obliczanie nagrzewania struktury linearnej, któ-	
	rej rezystancja termiczna zależy od temperatury	77
2.4.3.	Obliczanie nagrzewania złącza, którego rezystan-	
	cja elektryczna i termiczna zależy od temperatury	78
ROZDZIAŁ 3	PARAMETRY ZEWNĘTRZNE ZŁĄCZA	83
3.1.	Natężenie prądu dopuszczalnego, długotrwałego złącza	83
3.2.	Rezystancja dopuszczalna złącza dla obciążenia długo-	
	trwałego	86
3.3.	Własności starzeniowe i żywotność złącza	91
ROZDZIAŁ 4	ZŁĄCZA LINII NAWIETRZNYCH	94
4.1.	Wprowadzenie	94
4.2.	Złącza przewodów gołych linii nawiętrznych	96
4.3.	Model elektryczny złącza	98
4.4.	Nagrzewanie zespołu złącza - przewod linii nawiętrznych	108
4.4.1.	Wstęp	108
4.4.2.	Weryfikacja wzorów na obliczanie nagrzewania	
	zespołu złącze - przewod	114
4.4.2.1.	Weryfikacja analityczna	114
4.4.2.2.	Weryfikacja doświadczalna	116
4.4.3.	Metoda numeryczna obliczania nagrzewania jednowy-	
	miarowej struktury termokinetycznej	118
4.5.	Rezystancja dopuszczalna złącza stykowego	125
4.5.1.	Rezystancja względna, dopuszczalna złącza w ter-	
	micznym stanie ustalonym	127

4.6. Starzenie złączy przewodów gołych linii napowietrznych	131
4.6.1. Wprowadzenie	131
4.6.2. Model całościowy starzenia	132
4.7. Metody oceny jakości złączy linii napowietrznych	137
4.7.1. Pomiar temperatury wzdłuż złącza	138
4.7.2. Pomiar spadku napięcia wzdłuż złącza	140
4.7.3. Pomiar rezystancji elektrycznej złącza	142
4.7.3.1. Pomiar rezystancji elektrycznej złączy linii w stanie beznapięciowym	145
4.7.3.2. Pomiar rezystancji elektrycznej złączy linii w czasie jej normalnej pracy	151
4.7.3.2.1. Wstęp	151
4.7.3.2.2. Wartości liczbowe mierzonych parametrów	151
4.7.3.2.3. Pomiar spadku napięcia na przewodzie i na złączu	154
4.7.3.2.4. Wpływ pola elektromagnetycznego przewodów sąsied- nich na wyniki pomiarów spadku napięcia	156
4.7.3.2.5. Próba redukcji składowej indukcyjnej związanej z polem magnetycznym pojedynczego przewodu	158
4.7.3.2.6. Redukcja składowej indukcyjnej wytworzonej przez pole magnetyczne przewodu sąsiedniego	161
4.7.3.2.7. Próba kompensacji całkowitej składowej indukcyj- nej spadku napięcia na przewodzie należącego do wiązki podwójnej	162
4.7.3.2.8. Redukcja składowej indukcyjnej spadku napięcia na przewodzie należącego do wiązki przewodów	163
4.7.3.2.9. Sprawdzenie doświadczalne możliwości pomiaru spad- ku napięcia na przewodzie z kompensacją składowej indukcyjnej	164
4.7.3.2.10. Koncepcja zastosowania praktycznego zasady kompen- sacji składowej indukcyjnej spadku napięcia	167
4.7.3.2.11. Budowa urządzenia do pomiaru spadku napięcia na przewodzie lub złączu linii napowietrznej	167

ROZDZIAŁ 5 OBCIĄŻENIE DOPUSZCZALNE LINII NAWIETRZNEJ W FUNKCJI STANU DEGRADACJI ELEKTRYCZNEJ ZŁĄCZY	172
5.1. Wprowadzenie	172
5.2. Metoda obliczeń	172
5.3. Przykład liczbowy	174
WNIOSKI	177
LITERATURA	179
STRESZCZENIE	189

TABLE OF CONTENTS

	str.
PREFACE	15
INTRODUCTION	17
NOTES	21
CHAPTER 1 MODELLING OF CONTACT CONNECTORS AS WELL AS ELECTRICITY IS CONCERNED	27
1.1. Introduction	27
1.2. The mathematical model of flat connector with the discrete distribution of contact resistance	31
1.3. The mathematical model of linear connector with the dis- crete distribution of contact resistance	35
1.4. The physical model of linear connectors with the discrete distribution of contact resistance	41
1.5. The mathematical model of linear connector with the conti- nuous distribution of contact resistance	44
1.5.1. Introduction	44
1.5.2. Connections between the resistance of the connector	46
1.5.3. The homogeneous branch - joint	47
1.5.4. The homogeneous connectors I_{lp} , I_{lz} , I_o	49
1.5.5. Verification of the linear connector models	52
1.6. Some possibilities of the connector models application	59
1.6.1. Connection between the type of the connector and the resistance	59
1.6.2. The length of the connector and its resistance	61
1.6.3. Influence of the connector surface form on its resistance	63
1.6.4. Influence of the contact points resistance on the connector resistance	64

CHAPTER 2	MODELLING OF CONNECTORS AS WELL AS THERMAL FIELD IS CONCERNED. HEATING IN THE STEADY STATE	66
2.1.	Introduction	66
2.2.	The thermal power balance	68
2.3.	Analytical description of the linear thermokinetic structure heating	69
2.4.	Numerical method of the arbitrary linear structure heating calculations	73
2.4.1.	Bases of the method	73
2.4.2.	The heating calculation of the arbitrary linear structure whose thermal resistance depends on the temperature.....	77
2.4.3.	The heating calculation of the connector whose electric and thermal resistance depends on the tepmerature	78
CHAPTER 3	THE EXTERNAL PARAMETERS OF THE CONNECTOR	83
3.1.	The rated long - lasting current of the connector	83
3.2.	The rated resistance of the connector for long - lasting loading	86
3.3.	Ageing capabilities and eutailing no damage work time	91
CHAPTER 4	THE AERIAL LINES CONNECTORS	94
4.1.	Introduction	94
4.2.	The connectors of the aerial line bave conductor	96
4.3.	The connector electric model	98
4.4.	The connector set heating. The aerial line conductor	108
4.4.1.	Introduction	108
4.4.2.	Verification of the formulae for the connector set calculation	114
4.4.2.1.	Analytical verification	114
4.4.2.2.	Experimental verification	116
4.4.3.	Numerical method of the one-dimensional thermo-kinetic structure calculation	118
4.5.	The rated resistance of the contact connector	125

4.5.1. The relative rated resistance in thermal steady state	127
4.6. Ageing of the aerial line bare conductors	131
4.6.1. Introduction	131
4.6.2. The total ageing model	132
4.7. The method of the aerial line connectors quality estimation	137
4.7.1. Temperature measurement along the connector	138
4.7.2. Voltage drop measurement along the connector	140
4.7.3. The measurement of electric connector resistance	142
4.7.3.1. The measurement of electric connector resistance without voltage	145
4.7.3.2. The measurement of electric connector resistance during its normal work	151
4.7.3.2.1. Introduction	151
4.7.3.2.2. Numerical value of the unknown parameters	151
4.7.3.2.3. The measurement of the voltage drop on the conductor and the connector	154
4.7.3.2.4. Influence of the adjacent conductor electromagnetic field on the voltage drop results	156
4.7.3.2.5. The test of the inductive component reduction connected with the magnetic field of a single conductor	158
4.7.3.2.6. Reduction of the inductive component created by the magnetic field of the adjacent conductor	161
4.7.3.2.7. The test of the voltage drop inductive component on the conductor belonging to the group of conductors	162
4.7.3.2.8. Reduction of the inductive voltage drop on the conductor belonging to the group of conductors	163
4.7.3.2.9. The experiment of the voltage drop possible measurement on the conductor with the induction components compensation	164
4.7.3.2.10. Conception of the practical application of the voltage drop inductive component compensation rule	167
4.7.3.2.11. Creating the measuring device of the voltage drop on the conductor or the aerial line conductor	167

CHAPTER 5 BASIC AERIAL LINE-LOAD IN THE FUNCTION OF CONNECTORS	
ELECTRIC DEGRADATION	172
5.1. Introduction	172
5.2. Calculation method	172
5.3. Numerical example	174
CONCLUSIONS	177
BIBLIOGRAPHY	179
SUMMARY	189

PREFACE

Cet ouvrage s'adresse avant tout aux étudiants en génie électrique des universités, aux ingénieurs de l'industrie ou des bureaux d'études qui désirent se rafraîchir ou approfondir leurs connaissances des phénomènes électriques et thermiques liés aux raccords électriques.

Le développement des lignes aériennes est pratiquement terminé. Actuellement, la grande importance ont les travaux sur le diagnostic de la ligne. On prévoit la durée de vie des éléments de la ligne et de même le temps du service sans avarie. Parmi les autres, les raccords électriques sont les plus sensibles éléments influant sur la fiabilité de la ligne. C'est pourquoi cet ouvrage expose les concepts théoriques et les applications pratiques des raccords destinés aux courants forts.

En indiquant les possibilités d'application des modèles mathématiques pour les raccords, cet ouvrage, par l'appréciation de la résistance, de l'échauffement et du vieillissement, donne une base pour le calcul de la charge admissible d'une ligne aérienne en fonction de l'état de dégradation électrique des raccords. Avec les méthodes proposées de mesurer la température et la résistance des raccords sous la tension tout ça est l'un des éléments du diagnostic qui va jouer une rôle importante dans les prochaines années.

Cet ouvrage est une synthèse des recherches menées par l'auteur pendant la période 1978-1992 à la Division "Lignes Aériennes" de la Direction des Études et Recherches à L'Électricité de France ainsi qu'à L'Université Technique de Silésie (Gliwice, Pologne).

L'auteur a mené ses études sur les raccords électriques avec les objectifs suivants :

- création de modèles mathématiques des phénomènes électrique et thermiques dans les raccords, applicables aux études du vieillissement des raccords.
- création d'une méthode de dimensionnement des raccords, applicable par les constructeurs.
- détermination des exigences des paramètres électriques et thermiques des raccords (normalisation).

- application des modèles et méthodes pour l'appréciation de différentes technologies de raccordement.
- création d'une méthode de détermination de la résistance électrique des raccords sur la base de mesures en conditions de l'exploitation normale d'une ligne aérienne.
- détermination de la charge admissible d'une ligne aérienne en fonction de l'état de dégradation électrique des raccords.

Le livre commence par une introduction générale aux raccords électriques. Ensuite, il traite, aux trois premiers chapitres, des raccords dans la forme générale. Les derniers chapitres traitent des raccords dans le cas particulier c'est - à - dire des raccords de lignes aériennes.

Pour l'autodidacte, un effort a été fait en vue d'une plus grande clarté des exposés. Souvent on n'a pas hésité à répéter certaines formules, ce qui permet aussi d'utiliser l'ouvrage comme un livre de référence et d'entrer dans un chapitre sans connaître tous les détails des chapitres précédents.

Un livre, surtout en sciences appliquées, n'est jamais l'oeuvre d'un homme. Il est souvent le résultat d'une dure expérience, d'un concours de circonstances favorables et de l'aide directe de nombreuses autres personnes.

Parmi ces dernières, je me dois citer mes collègues de l'Électricité de France ainsi que de l'Université Technique de Silésie qui m'ont aidé à de nombreuses reprises, notamment par de fertiles discussions. L'édition n'était pas possible sans l'engagement particulier de mon collègue Mr Z. Piątek qui a rédigé le texte.

Un merci spécial est adressé à Mr S. Kujszczyk et Mr R. Kosztaluk qui ont fait l'opinion favorable de cet ouvrage.

Je tiens également à remercier la société "Polskie Sieci Energetyczne S.A." qui m'a aidé éditer cet ouvrage.

Enfin, je demande à mon épouse Marta de me pardonner les nombreuses heures où durant tant d'années je l'ai privée d'une présence qui lui revenait, occupé à ce travail interminable.

GERARD BARTODZIEJ

INTRODUCTION

Les raccords électriques présents dans tout matériel électrique ont une grande influence sur le comportement en service de celui-ci.

Les raccords sont en effet soumis au processus de vieillissement (influence de l'environnement, énergie électrique transmise), qui peut aboutir à des avaries de matériel.

Le coût de remplacement d'un raccord avarié dans un matériel électrique est souvent très élevé par rapport au coût initial (d'acquisition et de montage) car il inclut le coût d'indisponibilité du matériel. Les problèmes de vieillissement de raccords peuvent donc prendre une importance économique très grande.

L'étude est limitée aux raccords électriques pour les courants forts (raccords de câbles de lignes aériennes, de câbles souterrains, de barres dans les postes etc...)

On suppose généralement que dans ces raccords le courant électrique est transmis par un grand nombre de contacts élémentaires métalliques. L'analyse concerne surtout le comportement statique des raccords (ou quasi-statique pour les courants de court-circuit).

Malgré la très grande diversité de forme et d'utilisation des raccords destinés à des intensités de moins d'ampère à des dizaines de kiloampères, on observe des phénomènes électriques et thermiques communs pour tous les raccords mettant en oeuvre des contacts surfaciques.

Les phénomènes mis en jeu dans les raccords électriques parcourus par un courant électrique et soumis aux contraintes mécaniques sont suivants:

- phénomènes électriques; de répartition du courant, de la tension, des pertes de puissance dans les pièces de contact, les contacts élémentaires et les éléments mécaniques.
- phénomènes thermiques; d'échauffement du raccord par les pertes de puissance et d'échange de chaleur entre le raccord et l'environnement, ainsi qu'entre le raccord et les éléments du matériel électrique où le raccord est installé.
- phénomènes structurels; de recristallisation du matériau (surtout sur la surface des contacts), de relaxation des contraintes et de fluage.

- phénomènes mécaniques: liés à la présence des forces, contraintes, et déformations élastiques et plastiques dans les éléments du raccord.
- phénomènes chimiques: de corrosion des éléments qui composent un raccord; les contacts élémentaires y compris.

On constate une importance décisive des phénomènes électriques et thermiques dans le comportement statique d'un raccord. Par état statique d'un raccord on comprend ici l'état d'un raccord ayant une structure constante; les phénomènes structurels, mécaniques et chimiques sont donc ici négligés.

La procédure de vieillissement d'un raccord change surtout les paramètres de contacts élémentaires en provoquant le changement des paramètres électriques et thermiques ainsi que des paramètres mécaniques. On constate une influence de l'échauffement du raccord, sur les phénomènes déterminants la procédure du vieillissement.

Sur la figure 1 on essaie de montrer les relations entre les influences extérieures, les phénomènes auxquels un raccord est sensible et les manifestations extérieures de la procédure de vieillissement d'un raccord.

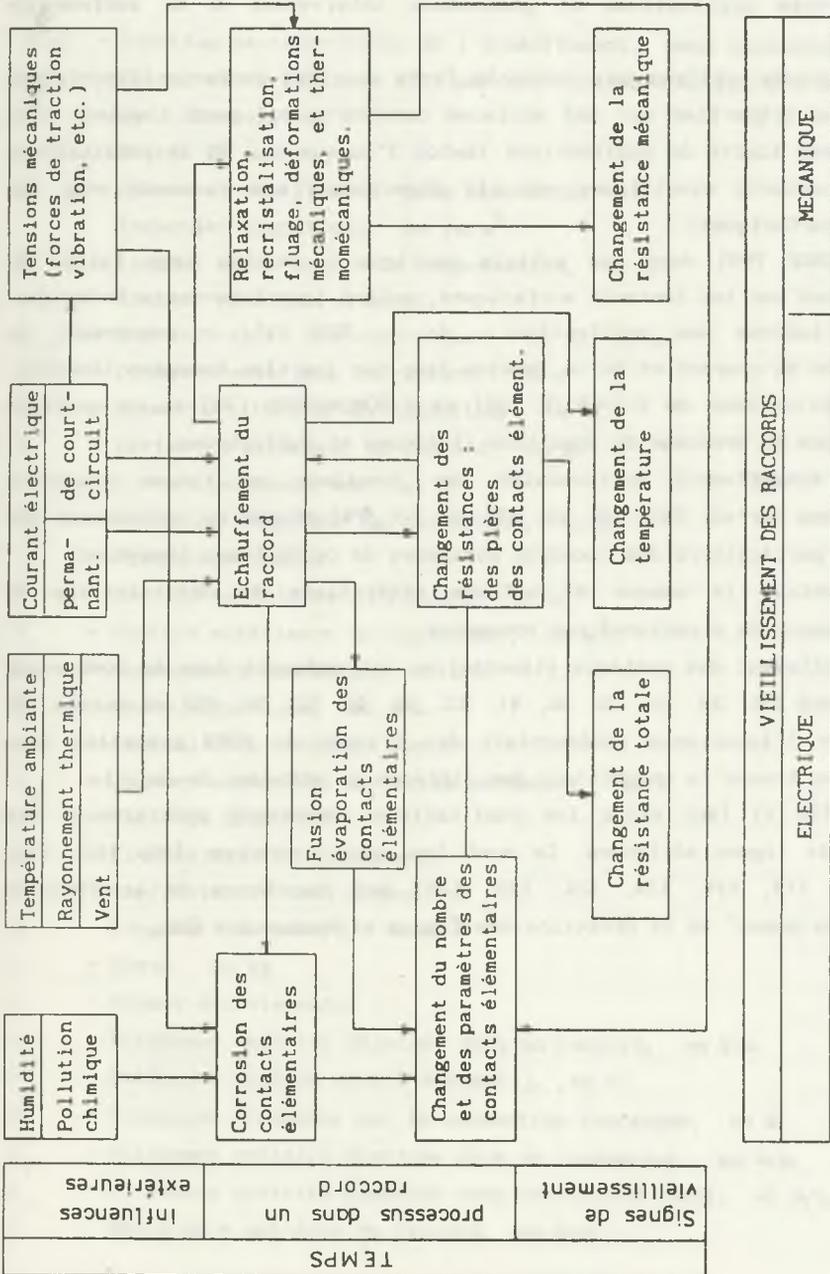


Fig.1. Mécanismes de vieillissement des raccords électriques
 Rys.1. Mechanizm starzenia się złączy stykowych

Une très vaste bibliographie est consacrée aux contacts électriques ponctuels, appliqués surtout aux courants faibles, très diversifiés à cause de différents applications et phénomènes intervenant à la surface de contact.

Les raccords utilisés pour courants forts avec des contacts élémentaires surfaciques (réparties sur des surfaces considérables) sont l'objet d'un nombre assez limité de publications (selon l'auteur ca. 5% de publications sur les contacts électriques est lié directement aux raccords avec les contacts surfaciques).

A. WOLLENEK [95] dans son article souligne le nombre très faible de publications sur les contacts surfaciques, malgré leur importance technique. L'auteur indique une publication - de J. HUS [51] - concernant la répartition du courant et de la tension dans une jonction homogène linéique, et les publications de Y. YOSHICK [96] et S. DOMONKONOS [34] où on souligne l'importance du problème de jonctions linéiques et surfaciques.

Sur l'échauffement stationnaire des jonctions on trouve plusieurs publications par ex. [43, 47, 48, 52, 54, 69, 79] et autres, concernant des problèmes particuliers des raccords homogènes de conducteurs homogènes.

On constate le manque de méthode généralisée de détermination de l'échauffement de structures non homogènes.

L'échauffement des contacts élémentaires est présenté dans de nombreuses publications [11, 25, 26, 35, 36, 41, 43, 44, 46, 50, 56, 85] et autres. Il faut noter l'importance fondamentale des travaux de HOFT présentés dans [11], où on trouve la comparaison des différentes méthodes de calculs.

À la fin il faut citer les publications concernant spécialement des raccords de lignes aériennes. Ce sont les notes technique [99, 103, 111, 113, 114, 115, 116, 118, 124, 125, 126] des chercheurs de la Division "Lignes Aériennes" de la Direction des Études et Recherches ÉdF.

NOTATIONS UTILISEES

- $\Lambda(x)$ - Fonction de répartition de l'échauffement, sans dimension
- Λ_0 - Valeur de la fonction $\Lambda(x)$ por $x=0$ (milieu d'un raccord de jonction) sans dimension.
- a, b - Points de mesure.
- B - Nombre de similitude, sans dimension.
Induction magnétique, en Vs/m².
- C - Largeur de la boucle de compensation, en m.
- c - Chaleur massique, en J/kgK.
- d_{12} - Distance entre les conducteurs 1 et 2, en m.
- D - Diamètre extérieur du raccord, en m.
- D_1 - Diamètre extérieur du conducteur, en m.
- E - Périmètre extérieur du raccord, en m.
Force électromotrice, en V.
- E_1 - Périmètre extérieur du conducteur, en m.
- f - Fréquence, en Hz.
- F - Surface extérieure du raccord, en m².
- F_1 - Surface extérieure du conducteur, en m².
- G - Conductance thermique, en W/k.
- H - Champ magnétique, en A/m.
- I - Intensité du courant, en A.
- I_{ad} - Courant admissible en régime permanent, en A .
- j - Variable discrète.
- k - Elément discret quelconque.
- K - Coefficient, sans dimension.
- l - Longueur du raccord, en m.
- m - Masse, en kg.
- n - Nombre des éléments.
- p - Puissance unitaire dissipée dans un raccord, en W/m.
- P_j - Puissance dispée dans l'élément j, en W.
- P_1 - Puissance transmise par la conduction thermique, en W.
- p_1 - Puissance unitaire dissipée dans un conducteur, en W/m.
- p_n - Puissance unitaire dissipée dans un raccord idéal, en W/m.
- r - Résistance unitaire du raccord, en Ω/m .

- R - Résistance totale du raccord, en Ω .
- r_1 - Résistance unitaire du conducteur, en Ω/m .
- R_n - Résistance du raccord idéal, en Ω .
- r_n - Résistance unitaire du raccord idéal, en Ω/m .
- r_{ad} - Résistance unitaire admissible du raccord, en Ω/m .
- \bar{r} - Résistance relative du raccord, sans dimension.
- \bar{r}_{ad} - Résistance relative admissible du raccord, sans dimension.
- s - Section effective (électrique) du raccord, en m^2 .
- S_1 - Section effective du conducteur, en m^2 .
- t - Temps, en s.
- Δt - Pas de temps, en s.
- T - Température du raccord, en $^{\circ}C$.
- ΔT - Échauffement du raccord, en K.
- T_a - Température ambiante (de l'air), en $^{\circ}C$.
- ΔT_1 - Échauffement du conducteur, en K.
- T_s - Température de la surface du sol, en $^{\circ}C$.
- T_c - Température équivalente du ciel pour la rayonnement thermique, en $^{\circ}C$.
- ΔT_k - Terme de correction, en K.
- $\Delta T^{(k)}$ - Échauffement de l'élément k, en K.
- w - Résistance thermique unitaire entre le raccord et l'ambiance, en $\frac{K}{W m}$.
- w_1 - Résistance thermique unitaire entre le conducteur et l'ambiance, en $\frac{K}{W m}$.
- w_λ - Résistance thermique unitaire de conduction du raccord, en $\frac{K}{W m}$.
- $w_{\lambda 1}$ - Résistance thermique unitaire de conduction du conducteur, en $\frac{K}{W m}$.
- W - Résistance thermique entre le raccord de longueur l et l'ambiance, en K/W.
- W_1 - Résistance thermique entre le conducteur de longueur l et l'ambiance, en K/W.
- W_λ - Résistance thermique de conduction du raccord de longueur l, en K/W.
- $W_{\lambda 1}$ - Résistance thermique de conduction du conducteur de longueur l, en K/W.
- W_a - Résistance thermique équivalente d'une structure thermique a, en K/W.
- W_b - Résistance thermique équivalente d'une structure thermique b, en K/W.

- W'_k - Résistance thermique équivalente de la partie "gauche" de la structure analysée, vue du point k, en K/W.
- W''_k - Résistance thermique équivalente de la partie "droite" de la structure analysée, vue du point k, en K/W.
- x - Distance, en m.
- X - Réactance globale, en Ω .
- X_o - Réactance interne (liée au flux interne), en Ω .
- Z - Impédance globale, en Ω .
- Z_o - Impédance interne, en Ω .
- α - Coefficient d'échange de chaleur, en W/m^2K .
- γ - Coefficient de transmission thermocinétique pour le raccord, en 1/m.
- γ_1 - Coefficient de transmission thermocinétique pour le conducteur, en 1/m.
- λ - Conductibilité thermique, équivalente pour le raccord, en W/mK.
- λ_1 - Conductibilité thermique du conducteur, en W/mK.

WYKAZ OZNACZEŃ

- $A(x)$ - Bezwymiarowa funkcja rozkładu nagrzewania.
 A_0 - Wartość funkcji $A(x)$ dla $x=0$ (środek złącza stykowego).
 a, b - Punkty pomiaru.
 B - Liczba podobieństwa, bez wymiaru.
 Indukcja magnetyczna, w Vs/m^2 .
 C - Szerokość pętli kompensacyjnej, w m.
 c - Ciepło właściwe, w J/kgK .
 d_{12} - Odległość między przewodem 1 a 2, en m.
 D - Średnica zewnętrzna złącza, w m.
 D_1 - Średnica zewnętrzna przewodu, w m.
 E - Obwód zewnętrzny złącza, w m.
 Siła elektromotoryczna, w V.
 E_1 - Obwód zewnętrzny przewodu, w m.
 f - Częstotliwość, w Hz.
 F - Pole powierzchni zewnętrznej złącza, w m^2 .
 F_1 - Pole powierzchni zewnętrznej przewodu, w m^2 .
 G - Przewodność cieplna, w W/k .
 H - Natężenie pola magnetycznego, w A/m .
 I - Natężenie prądu, w A.
 I_{ad} - Natężenie prądu dopuszczalnego w stanie ustalonym, w A.
 j - Zmienna dyskretna.
 k - Dowolny element dyskretny.
 K - Współczynnik, bezwymiarowy.
 l - Długość złącza, w m.
 m - Masa, w kg.
 n - Liczba elementów.
 p - Moc jednostkowa wydzielana w złączu, w W/m .
 P_j - Moc wydzielana w elemencie j , w W.
 P_1 - Moc przenoszona przez przewodnictwo cieplne, w W.
 p_1 - Moc jednostkowa wydzielana w przewodzie, w W/m .
 p_n - Moc jednostkowa wydzielana w złączu idealnym, w W/m .
 r - Rezystancja jednostkowa złącza, w Ω/m .

- R - Rezystancja całkowita złącza, w Ω .
- r_1 - Rezystancja jednostkowa przewodu, w Ω/m .
- R_n - Rezystancja złącza idealnego, w Ω .
- r_n - Rezystancja jednostkowa złącza idealnego, w Ω/m .
- r_{ad} - Rezystancja jednostkowa dopuszczalna złącza, w Ω/m .
- \bar{r} - Rezystancja względna złącza, bez wymiaru.
- \bar{r}_{ad} - Rezystancja względna dopuszczalna złącza, bez wymiaru.
- S - Przekrój rzeczywisty złącza, w m^2 .
- S_1 - Przekrój rzeczywisty przewodu, w m^2 .
- t - Czas, w s.
- Δt - Przyrost czasu, w s.
- T - Temperatura złącza, w $^{\circ}C$.
- ΔT - Przyrost temperatury, w K.
- T_a - Temperatura otoczenia (powietrza), w $^{\circ}C$.
- ΔT_1 - Przyrost temperatury przewodu, w K.
- T_s - Temperatura powierzchni ziemi, w $^{\circ}C$.
- T_c - Temperatura zastępcza nieba przy promieniowaniu cieplnym, w $^{\circ}C$.
- ΔT_k - Człon korekcyjny, w K.
- $\Delta T^{(k)}$ - Przyrost temperatury elementu k, w K.
- w - Rezystancja cieplna jednostkowa między złączem a otoczeniem,
w $\frac{K}{W m}$.
- w_1 - Rezystancja cieplna jednostkowa między przewodem a otoczeniem,
w $\frac{K}{W m}$.
- w_{λ} - Rezystancja cieplna jednostkowa przewodzenia złącza, w $\frac{K}{W m}$.
- $w_{\lambda 1}$ - Rezystancja cieplna jednostkowa przewodzenia przewodu, w $\frac{K}{W m}$.
- W - Rezystancja cieplna jednostkowa między złączem o długości l a otoczeniem, w K/W.
- W_1 - Rezystancja cieplna jednostkowa między przewodem o długości l a otoczeniem, w K/W.
- W_{λ} - Rezystancja cieplna przewodzenia złącza o długości l, w K/W.
- $W_{\lambda 1}$ - Rezystancja cieplna przewodzenia przewodu o długości l, w K/W.
- W_a - Rezystancja cieplna zastępcza układu termicznego a, w K/W.
- W_b - Rezystancja cieplna zastępcza układu termicznego b, w K/W.
- W'_k - Rezystancja cieplna zastępcza części "lewej" analizowanego układu, widziana z punktu k, w K/W.

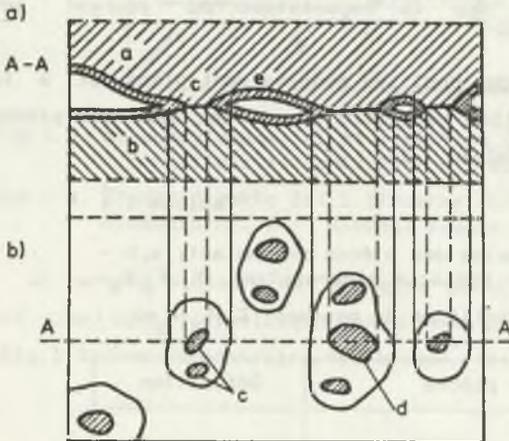
- W_k'' - Rezystancja cieplna zastępcza części "prawej" analizowanego układu, widziana z punktu k, w K/W.
- x - Odległość, w m.
- X - Reaktancja całkowita, w Ω .
- X_o - Reaktancja wewnętrzna (związana ze strumieniem wewnętrznym), w Ω .
- Z - Impedancja całkowita, w Ω .
- Z_o - Impedancja wewnętrzna, w Ω .
- α - Współczynnik wymiany ciepła, w W/m^2K .
- γ - Współczynnik przewodnictwa cieplnego złącza, w $1/m$.
- γ_1 - Współczynnik przewodnictwa cieplnego przewodu, w $1/m$.
- λ - Konduktywność cieplna, zastępcza, w W/mK .
- λ_1 - Konduktywność cieplna przewodu, w W/mK .

CHAPITRE 1

MODELISATION DES RACCORDS DU POINT DE VUE ELECTRIQUE

1.1. INTRODUCTION

L'analyse concerne des raccords dont les contacts élémentaires sont répartis sur une surface. Le raccord se compose de deux pièces (a, b) dont les résistances sont continues et des contacts élémentaires liant les deux pièces, avec une répartition surfacique directe (fig.1.1 et 1.2).



Raccord	Composantes mécaniques	Matériel du raccord
	Pièces de contact	
	Contacts élémentaires	
	Conducteurs	

Fig.1.2. Les éléments d'un raccord

Rys.1.2. Elementy złącza stykowego

Fig.1.1. Répartition des contacts élémentaires sur la surface apparente de contact; a,b - les pièces de contact, c-surfaces des contacts élémentaires, d-surfaces d'appui

Rys.1.1. Rozkład zestyków elementarnych na powierzchni pozornej styku; a,b - elementy styku, c - powierzchnia zestyków elementarnych, d - powierzchnia zetknięcia

Dans les raccords destinés pour les courants forts le nombre des contacts élémentaires est, selon les études de P.Johannet, [53, 55] de l'ordre de centaines ou de milliers.

On peut alors supposer à la limite une répartition continue de la résistance des contacts.

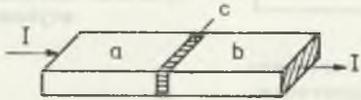
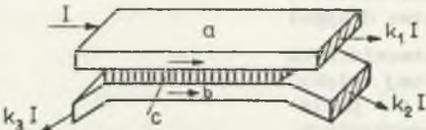
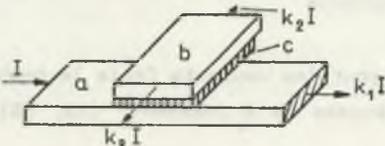
Le but de cette analyse est la détermination de la répartition du courant, des chutes de tension et des pertes de puissance dans un raccord, et enfin la détermination des fonctions qui décrivent la résistance totale d'un raccord.

On suppose dans un premier temps que:

- a) - les résistances sont indépendantes de l'intensité du courant et de la chute de tension. L'analyse s'applique alors aux raccords "froids" dont l'échauffement est négligeable, surtout au niveau des contacts élémentaires;
- b) - les contacts élémentaires sont du type à couche métallique;
- c) - l'influence de l'inductance sur la répartition du courant est négligeable;
- d) - l'analyse concerne les raccords, dont les modèles sont plans et à la limite linéaires avec conduction parallèle du courant dans les pièces de contact (disposition 2, tableau 1.1).

Tableau 1.1

Les compositions principales des pièces de contact; a, b - pièces de contact, c - contacte élémentaire, K_1, K_2, K_3 - coefficients de la répartition du courant, $K_1 + K_2 + K_3 = 1$

Composition des pièces	Définition
	En série
	En parallèle
	En angle

Les définitions font référence aux géométries des lignes de courant.

Le raccord plan dont la propriété de symétrie permet de décomposer le raccord en un nombre illimité d'éléments égaux (du point de vue géométrique et électrique) est défini comme un raccord linéaire (fig.1.3), inhomogène ou homogène.

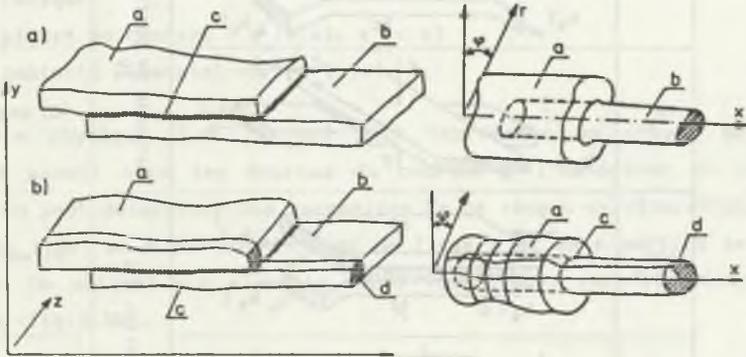


Fig. 1.3. Raccords plans (a) et linéaires (b); a, b - pièces de contact; c - contacts élémentaires; d - élément du raccord linéaire

Rys. 1.3. Złącza płaskie (a) i linearne (b); a, b - elementy styku; c - zestyk elementarny; d - element złącza linearnego

Un raccord linéaire est homogène quand la résistance unitaire des pièces est identique, asymétrique quand les pièces du contact sont différentes (fig. 1.4a) ou au contraire symétrique, (fig. 1.4b).

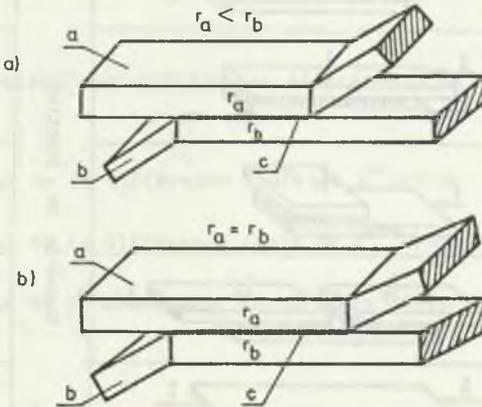


Fig. 1.4. Raccords homogènes; a) asymétrique; b) symétrique
Rys. 1.4. Złącza jednorodne; a) asymetryczne; b) symetryczne

Tableau 1.2

Les formes des raccords - Définitions

Symbole	Forme	Définition	
IV		Raccords de dérivation IV	En parallèle
IV _k			En angle
III _z		Raccords de dérivation III	Direct
III _p			Inverse
III _k			En angle
III _z		Raccords de jonction	Direct
II _p			Inverse
II _k			En angle
2II _p			Direct double
I _o			Inactif

1.2. MODELE MATHEMATIQUE D'UN RACCORD PLAN DONT LA REPARTITION DE LA RESISTANCE DE CONTACT EST DISCRETE

Les résistances d'un raccord plan sont représentées par les fonctions de densité surfacique:

- pour les pièces de contact : $r_a(x,z)$, $r_b(x,z)$
- pour les contacts élémentaires : $r_c(x,z)$

Le modèle physique d'un raccord plan représente un réseau maillé, résistif et passif avec les sources du courant à l'extérieur du réseau (fig.1.5). On peut déterminer les paramètres de ce réseau en discrétisant le raccord (fig.1.5a) en m parties le long de l'axe z et en n parties le long de l'axe x . On obtient $m.n$ éléments finis (fig.1.5b), caractérisés par 5 résistances (fig.1.5b).

Le réseau équivalent contient:

- 2 $m.n$ noeuds,
- $m.n$ résistances qui représentent les contacts élémentaires,
- 4 $m.n$ résistances qui représentent les pièces de contact,
- 5 $m.n$ courants qui sont déterminables par 4 $m.n$ d'équations.

On peut utiliser les lois d'Ohm et de Kirchhoff pour la description du réseau avec 4 $m.n$ équations algébriques qu'on peut résoudre par ordinateur. Les difficultés pratiques de résolution proviennent du grand nombre d'équations.

En prenant un système des coordonnées discrètes (j,k) et en utilisant les opérateurs:

Δ - opérateur de la différence finie de 1^{er} ordre,

Δ^2 - opérateur de la différence finie de 2^{ème} ordre,

Δ_j, Δ_k - opérateur de 1^{er} ordre pour la variable discrète j ,

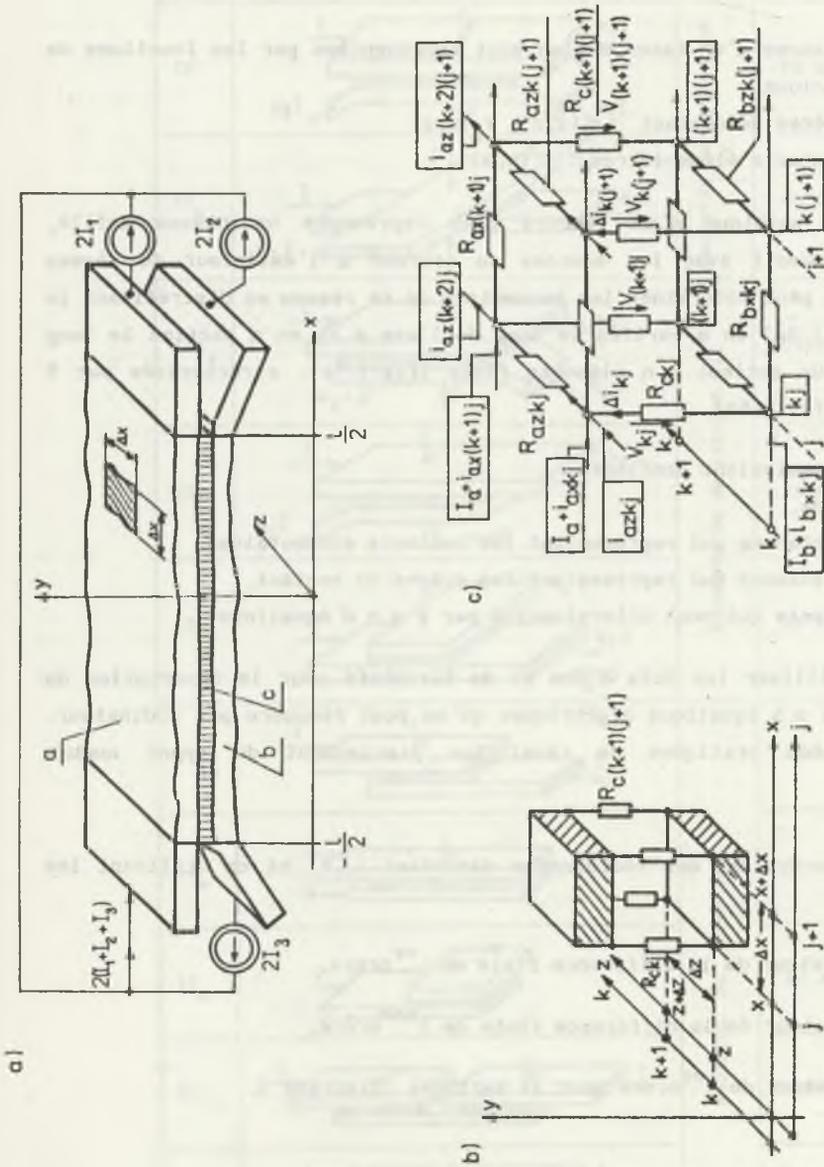


Fig. 1.5. Raccord de dérivation (IV); a) structure physique; b) élément fini; c) réseau équivalent correspondant

Rys. 1.5. Złącze odgałęźne (IV); a) budowa fizyczna; b) element skończony; c) sieć zastępcza

on obtient les formules de la deuxième loi de Kirchhoff pour les boucles:

$$\begin{aligned} \Delta_j^2 i_{axkj} + \Delta_k^1 i_{azk(j+1)} - \Delta_k^1 i_{azkj} + \frac{\Delta_j R_{ckj}}{R_{ckj}} \left(\Delta_k^1 i_{azk(j+1)} + \Delta_j^1 i_{axk(j+1)} \right) &= \\ = I_a^2 c_{axkj}^2 + I_{axk(j+1)}^2 c_{axkj}^2 - I_{bxk(j+1)}^2 c_{bxkj}^2 - I_b^2 c_{bxkj}^2 & \quad (1.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_k^2 i_{azkj} + \Delta_j^1 i_{ax(k+1)j} - \Delta_j^1 i_{axkj} + \frac{\Delta_k R_{ckj}}{R_{ckj}} \left(\Delta_j^1 i_{ax(k+1)j} + \Delta_k^1 i_{az(k+1)j} \right) &= \\ = I_{az(k+1)j}^2 c_{azkj}^2 - I_{bz(k+1)j}^2 c_{bz kj}^2 & \quad (1.2) \end{aligned}$$

Les formules de la première loi de Kirchhoff:

$$\Delta_j^1 i_{axkj} + \Delta_k^1 i_{azkj} - \Delta_k^1 i_{kj} = 0 \quad (1.3)$$

$$\Delta_j^1 i_{bxkj} + \Delta_k^1 i_{bz kj} + \Delta_k^1 i_{kj} = 0 \quad (1.4)$$

Les grandeurs utilisées dans l'équation (2.1-4) (fig.2.5):

$$I_a = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{m} \quad (1.5)$$

$$I_b = \frac{I_1 + I_2 - I_3}{m} \quad (1.6)$$

$$c_{axkj}^2 = \frac{R_{axkj}}{R_{ckj}}, \quad c_{bxkj}^2 = \frac{R_{bxkj}}{R_{ckj}}, \quad (1.7)$$

$$c_{azkj}^2 = \frac{R_{azkj}}{R_{ckj}}, \quad c_{bz kj}^2 = \frac{R_{bz kj}}{R_{ckj}}, \quad (1.8)$$

Les conditions initiales pour un raccord plan sont les suivantes:

Condition I - pour $j = 0$ et $k = 0 \dots m-1$

$$\left. \begin{aligned} i_{axko} &= I_a \\ i_{bxko} &= I_b \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

Condition II - pour $j = n-1$, $k = 0 \dots m-1$

$$\left. \begin{aligned} i_{axkn} &= (K_1 - K_2 - K_3) \frac{I}{m} \\ i_{bxkn} &= - (K_1 - K_2 - K_3) \frac{I}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

Condition III - pour $k = 0$, $j = 0 \dots n-1$

$$i_{axoj} = 0, \quad i_{bxoj} = 0 \quad (1.11)$$

Condition IV - pour $k = m-1$, $j = 0 \dots n-1$

$$i_{axmj} = 0, \quad i_{bxmj} = 0 \quad (1.12)$$

Dans le cas d'un raccord dont la surface apparente de contact est une surface fermée les conditions III et IV se changent (fig.1.6).

$$\text{Condition III} \quad i_{azo_j} = i_{azm_j} \quad (1.13)$$

$$\text{Condition IV} \quad i_{bzo_j} = i_{bzm_j} \quad (1.14)$$

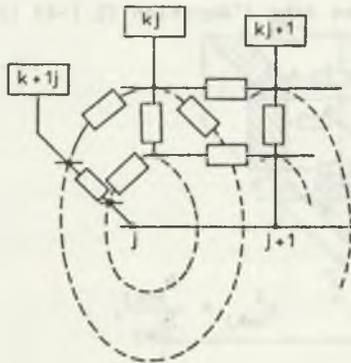


Fig.1.6. Conditions initiales III et IV pour un raccord dont la surface apparente de contact est fermée

Rys.1.6. Warunki początkowe III i IV dla złącza, którego powierzchnia pozorna styku jest zamknięta

1.3. MODELE MATHEMATIQUE D'UN RACCORD LINEAIRE DONT LA REPARTITION DE LA RESISTANCE DE CONTACT EST DISCRETE

La condition de linéarité d'un raccord plan est la suivante:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_k f(k, j) &= 0 \\ \Delta_k^2 f(k, j) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Les équations (1.1 .. 1.4) se transforment avec la formule (1.15) en équation (1.16):

$$\begin{aligned} \Delta_j^2 i_{axkj} + \frac{\Delta_j R_{ckj}}{R_{ckj}} \Delta_j i_{axkj+1} &= I_a C_{axkj}^2 - I_b C_{bxbkj}^2 \\ &+ i_{axkj+1} C_{axkj}^2 - i_{bxbkj+1} C_{bxbkj}^2 \end{aligned} \quad (1.16)$$

où:

$$I_a = I(K_1 + K_2 + K_3), \quad I_b = -I(K_1 + K_2 + K_3) \quad (1.17)$$

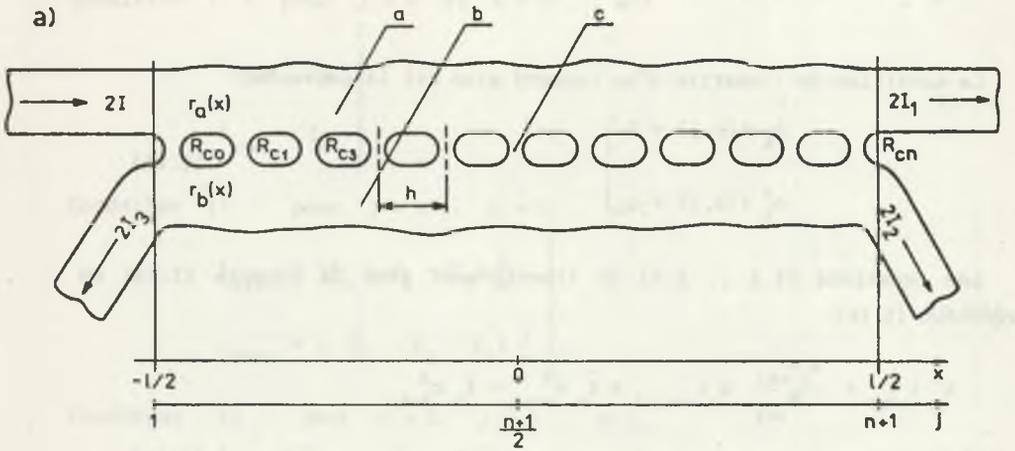
La structure du modèle correspond à l'équation (1.16 et 17), montrée à la figure 1.7.

