

P 3347/82

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

ELEKTRYKA

**Z. 80
GLIWICE
1982**



P.3347/82

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 721

GERARD BARTODZIEJ

MODELE ELEKTRYCZNYCH ZŁĄCZY STYKOWYCH

OPINIODAWCY

Prof. dr hab inż. Jan Maksymiuk

Prof. mgr inż. Edmund Piotrowski

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Wiesław Gabzdyl (redaktor naczelny), *Zofia Cichowska* (redaktor działu),
Elżbieta Stinzing (sekretarz redakcji)

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Kazimiera Rymarz

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0072-4688

**Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice**

Nakł 150+85 Ark. wyd. 5,32 Ark. druk. 6,25 Papier piśmienny kl. III, 70x100, 70 g
Oddano do druku 31.05.1982 Podpis. do druku 17.08.1982 Druk ukończ. we wrześniu 1982
Zamówienie 541/82 B-24 Cena zł 53,-

**Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach**

SPIS TREŚCI

	Str.
1. WPROWADZENIE	5
1.1. Informacje wstępne	5
1.2. Podstawowa pojęcia	6
1.3. Przegląd zjawisk występujących w złączach	9
1.4. Cel i zakres pracy	12
2. MODELOWANIE WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH W ZŁĄCZACH STYKOWYCH	14
2.1. Założenia wstępne	14
2.2. Model matematyczny złącza niejednorodnego z dyskretnym rozkładem rezystancji zestykowej	17
2.3. Model matematyczny złącza linearnego z dyskretnym rozkładem rezystancji zestykowej	21
2.4. Modelowanie fizyczne złączy z dyskretnym rozkładem rezystancji zestykowej	26
2.5. Model złącza linearnego z ciągłym rozkładem rezystancji zestykowej	29
2.5.1. Równanie rozplywu prądu	29
2.5.2. Wyrażenie rezystancji złącza za pomocą funkcji podobieństwa i rezystancji złącza idealnego	32
2.5.3. Jednorodne złącze rozgałęźne	34
2.5.4. Jednorodne złącze proste	36
2.5.5. Złącze proste o wyrównanym spadku napięcia na zestykach elementarnych	40
2.6. Weryfikacja modeli zjawisk elektrycznych w złączach liniarnych	41
2.6.1. Zakres weryfikacji	41
2.6.2. Porównanie wyników obliczeń rozplywu prądów i rozkładu napięć wg metody analitycznej i numerycznej ..	41
2.6.3. Porównanie wyników obliczeń rozplywu prądów i rozkładu napięć z pomiarami na modelu analogowym	42
2.6.4. Badania laboratoryjne rozkładu napięć w jednorodnych złączach szyn płaskich	44
2.6.5. Wyniki badań prowadzonych we Francji oraz w NRD	48
3. MODELOWANIE STACJONARNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY W UKŁADZIE ZŁĄCZE-PRZEWODY	51
3.1. Wprowadzenie	51
3.2. Założenia wstępne	51

3.3. Uwzględnienie zależności źródeł mocy w układzie termokinetycznym od temperatury	54
3.4. Analityczny opis rozkładu przyrostu temperatury w liniowych układach termokinetycznych	56
3.5. Metoda numeryczna wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury w niejednorodnym liniowym i liniowym układzie termokinetycznym	60
3.6. Wyznaczenie przyrostu temperatury w liniowym i liniowym układzie złącze-przewody	65
3.7. Wpływ temperatury na rezystancję elementów złącza	65
3.8. Wyznaczenie rozkładu temperatury w nieliniowym liniowym układzie złącze-przewody	69
3.9. Uwagi o weryfikacji modeli opisujących stacjonarny rozkład temperatury	71
4. NIEKTÓRE PRZYPADKI ZASTOSOWANIA MODELI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ	73
4.1. Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych jednorodnego złącza prostego na jego rezystancję	73
4.1.1. Wpływ rodzaju złącza	73
4.1.2. Wpływ długości powierzchni zestykowej	74
4.1.3. Wpływ kształtu powierzchni zestykowej	76
4.1.4. Wpływ zmiany rezystancji jednego styku na rezystancję złącza	78
4.2. Określanie własności eksploatacyjnych elektroenergetycznych złączy stykowych	79
4.2.1. Obciążalność prądowa długotrwałe złącza	80
4.2.2. Wyznaczenie rezystancji granicznej złącza ze względu na nagrzewanie długotrwałe	83
4.2.3. Odporność starzeniowa i czas życia złącza	87
4.3. Kierunki dalszych badań	90
LITERATURA	92

1. WPROWADZENIE

1.1. Informacje wstępne

Złącza stykowe stosowane są powszechnie w urządzeniach elektrycznych, teletechnicznych i elektronicznych, wpływając na ich pracę.

Obecność złączy stykowych w urządzeniach jest wynikiem określonych technologii wytwarzania, a zwłaszcza proporcji między kosztami różnych technologii łączenia torów prądowych oraz potrzeby zapewnienia wygody montażu i możliwości wymiany całego urządzenia lub jego elementów.

Oddziaływanie środowiska przepływającej energii elektrycznej, a także zjawisk występujących w urządzeniach wywołuje w łączu proces starzenia (degradacji), grożący w końcowej fazie awarią urządzenia.

W przypadku złączy stykowych stosowanych w elektroenergetycznych liniach przesyłowych koszty awarii linii wynikających z uszkodzeń złączy¹⁾ są zwykle wysokie, wielokrotnie przekraczając wartość elementów tworzących złącze. Wymiana złączy stykowych jest utrudniona i wymaga wyłączenia linii z eksploatacji.

W 1978 r. w Electricité de France (Ośrodek w Clamart) podjęto - przy udziale autora - badania nad procesami starzenia i kryteriami oceny jakości złączy stykowych stosowanych w liniach napowietrznych, zwłaszcza najwyższych napięć.

W okresie 1979-1982 autor kontynuował samodzielnie badania, dążąc do uzyskania opisu matematycznego podstawowych zjawisk występujących w złączach stykowych.

Podjęając badania nad modelami matematycznymi i fizycznymi zjawisk w elektrycznych złączach stykowych autor zmierzał do:

- określenia metodyki wymiarowania złączy stykowych, przydatnej w pracach konstrukcyjnych, umożliwiającej celowe ukształtowanie złączy,
- ustalenia wymagań dotyczących granicznych własności elektrycznych i cieplnych złączy dla celów normalizacyjnych (próby typu, badania eksploatacyjne),
- stworzenia jednolitego metodycznie opisu zjawisk elektrycznych i cieplnych w złączach, przydatnego w badaniach nad starzeniem złączy stykowych, zwłaszcza elektroenergetycznych.

¹⁾ Statystyki Electricité de France zanotowały w 1975 r. 25 poważnych awarii linii napowietrznych o napięciu nie niższym od 63 kV, wywołanych uszkodzeniami złączy stykowych zaprasowanych.

Badania autora nawiązują do jego wieloletnich zainteresowań projektowaniem i konstrukcją urządzeń elektrycznych, zwłaszcza w zakresie problematyki oddziaływań cieplnych prądu elektrycznego i termokinetyki w urządzeniach elektrycznych.

Niniejsza monografia jest również kontynuacją dorobku zespołu Prof. T. Stępniewskiego, z którym łączy autora wieloletnia współpraca, a którego prace ukształtowały znaczną część stosowanego w Polsce osprzętu elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokiego napięcia (w tym również złączy stykowych).

1.2. Podstawowe pojęcia

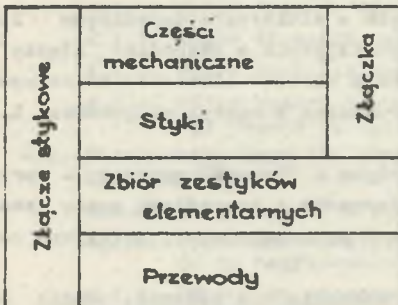
Problematyka stykowa nie posiada w polskim piśmiennictwie w pełni usystematyzowanego i wystarczającego słownictwa. Odnotować należy normę PN 74/E-01000^{x)} oraz zestawienie słownictwa dokonane przez S. Stolarza [19],

wymagające jednak uściślenia i rozszerzenia w stosunku do potrzeb występujących przy rozważaniu złączy stykowych.

Określenia wymagają często stosowane pojęcia złącze stykowe, zestyku, złączki. Na rys.1.1 przedstawiono zależności między tymi pojęciami.

Złącze stykowe jest układem konstrukcyjnym zawierającym styki, łączące przewody i osprzęt mechaniczny zapewniający docisk styków.

Zestyk - wg przyjętej systematyki - to układ 2 styków połączonych elektrycznie za pośrednictwem zbioru zestyków elementarnych (rys. 1.2).



Rys. 1.1. Schemat współzależności podstawowych pojęć dotyczących złącza stykowego

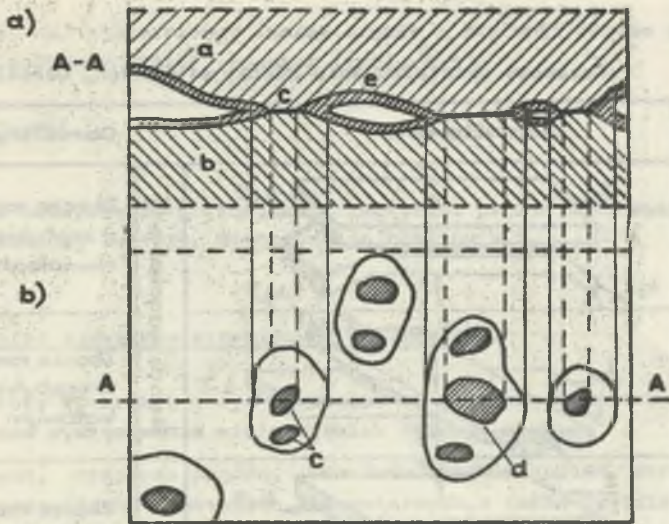
Złączka stanowi zestaw konstrukcyjny złożony ze styków i osprzętu mechanicznego.

Zależnie od kształtu miejsca geometrycznego zbioru zestyków elementarnych wyróżnia się zwykle [1] zestyki:

- punktowe,
- liniowe,
- powierzchniowe.

Złącza stykowe stosowane w elektroenergetyce zawierają zwykle zestyki powierzchniowe.

^{x)} łączniki elektroenergetyczne. Nazwy i określenia.



Rys. 1.2. Wycinek złącza z zestykami elementarnymi

a) przekrój, b) ślady zestyków elementarnych na geometrycznej powierzchni zetknięcia styków
 a, b - styki, c - zestyki elementarne (powierzchnie przewodzenia), d - powierzchnia oparcia, e - warstwa obca

Tablica 1.1

Podstawowe ukształtowania zestyków. Określenia

Ukształtowanie zestyku	Termin
	Zestyk szeregowy ¹⁾ Zestyk czokowy
	Zestyk równoległy ¹⁾
	Zestyk kątowy ¹⁾
Uwagi : oznaczenia : 1) propozycje autora a, b - styki k_1, k_2, k_3 - współczynniki rozptywu $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ - zbiór zestyków elementarnych	

Podstawowe ukształtowania złączy stykowych. Określenia

Oznaczenie	Ukształtowanie	Określenie
IV	<p>Diagram showing a parallel overlap joint. A top plate of thickness h and width b is subjected to a downward force F and a shear force I to the right. The bottom plate is fixed to a substrate. Stiffnesses are labeled: k_1 (top plate), k_2 (bottom plate), k_3 (substrate), and k_4 (overlap).</p>	Złącze rozgałęźne z zestykiem równoległym
IV _k	<p>Diagram showing a parallel overlap joint with a gap between the top and bottom plates. Forces F and I are applied. Stiffnesses k_1, k_2, k_3 are indicated.</p>	Złącze rozgałęźne z zestykiem kątowym
III _z	<p>Diagram showing a butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied. Stiffnesses k_1, k_2 are indicated, and $k_3 = 0$.</p>	Złącze rozgałęźne zgodne
III _p	<p>Diagram showing a butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied. Stiffnesses k_1, k_2, k_3 are indicated, and $k_3 = 0$.</p>	Złącze rozgałęźne przeciwne
III _k	<p>Diagram showing a butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied. Stiffnesses k_1, k_2, k_3 are indicated, and $k_3 = 0$.</p>	Złącze rozgałęźne kątowe
III _z	<p>Diagram showing a simple butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied.</p>	Złącze proste zgodne
III _p	<p>Diagram showing a simple butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied.</p>	Złącze proste przeciwne
III _k	<p>Diagram showing a simple butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied.</p>	Złącze proste kątowe
II _p	<p>Diagram showing a double simple butt joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied.</p>	Złącze proste zgodne
I ₀	<p>Diagram showing a zero joint with a gap between the two plates. Forces F and I are applied.</p>	Złącze zerowe

Ze względu na przestrzenny układ styków i kierunki prądów płynących przez zestyk można wyróżnić¹⁾ zestyki (tabl. 1.1):

- szeregowo,
- równoległe,
- kątowe.

Propozycje nazw złączy stykowych z zestykami powierzchniowymi, zależnie od realizowanej funkcji, zestawiono w tablicy 1.2.

1.3. Przegląd zjawisk występujących w złączach

Mimo prostoty konstrukcyjnej więkzości elektrycznych złączy stykowych są one miejscem występowania wielu zjawisk różnego rodzaju²⁾:

- elektrycznych; rozplywu prądów, rozkładu spadków napięć, strat mocy w stykach, przewodach, zestykach elementarnych, a także częściach mechanicznych;
- cieplnych; polegających na nagrzewaniu elementów złącza pod wpływem strat oraz warunków wymiany ciepła z otoczeniem i sąsiednimi elementami urządzenia, w którym złącze występuje;
- mechanicznych, wiążących się z występowaniem sił, naprężeń, i odkształceń w elementach złącza;
- strukturalnych; rekrytalizacji materiału styków (zwłaszcza na powierzchni zestykowej), relaksacji naprężeń i pełzania materiału;
- fizykochemicznych; korozji metali i powstawania warstw obcych o określonej strukturze.

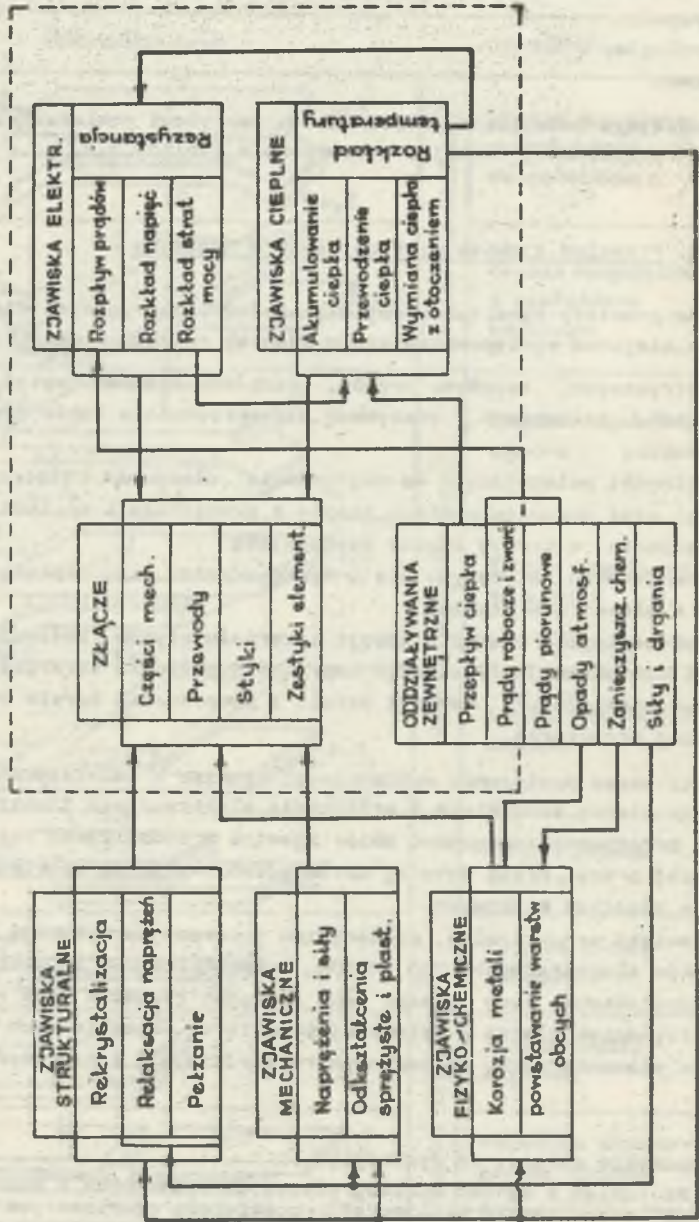
Podstawowe powiązania wymienionych zjawisk z oddziaływaniami zewnętrznymi ze strony środowiska i urządzenia elektrycznego ilustruje rys. 1.3. Linie przerywaną zaznaczono zbiór zjawisk i oddziaływań rozważanych w niniejszej pracy. Praca dotyczy zatem głównie zjawisk elektrycznych i cieplnych w złączach stykowych.

Zjawiska strukturalne, mechaniczne i korozyjne wpływają na zestyków elementarnych, ich liczbę, ukształtowanie i rozmieszczenie.