Le raccord est déterminé par ses coordonnées discrètes:

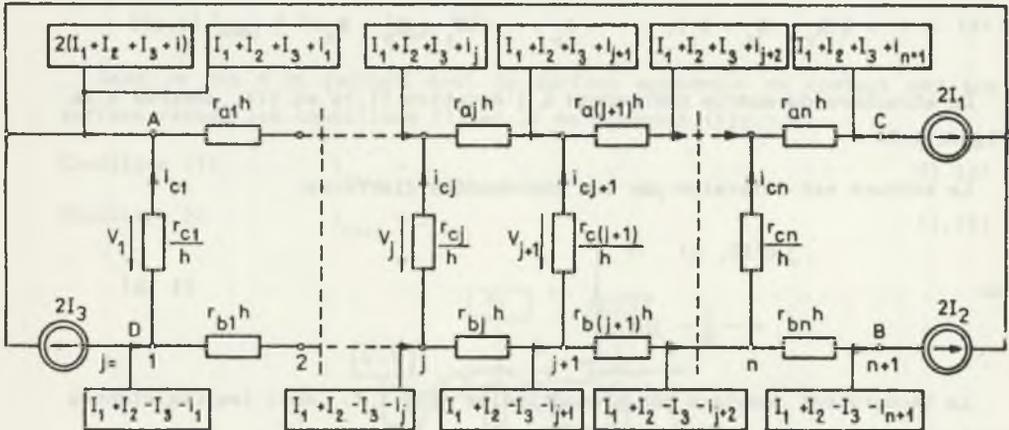
$$\text{où: } \left. \begin{aligned} j &\in (0, n) \\ x_j &= -\frac{1}{2} + j.n \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

La raccord est remplacé par n quadripôles (fig.1.7), dont les résistances sont données par les formules:

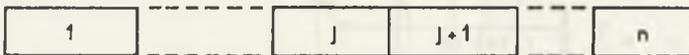
$$\left. \begin{aligned} r_{aj} &= \frac{1}{h} \int_v^w r_a(x) dx \\ r_{bj} &= \frac{1}{h} \int_v^w r_b(x) dx \\ r_{cj} &= \left[h \int_v^w \frac{dx}{r_o(x)} \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$



b)



Nombre de quadripôle



Coordonnées discrètes

continues

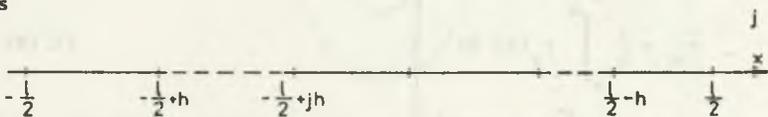


Fig.1.7. Modèle électrique d'un raccord linéaire

Rys.1.7. Model elektryczny złącza linearnego

où v et w déterminent les limites d'intégration:

$$\left. \begin{aligned} w - v &= h \\ v &= -\frac{1}{2} + j h \\ w &= -\frac{1}{2} + (j+1) h \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

En négligeant dans l'équation (1.16) les coordonnées k on obtient:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta^2 i_{aj}}{h^2} + \frac{\Delta r_{cj}}{r_{cj}} \Delta i_{aj+1} - i_{aj+1} \frac{c_{aj}^2}{l^2} + i_{bj+1} \frac{c_{bj}^2}{l^2} &= \\ = I \frac{(K_1 + K_2 + K_3) r_{aj} - (K_1 + K_2 - K_3) r_{bj}}{r_{cj}} & \quad (1.21) \end{aligned}$$

avec:

$$c_{aj}^2 = \frac{r_{aj}}{r_{cj}} \cdot l^2, \quad c_{bj}^2 = \frac{r_{bj}}{r_{cj}} \cdot l^2 \quad (1.22)$$

On définit la fonction d'analogie:

$$z_j = \frac{(K_1 + K_2 + K_3) r_{aj} - (K_1 + K_2 - K_3) r_{bj}}{r_{aj} + r_{bj}} \quad (1.23)$$

avec la valeur à la limite pour $K_1 + K_2 - K_3 = 1$:

$$z_j = \delta_j = \frac{r_{aj} - r_{bj}}{r_{aj} + r_{bj}} \quad (1.24)$$

Pour une structure linéaire on a la relation:

$$i_{bj} = -i_{aj} \frac{df}{f} i_j \quad (1.25)$$

L'équation (1.21) se transforme et on obtient:

$$\frac{\Delta^2 i_j}{h^2} + \frac{1}{r_{cj}} \frac{\Delta r_{cj}}{h} \frac{\Delta i_{j+1}}{h} - \frac{c_j^2}{l^2} i_{j+1} = I = j \frac{c_j^2}{l^2} \quad (1.26)$$

où

$$c_j^2 = c_{a_j}^2 + c_{b_j}^2 \quad (1.27)$$

Pour l'équation (1.26) il n'existe pas de solution analytique. Il est possible de déterminer l'algorithme de la solution numérique présenté sur la figure 1.8. L'algorithme IUP RACCORD (fig.1.8) permet le calcul:

- de la répartition du courant i_j ,
- de la chute de tension sur les contacts élémentaires:

$$v_j = \frac{\Delta i_j r_{c_j}}{h} \quad (1.28)$$

- de la densité des pertes de puissance:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- dans la pièce a: } P_{a_j} = \left[(K_1 + K_2 + K_3) I + i_{j+1} \right]^2 r_{a_j h} \\ \text{- dans la pièce b: } P_{b_j} = \left[(K_1 + K_2 + K_3) I + i_{j+1} \right]^2 r_{b_j h} \\ \text{- dans les contacts} \\ \text{élémentaires: } P_{c_j} = \frac{v_j^2}{r_{c_j}} = \frac{(\Delta i_j)^2}{h^2} r_{c_j} \end{array} \right\} \quad (1.29)$$

des pertes de puissance

$$\left. \begin{array}{l} \text{- dans la pièce a : } P_a = \sum_{j=0}^{n-1} P_{a_j h} \\ \text{- dans la pièce b : } P_b = \sum_{j=0}^{n-1} P_{b_j h} \\ \text{- dans les contacts} \\ \text{élémentaires: } P_c = \sum_{j=0}^{n-1} P_{c_j h} \end{array} \right\} \quad (1.30)$$

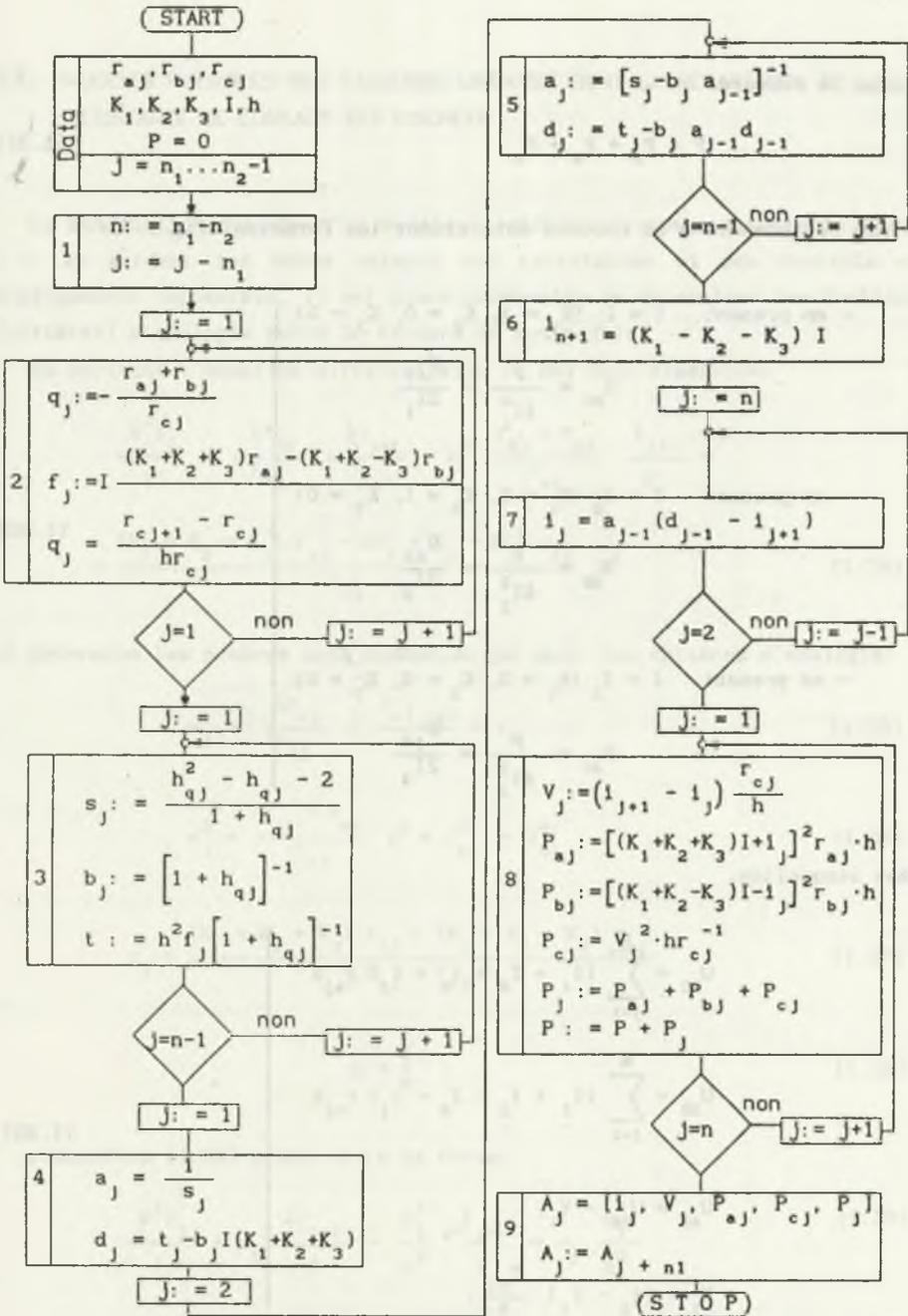


Fig.1.8. Algorithme IUP RACCORD pour les calculs de la répartition du courants, des chutes de tension et des pertes de la puissance

Rys.1.8. Algorytm IUP RACCORD do obliczeń rozkładu prądów, spadków napięć i strat mocy czynnej w złączu

- dans le raccord:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (1.31)$$

Les résistances d'un raccord déterminent les formules (fig.1.7):

$$\left. \begin{aligned} & \text{- en prenant } I = I_1 \quad (K_1 = 1, K_2 = 0, K_3 = 0) \\ & R_{AC} = \frac{P}{4I_1^2} = \frac{U_{AC}}{2I_1} \\ & \text{- en prenant } I = I_2 \quad (K_1 = 0, K_2 = 1, K_3 = 0) \\ & R_{AB} = \frac{P}{4I_2^2} = \frac{U_{AB}}{2I_2} \\ & \text{- en prenant } I = I_3 \quad (K_1 = 0, K_2 = 0, K_3 = 0) \\ & R_{AC} = \frac{P}{4I_3^2} = \frac{U_{AC}}{2I_3} \end{aligned} \right\} \quad (1.32)$$

dans lesquelles:

$$\left. \begin{aligned} U_{AC} &= \sum_{j=1}^n (I_1 + I_2 + I_3 + i_j) r_{aj} h \\ U_{DB} &= \sum_{j=1}^n (I_1 + I_2 - I_3 - i_j) r_{bj} h \\ U_{AB} &= U_{DB} - V_1, \\ V_1 &= (i_2 - i_1) \frac{r_{cl}}{h}, \end{aligned} \right\} \quad (1.33)$$

1.4. MODELES PHYSIQUES DES RACCORDS LINEAIRES DONT LA REPARTITION DE LA RESISTANCE DE CONTACT EST DISCRETE

La réalisation directe d'un modèle électrique du raccord selon la figure 1.7, en gardant les mêmes valeurs des résistances et des courants est pratiquement impossible. Il est alors nécessaire de déterminer les fonctions (critères) d'analogie entre le raccord et son modèle.

En écrivant l'équation différentielle (1.26) sans dimension:

$$\frac{\Delta^2 i_j}{I} + \frac{\Delta r_{cj}}{r_{cj}} \frac{\Delta i_{j+1}}{I} - h^2 \frac{r_{aj} + r_{bj}}{r_{cj}} \frac{i_{j+1}}{I} =$$

$$= \frac{(K_1 + K_2 + K_3) r_{aj} - (K_1 + K_2 - K_3) r_{bj}}{r_{cj}} h^2 \quad (1.34)$$

on détermine les nombres sans dimension qui sont les critères d'analogie:

$$m_j = \frac{\Delta r_{cj}}{r_{cj}} = \frac{r_{c(j+1)}}{r_{cj}} - 1 \quad (1.35)$$

$$c_j^2 = \frac{r_{aj} + r_{bj}}{r_{cj}} \quad l^2 = c_{aj}^2 + c_{bj}^2 \quad (1.36)$$

$$z_j = \frac{(K_1 + K_2 + K_3) r_{aj} - (K_1 + K_2 - K_3) r_{bj}}{r_{aj} - r_{bj}} \quad (1.37)$$

$$n = \frac{1}{h} \quad (1.38)$$

L'équation (1.34) prend alors la forme:

$$\frac{\Delta^2 i_j}{I} + m_j \frac{\Delta i_{j+1}}{I} - \frac{c_j^2}{n^2} \frac{i_{j+1}}{I} = z_j \frac{c_j^2}{n^2} \quad (1.39)$$

Selon l'équation (1.39) le raccord et son modèle ont les mêmes valeurs i_j/I si on garde les mêmes valeurs des nombres n , m_j , c_j , z_j pour le raccord et son modèle.

On peut remarquer que le changement des résistances par multiplication de toutes les valeurs par le coefficient de l'échelle k_r ne change pas les valeurs des nombres d'analogie.

La structure du modèle d'un raccord linéaire (fig.1.7) est alors réalisable par l'intermédiaire d'un modèle de réseau à courant continu.

Il est possible de créer les modèles physiques applicables surtout pour les raccords qui ont les formes géométriques compliquées, en utilisant par exemple la technique des circuits imprimés (fig.1.9).

Pour le modèle physique homogène (fig.1.9b) on peut déterminer les coefficients d'échelle:

$$\text{- des courants} \quad k_i = \frac{I_m}{I} \quad (1.40)$$

$$\text{- de longueur} \quad k_e = \frac{l}{l_m} \quad (1.41)$$

Les dimensions transversales du modèle sont déterminées par la relation (fig.1.9):

$$b_m = k_e \cdot b \cdot \frac{\gamma}{\gamma_m} \quad (1.42)$$

où γ et γ_m sont les conductivités spécifiques du matériau du raccord et son modèle.

Les chutes de tension mesurées sur le modèle V_m correspondent à celles du raccord selon la formule:

$$V = \frac{V_m}{k_i} \quad (1.43)$$

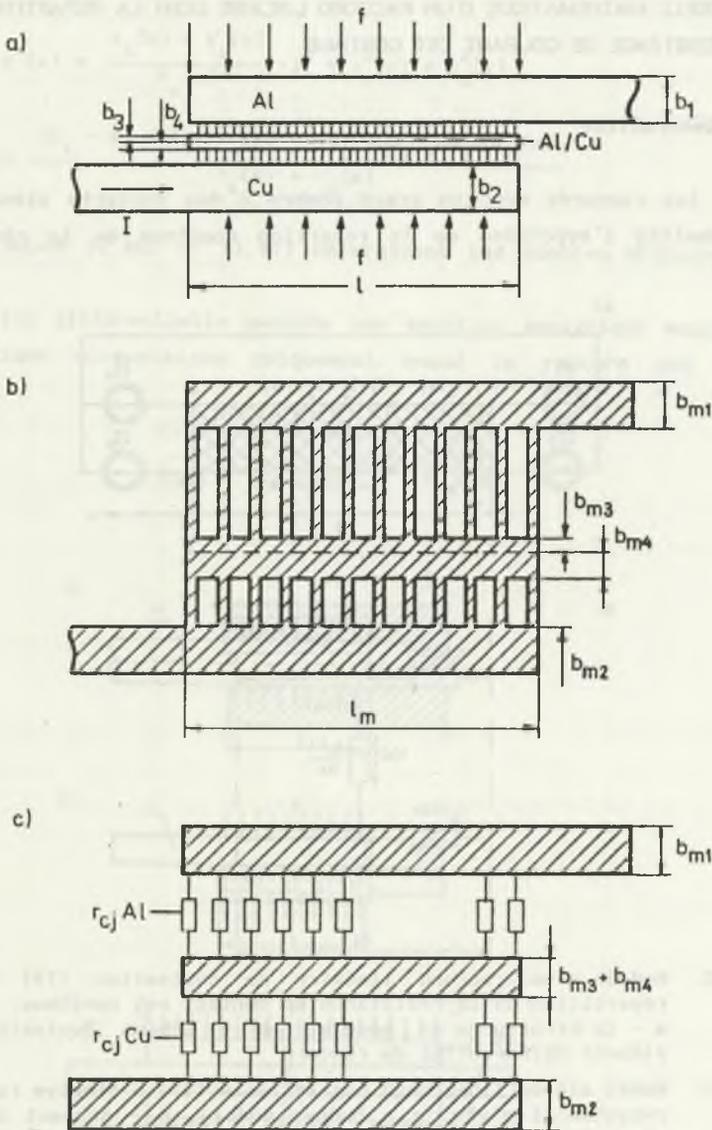


Fig.1.9. Exemple des modèles physiques du raccord Al/Cu avec la plaque bimétallique intermédiaire; a - structure du raccord, b - modèle réalisé entièrement comme circuit imprimé, c - modèle mixte

Rys.1.9. Przykład modeli fizycznych złącza Al/Cu z bimetalową płytka pośredniczącą; a - budowa złącza, b - model wykonany czkownicie jako obwód drukowany, c - model mieszany

1.5. MODELE MATHÉMATIQUE D'UN RACCORD LINEAIRE DONT LA REPARTITION DE LA RESISTANCE DE COURANT EST CONTINUE

1.5.1. Généralités

Pour les raccords avec un grand nombre n des contacts élémentaires on peut admettre l'hypothèse de la répartition continue de la résistance de contact.

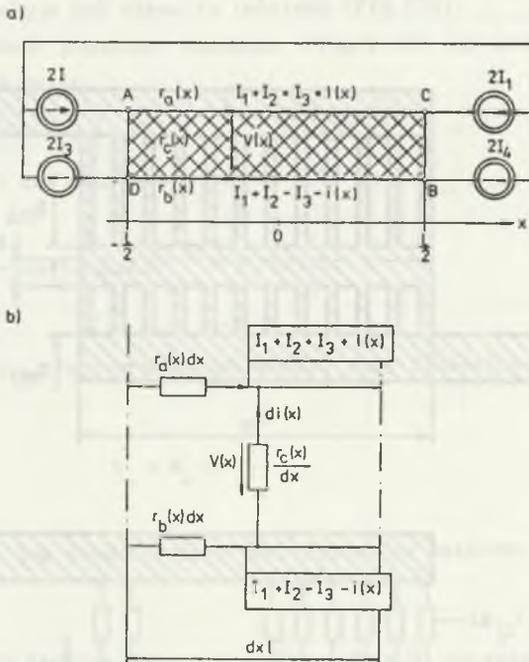


Fig.1.10. Modèle d'un raccord linéaire de dérivation (IV) dont la répartition de la résistance de la résistance de contact est continue. a - la structure du modèle, b - schéma équivalent d'un élément différentiel du raccord

Rys.1.10. Model złącza linearnego odgałęzienia (IV) o ciągłym rozkładzie rezystancji styku; a - budowa modelu, b - schemat zastępczy elementu różniczkowego złącza

En prenant l'équation (1.26) et supposant:

$$n \rightarrow \infty, \quad h \rightarrow dx \quad (1.44)$$

on obtient l'équation

$$\frac{d^2 i(x)}{dx^2} + \frac{1}{r_c(x)} \frac{dr_c(x)}{dx} \frac{di(x)}{dx} - I(x) \frac{c^2(x)}{l^2} = I \frac{c^2(x)z(x)}{l^2} \quad (1.45)$$

où

$$c^2(x) = \frac{r_a(x) + r_b(x)}{r_c(x)} l^2 = c_a^2(x) + c_b^2(x) \quad (1.46)$$

et

$$z(x) = \frac{(K_1 + K_2 + K_3) r_a(x) - (K_1 + K_2 - K_3) r_b(x)}{r_a(x) + r_b(x)} \quad (1.47)$$

Les formules (1.46) et (1.47) déterminent les nombres d'analogies des raccords.

L'équation différentielle possède une solution analytique exprimée par les fonctions élémentaires uniquement quand le raccord est homogène (fig.1.11).

$$c(x) = c = \text{const.}$$

$$(1.48)$$

$$c(x) = z = \text{const.}$$

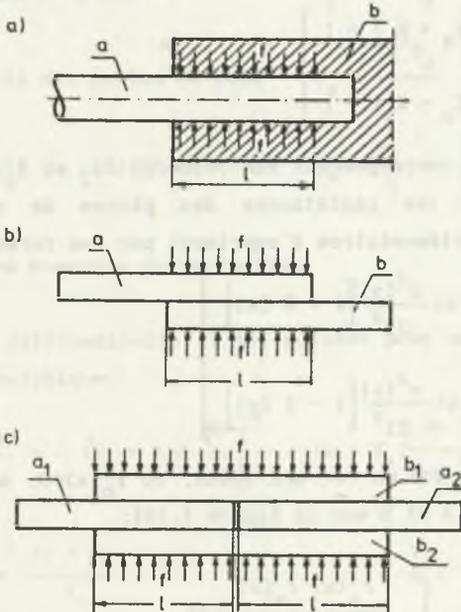


Fig.1.11. Exemples des raccords linéaires homogènes. a - raccord comprimé ou étiré; b - raccord de jonction plan, simple; c - raccord de jonction avec les plaques supplémentaires

Rys.1.11. Przykład złączy linearnych jednorodnych; a - złącze zapasowe lub przeciągane, b - złącze przelotowe płaskie, c - złącze przelotowe z nakładkami

Pour les autres raccords la solution de l'équation (1.45) est obtenue par des méthodes numériques.

Les raccords pratiquement homogènes sont souvent appliqués aux matériels des courants forts (fig.1.11).

1.5.2. Relations entre les résistances du raccord

Les résistances des pièces de contact sont liées par la formule:

$$r_a(x) [1 - \delta(x)] = r_b(x) [1 + \delta(x)] \quad (1.49)$$

où $\delta(x)$ - nombre d'analogie:

$$\delta(x) = \frac{r_a(x) - r_b(x)}{r_a(x) + r_b(x)} \quad (1.50)$$

La fonction $\delta(x)$ constitue le cas particulier de la fonction $z(x)$, (1.47), dans les conditions:

$$\left. \begin{aligned} (K_1 + K_2 + K_3) &= 1 \\ (K_1 + K_2 - K_3) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1.51)$$

Les conditions (1.51) correspondent aux raccords II₂ et I₀ (tabl.1.2).

Les relations entre les résistances des pièces de contact et la résistance des contacts élémentaires s'expriment par les formules:

$$\left. \begin{aligned} r_a(x) &= r_c(x) \frac{c^2(x)}{2l^2} [1 + \delta(x)] \\ r_b(x) &= r_c(x) \frac{c^2(x)}{2l^2} [1 - \delta(x)] \end{aligned} \right\} \quad (1.52)$$

Admettant la définition d'un raccord idéal, où $r_c(x)=0$, on obtient leur résistance totale (entre A et B sur la figure 1.10):

$$R_N = R_{NAB} = \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{r_a(x) r_b(x)}{r_a(x) + r_b(x)} dx \quad (1.53)$$

Pour un raccord homogène:

$$R_N = \frac{r_a r_b}{r_a + r_b} l \quad (1.54)$$

Utilisant de nombre δ et la résistance d'un raccord idéal R_N on obtient:

$$\left. \begin{aligned} r_a(x) &= \frac{2R_N}{1} \frac{1}{1 - \delta(x)} \\ r_b(x) &= \frac{2R_N}{1} \frac{1}{1 + \delta(x)} \\ r_c(x) &= \frac{4R_N}{c^2(x)} \frac{1}{1 - \delta^2(x)} \end{aligned} \right\} \quad (1.55)$$

Il est possible d'exprimer les paramètres électriques d'un raccord en valeur relative par rapport aux paramètres d'un raccord idéal soit:

$$\left. \begin{aligned} - \text{ tension de base} & \quad U_N = 2IR_N \\ - \text{ puissance de base} & \quad P_N = 4I^2R_N \\ - \text{ densité des pertes de base} & \quad P_N = \frac{4I^2R_N}{1} \\ - \text{ densité du courant de base} & \quad j_N = \frac{2I}{1} \end{aligned} \right\} \quad (1.56)$$

1.5.3. Raccord homogène de dérivation

L'équation différentielle (1.45) possède pour un raccord homogène (1.48) la solution analytique:

$$\frac{l(x)}{I} = - (K_2 + K_3) \frac{\text{sh} \frac{cx}{1}}{\text{sh} \frac{c}{2}} + (z + K_1) \frac{\text{ch} \frac{cx}{1}}{\text{ch} \frac{c}{2}} - z \quad (1.57)$$

où

$$c^2 = \frac{r_a + r_b}{r_c} \cdot l^2$$

$$z(x) = \frac{(K_1 + K_2 + K_3) r_a(x) - (K_1 + K_2 - K_3) r_b(x)}{r_a(x) + r_b(x)} \quad (1.58)$$

avec les conditions aux limites:

$$x = -\frac{1}{2} \quad i(x) = (K_1 + K_2 + K_3) I \quad (1.59)$$

$$x = \frac{1}{2} \quad i(x) = (K_1 - K_2 - K_3) I$$

La chute de tension aux contacts élémentaires est donnée par l'expression;

$$V(x) = r_c(x) \frac{di(x)}{dx} = I \frac{r_c}{l} c \left[-(K_2 + K_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} + (z + K_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} \right] \quad (1.60)$$

ou par l'expression sans dimension:

$$\frac{V(x)}{U_N} = \frac{2}{c(1 - \delta^2)} \left[-(K_2 + K_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} + (z + K_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} \right] \quad (1.61)$$

$$\delta = \frac{r_a - r_b}{r_a + r_b} \quad (1.62)$$

Pour les calculs d'échauffement d'un raccord on détermine la densité des pertes de puissance dans les éléments d'un raccord:

- Pièce a:

$$\frac{P_a(x)}{P_N} = \frac{1}{2(1 - \delta)} \left[(K_1 + K_2 + K_3) + (z + K_1) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} - (K_2 + K_3) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} - z \right]^2 \quad (1.63)$$

- Pièce b:

$$\frac{P_b(x)}{P_N} = \frac{1}{2(1 + \delta)} \left[(K_1 + K_2 - K_3) - (z + K_1) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} + (K_2 + K_3) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} + z \right]^2 \quad (1.64)$$

- Contacts élémentaires:

$$P_c(x) = \frac{1}{1 - \delta^2} \left[(z + K_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} - (K_2 + K_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} \right]^2 \quad (1.65)$$

La densité des pertes dans le raccord:

$$p(x) = p_a(x) + p_b(x) + p_c(x) \quad (1.66)$$

Les pertes totales de la puissance dans un raccord:

$$P = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} [p_a(x) + p_b(x) + p_c(x)] dx \quad (1.67)$$

Un utilisant les fonctions (1.63) ... (1.65), après l'intégration, on obtient l'expression:

$$\frac{P}{P_N} = \frac{1}{c(1-\delta^2)} \left\{ (K_1+K_2+K_3-z)^2 \frac{c(1+\delta)}{2} + (K_1+K_2-K_3) \frac{c(1-\delta)}{2} + \left[2(z+K_1)^2 + (K_1+K_2)\delta + (K_3-z) \right] \operatorname{th} \frac{c}{2} + 2(K_2+K_3)^2 \operatorname{cth} \frac{c}{2} \right\} \quad (1.68)$$

Elle permet de déterminer la résistance équivalente d'un raccord:

$$R_z = \frac{P}{4 I^2} \quad (1.69)$$

Résistance relative d'un raccord:

$$\bar{r} = \frac{R_z}{R_N} = \frac{P}{P_N} \quad (1.70)$$

On peut constater qu'un raccord idéal est caractérisé par la résistance relative $\bar{r}=1$ et que, généralement, la résistance relative d'un raccord de dérivation dépend de la répartition extérieure du courant (coefficients K_1, K_2, K_3).

1.5.4. Raccords homogènes simples (II_p, II_z, I_o)

Le tableau 1.2 montre les raccords de jonction: direct (II_z), inverse (II_p), inactif (I_o).

Les principales formules déterminant les grandeurs électriques des raccords homogènes sont données dans les tableaux 1.3 et 1.4.

On constate que les raccords inverses ont une résistance plus basse que les raccords directs (avec les mêmes résistance r_a, r_b, r_c).

Tableau 1.3

Les paramètres électriques des raccords de jonction homogènes

Raccord	Rep- courant	Gran- deurs	Raccord asymétrique $\delta \neq 0$	Raccord symétrique $\delta = 0$
I ₀	Inactif	$\frac{I(x)}{I}$	$= (1 + \delta) \frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c} - \delta}{\text{ch} \frac{cx}{2}}$	$= \frac{\text{ch} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}}$
		$\frac{V(x)}{U_N}$	$= \frac{2 \text{sh} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{c(1+\delta^2)} \cdot \text{ch} \frac{c}{2}$	$= \frac{2 \text{sh} \frac{1}{c}}{c \text{ch} \frac{c}{2}}$
	$z = \delta$ $\frac{A}{\text{ }} \frac{C}{\text{ }}$	$\bar{r}_{AC} = \frac{R_{AC}}{R_N}$	$= 1 + \frac{2(1+\delta)}{c(1-\delta)} \text{th} \frac{c}{2}$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{th} \frac{c}{2}$
II _z	Direct	$\frac{I(x)}{I}$	$= -\frac{\text{sh} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}} + \delta \left(\frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}} - 1 \right)$	$= -\frac{\text{sh} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}}$
		$\frac{V(x)}{U_N}$	$= \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[-\frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}} + \delta \frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}} \right]$	$= \frac{2 \text{ch} \frac{1}{c}}{c \text{sh} \frac{c}{2}}$
	$z = \delta$ $\frac{A}{\text{ }} \frac{B}{\text{ }}$	$\bar{r}_{AB} = \frac{R_{AB}}{R_N}$	$= 1 + \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left(\text{cth} \frac{c}{2} + \delta^2 \text{th} \frac{c}{2} \right)$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{cth} \frac{c}{2}$
II _P	Inverse	$\frac{I(x)}{I}$	$= -\frac{\text{sh} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}} + \frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}} - 1$	$= -\frac{\text{sh} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}} + \frac{\text{ch} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}} - 1$
		$\frac{V(x)}{U_N}$	$= \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[-\frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}} - \frac{\text{ch} \frac{cx}{c} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}} \right]$	$= -\frac{2}{c} \left[\frac{\text{ch} \frac{1}{c}}{\text{sh} \frac{c}{2}} + \frac{\text{ch} \frac{1}{c}}{\text{ch} \frac{c}{2}} \right]$
	$z = 1$ $\frac{A}{\text{ }} \frac{B}{\text{ }}$	$\bar{r}_{AD} = \frac{R_{AD}}{R_N}$	$= \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left(\text{cth} \frac{c}{2} + \text{th} \frac{c}{2} \right) = \frac{4 \text{cth} \frac{c}{2}}{c(1-\delta^2)}$	$= \frac{2}{c} \left[\text{cth} \frac{c}{2} + \text{th} \frac{c}{2} \right] = \frac{4}{c} \text{cthc}$

Tableau 1.4

Répartition des pertes de puissance dans les raccords de jonction homogènes

Symbole	Grandeur	Raccord asymétrique	Raccord symétrique
I ₀ Inactif	$\frac{P_a(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1-\delta)} \left[1-\delta + (1+\delta) \frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_b(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1+\delta)} \left[1+\delta - (1-\delta) \frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_c(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[(1+\delta) \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{\text{sh}^2 \frac{cx}{l}}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P(x)}{P_N}$	$= 1 + \frac{1+\delta}{1-\delta} \frac{\text{ch}^2 \frac{cx}{l}}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}}$	$= 1 + \frac{\text{ch } 2cx}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P}{P_N}$	$= 1 + \frac{2}{c} \frac{1+\delta}{1-\delta} \text{th } \frac{c}{2}$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{th } \frac{c}{2}$
II _z Direct	$\frac{P_a(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1-\delta)} \left[1-\delta - \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \delta \frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_b(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1+\delta)} \left[1+\delta + \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} - \delta \frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_c(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[-\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{\text{ch}^2 \frac{cx}{l}}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P(x)}{P_N}$	$= 1 + \delta + \frac{1}{1-\delta^2} \left[\text{ch } \frac{2cx}{l} \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} + \frac{\delta^2}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}} \right) - 4\delta \frac{\text{sh } \frac{2cx}{l}}{\text{sh } c} \right]$	$= 1 + \frac{\text{ch } 2cx}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P}{P_N}$	$= 1 + \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[\text{cth } \frac{c}{2} + \delta^2 \text{th } \frac{c}{2} \right]$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{cth } \frac{c}{2}$
II _p Inverse	$\frac{P_a(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1-\delta)} \left[\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_b(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1+\delta)} \left[-\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[-\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_c(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[-\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \left[-\frac{\text{ch } \frac{cx}{l}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{l}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[\text{ch } \frac{2cx}{l} \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} + \frac{1}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}} \right) - 4 \frac{\text{sh } \frac{2cx}{l}}{\text{sh } c} \right]$	$= \text{ch } \frac{2cx}{l} \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} + \frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} \right) - 4 \frac{\text{sh } \frac{2cx}{l}}{\text{sh } c}$
	$\frac{P}{P_N}$	$= \frac{4}{c(1-\delta^2)} \text{cth } c$	$= \frac{4}{c} \text{cth } c$

1.5.5. Vérification des modèles des raccords linéaires

La vérification des modèles des raccords linéaires est réalisée par:

- a) comparaison des résultats de calcul de la répartition du courant, des chutes de tensions dans les raccords homogènes: inverses, directs et inactifs, selon les familles analytiques (tab.1.2) et avec la méthode numérique (algorithme IUP RACCORD (fig.1.8));
- b) les mesures des chutes de tension sur des modèles physiques (fig.1.7);
- c) comparaison des résultats de calcul de la répartition de chute de tension aux contacts élémentaires avec les mesures laboratoires sur les raccords de barres d'aluminium;
- d) comparaison des résultats des calculs et mesures avec les recherches de B. Dalle (CIGRE 22/81/WG-05/02) [118].

Les calculs selon l'algorithme IUP RACCORD (fig.1.8) sont réalisées par l'ordinateur, pour les paramètres suivants des raccords:

$k_1 = 1$	0,5	0,5	0	0	0
$k_2 = 0$	0,5	0	0,5	1	0
$k_3 = 0$	0	0,5	0,5	0	1
$U = 0,1$	0	10			
$\delta = 0$	0,5	1,0			

Nombre des éléments du raccord:

$n = 10, 50, 100.$

On constate que pour $n = 100$ la différence maximale entre les résultats des calculs du courant selon IUP RACCORD et de la formule analytique (1.57) ne dépasse pas 0,05 % .

Les figures 1.12 - 1.14 représentent les résultats des calculs de la répartition du courant dans les raccords homogènes: directs, inverses, inactifs, symétriques et asymétriques.

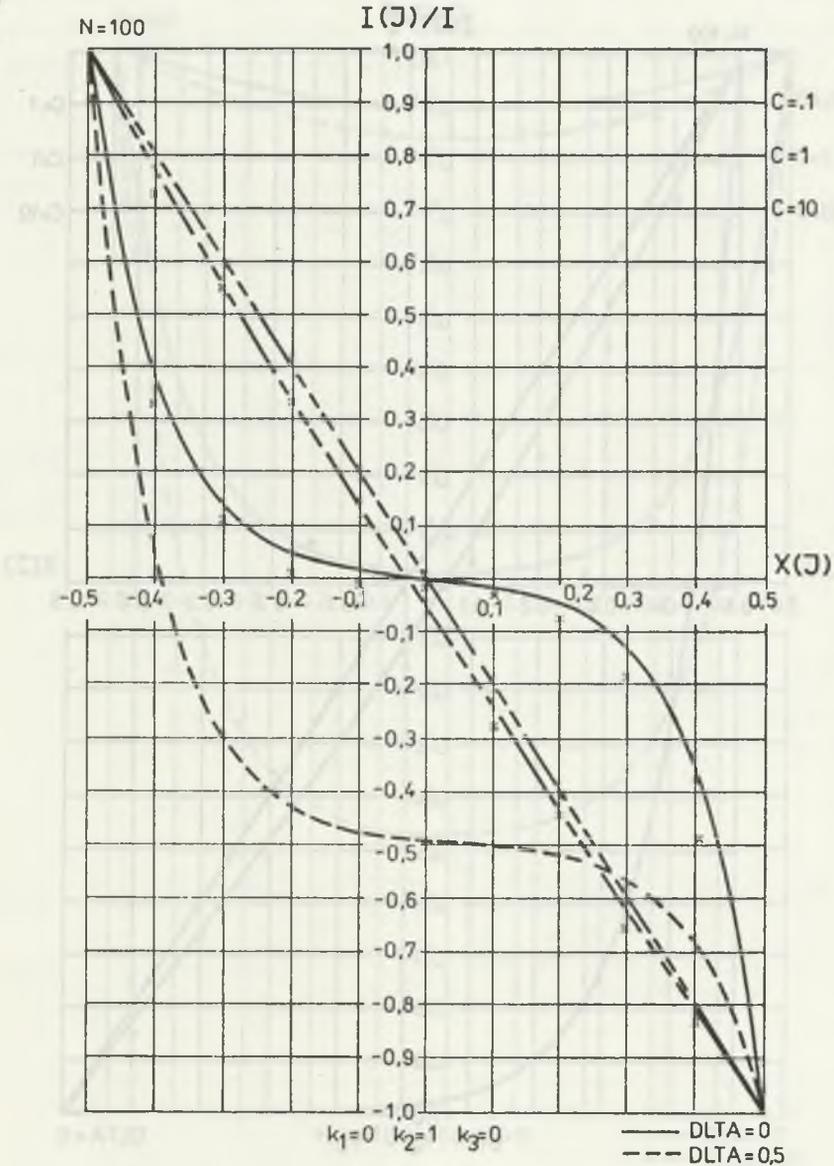


Fig. 1.12. Répartition du courant dans les raccords directs. Calcul - IUP. Mesures sur le modèle de la figure 1.7

Rys. 1.12. Rozkład prądu w złączach zgodnych. Obliczenia - IUP. Pomiarzy na modelu z rys. 1.7

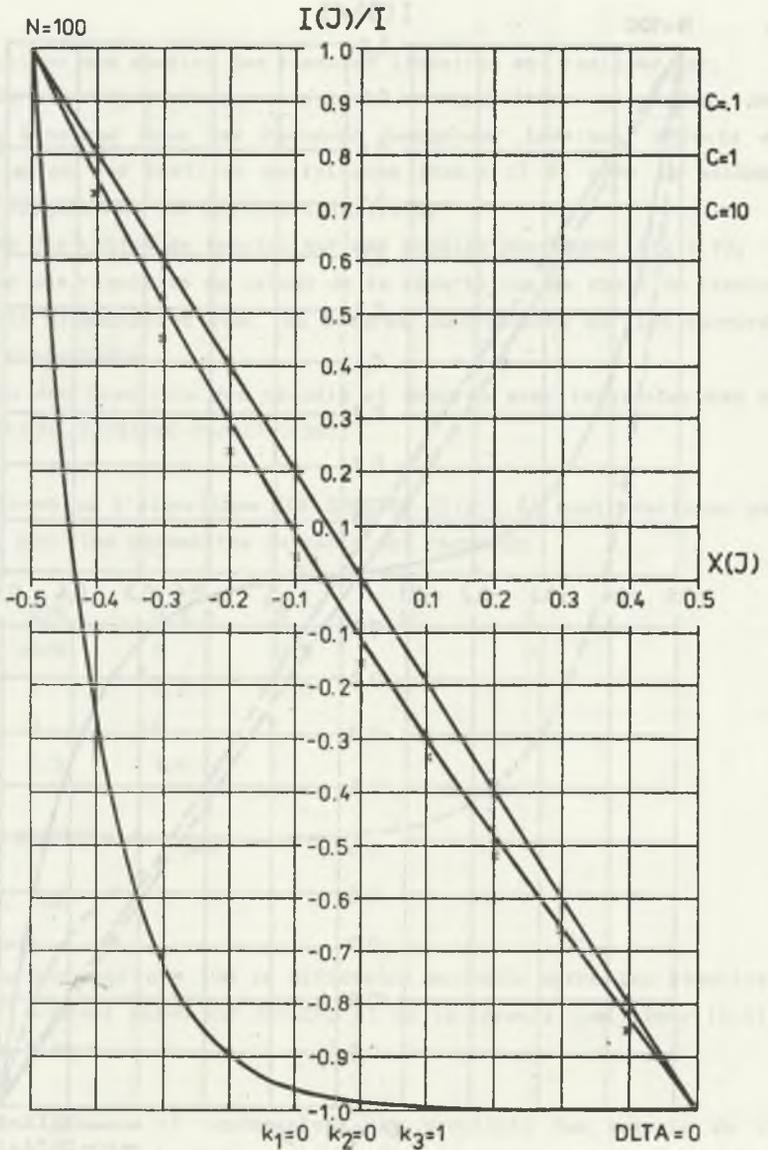


Fig. 1.13. Répartition du courant dans les raccords inverses symétriques; Calcul IUP RACCORD, mesures aux modèles figure 1.7

Rys. 1.13. Rozkład prądu w złączach przecownych symetrycznych; Obliczenia IUR RACCORD, pomiary na modelach z rys. 1.7

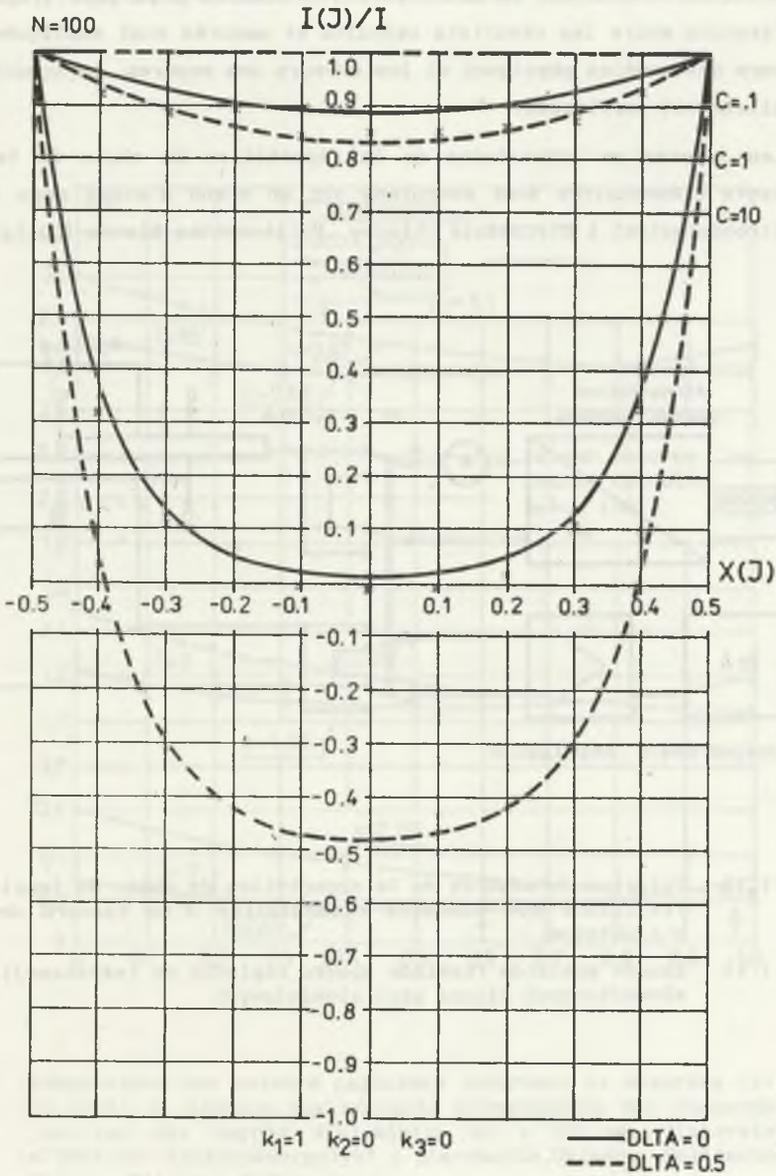


Fig.1.14. Répartition du courant dans les raccords inactifs; Calcul IUP RACCORD

Rys.1.14. Rozkład prądu w złączach zerowych; Obliczenia IUP RACCORD

Sur les figures 1.12 - 14, sont donnés les résultats des mesures de la répartition du courant obtenues avec les modèles physiques (fig.1.7). Les différences entre les résultats calculés et mesurés sont expliquées par les erreurs des modèles physiques et les erreurs des mesures. La concordance des résultats est suffisante.

Les mesures en laboratoire de la répartition de chute de tension aux contacts élémentaires sont exécutées sur un stand d'essai dans l'Institut Elektroenergetyki i Sterowania Układow, Politechnika Slaska (Pologne).

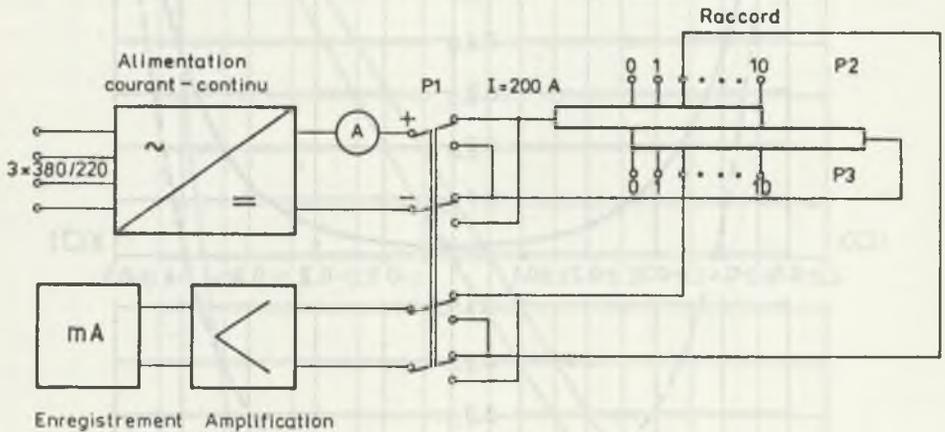


Fig.1.15. Principe de mesures de la répartition de chute de tension à la résistance des contacts élémentaires d'un raccord de barres d'aluminium

Rys.1.15. Zasada pomiarów rozkładu spadku napięcia na rezystancji zestyków elementarnych złącza szyn aluminiowych

La figure 1.16 montre la bonne concordance des valeurs calculées selon la formule analytique et mesurées sur les raccords de barres en aluminium 80 x 10 mm.