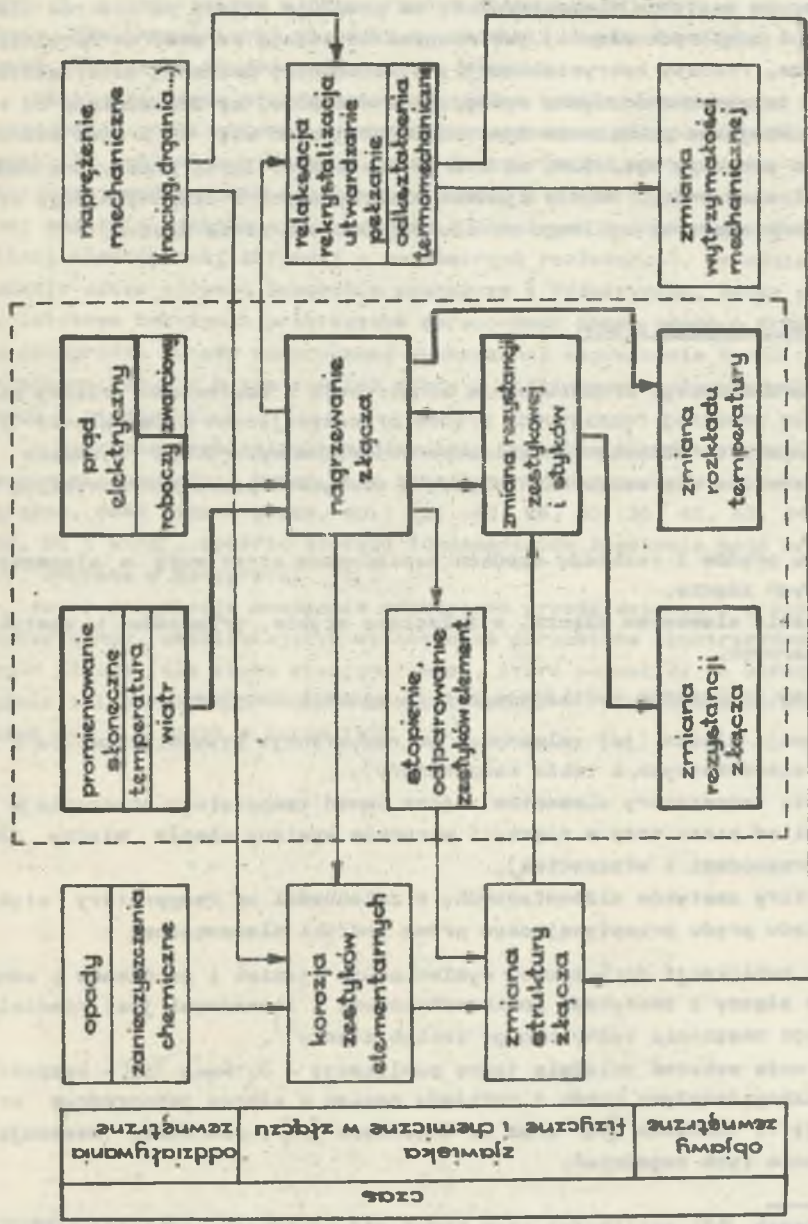
Pozostawienie tych zjawisk poza zakresem rozważań jest równoznaczne z rozpatrywaniem złącza o ustalonej strukturze, niezmiennych parametrach zestyków elementarnych, niezmiennym rozkładzie sił i naprężeń mechanicznych.

¹⁾ Propozycja autora, do dyskusji.

²⁾ Wg zestawień i syntezy bibliograficznych wydawanych z okazji "Seminariów Holma" można ocenić bibliografię poświęconą problematyce stykowej na ok. 7000 pozycji (stan na 1980 r.) z przyrostem rocznym o ok. 400 pozycji. Wg autora ok. 6-7% publikacji dotyczy złączy stykowych lub zestyków łączeniowych w stanie statycznym.



Rys. 1.3. Przegląd podstawowych zjawisk w złączach stykowych i ich współzależności



Rys. 1.4. Schemat powiązań zjawisk w procesie starzenia złącza na przykładzie złącza przewodów linii napowietrznej

Wymienione zjawiska związane są ze zjawiskami elektrycznymi, a następnie cieplnymi za pośrednictwem rezystancji zestykowej, wpływając na jej wartość.

Procesy starzeniowe w złączach stykowych oddziałują zarówno na zmianę parametrów zestyków elementarnych, co powoduje zmiany parametrów elektrycznych i cieplnych złącza, jak również na zmianę parametrów mechanicznych złącza. Procesy rekrytalizacji, utwardzania, pełzania materiału, odkształceń termomechanicznych, występujące w złączu, są uzależnione od temperatury. Wzajemne powiązanie zjawisk składających się na proces starzenia złącza pokazuje rys. 1.4, na którym zaznaczono linię przerywaną obszar objęty zakresem pracy. Modele zjawisk elektrycznych i cieplnych mogą stanowić główne elementy ogólnego modelu procesu starzenia złącza.

1.4. Cel i zakres pracy

Mimo bardzo dużego zróżnicowania konstrukcji i zastosowań złączy stykowych oraz znacznej rozpiętości prądów przepływających przez złącze (od ułamków ampera do dziesiątków kiloamperów) można wyodrębnić zjawiska i problemy wspólne dla wszystkich złączy z zestykami powierzchniowymi. Są to zjawiska:

- rozprężu prądów i rozkładu spadków napięć oraz strat mocy w elementach tworzących złącze,
- nagrzewania elementów złącza, a zwłaszcza styków, przewodów i zestyków elementarnych.

Problemy techniczne wynikające z tych zjawisk dotyczą:

- rezystancji złącza (jej zależności od rezystancji styków, przewodów i zestyków elementarnych, a także temperatury),
- przyrostu temperatury elementów złącza ponad temperaturę otoczenia (w zależności od strat mocy w złączu i warunków wymiany ciepła między złączem, przewodami i otoczeniem),
- temperatury zestyków elementarnych, w zależności od temperatury styków i rozkładu prądu przepływającego przez zestyki elementarne.

Liczba publikacji dotyczących wymienionych zjawisk i problemów w odniesieniu do złączy z zestykami powierzchniowymi i linearnymi jest niewielka mimo dużego znaczenia technicznego takich złączy¹⁾.

Autor może wskazać zaledwie jedną publikację - J. Hua [51] - bezpośrednio dotyczącą rozprężu prądu i rozkładu napięć w złączu jednorodnym oraz publikację Y. Yoshicka [96] oraz S. Domonkosa [34], pośrednio wskazujące na znaczenie tych zagadnień.

¹⁾ A. Wollenek [95] analizując stan badań nad zestykami podkreśla bardzo małą liczbę publikacji dotyczących zjawisk elektrycznych i cieplnych w zestykach płaskich i liniarnych.

Z zagadnieniem nagrzewania stacjonarnego styków wiąże się większa liczba publikacji, np. [43, 47, 48, 52, 54, 69, 79 i in.], dotyczących jednak szczególnych przypadków - złączy jednorodnych współpracujących z torami prądowymi jednorodnymi. Sposób wyznaczenia nagrzewania złączy i torów prądowych, przedstawiony w rozpatrzonym zbiorze publikacji, jest dość złożony. Brak uogólnionej metodyki wyznaczania nagrzewania złączy niejednorodnych, łączących niejednorodne tory prądowe.

Niniejsza praca przedstawi oryginalne modele matematyczne i fizyczne, opracowane przez autora, wyznaczające parametry elektryczne złączy stykowych. Za swój własny dorobek uważa autor również opracowanie metody analitycznej wyznaczania nagrzewania złączy i torów prądowych, wykorzystującej analogie zjawisk elektrycznych i cieplnych i nawiązującej do teorii linii elektrycznej aktywnej o parametrach rozłożonych. Metodzie tej przypisuje autor głównie znaczenie poznawcze i dydaktyczne, będąc przekonanym o istotnym znaczeniu praktycznym opracowanej przez niego i przedstawionej w monografii metody numerycznej wyznaczania nagrzewania torów prądowych niejednorodnych, w tym również torów o nieliniowych parametrach elektrycznych i cieplnych.

W zakresie problematyki nagrzewania zestyków elementarnych w złączach autor nie prowadził badań, a w przedłożonym opracowaniu wykorzystał dostępne, dość liczne prace, np.: [11, 25, 26, 35, 36, 41, 43, 44, 46, 50, 56, 85 i inne], spośród których fundamentalne znaczenie mają prace H. Höf-
ta, zebrane w monografii [11].

Autor przypisuje znaczenie praktyczne przedstawił w pracy metodom numerycznym, umożliwiającym wyznaczenie parametrów elektrycznych i cieplnych złącza (dla stanu stacjonarnego), które pozwoliły na opracowanie programu obliczeniowego RACCORD zrealizowanego w Fortranie w Ośrodku Badawczym EdF w Clamart w lutym 1982 r.¹⁾

¹⁾ Program dostępny w Politechnice Śląskiej.

2. MODELOWANIE WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH W ZŁĄCZACH STYKOWYCH

2.1. Założenia wstępne

Rozważa się złącze z zestykiem powierzchniowym, zawierające styki (wraz z częściami mechanicznymi) scharakteryzowane rezystancją rozłożoną w przestrzeni o rozkładzie możliwym do opisania funkcjami ciągłymi. Rezystancja zestykowa jest w ogólnym przypadku rozłożona w sposób nieciągły, co wynika ze struktury fizycznej złącza - ograniczonej liczby zestyków elementarnych rozłożonych w określony sposób na powierzchni zestykowej.

Liczba zestyków elementarnych w złączu stykowym zależy od szeregu parametrów - profilu powierzchni styków, własności fizycznych materiałów (głównie ich twardość), własności warstw obcych (tlenków, siarczków i innych zanieczyszczeń) na powierzchniach styków. Problem wyznaczenia liczby zestyków elementarnych jest dotąd otwarty. Zarówno publikacje z zakresu trybologii, jak i liczne publikacje dotyczące zestyków elektrycznych nie pozwalają - jak dotąd - na praktyczne wyznaczenie z zadowalającą dokładnością liczby zestyków elementarnych w oparciu o dostępne parametry styków.

W złączach elektroenergetycznych, pracujących przy znacznych ciśnieniach na powierzchni zestykowej, można oczekiwać, wg P. Johanneta [53,55, 56], znacznej liczby zestyków elementarnych od rzędu setek do rzędu dziesiątków tysięcy.

Można zatem rozważać model złącza stykowego dla 2 przypadków:

- dyskretnego rozkładu rezystancji zestykowej odpowiadającego skończonej liczbie zestyków elementarnych,
- ciągłego rozkładu rezystancji zestykowej, odpowiadającego obecności nieskończonej liczby zestyków elementarnych w złączu.

Modele z ciągłym rozkładem rezystancji zestykowej stanowią przypadek graniczny modeli z dyskretnym rozkładem tej rezystancji. Cenną właściwością modeli z ciągłym rozkładem rezystancji zestykowej jest możliwość opisu wielkości elektrycznych - w niektórych przypadkach, mających jednak duże znaczenie praktyczne, przy pomocy funkcji elementarnych.

Modele z dyskretnym rozkładem rezystancji pozwalają na uzyskanie numerycznego opisu wielkości elektrycznych. Analiza takich modeli jest praktycznie możliwa przy wykorzystaniu EMC, zwłaszcza współpracującej z digigrafem. Przy rozważaniu modeli opisujących wielkości elektryczne, cechujące złącza stykowe, przyjęto wstępnie podstawowe założenia upraszczające:

- a) Rozważa się złącza stykowe o liniowych rezystancjach styków i liniowej rezystancji zestykowej. Odpowiada to złączu stykowemu "zimnemu" o niewielkich przyrostach temperatury, zwłaszcza zestyków elementarnych i pomijalnych zmianach rezystancji. Założenie liniowości rezystancji zestykowej może być przyjęte dla złącza zimnego przy metalicznym połączeniu styków w zestykach elementarnych.
- b) Analizę modeli złącza stykowego przeprowadzono przy założeniu przepływu prądu stałego. Odpowiada to pominięciu w rozważaniach wpływu składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego na rozptyw prądu (rozkład strat mocy) w złączu. Straty dodatkowe powstające w zdecydowanej większości złączy stykowych przy przepływie prądu przemiennego są niewielkie i mogą być pominięte¹⁾.
- Wyniki analizy modeli złącza stykowego przy przepływie prądu stałego mogą być zweryfikowane doświadczalnie na rzeczywistych złączach. Bezpośrednie pomiary parametrów złącza przy prądzie przemiennym są bardzo trudne, sprowadzają się bowiem do pomiaru napięć rzędu mikro- lub miliwoltów w obecności silnego pola magnetycznego, pochodzącego od prądu przemiennego rzędu setek amperów, przepływającego przez złącze.
- c) Pomija się w zasadzie bezpośredni udział części mechanicznych w przewodzeniu prądu i kształtowaniu strat mocy w złączu. Założenie to nie ma znaczenia w przypadku złączy zaprasowanych, bez części o funkcjach czysto mechanicznych.
- d) Rozważa się złącza z zestykami równoległymi, najczęściej występujące w urządzeniach elektrycznych.
- e) Wobec faktu, że w większości złączy stykowych jeden z wymiarów gabarytowych styków (np. ich grubość) jest znacznie mniejsza od pozostałych, rozważa się model złącza, w którym rezystancja styków jest rozłożona na określonej powierzchni. Model ten nazywa się modelem płaskim²⁾. Szczególny przypadek modelu płaskiego stanowi model linearny.

Złącze może być zastąpione modelem linearnym, jeśli możliwy jest podział złącza na dowolną liczbę jednakowych, równoległych części. Ilustruje to rys. 2.1.

Szczególne przypadki złączy o modelach liniarnych³⁾ stanowią złącza (rys. 2.2):

- 1) Podstawowe informacje o stratach dodatkowych zawiera m.in. książka H.B. Dwighta [5]. Dla przewodów Al o przekroju mniejszym od 1000 mm² straty dodatkowe stanowią mniej niż 5% strat całkowitych. Złącza przewodów elektroenergetycznych o większych przekrojach występują dość rzadko.
- 2) Termin proponowany przez autora.
- 3) W dalszym tekście wprowadza się uproszczone terminy: "złącze płaskie", "złącze linearne". Autor zdaje sobie sprawę z odczuwanej niejasności przy stosowaniu terminów "liniowy" i "linearny" w tej samej publikacji. Termin "liniowy" jest używany w powszechnie przyjętym znaczeniu określającym niezmiennosc pewnych parametrów, zaś termin "linearny" posiada znaczenie geometryczne, wskazujące na rozłożenie parametrów układu wzdłuż linii i możliwość opisu układu za pomocą modelu o jednym wymiarze geometrycznym.

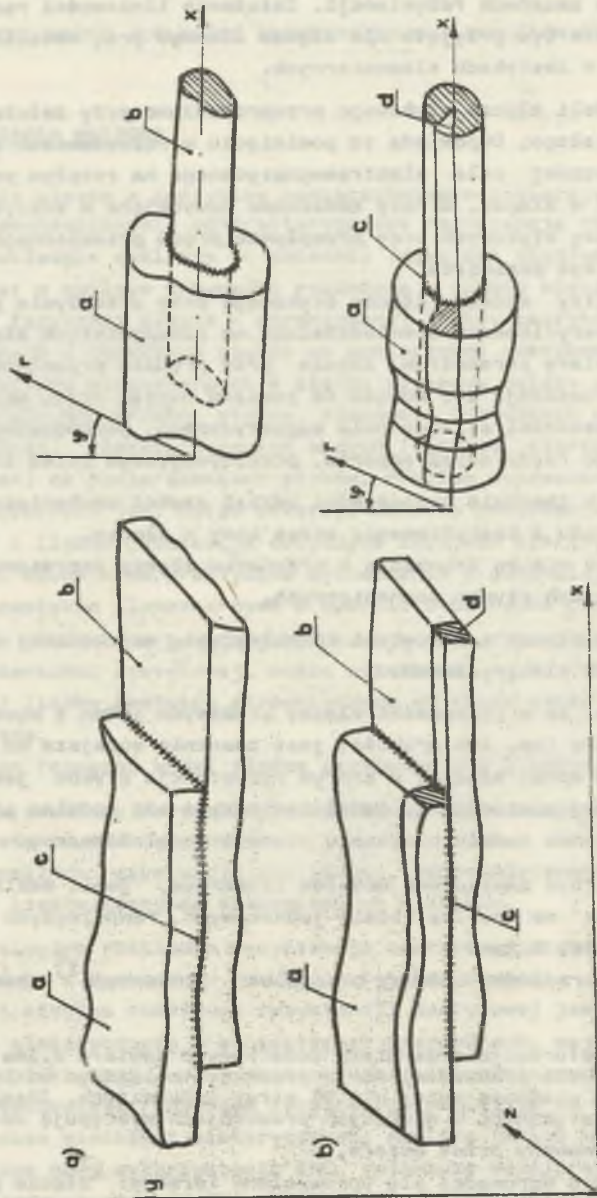
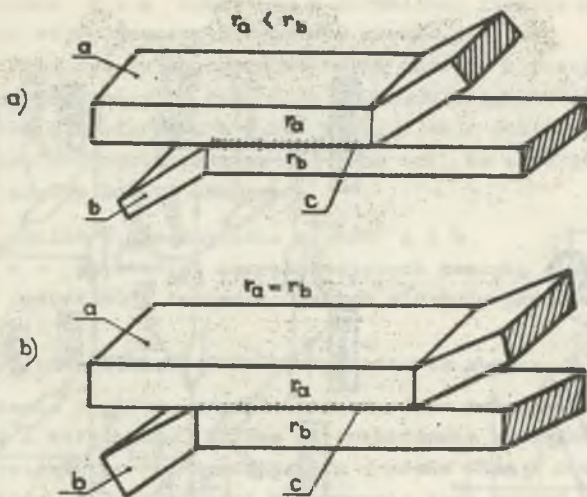


Рис. 2.1. Иллюстрация понятия з'єднання плоского (а) і з'єднання лінійного (б) в układzie współrzędnych prostopadłych x, y, z oraz cylindrycznych x, r, φ .
a, b - styki, c - powierzchnia zestykowa, d - element linearny



Rys. 2.2. Złącza jednorodne

a) niesymetryczne, b) symetryczne
a,b - styki, c - powierzchnia zestykowa

- jednorodne o stałych wartościach rezystancji jednostkowych styków i jednostkowej rezystancji zestykowej.
- jednorodne symetryczne, w których - obok warunku jednorodności - oba styki mają jednakowe rezystancje jednostkowe.