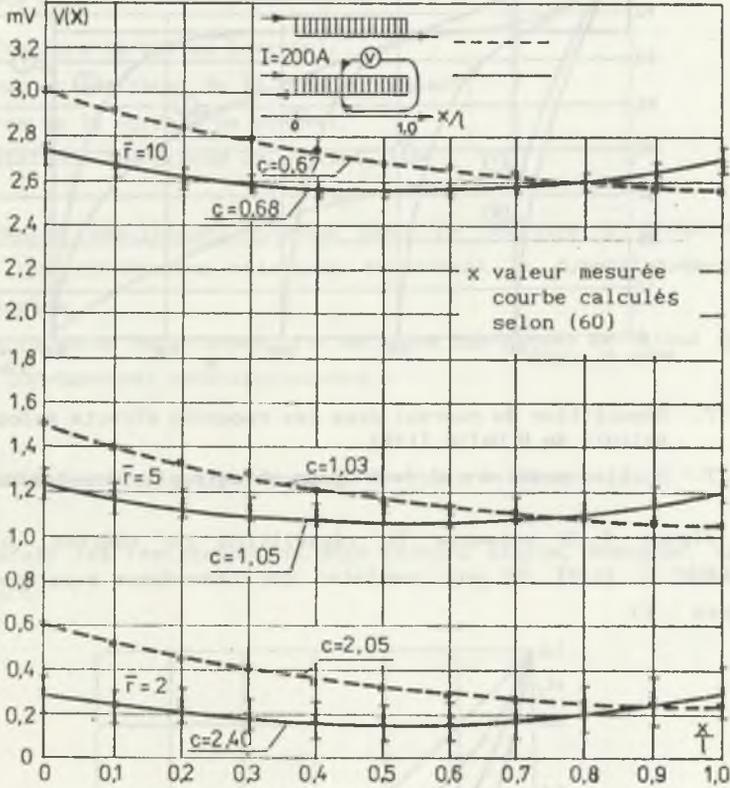


Fig. 1.16. Comparaison des valeurs calculées (courbes) et mesurées (x) de la chute de tension aux contacts élémentaires des raccords de jonction des barres d'aluminium 80 x 10 mm. (Laboratoire d'Institut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, Politechnika Śląska, Gliwice, Pologne)

Rys. 1.16. Porównanie wartości obliczonych (krzywe ciągłe) z wartościami zmierzonymi (x) spadków napięcia na zestykach elementarnych złączy przelotowych szyn aluminiowych 80 x 10 mm. (Laboratorium Instytutu Elektroenergetyki i Sterowania Układów, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska)

La figure 1.17 présente la répartition du courant calculée par B. Dalle [118]. On peut constater une concordance avec les courbes de la figure 1.12.

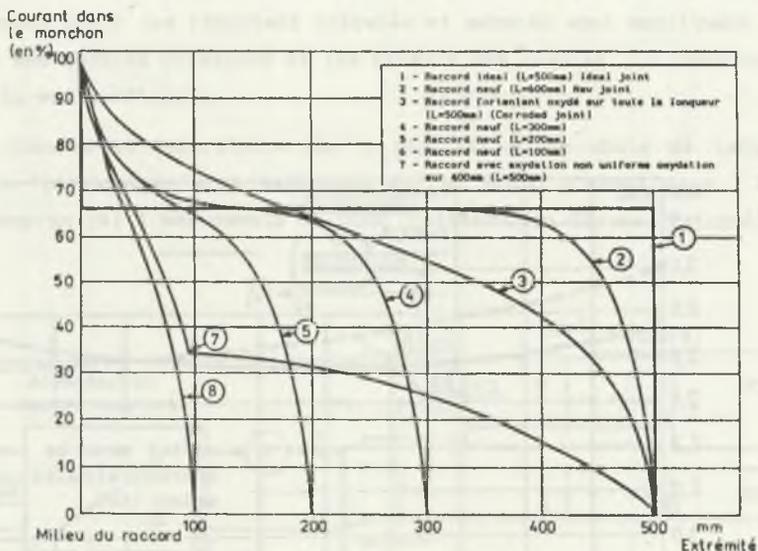


Fig. 1.17. Répartition du courant dans les raccords directs selon les calculs de B.Dalle [118]

Rys. 1.17. Rozkład prądu w złączach zgodnych według obliczeń B.Dalle [118]

La figure 1.18 présente la répartition du courant calculée par HENGELHAUPT F. [120]. On peut constater une concordance avec les courbes de la figure 1.13.

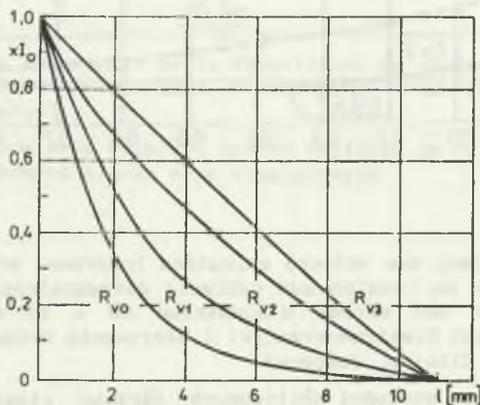


Fig. 1.18. Répartition du courant dans les raccords inverses selon les calculs de F.HENGELHAUPT [120]

Rys. 1.18. Rozkład prądu w złączach przeciwnych według obliczeń F.HENGELHAUPT [120]

1.6. CERTAINES POSSIBILITES D'APPLICATION DES MODELES DE RACCORDS

La connaissance des relations entre différents paramètres d'un raccord et leur résistance ou échauffement a une importance pour les constructeurs et les exploitants des raccords.

La résistance du raccord homogène dépend:

- du type (raccord direct ou inverse),
- de la longueur (surface) de la zone du contact,
- de la forme de la surface de contact,
- de la résistance des pièces de contact.

Les formules analytiques données dans le chapitre 1 permettent de déterminer les différentes relations concernant le dimensionnement d'un raccord homogène.

Pour les raccords hétérogènes, les méthodes numériques de calcul (par ex. algorithme IUP-Raccord) sont applicables.

1.6.1. Relation entre le type de raccord et la résistance

On compare les résistances du même raccord simple, homogène, appliqué comme raccord:

- direct,
- inverse,
- neutre.

Pour la même valeur du paramètre c on calcule, selon les formules de tableau 1.3 les résistances relatives des raccords simples homogènes et symétriques (fig.1.19).

On constate qu'un raccord inverse garde la résistance relative (et par conséquent aussi l'échauffement) inférieure à celle d'un raccord direct, surtout pour les paramètres c élevées (raccords de bonne qualité).

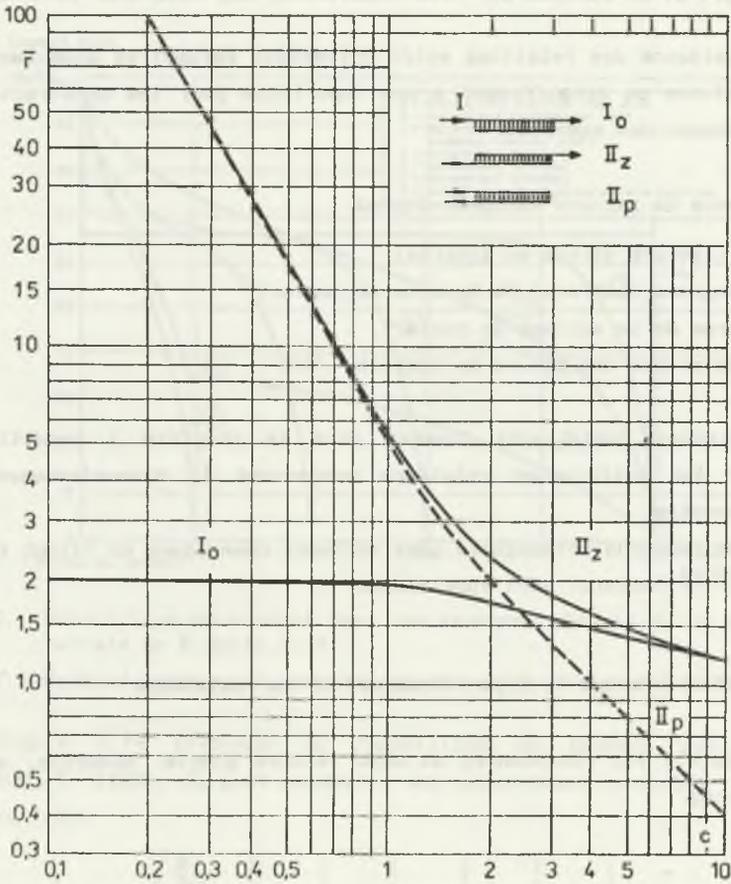


Fig. 1.19. Résistance relative de raccords; direct, inverse et neutre - de mêmes dimensions, en fonction du paramètre c

Rys. 1.19. Rezystancja względna złączy; zgodnego, przeciwnego i zerowego o tych samych wymiarach jako funkcje parametru c

Pour le paramètre $c \rightarrow \infty$ (raccord idéal) on obtient pour un raccord:

- direct et neutre $\bar{r} \rightarrow 1$
- inverse $\bar{r} \rightarrow 0$

Il est alors profitable d'appliquer les raccords inverses partout où les conditions le permettent.

1.6.2. La longueur d'un raccord et la résistance

On suppose un raccord homogène, simple dont la surface de contact est rectangulaire (raccord plan ou cylindrique) la longueur initiale est égale l_1 , et la paramètre d'analogie est égale c_1 .

Changement de la longueur du raccord de l_1 à $k_1 l_1$ change le paramètre d'analogie. On obtient:

$$c_1 \rightarrow c_k \quad (1.71)$$

$$c_k = k_1 c_1 \quad (1.72)$$

La résistance relative d'un raccord se change avec la longueur selon les formules:

- raccord direct:

$$\bar{r}_k = 1 + \frac{2}{k_1 c_1} \operatorname{cth} \frac{k_1 c_1}{2} \quad (1.73)$$

- raccord inverse:

$$\bar{r}_k = \frac{2}{k_1 c_1} \left(\operatorname{cth} \frac{k_1 c_1}{2} + \operatorname{th} \frac{k_1 c_1}{2} \right) = \frac{4}{k_1 c_1} \operatorname{cth} k_1 c_1 \quad (1.74)$$

Comme la résistance de base, on a admis la résistance R_{Nk} d'un raccord idéal direct ayant la longueur $k_1 l_1$:

$$R_{Nk} = k_1 R_{N1} \quad (1.75)$$

La figure 1.20 montre que pour les raccords directs avec une relativement petite résistance de contact (grande valeur du paramètre c_1) l'influence de la longueur à la résistance électrique (relative) est inférieure à celle qui existe pour une résistance de contact élevée (petite valeur du paramètre c_1).

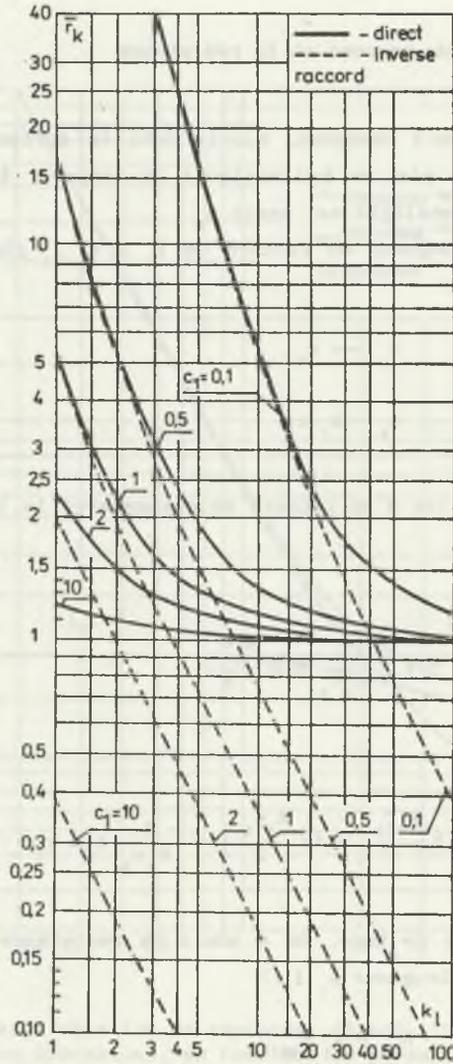


Fig.1.20. Résistance relative des raccords: directs et inverses en fonction de la longueur relative k_1 et du paramètre c_1

Rys.1.20. Rezystancja względna złączy: zgodnego i przeciwnego w zależności od długości względnej k_1 i parametru c_1

On constate ici la supériorité des raccords inverses par rapport aux raccords directs (le même allongement provoque une diminution de la résistance électrique plus forte pour un raccord inverse par rapport au raccord direct).

1.6.3. Influence de la forme de la surface d'un raccord sur leur résistance

On suppose que la résistance totale de contact dans un raccord est constante, égale à r_c , et que la surface de contact est rectangulaire.

Pour la surface de contact carrée avec la cote l_1 on suppose le paramètre d'analogie c_1 :

$$c_1^2 = \frac{r_{a1} + r_{b1}}{r_c} l_1^2 = \frac{(r_{a1} + r_{b1}) l_1}{R_c} \quad (1.76)$$

On définit le coefficient de la forme pour la surface de contact k_k :

$$k_k = \frac{1}{b}$$

où - l est la longueur de la surface rectangulaire,

- b est la largeur.

Le raccord avec la surface de contact rectangulaire possède le paramètre d'analogie c_k :

$$c_k = \sqrt{k_k} c_1 \quad (1.77)$$

On obtient les résistances relatives des raccords:

- raccord direct:

$$\bar{r}_k = 1 + \frac{2}{\sqrt{k_k} c_1} \operatorname{cth} \frac{\sqrt{k_k} c_1}{2} \quad (1.78)$$

- raccord inverse:

$$\bar{r}_k = \frac{4}{\sqrt{k_k} c_1} \operatorname{cth} \sqrt{k_k} c_1 \quad (1.79)$$

Comme la résistance de base R_{Nk} on admet la résistance d'un raccord idéal avec la même forme de surface de contact que celle du raccord analysé.

$$R_{Nk} = \sqrt{k_k} R_{N1} \quad (1.80)$$

La figure 1.21 montre le rapport entre la résistance relative r_k d'un raccord avec une surface rectangulaire de contact et la résistance relative d'un raccord avec surface de contact carrée \bar{r}_1 . On admet qu'il y a la même quantité du métal dans toutes les pièces de contact.

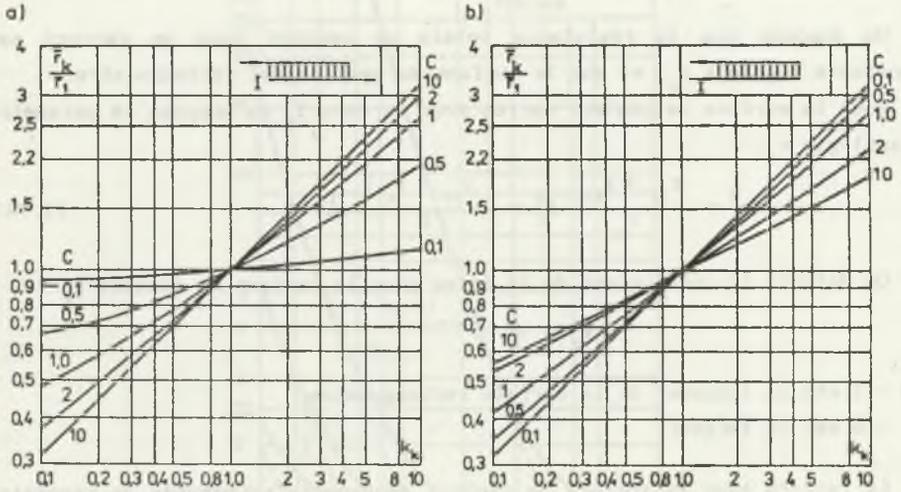


Fig. 1.21. Influence de la forme de la surface du contact d'un raccord sur le rapport des résistances relatives: r_k -raccord avec la surface du contact rectangulaire; r_1 -raccord avec la surface carée

Rys. 1.21. Wpływ kształtu powierzchni zestykowej złącza na stosunek rezystancji względnych: r_k - rezystancja z prostokątnymi powierzchniami styku; r_1 - złącze z powierzchniami kwadratowymi

On constate que avec la supposition initiale $R_c = \text{const.}$ (dans tous cas la même surface totale de contact et les mêmes résistances de contacts élémentaires) il est profitable de diminuer la longueur du raccord. La constatation est valable pour les raccords directs et invers; l'influence de la forme de surface reste différente pour ces deux types de raccords (comparaitre fig 1.21a et b).

1.6.4. Influence de la résistance d'une pièce de contact à la résistance du raccord

Dans certains types de raccords composés de conducteur et d'une pièce de contact (par ex. du manchon dans les raccords comprimés) le constructeur peut influencer la résistance du raccord par changement de la section (résistance) de pièce de contact.

On suppose qu'une pièce de contact varie sa section ($r_a = \text{var}$, $r_b = \text{const}$).
Les valeurs initiales de paramètres du raccord sont: c_1 , $\delta_1 = 0$, r_a .

Variation de la résistance d'une pièce de contact:

$$r_{ak} = k_r r_a \quad (1.81)$$

provoque le changement du paramètre c et δ :

$$c_k = c_1 \frac{1 + k_r}{2} \quad (1.82)$$

$$\delta_k = \frac{k_r - 1}{k_r + 1} \quad (1.83)$$

Comme base pour la résistance relative du raccord on admet un raccord idéal avec les résistances de pièces de contact r_{ak} et r_b et la résistance totale:

$$R_{Nk} = \frac{2k_r}{1 + k_r} R_{N1} \quad (1.84)$$

où R_{N1} est la résistance d'un raccord idéal direct, symétrique avec les résistances de pièces de contact r_a et r_b .

On obtient les formules pour les résistances relatives des raccords:

- raccord direct:

$$\begin{aligned} \bar{r}_k = 1 + & \frac{2}{c_1 \sqrt{\frac{1 + k_r}{2}} \left[1 - \left(\frac{k_r - 1}{k_r + 1} \right)^2 \right]} \text{cth} \frac{c_1}{2} \sqrt{\frac{1 + k_r}{2}} + \\ & + \left(\frac{k_r - 1}{k_r + 1} \right)^2 \text{th} \frac{c_1}{2} \sqrt{\frac{1 + k_r}{2}} \end{aligned} \quad (1.85)$$

- raccord inverse:

$$r_k = \frac{4 \text{cth} c_1 \sqrt{\frac{1 + k_r}{2}}}{c_1 \sqrt{\frac{1 + k_r}{2}} \left[1 - \left(\frac{k_r - 1}{k_r + 1} \right)^2 \right]} \quad (1.86)$$

MODELISATION DES RACCORDS DU POINT DE VUE THERMIQUE -
- ECHAUFFEMENT STATIONNAIRE

2.1. GENERALITES

Le raccord est représenté par la structure thermocinétique de la figure 2.1. En négligeant les chutes transversales de température à l'intérieur de la structure (bonne conduction de chaleur dans les métaux sur de petites distances) on peut supposer que la structure thermocinétique est linéaire et obtenir le modèle thermique bidimensionnel (fig.2.1b).

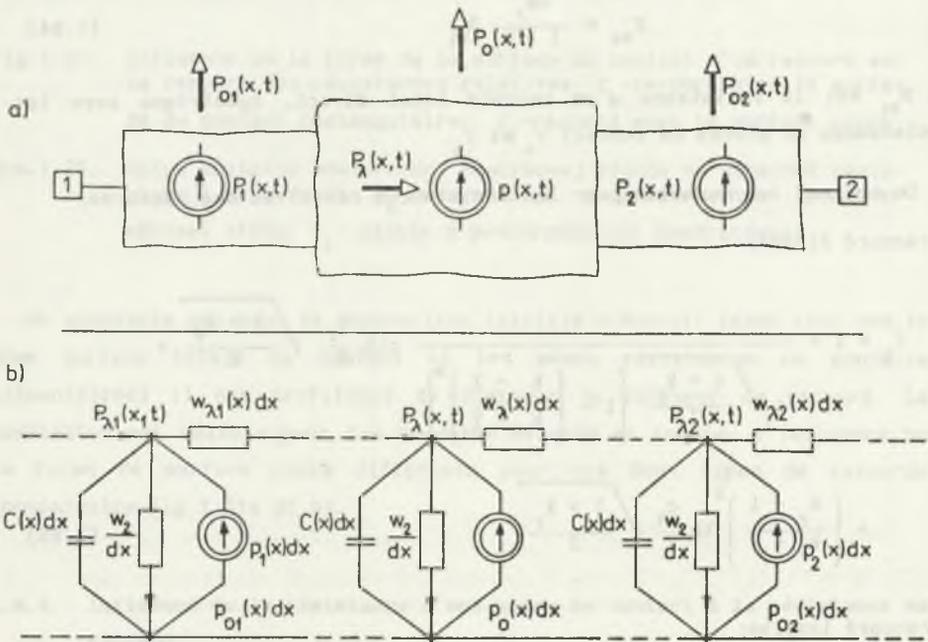


Fig.2.1. Modèle thermique d'un raccord; a - structure générale, b - modèle linéaire

Rys.2.1. Model ciepliny złącza; a - budowa ogólna, b - model linearny

Tableau 2.1

Analogie entre les grandeurs électriques et thermiques

Grandeur électrique	Dim SI	Grandeur thermique	Dim SI
Courant électrique I	A	Flux thermique (puissance) P	W
Densité du courant j		Densité de puissance p	
- linéaire	A/m	- linéaire	W/m
- surfacique	A/m ²	- surfacique	W/m ²
Potentiel électrique V	V	Température T	°C
Tension électrique U=ΔV	V	Echauffement ΔT	K
Resistance R	V/A	Résistance thermique W	K/W
Résistance unitaire		Résistance thermique unitaire	
- répartition en série	Ω/m	-répartition série	K/W.m
- répartition en parallèle	Ω.m	-répartition parallèle	K/W.m
Capacité électrique Ce	A.s/V	Capacité thermique C	W.s/ K
Loi d'Ohm		Loi d'Ohm/thermique	
$I = \frac{U}{R}$	A	$P = \frac{\Delta T}{W}$	W
I loi de Kirchhoff		Bilan des puissances	
$\sum_k I_k = 0$	A	$\sum_k P_k = 0$	W
II loi Kirchhoff		II loi de Kirchhoff (thermique)	
$\sum_{k, l} (U_k, E_l) = 0$	V	$\sum_{k, l} (\Delta T_k, \Delta T_l) = 0$	K

Le modèle thermique (fig.2.1) utilise l'analogie entre un champ électrique et thermique. Le tableau 2.1 présente les grandeurs analogues principales.

Le raccord avec les conducteurs est alors modélisé par la ligne active (fig.2.1b), avec les sources de puissance (pertes de la puissance), les résistances longitudinales (conduction thermique le long du raccord et des conducteurs) et les résistances transversales (échange de la puissance thermique avec le milieu ambiant). Les capacités thermiques sont liées avec l'accumulation de chaleur dans le raccord.

2.2. BILAN DES PUISSANCES THERMIQUES

Utilisant la I loi de Kirchhoff pour un noeud de ligne équivalente d'un raccord avec les conducteurs (bilan des puissances) on obtient l'équation différentielle de II ordre, qui décrit l'échauffement de la structure thermique :

$$\frac{\delta^2 \Delta T(x, t)}{\delta x^2} - \frac{1}{\chi^2(x)} \frac{\Delta T(x, t)}{\delta t} \gamma^2(x) \Delta(x, t) = - w_\lambda(x) p(x, t) \quad (2.1)$$

où

$\chi^2(x) = \frac{1}{w_\lambda(x) c'(x)}$: est la conductance thermométrique spécifique de matériau en m/s^2

$c'(x)$: est la densité de la capacité thermique en $W.s/K.m$

$w_\lambda(x)$: résistance thermique de conduction unitaire en K/Wm

$w(x)$: résistance thermique de l'échange avec l'ambiance, unitaire en K/Wm

$\gamma^2(x) = \frac{w_\lambda(x)}{w(x)}$: fonction de la transmission de ligne

$\gamma^2(x) = \frac{\alpha_z(x)}{\lambda(x)} g(x)$

$\alpha_z(x)$: coefficient équivalent d'échange de chaleur avec l'ambiance en W/m^2K

$\lambda(x)$: conductance thermique spécifique du matériau en $W/m.K$

$g(x) = \frac{b(x)}{s(x)}$: rapport du périmètre à la section de la structure thermique en m^{-1} .

L'équation (2.1) possède des solutions analytiques seulement pour certaines fonctions $p(s,t)$, $\chi^2(x)$, et $\gamma^2(x)$. Généralement les fonctions $p(x,t)$, $\chi^2(x)$ et $\gamma^2(x)$ varient avec la température et l'équation (2.1) devient non linéaire.

2.3. DESCRIPTION ANALYTIQUE DE L'ÉCHAUFFEMENT D'UNE STRUCTURE THERMOCINETIQUE LINEAIRE

Le raccord et les conducteurs constituent souvent une structure linéaire que l'on peut décomposer en parties homogènes (fig.2.2.).

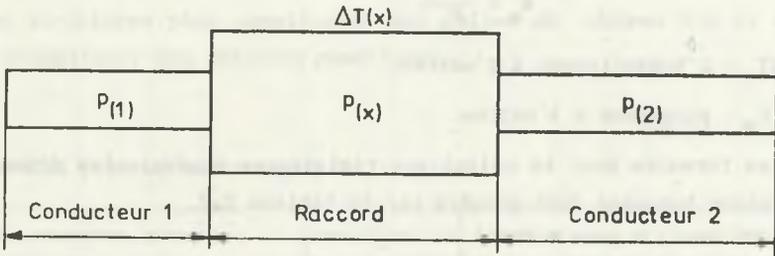


Fig.2.2. Raccord et les conducteurs
Rys.2.2. Złącze i przewody

L'application du principe de superposition pour le calcul des échauffements permet la décomposition de la structure en 3 structures présentées sur la figure 2.3.

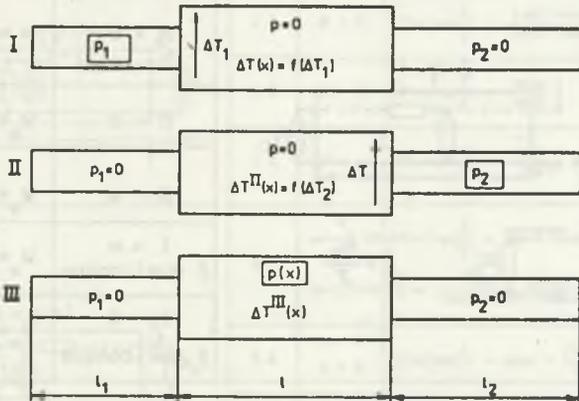


Fig.2.3. Application du principe de la superposition pour le calcul d'échauffement du raccord et des conducteurs

Rys.2.3. Zastosowanie zasady superpozycji do obliczenia nagrzewania złącza i przewodów

L'échauffement se détermine par la formule :

$$\Delta T(x) = \Delta T^I(x) + \Delta T^{II}(x) + \Delta T^{III}(x) \quad (2.2)$$

où $\Delta T^I(x)$, $\Delta T^{II}(x)$ et $\Delta T^{III}(x)$ sont les échauffements des structures I, II, III.

Pour l'analyse d'échauffement on introduit par l'analogie la résistance thermique de l'onde :

$$Z = \sqrt{W_\lambda W} \quad (2.3)$$

et la résistance thermique équivalente d'une structure passive W_w :

$$W_w = \frac{\Delta T_w}{P_w} \quad (2.4)$$

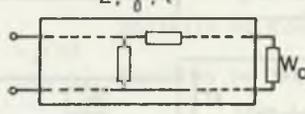
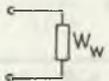
où ΔT_w : l'échauffement à l'entrée,

P_w : puissance à l'entrée.

Les formules pour le calcul des résistances équivalentes d'une structure thermique homogène sont données par le tableau 2.2.

Tableau 2.2

Résistances thermiques équivalentes d'une ligne thermique passive

Nombre	Structure, paramètres	Conditions	Resistance équivalente
1		$\beta > 0$	$W_w = Z \frac{\beta \operatorname{ch} \gamma l + \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l + \beta \operatorname{sh} \gamma l}$
2		$\beta = 0$	$W_w = Z \operatorname{th} \gamma l$
3		$\beta = \infty$	$W_w = Z \operatorname{cth} \gamma l$
4	 $\beta = \frac{W_0}{Z}$	$l \rightarrow \infty$ β quelconque	$W_w = Z$
5		$l = 0$ β quelconque	$W_w = W_0$

En décomposant une structure thermocinétique linéaire selon les règles de superposition on obtient 3 schémas équivalents représentés par le tableau 2.2 avec les formules de calcul de l'échauffement.

L'application des formules du tableau 2.3 pour la détermination de l'échauffement des raccords conduit à des formules analytiques assez compliquées. Les exemples sont présentés au tableau 2.4.

La structure n° 1 du tableau 2.4. représente un raccord avec la répartition homogène des pertes, posé entre deux conducteurs différents et homogènes.

La structure n° 2 du tableau 2.4 détermine l'échauffement d'un raccord direct homogène et symétrique, avec la répartition de puissance non homogène, posé entre deux conducteurs, identiques, homogènes.

La structure n° 3 correspond à un raccord homogène, qui joint deux conducteurs identiques.

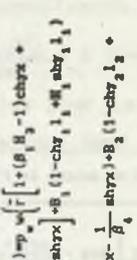
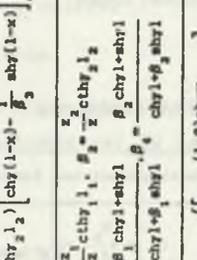
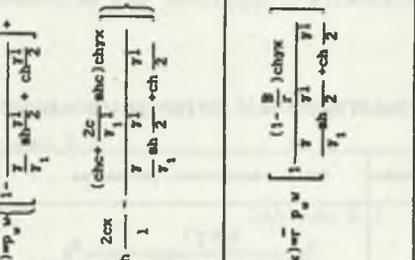
Pour les structures plus compliquées que celles du tableau 2.4 il est nécessaire d'appliquer des méthodes numériques.

Tableau 2.3

Echauffement des principales structures linéaires

Nombre	Schéma, équivalent, paramètres	Version	Condition	Formule de calcul de l'échauffement
1		1.1	$\beta = \frac{w}{z} > 0$	$\Delta T(x) = \Delta T_a \left(chyx - \frac{chyl + \beta shyl}{\beta chyl + shyl} shyx \right)$
		1.2	$\beta = 0$	$\Delta T(x) = \Delta T_a \left(chyx - cthyl shyx \right)$
		1.3	$\beta = \infty$	$\Delta T(x) = \Delta T_a \left(chyx - thyl shyx \right)$
2		2.1	$\beta > 0$	$\Delta T(x) = pv \left(1 - \frac{1 + \beta(1 - shyl)}{shyl - \beta chyl} shyx \right)$
		2.2	$\beta = 0$	$\Delta T(x) = pv \left(1 - \frac{shyx}{shyl} \right)$
		2.3	$\beta = \infty$	$\Delta T(x) = pv \left(1 - \frac{shyl - 1}{chyl} shyx \right)$
3		3.1	$\alpha = \frac{w}{z} > 0$ $\beta = \frac{w_b}{z} > 0$	$\Delta T(x) = pv \left[1 + (\alpha\beta - 1)chyx + \beta shyx \right]$ $H = \frac{chyl + \beta shyl - 1}{(\alpha + \beta)shyl + (1 + \alpha\beta)shyl}$
		3.2	$\alpha = 0$ $\beta = 0$	$\Delta T(x) = pv \left(1 - chyx + \frac{chyl - 1}{shyl} shyx \right)$
		3.3	$\alpha = \infty$ $\beta = \infty$	$\Delta T(x) = pv$
		3.4	$\alpha = 0$ $\beta = \infty$	$\Delta T(x) = pv \left(1 - chyx + thyl shyx \right)$
		3.5	$\alpha = \infty$ $\beta = 0$	$\Delta T(x) = pv \left(1 - chyx \right)$

Tableau 2.4
Exemples d'application du principe de la superposition à l'analyse d'échauffement des raccords

Nr	Structures, paramètres	Echauffement	Definitions
1		$\Delta T(x) = p_w \left\{ \left[1 + (\beta_1 \beta_2 - 1) \operatorname{ch} \beta_1 x + \beta_1 \operatorname{sh} \beta_1 x \right] + B \left[1 - \operatorname{ch} \beta_1 x + \beta_1 \operatorname{sh} \beta_1 x \right] \right. \\ \left. + (\operatorname{ch} \beta_2 x - \frac{1}{\beta_2} \operatorname{sh} \beta_2 x) + B_2 \left[1 - \operatorname{ch} \beta_2 x + \beta_2 \operatorname{sh} \beta_2 x \right] \right. \\ \left. + H_2 \operatorname{sh} \beta_2 x \right\} + H_1 \operatorname{sh} \beta_1 x$	$\frac{\operatorname{ch} \beta_1 x + \beta_1 \operatorname{sh} \beta_1 x}{H_1} - \frac{\operatorname{ch} \beta_2 x + \beta_2 \operatorname{sh} \beta_2 x}{H_2}$ $\frac{\operatorname{ch} \beta_1 x + \beta_1 \operatorname{sh} \beta_1 x}{H_1} + \frac{\operatorname{ch} \beta_2 x + \beta_2 \operatorname{sh} \beta_2 x}{H_2}$ $\frac{\operatorname{ch} \beta_1 x + \beta_1 \operatorname{sh} \beta_1 x}{H_1} + \frac{\operatorname{ch} \beta_2 x + \beta_2 \operatorname{sh} \beta_2 x}{H_2} + \frac{\operatorname{ch} \beta_1 x + \beta_1 \operatorname{sh} \beta_1 x}{H_1} + \frac{\operatorname{ch} \beta_2 x + \beta_2 \operatorname{sh} \beta_2 x}{H_2}$ $\frac{P_{1,1}}{P_{1,2}} \cdot B \cdot \frac{P_{2,2}}{P_{2,1}} \cdot \frac{r}{r_0} \cdot \frac{P}{P_0}$
2		$\Delta T(x) = p_w \left\{ \left[1 - \frac{(1-\beta) \operatorname{ch} \beta x}{\beta_1} + \frac{\operatorname{ch} \beta_2 x}{\beta_2} + \frac{\operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} \right] + \frac{2c \operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} \right. \\ \left. + A \operatorname{ch} \frac{x}{l} - \frac{2c \operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} - \frac{(c \operatorname{ch} \beta_2 x + \beta_2 \operatorname{sh} \beta_2 x) \operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} \right. \\ \left. + \frac{2c \operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} \right\}$	$p(x) = p_w \left(1 + \frac{2c \operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} - \frac{c}{\beta_1} \right)$ $A = \left[\left(1 - \frac{4c^2}{\beta_1^2 l^2} \right) \operatorname{sh}^2 \frac{c}{2} \right]^{-1}$ $B = \frac{P_{1,1}}{P_{1,2}}$
3		$\Delta T(x) = p_w \left\{ \left[1 - \frac{B}{\beta_1} \operatorname{ch} \beta_1 x \right] + \frac{2c \operatorname{ch} \beta_1 x}{\beta_1} + \frac{2c \operatorname{ch} \beta_2 x}{\beta_2} \right\}$	$B = \frac{P_{1,1}}{P_{1,2}}$

2.4. METHODE NUMERIQUE DE CALCUL DE L'ECHAUFFEMENT D'UNE STRUCTURE LINEAIRE QUELCONQUE

2.4.1. Principes de la méthode

La structure thermique est divisée en n éléments finis (fig.2.4). La position d'une source est déterminée par les coordonnées directes J , les éléments passifs sont indexés par les coordonnées discrètes. L'échauffement dans un lieu k déterminé par la source de puissance j est définie par le symbole $\Delta T_j^{(k)}$.

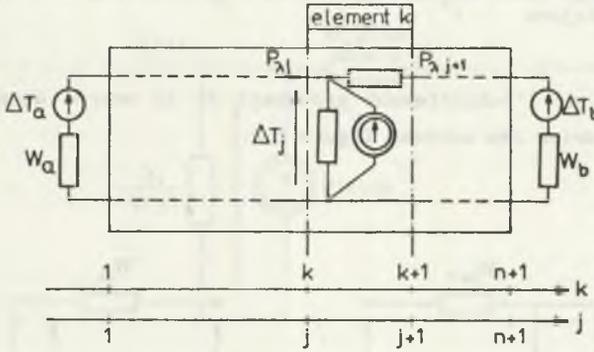


Fig.2.4. Schéma équivalent d'une structure thermocinétique pour l'analyse numérique de l'échauffement

Rys.2.4. Schemat zastępczy układu termokinetycznego do analizy numerycznej nagrzewania

Les structures thermocinétiques à l'extérieur du raccord sont remplacées par les sources de température (ΔT_a , ΔT_b) et les résistances thermiques équivalentes ($W_a^{(k)}$, $W_b^{(k)}$) :

$$\Delta T_j = \sum_{k, j} \Delta T_j^{(k)} + \sum_k \Delta T_a^{(k)} + \sum_k \Delta T_b^{(k)} \quad (2.5)$$

La figure 2.5 présente le principe de la détermination de l'échauffement provenant de la source j de puissance P_j . Le réseau des résistances thermiques est remplacé par les résistances équivalentes W'_k et W de lieu $j=k$

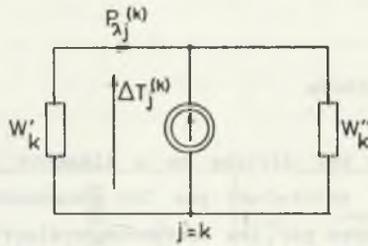


Fig.2.5. Illustration de la détermination d'échauffement dans lieu $k=j$ pour la source dans le même lieu

Rys.2.5. Ilustracja wyznaczania nagrzewania w miejscu $k=j$ dla źródła w tym samym miejscu

La répartition de l'échauffement provenant de la source dans les lieux $j=k$ est calculée selon les schémas figure 2.6.

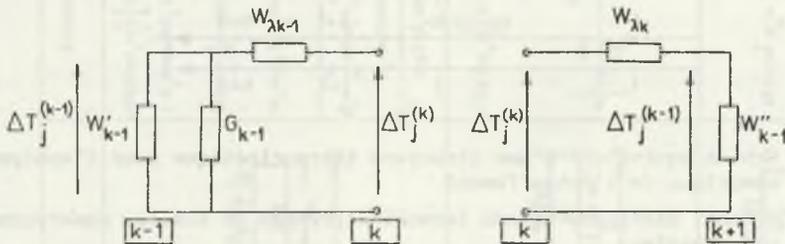


Fig.2.6. Schémas équivalents pour la détermination de l'échauffement au lieu $k-1$ et $k+1$ pour la source dans lieu $k=j$

Rys.2.6. Schemat zastępczy do wyznaczania nagrzewania w miejscu $k-1$ i $k+1$ dla źródła w miejscu $k=j$

Pour l'organisation des calculs numériques on prend les coordonnées des conducteurs et du raccord selon la figure 2.7, admettant que les conducteurs ont les coordonnées j, k entre $1 \dots n_1, n_2 \dots n_3$, et le raccord entre $n_1 \dots n_2$.

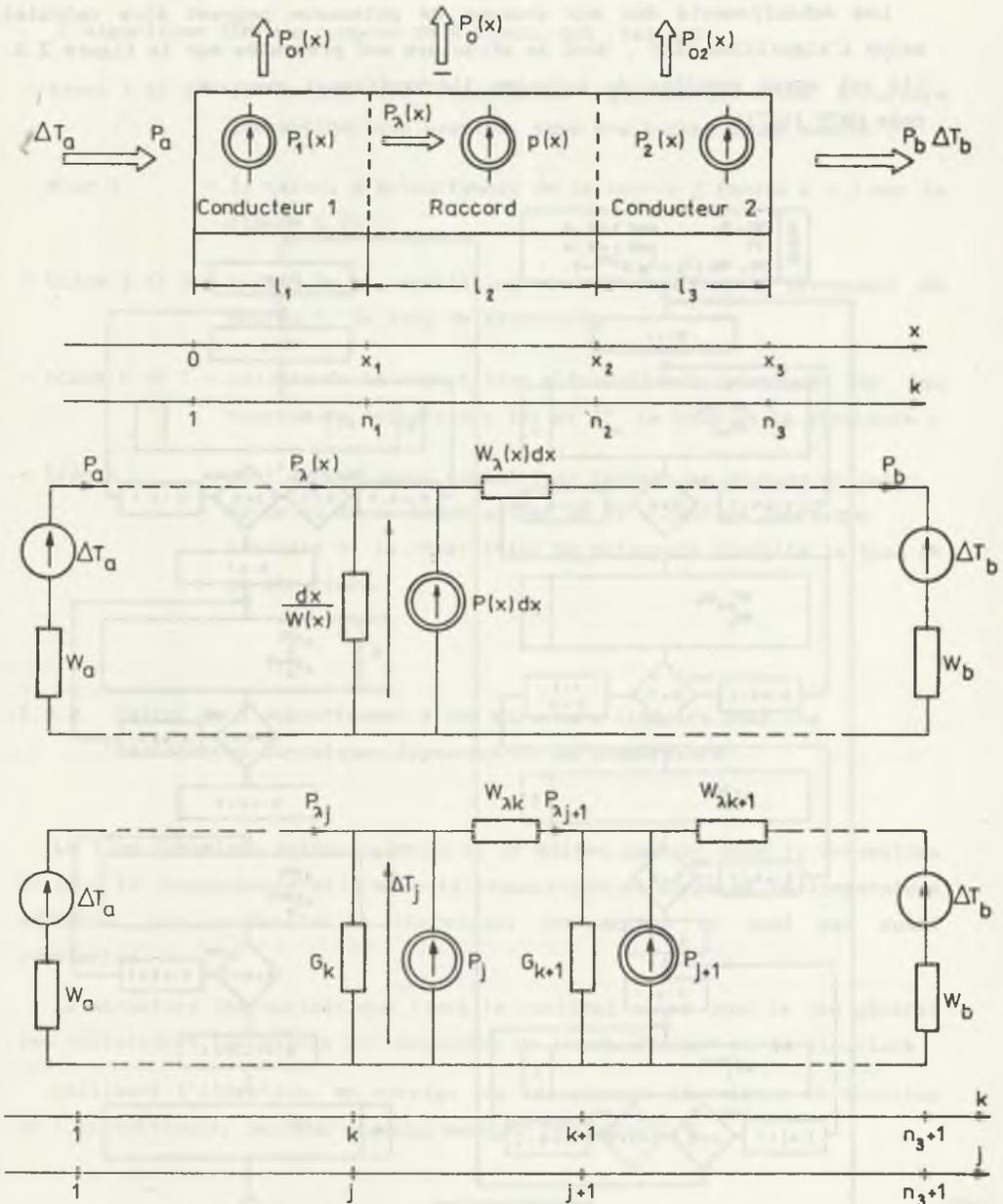


Fig.2.7. Structure thermokinétique linéaire formée par un raccord avec les conducteurs: a - structure physique, b - schéma équivalent avec les paramètres répartis, c - schéma équivalent avec les paramètres discrets

Rys.2.7. Układ termokinetyczny liniowy utworzony przez złącze z przewodami: a - budowa fizyczna, b - schemat zastępczy z parametrami rozłożonymi, c - schemat zastępczy z parametrami dyskretnymi

Les échauffements dus aux sources de puissance peuvent être calculés selon l'algorithme TEMP, dont la structure est présentée sur la figure 2.8. (Il est aussi possible de calculer l'échauffement avec le code EMTF [127]).

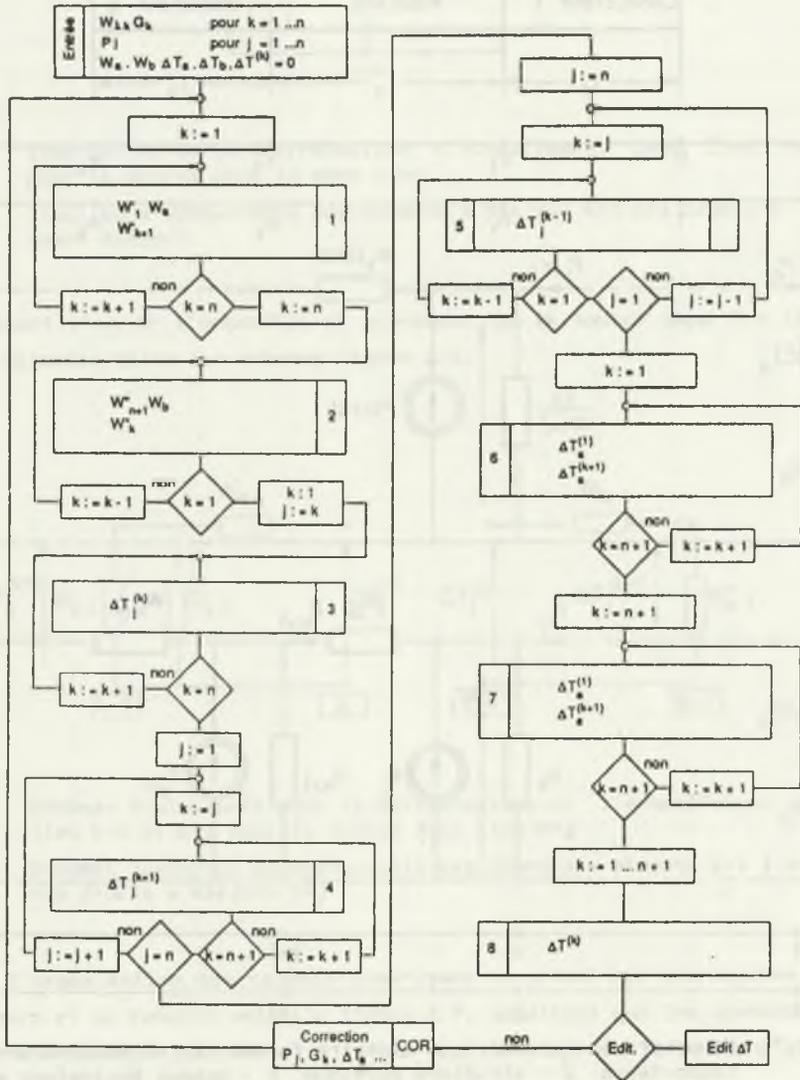


Fig.2.8. Algorithme "TEMP" de calcul de l'échauffement d'une structure linéaire

Rys.2.8. Alorytm "TEMP" do obliczeń nagrzewania układu linearnego

L'algorithme TEMP se compose de 8 blocs, qui réalisent :

- blocs 1 et 2 - le calcul des résistances équivalentes d'une structure thermocinétique passive, vues des bornes d'une source ;
- bloc 3 - le calcul d'échauffement de la source j (noeud $k = j$ sur la figure 2.7c) ;
- blocs 4 et 5 - calcul de la répartition de l'échauffement provenant de source j , le long de structure;
- blocs 6 et 7 - calculs de la répartition d'échauffement provoqué par les sources de température ΔT_a et ΔT_b le long de la structure ;
- bloc 8 - de l'échauffement global (par toutes les sources de puissance et de la température) de la structure thermique linéaire et la répartition de puissance conduite le long de la structure.

2.4.2. Calcul de l'échauffement d'une structure linéaire dont les résistances thermiques dépendent de la température

Le flux thermique entre un corps et le milieu ambiant pour la convection et pour le rayonnement varie avec la température du corps et la température ambiante. Les conductivités thermiques des métaux ne sont pas aussi constantes.

La structure thermocinétique linéaire contient alors dans le cas général les résistances thermiques qui dépendent de l'échauffement de la structure.

Utilisant l'itération, on corrige les résistances thermiques en fonction de l'échauffement, selon l'organigramme de la figure 2.9.

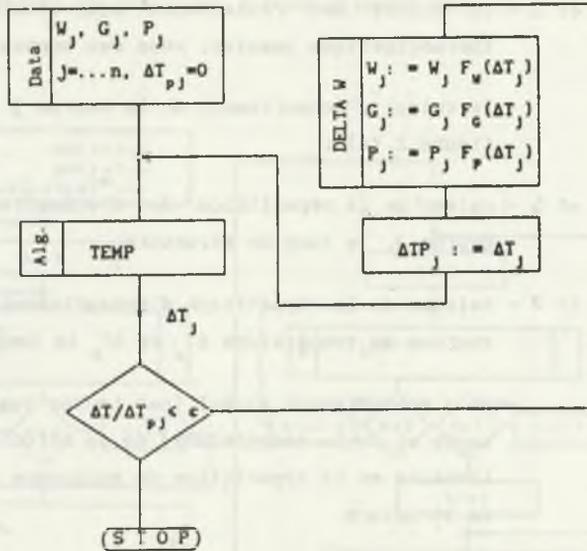


Fig.2.9. Organigramme des calculs itératifs d'échauffement d'une structure linéaire dont les résistances thermiques dépendent de l'échauffement

Rys.2.9. Algorytm obliczeń iteracyjnych nagrzewania układu linearnego, którego rezystancje cieplne zależą od temperatury

2.4.3. Calcul de l'échauffement d'un raccord dont les résistances électriques et thermiques dépendent de l'échauffement

Le calcul numérique d'échauffement d'un raccord avec les conducteurs est organisé par l'utilisation des algorithmes:

- IUP RACCORD - pour le calcul des pertes de puissance dans le raccord.
- P CONDUCTEURS - pour le calcul des pertes de puissance dans les conducteurs (fig. 2.10).
- TEMP - pour les calculs de l'échauffement d'une structure thermocinétique aux paramètres indépendants de l'échauffement.
- DELTA W - pour la correction des résistances thermiques en fonction de l'échauffement.
- DELTA R - pour la correction des résistances du raccord en fonction de l'échauffement (fig.2.11).
- TEMPC - pour le calcul de la température des contacts élémentaires dans le raccord (fig.2.12).

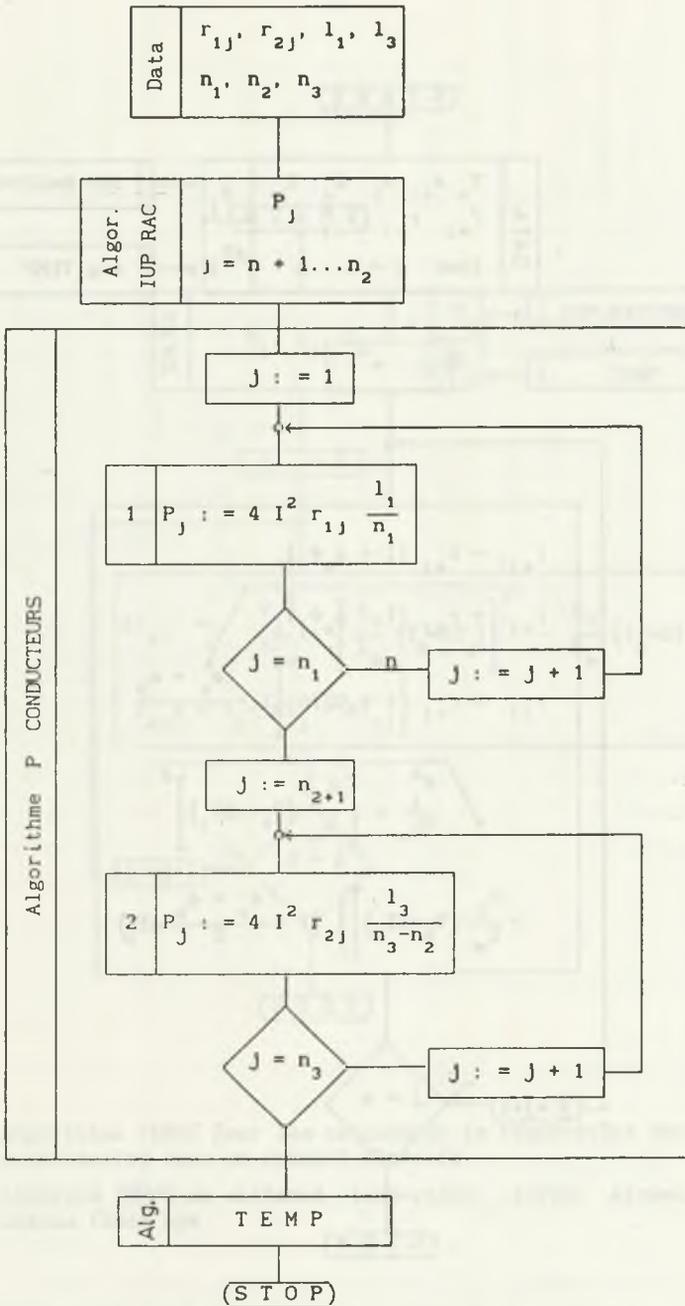


Fig.2.10. Algorithme P CONDUCTEURS pour le calcul des pertes de puissance dans les conducteurs

Rys.2.10. Algorytm P CONDUCTEURS do obliczania strat mocy czynnej w przewodach

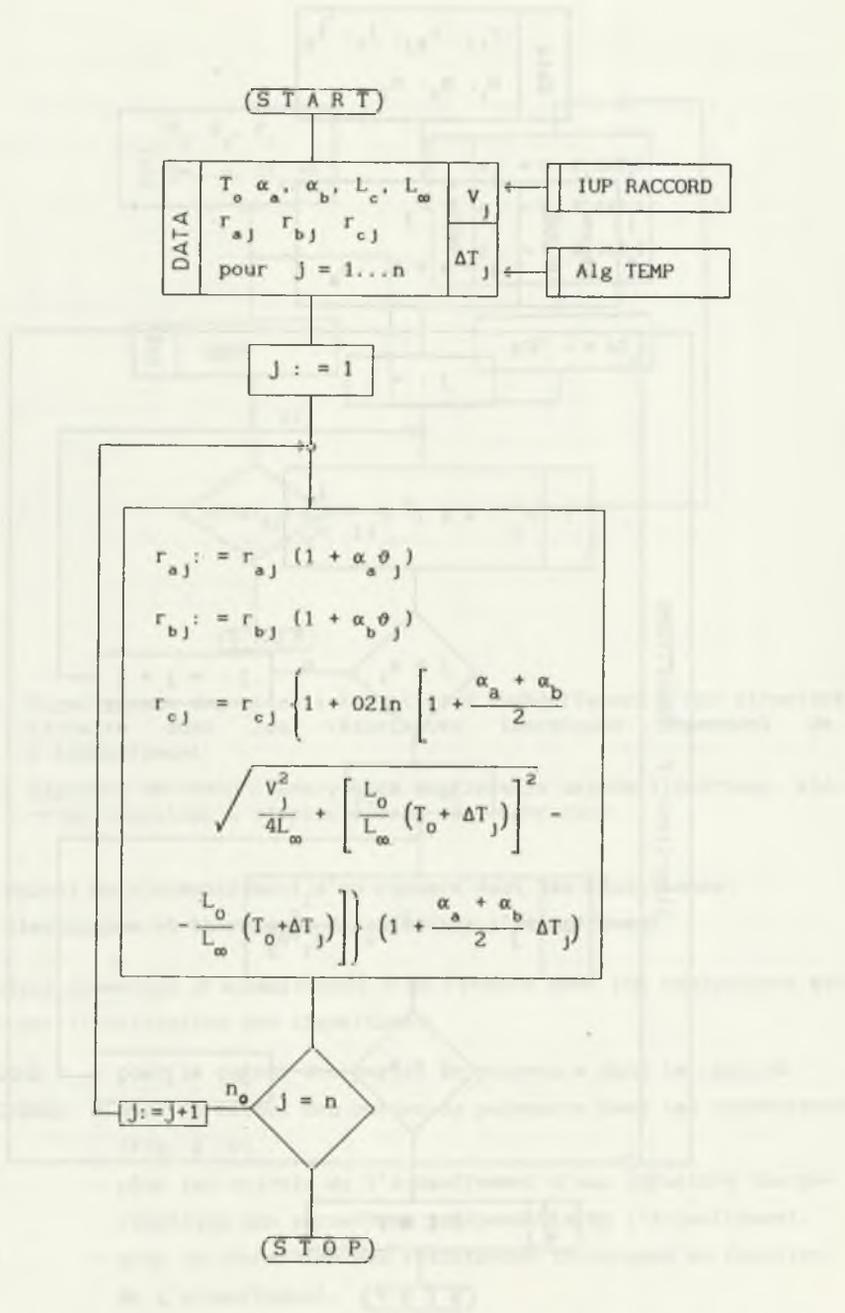


Fig.2.11. Algorithme DELTAR permettant de corriger les résistances

Rys.2.11. Algorytm DELTAR pozwalający korygować wartości rezystancji cieplnych

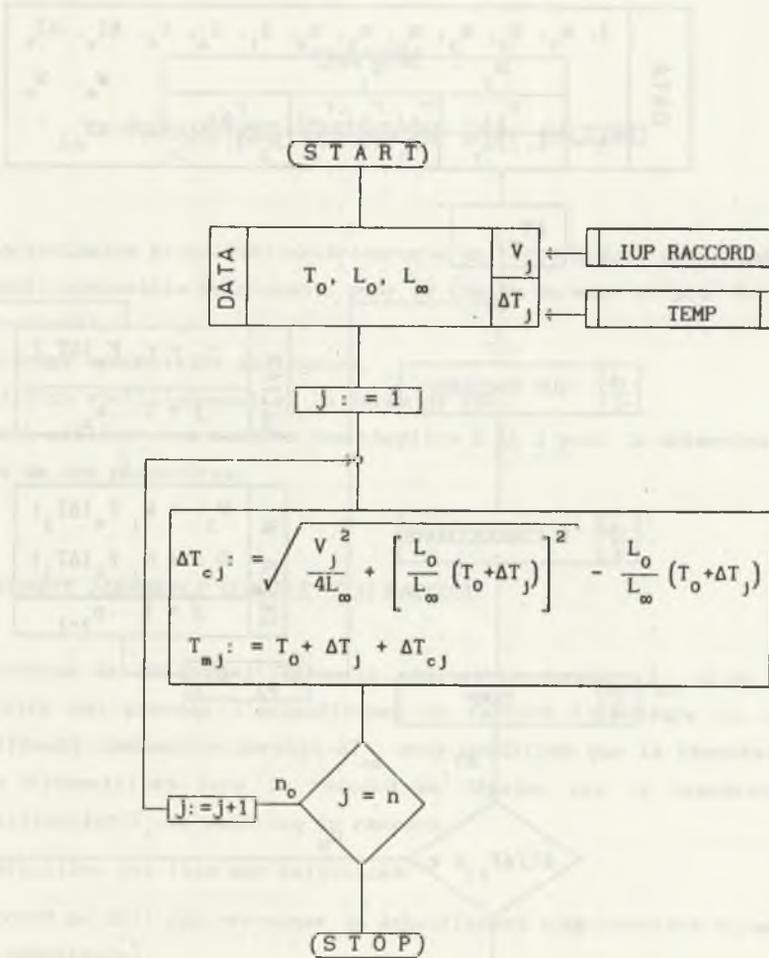


Fig.2.12. Algorithme TEMPC pour les calculs de la température des contacts élémentaires dans un raccord linéaire

Rys.2.12. Algorytm TEMPC do obliczeń temperatury styków elementarnych w złączu linearnym

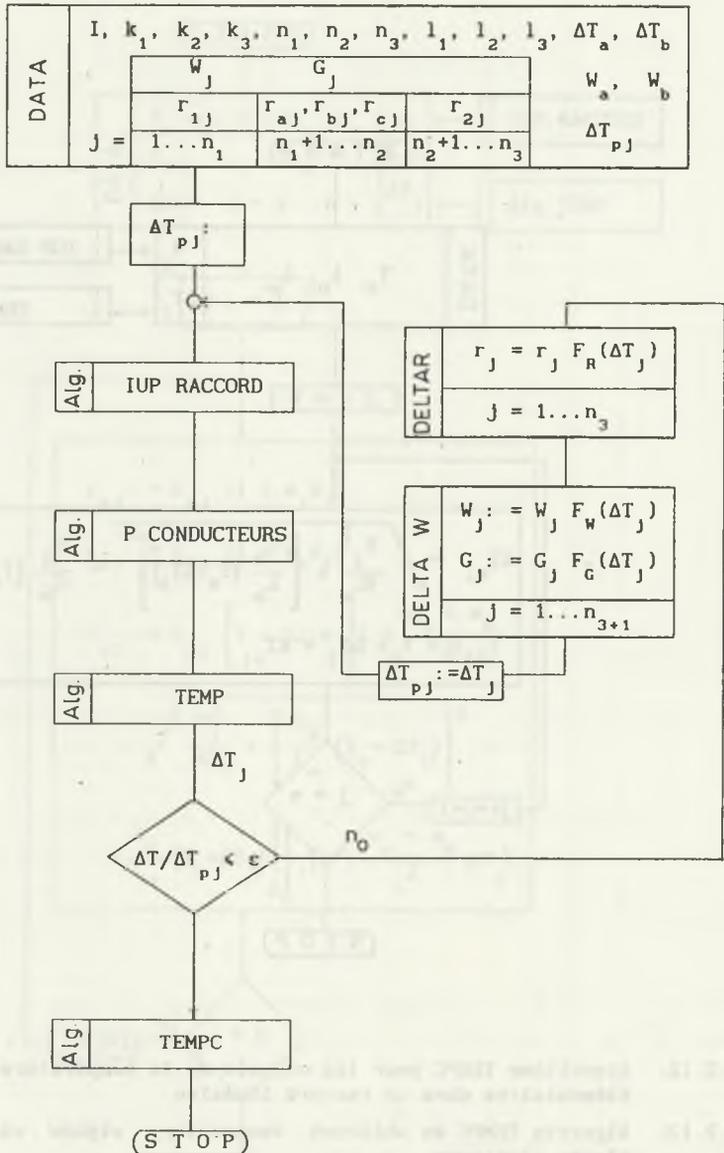


Fig.2.13. Organigramme des calculs d'échauffement d'un raccord linéaire avec les résistances électriques et thermiques qui dépendent de l'échauffement

Rys.2.13. Algorytm do obliczeń nagrzewania złącza liniowego o rezystancjach elektrycznych i cieplnych zależących od temperatury

CHAPITRE 3

PARAMETRES EXTERIEURS D'UN RACCORD

Les principales propriétés extérieures d'un raccord sont déterminées par:

- intensité admissible du courant, pour la charge normale et pour le cas de court-circuit,
- résistances admissibles du raccord,
- capacité du vieillissement et la durée de vie.

On peut utiliser les modèles des chapitre 2 et 3 pour la détermination de certains de ces paramètres.

3.1. INTENSITE ADMISSIBLE DURABLE D'UN RACCORD

On propose de définir l'intensité admissible durable I_{ad} d'un raccord comme celle qui provoque l'échauffement du raccord inférieure ou égale à l'échauffement admissible durable ΔT_{ad} sous condition que la température de contacts élémentaires dans le raccord ne dépasse pas la température de recristallisation T_r du matériau du raccord.

La définition est liée aux exigences:

- le raccord ne doit pas provoquer un échauffement supplémentaire du matériel (des conducteurs).
- on évite le changement des paramètres électriques et mécaniques du raccord ensuite de la recristallisation du métal.

On propose de définir le courant admissible en cas de court-circuit comme courant provoquant au temps du court-circuit l'échauffement du raccord égale à celle du conducteur (valeur maximale admissible I_{ac}). Il est nécessaire d'ajouter ici l'exigence supplémentaire que la température maximale de contacts élémentaires ne dépasse pas la température de fusion du matériau.

Tableau 3.1 propose les limitations de températures dans un raccord électrique.

Tableau 3.1

Limitation de températures dans les raccords électriques

Conditions d'exploitation	Exigence physique	Courant	
		Durable	de court-circuit
normales	éviter l'échauff. supplémentaire du matériel	$\Delta T < \Delta T_{ad}$	$\Delta T < \Delta T_{ac}$
	garder la stabilité du raccord	$T < T_r$	$T < T_f$
exceptionnelles	éviter une avarie immédiate	$T < T_f$	$T < T_o$
symboles	ΔT - échauffement stationnaire du raccord ΔT_{ad} - échauffement admissible stationnaire du conducteur ΔT_{ac} - échauffement admissible du conducteur pour un courant de court-circuit T - température des contacts élémentaires T_r - température de recristallisation T_f - température de fusion T_o - température d'ébullition de matériau des contacts		

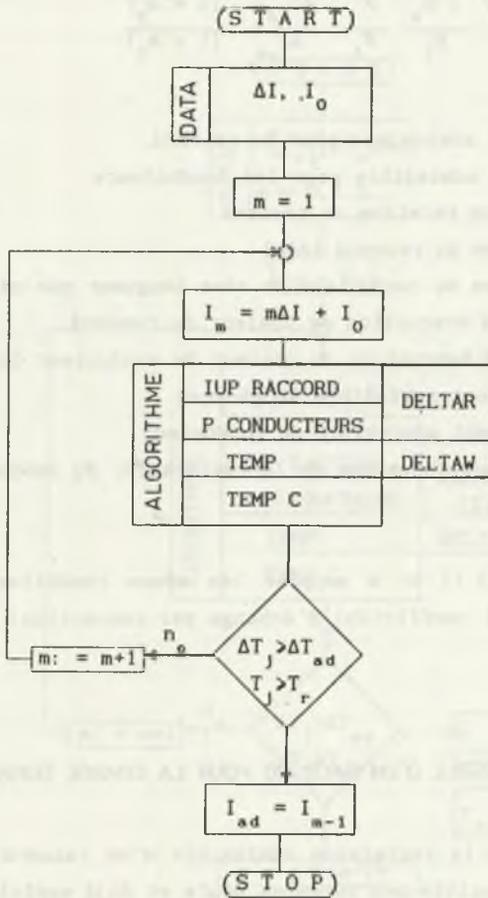


Fig.3.1. Organigramme de calcul numérique de l'intensité admissible durable du courant transité par un raccord

Rys.3.3. Algorytm do obliczania numerycznego długotrwałego natężenia prądu dopuszczalnego przepływającego przez złącze

Pour les raccords simples homogènes avec les conducteurs homogènes on peut déterminer [111] l'intensité admissible durable du courant par la formule simplifiée:

$$I_{ad} = I_{ad1} \sqrt{\frac{\bar{r} R_N}{R_1} \frac{F}{F_1} \frac{\Delta T_{ad}}{\Delta T_{ad1}} \frac{(1 + \alpha_2)}{(1 + \alpha_1)}} \quad (3.1)$$

- où
- I_{ad} - intensité admissible pour le raccord,
 - I_{ad1} - intensité admissible pour les conducteurs
 - \bar{r} - résistance relative du raccord
 - R_N - résistance du raccord idéal
 - R_1 - résistance du conducteur de même longueur que celle du raccord
 - F - surface d'évacuation de chaleur du raccord
 - F_1 - surface d'évacuation de chaleur du conducteur de même longueur
 - ΔT_{ad} - échauffement admissible du raccord
 - ΔT_{ad1} - échauffement admissible du conducteur
 - α_1, α_2 - coefficient thermique de la résistance; du conducteur (1) et du raccord (2).

Pour la formule (3.1) on a supposé les mêmes conditions d'échange de chaleur (émissivité et coefficient d'échange par convection) pour le raccord et les conducteurs.

3.2. RESISTANCE ADMISSIBLE D'UN RACCORD POUR LA CHARGE DURABLE

La connaissance de la résistance admissible d'un raccord est nécessaire pour le contrôle de qualité des raccords neufs et déjà exploités.

On propose de définir la résistance admissible pour la charge durable, \bar{r}_{ad} , comme la plus petite de deux valeurs:

- \bar{r}_{ad1} - résistance relative pour laquelle le raccord a l'échauffement admissible ΔT_{ad}
- \bar{r}_{ad2} - résistance relative du raccord pour laquelle les contacts élémentaires ont la température admissible (par ex. de recristallisation T_r).

Dans le cas général (raccord hétérogène, conducteurs hétérogènes etc..) on peut déterminer, la résistance admissible \bar{r}_{ad} par les calculs numériques. L'organigramme de calculs est présenté par la figure 3.2 .

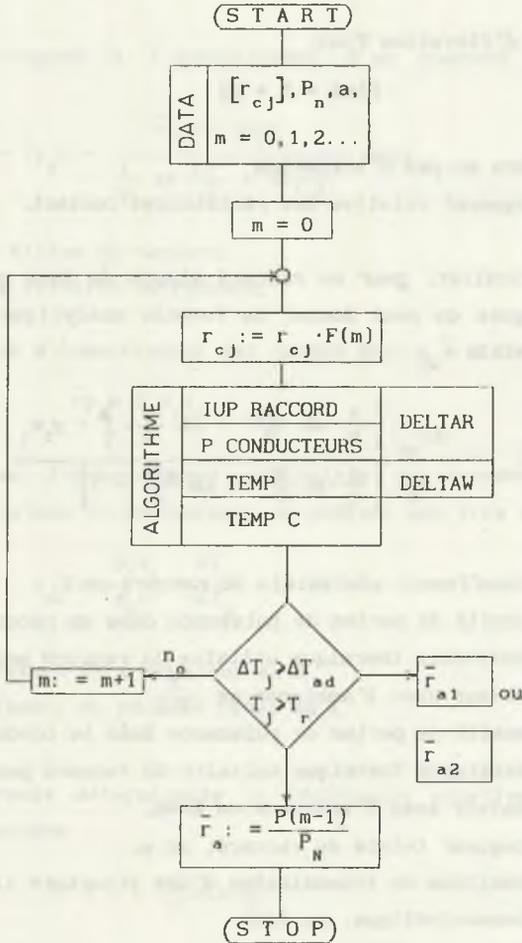


Fig.3.2. Organigramme de calcul numérique de résistance relative admissible d'un raccord pour le courant durable

Rys.3.2. Algorytm do obliczania numerycznej rezystancji względnej dopuszczalnej złącza przy prądzie długotrwałym

Pour un raccord déterminé avec les résistances de pièces de contact déterminées, on change dans les calculs numériques les valeurs de la résistance de contact et détermine l'échauffement du raccord et des contacts élémentaires.

La résistance relative du raccord est déterminée par rapport de pertes de puissance du raccord analysé et du raccord idéal.

La fonction d'itération $F(m)$:

$$F(m) = 1 + ma \quad (3.2)$$

ou - m - numéro du pas d'itération

a - changement relative des résistances contact.

En cas particulier, pour un raccord simple de deux conducteurs (égaux), infiniment longues on peut donner la formule analytique pour la résistance relative admissible \bar{r}_{a1} :

$$\bar{r}_{a1} = \frac{\Delta T_{ad} \left(\frac{\gamma}{\gamma_1} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2} \right) - p_1 w_1}{P_N w \left(\frac{\gamma}{\gamma_1} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2} - 1 \right)} \quad (3.3)$$

ou - ΔT_{ad} - échauffement admissible du raccord en K,

P_N - densité de pertes de puissance dans un raccord idéal, en W/m,

w - résistance thermique unitaire du raccord pour l'échange de chaleur avec l'ambiance en $\frac{K}{W m}$,

p_1 - densité de pertes de puissance dans le conducteur W/m,

w_1 - résistance thermique unitaire du raccord pour l'échange de chaleur avec l'ambiance en K/Wm,

l - longueur totale du raccord, en m,

γ, γ_1 - fonctions de transmission d'une structure linéaire thermocinétique, en 1/m,

$$\gamma = \frac{w_\lambda}{w} \quad \text{pour le raccord,}$$

$$\gamma_1 = \frac{w_{\lambda 1}}{w} \quad \text{pour le conducteur,}$$

$w_\lambda, w_{\lambda 1}$ - résistances thermiques unitaires de conduction thermique; du raccord et du conducteur en $\frac{K}{W m}$,

$$w_{\lambda} = \frac{1}{\lambda s} \quad w_{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_1 s_1}, \quad (3.4)$$

λ - conductivité thermique du matériau, en $\frac{W}{K m}$,

s - section totale du raccord, en m^2 ,

λ_1, s_1 - pour le conducteur.

La formule correspond à l'échauffement d'un raccord déterminé par l'expression :

$$\Delta T(x) = \bar{r} p_N w - \frac{\bar{r} p_N w - p_1 w_1}{\frac{\gamma}{\gamma_1} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} \operatorname{ch} \gamma x, \quad (3.5)$$

ou $x = 0$ pour le milieu du raccord,

\bar{r} = résistance relative du raccord,

La valeur maximale d'échauffement est donnée pour $x = 0$ sous condition :

$$\bar{r} p_N w > p_1 w_1 \quad (3.6)$$

En supposant que l'échauffement admissible du raccord est égal à l'échauffement admissible du conducteur, on obtient une très simple formule:

$$r_{a1} = \frac{p_1 w_1}{p_N w} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_N} = B \quad (3.7)$$

ou ΔT_1 - échauffement du conducteur en K

ΔT_N - échauffement du raccord idéal en K

Utilisant la formule déterminante la résistance relative d'un raccord simple direct et homogène :

$$r = 1 + \frac{2}{c} \operatorname{cth} \frac{c}{2} \quad (3.8)$$

on obtient pour $\bar{r} = \bar{r}_{a1}$, et ensuite

$$c = c_{a1},$$

la relation :

$$B = 1 + \frac{2}{c_{a1}} \operatorname{cth} \frac{c_{a1}}{2} \quad (3.9)$$

Pour un raccord neuf on exige une résistance inférieure à la résistance admissible :

$$\bar{r} < \frac{\bar{r}_{a1}}{k_b}, \quad (3.10)$$

ou k_b - coefficient de sécurité (coefficient de vieillissement)

On obtient alors la relation :

$$\frac{\text{cth} \frac{c_{a1}}{2}}{c_{a1}} = \frac{1}{2} \left(\frac{B}{k_b} - 1 \right) \quad (3.11)$$

permettant de déterminer la valeur admissible du paramètre $c = c_{a1}$.

La figure 3.3 présente les courbes $c = f(B, k_b)$.

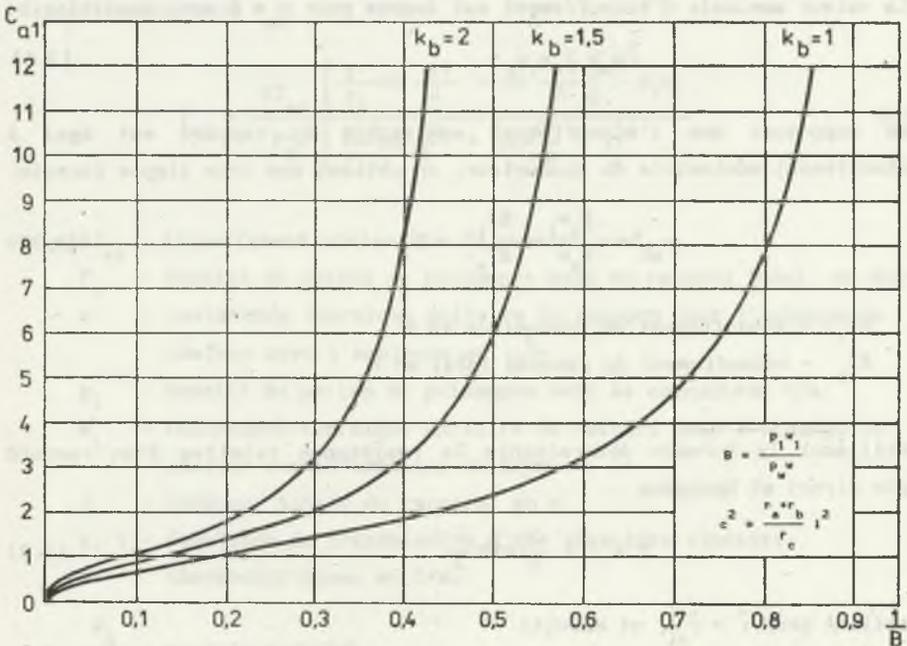


Fig.3.3. Paramètre c_{a1} d'un raccord homogène directe, avec le même échauffement que le conducteur, en fonction du paramètre B

Rys.3.3. Parametr c_{a1} złącza zgodnego o tej samej temperaturze co przewód w zależności od parametru B

La relation (3.10), ou les courbes figure 3.3 permettent de:

- a) déterminer la résistance unitaire r_c du contact d'un raccord de la longueur l , avec les conditions thermiques déterminées par le paramètre B et les résistances de pièces de contact r_a, r_b .
- b) déterminer le longueur d'un raccord avec les paramètres r_a, r_b, r_c , et B déterminés.
- c) déterminer le paramètre B (qui dépend de dimensions transversales d'un raccord et des conducteurs) pour un raccord de longueur déterminée et la résistance de contact r_c déterminée.

Il est possible de donner les formules et courbes analogues pour les raccords inverses et aussi pour les raccords asymétriques, à la base de formules du chapitre 1, tableau 1.3.

3.3. CAPACITE DE VIEILLISSEMENT ET LA DUREE DE VIE D'UN RACCORD

B.Dalle a proposé [111] la définition suivante de la capacité de vieillissement d'un raccord:

$$k_v = 10 \log \frac{r_{ca}}{r_c}, \quad (3.12)$$

- où:
- r_{ca} est la résistance de contact admissible au point de vue de l'échauffement du raccord
 - r_c résistance de contact du raccord analysé.

Pour la détermination de la capacité de vieillissement de raccords de conducteur nus lignes aériennes on utilise (EdF) [112] le programmes spécialisés de calculs numériques.

Les relations analytiques du chapitre 2 permettent une détermination analytique de la valeur k_v .

Le document commun de B.Dalle et de l'auteur [111] donne la formule :

$$k_v = 10 \log \frac{c^2}{c_a^2}, \quad (3.13)$$

où c est critère d'analogie du raccord,

c_a est la valeur admissible c de point de vue de l'échauffement.

Le document [111] présente une méthode analytique de détermination de la capacité de vieillissement k_v , avec l'exemple de calcul.

Pour la charge durable d'un raccord on peut déterminer la valeur admissible du paramètre c :

$$c_a \longrightarrow c_{ad} \quad (3.14)$$

selon les courbes de la figure 3.3.

Valeur admissible c_{ad} correspond aux mêmes échauffements du raccord et des conducteurs.

Pour le cas de court-circuit on peut utiliser les mêmes courbes de la figure 3.3 pour la détermination de la valeur admissible du paramètre c :

$$c_a \longrightarrow c_{a2} \quad (3.15)$$

en calculant le paramètre B selon la formule :

$$B = \frac{P_1}{P_N} \frac{C}{C_1} \quad (3.16)$$

où C et C_1 sont les capacités thermiques du raccord et du conducteur de même longueur, en Ws/K .

La capacité de vieillissement k_v peut tenir compte de la température des contacts élémentaires. On peut calculer, la valeur du paramètre c pour laquelle les contacts élémentaires atteignent la température de recristallisation (pour la charge durable), ou la température de la fusion en cas de court-circuit.

Les formules analytiques et les programmes de calculs numériques (IUP RACCORD, P CONDUCTEUR, TEMP, TEMPC) sont ici applicables.

La capacité de vieillissement d'un raccord est alors déterminée par le plus fort de 4 critères :

1. échauffement durable du raccord pour le courant transité,
2. échauffement du raccord par le courant de court-circuit,
3. échauffement de contacts élémentaires pour le courant durable (température admissible de contacts correspondant à la recristallisation du matériau),
4. échauffement de contacts élémentaires pour le courant de court-circuit (température admissible de contacts élémentaires correspondant à la fusion du matériau).

La durée de vie d'un raccord est égale au temps pour lequel le raccord atteint :

$$k_v = 0 \quad (3.17)$$

En déterminant la fonction du vieillissement de contacts élémentaires :

$$r_c = f(r_{c0}, t, I, K_1, K_2 \dots) \quad (3.18)$$

- où r_{c0} - valeur initiale de la résistance de contacts élémentaires,
 t - temps,
 I - intensité du courant,
 K_1, K_2 - coefficients de l'influence extérieure

on peut calculer la durée de vie d'un raccord :

- par simulation numérique en cas général,
- pour les formules analytiques, si la fonction du vieillissement est analytique.

Les mesures laboratoires de vieillissement des raccords de conducteurs nus de lignes aériennes (EdF, ERMEL, Clamart) ont donné une formule générale (1980):

$$r_c \approx r_{c0} (1 + Kt^{1/3}) \quad (3.19)$$

- où t - temps en h,
 K - coefficient de vieillissement, tenant compte de conditions, des matériaux et de la température de contacts élémentaires.

Cette formule appliquée dans la formule de capacité de vieillissement donne les expressions analytiques :

$$k_v = 10 \log(1 + Kt^{1/3}) \quad (3.20)$$

$$t = 10^{(0,3k_v - 3 \log K)} \quad (3.21)$$

En prenant $k_v = 0$ pour $t = t_v$ on obtient :

$$t = 10^{-3 \log K} \quad (3.22)$$

CHAPITRE 4

RACCORDS DE LIGNES AERIENNES

4.1. INTRODUCTION

La connaissance de l'état électrique des raccords et la prévision de leur comportement dans le temps sont des aides à la décision appréciables dans le cas où on envisage le renouvellement d'une ligne aérienne ou la possibilité d'augmenter sa capacité de transit.

L'évolution des intensités transitées par les conducteurs nus des lignes aériennes a rendu plus aigu le problème d'échauffement des raccords. En effet, ces échauffements se traduisant par des températures relativement élevées entraînent une accélération de la vitesse d'oxydation et donc une augmentation des résistances de contact pouvant conduire à une dégradation et même à une détérioration complète du raccord.

L'existence de quelques raccords dégradés sur l'ensemble de la ligne constitue des points faibles qui diminuent globalement le niveau de sécurité et la fiabilité de la ligne. Selon l'état de dégradation des raccords la ligne peut ne plus répondre aux spécifications initiales de fonctionnement et on doit dans ce cas procéder à son déclassement pour la maintenir en exploitation sans une intervention d'entretien.

Dans le cas où le nombre de raccords dégradés et le niveau de dégradation sont importants, une opération de renouvellement est nécessaire si on veut conserver à la capacité de transit de la ligne. Mais le coût de remplacement d'un raccord ne se limite pas seulement au coût de manchonnage, mais inclut le coût d'indisponibilité d'une ligne qui peut être très élevé si cette indisponibilité se produit à une période de forte puissance appelée.

Il était donc important d'accorder aux problèmes d'échauffement des raccords une plus grande importance que dans le passé.

Il y a deux problèmes donc: vieillissement et durée de vie des raccords. Dans les deux cas, il est utile d'avoir une estimation de la durée de vie résiduelle des raccords dégradés pour des conditions de charge données.

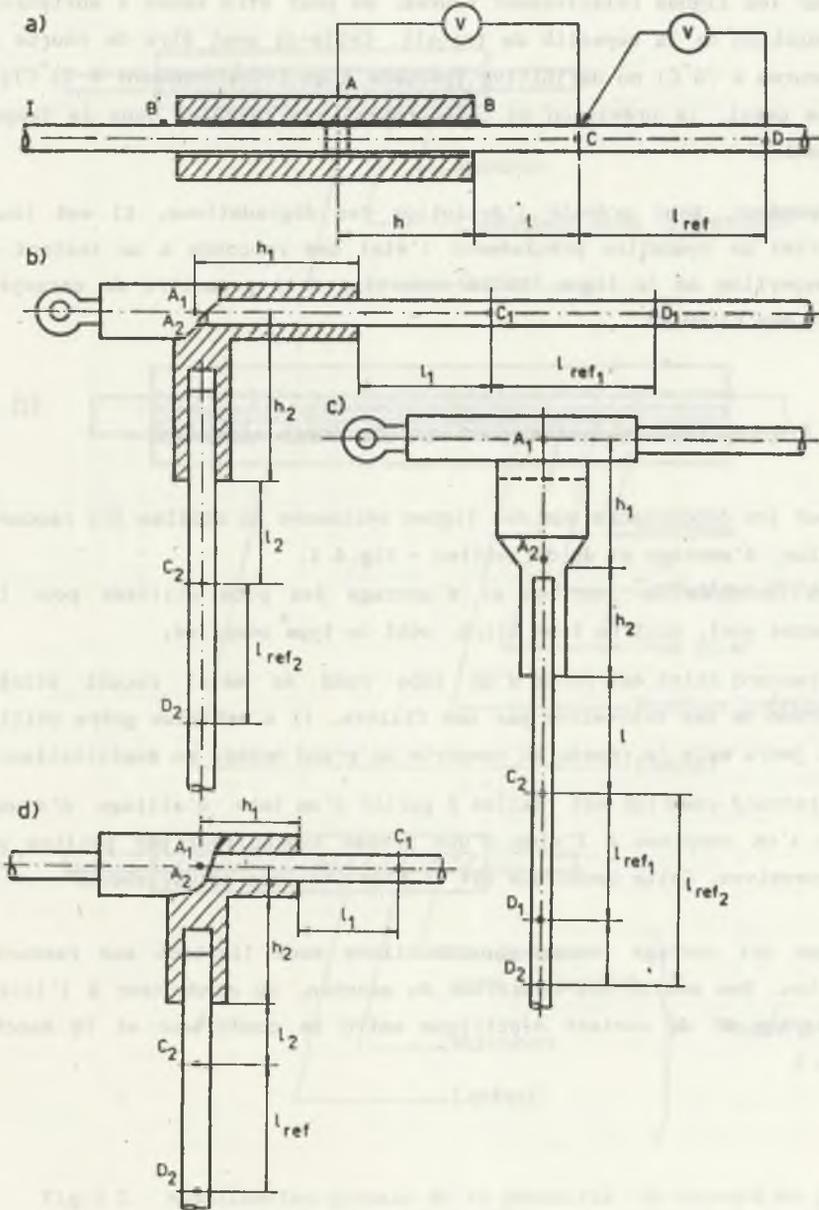


Fig. 4.1. Raccords de conducteurs nus des lignes aériennes, de jonction (a), d'ancrage (b et c) et de dérivation (d) et les points caractéristiques pour la mesure de la résistance

Rys. 4.1. Złącza przewodów gołych linii napowietrznych, przelotowe (a), kotwowe (b i c) i odgałęźne (d) i charakterystyczne punkty pomiaru rezystancji

Pour les lignes relativement neuves, on peut être amené à envisager une augmentation de la capacité de transit. Celle-ci peut être de courte durée (10 heures à 75°C) ou définitive (passage à un fonctionnement à 75°C). Dans ce cas aussi, la prévision du comportement des raccords dans le temps est nécessaire.

Cependant, pour prévoir l'évolution des dégradations, il est toujours essentiel de connaître précisément l'état des raccords à un instant donné par expertise de la ligne. Cette expertise doit permettre de caractériser l'état des raccords.

4.2. LES RACCORDS DE CONDUCTEURS NUS DES LIGNES AERIENNES

Pour les conducteurs nus des lignes aériennes on utilise les raccords de jonction, d'ancrage et de dérivation - fig.4.1.

Les raccords de jonction et d'ancrage les plus utilisés pour lignes aériennes sont, soit de type étiré, soit de type comprimé;

- le raccord étiré est formé d'un tube rond de métal recuit étiré sur chacune de ses extrémités par une filière. Il n'est plus guère utilisé de nos jours mais le réseau en comporte un grand nombre en exploitation.
- le raccord comprimé est réalisé à partir d'un tube d'alliage d'aluminium que l'on comprime à l'aide d'une presse hydraulique par petites passes successives. Cette technique est la plus utilisée actuellement.

Dans cet ouvrage toutes considérations sont limitées aux raccords de jonction. Son modèle est constitué du manchon, du conducteur à l'intérieur du manchon et du contact électrique entre le conducteur et le manchon - fig.4.2.

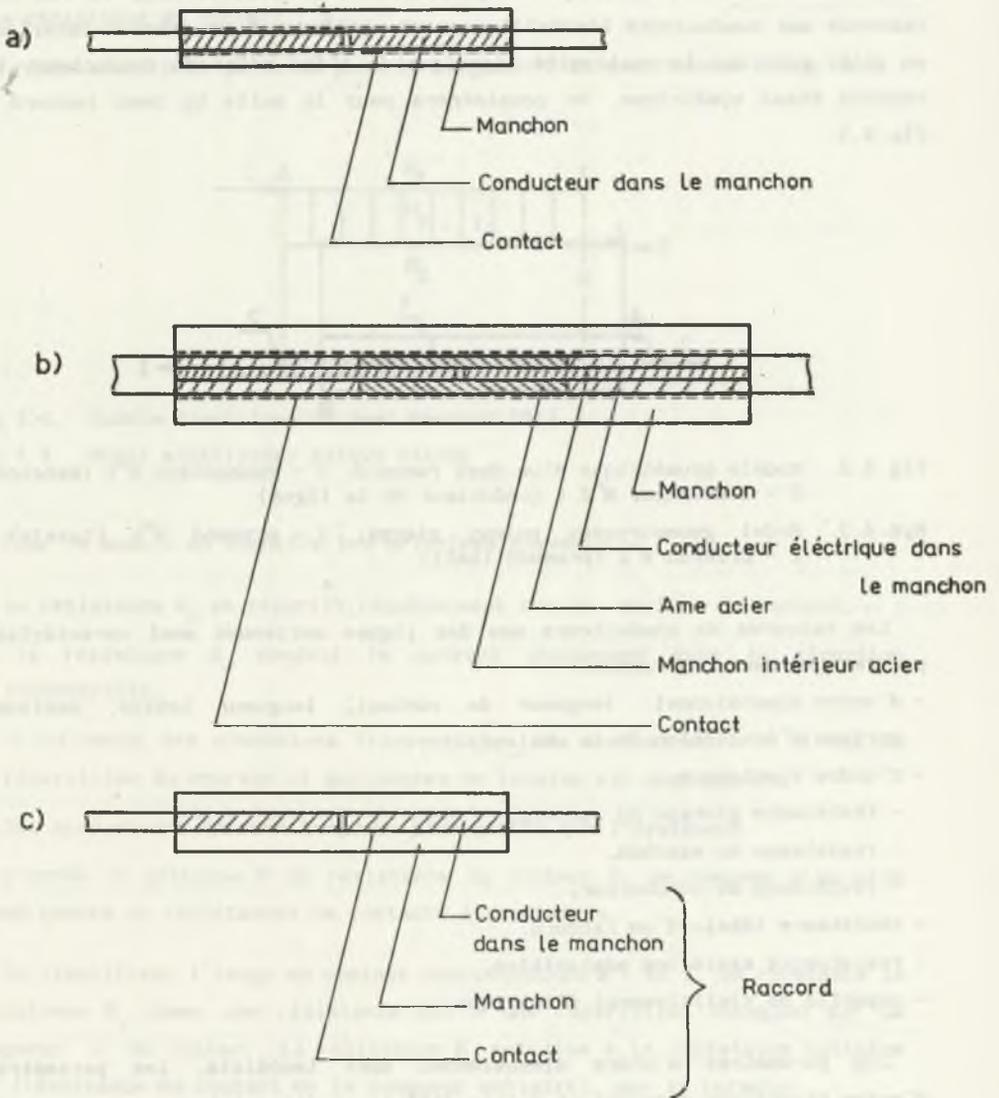


Fig. 4.2. Modélisation globale de la géométrie du raccord de jonction; a) - raccord sur conducteur homogène (étiré ou comprimé), b) - raccord sur conducteur bimétallique (étiré ou comprimé), c) - modèle global de la géométrie du raccord

Rys. 4.2. Układy geometrii złączy przelotowych; a) - złącze na przewodzie jednorodnym (przeciągane lub zaprasowane), b) - złącze na przewodzie bimetalowym (przeciągane lub zaprasowane), c) - model ogólny geometrii złącza

Cette description est exacte pour les raccords sur conducteurs homogènes. Elle constitue une simplification parfaitement admissible dans le cas des raccords sur conducteurs bimétalliques qui contiennent un manchon intérieur en acier assurant la continuité mécanique de l'âme acier du conducteur. Le raccord étant symétrique, on considèrera pour la suite un demi raccord - fig.4.3.

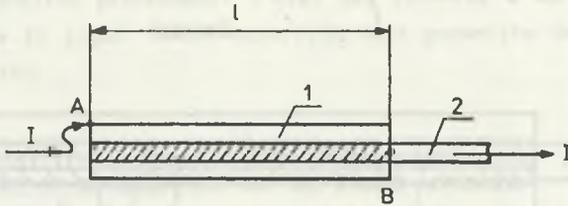


Fig.4.3. Modèle géométrique d'un demi raccord; 1 - conducteur N°1 (manchon), 2 - conducteur N°2 (conducteur de la ligne)

Rys.4.3. Model geometryczny połowy złącza; 1 - przewód N°1 (tuleja), 2 - przewód N°2 (przewód linii)

Les raccords de conducteurs nus des lignes aériennes sont caractérisés par les grandeurs suivantes:

- d'ordre dimensionnel: longueur de contact, longueur totale, section, surface d'évacuation de la chaleur,
- d'ordre électrique:
 - résistance globale du raccord,
 - résistance du manchon,
 - résistance du conducteur,
- résistance idéale d'un raccord,
- résistances maximales admissibles,
- capacité de vieillissement électrique.

Les paramètres d'ordre dimensionnel sont immédiats, les paramètres d'ordre électrique nécessitent d'être définis et déterminés.

4.3. MODELE ELECTRIQUE DU RACCORD

Le modèle géométrique proposé conduit à distinguer trois résistances caractéristiques d'un demi raccord:

- la résistance du manchon : R_1 ,
- la résistance du conducteur dans le manchon : R_2 ,
- la résistance du contact : R_c .

Ces résistances sont définies pour la longueur l du demiraccord - fig. 4.4.

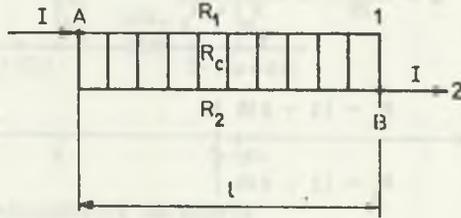


Fig.4.4. Modèle électrique du demi raccord [51]

Rys.4.4. Model elektryczny połowy złącza

Pour le modèle on admettra les principes suivants:

- la résistance R_c se répartit régulièrement sur la surface du contact,
- la résistance R_c conduit le courant uniquement dans la direction transversale,
- l'influence des dimensions transversales des conducteur 1 et 2 sur la répartition du courant et des chutes de tension est négligeable,
- les conducteurs ont une longueur plus grande que l'épaisseur.