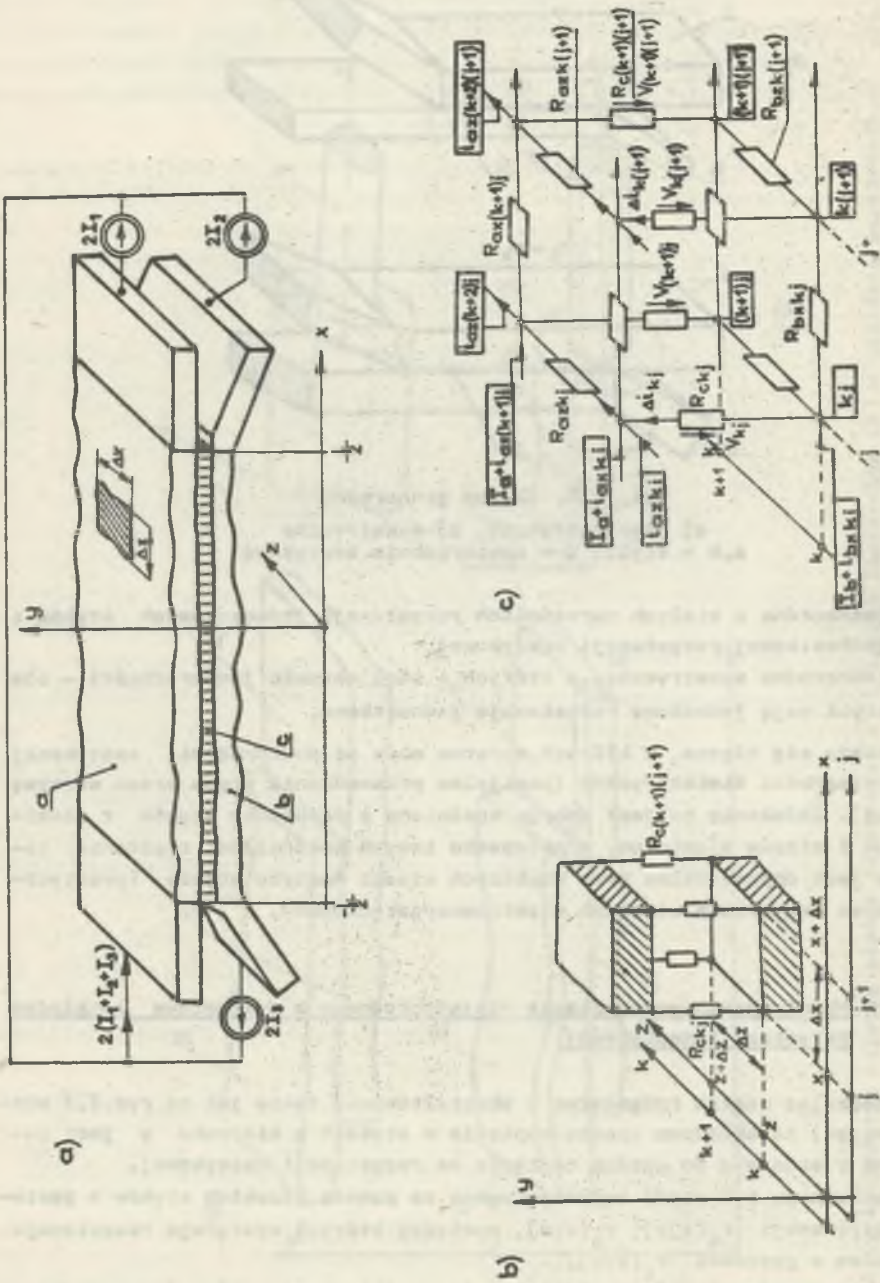
f) Rozważa się złącza, w których warstwa obca na powierzchni zestykowej ma własności dielektryczne (pomijalne przewodzenie prądu przez warstwę obcą). Założenie to jest dobrze spełnione w przypadku styków z aluminium i stopów aluminium. W przypadku innych materiałów założenie takie jest dopuszczalne przy większych siłach docisku styków (praktycznie we wszystkich złączach elektroenergetycznych).

2.2. Model matematyczny złącza niejednorodnego z dyskretnym rozkładem rezystancji zestykowej

Rozważając złącze rozgałęźne o ukazałtowaniu takim jak na rys.2.3 można przyjąć, że składowa spadku napięcia w stykach w kierunku y jest pomijalna w stosunku do spadku napięcia na rezystancji zestykowej.

Złącze może być wtedy reprezentowane za pomocą płaskich styków o gęstości rezystancji $r_a(x,z)$, $r_b(x,z)$, pomiędzy którymi występuje rezystancja zestykowa o gęstości $r_c(x,z)$.

Funkcje $r_a(x,z)$ i $r_b(x,z)$ są ciągłe, zaś funkcja $r_c(x,z)$ ma przebieg dyskretny. Wynika to ze struktury złącza, w którym połączenie elektryczne



Rys. 2.3. Złącze rozgałkone
a) struktura fizyczna, b) wycinek złącza (element skończony), c) fragment schematu zastępczego

między stykami a i b występuje w określonej liczbie miejsc na pozornej powierzchni styku geometrycznego obu styków.

Złącze może być zatem reprezentowane modelem w postaci przestrzennej sieci rezystancyjnej. Na rys. 2.3c pokazano fragment sieci zastępujący wy-cinek złącza o wymiarach Δx , Δz (rys. 2.3b). Jeśli przyjęć stałe wymia-ry elementów tworzących złącze Δx oraz Δz , to sieć przestrzenna repre-zentująca złącze będzie zawierać:

- 2 m n węzłów w płaszczyźnie styków a i b
- m n rezystancji reprezentujących zestyki elementarne
- 4 m n rezystancji reprezentujących elementy skończone, zastępujące sty-ki
- 5 m n prądów możliwych do wyznaczenia za pomocą 4 m n równań.

Wyznaczenie rozplywu prądów w złączu (a w konsekwencji rozkładu spad-ków napięć i strat mocy) polega na rozwiązaniu odpowiedniego układu rów-nań algebraicznych, np. wynikających z prawa Ohma i praw Kirchhoffa. Ist-nieje problem pracochłonności generowania tych równań. Bliższa analiza za-gadnienia¹⁾ wskazuje na możliwość opisu matematycznego rozkładu prądu w złączu płaskim za pomocą układu równań różnicowych, które mogą być podsta-wą maszynowego (EMC) generowania układu równań algebraicznych. Układ ta-kich równań może być następnie rozwiązany przy wykorzystaniu standardowe-go programu obliczeniowego²⁾.

Przyjmując w zapisie oznaczenia operatorów:

- Δ - operator różnicy I rzędu,
- Δ^2 - operator różnicy II rzędu,
- Δ_k, Δ_j - operatory różnicy I rzędu względem zmiennej dyskretnej j i zmiennej k

uzyskano przykładowy zapis równań II prawa Kirchhoffa dla oczek w płaszczyznach x y oraz z y:

$$\Delta_j^2 i_{axkj} + \Delta_k^2 i_{azk(j+1)} - \Delta_k^2 i_{azkj} + \frac{\Delta_j^R c_{kj}}{R_{ckj}} (\Delta_k^2 i_{azk(j+1)} + \Delta_j^2 i_{axk(j+1)}) =$$

$$= I_a c_{axkj}^2 + i_{axk(j+1)} c_{axkj}^2 - i_{bxk(j+1)} c_{bxkj}^2 - I_b c_{bxkj}^2 \quad (2.2-1)$$

¹⁾ Wyprowadzenie równań dostępne w Inst. Elektroenergetyki i Sterowania układów Politechniki Śląskiej w opracowaniu autora [106]: "Równania roz-ptywu prądów w złączu płaskim".

²⁾ Programy rozwiązywania układu równań algebraicznych znajdują się w bi-bliotece programów standardowych EMC średniej wielkości.

$$\begin{aligned} \Delta_k^2 i_{azkj} + \Delta_j^1 i_{ax(k+1)j} - \Delta_j^1 i_{axkj} + \frac{\Delta_k R_{ckj}}{R_{ckj}} (\Delta_j^1 i_{ax(k+1)j} + \Delta_k^1 i_{az(k+1)j}) = \\ = i_{az(k+1)j} c_{azkj}^2 - i_{bz(k+1)j} c_{bzkj}^2 \end{aligned} \quad (2.2-2)$$

Równania I prawa Kirchhoffa dla węzłów (k,j)

$$\Delta_j^1 i_{axkj} + \Delta_k^1 i_{azkj} - \Delta i_{kj} = 0 \quad (2.2-3)$$

$$\Delta_j^1 i_{bxkj} + \Delta_k^1 i_{bzkj} + \Delta i_{kj} = 0 \quad (2.2-4)$$

Pomocnicze wielkości występujące w równaniach określają wzory:

$$I_a = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{m}, \quad (2.2-5)$$

$$I_b = \frac{I_1 + I_2 - I_3}{m}, \quad (2.2-6)$$

$$c_{axkj}^2 = \frac{R_{axk1}}{R_{ckj}}, \quad c_{bxxkj}^2 = \frac{R_{bxxk1}}{R_{ckj}}, \quad (2.2-7)$$

$$c_{azkj}^2 = \frac{R_{azk1}}{R_{ckj}}, \quad c_{bzkj}^2 = \frac{R_{bzk1}}{R_{ckj}} \quad (2.2-8)$$

Przedstawiony układ równań umożliwia wyznaczenie rozprywu prądów w dowolnym złączu płaskim z zestykiem równoległym (powierzchnia zestykowa nie musi być prostokątem, obrys powierzchni etyki płaskiego nie musi pokrywać się z obrysem powierzchni zestykowej).

Jeśli powierzchnia zestykowa ma kształt powierzchni bryły obrotowej, ulega zmianie część warunków brzegowych.

W przypadku złącza z zestykiem kątowym można uzyskać układ równań w sposób analogiczny jak dla złącza z zestykiem równoległym, uwzględniając odpowiednie warunki brzegowe.

2.3. Model matematyczny złącza linearnego z dyskretnym rozkładem rezystancji zestykowej

Przyjmuje się założenie, że przepływ prądu pomiędzy stykami tworzącymi złącze (rys. 2.4a) występuje w skończonej liczbie zestyków elementarnych, którym można przypisać określoną rezystancję zestykową.

Jeśli zatem złącze spełnia warunek linearności, to można wyznaczyć rozkład prądów w złączu i rozkład napięć w oparciu o model utworzony z łańcucha czwórników typu [], zasilanego z układu źródeł prądu (rys. 2.4b). Każdy czwórnik reprezentuje odcinek złącza z jednym zestykiem elementarnym, o długości $h = l/n$.

Przyjęto, że wskutek przepływu prądu przez gałęzie poprzeczne (reprezentujące zestyki elementarne) następuje zmiana prądu i_j w gałęziach podłużnych. Wychodząc z równań prawa Ohma i praw Kirchhoffa uzyskano równanie różnicowe drugiego rzędu, opisujące składową i_j prądu podłużnego¹⁾:

$$\frac{\Delta^2 i_j}{h^2} + \frac{1}{r_{cj}} \frac{\Delta r_{cj}}{h} \frac{\Delta i_{j+1}}{h} - \frac{\sqrt{r_{a1}} + \sqrt{r_{b1}}}{r_{cj}} i_{j+1} =$$
$$= I \frac{(k_1 + k_2 + k_3) \sqrt{r_{a1}} - (k_1 + k_2 - k_3) \sqrt{r_{b1}}}{\sqrt{r_{cj}}} \quad (2.3-1)$$

Warunki brzegowe:

$$\left. \begin{array}{l} - \text{dla } j = 1; \quad i_1 = (k_1 + k_2 + k_3) I \\ - \text{dla } j = n+1; \quad i_{n+1} = (k_1 - k_2 - k_3) I \end{array} \right\} \quad (2.3-2)$$

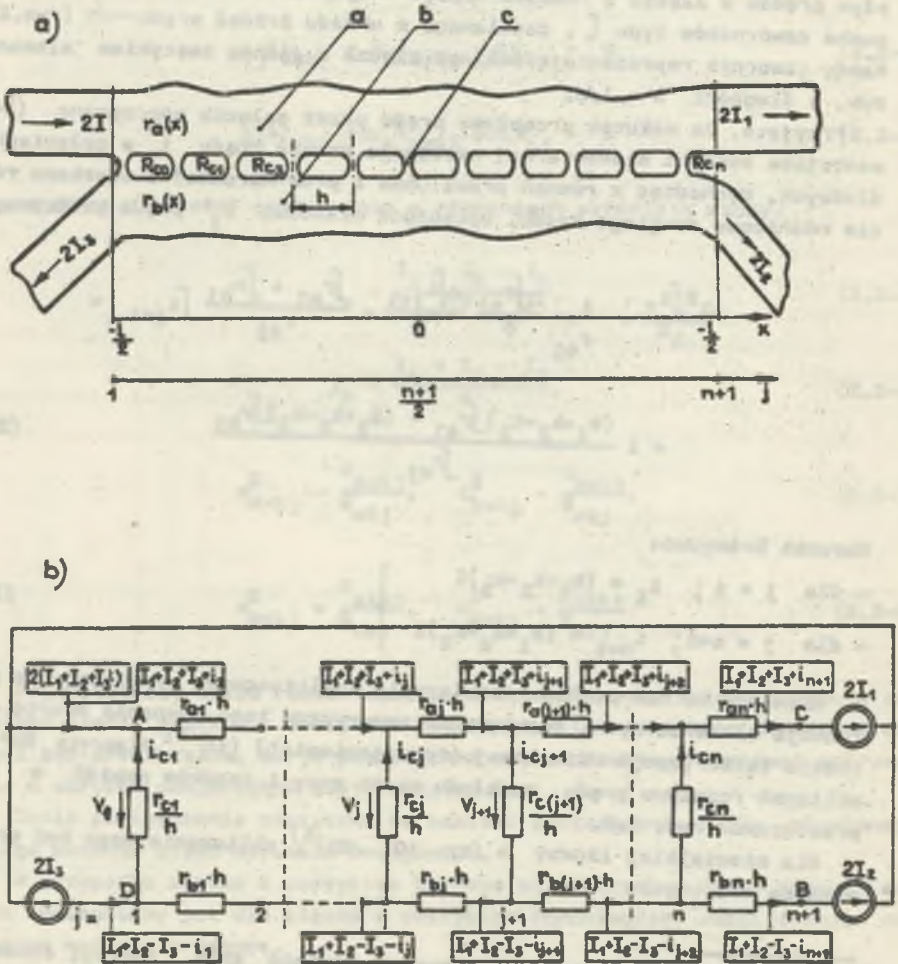
Równanie to nie posiada rozwiązania analitycznego wyrażonego za pomocą funkcji elementarnych. Rozwiązanie numeryczne tego równania oparto na metodzie faktoryzacji różnicowej ("przeganianie") [16]²⁾. Algorytm IUP ZŁACZE obliczeń rozkładu prądu, rozkładu strat mocy i spadków napięć w złączu przedstawia rys. 2.5.

Dla niewielkiej liczby n (np. 10...20)³⁾ obliczenia mogą być przeprowadzone bez użycia EMC.

¹⁾ W dalszej części pracy pominięto w zapisie znak funkcji schodkowej. Wszystkie wielkości z indeksem j są funkcjami schodkowymi.

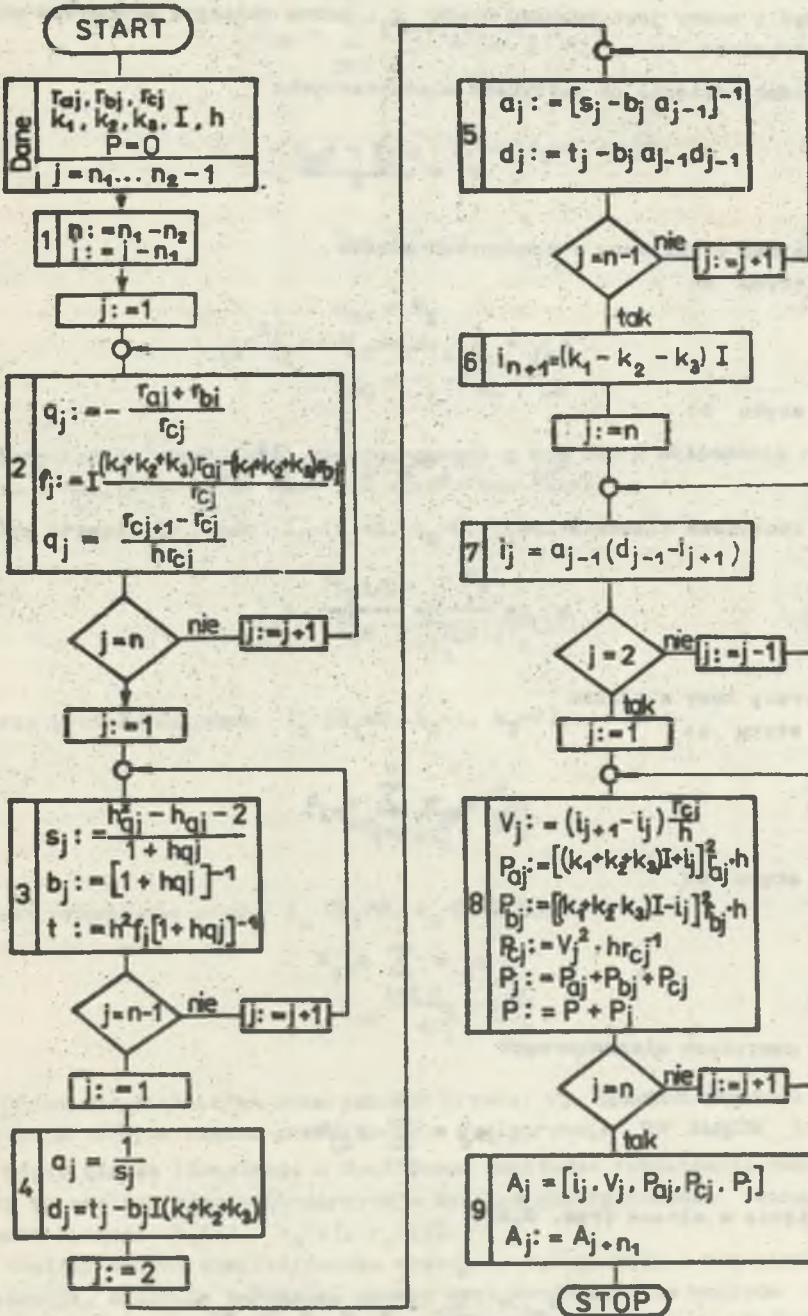
²⁾ Szczegóły dostępne w Inst. Elektroen. i Ster. Układów Pol. Śl. w opracowaniu autora: "Równanie rozkładu prądu w złączu linearnym z dyskretnym rozkładem rezystancji" [107].