D'après le principe b la résistance du contact R_c se compose d'un très grand nombre de résistances de contacts élémentaires.

En simplifiant l'image du contact des conducteurs 1 et 2, on considère la résistance R_c comme une résistance qui a une répartition homogène sur la longueur l du contact. La résistance R_c est liée à la résistance unitaire R_{c1} (résistance du contact de la longueur unitaire), par la formule:

$$R_c = \frac{R_{c1}}{l} \quad (4.1)$$

En changeant la longueur du contact $l' = kl$ on obtient la résistance R'_c :

$$R'_c = \frac{R_{c1}}{l'} = \frac{R_c}{k} \quad (4.2)$$

On définit la résistance moyenne R des conducteurs 1 et 2 et le paramètre sans dimensionnel Δ :

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (4.3)$$

$$\Delta = \frac{R_1 - R_2}{2R} = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.4)$$

On obtient alors:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= (1 + \Delta)R \\ R_2 &= (1 - \Delta)R \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

On détermine la résistance R_c par le paramètre sans dimensionnel C :

$$C^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_c} = \frac{2R}{R_c} \quad (4.6)$$

L'analyse du modèle est faite en relation avec le schéma de la figure 4.5 qui définit les grandeurs utilisées. le courant transité est pris égal à $2I$ pour simplifier l'écriture des relations.

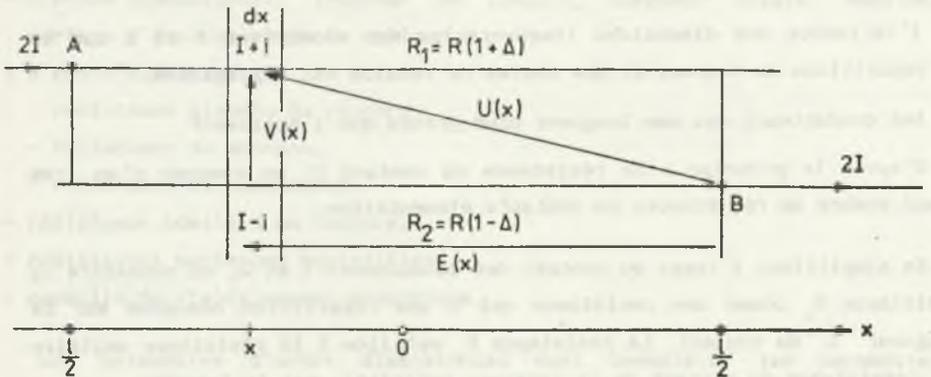


Fig.4.5. Modèle mathématique de raccord d'après J.Hus [51]

Rys.4.5. Model matematyczny złącza według J.Hus [51]

L'étude d'une "tranche" du modèle conduit à l'écriture de l'équation différentielle qui régit le comportement électrique du raccord modélisé (figure 4.6).

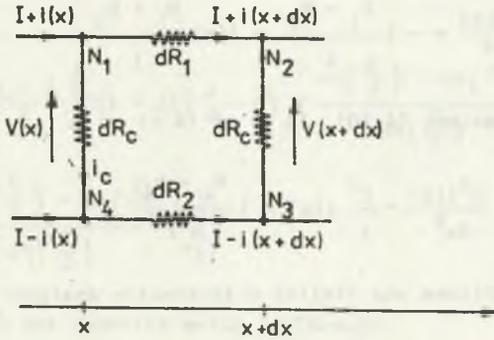


Fig.4.6. "Tranche" élémentaire du modèle

Rys.4.6. Odcinek elementarny modelu

Pour la "tranche" élémentaire, en longueur dx on a les trois résistances différentielles:

$$\left. \begin{aligned} dR_1 &= R_1 \frac{dx}{l} \\ dR_2 &= R_2 \frac{dx}{l} \\ dR_c &= R_c \frac{1}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Pour les résistances élémentaires dR_c il faut remarquer qu'elles soient en parallèle.

Le courant qui passe en direction transversale sur une longueur dx détermine la relation:

$$\left. \begin{aligned} di &= \frac{V(x)}{dR_c} = -\frac{V(x)}{R_c l} dx \\ \frac{di}{dx} &= -\frac{V(x)}{R_c l} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

$$\frac{d^2 i}{dx^2} = -\frac{1}{R_c l} \frac{dV(x)}{dx} \quad (4.9)$$

La tension $V(x)$ en longueur dx est déterminée par la différence des chutes de tension aux conducteurs 1 et 2 en longueur dx :

$$dV(x) = -(I + i)dR_1 + (I - i)dR_2$$

En utilisant les formules (4.5) on obtient:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -I \frac{R_1 - R_2}{1} - i(x) \frac{R_1 + R_2}{1} \quad (4.10)$$

D'après les expressions (4.10), (4.9) et (4.6) on a:

$$\frac{d^2 i(x)}{dx^2} - \frac{C^2}{1} i(x) = I \frac{R_1 - R_2}{R_1^2} \quad (4.11)$$

On prend les conditions aux limites d'intervalle analysé:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{ pour } x = \frac{1}{2} \quad I + i = 2I, \quad i = I \\ - \text{ pour } x = \frac{1}{2} \quad I + i = 0 \quad i = -I \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

En prenant la relation (4.4) et les conditions (4.12) on obtient la solution pour (4.11):

$$i(x) = I \left[-\frac{\text{sh}\left(\frac{Cx}{1}\right)}{\text{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} + \frac{\Delta \text{ch}\left(\frac{Cx}{1}\right)}{\text{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} - \Delta \right] \quad (4.13)$$

$$\frac{di(x)}{dx} = \frac{IC}{1} \left[-\frac{\text{ch}\left(\frac{Cx}{1}\right)}{\text{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} + \frac{\Delta \text{sh}\left(\frac{Cx}{1}\right)}{\text{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} \right] \quad (4.14)$$

On peut alors écrire l'expression pour la tension V(x):

$$V(x) = IR_e C \left[\frac{\text{ch}\left(\frac{Cx}{1}\right)}{\text{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} - \frac{\Delta \text{sh}\left(\frac{Cx}{1}\right)}{\text{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} \right] \quad (4.15)$$

La chute de tension le long du conducteur E(x) est déterminée par l'équation intégrale:

$$E(x) = \int_x^{\frac{1}{2}} [I - i(x)] dR_2 = \int_x^{\frac{1}{2}} [I - i(x)] \frac{1 - \Delta}{1} R dx \quad (4.16)$$

Avec les formules (4.13) et (4.6), l'expression pour $E(x)$ est la suivante:

$$E(x) = IR_c C \left\{ \frac{1-\Delta}{2} \left[C(1+\Delta) \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l} \right) + \frac{\text{ch}\left(\frac{C}{2}\right) - \text{ch}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\text{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} - \Delta \frac{\text{sh}\left(\frac{C}{2}\right) - \text{sh}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\text{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} \right] \right\} \quad (4.17)$$

La tension $U(x)$ est répartie selon la formule:

$$U(x) = V(x) + E(x) \quad (4.18)$$

En utilisant les relations (4.13) et (4.17) on obtient:

$$U(x) = IR_c C \left\{ \frac{1+\Delta}{2} \left[\frac{\text{ch}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\text{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} - \frac{\Delta \text{sh}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\text{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} \right] + \frac{1-\Delta}{2} \left[C(1+\Delta) \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l} \right) + \text{cth}\left(\frac{C}{2}\right) - \Delta^2 \text{th}\left(\frac{C}{2}\right) \right] \right\} \quad (4.19)$$

La tension totale entre les points A et B est déterminée par (4.19), en prenant $x = -\frac{l}{2}$:

$$U_{AB} = IR_c C \left[C \frac{1-\Delta^2}{2} + \Delta^2 \text{th}\left(\frac{C}{2}\right) + \text{cth}\left(\frac{C}{2}\right) \right] \quad (4.20)$$

La résistance totale d'un raccord (entre les points A et B):

$$R_{AB} = \frac{U_{AB}}{2I} = \frac{R_c \cdot C}{2} \left[C \frac{1-\Delta^2}{2} + \Delta^2 \text{th}\left(\frac{C}{2}\right) + \text{cth}\left(\frac{C}{2}\right) \right] \quad (4.21)$$

Cette résistance est rapportée à la résistance du raccord idéal dont la résistance de contact entre le manchon et le conducteur est nulle.

La résistance du demi raccord idéal R_N peut être déduite de (4.21) en faisant tendre R_c vers zero. Apres avoir fait le calcul on obtient donc:

$$R_N = \lim_{R_c \rightarrow 0} R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.22)$$

On retrouve ainsi le fait que dans le raccord idéal, le manchon et le conducteur sont en parallèle.

Utilisant les relations (4.4) et (4.6) on obtient:

$$R_N = \frac{R_c C^2}{4} (1 - \Delta^2) \quad (4.23)$$

L'expression de R_c en fonction de R_N , Δ et C est donnée par (4.23):

$$R_c = \frac{4R_N}{C^2(1 - \Delta^2)} \quad (4.24)$$

La résistance totale d'un raccord peut être alors exprimée de façon suivante:

$$R_{AB} = \frac{2R_N}{C(1 - \Delta^2)} \left[C \frac{1 - \Delta^2}{2} + \Delta^2 \operatorname{th} \left(\frac{C}{2} \right) + \operatorname{cth} \left(\frac{C}{2} \right) \right] \quad (4.25)$$

La résistance relative du raccord est définie comme un rapport de la résistance totale du raccord analysé et la résistance du raccord idéal. On obtient alors:

$$\bar{r} = \frac{R_{AB}}{R_N} = 1 + \frac{2}{C(1 - \Delta^2)} \left[\operatorname{cth} \left(\frac{C}{2} \right) + \Delta^2 \operatorname{th} \left(\frac{C}{2} \right) \right] \quad (4.26)$$

Cette résistance relative prend les valeurs:

$$\begin{aligned} \bar{r} &= 1 && \text{pour} && R_c = 0 \\ \bar{r} &\rightarrow \infty && \text{pour} && R_c \rightarrow \infty \end{aligned}$$

L'expression (4.19) de la chute de tension $V(x)$ dans le demi raccord devient alors:

$$U(x) = \frac{4R_N}{C(1 - \Delta^2)} I \left[\frac{1 + \Delta}{2} [\dots] + \frac{1 - \Delta}{2} [\dots] \right] \quad (4.27)$$

Le demi raccord de jonction est caractérisé électriquement par la donnée de l'un des triplets (R_1, R_2, R_c) ou (R_N, Δ, C) . La seconde description est préférable vis-à-vis de l'utilisation du modèle proposé.

En rapportant le courant $i(x)$ donné par l'expression (4.13) au courant I et la tension $U(x)$ - formule (4.19) à la tension U_{AB} - donnée par l'expression (4.20) on peut déterminer la répartition du courant (figure 4.7) et de la chute de tension (figure 4.8) en fonction de la longueur relative x/l du raccord;

$$\frac{i(x)}{I} = -\frac{\operatorname{sh}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} + \left(\frac{\operatorname{ch}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} - 1\right) \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{U(x)}{U_{AB}} = & \left[\frac{C}{2}(1-\Delta^2) + \Delta^2 \operatorname{th}\left(\frac{C}{2}\right) + \operatorname{cth}\left(\frac{C}{2}\right) \right]^{-1} \left\{ \frac{1+\Delta}{2} \left[\frac{\operatorname{ch}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{C}{2}\right)} - \frac{\Delta \operatorname{sh}\left(\frac{Cx}{l}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{C}{2}\right)} \right] + \right. \\ & \left. + \frac{1-\Delta}{2} \left[C(1+\Delta) \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l} \right) + \operatorname{cth}\left(\frac{C}{2}\right) + \Delta^2 \operatorname{th}\left(\frac{C}{2}\right) \right] \right\} \quad (4.29) \end{aligned}$$

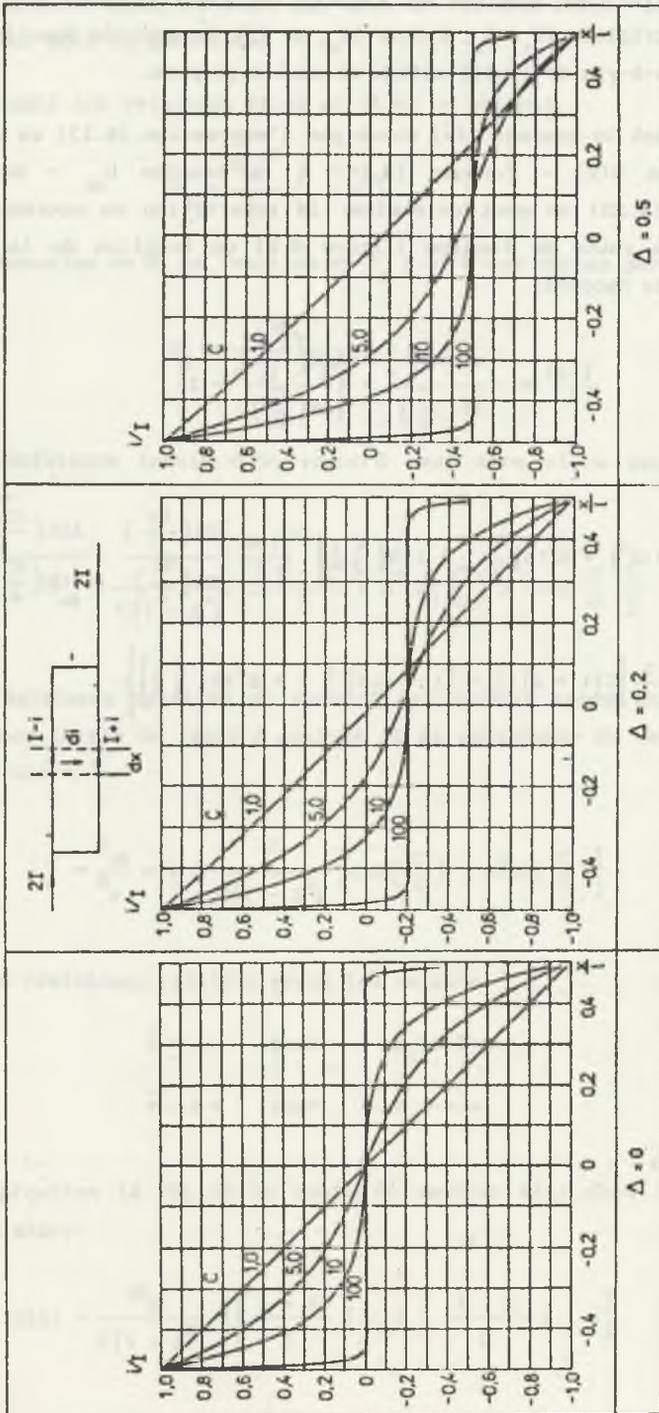


Fig.4.7. La répartition du courant dans un raccord; X - coordonnée,
 l - longueur du modèle, C, Δ - paramètres sans dimension du raccord
 Rys.4.7. Rozkład prądu w złączu; X - współrzędna, l - długość modelu,
 C, Δ - bezwymiarowe parametry modelu

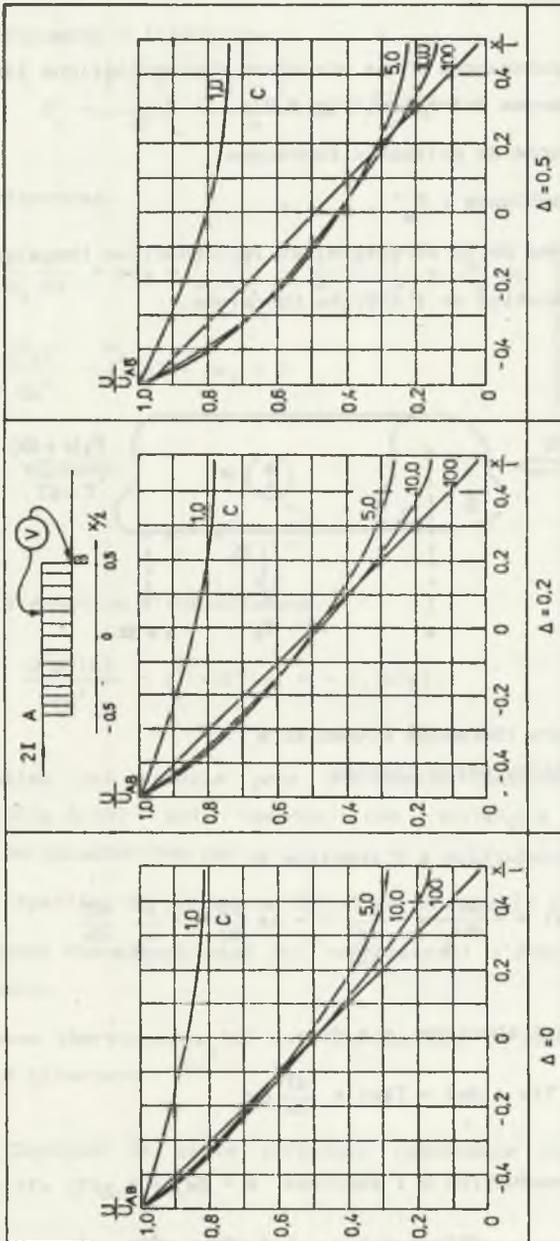


Fig. 4.8. La répartition de la chute de tension le long du modèle d'un raccord; X - coordonnée, l - longueur du modèle, C, Δ - paramètres sans dimension du raccord

Rys. 4.8. Rozkład spadku napięcia wzdłuż modelu złącza; X - współrzędna, l - długość modelu, C, Δ - bezwymiarowe parametry złącza

4.4. L'ECHAUFFEMENT DE L'ENSEMBLE RACCORD - CONDUCTEUR DE LIGNES AERIENNES

4.4.1. Généralités

Le bilan des puissances d'une structure thermocinétique linéique prend en compte les puissances suivantes (Fig.4.9):

- de Joule P (source de puissance thermique),
- transmise à l'ambiance : P_a' ,
- transmise le long de la structure par la conduction thermique P_λ ,
- liée à l'accumulation de l'énergie thermique.

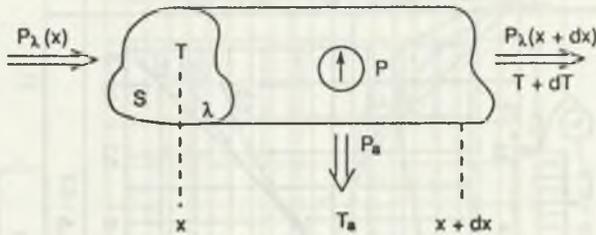


Fig.4.9. Structure thermique élémentaire

Rys.4.9. Elementarny układ cieplny

Puissance de conduction à l'abscisse x:

$$P_\lambda(x) = -\frac{dT}{dw_\lambda} = -\frac{dT}{dx} = -\lambda s \frac{dT}{dx} = -\frac{1}{w_\lambda} \frac{dT}{dx} \quad (4.30)$$

Echauffement à l'abscisse $x + dx$:

$$T(x + dx) = T(x) + \frac{dT}{dx} dx \quad (4.31)$$

Puissance de conduction à l'abscisse $x + dx$:

$$P_\lambda(x + dx) = -\frac{dT(x + dx)}{dw_\lambda} = -\frac{1}{w_\lambda} \left(\frac{dT}{dx} + \frac{d^2T}{dx^2} dx \right) \quad (4.32)$$

Puissance de Joule sur la longueur dx:

$$P = p dx \quad (4.33)$$

Puissance transmise à l'ambiance:

$$P_a = \frac{T - T_a}{\alpha F} = \frac{T - T_a}{w} dx = \frac{\Delta T}{w} dx \quad (4.34)$$

Bilan de puissances:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{w_\lambda} \frac{dT}{dx} + p dx &= \frac{1}{w_\lambda} \frac{dT}{dx} + \frac{1}{w_\lambda} \frac{d^2 \Delta T}{dx^2} + \frac{\Delta T}{w} dx \\ \frac{d^2 \Delta T}{dx^2} - \frac{w_\lambda}{w} \Delta T + p w_\lambda &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

En posant:

$$\gamma^2 = \frac{w_\lambda}{w} \quad (4.36)$$

on obtient l'équation d'échauffement:

$$\frac{d^2 \Delta T(x)}{dx^2} - \gamma^2(x) \Delta T(x) = - w_\lambda(x) p(x) \quad (4.37)$$

Cette équation est valable pour l'ensemble raccord de jonction - conducteurs (Fig.4.10) qui compose une structure thermocinétique unidimensionnelle caractérisée par:

- les sources réparties de puissance thermique de densité linéique $p(x)$;
- les résistances thermiques $w(x)$ qui représentent l'échange de puissance avec l'ambiance;
- les résistances thermiques $w_\lambda(x)$ qui représentent la conduction thermique le long de la structure.

Le modèle physique de cette structure représente une continuité de quadripôles actifs (Fig.4.10.b).

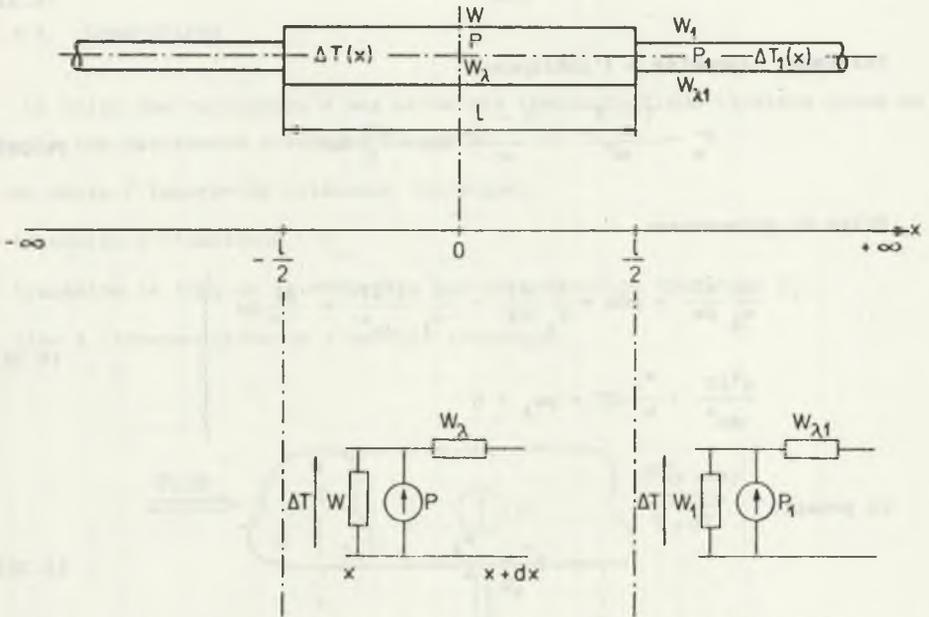


Fig. 4.10. Modèle physique de l'ensemble raccord - conducteurs

Rys. 4.10. Model fizyczny zespołu złącze - przewody

L'équation (4.37) représente le modèle mathématique général d'échauffement de l'ensemble raccord-conducteurs en régime stationnaire.

L'équation différentielle (4.37) possède une solution analytique générale

$$\Delta T(x) = pw + C_1 e^{-\gamma x} + C_2 e^{\gamma x} \quad (4.38)$$

dans les conditions particulières:

$$\left. \begin{aligned} p(x) = p; \quad \gamma(x) = \gamma, \quad \text{pour } x \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \\ p(x) = p_1; \quad \gamma(x) = \gamma_1 \quad \text{pour } x \in \left[-\infty, \frac{1}{2}\right] \text{ et } \left[+\infty, \frac{1}{2}\right] \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

Les conditions (4.39) correspondent au raccord symétrique et homogène du point de vue de la répartition des puissances et pour des conditions d'échange de puissance avec l'ambiance indépendantes du temps et de l'échauffement.

Les conditions aux limites sont:

$$\left. \begin{array}{l} x = -\infty \text{ et } x = +\infty \\ x = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Delta T(x) = p_1 w_1 \\ \frac{d\Delta T(x)}{dx} = 0 \end{array} \quad (4.40)$$

Solution analytique de l'équation (4.37) avec les conditions (4.39) et (4.40) pour $x \in [0, \frac{l}{2}]$ est la suivante:

$$\Delta T(x) = p w + (p_1 w_1 - p w) \frac{\operatorname{ch} \gamma x}{\frac{\gamma}{\gamma_1} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} \quad (4.41)$$

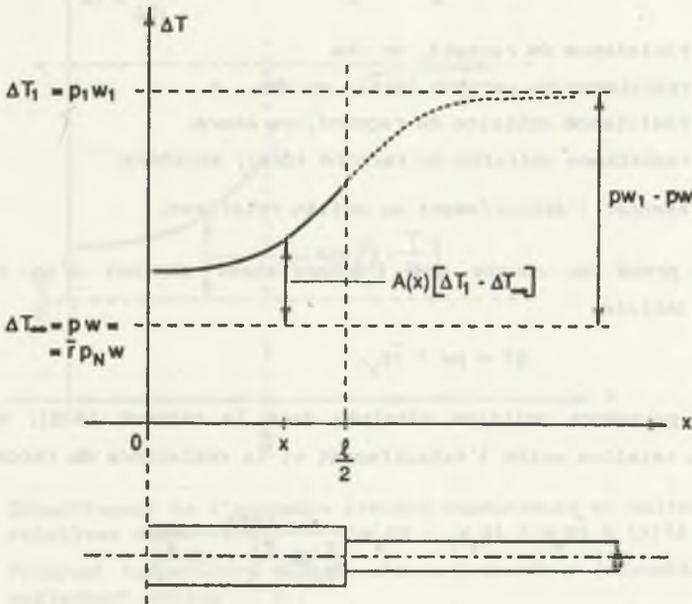


Fig. 4.11. Illustration de la répartition de l'échauffement le long de l'ensemble raccord-conducteurs selon la formule (4.41)

Rys. 4.11. Ilustracja rozkładu przyrostu temperatury wzdłuż zespołu złącze-przewody według wzoru (4.41)

Pour $x \in \left[\frac{1}{2}, \infty \right]$ on a:

$$\Delta T(x) = \Delta T\left(\frac{1}{2}\right) + \left[p_1 w_1 - \Delta T\left(\frac{1}{2}\right) \right] \left[1 - e^{-\gamma_1 \left(x - \frac{1}{2}\right)} \right] \quad (4.42)$$

où l'échauffement d'un raccord infiniment long (ou du raccord sans conducteurs):

$$pw = \Delta T_\infty \quad (4.43)$$

et l'échauffement du conducteur sans l'influence du raccord:

$$p_1 w_1 = \Delta T_1 \quad (4.44)$$

En introduisant la résistance relative du raccord

$$\bar{r} = \frac{R}{R_N} = \frac{r}{r_N} \quad (4.45)$$

où R - résistance du raccord, en ohm

R_N - résistance du raccord idéal, en ohm

r - résistance unitaire du raccord, en ohm/m

r_N - résistance unitaire du raccord idéal, en ohm/m

ou peut présenter l'échauffement en unités relatives.

Si on prend en compte que l'échauffement maximal d'un raccord de longueurs infinie:

$$\Delta T = pw = \bar{r} p_N w \quad (4.46)$$

où p_N - puissance unitaire dissipée dans le raccord idéal, en W/m, on obtient la relation entre l'échauffement et la résistance du raccord.

$$\Delta T(x) = \bar{r} p_N w + (p_1 w_1 - \bar{r} p_N w) \frac{\operatorname{ch} \gamma x}{\frac{\gamma}{\gamma_1} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} \quad (4.47)$$

Il est alors possible de présenter l'échauffement d'un raccord en unités relatives.

L'échauffement relatif $\bar{\Delta T}(x)$ est définie par le rapport:

$$\bar{\Delta T}(x) = \frac{\Delta T(x)}{\Delta T_1} \quad (4.48)$$

En définissant le paramètre B de similitude thermique pour l'ensemble raccord-conducteurs homogènes:

$$B = \frac{p_1 w_1}{p_N w} \quad (4.49)$$

et la fonction de la répartition A(x):

$$A(x) = \frac{\text{ch} \gamma x}{\frac{\gamma}{\gamma_1} \text{sh} \frac{\gamma l}{2} + \text{ch} \frac{\gamma l}{2}} \quad (4.50)$$

on obtient la formule en unités relatives: pour $x \in [0, \frac{1}{2}]$:

$$\Delta \bar{T}(x) = \frac{\bar{r}}{B} [1 - A(x)] + A(x) \quad (4.51)$$

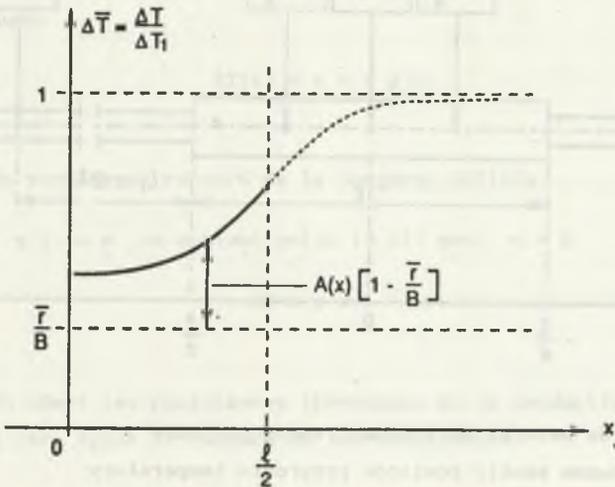


Fig. 4.12. Echauffement de l'ensemble raccord-conducteurs en unités relatives selon (4.51)

Rys. 4.12. Przyrost temperatury zespołu złącze-przewody w jednostkach względnych według (4.51)

En unités relatives, pour $x \in [\frac{1}{2}, \infty]$, on obtient:

$$\Delta \bar{T}(x) = \Delta \bar{T} \left(\frac{1}{2} \right) + \left[1 - \Delta \bar{T} \left(\frac{1}{2} \right) \right] \left[1 - e^{-\gamma_1 \left(x - \frac{1}{2} \right)} \right] \quad (4.52)$$

Il est possible de déterminer la résistance relative du raccord par des mesures de l'échauffement en 2 points de l'ensemble raccord-conducteurs (1 point sur le raccord et 1 point sur le conducteur éloigné du raccord):

$$\bar{r} = \frac{B [\Delta\bar{T}(x) - \Lambda(x)]}{1 - \Lambda(x)} \quad (4.53)$$

On propose d'admettre pour les mesures pratiques les points particuliers (Fig.4.13) sur un raccord:

$x = 0$ - milieu d'un raccord de jonction

$x = \frac{1}{4}$ - milieu d'un demi-raccord.

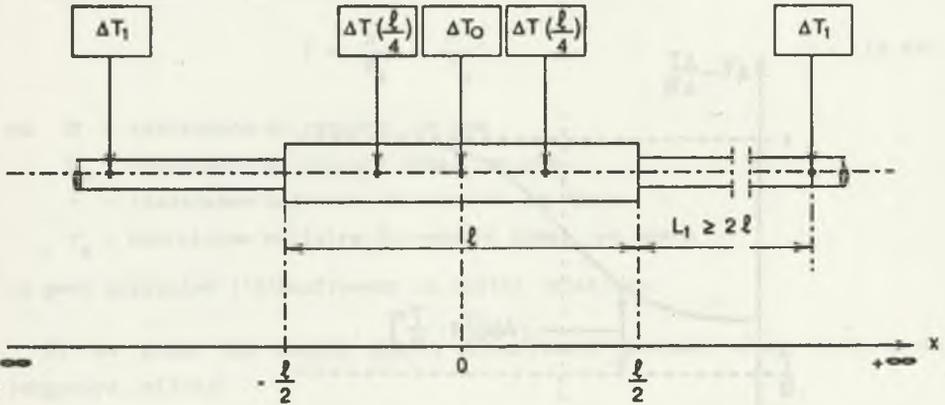


Fig.4.13. Points de mesures de l'échauffement proposés

Rys.4.13. Proponowane punkty pomiarów przyrostu temperatury

4.4.2. Vérifications des formules de calcul de l'échauffement de l'ensemble raccord-conducteurs

4.4.2.1. Vérification analytique

On a trouvé sept cas particuliers où les valeurs de l'échauffement sont connues. L'application de formules (4.41) et (4.52) pour ces cas particuliers représente une première vérification des formules mentionnées.

Cas 1: On néglige la conduction thermique le long de la structure composée par un raccord et les conducteurs:

Pour $w_{\lambda 1} \rightarrow \infty$, $w_1 \rightarrow \infty$, $\gamma \rightarrow \infty$, $\gamma_1 \rightarrow \infty$

on obtient:

par formule (4.41): $\Delta T(x) = p w$,

par formule (4.52): $\Delta T(x) = p_1 w_1$.

Cas 2: On suppose un raccord admissible qui a la même température que les conducteurs.

Pour $p w = p_1 w_1$ on obtient de (4.41) et (4.52) pour γ et γ_1 quelconques:

$$\Delta T(x) = p w = p_1 w_1$$

Cas 3: On suppose un raccord de la longueur infinie.

Pour $\gamma \rightarrow \infty$ on obtient selon (4.41) pour $x = 0$

$$\Delta T = p w$$

Cas 4: On admet les résistances thermiques de la conduction thermique égales à zéro (pour le raccord et les conducteurs.

On obtient de (4.41) et (4.52) pour $w_{\lambda} = w_{\lambda 1} = 0$ $\gamma = \gamma_1 = 0$

$$\Delta T(x) = p_1 w_1$$

Cas 5: Longueur du raccord égale à zéro.

Pour $\gamma = 0$ on obtient:

selon (4.41) pour $x = 0$: $\Delta T = p_1 w_1$,

selon (4.52): $\Delta T(x) = p_1 w_1$.

Cas 6: On néglige la conduction thermique dans le raccord.

Pour $w_1 \rightarrow \infty$, $\gamma = 0$, $\gamma_1/\gamma \rightarrow \infty$ on obtient:

selon (4.41): $\Delta T(x) = p w$,

selon (4.52): $\Delta T(x) = p_1 w_1$.

Cas 7: On admet la conductibilité thermique du raccord infinie et on néglige la conduction thermique du conducteur.

Pour $w_\lambda = 0$, $w_{\lambda_1} \rightarrow \infty$, $\gamma = 0$, $\gamma_1 \rightarrow \infty$, on obtient:

selon (4.41): $\Delta T(x) = p w$,

selon (4.52): $\Delta T(x) = p_1 w_1$.

On constate que les formules (4.41) et (4.52) donnent les résultats corrects pour les sept cas analysés.

4.4.2.2. Vérification expérimentale

On utilise pour la vérification des formules (4.41) et (4.52) les résultats de mesures de température du raccord étiré sur conducteurs Crocus 228.

Le tableau 4.1 présente les résultats des mesures de température pour une charge permanente 340A à $T_a = 18,8^\circ\text{C}$.

Tableau 4.1

Résultats de mesures

ELEMENT	x(m)	T(°C)	Echauffement relatif
RACCORD	0	32,8	0,50
	0,1	32,4	0,48
	0,2	32,5	0,49
	0,3	33,1	0,51
	0,35	33,9	0,54
	0,4	35,0	0,58
	0,45	34,6	0,57
CONDUCTEUR	0,5	37,6	0,67
	0,55	38,7	0,71
	0,6	40,4	0,77
	0,65	41,4	0,81
	0,7	42,3	0,84
	0,9	45,1	0,94
	1,1	46,1	0,97
	1,3	46,6	0,99
	1,5	46,7	1,0

La comparaison des mesures avec les calculs de l'échauffement selon les formules dérivées de (4.41) et (4.52) montre que le modèle simplifié est applicable aux raccords de conducteurs de lignes aériennes.

Raccord étiré - $D=29,5$ mm, $l=1,02$ m, $R=3,54 \mu\Omega$, $r=82,1 \mu\Omega/m$.

Conducteurs - Crocus 228, $r_1=157 \mu\Omega/m$ à 20°C .

Paramètres pour le calcul: $\bar{r} = 1,47$, $l = 1,02$ m, $B = 3,78$,
 $\gamma = 2,9$ 1/m, $\gamma_1 = 4,4$ 1/m.

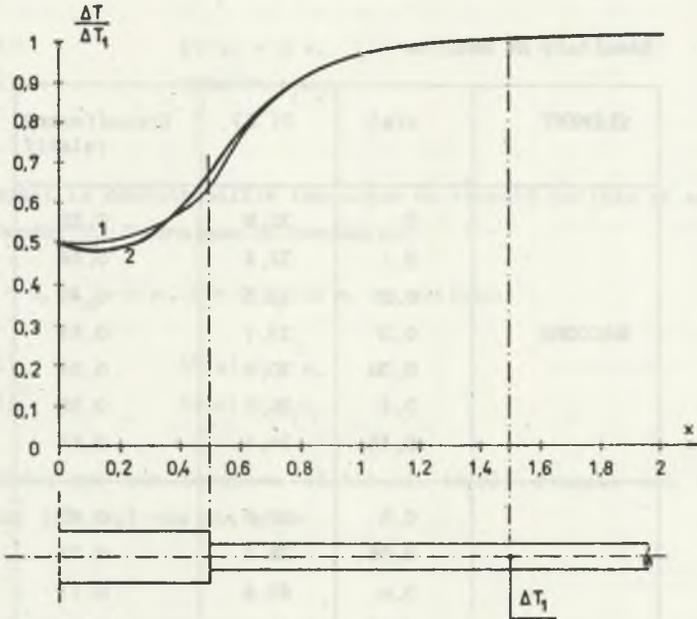


Fig. 4.14. Comparaison des échauffements mesurés et calculés selon la formule (4.41) et (4.52); 1 - calcul, 2 - mesure

Rys. 4.14. Porównanie zmierzonych przyrostów temperatury z obliczonymi według wzorów (4.41) i (4.52); 1 - obliczenie, 2 - pomiar

4.4.3. Méthode numérique de calcul de l'échauffement d'une structure thermocinetique unidimensionnelle

La solution numérique de l'équation différentielle (4.37) peut être obtenue par une méthode numérique classique, par exemple Runge-Kutty.

Le volume de calculs nécessaires est ici assez grand, surtout en prenant en compte les paramètres nonlinéaires de l'équation (4.37).

Une accélération des calculs est possible par l'application de la méthode numérique proposée ci-dessous.

a) Discrétisation de la structure thermocinetique.

On discrétise la structure thermocinetique analysée (Fig.4.9), en admettant n éléments (quadripôles) actifs au lieu de la structure continue (Fig. 4.15).

La longueur de la structure modélisée doit être limitée, par exemple $L \approx 9 l$ pour un raccord de conducteurs de ligne aérienne. Chaque partie des conducteurs non modélisée est remplacée par une source d'échauffement correspondante à l'échauffement d'un conducteur infiniment long. La structure modélisée a aux bords a et b des sources d'échauffement et des résistances thermiques.

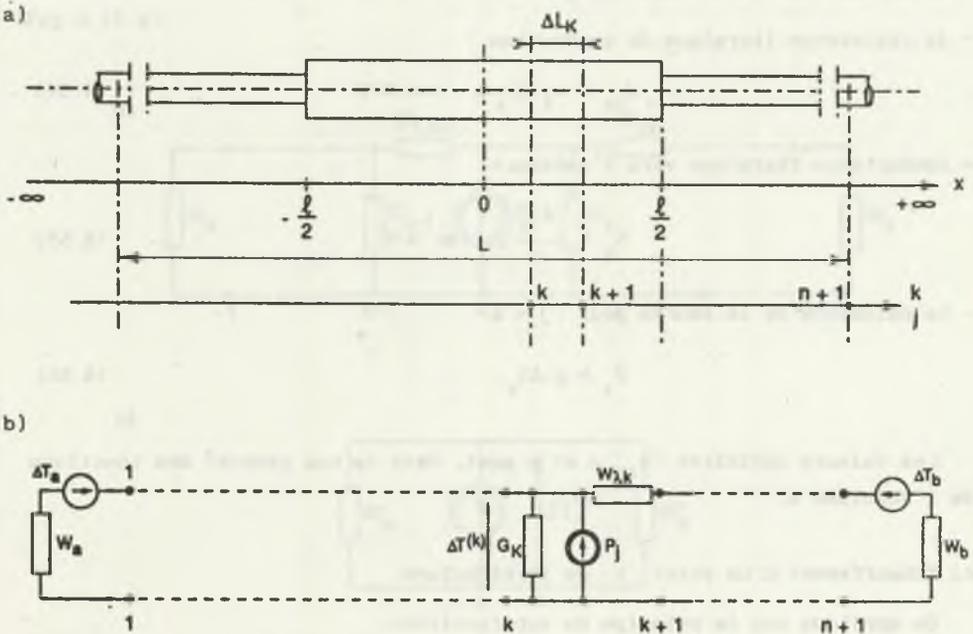


Fig. 4.15. Structure du modèle thermique de l'ensemble raccord-conducteurs; a) Structure physique, L - Longueur discrétisée, b) Structure équivalente discrète

Rys. 4.15. Budowa modelu cieplnego zespołu złącze-przewody; a) budowa fizyczna, L - długość dyskretyzowana, b) dyskretna budowa zastępcza

b) Paramètres d'un élément quelconque k .

Le pas k de discrétisation Δl_k est choisi soit constant pour toute la structure, soit variable (différent pour le raccord et les conducteurs par exemple).

Les paramètres d'un élément contiennent:

- l'indice j pour la source de puissance (P_j);
- l'indice k pour la résistance thermique et conductance thermique ($w_{\lambda k}, G_k$);
- l'exposant (k) pour l'échauffement d'un point k de la structure ($\Delta T^{(k)}$).

La distinction des indices et exposants est nécessaire pour l'organisation des calculs numériques.

L'élément k se caractérise par:

- la résistance thermique de conduction

$$w_{\lambda k} = w_{\lambda} \Delta l_k, \quad \text{en K/W} \quad (4.54)$$

- conductance thermique vers l'ambiance

$$G_k = \frac{\Delta l_k}{w}, \quad \text{en W/K} \quad (4.55)$$

- la puissance de la source pour $j = k$

$$P_j = p \Delta l_k \quad (4.56)$$

Les valeurs unitaires w_{λ} , w et p sont, dans le cas général des fonctions de l'abscisse x .

c) Echauffement d'un point k de la structure.

On applique ici le principe de superposition.

L'échauffement d'un point k quelconque, $\Delta T^{(k)}$ est provoqué par chaque source P_j de puissance et les deux sources de l'échauffement ($\Delta T_a, \Delta T_b$) aux bords de la structure:

$$\Delta T^{(k)} = \sum_{j=1}^n \Delta T_j^{(k)} + \Delta T_a^{(k)} + \Delta T_b^{(k)} \quad (4.57)$$

ou $\Delta T_j^{(k)}$ - l'échauffement d'un point k provoqué par la source de puissance P_j .

$\Delta T_a^{(k)}$ - l'échauffement d'un point k provoqué par la source ΔT_a ,

$\Delta T_b^{(k)}$ - l'échauffement d'un point k provoqué par la source ΔT_b .

La structure thermocinétique décomposée en n éléments discrets possède $n+1$ points caractéristiques. En appliquant la superposition on analyse alors $n+2$ structures, chacune avec une source unique (n sources de puissance P_j et 2 sources de température ΔT_a et ΔT_b).

d) Résistances équivalentes d'une structure vue de bornes de la source.

Les structures du côté gauche et droit d'une source sont passives (Fig.4.16.a) et il est possible de les remplacer par une résistance thermique équivalente. W' pour la partie et W'' pour la partie droite (Fig.4.16.b).

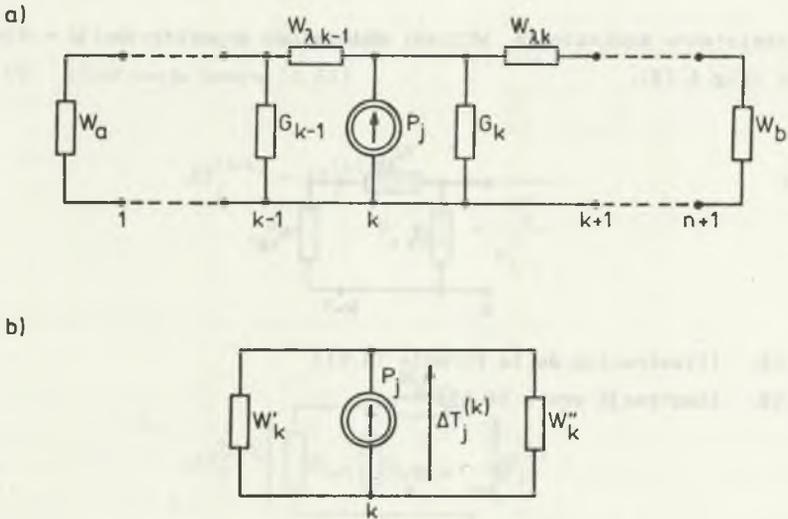


Fig.4.16. Structure avec une seule source P_j ; a) schéma complet, b) schéma équivalent

Rys.4.16. Układ z jednym źródłem P_j ; a) schemat całkowity, b) schemat zastępczy

La résistance équivalente W_k se calcule à partir de $k=1$. On a (Fig.4.17):

$$W'_1 = W_a \quad (4.58)$$

$$W'_{k+1} = W_{\lambda k} \frac{1}{1 + W'_k G_k} \quad (4.59)$$

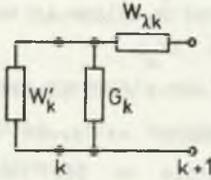


Fig.4.17. Illustration de la formule (4.59)

Rys.4.17. Ilustracja wzoru (4.59)

La résistance équivalente W'' est déterminée à partir de $k = n + 1$. On obtient (Fig.4.18):

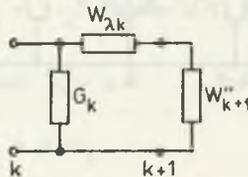


Fig.4.18. Illustration de la formule (4.61)

Rys.4.18. Ilustracja wzoru (4.61)

$$W''_{n+1} = W_b \tag{4.60}$$

et

$$W''_k = \frac{1}{G_k + \frac{1}{\frac{1}{W''_{k+1}} + W_{\lambda k}}} \tag{4.61}$$

e) Calcul de l'échauffement $\Delta T_j^{(k)}$ pour $j = k$.

L'échauffement en $k = j$ provoqué par la source P_j se calcule selon la formule (Fig.4.16.b)

$$\Delta T_j^{(k)} = P_j \frac{W'_k W''_k}{W'_k + W''_k} \tag{4.62}$$

f) Calcul de l'échauffement aux points voisins $k-1$ et $k+1$.

L'échauffement aux points voisins $(k - 1)$ et $(k + 1)$ se calcule à partir de l'échauffement du point k selon les formules (Fig.4.19 et 4.20).

$$\Delta T_j^{(k+1)} = \Delta T_j^{(k)} \frac{W''_{k+1}}{W''_{k+1} + W_{\lambda k}} \quad (4.63)$$

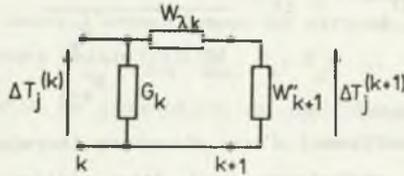


Fig. 4.19. Illustration de la formule (4.63)

Rys. 4.19. Ilustracja wzoru (4.63)

$$\Delta T_j^{(k-1)} = \Delta T_j^{(k)} \frac{1}{W'_k G_{k-1} + \frac{W'_k}{W'_{k-1}}} \quad (4.64)$$

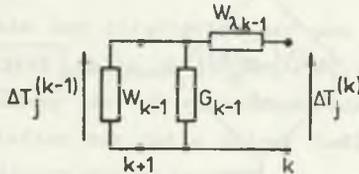


Fig. 4.20. illustration de la formule (4.64)

Rys. 4.20. Ilustracja wzoru (4.64)

g) Calcul de l'échauffement provoqué par les sources de température ΔT_a et ΔT_b .

La source ΔT_a provoque en $k = 1$ l'échauffement

$$\Delta T_a^{(1)} = \Delta T_a \frac{W'_1}{W''_1 + W_a} \quad (4.65)$$

En $k + 1$ on a l'échauffement

$$\Delta T_a^{(k+1)} = \Delta T_a^{(k)} \frac{W''_k}{W''_{k+1} + W_{\lambda k}} \quad (4.66)$$

Pour la source ΔT_b on obtient les formules:

$$\Delta T_b^{(n+1)} = \Delta T_b \frac{W'_{n+1}}{W'_{n+1} + W_b} \quad (4.67)$$

$$\Delta T_b^{(k-1)} = \Delta T_b^{(k)} \frac{1}{W'_k G_{k-1} + \frac{W'_k}{W'_{k-1}}} \quad (4.68)$$

Le calcul de l'échauffement d'une structure thermique qui peut modéliser le raccord avec les conducteurs peut être réalisé d'après l'algorithme "TEMP" - Fig.2.8 du Chapitre 2.

Prenant en considération le fait que les résistances thermiques dépendent de la température on utilise l'itération et on corrige les paramètres en fonction de l'échauffement selon l'organigramme "COR" - Fig.4.21.

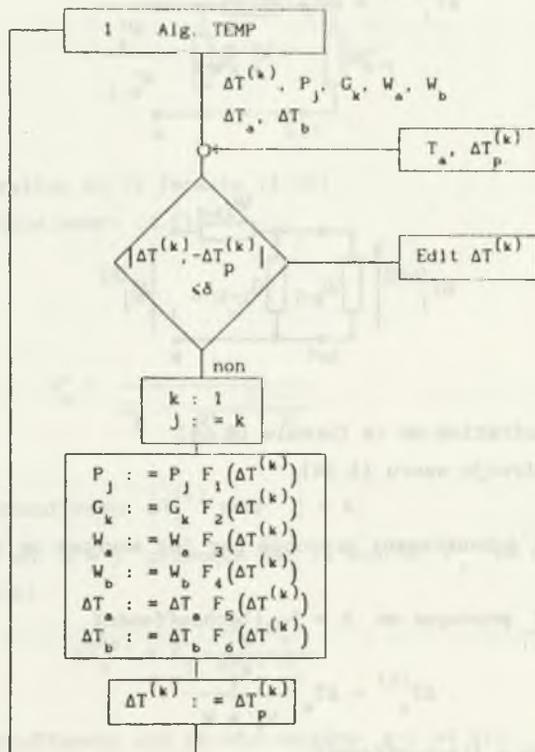


Fig. 4.21. Algorithme COR

Rys. 4.21. Alorytm COR

Pour chaque structure thermique analysée il est nécessaire de déterminer les fonctions de correction. En règle générale il est possible d'appliquer ici des fonctions du type:

$$F_1 = a_1 + k_1 \Delta T^{n_1} \quad (4.69)$$

Il faut déterminer aussi l'échauffement de référence $\Delta T_P^{(k)}$, pour lequel on a déterminé les valeurs initiales $W_{\lambda k}, P_k, P_j, \dots$

On sort de la boucle de correction en définissant la valeur δ , par exemple $\delta = 1 \text{ K}$.

Exemple d'une fonction de correction:

$$F_1(\Delta T) = 1 + \alpha_t (T_a + \Delta T - 20) \quad (4.70)$$

ou α_t - coefficient de changement de la résistance, en $1/\text{K}$,

T_a - Température ambiante, $^{\circ}\text{C}$,

20 - $^{\circ}\text{C}$, température de référence pour le calcul des résistances électriques.

4.5. RESISTANCE ADMISSIBLE D'UN RACCORD DE JONCTION

Le raccord admissible est caractérisé par une résistance telle que sa température soit égale à celle du conducteur en régime permanent. La connaissance de la valeur de la résistance admissible du raccord est primordiale en exploitation, car cette valeur indique un premier seuil de dégradation de l'état électrique du raccord.

On exige que la température du raccord ne dépasse pas la température des conducteurs raccordés (dans l'état thermique stationnaire et pour l'échauffement par le courant de court-circuit).

L'échauffement du raccord est lié aux pertes de l'énergie dans le raccord et aux conditions de dissipation de la chaleur produite.

Dans l'état stationnaire la répartition de la température le long du raccord et du conducteur dépend de la répartition des pertes de puissance et de résistances thermiques aux dissipations longitudinale et transversale de la chaleur.

Dans le plus simple modèle thermique du raccord on peut prendre le raccord comme un corps métallique homogène, avec une répartition homogène des pertes de puissance, connexe aux conducteurs C_1 et C_2 également homogènes (Fig. 4.9).

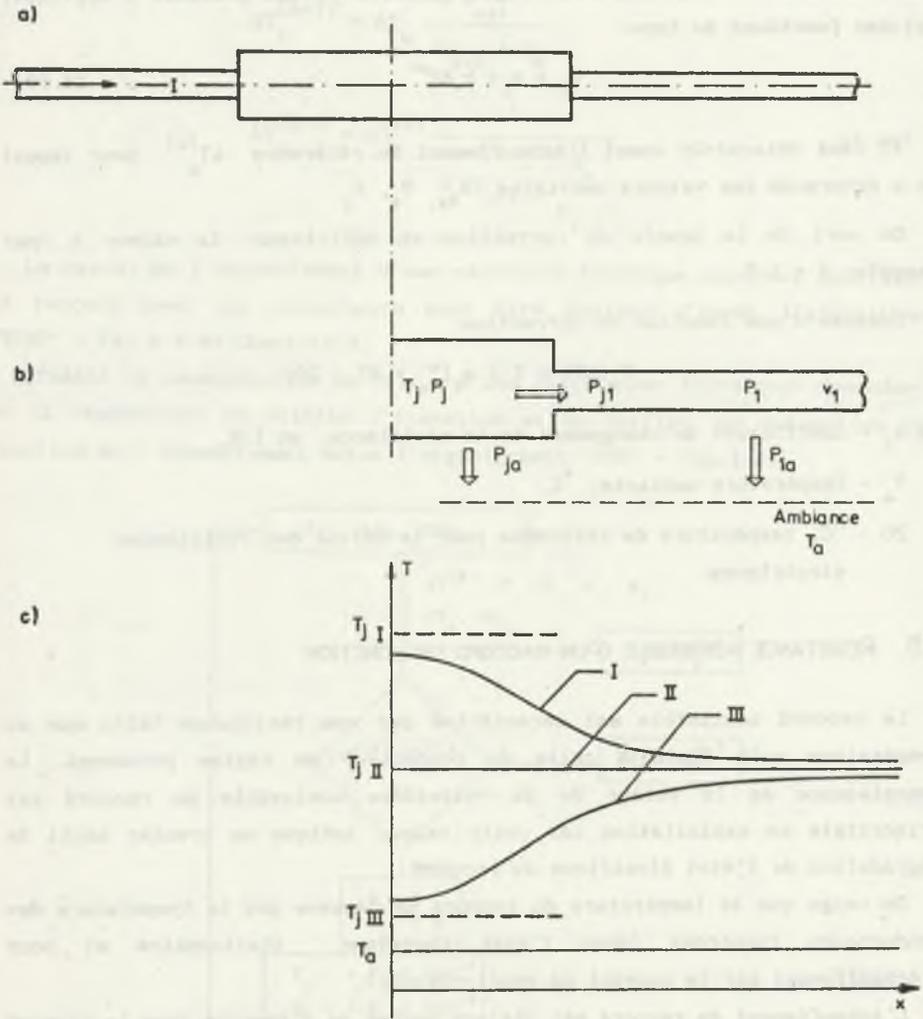


Fig. 4.22. Raccord de jonction; a) disposition, b) modèle thermique simple, c) répartition de températures le long du modèle symétrique en état stationnaire: I - raccord avec température maximale élevée, II - raccord à la même température T_1 que le conducteur, III - raccord avec température plus basse que T_1

Rys. 4.22. Złącze przelotowe; a) budowa, b) model cieplny, prosty, c) rozkład temperatury wzdłuż modelu symetrycznego w stanie ustalonym: I - złącze o zwiększonej temperaturze, II - złącze o tej samej temperaturze co przewód, III - złącze o temperaturze znacznie niższej niż T_1

En prenant comme conditions simplifiées:

- que la longueur des conducteurs est très grande,
- que leur température est la même,
- que l'émissité et le coefficient d'absorption du flux solaire sont identiques pour le raccord et le conducteur, on obtient un modèle thermique simple et symétrique du raccord.

4.5.1. Résistance relative admissible d'un raccord dans l'état thermique stationnaire

La température maximale admissible du raccord est celle que l'on obtient lorsque le raccord et les conducteurs sont à la même température T_1 . Dans ce cas, pour $T_j = T_1$ on peut écrire:

$$P_{j1} = 0, \quad P_j = P_{ja}, \quad P_1 = P_{1a} \quad (4.71)$$

L'échange de chaleur entre le raccord et l'ambiance et entre le conducteur et l'ambiance est déterminé par la loi d'Ohm, en utilisant la résistance thermique: W_j - pour le raccord, W_1 - pour le conducteur:

$$\left. \begin{aligned} T_j - T_a &= dP_j \, dW_j \\ T_1 - T_a &= dP_1 \, dW_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

En prenant:

$$W_j = \frac{1}{\alpha_j F_j}, \quad W_1 = \frac{1}{\alpha_1 F_1} \quad (4.73)$$

où: α_j, α_1 - les coefficients d'échange de chaleur pour le raccord et conducteur

F_j, F_1 - les surfaces du raccord et du conducteur.

On obtient pour $T_j = T_1$ les relations:

$$\begin{aligned} dP_j \, dW_j &= dP_1 \, dW_1 \\ I^2 \frac{R}{l} dx \frac{1}{\alpha_j \, dF_j} &= I^2 \frac{R_1}{l} dx \frac{1}{\alpha_1 \, dF_1} \end{aligned} \quad (4.74)$$

En prenant $dF_j = E_j dx$, $dF_1 = E_1 dx$ (4.75)

où E_j, E_1 - les périmètres de raccord et de conducteur on obtient la condition pour $T < T_1$:

$$\frac{R}{\alpha_j E_j} < \frac{R}{\alpha_1 E_1} \quad (4.76)$$

En divisant la dernière formule par R_N on obtient:

$$r_{ad} = \frac{\alpha_j E_j}{\alpha_1 E_1} \frac{R_1}{R_N} \quad (4.77)$$

La résistance admissible se calcule alors par

$$R_{ad} = R_1 \frac{E_j}{E_1} \quad (4.78)$$

Des bilans thermiques pour le raccord et le conducteur on peut calculer les échauffements respectifs par rapport à la température ambiante T_a [124]:

$$\Delta T_j = \frac{[(T_a + \Delta T_j - 273,15)\beta_j + 1] R I^2 + r_j \phi_s F_j}{E_j l \left[\frac{\sigma \epsilon_j (T_a + \Delta T_j)^4 - T_a^4}{\Delta T_j} + \frac{\lambda N_{uj}}{D_{hj}} \right]} \quad (4.79)$$

$$\Delta T_1 = \frac{[(T_a + \Delta T_1 - 273,15)\beta_1 + 1] R_1 I^2 + r_1 \phi_s F_1}{E_1 l \left[\frac{\sigma \epsilon_1 (T_a + \Delta T_1)^4 - T_a^4}{\Delta T_1} + \frac{\lambda N_{u1}}{D_{h1}} \right]} \quad (4.80)$$

où: β_j, β_1 - coefficients de température de la résistance, en K^{-1} ,

R, R_1 - résistances à $0^\circ C$, en Ω ,

r_j, r_1 - coefficients d'absorption du flux solaire, (sans dimension),

ϕ_s - flux solaire, en W/m^2 ,

F_j, F_1 - surface recevant le flux solaire, en m^2 ,

E_j, E_1 - périmètres, en m,

l - longueur considérée, en m,

σ - constance de Stefan-Boltzmann, en $Wm^{-2}K^{-4}$,

ϵ_j, ϵ_1 - émissivité, sans dimension,

λ - conductivité thermique de l'air, en $Wm^{-1}K^{-1}$,

N_{uj}, N_{u1} - nombre de Nusselt, sans dimension,

D_{hj}, D_{h1} - dimensions caractéristiques, en m.

Le calcul simplifié de la résistance est fait en égalant ΔT_1 et ΔT_2 sous les hypothèses suivantes:

- $\alpha_j = \alpha_1$,

- $\phi_s = 0$,

- $\epsilon_j = \epsilon_1$,

- $\frac{N_{uj}}{D_{hj}} = \frac{N_{u1}}{D_{h1}}$.

La seconde hypothèse se justifie par le fait que l'apport solaire est faible par rapport à la puissance dissipée par effet Joule. La dernière est valable pour des dimensions (diamètres) voisines entre le raccord et le conducteur.

Les hypothèses utilisées sont fortes mais permettent une estimation très simple de la valeur de la résistance admissible. Pour l'exemple traité (raccord de jonction sur ASTER 570 de longueur 957 mm) le calcul simplifié donne $R_{ad} = 87,0 \mu\Omega$ à comparer à une valeur moyenne de $71 \mu\Omega$ par un calcul précis.

La résistance admissible est une caractéristique intrinsèque de l'état de dégradation électrique du raccord. Le calcul précis de cette résistance montre que sa valeur est indépendante des conditions climatiques (flux solaire, température ambiante, vitesse du vent), des conditions d'échange thermique par rayonnement (émissivité, coefficient d'absorption) et de la température de fonctionnement de la ligne.

A titre d'exemple, les résultats sont présentés dans le tableau pour un raccord comprimé sur conducteur ASTER 570 de 957 mm de longueur [124].

Tableau 4.2

Résultats de calcul pour un raccord comprimé sur Aster 570
(2l = 957 mm) (d'après [124])

Rad ($\mu\Omega$)		Température de fonctionnement (°C)		
		60	75	90
Param. fixés	Temp. ambiante			
$\phi_s = 900 \text{ W/m}^2$	$T_a = 15^\circ\text{C}$	71,5	71,2	71,7
$\epsilon = 0,6$	$T_a = 20^\circ\text{C}$	71,3	71,6	72,0
$v = 1 \text{ m/s}$	$T_a = 30^\circ\text{C}$	70,8	71,2	72,0
Param. fixés	Flux solaire			
$T_a = 20^\circ\text{C}$	$\phi_s = 100 \text{ W/m}^2$	72,4	71,9	72,2
$\epsilon = 0,6$	$\phi_s = 500 \text{ W/m}^2$	72,0	72,3	72,2
$v = 1 \text{ m/s}$	$\phi_s = 900 \text{ W/m}^2$	71,3	71,6	72,0
Param. fixés	Emissivité			
$T_a = 20^\circ\text{C}$	$\epsilon = 0,3$	70,1	68,9	70,2
$\phi_s = 900 \text{ W/m}^2$	$\epsilon = 0,6$	71,3	71,6	72,0
$v = 1 \text{ m/s}$	$\epsilon = 0,9$	72,0	73,5	73,1
Param. fixés	Vitesse du vent			
$T_a = 20^\circ\text{C}$	Conv. naturelle	76,6	77,0	77,4
$\phi_s = 900 \text{ W/m}^2$	$v = 1 \text{ m/s}$	71,3	71,6	72,0
$\epsilon = 0,6$	$v = 3 \text{ m/s}$	70,1	70,1	70,2

On constate que la dispersion sur la valeur de la résistance admissible du raccord pour les différents cas de calcul est très faible ($< \pm 2\%$). Dans le cas de la convection naturelle, la valeur de la résistance admissible est plus grande que dans le cas de la convection forcée.

La régime de convection naturelle est donc moins défavorable pour le raccord que celui de convection forcée. On choisit donc ce dernier, pour définir la valeur de la résistance admissible.

Finalement, la résistance admissible d'un raccord de jonction est définie par l'égalité des températures du raccord et du conducteur pour des conditions d'échange par rayonnement identiques et en régime de convection forcée.

Le calcul simplifié, par les hypothèses formulées, ne donne qu'une estimation de la valeur de la résistance admissible. Cette estimation est néanmoins suffisante à des fins pratiques.

4.6. VIEILLISSEMENT DES RACCORDS DE CONDUCTEURS NUS DES LIGNES AERIENNE

4.6.1. Introduction

L'analyse initiale du vieillissement permet de cerner les processus généraux qui engendrent la dégradation des propriétés des raccords:

- relaxation des contraintes entre le manchon et le câble, d'où une diminution des forces au niveau des contacts élémentaires qui provoque l'accroissement de la résistance de contact;
- dégradation chimique des surfaces de contact du câble et du manchon par oxydation ou toute autre forme de corrosion.

En exploitation, la dégradation chimique des surfaces de contact liée à la température, l'humidité et la pollution atmosphérique, commence aux extrémités du manchon et progresse vers l'intérieur en fonction du temps.

La conjugaison de ces deux processus a pour conséquence la diminution de la surface réelle de contact électrique d'où une augmentation de l'échauffement du raccord susceptible d'atteindre la température de fusion de l'almélec ou de l'aluminium et provoquer le glissement du conducteur à l'intérieur du raccord monométallique puis sa chute.

Dans les raccords bimétalliques, au fur et à mesure de la destruction du contact électrique, une partie plus importante du courant passe par le câble et le manchon acier. L'échauffement du circuit acier (résistances de contact, plus résistance du métal) s'ajoute à l'échauffement du circuit électrique. En général, la partie conductrice du câble fond à l'extérieur du raccord, puis tout le courant passe par l'acier et le câble d'acier fond à son tour à l'extrémité du manchon d'acier.

4.6.2. Modèle global de vieillissement

L'oxydation - corrosion des contacts et la relaxation des contraintes dépendent respectivement de la température du point de contact et de la température du raccord. Pour satisfaire, à tout moment, l'hypothèse de répartition uniforme de la résistance de contact, il faut que les résistances des contacts évoluent toutes de la même façon. On a donc choisi de piloter la dégradation des contacts par la température à l'abscisse $l/2$ du raccord. On définit ainsi [126] un modèle global cohérent du vieillissement des raccord - figure 4.23.

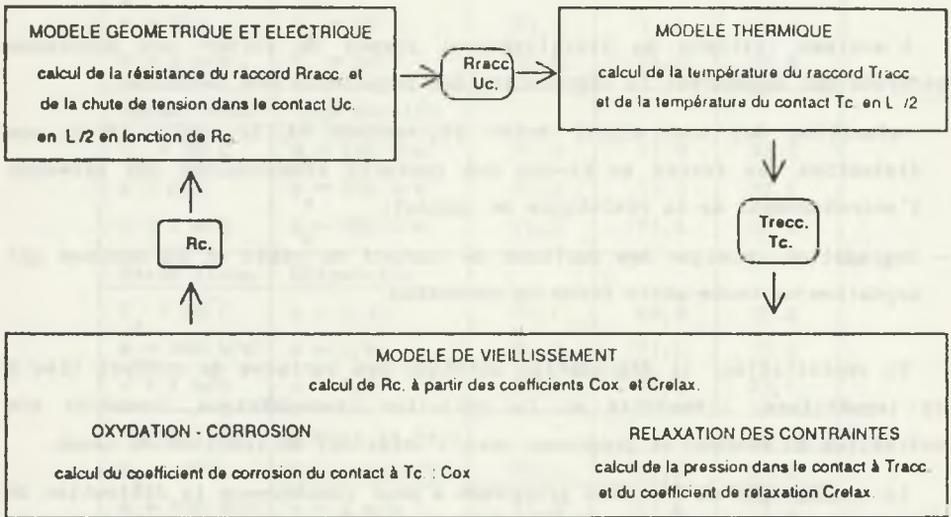


Fig. 4.23. Synoptique du modèle de vieillissement des raccords [126]

Rys. 4.23. Mnemotechniczny model starzenia złącz [126]

Les données à fournir sont les caractéristiques du raccord - longueur, diamètre, résistance électrique, âge -, le nom du conducteur - il en existe différents types et chaque conducteur a des caractéristiques particulières -, les conditions climatiques - vitesse du vent, flux solaire, température ambiante - et la charge de la ligne.

Par simulation, on obtient alors la température du conducteur et les évolutions sur la période souhaitée - de quelques mois à plusieurs dizaines d'années - de la température et de la résistance du raccord. Le jeu

"standard" de valeurs des paramètres du modèle a été validé expérimentalement par comparaison du vieillissement prévu et du vieillissement constaté de raccords prélevés sur une ligne en exploitation depuis des années.

A titre d'exemple sur les figures ci-dessous on présente quelques résultats obtenus par simulation.

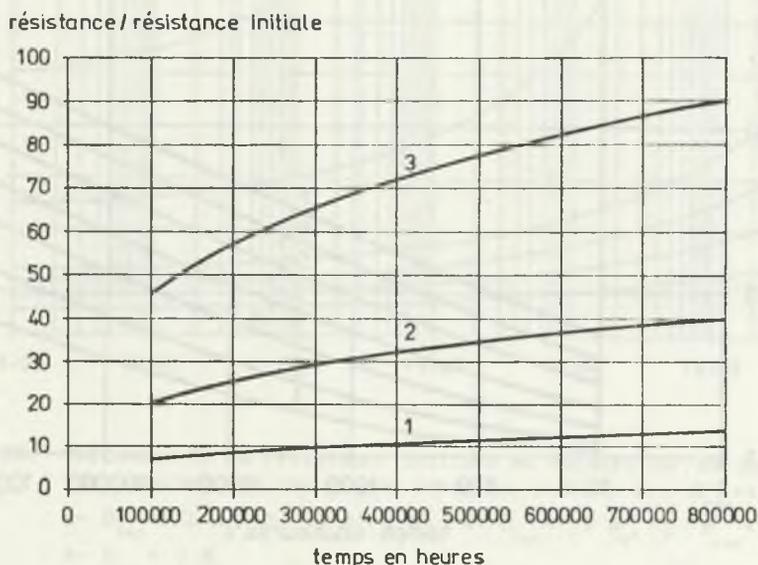


Fig. 4.24. Simulation des résultats d'essais de vieillissement de contacts neufs à 40°C, 75°C et 105°C pour $\alpha_c = 0,6$; $\beta_c = 2,8$; $w_c = 100 \text{ kJ/mole}$ avec $T_{ref} = 293,15 \text{ K}$ (d'après [125]); α_c et β_c sont des constantes sans dimension dependantes du milieu environnant; 1-T=40°C, 2-T=75°C, 3-T=105°C

Rys. 4.24. Symulacja wyników badań starzenia zestyków nowych w 40°C, 75°C i 105°C dla $\alpha_c = 0,6$; $\beta_c = 2,8$; $w_c = 100 \text{ kJ/mole}$ z $T_{odniesienia} = 293,15 \text{ K}$ (według [125]); α_c i β_c są bezwymiarowymi stałymi zależnymi od otaczającego środowiska; 1-T=40°C, 2-T=75°C, 3-T=105°C

résistance/résistance initiale

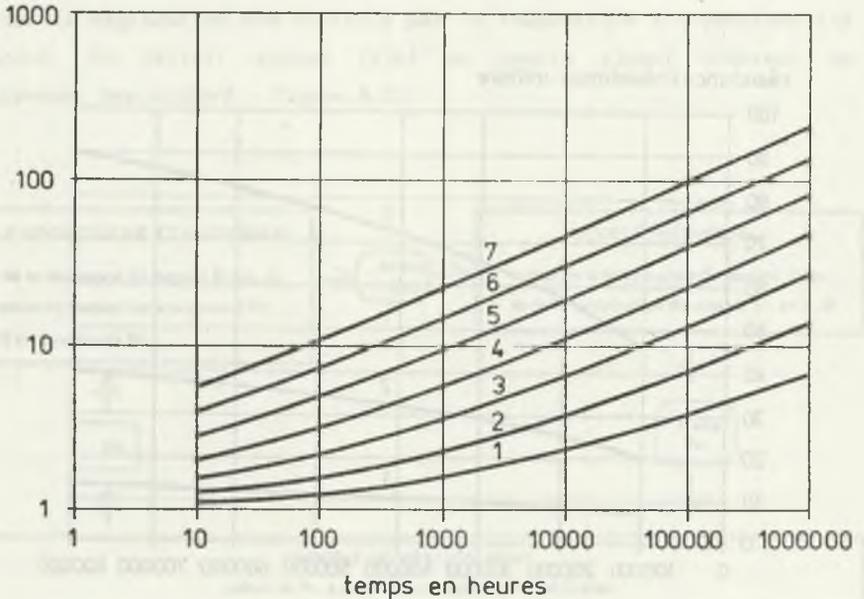


Fig. 4.25. Simulation de l'oxydation - corrosion des contacts électriques pour $\alpha_c = 0,6$; $\beta_c = 2,8$; $w_c = 100 \text{ kJ/mole}$ et $T_{ref} = 293,15 \text{ K}$ (d'après [125]); 1 - 20°C, 2 - 40°C, 3 - 60°C, 4 - 80°C, 5 - 100°C, 6 - 120°C, 7 - 140°C

Rys. 4.25. Symulacja utleniania - korozji styków elektrycznych dla $\alpha_c = 0,6$; $\beta_c = 2,8$; $w_c = 100 \text{ kJ/mole}$ i $T_{odniesienia} = 293,15 \text{ K}$ (według [125]); 1 - 20°C, 2 - 40°C, 3 - 60°C, 4 - 80°C, 5 - 100°C, 6 - 120°C, 7 - 140°C

Raccord étiré sur conducteur CROCUS 228

Résistance du raccord (μohm)

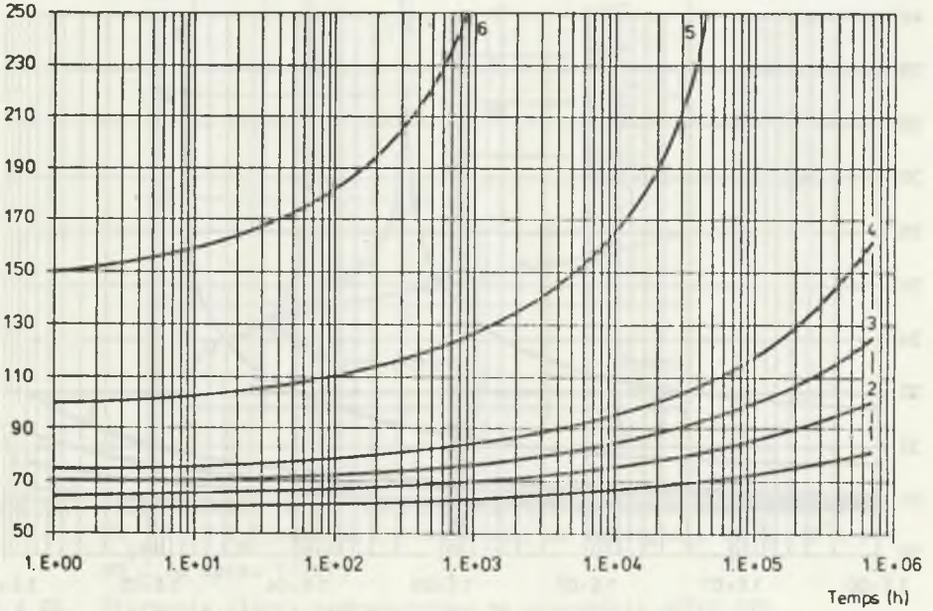


Fig. 4.26. Influence de la résistance initiale du raccord sur sa durée de vie: courbes en résistance (d'après [125]); 1 - $R_{\text{rac}} = 1,2 R_N$, 2- $R_{\text{rac}} = 1,3 R_N$, 3- $R_{\text{rac}} = 1,4 R_N$, 4- $R_{\text{rac}} = 1,5 R_N$, 5- $R_{\text{rac}} = 2 R_N$, 6- $R_{\text{rac}} = 3 R_N$

Rys. 4.26. Wpływ rezystancji początkowej złącza na jego żywotność: krzywe dla rezystancji (według [125]); 1 - $R_{\text{rac}} = 1,2 R_N$, 2- $R_{\text{rac}} = 1,3 R_N$, 3- $R_{\text{rac}} = 1,4 R_N$, 4- $R_{\text{rac}} = 1,5 R_N$, 5- $R_{\text{rac}} = 2 R_N$, 6- $R_{\text{rac}} = 3 R_N$

Raccord étiré sur conducteur CROCUS 228

Température (°C)

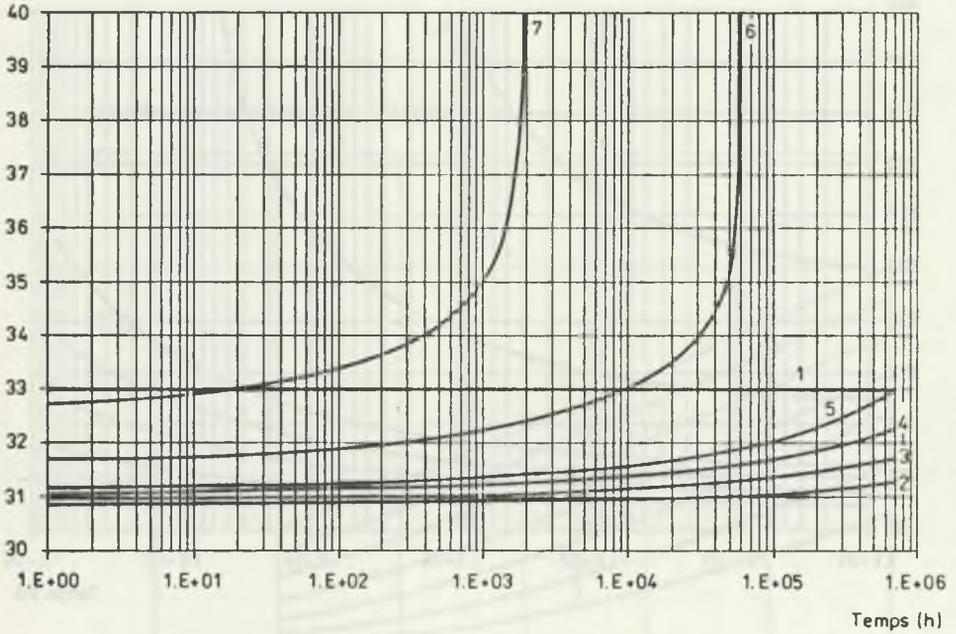


Fig. 4.27. Influence de la résistance initiale du raccord sur sa durée de vie: courbes en température (d'après [125]); 1 - conducteur, 2- $R_{rac} = 1,2 R_N$, 3- $R_{rac} = 1,3 R_N$, 4- $R_{rac} = 1,4 R_N$, 5- $R_{rac} = 1,5 R_N$, 6- $R_{rac} = 2 R_N$, 7- $R_{rac} = 3 R_N$.

Rys. 4.27. Wpływ rezystancji początkowej na żywotność: krzywe dla rezystancji (według [125]); 1 - przewód, 2 - $R_{rac} = 1,2 R_N$, 3- $R_{rac} = 1,3 R_N$, 4- $R_{rac} = 1,4 R_N$, 5- $R_{rac} = 1,5 R_N$, 6- $R_{rac} = 2 R_N$, 7- $R_{rac} = 3 R_N$.

La modélisation du vieillissement de raccords de lignes aériennes permet de prévoir la durée de vie résiduelle des raccords pour un fonctionnement de la ligne à 75°C et même à 90°C c'est-à-dire pour l'augmentation de la durée des surcharges temporaires des lignes de transport d'énergie - fig.4.28.

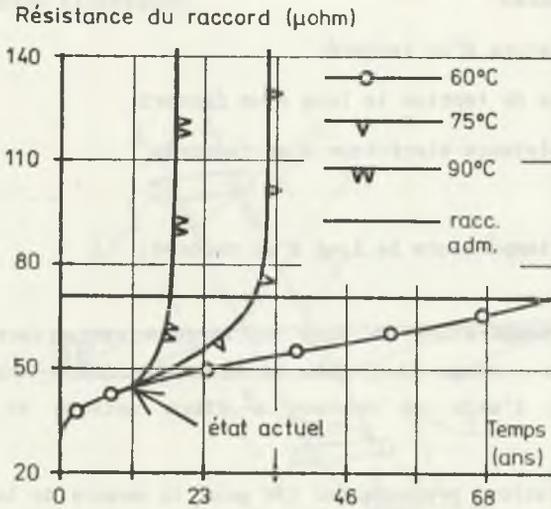


Fig.4.28. Vieillissement d'un raccord comprimé sur conducteur ASTER 570 ($R_{rac}=1,3 R_N$) pour un fonctionnement de la ligne à 60°C, 75°C et 90°C (d'après [126])

Rys.4.28. Starzenie złącza zaprasowanego na przewodzie ASTER 570 ($R_{rac}=1,3 R_N$) przy pracy linii w 60°C, 75°C i 90°C (według [126])

Cette figure montre que la dégradation s'accélère dès que la résistance du raccord dépasse la valeur admissible ainsi que la vieillissement est d'autant plus rapide que la température de fonctionnement est élevée.

4.7. METHODES D'EVALUATION DE LA QUALITE DES RACCORDES DE LIGNES AERIENNES

Au cours du temps, les modifications des caractéristiques électriques et mécaniques entraînent le vieillissement des raccords de conducteurs de lignes aériennes.

Dans le cadre de l'étude de ce vieillissement on compare la structure et certains paramètres de raccords neufs à celle et à ceux de raccords qui ont vieilli naturellement en exploitation.

L'estimation de l'état de dégradation d'un raccord peut être réalisée par les méthodes suivantes:

- mesure de température d'un raccord,
- mesure des chutes de tension le long d'un raccord,
- mesure de la résistance électrique d'un raccord.

4.7.1. Mesure de température le long d'un raccord

La mesure de température le long du raccord est effectuée soit par thermovision infra - rouge (à l'aide de la caméra infra-rouge), soit par fibre optique (à l'aide du capteur à fibre optique et électronique associée).

La dernière solution, proposée par EDF pour la mesure de la température, est le capteur de l'échauffement des conducteurs nus et des raccords de lignes aériennes d'énergie applicable sous tension.

Ce capteur permet la mesure de l'échauffement de la surface des conducteurs et des raccords vieillissés de lignes aériennes d'énergie. Ce capteur utilise le principe du thermocouple avec 4 modifications importantes (fig. ci-dessous).

- La jonction électrique des fils du thermocouple se réalise par l'intermédiaire du conducteur ou du raccord; on assure, en effet, la mesure de l'échauffement de la surface et on diminue l'inertie du capteur (le temps nécessaire entre la pose du capteur et la lecture correcte du résultat).
- Les 2 fils (par ex. Fer - Constantan ou Cuivre - Constantan) sont toronnés; ceci assure le nettoyage de la surface de contact entre les fils et le conducteur (ou le raccord par déplacement et frottement lors de la pose du capteur.
- Les 2 fils sont liés par une résistance (6) qui limite la différence de potentiel entre les 2 fils lors de la pose sur les conducteurs (ou sur les raccords) sous tension électrique.
- Le champ électrique autour des 2 fils, lorsqu'ils sont posés sur une ligne sous tension, est atténué par une électrode métallique (8) qui sert également de support mécanique.

Les modifications mentionnées sont originales: elles n'existent pas sur les thermocouples classiques.

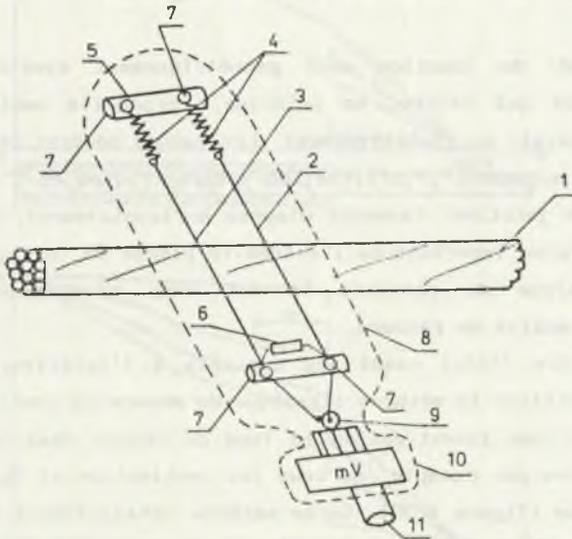


Fig. 4.29. Disposition du capteur; 1 - conducteur, 2 et 3 - fils torronnés du thermocouple, 4 - ressort, 5 - support isolant, 6 - résistance, 7 - point de fixation, 8 - électrode métallique, 9 - prise de raccordement, 10 - multivoltmètre, 11 - perche isolante (TST)

Rys. 4.29. Budowa czujnika; 1 - przewód, 2 i 3 - przewody linkowe termoelementu, 4 - sprężyna, 5 - izolowany wspornik, 6 - opornik, 7 - punkt zamocowania, 8 - elektroda metalowa, 9 - gniazdo połączeniowe, 10 - miliwoltomierz, 11 - drążek izolacyjny (TST)

À partir de mesures de température en deux points quelconques de l'ensemble raccord - conducteurs, on peut calculer par la formule analytique, comme on l'a montré dans le chapitre 4.4, la résistance du raccord. En comparant cette résistance avec celle admissible on peut évaluer de la qualité du raccord.

Il faut remarquer que la mesure de l'échauffement des raccords peut être réalisée en exploitation de la ligne, sous tension. Alors cette mesure est la donnée fondamentale pour l'évaluation de la qualité des raccords.

4.7.2. Mesure de la chute de tension le long d'un raccord

La chute de tension le long d'un raccord est l'un des paramètres de raccords permettant d'estimer de l'état de dégradation des raccords de lignes aériennes.

Si les raccords de jonction sont géométriquement symétriques, leur symétrie électrique qui existe, en principe, lorsqu'ils sont montés sur câbles neufs, disparaît au vieillissement. Les causes peuvent être diverses, mais on retiendra notamment l'infiltration dissymétriques de l'eau de pluie dans le raccord de jonction, rarement disposé horizontalement, qui entraîne un vieillissement plus important de l'extrémité placée en "boît l'eau".

Lors de l'analyse de raccords il est donc nécessaire d'examiner séparément chaque moitié de raccord.

Afin de connaître l'état exact des contacts à l'intérieur de chacune d'elle, on peut utiliser la méthode classique de mesure de chute de tension, mais en effectuant une investigation le long de chaque demi-raccord, tous les deux centimètres par exemple, ou tous les centimètres si le raccord est de petite dimension (figure 4.30). Cette méthode est également valable pour les raccords assymétriques, par exemple les raccords d'extrémité avec dérivation.

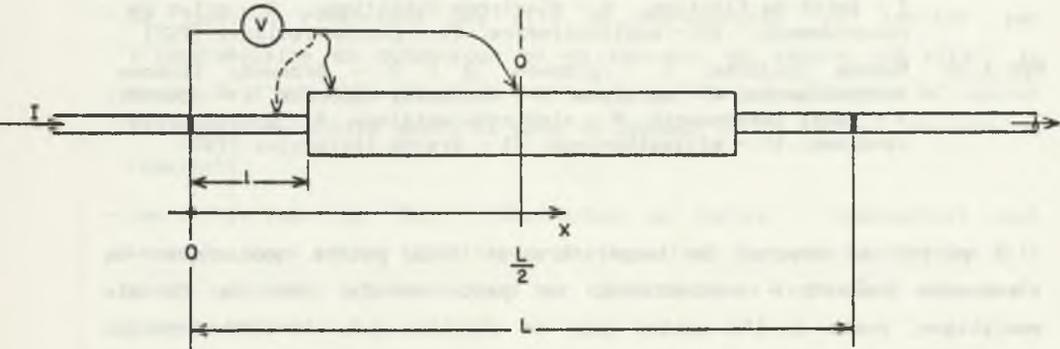


Fig. 4.30. Mesur la chute de tension le long d'un raccord

Rys. 4.30. Pomiar spadku napięcia wzdłuż złącza

Cette méthode est également valable pour les raccords assymétriques, par exemple les raccords d'extrémité avec dérivation.

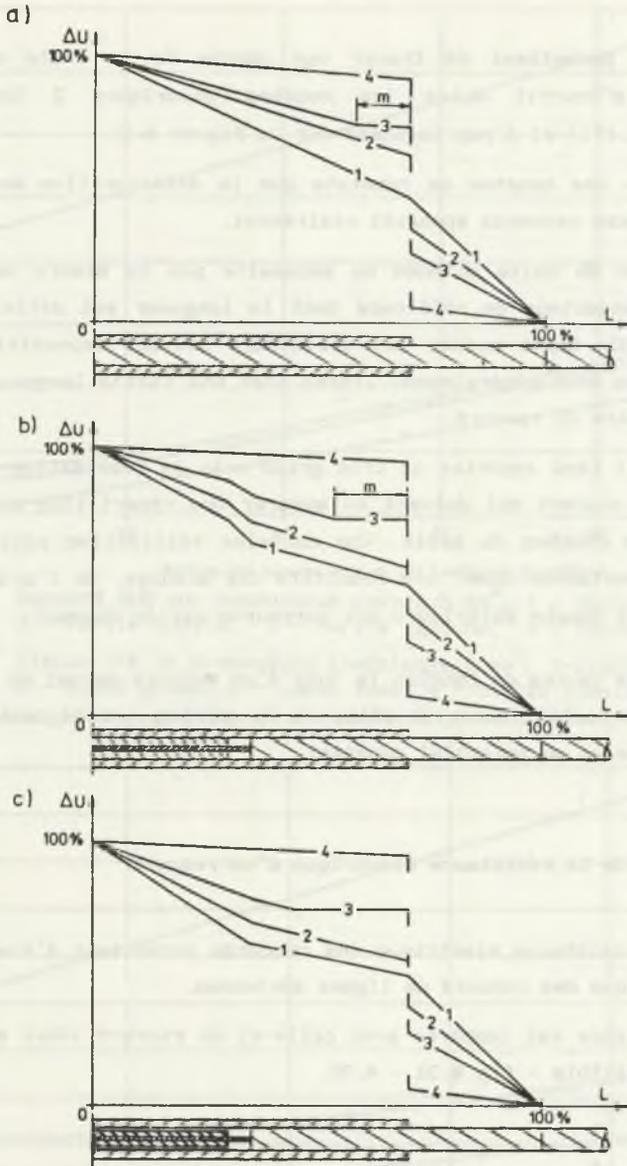


Fig. 4.31. Les chutes de tension le long des raccord; a - Raccord comprimé ou étiré sur câble homogène, b - Raccord comprimé bimétallique, c - Raccord étiré bimétallique; 1 - Courbe idéale, 2 - Raccord neuf, 3 - Raccord qui a commencé à vieillir, 4 - Raccord dont la surface de contact est totalement détériorée, m - Partie de contact dégradé

Rys. 4.31. Spadki napięć wzdłuż złączy; a - złącze prasowane lub ciągnięte na żyłę jednorodnej, b - złącze zaprasowane bimetalowe, c - złącze przeciągane bimetalowe; 1 - krzywa idealna, 2 - złącze nowe, 3 - złącze w początkowej fazie starzenia, 4 - złącze, którego powierzchnia styku jest całkowicie zniszczona, m - zdegenerowana część styku

Ces mesures permettent de tracer une courbe de la chute de tension relative qui s'inscrit entre les courbes théoriques 2 (obtenue de l'expression (4.19)) et 4 représentées sur la figure 4.31.

A l'étude de ces courbes on constate que la détérioration des contacts aux extrémités des raccords apparaît clairement.

L'application de cette méthode ne nécessite pas la mesure de chute de tension d'un conducteur de référence dont la longueur est définie dans la norme NF-C66-800. Cette mesure est d'ailleurs souvent impossible car les raccords déposés sont généralement livrés avec une faible longueur de câble de part et d'autre du raccord.

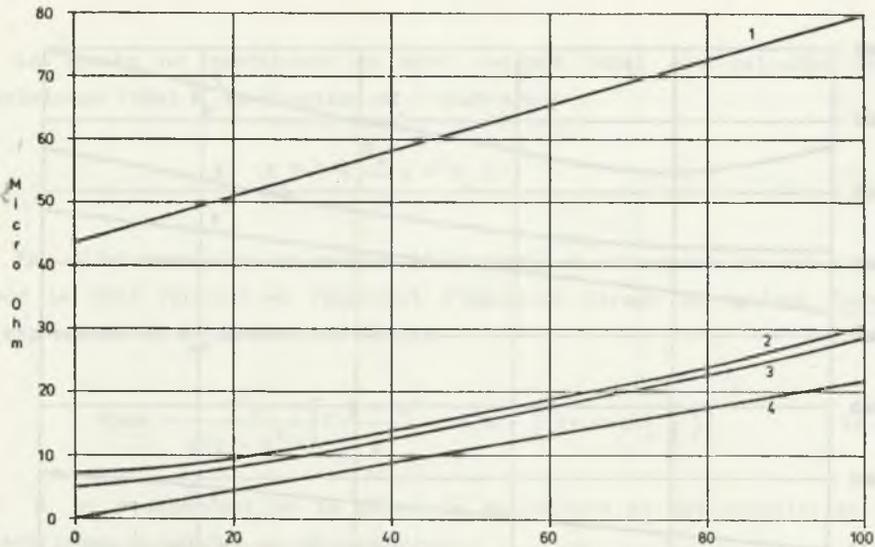
Par contre il faut apporter un très grand soin la réalisation des points d'injection du courant qui doivent en assurer une répartition normale dans les différentes couches du câble. Une mauvaise réalisation peut entraîner des erreurs importantes dans les résultats des mesures, de l'ordre de 10 à 15 % si seule la couche extérieure est parcourue par le courant.

La mesure des chutes de tension le long d'un raccord permet de déterminer la partie où le contact entre le câble et le manchon est dégradé. C'est la partie qui conserve un potentiel constant.

4.7.3. Mesure de la résistance électrique d'un raccord

Mesures de résistance électrique des raccords permettent d'évaluer de la qualité électrique des raccords de lignes aériennes.