³⁾ Poprawne obliczenie napięcia V_1 (z błędem mniejszym od 5%) wymaga podziału złącza na co najmniej 50 elementów.



Rys. 2.4. Model złącza rozgałęźnego liniowego

a) struktura fizyczna, b) struktura dyskretnego modelu elektrycznego złącza liniowego (schemat zastępczy)



Rys. 2.5. Algorytm IUP ZŁĄCZE do obliczenia rozptyłu prądu, spadków napięcia i strat mocy w złączu liniarnym

Jeśli znany jest rozkład prądu i_j , można obliczyć pozostałe wielkości elektryczne:

- spadek napięcia na zestykach elementarnych:

$$v_j = \frac{\Delta i_j \cdot r_{aj}}{h} \quad (2.3-3)$$

- gęstość strat mocy w elementach złącza w styku a:

$$p_{aj} = [(k_1 + k_2 + k_3)I + i_j]^2 r_{aj} \quad (2.3-4)$$

w styku b:

$$p_{bj} = [(k_1 + k_2 - k_3)I - i_j]^2 r_{bj} \quad (2.3-5)$$

w zestykach elementarnych

$$p_{cj} = \frac{v_j^2}{r_{cj}} = \frac{(\Delta i_j)^2}{h^2} r_{cj} \quad (2.3-6)$$

- straty mocy w złączu w styku a:

$$p_a = \sum_{j=1}^n p_{aj} h \quad (2.3-7)$$

w styku b:

$$p_b = \sum_{j=1}^n p_{bj} h \quad (2.3-8)$$

w zestykach elementarnych

$$p_c = \sum_{j=1}^n p_{cj} h \quad (2.3-9)$$

Napięcia w złączu (rys. 2.4b)

$$U_{AC} = \sum_{j=1}^n (I_1 + I_2 + I_3 + i_j) r_{aj} h \quad (2.3-10)$$

$$U_{DB} = \sum_{j=1}^n (I_1 + I_2 - I_3 - 1_j) r_{bj} h \quad (2.3-11)$$

$$U_{AB} = U_{DB} - V_1, \quad V_1 = (I_2 - 1_1) \frac{r_{c1}}{h}, \quad (2.3-12)$$

$$U_{DC} = U_{AC} + V_1 \quad (2.3-13)$$

$$U_{DA} = V_1 \quad (2.3-14)$$

$$U_{BC} = V_1 + U_{AC} - U_{DB} \quad (2.3-15)$$

Rezystancje złącza mogą być wyznaczone w oparciu o obliczenia rozplywu prądu a następnie strat mocy lub spadku napięcia:

- przy przepływie prądu I_1 ($k_1=1, k_2=0, k_3=0$)

$$R_{AC} = \frac{P}{4I_1^2} = \frac{U_{AC}}{2I_1} \quad (2.3-16)$$

- przy przepływie prądu I_2 ($k_1=0, k_2=1, k_3=0$)

$$R_{AB} = \frac{P}{4I_2^2} = \frac{U_{AB}}{2I_2} \quad (2.3-17)$$

- przy przepływie prądu I_3 ($k_1=0, k_2=0, k_3=1$)

$$R_{AC} = \frac{P}{4I_3^2} = \frac{U_{AC}}{2I_3} \quad (2.3-18)$$

Organizację obliczeń numerycznych prądów, tj. spadków napięcia V_j oraz strat mocy w złączu przedstawiono w algorytmie IUP ZŁĄCZE (rys.2.5).

Model złącza linearnego z dyskretnym rozkładem rezystancji może być użyty do analizy złączy linearnych o dowolnym ukształtowaniu (dowolne postaci funkcji $r_a(x), r_b(x), r_c(x)$).

Analiza wpływu ukształtowania złącza na występujące w nim straty, rezystancji, napięcia i rozplyw prądów jest utrudnione ze względu na numeryczną postać wyników. Zastosowanie EMC współpracującej z digigrafem do

obliczeń umożliwia analizę wpływu różnych czynników na własności złącza, w oparciu o wyniki w postaci wykresów zależności¹⁾.

Opracowany algorytm IUP ZŁĄCZE może być stosowany przy obliczaniu wielkości elektrycznych cechujących złącza z rezystancjami zależnymi od temperatury (złącza z nieliniowymi rezystancjami), wykorzystując metodę obliczenia przyrostu temperatury w złączu przedstawioną w rozdz. 3.

2.4. Modelowanie fizyczne złączy z dwakrotnym rozkładem rezystancji zestykowej

Rozkład prądu i spadków napięć w złączu może być wyznaczony drogą pomiarową za pomocą modelu fizycznego homologowego w postaci łańcucha czwórników, o parametrach identycznych jak układ na rys. 2.4b. Ze względu na występujące w praktyce bardzo małe wartości rezystancji styków i rezystancji zestykowej w złączach realizacja modelu z rezystancjami o tych samych wartościach jak w złączu jest praktycznie niemożliwa. Konieczne jest określenie parametrów modelu fizycznego podobnego do złącza możliwego do praktycznej realizacji. Wymaga to określenia kryteriów podobieństwa złącza i modelu.

Ogólne równanie różnicowe (2.3-1) można sprowadzić do postaci bezwymiarowej:

$$\frac{\Delta^2 i_1}{I} + \frac{\Delta r_{a1}}{r_{cj}} \cdot \frac{\Delta^2 i_1}{I} - h^2 \frac{r_{a1} + r_{b1}}{r_{cj}} \cdot \frac{i_1}{I} = \frac{(k_1 + k_2 + k_3)r_{a1} - (k_1 + k_2 - k_3)r_{b1}}{r_{cj}} \cdot h^2 \quad (2.4-1)$$

i określić funkcje podobieństwa (bezwymiarowe):

$$a_j = \frac{\Delta r_{a1}}{r_{cj}} = \frac{r_{a1}(1+h)}{r_{cj}} - 1 \quad (2.4-2)$$

$$c_j^2 = \frac{r_{a1} + r_{b1}}{r_{cj}} \cdot h^2 = c_{aj}^2 + c_{bj}^2 \quad (2.4-3)$$

$$z_j = \frac{(k_1 + k_2 + k_3)r_{a1} - (k_1 + k_2 - k_3)r_{b1}}{r_{aj} - r_{bj}} \quad (2.4-4)$$

$$n = \frac{1}{h} \quad (2.4-5)$$

¹⁾ Na podstawie algorytmu IUP ZŁĄCZE opracowano program obliczeniowy w Fortranie.

Uzyskuje się postać bezwymiarową równania różnicowego rozptyłu prądu:

$$\frac{\Delta^2 i_1}{Y} + n_j \frac{\Delta i_1}{Y} - \frac{\sigma_j^2}{n^2} \cdot \frac{i_1}{Y} = z_j \frac{\sigma_j^2}{n^2} \quad (2.4-6)$$

Model zapewni rozptył prądu $\frac{i_1}{Y}$ taki sam jak w złączu, jeśli liczba n oraz funkcje n_j , σ_j^2 , z_j będą w obu przypadkach jednakowe.

Zmiana skali rezystancji (pomnożenia wszystkich rezystancji przez współczynnik skali k_r) nie zmienia wartości funkcji podobieństwa. Model fizyczny homologowy może być zatem zrealizowany w oparciu o schemat zastępczy złącza w postaci łańcucha czwórników. Rezystancje występujące w modelu mogą być zwiększone k_r -krotnie, co ułatwia realizację modelu przy wykorzystaniu analizatora sieciowego prądu stałego lub łatwo dostępnych takich rezystorów.

Odwzorowanie złączy linearnych o skomplikowanych kształtach styków za pomocą schematu zastępczego może być utrudnione nieznaną wartością rezystancji dystrybucji styków, praktycznie trudnej do wyznaczenia drogą obliczeniową¹⁾.

Istnieje prosta możliwość przybliżonego uwzględnienia wpływu zjawiska dystrybucji na rezystancje styków w modelu fizycznym odtwarzającym kształt styków w złączu linearnym. Przykład ukazania takiego modelu pokazano na rys. 2.6. Zakresowane powierzchnie na rysunku przedstawiają folię metalową. Rezystancje styków 1 i 2 są odwzorowane bezpośrednio poprzez rezystancję folii. Rezystancja zastawkowa może być realizowana poprzez dobór długości ścieżek łączących styki 1 i 2 (rys. 2.6b) lub za pomocą rezystorów (rys. 2.6c).

Modeli takie umożliwiają wyznaczenie wielkości elektrycznych cechujących złącza o złożonych strukturach, których opis matematyczny stanowiłby układ kilku równań różnicowych (lub różniczkowych dla ciągłego rozkładu rezystancji).

Nakład pracy na sporządzenie i zbadanie pomiarowe modelu fizycznego może być wielokrotnie mniejszy od nakładu na rozwiązanie modelu matematycznego drogą obliczeń numerycznych. Badanie modelu sprowadza się do wymuszenia określonego rozptyłu prądu i pomiaru spadków napięć.

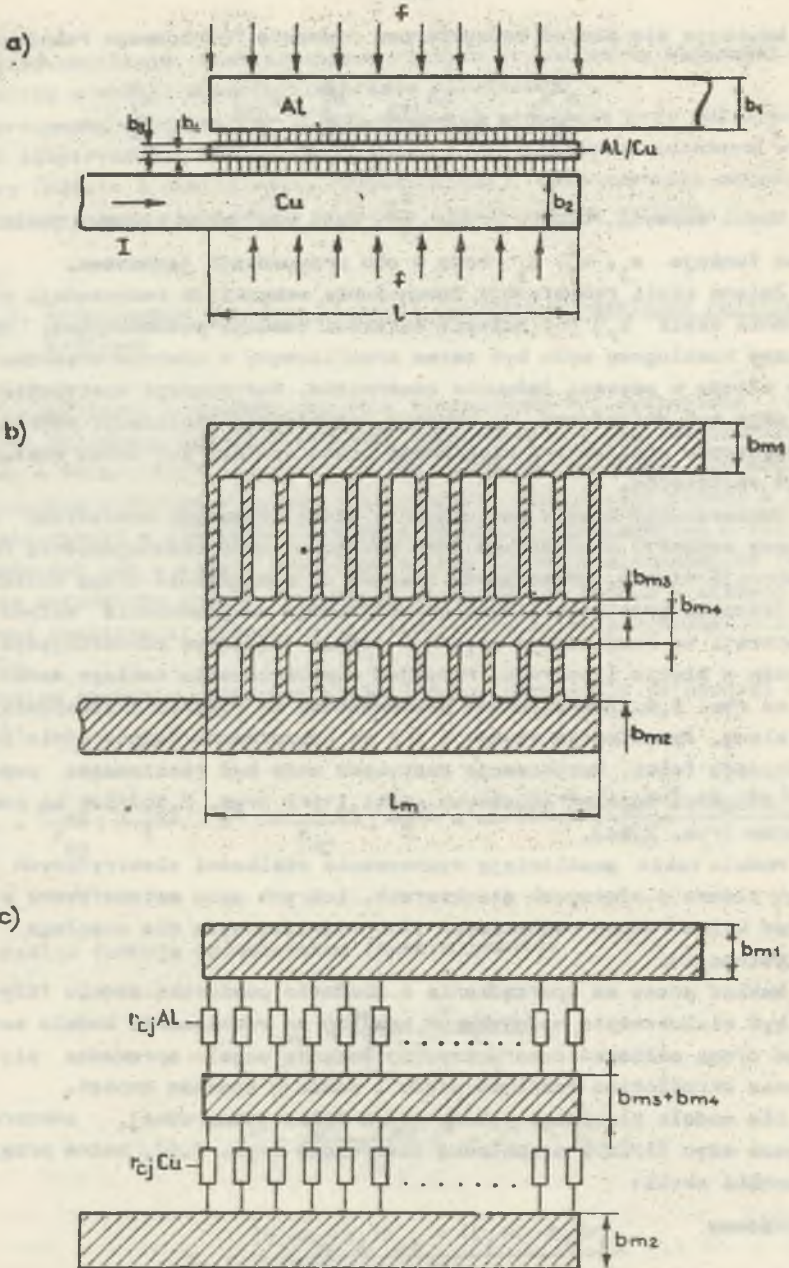
Dla modelu płaskiego wykonanego z folii jednorodnej, odwzorowującego złącze szyn Al/Cu z przekładką bimetalową (rys. 2.6), można przyjąć współczynniki skali:

- prądowy

$$k_1 = \frac{I_m}{I} \quad (2.4-7)$$

gdzie I_m jest prądem modelu

¹⁾ Wg Goworkowa [8].



Rys. 2.6. Przykład modelowania fizycznego złącza linearnego Al/Cu z przekładką bimetalową

a) budowa złącza, b) model z folii metalowej z rezystancją zestykową utworzoną za pomocą ścieżek, c) model z folii z rezystancją zestykową utworzoną za pomocą rezystorów

- długości

$$k_1 = \frac{1}{l_m}, \quad (2.4-9)$$

gdzie l_m jest długością złącza w modelu.

Wymiary poprzeczne modelu:

$$b_m = k_1 b \frac{\delta}{\delta_m}, \quad (2.4-9)$$

gdzie δ_m - konduktywność folii.

Spadki napięcia mierzone na modelu V_m należy przeliczyć uwzględniając współczynnik skali k_1 :

$$V = \frac{1}{k_1} V_m \quad (2.4-10)$$

2.5. Model złącza linearnego z ciągłym rozkładem rezystancji zestykowej

2.5.1. Równanie rozptywu prądu

Jeśli złącze stykowe zawiera dużą liczbę n zestyków elementarnych, można przyjąć założenie, że rezystancja zestykowa jest rozłożona w sposób ciągły (rys. 2.7). Zestyki elementarne występują zatem w modelu linearnym w nieskończenie małych odległościach od siebie. Można wyjść z równania różnicowego opisującego złącze z dyskretnym rozkładem rezystancji i przyjąć założenia:

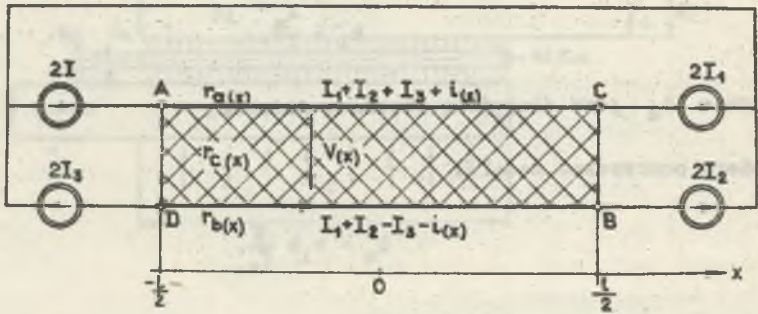
$$n \rightarrow \infty, \quad h \rightarrow dx \quad (2.5-1)$$

i uzyskać równanie różniczkowe opisujące model złącza (rys. 2.7).

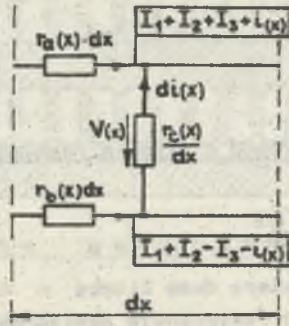
Bezpośrednie rozważenie złącza z ciągłym rozkładem rezystancji prowadzi oczywiście do takiego samego równania (2.5-2):

$$\frac{d^2 i(x)}{dx^2} + \frac{1}{r_c(x)} \cdot \frac{dr_c(x)}{dx} \cdot \frac{di(x)}{dx} - i(x) \frac{c^2(x)}{l^2} = I \frac{c^2(x)z(x)}{l^2}, \quad (2.5-2)$$

a)



b)



Rys. 2.7. Model liniowego złącza rozgałęźnego z ciągłym rozkładem rezystancji

a) struktura modelu, b) schemat zastępczy odcinka złącza o długości różniczkowej

gdzie:

$$c^z(x) = \frac{r_a(x) + r_b(x)}{r_c(x)} l^2 = c_a^2(x) + c_b^2(x) \quad (2.5-3)$$

$$z(x) = \frac{(k_1 + k_2 + k_3)r_a(x) - (k_1 + k_2 - k_3)r_b(x)}{r_a(x) + r_b(x)} \quad (2.5-4)$$

Funkcje $c(x)$ i $z(x)$ stanowią kryteria podobieństwa złączy. Złącza, które cechują te same funkcje $c(x)$ i $z(x)$ mają identyczne rozkłady prądu, rozkłady napięć, strat mocy i rezystancji wyrażone w jednostkach względnych.