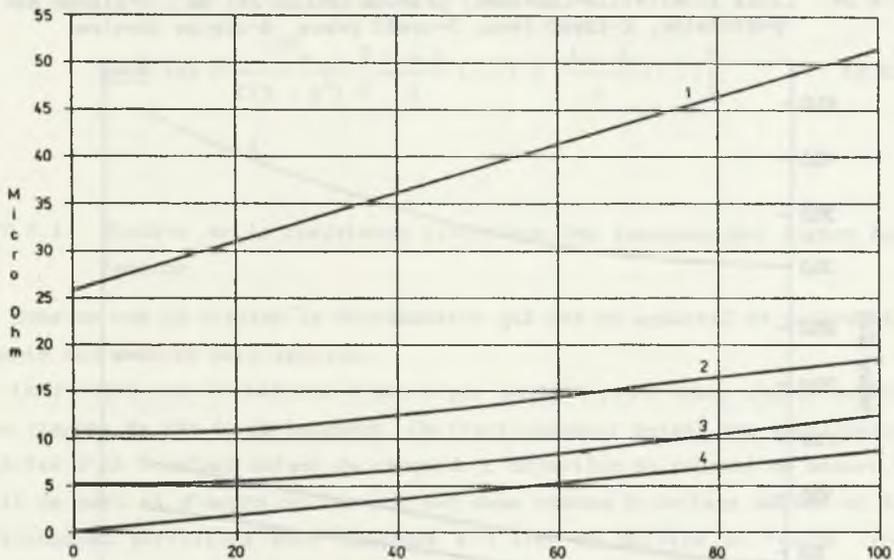
Cette résistance est comparée avec celle-ci du raccord idéal et celle-là du raccord admissible - fig.4.32 - 4.35.



Position des mesures en % de L/2 (L=longueur du raccord).

Fig. 4.32. Raccord DER sur conducteur cuivre 5 mm²; 1 - Raccord admissible, 2 - Partie droite, 3 - Partie gauche, 4 - Raccord idéal.

Rys. 4.32. Złącze DER na przewodzie miedzianym 5 mm²; 1 - złącze dopuszczalne, 2 - część prawa, 3 - część lewa, 4 - złącze idealne



Position des mesures en % de L/2 (L=longueur du raccord).

Fig. 4.33. Ligne MORBRAS-LE CHESNOY; Raccord de jonction sur conducteur Alu-Acier 595 (excentration du manchon acier de 90 mm côté gauche); 1 - Raccord admissible, 2 - Partie gauche, 3 - Partie droite, 4 - Raccord idéal

Rys. 4.33. Linia MORBRAS-LE CHESNOY; Złącze przelotowe na przewodzie alumi- niowo-stalowym 595 (przesunięcie tulei stalowej o 90 mm od środka w lewo); 1 - złącze dopuszczalne, 2 - część lewa, 3 - część prawa, 4 - złącze idealne

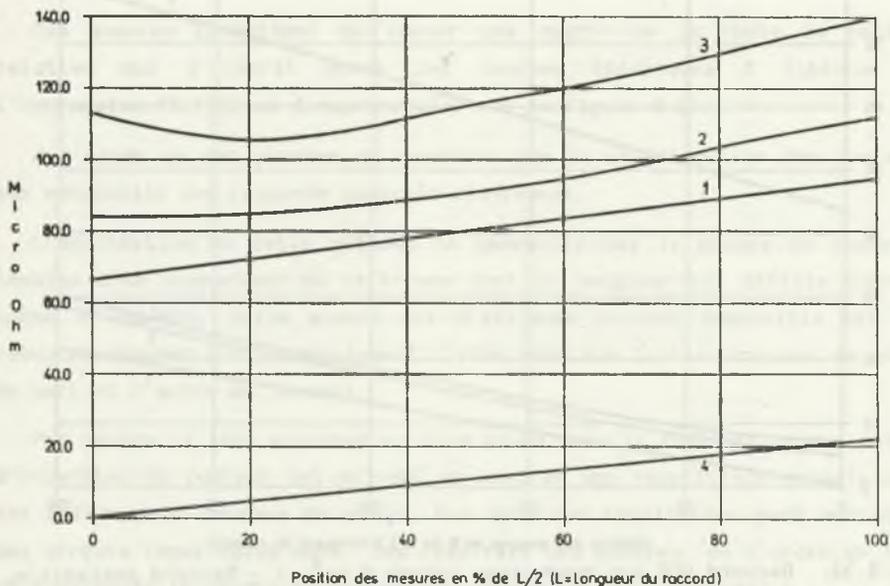


Fig. 4.34. Ligne Albertville-Chavanod; conducteur CROCUS 297 mm²; 1-Raccord admissible, 2-Partie gauche, 3-Partie droite, 4-Raccord idéal

Rys. 4.34. Linia Albertville-Chavanod; przewód CROCUS 297 mm²; 1-złącze dopuszczalne, 2-część lewa, 3-część prawa, 4-złącze idealne

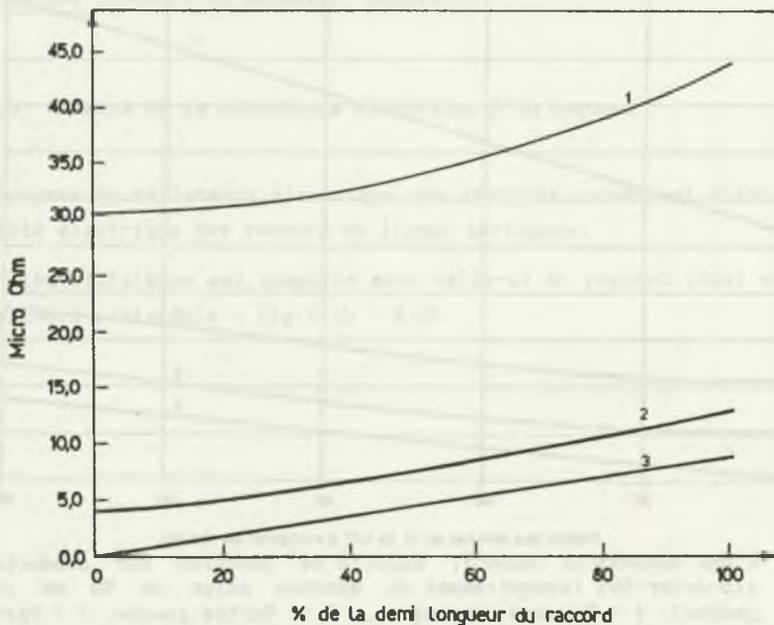


Fig. 4.35. Visualisation par VERALINE (raccord comprimé sur ASTER 570); 1-Raccord admissible, 2-Partie droite mesurée, 3-Raccord idéal

Rys. 4.35. Wyniki otrzymane z programu VERALINE (złącze zaprasowane na przewodzie ASTER 570); 1-złącze dopuszczalne, 2-mierzona część prawa, 3-złącze idealne

La courbe de résistance du demi raccord idéal est calculée de la résistance idéal R_N en fonction de l'abscisse:

$$R_N(x) = \frac{R_N}{1} x = r_N x \quad (4.81)$$

Par l'intermédiaire du modèle électrique, on détermine la valeur de C pour le demi raccord en résolvant l'équation formée en égalant R_{adm} et l'expression de R_{AB} donnée par (4.25):

$$R_{adm} = \frac{2R_N}{C(1 - \Delta^2)} \left[C \frac{1 - \Delta^2}{2} + \Delta^2 \operatorname{th}\left(\frac{C}{2}\right) + \operatorname{coth}\left(\frac{C}{2}\right) \right] \quad (4.82)$$

où R_N et Δ dépendent de la géométrie du raccord et des caractéristiques électriques du manchon et du conducteur.

Les valeurs de C , Δ et R_N étant calculées, la chute de tension dans le demi raccord est donnée par (4.27). On en déduit la courbe de résistance du demi raccord admissible en fonction de l'abscisse.

$$R_{adm}(x) = \frac{2R_N}{C(1 - \Delta^2)} \left[\frac{1 + \Delta}{2} [\dots] + \frac{1 - \Delta}{2} [\dots] \right] \quad (4.83)$$

4.7.3.1. Mesures de la résistance électrique des raccords des lignes hors tension

Dans ce cas on utilise le microohmmètre qui est un appareil de mesure bien adapté aux mesures hors tension.

Le raccord est fractionné d'abord par moitiés puis, dans chaque moitié, par tranche de 20% de la longueur. Ce fractionnement permet une localisation précise d'un éventuel défaut du raccord. L'injection du courant de mesure se fait de part et d'autre du raccord par deux pinces à serrage manuel et les résistances partielles sont mesurées à l'aide de pointes de touche (voir fig. 4.36).

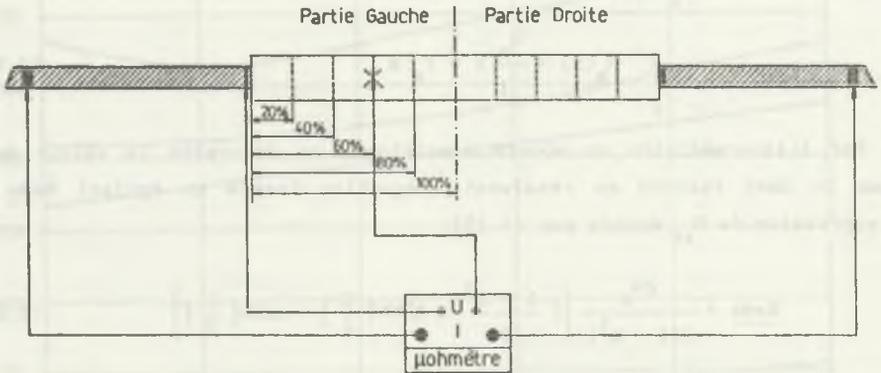


Fig.4.36. Dispositif de mesure de la répartition de résistance le long d'un raccord de jonction

Rys.4.36. Układ do pomiaru rozkładu rezystancji wzdłuż złącza przelotowego

On obtient donc six mesures (de 0 % à 100 %) pour chaque demi-raccord soit douze valeurs de résistance au total.

À E.D.F. on a élaboré le logiciel "VERALINE" - [119, 124] d'après duquel ces douze valeurs seront à entrer dans la feuille de calcul du micro-ordinateur.

Cette feuille comprend plusieurs parties dont trois sont à renseigner:

- Le tableau d'entrée des données concernant le raccord,
- Le tableau d'entrée des résistances mesurées sur le raccord,
- Le base de données "conducteurs" si le conducteur ne figure pas dans la base.

Les autres parties contiennent des formules de calcul nécessaires à l'évaluation du raccord. Elles n'ont pas à être modifiées par l'utilisateur.

Sans tenir compte du temps nécessaire pour faire les mesures de résistance sur le raccord, il faut environ 5 mn pour effectuer la saisie totale des renseignements et obtenir ainsi le fichier résultat à l'écran. L'impression de ce fichier sur un support papier prend deux minutes supplémentaires.

Après ouverture de la feuille de calcul, la première opération à effectuer est compléter le tableau d'entrée des données représenté ci-dessous:

Tableau 4.3

Tableau d'entrée des données

	B	C	D	E	F
3	21-Jul-90	TABLEAU D'ENTREE DES DONNEES:			
4					
5		Nom de la ligne:		St AUBAN-VENTAVON	
6	FACULTATIF	Niveau de tension (kV):		63 / 150	
7		Portée:		67 - 68	
8		Raccord n°:		5	
9		Nom du conducteur:		CROCUS 301	
10	OBLIGATOIRE	Diamètre extérieur du manchon (mm):		35	
11		Longueur totale du raccord (mm):		305	

La première zone réclame des renseignements facultatifs concernant la ligne dont est issu le raccord (nom de la ligne, niveau de tension, n° de la portée et n° du raccord). Ces renseignements ne sont pas absolument nécessaires au bon fonctionnement du calcul et peuvent être volontairement omis. Il est toutefois conceillé de renseigner au moins la case "nom de la ligne" car elle est utilisée comme titre du fichier résultat. Par contre, la deuxième zone doit obligatoirement comporter les 3 points suivants:

- nom du conducteur,
- longueur du raccord,
- cote sur plats des matrices utilisées dans le cas d'un raccord comprimé ou diamètre extérieur du raccord s'il est étiré.

La connaissance de ces 3 points permet d'effectuer les différents calculs générant le résultat final.

L'opération suivante consiste à saisir les valeurs de résistance du raccord dans le tableau ci-dessous:

Tableau 4.4

Tableau d'entrée des résistances mesurées

	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
4	Tableau d'entrée des résistances mesurées sur chaque demi-raccord (en uOhm):						
5							
6	Longueur de mesure en mm:	0	31	61	92	122	153
7							
8	% de la longueur de mesure	0	20	40	60	80	100
9	Partie gauche	24.2	24.2	25.2	25.4	25.8	26.2
10	Partie droite	76.5	81.3	83.8	84.8	85.0	86.5
11	RACCORD ADMISSIBLE	16.8	19.6	22.4	25.2	28.0	30.8
12	RACCORD IDEAL	0.0	1.1	2.2	3.4	4.5	5.6

Les lignes "partie gauche" et "partie droite" sont les seules lignes à compléter. Le contenu des lignes "raccord admissible" et "raccord idéal" est généré par les différents calculs exécutés grâce aux données introduites dans la zone 2. Une fois ces opérations effectuées, il suffit d'ouvrir le fichier résultat qui donnera de façon "visuelle" l'état électrique du raccord étudié.

Toutefois, il existe une autre zone que l'on peut modifier si nécessaire. C'est la base de données "conducteurs". On peut à volonté ajouter ou retirer des conducteurs en prenant la précaution de les classer d'abord par ordre alphabétique puis par valeur croissante pour la section. Par exemple, si l'on désire analyser un raccord réalisé sur un conducteur exceptionnel ou particulier n'existant pas dans la base de données, il suffit d'y insérer une ligne comprenant le nom du conducteur et sa section exacte, sa résistance électrique en micro-Ohm par mètre et son diamètre extérieur en millimètres (voir tableau ci-dessous).

Tableau 4.5

Base de données

	A	B	C
29	BASE DE DONNEES "CONDUCTEURS"		
30			
31	Nom du conducteur	résistance	diamètre
32		(uOhm/m)	(mm)
33	ALU-ACIER 22	1530	6
34	ALU-ACIER 238	151	20.02
35	ASTER 1144	29.2	44
36	ASTER 117	283	14
37	ASTER 148	224	15.75
38	ASTER 1600	20.6	52
39	ASTER 181,6	183	17.5
40	ASTER 22	1500	6
41	ASTER 228	146	19.6
42	ASTER 288	115	22.05
43	ASTER 34,4	958	7.5
44	ASTER 366	90.5	24.85
45	ASTER 54,6	603	9.45
46	ASTER 570	58.3	31.05
47	ASTER 75,5	438	11.25
48	ASTER 851	39.1	37.95
49	CANNA 116,2	306	14
50	CANNA 147,1	243	15.75
51	CANNA 181,6	197	17.5
52	CANNA 228	157	19.6

Le fichier résultat se présente sous la forme d'un graphique (voir fig.4.32)

Les valeurs de résistance de chaque demi-raccord doivent se situer entre les deux droites "Raccord idéal" et "Raccord admissible", le raccord idéal étant un raccord sans aucune résistance de contact conducteur - manchon et le raccord admissible étant un raccord dont la résistance totale provoquerait un échauffement du raccord tel que sa température serait celle du conducteur.

Un raccord neuf ou récent doit présenter des valeurs de résistance par demi-raccords proches de la droite "raccord idéal". Par opposition, un raccord détecté comme chaud par thermovision verra ses valeurs de résistance dépasser la droite "raccord admissible".

Cette présentation simple permet de se faire une idée précise et rapide de l'état électrique d'un raccord et le cas échéant de décider de son remplacement.

Une mesure effectuée sur un raccord neuf avant sa mise en place sur la ligne et plusieurs mesures effectuées ensuite lors de consignations de la ligne permettront de suivre l'évolution des contacts électriques du raccord pendant la période d'exploitation de la ligne.

Cette méthode présente aussi l'avantage de permettre une évaluation avant la mise en service de la ligne des raccords par la vérification de la mise en oeuvre (mauvais nettoyage du conducteur avant manchonnage ou excentrement du manchon acier dans un raccord sur conducteur bimétallique).

A titre d'exemple, la fig.4.32 représente les caractéristiques de résistance d'un raccord de jonction comprimé sur un conducteur cuivre 5 mm². Les valeurs de résistance des deux parties sont sensiblement identiques et proches de la droite "raccord idéal". Ce raccord présente donc de bonnes caractéristiques électriques.

La fig.4.33 représente les caractéristiques de résistance d'un raccord de jonction comprimé sur un conducteur Alu-Acier 595 mm². On peut noter sur la partie gauche du raccord des valeurs de résistance nettement supérieures à celles de la partie droite mais inférieures à la droite "raccord admissible". Le bon état général du conducteur ne permettant pas d'expliquer l'écart entre les deux parties par un phénomène d'oxydation, la cause la plus probable et qui a été confirmée lors de l'ouverture du raccord est un excentrement important du raccord acier dans le raccord aluminium.

La fig.4.34 représente les caractéristiques de résistance d'un raccord de jonction étiré sur un conducteur CROCUS 297 mm². Les valeurs de résistance relevées sur les deux moitiés du raccord sont très élevées et supérieures à la droite "raccord admissible". A l'ouverture du raccord, on a effectivement constaté une oxydation complète du manchon acier, une oxydation importante des brins acier à l'intérieur du raccord et une oxydation des brins aluminium au contact du manchon alu. Ce raccord ne peut pas assurer le transit du courant sans échauffement excessif.

4.7.3.2. Mesures de la résistance électrique des raccords des lignes en service

4.7.3.2.1. Généralité

Il est intéressant d'un point de vue économique et technique de développer les méthodes de mesures destinées à l'évaluation des raccords sur les lignes en conditions de l'exploitation normale c'est - à - dire sous tension et sous charge.

La mesure devient alors complexe car il y a :

- des chutes de tensions dues au courant alternatif de charge,
- le champ électromagnétique qui peut provoquer les perturbations de mesures par induction (composante magnétique du champ) et l'effet capacitif (composante électrique du champ).

Enfin, il faut prendre en compte la sécurité du personnel qui exécute les mesures.

Prenant en compte les conditions de mesures sur une ligne aérienne on peut distinguer la détermination de la résistance électrique :

- directe, par les mesures de paramètres électriques (tension, courant, etc...).
- indirecte, par les mesures de l'échauffement et l'application d'un modèle mathématique qui détermine les relations entre la résistance d'un raccord et son échauffement.

Les méthodes directes sont théoriquement faciles à appliquer. Le seul inconvénient est créé par les perturbations électromagnétiques qui ont une influence directe sur les résultats de mesures et sur le fonctionnement des appareils de mesure (surtout les composants électroniques).

Les méthodes indirectes sont en principe insensibles à l'influence du champ électromagnétique; les appareils de mesure restent sous l'influence du champ électromagnétique.

Le choix d'une méthode de mesure est lié aux valeurs des paramètres mesurés. Il est nécessaire de déterminer: les valeurs des résistances, des chutes de tension et des courants à mesurer.

4.7.3.2.2. Valeurs numériques des paramètres mesurés

a) Résistance des raccords:

On admet comme référence, la résistance unitaire du conducteur r_1 avec la section S_1 et diamètre D_1 .

La section totale S d'un raccord récent utilisé à EDF:

$$S < 3 S_1 \quad (4.84)$$

Résistance unitaire d'un raccord idéal utilisé à EDF:

$$r_N > \frac{1}{3} r_1 \quad (4.85)$$

Résistance d'un raccord admissible avec le diamètre $D < \sqrt{3} D_1$, selon (4.84):

$$r_{ad} = r_1 \frac{D}{D_1} = \sqrt{3} r_1 \quad (4.86)$$

En prenant la définition de la résistance relative admissible du raccord (2) on obtient avec (4.86) et (4.85):

$$\bar{r}_{ad} = 3\sqrt{3} = 5,2 \quad (4.87)$$

Tableau 4.6.

Valeurs numériques de paramètres des conducteurs et raccords

Type	CONDUCTEUR		RACCORD		
	Section mm ²	r_1 à 20°C 10 ⁻⁶ ohm/m	r_N 10 ⁻⁶ ohm/m	r_{ad} 10 ⁻⁶ ohm/m	l m
Alu- -Acier	288	124	41	214	1,0
Aster	570	61	20,3	105	1,0
	851	41,7	13,9	72	1,5
	1600	25,1	8,3	43,5	2,0

b) Résistances minimales à mesurer, du conducteur et du raccord de bonne qualité, avec la résistance relative \bar{r} admise égale à 1,2:

ASTER 1600 conducteur soit 25 $\mu\Omega$
 raccord soit 10 $\mu\Omega$

ASTER 570 conducteur soit 31 $\mu\Omega$
 raccord soit 12 $\mu\Omega$

c) Résistances maximales à mesurer:

Raccords avec la résistance relative $\bar{r} = 6$

résistance à mesurer $\sim 250 \mu\Omega$ pour un conducteur Alu-Acier 288 mm².

d) Réactances des conducteurs

L'inductance propre interne du conducteur (liée au champ magnétique interne) est indépendante du diamètre D du conducteur [1]:

$$L_o = \frac{\mu_o}{8\pi} l \quad (4.88)$$

avec $\mu_o = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/A·m et $l = 1$ m on obtient pour $f = 50$ Hz:

$$X_o = 2\pi f L_o = 15,7 \cdot 10^{-6} \Omega/m$$

Réactance globale d'une ligne triphasée:

$$X = 2\pi f \left(0,5 + 2 \ln \frac{2d}{D} \right) 10^{-7} \Omega/m \quad (4.89)$$

où d est la distance moyenne entre conducteurs:

$$d = \sqrt[3]{d_{12} d_{23} d_{31}} \quad (4.90)$$

où 1, 2, 3 symbolisent les phases L_1 , L_2 et L_3 .

Pour une ligne de 90 kV, Alu-Acier 288 mm² on obtient:

$$X = 380 \mu\Omega/m.$$

Pour une ligne de 220 kV, avec les conducteurs ASTER 570 on obtient:

$$X = 390 \mu\Omega/m$$

La réactance globale d'une ligne triphasée est beaucoup plus grande que la réactance interne du conducteur.

4.7.3.2.3. Mesure de la chute de tension sur un conducteur et un raccord

La méthode la plus simple de la détermination de la résistance d'un raccord est d'utiliser les mesures de chute de tension provoquées par le courant de charge d'une ligne en exploitation normale. Il est évident qu'il

faut ici prendre en compte la composante selfique de la chute de tension et prendre en compte les paramètres qui déterminent la valeur de cette composante.

Le problème principal de mesure de très petites tensions avec un courant alternatif en présence du champ électromagnétique est lié aux tensions induites dans les fils du circuit de mesure et à la géométrie du circuit. Un exemple (Fig. 4.37) démontre qu'on obtient des résultats différents de mesure d'une chute de tension entre les mêmes points d'un conducteur, en changeant la géométrie du circuit de mesure:

Cas a)
$$U = I \sqrt{R^2 + X_o^2} \quad (4.91)$$

b)
$$U = I \sqrt{R^2 + X^2} \quad (4.92)$$

c)
$$U = \sqrt{(IR)^2 + \left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2} \quad (4.93)$$

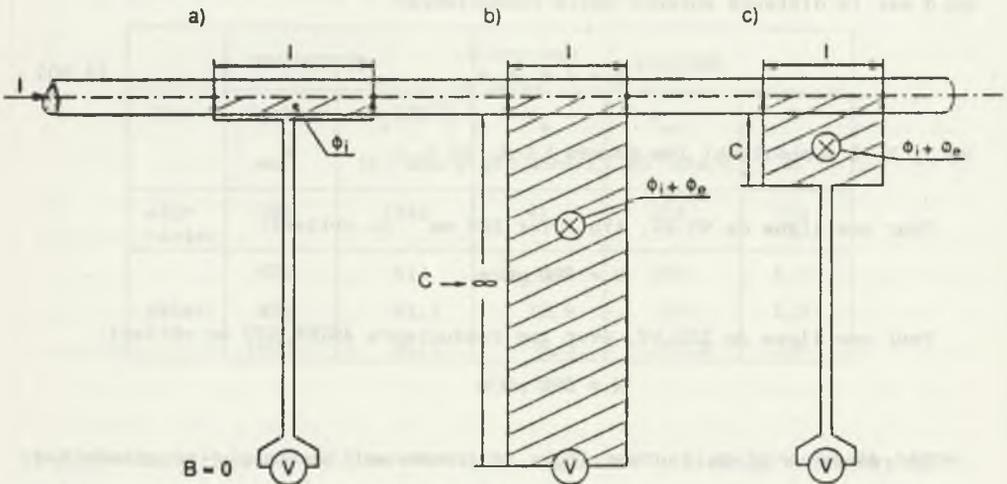


Fig. 4.37. Illustration de l'influence de la géométrie du circuit de mesure sur le résultat de mesure de chute de tension

Rys. 4.37. Ilustracja wpływu geometrii obwodu pomiarowego na wynik pomiaru spadku napięcia

Dans la pratique le cas le plus intéressant et le plus difficile est la mesure de chute de tension sur un raccord avec la résistance minimale.

On suppose comme exemple un raccord du conducteur ASTER 570 avec une résistance $10 \mu\Omega$ et une longueur de 0,5 m.

La réactance propre sur la même longueur est de $8 \mu\Omega$. Disposition de mesure selon Fig.4.37.

Impédance $Z_o = \sqrt{10^2 + 8^2} = 12,8 \mu\Omega$

On suppose le courant de 300A et on obtient:

$$\Delta U = 3,85 \text{ mV}$$

Il est alors nécessaire d'utiliser un voltmètre avec les 2 gammes:

0 - 10 mV	avec une résolution 0,01 mV
0 - 100 mV	avec une résolution 0,1 mV

La précision nécessaire totale - 1 % de la gamme.

Pour une mesure de la chute de tension sur un conducteur (ou un raccord) avec la disposition de la figure 4.37, on détermine l'impédance interne du conducteur. Il est intéressant d'évaluer le rapport entre la résistance et cette impédance. Le tabl.4.7 donne les valeurs des résistances: r_1 - des conducteurs et r - des raccords (valeurs minimales) des impédances internes du conducteur Z_{o1} et du raccord Z_o , et aussi des rapports Z_{o1}/r_1 et Z_o/r .

L'évaluation des valeurs montre que pour les conducteurs uniques (et les raccords correspondants) avec une section qui ne dépasse 570 mm^2 (pour Almelec) on peut admettre:

$$Z_o \approx r_o \text{ et } Z_{o1} \approx r_1$$

avec l'erreur qui ne dépasse pas 3,5 % .

Tableau 4.7

Résistance et impédance interne¹⁾ des conducteurs uniques

Type de conducteur	Paramètres du conducteur			Paramètres du raccord avec $\bar{r} = 1,5$			
	r_1	Z_{01}	Z_{01}/r_1	r	Z_0	Z_0/r	
-	m Ω /m	m Ω /m	-	m Ω /m	m Ω /m	-	
Aster	148	0,2240	0,2245	1,002	0,336	0,3360	1,000
	228	0,1460	0,1468	1,005	0,219	0,2195	1,002
	570	0,0583	0,0603	1,035	0,0875	0,0889	1,015
	851	0,0417	0,0445	1,067	0,0625	0,0644	1,031
	1600	0,0251	0,0296	1,175	0,0377	0,0408	1,083

1) Z_{01} et Z_0 sont calculées avec $X_0 = 0,0157$ m Ω /m

4.7.3.2.4. L'influence du champ électromagnétique des conducteurs voisins sur les résultats de mesure de la chute de tension

Le circuit de mesure avec fils posés selon la figure 4.37.a, reste sensible aux champs électromagnétiques extérieurs. On peut admettre le modèle selon la figure 4.38.

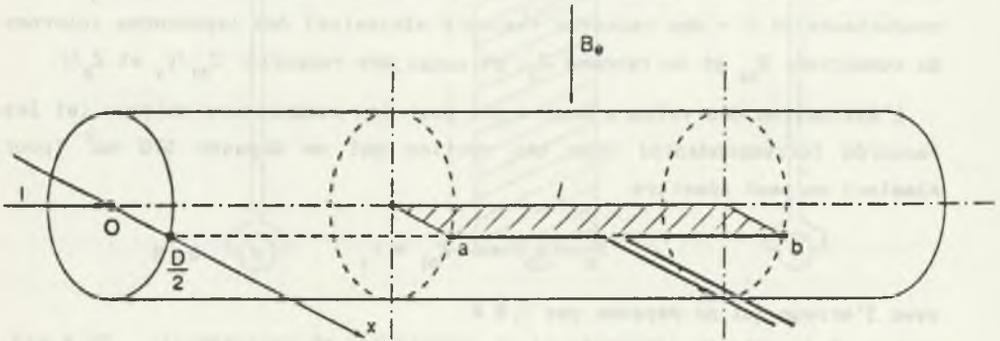


Fig.4.38. Modèle pour l'analyse de l'influence du champ électromagnétique extérieur sur le résultat de mesure de la chute de tension

Rys.4.38. Model do analizy wpływu zewnętrznego elektromagnetycznego na wynik pomiaru spadku napięcia

Supposons que le champ électromagnétique extérieur a une induction B_e .
Le flux magnétique accouplé au circuit de mesure:

$$\phi = B_e l \frac{D}{2} \quad (4.94)$$

La tension induite:

$$E_e = \frac{d\phi}{dt} \quad (4.95)$$

Pour $B = B_m \sin \omega t$ on obtient:

$$E_e = 2\pi f \phi = 2\pi f B_e l \frac{D}{2} \quad (4.96)$$

Les valeurs B_e dépendent de la distance entre les conducteurs de ligne aérienne (Tableau 4.8).

Tableau 4.8

Les distances entre les conducteurs de lignes aériennes

Tension nominale	Distance min.	Distance max.
kV	m	m
90	3,0	4,2
225	5,0	6,0
400	8,0	10,0

Dans le circuit de mesure de la chute de tension sur le conducteur 1 on obtient la composante induite due au courant d'une phase voisine 2:

$$E_{e12} = 2\pi f B_{e12} F \quad (4.97)$$

où F est la surface du circuit de mesure, B_{e12} est l'induction moyenne à la surface du circuit de mesure.

$$B_{e12} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi d_{12}} \quad (4.98)$$

où d_{12} est distance entre les phases 1 et 2.

Exemple numérique 1

Données:

Ligne 90 kV, conducteur ASTER 570, distance mini $d_{12} = 3$ m, courant $I = 300$ A, la distance de mesure $l = 1$ m. Après avoir fait le calcul on obtient $B_{012} = 20 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{m^2}$.

Pour le diamètre du conducteur $D = 31$ mm on obtient $F = \frac{D}{2} l = 0,015 m^2$ et $E_{e12} = 0,094$ mV.

On a déterminé la chute de tension pour $l=1$ m sur ASTER 570 unique, pour $I = 300$ A: $\Delta U = 3,85$ mV et le rapport $\frac{E_{e12}}{\Delta U} = 0,024$

Compte tenu du déphasage de tensions ΔU et E_{e12} on obtient l'erreur due à l'influence d'une phase voisine pour le cas analysé ne dépassant pas 2 % , alors pratiquement négligeable.

Exemple numérique 2

Données:

Ligne 225 kV, 2 conducteurs ASTER 570 (faisceau double) $d = 0,4$ m, $I = 600$ A, la distance de mesure $l = 1$ m. On obtient: $B_{e12} = 150 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{m^2}$, $E_{e12} = 0,705$ mV .

Le rapport $\frac{E_{e12}}{\Delta U} = 0,18$ indique qu'il est obligatoire de prendre en compte les tensions induites dans le circuit de mesure par les courants dans les conducteurs voisins composant un faisceau.

4.7.3.2.5. *Essai de réduction de la composante selfique liée au champ magnétique d'un conducteur unique*

A l'intérieur du conducteur il n'est pas possible de créer un circuit de compensation accouplé de même flux magnétique que le circuit de mesure de la figure 4.38.

Supposons que le champ magnétique H en proximité directe d'un conducteur dépend uniquement de son courant (cas d'un conducteur unique).

Pour un conducteur cylindrique circulaire infiniment long, le champ magnétique est déterminé par les formules (Fig.4.39):

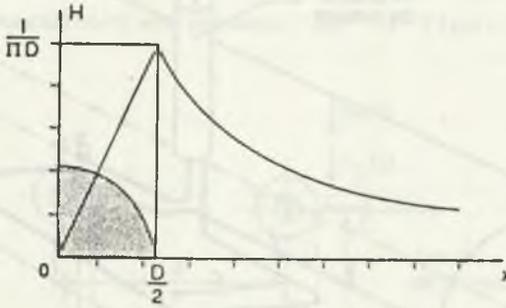


Fig.4.39. Champ magnétique d'un conducteur cylindrique circulaire

Rys.4.39. Pole magnetyczne przewodu cylindrycznego

$$H = \frac{Ix}{\pi D^2} \quad \text{pour } x \in [0, D/2] \quad (4.99)$$

$$H = \frac{I}{2\pi x} \quad \text{pour } x > D/2 \quad (4.100)$$

Le flux interne sur la longueur l:

$$\phi_1 = \mu\mu_0 \cdot \frac{Il}{4\pi} \quad (4.101)$$

ne dépend pas du diamètre du conducteur.

La compensation de la composante selfique de la chute de tension mesurée sur la longueur l (Fig.4.38) est réalisable par une boucle supplémentaire accouplée au champ magnétique à l'extérieur du conducteur sous condition que le flux accouplé à cette boucle soit égal au flux interne du conducteur sur la longueur l (Fig.4.40)

$$\phi_e = \phi_1 \quad (4.102)$$

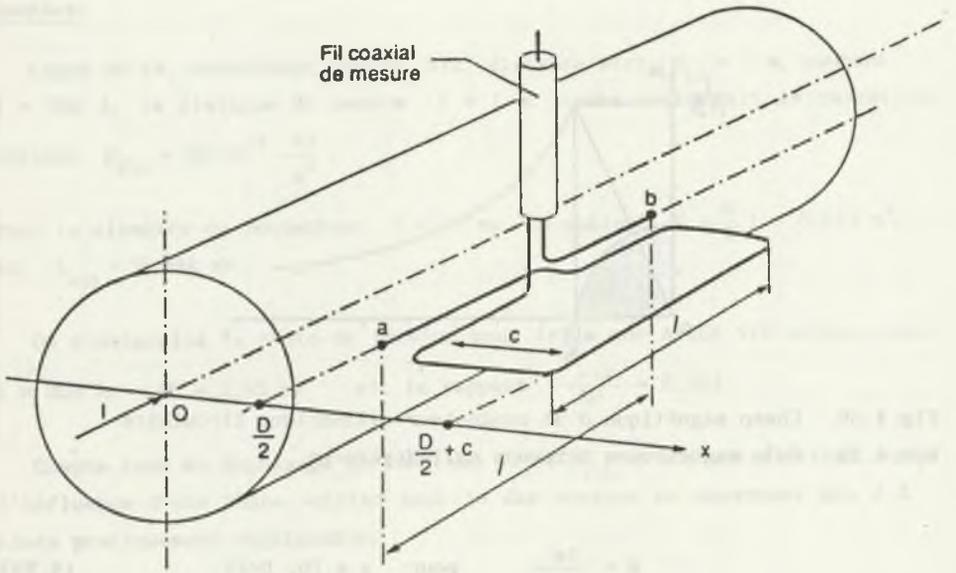


Fig.4.40. Disposition de compensation de la partie séfrique de la chute de tension sur un conducteur

Rys.4.40. Układ kompensacji składowej indukcyjnej spadku napięcia na przewodzie

En prenant les formules on obtient les relations:

$$\phi_e = \int_{x=0,5D}^{x=0,5D+c} \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi x} dx = \mu\mu_0 \frac{Il}{2\pi a} \ln\left(\frac{0,5D+c}{0,5D}\right) \quad (4.103)$$

et
$$\phi_1 = \mu\mu_0 \frac{Il}{4\pi} \quad (4.104)$$

Avec (4.102) on en déduit la condition géométrique:

$$c = 0,325 D$$

(4.105)

4.7.3.2.6. Réduction de la composante selfique provoquée par le champ magnétique d'un conducteur voisin

On suppose que le conducteur voisin 1 est parcouru par le courant I_1 . La disposition des conducteurs est présente sur la figure 4.41.

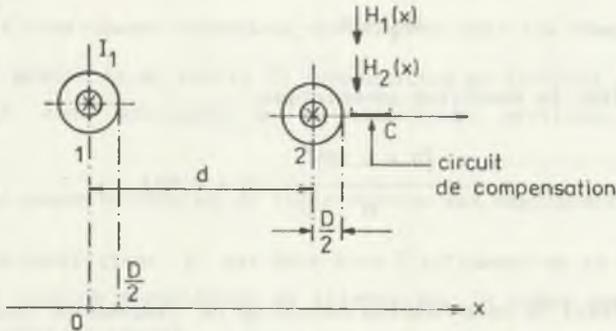


Fig. 4.41. Faisceau double de conducteurs de ligne aérienne

Rys. 4.41. Włazka podwójna przewodów linii napowietrznej

Le champ magnétique du conducteur 1: pour $x \in \left[\frac{D}{2}, \infty \right]$ est:

$$H_1(x) = \frac{I_1}{2\pi x} \quad (4.106)$$

Le circuit de mesure est accouplé au flux magnétique provenant du conducteur 1.

$$\phi_o = \mu\mu_0 \frac{I_1 l}{2\pi} \ln\left(\frac{d + 0,5D}{d}\right) \quad (4.107)$$

Le circuit de compensation (Fig. 4.41) est accouplé au flux:

$$\phi_{ec} = \mu\mu_0 \frac{I_1 l}{2\pi} \ln\left(\frac{d + 0,5D + c}{d + 0,5D}\right) \quad (4.108)$$

où c - est la distance entre les fils du circuit de compensation.

Le courant 1 provoque une tension supplémentaire, due à la différence de deux flux:

$$\Delta E_1 = 2\pi f(\phi_o - \phi_{ec}) \quad (4.109)$$

c'est - à - dire

$$\Delta E_1 = 2\pi f \mu \mu_0 I \ln \left(\frac{d + 0,5D + c}{d + 0,5D} \right) . \quad (4.110)$$

La compensation de l'influence du conducteur 1 sur le résultat de mesure de la chute de tension sera théoriquement idéale en admettant:

$$\Delta E_1 = 0, \quad (4.111)$$

d'où on obtient la condition géométrique:

$$c = \frac{(D + 0,5D)^2}{d} - (d + 0,5D), \quad (4.112)$$

4.7.3.2.7. Essai de compensation totale de la composante selfique de la chute de tension sur un conducteur appartenant au faisceau double

On suppose que chaque conducteur du faisceau conduit le même courant I. La boucle de mesure (Fig.4.38) est transversée par le flux magnétique résultant, provenant du courant propre et du courant de conducteur voisin (4.104) et (4.107):

$$\phi_m = \frac{\mu \mu_0 I l}{4\pi} + \frac{\mu \mu_0 I l}{2\pi} \ln \left(\frac{d + 0,5D}{d} \right). \quad (4.113)$$

Pour la boucle de compensation on obtient (4.103) et (4.108)

$$\phi_c = \frac{\mu \mu_0 I l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{c + 0,5D}{0,5D} \right) + \ln \left(\frac{d + 0,5D + c}{d + 0,5D} \right) \right] \quad (4.114)$$

La compensation sera réalisée sous condition:

$$\phi_m = \phi_c \quad (4.115)$$

La comparaison de formules (4.113) et (4.114) donne la relation pour la dimension c:

$$\frac{c + 0,5D}{0,5D} \frac{c + 0,5D + d}{d + 0,5D} \frac{d}{d + 0,5D} = e^{0,5} \quad (4.116)$$

4.7.3.2.8. Réduction de la composante selfique de la chute de tension sur un conducteur appartenant au faisceau

On analyse un cas réel de mesure de la chute de tension sur un conducteur appartenant au faisceau.

On suppose que:

- les courants I dans chaque conducteur du faisceau sont les mêmes.
- le circuit de mesure et de boucle de compensation se trouvent sur un plan horizontal et sont accouplés à la composante verticale du champ magnétique.
- l'influence de phase voisine ou de ligne voisine est négligeable.

On définit le coefficient k qui détermine l'influence de la disposition des conducteurs voisins appartenant au faisceau sur le champ magnétique en proximité du conducteur mesuré.

Par définition, pour le faisceau double on a:

$$k = 1 \quad (4.117)$$

Pour le conducteur unique, par définition:

$$k = 0 \quad (4.118)$$

Le flux magnétique traversant la boucle de mesure:

$$\begin{aligned} \phi_m &= \frac{\mu\mu_0 I l}{4\pi} + k \frac{\mu\mu_0 I l}{2\pi} \ln\left(\frac{d + 0,5D}{d}\right) \\ &= \frac{\mu\mu_0 I l}{2\pi} \left[0,5 + k \ln\left(\frac{d + 0,5D}{d}\right) \right] \end{aligned} \quad (4.119)$$

Le circuit de compensation est accouplé au flux magnétique:

$$\phi_c = \frac{\mu\mu_0 I l}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{c + 0,5D}{0,5D}\right) + k \ln\left(\frac{d + 0,5D + c}{d + 0,5D}\right) \right] \quad (4.120)$$

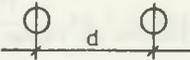
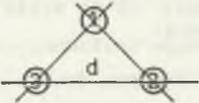
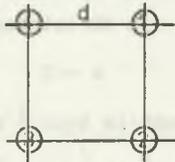
En prenant la condition de réduction de la composante selfique (4.115) on obtient l'équation déterminant la dimension c de la boucle de compensation (Fig. 4.40):

$$\frac{c + 0,5D}{0,5D} \left(\frac{c + 0,5D + d}{d + 0,5D} \frac{d}{d + 0,5D} \right)^k = e^{0,5} \quad (4.121)$$

Tableau 4.9 donne les valeurs k pour dispositions différentes de conducteurs.

Tableau 4.9

Valeurs du coefficient k

N°	Cas analysé	Disposition	Coefficient k
1	Conducteur unique		$k = 0$
2	Faisceau double		$k = 1$
3	Faisceau triple		$k_1 = 0$ $k_2 = 1,5$ $k_3 = 1,5$
4	Faisceau quadruple		$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1,5$

4.7.3.2.9. *Vérification expérimentale de possibilité de mesure de la chute de tension sur un conducteur avec une compensation de la composante selfique*

Après une série d'essais préliminaires avec les conducteurs ASTER 34,4 et ASTER 148 qui ont confirmé l'influence de la géométrie d'une boucle de mesure sur les résultats de mesures des chutes de tension, on a préparé une série de mesures sur le conducteur ASTER 570.

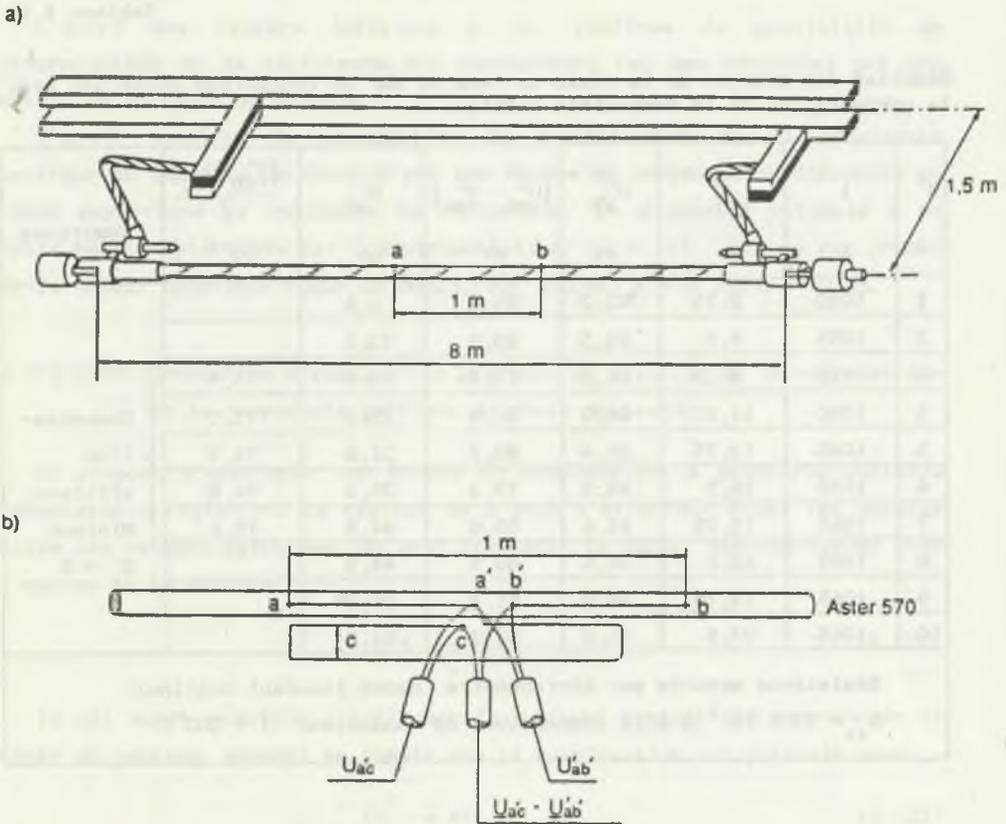


Fig. 4.42. Illustration des mesures de la chute de tension sur un conducteur avec la compensation de la composante selfique: a) disposition générale du stand d'essai b) disposition des fils de circuit de mesure; où U_{ab} - chute de tension sur le conducteur et U_{ac} - tension induite dans la boucle de compensation

Rys. 4.42. Przykład pomiarów spadku napięcia na przewodzie z kompensacją składową indukcyjnej: a) układ ogólny stanowiska badawczego, b) układ przewodów obwodu pomiarowego; gdzie U_{ab} - spadek napięcia na przewodzie i U_{ac} - napięcie indukcyjne w pętli kompensacyjnej

La figure 4.42 montre la disposition générale du stand d'essai et la géométrie du circuit de mesure de la chute de tension avec une boucle de compensation de la partie selfique de la chute. Largeur de cette boucle (dimension c - -fig.4.42) étant variable, a permis de trouver pour l'expérimentation la compensation optimale.

Tableau 4.10

Résultat des mesures de la chute de tension sur le conducteur ASTER 570 avec la compensation de la composante selfique

N°	l	C	U'' _{ab}	U'' _{ab} - U' _{ac}	U' _{ac}	$\frac{ U''_{ab} - U'_{ac} }{I}$	Remarques
-	A	mm	mV	mV	mV	10 ⁻⁶ Ω	
1	1040	2,75	83,2	81,4	6,6		} Compensation efficace Minimum Z ₀ ≈ R
2	1055	5,5	84,5	80,9	13,5		
3	1075	8,25	86,2	81,6	19,9	75,9	
4	1080	11,0	86,2	81,0	25,6	75,0	
5	1080	13,75	86,4	80,9	31,0	74,9	
6	1060	16,5	84,5	79,3	35,3	74,8	
7	1065	19,25	84,6	80,0	44,5	75,6	
8	1065	22,0	84,6	80,5	44,5		
9	1065	24,75	84,8	81,4	48,3		
10	1065	27,5	85,0	82,2	51,8		

Résistance mesurée par microhmmètre Chance (courant continu):
 $R_{ab} = 73,5 \cdot 10^{-6} \Omega$ à la température du conducteur T = 103°C

Les résultats de mesures sont présentés dans le tableau 4.10. On obtenu une très bonne concordance des valeurs de la résistance du conducteur (à la température de 103°C):

- résistance déterminée par la mesure de la chute de tension (courant alternatif):

$$R = 74,8 \cdot 10^{-6} \Omega$$

- (courant continu):

$$R = 73,5 \cdot 10^{-6} \Omega$$

L'écart des valeurs inférieur à 2%, confirme la possibilité de détermination de la résistance des conducteurs (et des raccords) par une mesure de la chute de tension.

L'essai confirme la possibilité de l'élimination de la composante selfique de la chute de tension par une boucle de compensation accouplée au champ magnétique au voisinage du conducteur. La dimension optimale c de cette boucle déterminée par l'expérimentation: $c = (11...20)$ mm est proche de la valeur théorique (pour un conducteur unique) $c = 0,325 D = 10$ mm.

4.7.3.2.10. Conception d'application pratique du principe de la compensation de la composante selfique de chute de tension

On propose d'appliquer une boucle de compensation à géométrie variable (dimension c réglable). Le réglage de c peut s'effectuer avant les mesures selon les valeurs calculées. On peut remplacer la bande, par une bobine avec n spires et la surface F_b :

$$n \approx \frac{c l}{F_b} \quad (4.122)$$

Il est aussi possible d'appliquer le réglage pendant les mesures de la chute de tension, prenant en compte que la compensation est optimale pour:

$$\Delta U \rightarrow \min \quad (4.123)$$

4.7.3.2.11. Structure d'un dispositif de mesure de la chute de tension sur un conducteur ou raccord de la ligne aérienne

a) Appareil de mesure

On propose d'utiliser comme appareil de mesure, un millivoltmètre électronique avec les caractéristiques suivantes:

a) Entendue de mesure:

I : 0 - 10 mV,

II : 0 - 100 mV,

III : 0 - 1000 mV.

b) Précision de mesure $\pm 1\%$ de la valeur maximale

c) Résolution de mesure:

I : 0,1 mV,

II : 1 mV,

III : 10 mV.

d) Alimentation par source propre.

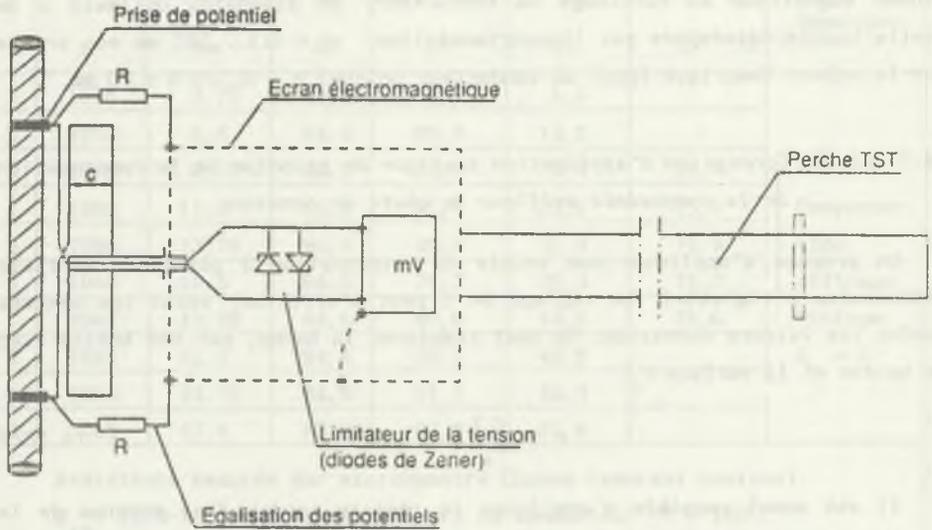


Fig.4.43. Conception du dispositif pour la mesure de chute de tension sur les conducteurs ou les raccords de lignes aériennes

Rys.4.43. Koncepcja układu do pomiaru spadku napięcia na przewodach lub złączach linii napowietrznych

b) Protection du dispositif contre l'influence du champ électromagnétique

L'appareil de mesure doit être posé dans un boîtier métallique qui peut assurer le rôle d'un écran électromagnétique. Chaque prise de potentiel doit être liée au boîtier par une résistance faible mais beaucoup plus grande que la résistance du conducteur comprise entre les prises du potentiel (par exemple 10 ohm). A l'entrée du millivoltmètre, on applique un limiteur de tension, par exemple composé de 2 diodes Zener (ou un autre limiteur adapté aux conditions de mesure).

Tous les conducteurs en dehors du millivoltmètre doivent être équipés d'un écran lié directement au boîtier métallique.

c) Pose de dispositif sur la ligne

On peut utiliser des perches de TST comme support pour le dispositif en

cas de mesures sur les lignes sous tension.

d) Pince auto-nettoyante de mesure des chutes de potentiel sur des raccords de conducteurs nus de lignes aériennes d'énergie

Cet appareil permet la prise de la chute de potentiel sur des raccords réalisés sur les conducteurs nus de lignes aériennes sous tension électrique. Les prises de potentiel sont des pinces à ouverture par pression sur le conducteur. Le contact est établi par l'intermédiaire d'une élingue en acier d'un diamètre de 0,4 mm environ.

Cette élingue a pour but:

- le nettoyage de la surface de contact par déplacement lors de l'introduction du câble ou du raccord dans les pinces,
- le contact est établi sur au moins 50 % du périmètre du conducteur ou manchon,
- l'adaptation aisée et continue aux différents diamètres de conducteurs et raccords, exemple de la pince courante $\varnothing 15$ à $\varnothing 55$ mm.

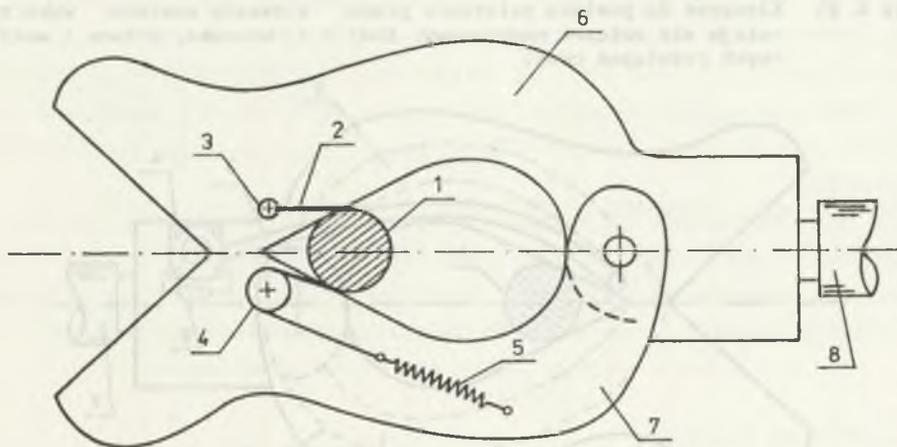


Fig. 4.44. Disposition de mécanisme de la pince de prise de potentiel auto-nettoyante; 1-Conducteur ou manchon, 2-Elingue en acier, 3-Point de fixation et borne de potentiel, 4-Roulette, 5-Ressort de rappel, 6-Mâchoire fixe, 7-Mâchoire mobile, 8-Perche de manoeuvre

Rys. 4.44. Rozmieszczenie części składowych kleszczy przyłączających do pomiaru spadku napięcia, samoczyszczących się; 1-przewód lub tuleja, 2-linka stalowa, 3-punkt zamocowania i zacisk napięciowy, 4-krażek 5-sprężyna odciążana, 6-szczęką stałą, 7-szczęką ruchoma, 8-drażek manipulacyjny

e) Pince ampéremétrique par bobine de Rogowski applicable sur les lignes aériennes HT et THT

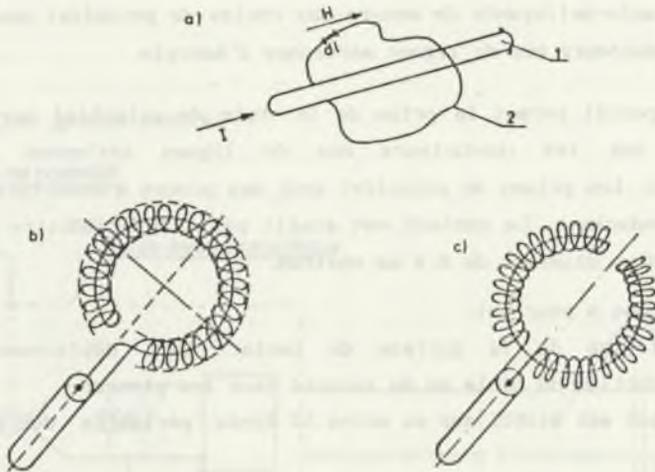


Fig. 4. 45. Pince ampéremétrique; a-Principe de la mesure: on utilise la relation fondamentale: $\oint hdl = I$, b-Bobine utilisée, c-Autre disposition possible de la bobine

Rys. 4. 45. Kleszcze do pomiaru natężenia prądu; a-zasada pomiaru: wykorzystuje się związek podstawowy: $\oint hdl = I$, b-cewka, c-inne z możliwych rozwiązań cewki

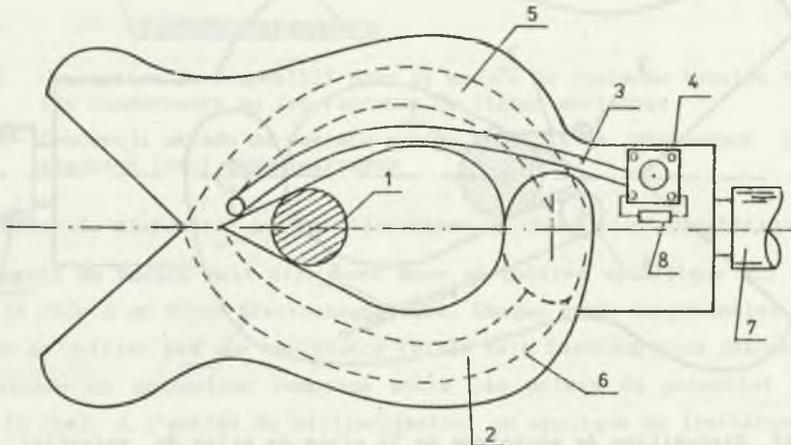


Fig. 4. 46. Disposition de la pince; 1-Conducteur, 2-Bobine de ROGOWSKI, 3-Coaxial de mesure, 4-Prise voltmètre, 5-Mâchoire fixe métallique, 6-Mâchoire mobile métallique, 7-Perche de manutention (TST), 8-Résistance

Rys. 4. 46. Budowa kleszczy do pomiaru natężenia prądu; 1-przewód, 2-cewka Rogowskiego, 3-koncentryczny przewód pomiarowy, 4-gniazdo woltomierza, 5-metalowa szczeka stała, 6-metalowa szczeka ruchoma, 7-drażek manipulacyjny, 8-opornik

La construction proposée de la pince ampèremétrique est originale car:

- la bobine de ROGOWSKI flexible est posée à l'intérieur de mâchoires métalliques qui assurent l'égalisation du champ électrique le long de la bobine.
- la forme géométrique et les dimensions des mâchoires limitent l'intensité du champ électrique à un niveau inférieur au seuil de décharge par effet couronne.
- une résistance (8) permet de régler la sensibilité de la bobine et de limiter la différence de potentiel à ses bornes.

Un filtre électrique (50 Hz) branché entre la bobine et le voltmètre permet d'éliminer l'influence de la distorsion de la forme du courant sur les résultats de mesures. Cette bobine peut être utilisée sur une perche isolante TST avec le voltmètre.

CHAPITRE 5

CHARGE ADMISSIBLE D'UNE LIGNE AERIENNE EN FONCTION DE L'ETAT DE DEGRADATION ELECTRIQUE DES RACCORDS

5.1. INTRODUCTION

Le vieillissement des raccords de jonction ou d'ancrage des lignes aériennes HT et THT se caractérise par un échauffement dépassant celui des conducteurs. L'exploitation d'une telle ligne à l'IMAP provoque un échauffement des raccords supérieur aux valeurs admissibles, ce qui entraîne une accélération de leur vieillissement, la diminution de leur durée de vie et l'augmentation du risque de rupture du conducteur.

Dans le cas où la ligne contient un raccord vieilli (avec une résistance plus grande que la résistance admissible), on peut diminuer la charge de la ligne et garder l'échauffement du raccord égal à l'échauffement admissible des conducteurs. Ceci permet d'augmenter la durée de vie résiduelle du raccord, de diminuer la risque de défaillance et de préparer le remplacement du raccord.

Ce chapitre présente les formules analytiques pour déterminer l'intensité admissible d'une ligne aérienne avec des raccords vieillis (dont la résistance dépasse la résistance admissible) en admettant de limiter l'échauffement des raccords à l'échauffement admissible des conducteurs.

5.2. METHODE DE CALCUL

La méthode proposée ci-dessous, utilise le modèle de l'ensemble raccord-conducteurs présenté dans le chapitre 4.4. L'analyse du modèle donne la relation entre l'échauffement au milieu du raccord (point le plus chaud), le courant transité et les paramètres du raccord et les conducteurs :

$$\Delta T_0 = r I^2 w (1 - A_0) + I^2 r_1 w_1 A_0 \quad (5.1)$$

On suppose que pour un raccord admissible on a les relations:

$$r = r_{ad} \quad (5.2)$$

$$\Delta T_0 = \Delta T_1 = \Delta T_{ad} = I_{ad}^2 r_1 w_1 = I_{ad}^2 r_{ad} w \quad (5.3)$$

Avec un raccord vieilli

$$r > r_{ad} \quad (5.4)$$

on diminue le courant permanent à la valeur I_x et on garde la relation :

$$\Delta T_0 = \Delta T_{ad} \quad (5.5)$$

$$\Delta T_{ad} = r I_x^2 w (1 - A_0) + I_x^2 r_1 w_1 A_0 \quad (5.6)$$

La comparaison des formules (5.3) et (5.6) donne la relation finale:

$$I_x = I_{ad} \sqrt{\frac{1}{\frac{r}{r_{ad}} (1 - A_0) + A_0}} \quad (5.7)$$

où: I_{ad} - est le courant permanent qui provoque l'échauffement admissible ΔT_{ad} des conducteurs, sans prendre en compte les raccords, en A,

\bar{r} - est la plus grande résistance relative des raccords de la ligne analysée, sans dimension,

r_{ad} - est la résistance relative admissible du raccord analysé, sans dimension,

A_0 - est le coefficient qui détermine l'influence de la conduction thermique entre un raccord et les conducteurs sur l'échauffement maximal du raccord, sans dimension:

$$A_0 = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 \operatorname{sh} \frac{\gamma_1}{2} + \gamma_1 \operatorname{ch} \frac{\gamma_1}{2}} \quad (5.8)$$

où,

$$\gamma = \sqrt{\frac{w \lambda}{w}} \quad (5.9)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{w \lambda_1}{w_1}} \quad (5.10)$$

- où l - est la longueur du raccord, en m,
 γ, γ_1 - sont les coefficients de transmission thermocinétique du raccord et des conducteurs, en $1/m$,
 w_λ - est la résistance thermique unitaire de conduction du raccord, en K/Wm ,
 $w_{\lambda 1}$ - est la résistance thermique unitaire de conduction des conducteurs, en K/Wm ,
 w - est la résistance thermique unitaire entre le raccord et l'ambiance, en $K./Wm$,
 w_1 - est la résistance thermique unitaire entre le conducteur et l'ambiance, en K/Wm .

Le chapitre 4.4. présente aussi un modèle numérique de l'ensemble raccord-conducteurs qui permet de prendre en compte la non-linéarité des paramètres thermiques de la structure analysée.

5.3. EXEMPLE NUMERIQUE

On calcule le courant admissible d'une ligne composée de conducteurs Crocus 228 et de raccords de jonction étirés, en fonction de la résistance des raccords. On suppose que l'échauffement maximal des raccords reste égal à celui des conducteurs (loin des raccords).

Pour un conducteur Crocus 228 on a :

$$\gamma_1 = 4,4 \text{ 1/m}$$

Pour un raccord étiré, de diamètre $D_1 = 29,5 \text{ mm}$ et de longueur $l = 1,04m$; on a :

$$\gamma = 2,9 \text{ 1/m.}$$

On calcule le coefficient A_0 :

$$A_0 = \frac{1}{\frac{\gamma}{\gamma_1} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} = 0,27$$

et le rapport

$$\frac{I_x}{I_{ad}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\bar{r}}{\bar{r}_{ad}} (1 - A_0) + A_0}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\bar{r}}{\bar{r}_{ad}} 0,73 + 0,27}}$$

Tableau 5.1

Résultats de calculs du courant admissible

$\frac{r}{r_{ad}}$	1,0	1,2	1,5	2	3
$\frac{I_x}{I_{ad}}$	1,0	0,93	0,86	0,76	0,64

Il faut souligner que la durée de vie d'un raccord dont la résistance dépasse considérablement la résistance admissible est limitée en fonction de la température maximale atteinte. La simulation numérique du vieillissement du raccord [125] sur conducteurs Crocus 228 donne les résultats présentés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2

Durée de vie résiduelle (temps jusqu'à la rupture) du raccord sur conducteurs Crocus 228 sous la charge admissible des conducteurs: $I = I_{ad} = 610 \text{ A}$

Dépassement de la résistance $\frac{r}{r_{ad}}$ du raccord	1,0	1,2	1,5	2	3
Durée de vie résiduelle	3 mois	1 mois	2 semaines	1 semaine	nulle

La diminution de la charge de la ligne conformément aux valeurs données dans le tableau 5.1 permet de prolonger la durée de vie des raccords et de préparer leur remplacement. Les calculs effectués pour le raccord sur conducteurs Crocus 228 sont présentes dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3

Durée de vie résiduelle du raccord sur conducteurs Crocus 228 sous charge diminuée conformément au tableau 5.1.

Dépassement de la résistance $\frac{\bar{r}}{\bar{r}_{ad}}$ du raccord	1,0	1,2	1,5	2	3
Charge électrique $\frac{I_x}{I_{ad}}$ relative	1,0	0,93	0,86	0,76	0,64
Durée de vie résiduelle	3 mois	3 mois	2 mois	1 mois	< 1 mois

Des résultats obtenus ci-dessus on voit que la durée de vie résiduelle des raccords dont la résistance a atteint ou dépassé la résistance admissible est de l'ordre de quelques semaines. Une diminution de la charge de la ligne fonction de l'état de dégradation des raccords permet d'aménager un délai supplémentaire pour préparer le remplacement des raccords vieillissants.

Il faut noter que la méthode et les valeurs de la charge proposées dans cette note s'inscrivent dans le cadre de l'entretien des lignes qui doit aboutir au remplacement des raccords vieillissants. L'étude du déclassement d'une ligne pour prolonger sa durée de vie résiduelle de façon sensible, demande une approche différente.

CONCLUSIONS

Le diagnostic des raccords des lignes aériennes a une grande importance pour leur exploitation. Ce diagnostic demande une modélisation mathématique des phénomènes physiques ayant lieu dans les raccords électriques.

L'intérêt d'une modélisation des raccords des conducteurs de lignes aériennes est tout d'abord scientifique car elle nécessite la compréhension des phénomènes variés qui sont en jeu pour isoler ceux qui sont effectivement les plus influents, mais surtout pratique car elle permet par la simulation d'envisager facilement de nombreux cas d'étude pour répondre aux questions qui se posent en exploitation. Ainsi, on peut, en particulier, mettre en évidence:

- l'intérêt d'un contrôle non destructif initial de la qualité de réalisation des raccords afin de leur assurer une espérance de vie suffisante,
- la nécessité d'un outil de diagnostic précis de l'état de dégradation des raccords en service par mesure au potentiel de leur résistance électrique qui permette de détecter les raccords vieillis avant qu'ils ne constituent un risque d'avarie de la ligne.

Le modèle mathématique de l'ensemble raccord-conducteurs permet de déterminer les relations entre l'échauffement et la résistance du raccord et par cela d'évaluer de la qualité des raccords en exploitation. Pour définir un raccord du point de vue électrique, il est nécessaire de mesurer la résistance du manchon du conducteur et la résistance initiale du raccord ainsi que de calculer la résistance idéale, la résistance maximale admissible et la capacité de vieillissement.

L'échauffement et la résistance du raccord peuvent être mesurées sous tension et sous charge de ligne aérienne. Les méthodes proposées assurent une sécurité d'exécution des mesures.

Pour une ligne aérienne avec des raccords vieillis on peut calculer l'intensité admissible du courant.

Le vieillissement électrique des raccords de lignes aériennes peut être modelé globalement. La modélisation du vieillissement permet d'évaluer de la dégradation des raccords dans diverses conditions d'exploitation. Les apports de cette modélisation intéressent directement les domaines du renouvellement et de l'exploitation des ligne aériennes: augmentation de la capacité de transit permanent, prolongation de la durée de vie d'une ligne par déclassement du profil d'exploitation et fonctionnement occasionnel des lignes THT à 75°C et 90°C.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BABIKOW N.A. : Električeskije apparaty. Gosenergoizdat, 1963.
- [2] BELCIN G.S., KISIELOW B.J.: Silnotočnyje električeskije kontakty. Naukova Dumka, Kiew 1972.
- [3] GARBALLEIRA A.: Notion de constriction dans les contacts electriques, ESE Paris 1976, Nr 5251 (skrypt), s. 73.
- [4] CHOLEWICKI T.: Elektrotechnika teoretyczna. WNT, Warszawa 1971.
- [5] DWIGHT H.B.: Elektrical Coils and Conductors. New York 1945.
- [6] ERK A., SCHMELZLE M.: Grundlagen der Schaltgeratetechnik. Springer Verlag, Berlin 1974.
- [7] FÉCHANT L.: I. Conduction électrique dans les contacts courants forts. II. Comportement des contacts dans l'appareillage de commande BT. Session de perfectionnement ESE. Paris. Phenomenes de contact électrique 26-29. IV. 1976 (skrypt), s. 110.
- [8] GOWORKOW A.W.: Pole elektryczne i magnetyczne. WNT, Warszawa 1962.
- [9] HERING M.: Termokinytyka dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
- [10] HOLM R.: Electric Contacts Handbook. Springer Verlag 1958 Ed. III.
- [11] HOFT H.: Elektrische Kontakte. Physikalische Grundlagen. Verlag Technik, Berlin 1977.
- [12] KAETANOWIĆ M.M. JAKOBSON I.A.: Sojedinienije przewodow vozdušnych linii elektropieriedači. Energia, Moskwa 1972.
- [13] KIM E.I., OMEŁČENKO W.T., HARIN C.N.: Silnotočnyje električeskije kontakty. Naukova Dumka, Kiew 1970.
- [14] KUKKOW G.A.: Projektirovanije wyklučatielej pieriemennogo toka vysokogo napriazhenija. Gosenergoizdat 1961.
- [15] LLELEVYN-JONES F.: The Physics of electric Contacts. Oxford 1957.

- [16] MAKSYMIOUK J.: Aparaty elektryczne. Podstawy doboru i eksploatacji. WNT, Warszawa 1977.
- [17] MAU H. J.: Kontakte in der Elektrotechnik. Akademie Verlag, Berlin. 1965.
- [18] POŁOZY G.N. i in.: Metody przybliżonych obliczeń. WNT, Warszawa 1966.
- [19] BAER G.: Ermittlung und Aussagekraft statistischer Kontaktwiderstands-Kennwerte. Elektrische 1974, II.7, ss. 375-377.
- [20] BARTODZIEJ F., GUZIK J.: Złącza stykowe w urządzeniach elektroenergetycznych. ZN Pol. Śląskiej s."Elektryka" z.21, Gliwice 1966.
- [21] BARTODZIEJ G.: Modelowanie złączy stykowych linearnych. ZN Pol. Śląskiej s."Elektryka" z.76, Gliwice 1981, ss. 153-164.
- [22] BARTODZIEJ G., KIŚ W.: Zastosowanie teorii linii elektrycznej jednorodnej do określenia temperatur w torach prądowych skokowo niejednorodnych. ZN Pol.Śl. s."Elektryka" z.76, Gliwice 1981, ss. 35-42.
- [23] BARTODZIEJ G.: Kriterien zur quantitativen Bewertung der Qualität elektrischer Kontaktverbindungen. Wiss. Zeltachr. der TH Leipzig, nr 4, 1981.
- [24] BARTODZIEJ G., KIŚ W.: Obciążalność prądowa torów prądowych urządzeń elektroenergetycznych. Biuletyn Energoprojektu Kraków "Sieci Elektryczne", przyjęte do druku (1982).
- [25] BERGOLD K., FAIKUS K.: Zur Frage des Kontaktverschweissens bei Leistungsschutzschaltern. ETZ-B Bd 17, 1965, II.6, ss. 130-132.
- [26] BERGOLD K., FAIKUS K.: Zur Frage des Verschweissens einschaltender Kontakte. ETZ-B, Bd.17, II.15, ss. 489-491.
- [27] BOND N.T.: Aluminium contact surfaces in electrical transition interfaces. El. Contacts 1968, ss. 19-25.
- [28] BORCHERT L.: Allgemeine physikalische Grundlagen. Elektrische Kontakte 1970, Bd.1, ss. 11-15.
- [29] BORUSIEWICZ L., CICHOCKI K.: Styki w obwodach silnoprądowych, Energetyka, t.26, 1972, nr 4, ss. 133-134.

- [30] BOUGGES J.: Contacts semipermanents. Courant faible: connecteurs. Ecole Sup. d'Electr. SPE 7, 1967.
- [31] BRON O.B., DZEKTSER N.N.: Contact connections of multi ampere current-carrying bus-bars. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph., 1974, ss. 375-381.
- [32] CICHOCKI A., OSOWSKI S.: Nowa metoda badania elektrycznych układów łańcuchowych uogólnionych. Praca V Sympozjum "Metody matematyczne w elektrotechnice", 1976, ss. 284-292.
- [33] DIETRICH B.: Zum Verhalten geschlossener Kontaktstücke mit Fremdschicht bei Stromfluss. Elektrische Kontakte, Bd.1, s. 12-22, VDE Verlag Berlin.
- [34] DOMONKOS S., PAPP G.: The analysis of the current distribution of parallel contacts in the case of direct and alternating currents. Proc. VIII Int. Conf. El. Contact Ph. Tokio 1976, ss. 559-565.
- [35] DZIERZBICKI S., WALCZUK E.: Über das Verschweissen geschlossener Starkstrom-Flächenkontakte. Proc. III Int. Conf. El. Contact Ph., Orono 1966, ss. 245-248.
- [36] ERK A.: Über die thermische Beanspruchung von Starkstromkontaktstücken bei Kurzzeitbelastung mit hohen Strömen. ETZ-A, Bd.85, 1964, H.8, ss. 226-231.
- [37] ERK A., SCHRÖDER K.H.: Über das Verschweissen geschlossener Starkstromkontaktstücke bei hohen Wechselströmen. ETZ-A, Bd.85, 1964, H.8, ss. 231-238.
- [38] FARRELL T., NAYBOUR R.D.: The effect of contact voltage on the performance of electric contacts. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph., 1974, ss. 388.
- [39] FEHLING H.: Über die Kontaktbeanspruchung an Schnellschaltern bei hohen Spitzströmen. AEG Mitt., Bd.48, 1958, H.4/5, ss. 191-196.
- [40] GREENWOOD J.A.: Constriction resistance and the real area of contact. Brit. J. Appl. Physics 17, 1966, ss. 1621-1632.
- [41] GRUSZCZYŃSKI W., HRYŃCZUK J., WIERZBA H.: On the thermal stability of electric contacts. El. Contacts 1972, ss. 225-229.
- [42] GUYETAND A.: Contribution a l'etude des contacts electriques separables : synthese bibliographique. RGE, t.83, N°1, 1974, ss. 3-26, N°2, 1974, ss. 102-124.

- [43] HILGARTH G.: Über die Grenzstromstarken ruhender Starkstromkontakte, ETZ-A, Bd.78, 1957, H.6, ss. 211-217.
- [44] HILGARTH G.: Zusammenhang zwischen Kontaktspannung und Kontaktstellentemperatur bei Kurzzeitig bebelasteten Starkstromkontakten. ETZ-A, Bd.79, 1958, H.13, ss. 464-468.
- [45] HÖFT H.: Die Übertemperatur an elektrischen Kontakten mit Fremdschicht WZ TH Ilmenau Bd.12, 1966, H.2, ss. 155-158.
- [46] HÖFT H.: Das Verschweissen elektrischer Starkstromkontakte Elektrie 1966, H.4, ss. 164-167.
- [47] HORTOPAN G.: Die Erwärmung der elektrischen Flächekontakte Elektrische Kontakte 1970. VDE Verlag, ss. 102-108.
- [48] HORTOPAN G.: Die Erwärmung der elektrischen Flächenkontaktstücke. ETZ-A, Bd.93, 1972, H.4, ss. 212-215.
- [49] HUBHARD D.C.: Elements of good connections. Change Tips. Oct. 1957.
- [50] HUEBER B.F.: Joule heating and development of temperature in asymetric metallic current constriction. El. Contracts 1972, ss. 33-35.
- [51] HUS J.: The contacts resistance of lam joints. Proc. VII Conf. El. Contact Ph., Paris 1974, ss. 369-374.
- [52] JOHANN H.H.: Wärmeausgleich und Über-temperatur an Gürateanschlüssen. ETZ-A, Bd.85, 1964, H.1, ss. 14-21.
- [53] JOHANNET P.: Contacts permanents et samipermanents á courant fort. Problemes spécifiques. EdF, note techn. 24.IV.1976, ss. 70.
- [54] JOHANNET P.: Appareillage électrique. Echauffement des conducteurs et de bornes de raccordement. EdF, note techn. M71/3734/PHo/TPLD.
- [55] JOHANNET P.: Study of a mathematical model represent ing the ageing af electrical contacts versus time. IEEE Trans. PAS 1972, ss.1211-1219.
- [56] JOHANNET P.: Les mecanismes de vieillissement dans les contacts electriques et l'influenca des echauffements sur leur durée de vie. Bull.Der, N°4, 1971, ss. 49- 136.
- [57] JOHNSON J.L., MOBERLY L.E.: Separable electrical-power contacts involving aluminium bus bars. El. Contacts 1975, ss. 53-59.

- [58] KEIL A.: Der elektrische Kontakt als Gegenstand der Forschung Bull. SEV, Bd.55, 1966, H.2, ss. 51-58
- [59] KHARIN S.N.: Models for investigation of heat and mass transfer in electrica contacts. Proc. VIII. Int. Conf. El. Contact Ph. 1976, ss. 553-558.
- [60] KLENGEL H.: Der Einfluss von Hautschichten auf den Übergangswiderstand von Aluminium-Pressverbindungs-Armaturen. Elektro-App. Mitt. S/1967, ss. 5-8.
- [61] KUSZKE H.: Wpływ zużycia styku w złączkach zaprasowa nych w przewodach stalowo-aluminiowych na rozptyw prądu w połączeniu. Prace IESU Gliwice, Listopad 1977.
- [62] LANGERON H.P.: Propietes fondamentales de metaux. Ecole Sup.d'Electr. SPE 7, 1976, s. 25.
- [63] LIPSKI T.: Badania nad stykami silnoprądowymi. Przegląd Elektrotechn. 1953, nr 11/12.
- [64] MAU H. J., MÜLLER B.: Eine Methode zur Bestimmung der Stromtragfähigkeitsgrenze ruhender Kontakte. Proc. VIII. Int. Conf.El.Contact Ph., 1976, ss. 252-256.
- [65] MAU H.J.: Stan wiadomości o narażeniach elektrycznych zestyków silnoprądowych. Przegląd Elektrotechn. 1970, Nr 11.
- [66] MAU H.J.: Über die Kontaktspannung und die Stromdichte in der Stromenge hochbelasteten Kontakte - II Int. Tagung uber elektr. Kontakte Graz 1964, ss. 112-132.
- [67] MAYER U., MERL W.: Kontaktpflegemittel in der Elektrotechnik. ETZ-8, 1971, H. 26, ss. 656-658.
- [68] MERL W., HORN G.: Der ruhender Kontakt. 2 Seminar "Kontaktverhalten und Schalten". Karlsruhe 1973, ss. 2-5.
- [69] MOLNAR I.: The temperature rise of heavy current line contacts. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph. 1976, ss. 547-552.
- [70] NAYBOUR R.D., FARRELL T.: Connectors for aluminium cables. A study of the degradations mecanismes and design criteria for reliable connectors. El. Contacts 1972, ss. 107-115.

- [71] NAYBOUR R.D., FARRELL T.: Degradation mecanismes of mechanical connectors on aluminium conductors. Proc. IEE Vol. 120, 1973, ss. 273-280.
- [72] NAYBOUR R.D., FARRELL T.: A short duration test power connectors to be used on aluminium conductors. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph., 1974, ss. 395-398.
- [73] NAYBOUR R.D., EELES W.T., CHESTER P.F.: Electrical contact to aluminium. Elektrische Kontakte 1970, Bd.1, ss. 54-57.
- [74] NEMOIANU C., CRISTEA N.: La resistance transitoire de striction dans l'accouplement linearie. Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. of Energ. 17, N°3, 1970, ss. 389-396.
- [75] NISOL L.: Essai de synthese d'une techniqe ot d'un art de la connexion electrique. Industrie et sciences N°2, Juin 1975, ss. 1-19.
- [76] PAUKERT J.: Vliv technologie na prechedowy odpor kontaktu. Elektrot. časopis. 19, 1968, Nr 3.
- [77] PEARSON R.: Designing mechanical connectors of aluminium cables. Electr. Reviev, 4 Aug. 1972.
- [78] PLANTE M.P.: Raccordements electriques par contact des conducteurs usuels en aluminium et cuivre, Bull. SFE, t. IX, 1959, ss. 504-516.
- [79] RIEDER W.: L'echauffement des contacts sur l'appareillage de couplage et les jonctions, CIGRE 1956, N°124, ss 1-11.
- [80] SATO K., YOKOTA M., KABAYAMA S. Various factors influencing the connectability of aluminium conductors. Proc. VIII Int. Conf. El. Contact Ph., 1976, ss. 567-572.
- [81] SAVIGNY A.: Les raccordements des cables en aluminium. Revue d'Aluminium Nov. 1973, ss 613-622.
- [82] SCHONEBEERG H.: Untersuchungen an ruchenden Stark-Stromkontakten unter besonderer Berücksichtigung der plastischen Verformung. EAM, H.S/1967, ss. 1-5.
- [83] SCHRÖDER K.H.: Elektrische Kontakte in der Eneergletechnik (I, II, III) ETZ Bd.199 (1979), H. 20, 21, 22.

- [84] SKOCZYLAŚ J.: Obliczanie rozkładu napięć w linii długiej metodą elementów skończonych. Mat. V. Sympo zjum - "Metody matematyczne w elektrotechnice", 1976 r., ss. 459-463.
- [85] SNOWDON A.C.: Thermal and mechanical behaviour of static contacts carrying transient currents of high magnitude. III Int. Conf. El. Contact Ph., Orono 1966, ss. 15-26
- [86] TAKANO E., MANO K.: The failure mode and lifetime of static contacts. IEEE Trans. PMP-1, N^o2, 1968, ss. 51-55.
- [87] TITAS E.: Über die Anwendung statistischer Methoden auf die Auswertung von Versuchen mit elektrischen Kontakten. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph., 1974, ss. 327-332.
- [88] TURNER H.W., TURNER C.: Research into electric contact phenomena Electr. Times 26, June 1970.
- [89] TURNER H.W., TURNER C.: Factors reducing temperature rise in contactors. ERA Report N^o 5215.
- [90] TURNER H.W., TURNER C.: Physics of electrical contacts Electr. Times, 23. III. 1967.
- [91] TURNER H.W., TURNER C.: Factors influencing the reliability of contacts. Electr. Review 11 Oct. 1974, ss. 453-455.
- [92] WAGAR H.N.: The making of a good contact. Bell Lab. Rec. Vol. 46 1969, N^o VII/VIII.
- [93] WILIAMSON J.B.P.: Basic properties of electric contacts. El. Contacts Orno 1965.
- [94] WOLLENEK A.: Stromfaden-Kontaktmodell Elektrotechn. und Masch. Bau. Bd. 88/1971, ss. 423-427.
- [95] WOLLENEK A.: Einige aktuelle Forschungsaufgaben über ruhende hochbelastete Kontakte. ETZ-A, Bd. 93/1972, H. 4, ss. 207-211.
- [96] YOSHICKA Y.: Calculation of current distribution in heavy current contacts with many parallel finger contacts with many parallel finger contacts. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph. Paris 1974, ss. 382-386.
- [97] BARTODZIEJ G., DĄBROWSKA J., KAJURA A.: Badania połączeń śrubowych szyn płaskich Al-Al oraz Al-Cu. Praca NB-564 (417) RE-2/8/7/71, Gliwice 1974.

- [98] BARTODZIEJ G.: Etude des contacts a l'interieur d'un raccord EdF, BER, doc. de trav. HM 72/BG/Mc, 1978.
- [99] BARTODZIEJ G.: Etude d'un modele mathematique applicable a un raccord de conducteur nu de ligne aerienne. EdF. DER Doc. de travail HMO/BG/MC, 25 Mai, 1978.
- [100] BARTODZIEJ G., BLEUZEN M.: Methoda d'evaluation des resistances des raccords de jonction, de dervation et d'extermite et des connecteurs. EdF, DER, doc de travail HM 72/BG/MB/MC. Juin 1978.
- [101] BARTODZIEJ G., BLEUZEN M.: Examen de connecteurs AMPACT. Elaboration d'uns methode analytique. EdF, DER, doc. de travail HM 72/BG/MB/MC. Juillet, 1978.
- [102] BARTODZIEJ G.: Influence de la force de traction sur le comportement d'une jonction. EdF, DER, Doc. de travail. Mai 1978.
- [103] BARTODZIEJ G., BLUZEN M.: Methode d'investigation de l'etat des contacts des raccords de lignes aerienes. EdF, DER, doc. de trav. HM 72/04015/BG/MB/MC, 19.III.1978, p.9.
- [104] BARTODZIEJ G. : Modelowanie elektroenergetycznych złącz stykowych. Gliwice, październik 1979 (maszynopis).
- [105] BARTODZIEJ G. : Opracowanie kryterium oceny elektroenergetycznych złącz stykowych w oparciu o bezstykowy pomiar temperatury. Gliwice wrzesień 1980 (zlecenie ZPBE "Energopomiar" - maszynopis).
- [106] BARTODZIEJ G.: Równania rozplywu prądów w niejednorodnym złączu płaskim. Oprac. nie publ. (maszynopis) IESU Pol. Śląskiej, Gliwice 1981.
- [107] BARTODZIEJ G.: Równanie rozplywu prądu w złączu linearnym z dyskretnym rozkładem rezystancji. Oprac. niepubl. (maszynopis) Inst. Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej, Gliwice 1981.
- [108] BARTODZIEJ G.: Określenie warunków wyrównania rozkładu spadków napięcia na zestykach elementarnych w złączu linearnym prostym. Oprac. niepubl. (maszynopis) IESU Pol.Śl., Gliwice 1981.
- [109] BARTODZIEJ G.: Analiza układu termokinetycznego zawierającego jednorodne złącze proste zgodne i jednorodne przewody. Oprac. nie publ. (maszynopis) IESU Pol. Śl., Gliwice 1981.

- [110] BARTODZIEJ G.: Metoda numeryczna wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury w niejednorodnym linearnym układzie termokinetycznym. Oprac. nie publ. (maszynopis) IESU Pol. Śl., Gliwice 1981.
- [111] BARTODZIEJ G., DALLE B.: Methode simplifiée d'évaluation de la qualité d'un raccord. Note techni que EdF-BM-72-4712-BD/GB/MC, pp.17, 5.III.1982.
- [112] BARTODZIEJ G.: Étude des phénomènes électriques, thermiques liés au vieillissement des raccords électriques. Note technique EdF-HM/72-5299-GB/TPLD, 15.VII.1985.
- [113] BARTODZIEJ G., Le Huerou M.: Étude de possibilités de détermination de la résistance électrique des raccords sur la base de mesures en conditions de l'exploitation normale d'une ligne aérienne. Note technique EdF-HM-72/5899, 16.IX.1991.
- [114] BARTODZIEJ G.: Modelisation de l'ensemble raccord conducteurs de lignes aériennes pour le calcul de la repartition longitudinale de l'échauffement. Note technique EdF-HM-72/5901, 18.IX.1991.
- [115] BARTODZIEJ G., PENSERINI P.: Calcul de la charge admissible d'une ligne aérienne en fonction de l'état de dégradation électrique des raccords. Note technique EdF-HM-72/5913, 12.XII.1991.
- [116] BARTODZIEJ G., DALLE B.: Evaluation de la qualité des raccords de lignes et de postes à l'aide d'un microohmètre portatif, Note technique EdF/DER/ERMEL/PEL/HM 72-5226, 3.02.1985.
- [117] DALLE B.: Dimensionnement et vieillissement des raccords de conducteurs nus des lignes aériennes. EDF, Bulletin des Etudes et Recherches, série B, Réseaux Électrique, N° 3/4, 1983, pp 5-25.
- [118] DALLE B.: Etude theorique et experimentale de la capacite de vieillissement des raccords de conducteurs nus des lignes aeriennes. Opracowanie CIGRE, 22/81/WG- 05/02 22-SI(W605)02 z dn. 5.V.1981.
- [119] ECOCHARD L.: Appréciation du vieillissement électrique d'un raccord de ligne aérienne : "Veraline". Note technique EdF-HM-72/5816, 05. IX.1990.
- [120] HENGELHAUPT F.: Untersuchung des elektrischen Verhaltens von Abzweig-Pressverbindungen massiver Aluminiumleiter der Elektroinstallation. Diss. TH Karl-Mars- Stadt 1981.

- [121] KUSZKE H.: Opracowanie kryterium oceny stanu złącz linii napowietrznych najwyższych napięć na podstawie bezdotykowych pomiarów temperatury. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1977.
- [122] LE HUEROU M.: Avarie du raccord de jonction alu-acier 328 mm² - ligne Champagnier - Pariset 225 kV. Note technique EDF/HM 72-5827, 15.11.1990.
- [123] LE HUEROU M.: Synthèse des expertises d'avaries sur les conducteurs bi-metalliques du reseau de transport de 63 kV à 400 kV. Note technique EDF/HM 72-5850, 20.02.1991.
- [124] PENSERINI P.: Synthèse des fondements théoriques du logiciel Varaline. Note technique EDF/HM72-5869, 24.05.1991.
- [125] PENSERINI P.: Modelisation du comportement électrique des raccords de lignes aériennes. Note technique EDF/HM 72-5907, 29.10.1991.
- [126] PENSERINI P., LE HUEROU M., ECOCHARD L.: Modelisation du vieillissement de raccords de lignes et outil de controle sous tension. Textes des Communications de Journées d'Etudes, 10-11.12.1992, EDF-DER à Clamart.
- [127] BARTODZIEJ G., ROGUIN J., LAURENT G.: Calcul de l'échauffement transitoire d'un matériel électrique avec EMTP. Note technique HM/72-5258, 20.06.1985.

RESISTANCE ET L'ECHAUFFEMENT DES RACCORDS ELECTRIQUES

Résumé

Dans cet ouvrage on a considéré la possibilité d'utiliser la modélisation des raccords électriques du point de vue électrique et thermique pour la détermination des phénomènes électriques et thermiques ayant lieu aux raccords électriques. On a construit le modèle mathématique et le modèle physique des raccords plan et linéaire dont la répartition de la résistance de contact est discrète et continue.

Pour les raccords linéaires on a considéré l'influence du type, de la longueur, de la forme de la surface et de l'échauffement d'un raccord sur leur résistance.

Les solutions analytiques et numériques permettant d'obtenir la répartition du courant, de la chute de tension, de la résistance électrique, des pertes par l'effet de Joule et de l'échauffement composent la partie principale de cette étude.

Ces solutions, appliquées aux lignes aériennes, permettent d'apprécier de la capacité de vieillissement et la durée de vie d'un raccord ainsi que de calculer de la charge admissible d'une ligne aérienne en fonction de l'état de dégradation électrique des raccords.

Pour les raccords de conducteurs nus de lignes aériennes on a fait la vérification analytique, numérique et expérimentale de calcul de la résistance et de l'échauffement de raccords.

On a proposé la méthode d'évaluation de la qualité de raccords de lignes aériennes par la mesure de la température et de la chute de tension le long du raccord ainsi que par la mesure de la résistance électrique des raccords des lignes hors tension et en service.

On a proposé les solutions des appareils de mesure et présenté les résultats des calculs et des essais.

REZYSTANCJA I NAGRZEWANIE ZŁĄCZY STYKOWYCH

Streszczenie

W pracy rozważano możliwość wykorzystania modelowania elektrycznych złączy stykowych w celu określenia zjawisk elektrycznych i termicznych zachodzących w tych złączach. Skonstruowano modele matematyczne oraz modele fizyczne złączy płaskich i linearnych, w których rozkład rezystancji stykowej jest dyskretny oraz ciągły. Dla złączy linearnych rozważano wpływ typu, długości, kształtu powierzchni i nagrzewania złącza na jego rezystancję.

Rozwiązania analityczne i numeryczne pozwalające na określenie rozkładu prądu, spadku napięcia, rezystancji, strat mocy Joule'a i nagrzewania złączy stanowią część zasadniczą tej pracy.

Rozwiązania te zastosowane do linii napowietrznych umożliwiają ocenę zjawisk starzeniowych i ocenę żywotności złącza jak również obliczenie obciążenia dopuszczalnego linii napowietrznej w zależności od degradacji elektrycznej złączy.

Dla złączy stykowych przewodów gołych linii napowietrznych wykonano weryfikację analityczną, numeryczną i eksperymentalną obliczonych wartości rezystancji i nagrzewania złączy.

Zaproponowano metodę oceny jakości złączy linii napowietrznych poprzez pomiar temperatury i spadku napięcia wzdłuż złącza jak również poprzez pomiar rezystancji złączy linii napowietrznych w stanie beznapięciowym oraz w czasie normalnej pracy.

Zaproponowano rozwiązania aparatury pomiarowej i przedstawiono wyniki obliczeń i badań eksperymentalnych.

RESISTANCE AND HEATING OF CONTACT CONNECTORS

Summary

The paper investigates the possibility of using the electric contact connectors modelling to predict the electric and thermic effects occurring in the connectors.

The mathematical and phisical models of flat and linear connectors with the discrete and continuous distribution of contact resistance have been constructed.

Next, the influence of the type, length, surface structure and connector heating for the linear connectors has been analysed.

The analytical and numerical sollutions that allow to predict the current sistribution, the voltage drop, the resistance, Joule's power loss and the connectors heating are the main parts of the paper. Such sollutions aplyed to the aerial lines facilitate the prediction of ageing capabilities, the etailing no damage work time of the connector and the calculations of the basic aerial line-load in the function of connectors electric degradation.

Moreover, the analytical, numerical and experimental verification of the calculated resistance value and the connectors heating for the contact connectors has been analysed.

The methods of the aerial line connectors quality in the form of the temperature and the voltage drop measurement along the connector and in the form of the connectors resistance measurement without voltage and during normal work have been discussed.

The constructions of the measurement apparatus - and the calculation results and the experimental investigations have been presented.