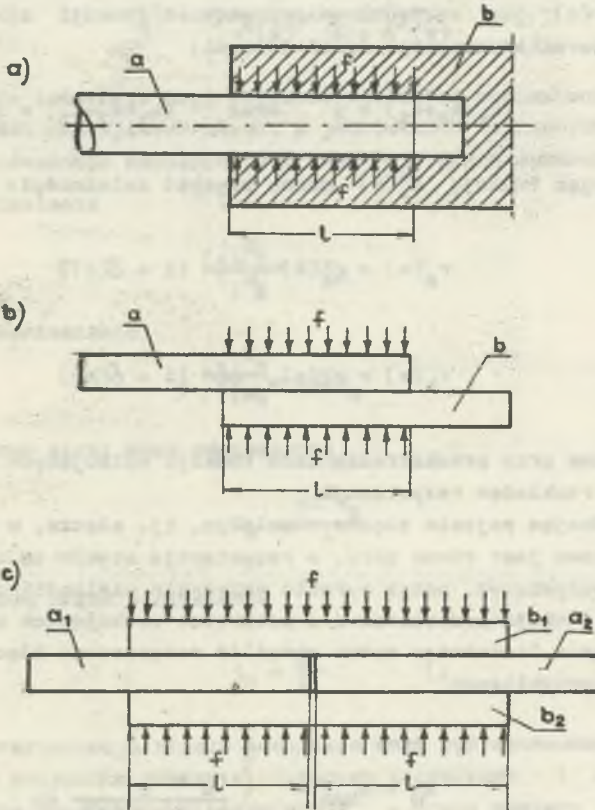
Jeśli złącze cechuje:

$$r_c(x) = \text{const}, \quad c(x) = \text{const}, \quad z(x) = \text{const}, \quad (2.5-5)$$

to złącze jest jednorodne, a równanie różniczkowe posiada rozwiązanie analityczne.

Złącza zbliżone do jednorodnych występują stosunkowo często w elektroenergetyce i elektrotechnice przemysłowej (rys. 2.8). Analiza wielkości cechujących takie złącze posiada zatem istotne znaczenie praktyczne.

W przypadku złącza linearnego niejednorodnego możliwe jest rozwiązanie równania metodami numerycznymi (wskazane jest bezpośrednio zastosowanie algorytmu dla rozwiązania równania różnicowego; możliwe jest użycie standardowych programów dla EMC).



Rys. 2,8. Przykłady złączy linearnych jednorodnych, prostych, zgodnych
a) złącze zaprasowane (cylinder z walcem), b) złącze szyn płaskich "na zakładkę", c) złącze szyn płaskich "z nakładkami"

a, a_1, a_2, b, b_1, b_2 - styki, f - ciśnienie na powierzchni zestykowej, l - długość złącza

2.5.2. Wyrażenie rezystancji złącza za pomocą funkcji podobieństwa i rezystancji złącza idealnego

Pomiędzy funkcjami podobieństwa i rezystancjami elementów złącza zachodzi zależność:

$$r_a(x) [1 - \delta(x)] = r_b(x) [1 + \delta(x)] \quad (2.5-6)$$

przy przyjęciu funkcji podobieństwa:

$$\delta(x) = \frac{r_a(x) - r_b(x)}{r_a(x) + r_b(x)} \quad (2.5-7)$$

Funkcja $\delta(x)$ jest szczególnym przypadkiem funkcji $z(x)$ - dla rozpyływu prądów scharakteryzowanemu zależnościami:

$$(k_1 + k_2 + k_3) = 1 \quad \text{oraz} \quad (k_1 + k_2 - k_3) = 1 \quad (2.5-8)$$

Wykorzystując funkcję $c^2(x)$ można uzyskać zależności:

$$r_a(x) = r_c(x) \frac{c^2(x)}{2 \cdot 1^2} (1 + \delta(x)) \quad (2.5-9)$$

$$r_b(x) = r_c(x) \frac{c^2(x)}{2 \cdot 1^2} (1 - \delta(x)) \quad (2.5-10)$$

wykorzystane przy przekształceniach funkcji opisujących złącza jednorodne z ciągłym rozkładem rezystancji.

Wprowadzając pojęcie złącza idealnego, tj. złącza, w którym rezystancja zestykowa jest równa zeru, a rezystancje styków są takie same jak w złączu rzeczywistym, można wyrazić wszystkie wielkości cechujące złącza za pomocą funkcji podobieństwa i wielkości cechujących złącze idealne.

Dla złącza linearnego można określić rezystancję złącza idealnego zależnością przybliżoną¹⁾

$$R_N = R_{NAB} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{r_a(x)r_b(x)}{r_a(x)+r_b(x)} dx \quad (2.5-11)$$

¹⁾ Nie uwzględniono rezystancji dystorsji.

Dla złącza jednorodnego:

$$R_N = \frac{r_a r_b}{r_a + r_b} l \quad (2.5-12)$$

Wykorzystując funkcje podobieństwa można napisać zależności:

$$r_a(x) = \frac{2 R_N}{l} \cdot \frac{1}{1 - \delta(x)} \quad (2.5-13)$$

$$r_b(x) = \frac{2 R_N}{l} \cdot \frac{1}{1 + \delta(x)} \quad (2.5-14)$$

$$r_c(x) = \frac{4 R_N l}{c^2(x)} \cdot \frac{1}{1 - \delta^2(x)} \quad (2.5-15)$$

Parametry złącza idealnego mogą stanowić wielkości odniesienia przy wyrażeniu wielkości cechujących złącze w jednostkach względnych.

Dla złącza idealnego obciążonego prądem $2I$ można wyznaczyć:

- napięcie odniesienia

$$U_N = 2IR_N \quad (2.5-16)$$

- straty mocy odniesienia

$$P_N = 4I^2 R_N \quad (2.5-17)$$

- gęstość liniową strat mocy odniesienia

$$P_N = \frac{4I^2 R_N}{l} \quad (2.5-18)$$

- gęstość liniową prądu odniesienia

$$j_N = \frac{2I}{l} \quad (2.5-19)$$

W praktyce rezystancja złącza idealnego może być wyznaczona drogą obliczeń lub - w przypadku złączy o złożonych kształtach i niepomijalnym wpływie zjawiska dystorsji na rezystancję¹⁾ - drogą pomiaru na modelu u-

¹⁾ Zależność nie uwzględnia rezystancji dystorsji, trudnej do analitycznego wyznaczenia. K. Goworkow [8] podaje bardzo złożoną zależność analityczną dla wyznaczenia rezystancji dystorsji w torze prądowym o przekroju prostokątnym przy skokowej zmianie przekroju.

zyskanym np. po zlutowaniu obu etyków lub na modelu specjalnie wykonanym (odlew zachowujący kształt złącza).

2.5.3. Jednorodna złącza rozgałęzione

Dla złącza jednorodnego funkcje podobieństwa przyjmują stałe wartości:

$$c^2(x) = c^2 = \frac{r_a + r_b}{r_c} l^2, \quad (2.5-20)$$

$$z(x) = z = \frac{(k_1 + k_2 + k_3)r_a - (k_1 + k_2 - k_3)r_b}{r_a + r_b} \quad (2.5-21)$$

$$\delta(x) = \delta = \frac{r_a - r_b}{r_a + r_b} \quad (2.5-22)$$

Równanie różniczkowe (3.6-2) posiada - dla złącza jednorodnego - rozwiązanie analityczne¹⁾:

$$\frac{i(x)}{I} = - (k_2 + k_3) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} + (z + k_1) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} - z \quad (2.5-23)$$

przy warunkach brzegowych:

$$x = -\frac{l}{2} \quad i(x) = (k_1 + k_2 + k_3)I, \quad (2.5-24)$$

$$x = \frac{l}{2} \quad i(x) = (k_1 - k_2 - k_3)I$$

Rozkład spadku napięcia na rezystancji zestykowej wyraża zależność:

$$V(x) = r_c(x) \frac{di(x)}{dx} = I \frac{r_c}{l} c \left[- (k_2 + k_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{l}}{\operatorname{sh} \frac{c}{2}} + (z + k_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{l}}{\operatorname{ch} \frac{c}{2}} \right] \quad (2.5-25)$$

¹⁾ Rozwiązanie szczególne (dla jednorodnego złącza prostego zgodnego) podane przez J. Husa [51] jest tożsame z zależnością (2.5-23) przy założeniu $k_1 = 0$, $k_2 = 1$, $k_3 = 0$ oraz $z = \delta$.

lub inaczej:

$$V(x) = I \frac{4 R_N}{c(1 - \delta^2)} \left[(k_2 + k_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{2}}{\operatorname{sh} \frac{1}{2}} + (z + k_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{2}}{\operatorname{ch} \frac{1}{2}} \right] \quad (2.5-26)$$

W jednostkach względnych:

$$\frac{V(x)}{U_N} = \frac{2}{c(1 - \delta^2)} \left[- (k_2 + k_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{2}}{\operatorname{sh} \frac{1}{2}} + (z + k_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{2}}{\operatorname{ch} \frac{1}{2}} \right] \quad (2.5-27)$$

Do analizy nagrzewania złącza istotna jest znajomość funkcji rozkładu liniowej gęstości strat mocy w elementach złącza, wynikających z ogólnych zależności:

$$p_a(x) = [(k_1 + k_2 + k_3)I + i(x)]^2 r_a \quad (2.5-28)$$

$$p_b(x) = [(k_1 + k_2 - k_3)I - i(x)]^2 r_b \quad (2.5-29)$$

$$p_c(x) = \frac{V^2(x)}{r_c} \quad (2.5-30)$$

$$p(x) = p_a(x) + p_b(x) + p_c(x) \quad (2.5-31)$$

Wykorzystując wzory można uzyskać bezwymiarowa funkcje gęstości strat mocy:

$$\frac{p_a(x)}{P_N} = \frac{1}{2(1 - \delta)} \left[(k_1 + k_2 + k_3) + (z + k_1) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{2}}{\operatorname{ch} \frac{1}{2}} - (k_2 + k_3) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{2}}{\operatorname{sh} \frac{1}{2}} - z \right]^2 \quad (2.5-32)$$

$$\frac{p_b(x)}{P_N} = \frac{1}{2(1 + \delta)} \left[(k_1 + k_2 - k_3) - (z + k_1) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{2}}{\operatorname{ch} \frac{1}{2}} + (k_2 + k_3) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{2}}{\operatorname{sh} \frac{1}{2}} + z \right]^2 \quad (2.5-33)$$

$$p_c(x) = \frac{1}{1 - \delta^2} \left[(z + k_1) \frac{\operatorname{sh} \frac{cx}{2}}{\operatorname{ch} \frac{1}{2}} - (k_2 + k_3) \frac{\operatorname{ch} \frac{cx}{2}}{\operatorname{sh} \frac{1}{2}} \right]^2 \quad (2.5-34)$$

Całkowite straty mocy w złączu wynoszą:

$$P = \int_{-\frac{z}{2}}^{\frac{z}{2}} [p_a(x) + p_b(x) + p_c(x)] dx \quad (2.5-35)$$

Po scałkowaniu uzyskano wyrażenie:

$$\frac{P}{P_N} = \frac{1}{c(1-\delta^2)} \left\{ (k_1+k_2+k_3-z)^2 \frac{c(1+\delta)}{2} + (k_1+k_2-k_3) \frac{c(1-\delta)}{2} + [2(z+k_1)^2 + (k_1+k_2)\delta + (k_3-z)] \operatorname{th} \frac{c}{2} + 2(k_2+k_3)^2 \operatorname{cth} \frac{c}{2} \right\} \quad (2.5-36)$$

Funkcja opisująca straty mocy w złączu określa zarazem zastępczą rezystancję złącza:

$$R_z = \frac{P}{4 I^2} \quad (2.5-37)$$

lub w jednostkach względnych:

$$\bar{r}_z = \frac{R_z}{R_N} = \frac{P}{P_N} \quad (2.5-38)$$

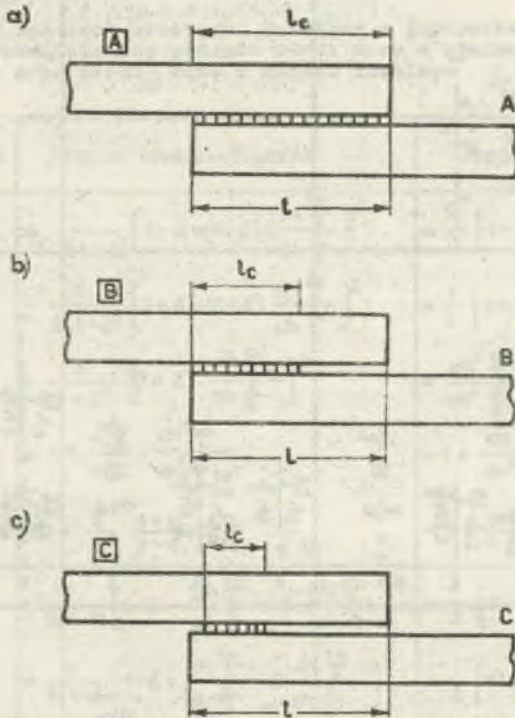
Złącze idealne cechuje $\bar{r}_z = 1$.

2.5.4. Jednordne złącza proste

Złącza proste są często stosowane w praktyce (rys. 2.8). Wynika stąd istotna potrzeba określenia występujących w nich wielkości. Zgodnie z ogólną klasyfikacją przedstawioną w tablicy 1.2 można rozróżnić złącza proste: zerowe, zgodne i przeciwna o zróżnicowanych właściwościach. Szczegółową analizę złączy prostych zgodnych przedstawił autor w opracowaniu [99]¹⁾²⁾ oraz publikacji [21]. W opracowaniu [99] autor przedstawił wielkości cechujące złącza proste zgodne o ukształtowaniu pokazanym na rysunku 2.9.

1) Opracowanie dostępne w Inst. Elektroen. i Ster. Ukł. Pol. Śląskiej.

2) W obu przypadkach występuje odmienne oznaczenie parametru δ jako Δ , z którego zrezygnowano z uwagi na kolizję z oznaczeniem operatorów różniccy funkcji schodkowej. Również napięcie $V(x)$ jest strzałkowane przeciwnie niż w niniejszej pracy, co powoduje przeciwny znak wyrażenia $V(x)$.



Rys. 2.9. Charakterystyczne ukształtowania modeli linearnych jednorodnych złączy prostych, zgodnych

Złącza o ukształtowaniu B i C odwzorowują niektóre połączenia zaprasowane stosowane w elektroenergetyce. Długość strefy zestykowej l_c jest bowiem z reguły mniejsza od długości złącza.

Szczególne przypadki złączy jednorodnych stanowią złącza symetryczne o jednakowych stykach a i b.

Charakterystyczne wielkości cechujące złącza jednorodne, wyrażone w jednostkach względnych, przedstawiono w tablicach 2.1 i 2.2.

Porównanie wzorów opisujących spadki napięcia na zestykach elementarnych oraz rezystancję złącza dla złączy zgodnych i przeciwnych wskazują na korzystniejsze własności złączy przeciwnych, zapewniających niższą rezystancję i niższy spadek napięcia na zestykach elementarnych niż złącza zgodne, przy identycznych rezystancjach r_a, r_b, r_c .

Tablica 2.1

Podstawowe wielkości cechujące złącza proste jednorodne, wyrażone w jednostkach względnych wielkości odniesienia: spadek napięcia na złączu idealnym i straty mocy w złączu idealnym

Sym- bol	Złącza	Rozkład prądu	Wielkość	Złącza niesymetryczne $\delta \neq 0$	Złącza symetryczne $\delta = 0$	Uwagi
I ₀	proste	$k_1 = 1$	$\frac{I(x)}{I}$	$= (1 + \delta) \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - \delta$	$= \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}}$	$\delta = \frac{r_a - r_b}{r_a + r_b}$ $c^2 = \frac{r_a + r_b}{r_b} \cdot l^2$
	zerowe	$k_2 = 0$	$\frac{V(x)}{U_N}$	$= \frac{2}{c(1+\delta)} \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}}$	$= \frac{2 \text{sh } \frac{cx}{2}}{c \text{ch } \frac{c}{2}}$	
	$z = \delta$	$k_3 = 0$	$\frac{P}{R_{ad}} = \frac{R_{ad}}{R_N}$	$= 1 + \frac{2}{c} \frac{(1+\delta)}{(1-\delta^2)} \text{th } \frac{c}{2}$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{th } \frac{c}{2}$	
II _z	proste	$k_1 = 0$	$\frac{I(x)}{I}$	$= - \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \delta \left(\frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - 1 \right)$	$= - \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}}$	
	zgodne	$k_2 = 1$	$\frac{V(x)}{U_N}$	$= \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[- \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \delta \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]$	$= \frac{2 \text{ch } \frac{cx}{2}}{c \text{sh } \frac{c}{2}}$	
	$z = \delta$	$k_3 = 0$	$\frac{P}{R_{ad}} = \frac{R_{ad}}{R_N}$	$= 1 + \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[\text{cth } \frac{c}{2} + \delta^2 \text{th } \frac{c}{2} \right]$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{cth } \frac{c}{2}$	
II _p	proste	$k_1 = 1$	$\frac{I(x)}{I}$	$= - \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - 1$	$= - \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - 1$	
	przeciwnie	$k_2 = 0$	$\frac{V(x)}{U_N}$	$= \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[- \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}} - \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]$	$= \frac{2}{c} \left[- \frac{\text{ch } \frac{cx}{2}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{2}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]$	
	$z = 1$	$k_3 = 1$	$\frac{R_{ad}}{R_N}$	$= \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left(\text{cth } \frac{c}{2} + \text{th } \frac{c}{2} \right) = \frac{4 \text{cth } \frac{c}{2}}{c(1-\delta^2)}$	$= \frac{2}{c} \left[\text{cth } \frac{c}{2} + \text{th } \frac{c}{2} \right] = \frac{4 \text{cth } \frac{c}{2}}{c}$	

Tablica 2.2

Straty mocy w złączach prostych, wyrażone w jednostkach względnych wielkości odniesienia: gęstość strat mocy w złączu idealnym oraz straty mocy w złączu idealnym

Oznaczenie nazwa złącza	Wielkość	Złącze niesymetryczne	Złącze symetryczne
I ₀ proste zerowe	$\frac{P_a(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1-\delta)} \left[1 - \delta + (1+\delta) \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_b(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1+\delta)} \left[1 + \delta - (1+\delta) \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_c(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[(1+\delta) \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{\text{sh}^2 \frac{cx}{L}}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P(x)}{P_N}$	$= 1 + \frac{1+\delta}{1-\delta} \frac{\text{ch } \frac{2cx}{L}}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}}$	$= 1 + \frac{\text{ch } \frac{2cx}{L}}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P}{P_N}$	$= 1 + \frac{2}{c} \frac{1+\delta}{1-\delta} \text{th } \frac{c}{2}$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{th } \frac{c}{2}$
II _Z proste zgodne	$\frac{P_a(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1-\delta)} \left[1 - \delta - \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \delta \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_b(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1+\delta)} \left[1 + \delta + \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} - \delta \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_c(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[- \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{\text{ch}^2 \frac{cx}{L}}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P(x)}{P_N}$	$= 1 + \delta + \frac{1}{1-\delta^2} \left[\text{ch } \frac{2cx}{L} \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} + \frac{\delta^2}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}} \right) - 4\delta \frac{\text{sh } \frac{2cx}{L}}{\text{sh } c} \right]$	$= 1 + \frac{\text{ch } \frac{2cx}{L}}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}}$
	$\frac{P}{P_N}$	$= 1 + \frac{2}{c(1-\delta^2)} \left[\text{cth } \frac{c}{2} + \delta^2 \text{th } \frac{c}{2} \right]$	$= 1 + \frac{2}{c} \text{cth } \frac{c}{2}$
II _p proste przeciwnie	$\frac{P_a(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1-\delta)} \left[\frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[\frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} - \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_b(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{2(1+\delta)} \left[\frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \frac{1}{2} \left[- \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P_c(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[\frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} \right]^2$	$= \left[- \frac{\text{ch } \frac{cx}{L}}{\text{sh } \frac{c}{2}} + \frac{\text{sh } \frac{cx}{L}}{\text{ch } \frac{c}{2}} \right]^2$
	$\frac{P(x)}{P_N}$	$= \frac{1}{1-\delta^2} \left[\text{ch } \frac{2cx}{L} \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} + \frac{1}{\text{ch}^2 \frac{c}{2}} \right) - 4 \frac{\text{sh } \frac{2cx}{L}}{\text{sh } c} \right]$	$= \text{ch } \frac{2cx}{L} \left(\frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} + \frac{1}{\text{sh}^2 \frac{c}{2}} \right) \frac{\text{sh } \frac{2cx}{L}}{\text{sh } c}$
	$\frac{P}{P_N}$	$= \frac{4}{c(1-\delta^2)} \text{cthc}$	$= \frac{4}{c} \text{cthc}$

2.5.5. Złącze proste o wyrównanym spadku napięcia na zestykach elementarnych

Spadek napięcia $V(x)$ na zestykach elementarnych jest głównym czynnikiem decydującym o ich nagrzewaniu [11, 37, 44 i inne].

Spadek napięcia $V(x)$ może decydować o obciążalności prądowej złącza, zwłaszcza przy prądach zwarciovych.

Wyrównanie wartości spadku napięcia $V(x) = V$ (przy założeniu występowania n jednakowych zestyków elementarnych w złączu) oznacza jego minimalizację oraz wyrównanie obciążenia prądowego zestyków elementarnych (do jednakowej wartości $2 I/n$ dla każdego zestyku).

Równania różniczkowe rozplywu prądu w złączu może być podstawą do analizy warunków wyrównania rozkładu $V(x)^1$.

Jeżeli

$$V(x) = \frac{2I}{1} r_c, \quad (2.5-39)$$

to zachodzi

$$i(x) = - \frac{2I}{1} x \quad (2.5-40)$$

Dla złącza prostego, zgodnego i symetrycznego przy $r_a(x) = r_b(x) = r_c$ uzyskuje się warunek [108]:

$$r_c(x) = x^2 r_c \quad (2.5-41)$$

W praktyce niemożliwa jest realizacja zależności (2.5-41) wobec wymagania $r_c = 0$ dla $x = 0$. Zbliżenie rozkładu $r_c(x)$ do parabolicznego zbliża rozkład $V(x)$ do wyrównanego.

W złączach prostych, zgodnych o stałej rezystancji zestykowej $r_c(x) = r_c$ można uzyskać [108] warunki dla rezystancji styków, zapewniające wyrównanie $V(x)$:

$$\left. \begin{aligned} r_a(x) &= \left(1 + \frac{2x}{1}\right) s(x) \\ r_b(x) &= \left(1 - \frac{2x}{1}\right) s(-x) \end{aligned} \right\} \quad (2.5-42)$$

gdzie $s(x)$ jest dowolną funkcją parzystą.

¹⁾ Analizę zawiera opracowanie autora [108] "Określenie warunków wyrównania rozkładu spadku napięcia na zestykach elementarnych w złączu linearnym prostym", dostępne w IEiSU Pol. Śląskiej.

Praktyczna realizacja złącza o wyrównanym rozkładzie $V(x)$ jest również w tym przypadku niemożliwa ze względu na występujące wymagania $r_a = 0$, $r_b = 0$ dla określonych rzędnych x . Niemniej, kształtowanie rezystancji $r_a(x)$ i $r_b(x)$ w sposób zbliżony do określonego zależnościami (2.5-42) zbliża rozkład $V(x)$ w złączu do wyrównanego.

Rozpatrując złącza proste, zgodne, niesymetryczne stwierdzono [108] niemożliwość uzyskania wyrównania rozkładu $V(x)$ drogą doboru funkcji $r_a(x)$, $r_b(x)$ i $r_c(x)$ (poza przypadkiem $r_c(x) \rightarrow \infty$). Analogiczna sytuacja występuje dla złączy prostych, przeciwnych zarówno symetrycznych, jak i niesymetrycznych.

2.6. Weryfikacja modeli zjawisk elektrycznych w złączach linearnych

2.6.1. Zakres weryfikacji

Weryfikację modeli zjawisk elektrycznych w złączach linearnych przeprowadzono drogą:

- sprawdzenia zgodności wyników obliczeń rozptywu prądu i rozkładu napięć w złączach w oparciu o zależności analityczne i metodą numeryczną (algorytm IUP ZŁĄCZE) dla jednorodnych złączy zgodnych, przeciwnych i zerowych;
- sprawdzenia poprawności uzyskanych wyników obliczeń rozptywu prądów i rozkładu napięć w złączach poprzez pomiary na modelach analogowych dyskretnych (sieć rezystancyjna);
- porównania wyników obliczeń rozptywu prądu i rozkładu napięć w złączach z wynikami pomiarów laboratoryjnych wykonanych dla zbioru złączy szyn aluminiowych płaskich;
- porównania wyników uzyskanych przez autora z wynikami badań nad złączami przewodów w liniach napowietrznych uzyskanych w EdF (Clamart, ERMEL, Division Lignes Aériennes), przedstawionymi w raporcie CIGRE 22-81 (WG-05)02 z dnia 5 maja 1981 r. na zebraniu grupy roboczej w Sztokholmie [112] oraz wynikami badań F. Hengelhaupta [131].

Zakres podjętej weryfikacji wynika z możliwości technicznych i czasowych autora. Pełna weryfikacja modeli złączy zarówno elektrycznych, jak i termokinetycznych została podjęta przez A. Wierzbickiego w ramach przygotowywanej rozprawy doktorskiej.

2.6.2. Porównanie wyników obliczeń rozptywu prądów i rozkładu napięć wg metody analitycznej i numerycznej

Dla jednorodnych złączy linearnych dokonano obliczeń rozptywu prądów i rozkładu napięcia na zestykach elementarnych wg zależności analitycznych

(2.6-23) i (2.6-26) oraz metodą numeryczną opartą na algorytmie IUP ZŁĄCZE. Wykorzystano program w Fortranie i maszynę ODRA 1305.

Obliczenia przeprowadzono dla zbioru parametrów:

- współczynniki rozprężu:

$$k_1 = \begin{matrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

$$k_2 = \begin{matrix} 0 & 0,5 & 0 & 0,5 & 1 & 0 \end{matrix}$$

$$k_3 = \begin{matrix} 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 1 \end{matrix}$$

- współczynniki podobieństwa:

$$c = \begin{matrix} 0,1 & 1,0 & 10 \end{matrix}$$

$$\delta = \begin{matrix} 0 & 0,5 & 1,0 \end{matrix}$$

- liczba elementów skończonych

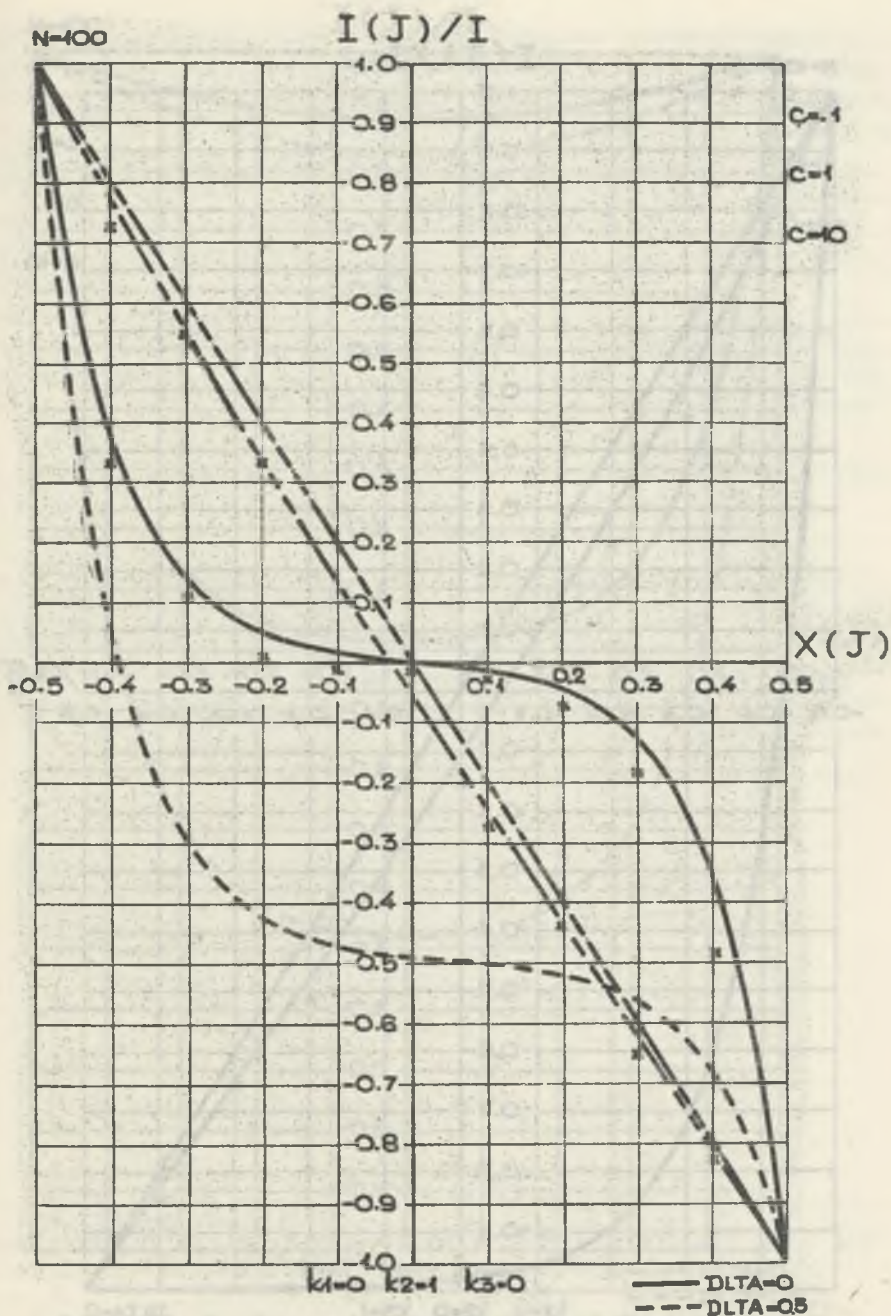
$$n = 10, 50, 100$$

Uzyskano wyniki obliczeń w postaci numerycznej pozwalające stwierdzić:

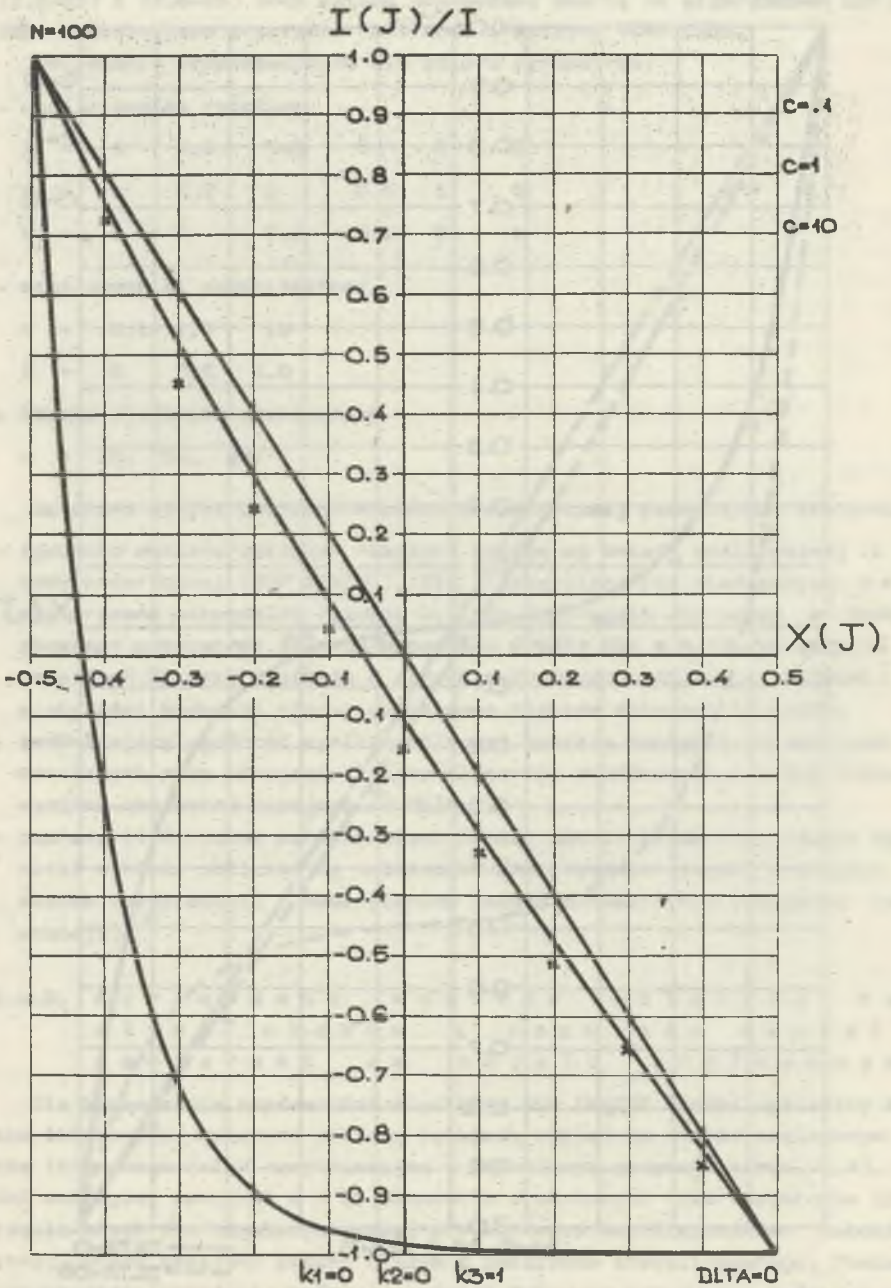
- zgodność wyników obliczeń rozprężu prądów wg metody analitycznej i metody numerycznej (IUP ZŁĄCZE). Dla liczby elementów skończonych $n = 100$ stwierdzono maksymalną różnicę wyników liczbowych obu metod w badanym obciążeniu parametrów złącza, wynoszącą 0,05%. Dla $n = 10$ różnice te mogą się sięgać 9% przy złączach o dużych wartościach dI/dx , aczkolwiek dla większości badanych złączy uzyskiwano różnice mniejsze od 0,05%;
- zadawalającą zgodność wyników obliczeń spadków napięcia na zestykach elementarnych przy przyjęciu liczby elementów skończonych $n = 100$ (różnica wyników obu metod mniejsza od 5%);
- poprawność formalną porównywanych modeli złącza linearnego wobec zgodności wyników obliczeń wg zależności analitycznych (model z ciągłym rozkładem rezystancji) i numerycznych (model z dyskretnym rozkładem rezystancji).

2.6.3. Porównanie wyników obliczeń rozprężu prądów i rozkładu napięć z pomiarami na modelu analogowym

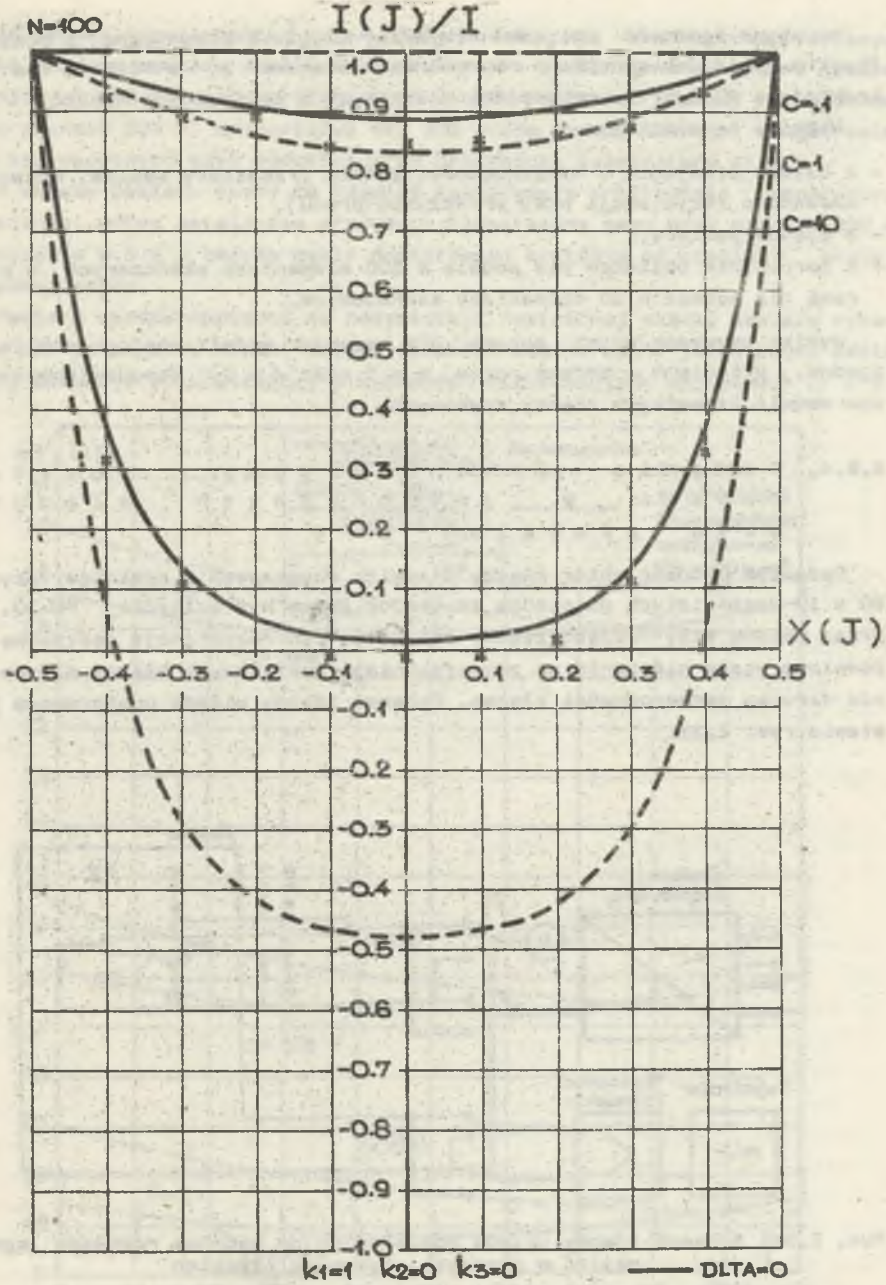
Dla sprawdzenia poprawności algorytmu IUP ZŁĄCZE (model dyskretny złącza linearnego) wykonano pomiary rozkładu napięć na modelu analogowym złącza linearnego (sieć rezystancyjna o strukturze podanej na rys. 2.4). Model analogowy zawierał $n = 20$ elementów skończonych (60 rezystorów 10 k Ω regulowanych dla uzyskania wymaganych wartości współczynników podobieństwa). Układ zasilano prądem stałym z zasilacza stabilizowanego. Pomiarów rezystancji (strojenie modelu) i napięć dokonano przyrządem cyfrowym o rezystancji wejściowej ok. 20 M Ω i dokładności 0,5%. Wyniki pomiarów autora naniesiono na wykresy rys. 2.10.



Rys. 2.10. Rozpływ prądu w jednorodnych złączach prostych
a) zgodnych; linie ciągłe dotyczą rozpływów obliczonych dla złączy symetrycznych, linie przerywane dotyczą złączy niesymetrycznych. Zaznaczono (x) wyniki pomiarów uzyskanych na modelach homologowych



Rys. 2.10. Rozpływ prądu w jednorodnych złączach prostych
b) przeciwnych; linie ciągłe dotyczą rozpływów obliczonych dla złączy symetrycznych, linie przerywane dotyczą złączy niesymetrycznych. Zaznaczono (x) wyniki pomiarów uzyskanych na modelach homologowych



Rys. 2.10. Rozpływ prądu w jednorodnych złączach prostych

c) zerowych; linie ciągłe dotyczą rozpływów obliczonych dla złączy symetrycznych, linie przerywane dotyczą złączy niesymetrycznych. Zaznaczono (x) wyniki pomiarów uzyskanych na modelach homologowych
Wykresy wykonano za pomocą digigrafu

Uzyskano zgodność obliczeń (wykresy ciągłe i przerywane) i pomiarów (punkty pomiarowe oznaczono na rysunkach znakami x) z różnicą nie przekraczającą 5% zakresu zmienności mierzonych i obliczanych napięć.

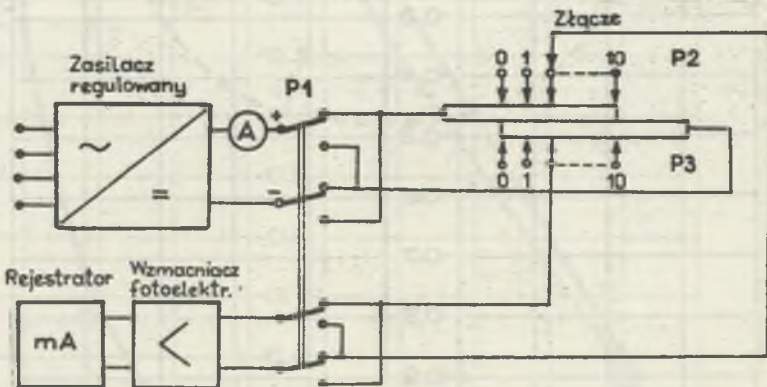
Różnice te wynikają:

- z błędów strojenia i nieliniowości modelu (rezystory masowe, wykazujące zmienność rezystancji przy przepływie prądu),
- z błędów pomiaru,
- z porównania obliczeń dla modelu o 100 elementach skończonych z pomiarami dla modelu o 20 elementach skończonych.

Wyniki uzyskane przez autora dla badanych modeli analogowych (złącza zgodne, przeciwne i zerowe, przy $c = 1$ oraz $\delta = 0$) dowodzą poprawności obu modeli linearnych złączy stykowych.

2.6.4. Badanie laboratoryjne rozkładu napięć w jednorodnych złączach szyn płaskich¹⁾

Badaniom poddano zbiór złączy płaskich uzyskanych z odcinków szyn AP 80 x 10 dociśniętych do siebie za pomocą prasy hydraulicznej PH-30. Poprzez zmianę siły docisku złącza zmieniano ich rezystancję zestykową. Zapewniono stałe ciśnienie na powierzchniach zestykowych złączy dla spełnienia warunku jednorodności złącza. Schemat ideowy układu pomiarowego przedstawia rys. 2.11.



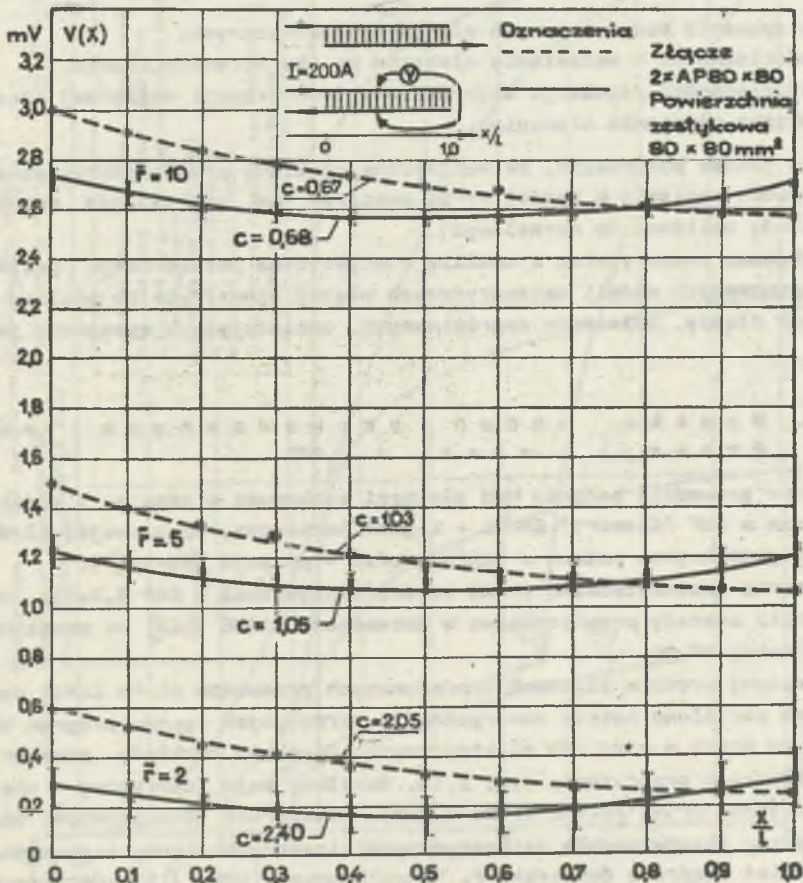
Rys. 2.11. Schemat ideowy układu pomiarowego do badania rozkładu spadków napięć w złączach stykowych płaskich

¹⁾ Badanie przeprowadził mgr inż. A. Wierzbicki pod kierunkiem autora.

Za pomocą przełącznika zmiany biegunowości p_1 i dwukrotnego wykonywania każdego pomiaru umożliwiono praktyczne wyeliminowanie wpływu pasożytniczych sił termoelektrycznych na wyniki pomiarów. Pomiarów wykonywano przy prądzie 200 A, stanowiącym ok. 10% prądu dopuszczalnego długotrwale dla zastosowanych szyn płaskich przy przyroście temperatury 45 K.

W czasie pomiaru szyny ze złączem zachowywały praktycznie temperaturę otoczenia, wobec ustalonego przyrostu temperatury szyn przy prądzie 200 A, wynoszącym 0,5 K i czasie cyklu pomiarowego krótszym od ciepłej stałej czasowej szyny.

Pomiary spadku napięcia na rezystancji zestykowej złączy zostały wykonane dla 11 punktów wzdłuż złącza (podział złącza na 10 jednakowych odcinków). Badano 3 zbiory złączy o wybranych rezystancjach względnych ($r = 2$,



Rys. 2.12. Wyniki pomiarów laboratoryjnych i obliczeń analitycznych rozkładu spadku napięcia w jednorodnych złączach prostych zgodnych (linia ciągła) i przeciwnych (linia przerywana). Zaznaczono wartości średnie pomiarzone - (x) dla złączy zgodnych, (o) dla złączy przeciwnych

5, 10), uzyskując dla każdego punktu pomiarowego w danym zbiorze 30 wyników.

Dla każdego punktu (30 wyników) obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe i dwustronny przedział ufności po uprzednim zweryfikowaniu hipotezy o rozkładzie prawdopodobieństwa Studenta (zastosowano test Kruskala-Wallisa na poziomie ufności nie mniejszym od 90%). Wyniki pomiarów i obliczeń podano na rys. 2.12.

Uzyskano dobrą zgodność wartości średnich uzyskanych wyników pomiarów z obliczeniami wg zależności analitycznych dla złącza jednorodnego prostego, zgodnego i przeciwnego, z ciągłym rozkładem rezystancji (różnice nie przekraczają 5% wartości obliczonych z wyjątkiem jednej serii pomiarowej $r = 2$, $x/1 = 0,2$, gdzie różnica wynosi 9%). Rozrzut wyników pomiarowych jest dość znaczny, co wynika z wielu uwarunkowań fizycznych, a głównie:

- występowania pasożytniczych sił termoelektrycznych,
- niedokładności w ustawieniu elektrod po obu stronach złącza,
- niedokładności regulacji siły docisku (rezystancji względnej złącza),
- zjawiska płynięcia aluminium.

Należy jednak podkreślić, że empiryczne rozkłady prawdopodobieństwa wartości spadku napięcia w każdej serii pomiarów są praktycznie symetryczne (rozkłady zbliżone do normalnego).

Wykonane pomiary wraz z analizą statystyczną potwierdzają przydatność zaproponowanych modeli matematycznych złączy linearnych do analizy rzeczywistych złączy, zwłaszcza zaprasowanych, spełniających wymagania jednorodności.

2.6.5. Wyniki badań prowadzonych w Francji oraz w NRD

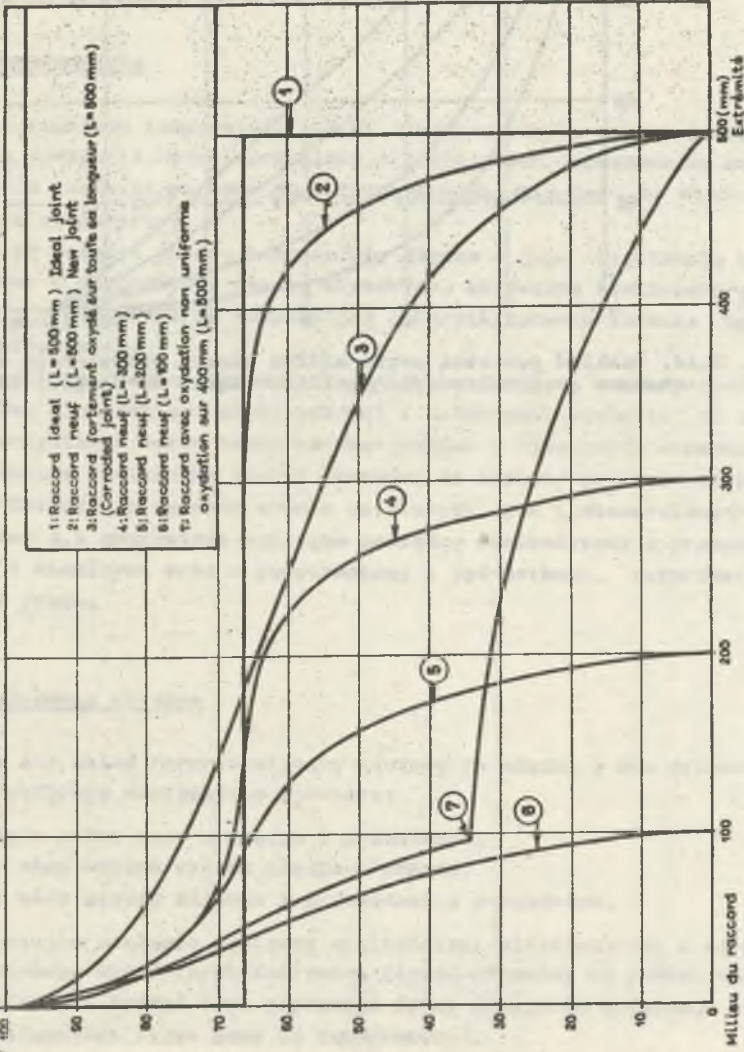
Autor prowadził badania nad złączami stykowymi w czasie 7 miesięcznego stażu w EDF (Clamart) ERMEI - Lignes Asriennes, opracowując 12 dokumentów (najważniejsze podano w bibliografii - pozycje [98-103]).

Badania zapoczątkowane przez autora kontynuował w EDF B.Dalle. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w dokumencie CIGRE [112] na spotkaniu grupy roboczej WG 05.

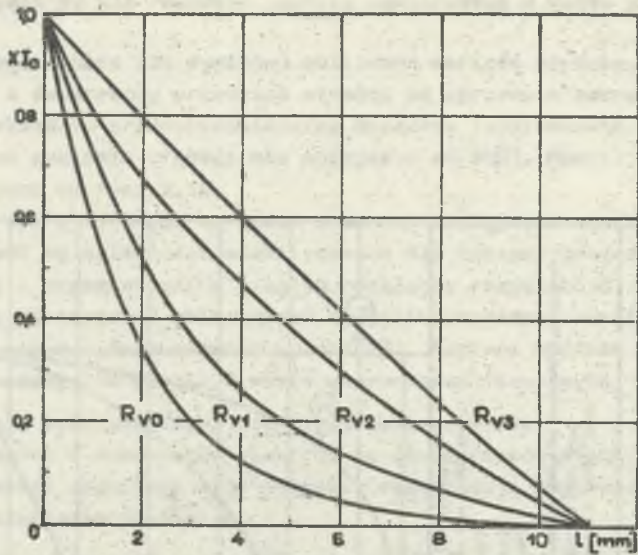
Rozpływy prądu w złączach zaprasowanych przewodów Al-Fe linii napowietrznych określono metodą numeryczną, wykorzystując typowy program obliczeń rozptywu prądu w sieciach elektrycznych. Uzyskane rozkłady gęstości prądu w złączach przedstawia rys. 2.13. Rozkłady mają identyczny charakter jak uzyskane przez autora (rys. 2.10a). Potwierdza to poprawność opracowanych przez autora modeli matematycznych linearnych złączy stykowych.

Również rozprawa doktorska F. Hengelhaupta (NRD) [113], dotycząca technologii połączeń zaprasowanych przewodów instalacyjnych o przekroju 1...4 mm², tworzących złącza przeciwne, zawiera opis rozptywu prądu w złączach (rys. 2.14) zgodny z uzyskanym przez autora (rys. 2.10b).

Courant dans le manchon (en %) 120
Distribution of the current density along the stator.
Figure 4 Répartition de la densité de courant dans le manchon (demi raccord de jonction pour conducteur ASTER 5/70)



Rys. 2.13. Rozkład gęstości prądu wzdłuż złącza zgodnego wg [112]. Zachowano oryginalny opis rysunku



Rys. 2.14. Rozkład gęstości prądu wzdłuż złącza przeciwnego wg [113]. Zachowano oryginalny opis rysunku. Złącze ma długość 11 mm

3. MODELOWANIE STACJONARNEGO ROZKŁADU TEMPERATURY W UKŁADZIE ZŁĄCZE-PRZEWODY

3.1. Wprowadzenia

Badanie rozkładu temperatury układu złącze-przewody jest niezbędne ze względu na wymagania norm i przepisów określających dopuszczalne wartości temperatur, a także ze względu na zależność wielu zjawisk i wielkości w złączach od temperatury.

Znajomość relacji między temperaturą złącza a jego rezystancją może być wykorzystana w diagnostyce złączy stykowych, zwłaszcza elektroenergetycznych przy zdalnym pomiarze temperatury (mierniki promieniowania podczerwonego, termowizja).

Przy analizie zjawisk termokinetycznych celowe jest wykorzystanie analogii między wielkościami elektrycznymi i cieplnymi. Analogie te umożliwiają wykorzystanie metod badań matematycznych i fizycznych stosowanych w elektrotechnice (zwłaszcza teorii obwodów) do analizy procesów termokinetycznych. Dotyczy to zarówno stanów ustalonych, jak i nieustalonych.

W tabelicy 3.1 zestawiono analogie pomiędzy wielkościami i prawami elektrycznymi i cieplnymi wraz z oznaczeniami i jednostkami, wykorzystane w niniejszej pracy.

3.2. Założenia wstępne

Rozważa się układ termokinetyczny złożony ze złącza i dwu przewodów¹⁾, w którym występują następujące zjawiska:

- wydzielanie strat mocy w złączu i przewodach,
- przepływ mocy wzdłuż układu złącza-przewody,
- przepływ mocy między złączem z przewodami a otoczeniem.

Wykorzystując analogię pomiędzy wielkościami elektrycznymi i cieplnymi można odwzorować układ termokinetyczny złącza-przewody za pomocą sieci oporów cieplnych i źródeł typu prądowego (przy przyjęciu wstępnego założenia o niezależności strat mocy od temperatury).

¹⁾ Złącze rozgałęźne IV, do którego przyłączone są 4 przewody, może być sprowadzone do zastępczego układu termokinetycznego złącza prostego z 2 przewodami dla wyznaczenia rozkładu przyrostu temperatury złącza.

Tablica 3.1

Analogie między wielkościami elektrycznymi i cieplnymi
Oznaczenia i wymiary jednostek

Wielkości elektryczne	Wymiar SI	Wielkości cieplne	Wymiar SI
Prąd elektryczny Gęstość prądu: - liniowa - powierzchniowa	A A/m A/m^2	Strumień cieplny P Gęstość strumienia cieplnego: - liniowa P - powierzchniowa	W W/m W/m^2
Potencjał elektryczny	V	Temperatura T	$^{\circ}C, K$
Napięcie elektryczne U	V	Różnica temperatur ΔT	K
Rezystancja	Ω	Opór cieplny W	K/W
Gęstość liniowa rezystancji rozłożonej szeregowo	Ω/m	Gęstość liniowa oporu cieplnego rozłożonego szeregowo	K/Wm
Gęstość liniowa rezystancji rozłożonej równoległe	$\Omega \cdot m$	Gęstość liniowa oporu cieplnego rozłożonego równoległe	$\frac{K \cdot m}{W}$
Pojemność elektryczna C_0	ΔV^2	Pojemność cieplna C	$\frac{W \cdot s}{K}$
Prawo Ohma $I = \frac{U}{R}$		Prawo Ohma (cieplna) $\frac{\Delta T}{P} = \frac{W}{W}$	W
I prawo Kirchhoffa $\sum_k I_k = 0$	A	Zasada zachowania energii $\sum_k P_k = 0$	W
II prawo Kirchhoffa $\sum_{k,1} (U_k, E_1) = 0$	V	II prawo Kirchhoffa (cieplna ¹⁾) $\sum_{k,1} (\dot{\psi}_k, \dot{\psi}_1) = 0$	K

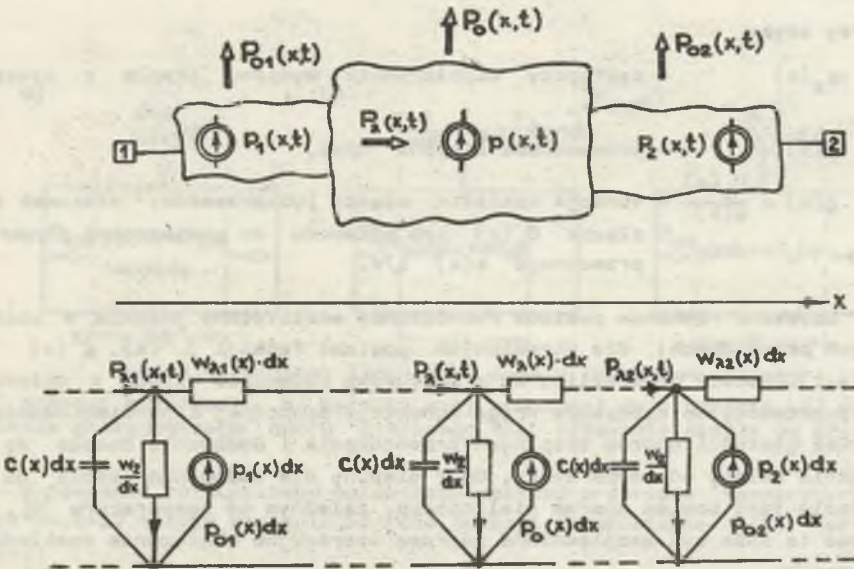
1) $\dot{\psi}_1$ - różnica temperatur wytwarzana przez źródło, $\dot{\psi}_k$ - spadek temperatury na k-tym oporze cieplnym.

Opory cieplne występujące w rozważanym przypadku są oporami rozłożonymi:

- łączonymi szeregowo w przypadku oporu dla przewodzenia ciepła wzdłuż złącza i przewodów,
- łączonymi równolegle w przypadku oporu cieplnego dla oddawania ciepła do otoczenia.

Pomija się opór cieplny dla przewodzenia ciepła wewnątrz złącza w kierunku prostopadłym do osi podłużnej układu złącze-przewody jako bardzo mały w porównaniu z oporami dla oddawania ciepła do otoczenia oraz oporem dla przewodzenia ciepła wzdłuż złącza.

Układ złącze-przewody może być zatem - przy przyjętym założeniu - rozważany jako linearny. Schemat zastępczy układu stanowi kontinuum złożone z oporów cieplnych, źródeł prądowych i pojemności cieplnych (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Model termokinetyczny linearnego złącza stykowego
 a) struktura modelu, b) schemat zastępczy w postaci linii aktywnej o parametrach rozłożonych

Z równania bilansu mocy (I prawo Kirchhoffa) można uzyskać równanie różniczkowe cząstkowe II rzędu, opisujące rozkład przyrostu temperatury złącza ponad temperaturę otoczenia:

$$\frac{\partial^2 \vartheta(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{x^2(x)} \cdot \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial t} - f^2(x) \vartheta(x,t) = -w_{\lambda}(x)p(x,t), \quad (3.2-1)$$

w którym:

$\chi^2(x) = \frac{1}{\lambda(x)c(x)}$ - przewodność temperaturowa (termometryczna) materiału złącza w m^2/s . W przypadku złącza złożonego z 2 różnych materiałów konieczne jest wyznaczenie zastępczej przewodności temperaturowej,

$c(x)$ - jednostkowa pojemność cieplna Ws/Km ,

$f^2(x) = \frac{w_\lambda(x)}{\pi(x)}$ - stosunek liniowej gęstości oporu cieplnego przewodzenia i liniowej gęstości oporu cieplnego oddawania ciepła do otoczenia w $1/m^2$ (funkcja przenoszenia w teorii linii o parametrach rozłożonych)

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

przy czym:

$\alpha_z(x)$ - zastępczy współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem W/m^2K ,

$\lambda(x)$ - przewodność cieplna W/mK ,

$g(x) = \frac{O_b(x)}{s(x)}$ - funkcja kształtu złącza lub przewodu; stosunek obwodu złącza $O_b(x)$ lub przewodu do powierzchni przekroju poprzecznego $s(x)$ $1/m$.

Uzyskane równanie posiada rozwiązanie analityczne jedynie w szczególnych przypadkach: dla określonych postaci funkcji $\lambda^2(x)$, $f^2(x)$ oraz $p(x,t)$. Należy podkreślić, że w przypadku oddawania ciepła z układu złącze-przewody do otoczenia drogą konwekcji swobodnej i promieniowania stosunek gęstości oporów cieplnych przewodzenia i oddawania ciepła do otoczenia zależy od temperatury. Opór cieplny dla oddawania ciepła do otoczenia jest bowiem oporem nieliniowym, zależnym od temperatury [9]. Zależność ta może być uwzględniona poprzez iteracyjne obliczenie rozkładu temperatury.

Przy poszukiwaniu rozwiązań analitycznych równania przyjęto wstępnie założenie liniowości oporów oraz pojemności cieplnych występujących w układzie termokinetycznym złącze-przewody.

3.3. Uwzględnienie zależności źródeł mocy w układzie termokinetycznym od temperatury

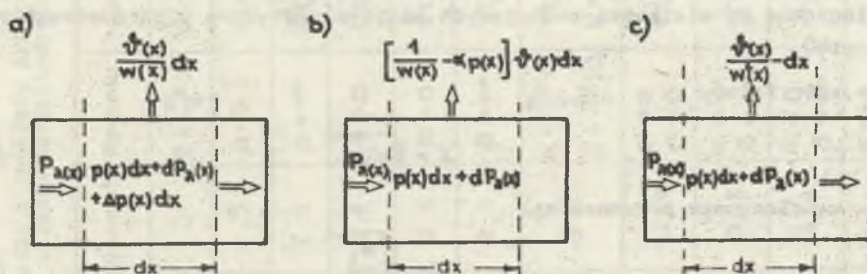
Złącza stykowe pracują zwykle w obwodach z prądem praktycznie niezależnym od rezystancji złącza. W analizie stanu cieplnego ustalonego złącza można przyjąć założenie o zależności gęstości strat mocy w złączu

od temperatury wg uproszczonego wzoru (dla jednakowych materiałów styków w złączu)¹⁾.

$$p(x) = p(x) + \Delta p(x, \vartheta) = p(x) + p(x) \delta(x) \quad (3.3-1)$$

Bilans mocy odcinka dx linearnego układu termokinetycznego nie zmieni się, jeśli zastąpić wydzielenie strat dodatkowych zależnych od przyrostu temperatury $\Delta p(x, \vartheta)$ (rys. 3.2a) odpowiednim zmniejszeniem mocy oddawanej do otoczenia (rys. 3.2b). Takie postępowanie umożliwi uwzględnienie wpływu przyrostu temperatury na moc wydzieloną w złączu poprzez zastąpienie gęstości oporu cieplnego oddawania ciepła do otoczenia (rys. 3.2c) $w(x)$ gęstością $w'(x)$

$$w'(x) = \frac{w(x)}{1 - \alpha p(x) w(x)} \quad (3.3-2)$$



Rys. 3.2. Odcinek linearnego modelu termokinetycznego

a) schemat wyjściowy, b) korekta mocy oddawanej do otoczenia, c) wprowadzenie skorygowanego oporu cieplnego dla oddawania ciepła do otoczenia

W równaniu różniczkowym opisującym rozkład przyrostu temperatury złącza (4.2-1) należy zastąpić wartość funkcji przenośności $\delta(x)$ wartością $\delta'(x)$:

$$\delta'(x) = \delta(x) \sqrt{1 - \alpha p(x) w(x)} \quad (3.3-3)$$

uzyskując zgodne z założeniem (4.3-1) uwzględnienia wpływu zmienności złącza na rozkład przyrostu temperatury.

¹⁾Uproszczenie dotyczy głównie zależności strat mocy w zestykach elementarnych od temperatury.

3.4. Analityczny opis rozkładu przyrostu temperatury w liniowych układach termokinetycznych

Przyjmując założenie o liniowości oporów cieplnych można uzyskać analityczny opis rozkładu przyrostu temperatury w układach liniowych odcinkami jednorodnych, przy wykorzystaniu zasady superpozycji¹⁾. Rzeczywisty liniowy układ termokinetyczny zastępuje się - zgodnie z zasadą superpozycji określoną liczbą układów składowych, z których każdy zawiera jedno źródło temperaturowe lub odcinek z rozłożonymi źródłami mocy. Rozkład przyrostu temperatury może być uzyskany jako suma rozkładów składowych:

$$\psi(x) = \psi^I(x) + \psi^{II}(x) + \psi^{III}(x) + \dots \quad (3.4-1)$$

przy czym indeksy I, II, III ... odnoszą się do poszczególnych schematów składowych.

Przy wyznaczaniu rozkładów przyrostu temperatury wykorzystano wielkości charakterystyczne dla układu liniowego o parametrach rozłożonych (analogiczne do wielkości cechujących linię elektryczną o parametrach rozłożonych):

- opór falowy

$$Z = \sqrt{w_{\lambda} w} \quad (3.4-2)$$

- współczynnik przenoszenia

$$\delta = \sqrt{\frac{w_{\lambda}}{w}} \quad (3.4-2)$$

- opór wejściowy W_w , zdefiniowany jako zastępczy opór cieplny układu o parametrach rozłożonych.

Autor wyodrębnił 3 podstawowe ukształtowania schematów zastępczych składowych układów termokinetycznych, występujące przy wyznaczaniu przyrostu temperatury metodą superpozycji²⁾, których schematy i wyprowadzone zależności opisujące rozkład przyrostu temperatury zestawiono w tabl.3.2. Opory W_a i W_b , obciążające analizowane układy, są często oporami wejściowymi pasywnych liniowych układów termokinetycznych. Zależności wyznaczające opory wejściowe podano w tabl. 3.3.

Metoda analityczna jest efektywna jedynie dla najprostszych ukształtowań układu termokinetycznego.

¹⁾ W publikacji [22] przedstawiono m.in. założenia oraz wyznaczenie rozkładu przyrostu temperatury w układzie termokinetycznym, zawierającym przewody i złącze szeregowo (czołowe).

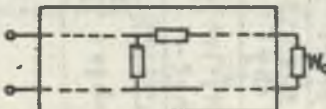
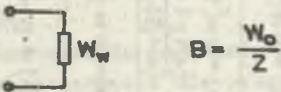
²⁾ Szczegółowe wyprowadzenie zależności p. 3.4 zawiera opracowanie autora [109] "Analiza układu termokinetycznego zawierającego złącze proste zgodne i jednorodne przewody".

Podstawowe schematy zastępcze i rozkłady przyrostów temperatury linearnych układów termokinetycznych

Lp.	Schemat układu, wielkości zadane	Wariant	Warunki	Rozkład przyrostu temperatury
1		1.1	$\beta = \frac{w_b}{z} > 0$	$\vartheta(x) = \vartheta_a (ch \gamma x - \frac{ch \gamma l + \beta sh \gamma l}{\beta ch \gamma l + sh \gamma l} sh \gamma x)$
		1.2	$\beta = 0$	$\vartheta(x) = \vartheta_a (ch \gamma x - cth \gamma l \cdot sh \gamma x)$
		1.3	$\beta = \infty$	$\vartheta(x) = \vartheta_a (ch \gamma x - th \gamma l \cdot sh \gamma x)$
2		2.1	$\beta > 0$	$\vartheta(x) = pw (1 - \frac{1 + \beta(1 - sh \gamma l)}{sh \gamma l - \beta ch \gamma l} sh \gamma x)$
		2.2	$\beta = 0$	$\vartheta(x) = pw (1 - \frac{sh \gamma x}{sh \gamma l})$
		2.3	$\beta = \infty$	$\vartheta(x) = pw (1 - \frac{sh \gamma l - 1}{ch \gamma l} sh \gamma x)$
3		3.1	$\alpha = \frac{w_a}{z} > 0$ $\beta = \frac{w_b}{z} > 0$	$\vartheta(x) = pw [1 + (\alpha H - 1) ch \gamma x + H sh \gamma x]$ $H = \frac{ch \gamma l + \beta sh \gamma l - 1}{(\alpha + \beta) ch \gamma l + (1 + \alpha \beta) sh \gamma l}$
		3.2	$\alpha = 0$ $\beta = 0$	$\vartheta(x) = pw (1 - ch \gamma x + \frac{ch \gamma l - 1}{sh \gamma l} sh \gamma x)$
		3.3	$\alpha = \infty$ $\beta = \infty$	$\vartheta(x) = pw$
		3.4	$\alpha = 0$ $\beta = \infty$	$\vartheta(x) = pw (1 - ch \gamma x + th \gamma l \cdot sh \gamma x)$
		3.5	$\alpha = \infty$ $\beta = 0$	$\vartheta(x) = pw (1 - ch \gamma x)$

Tablica 3.3

Opór wejściowy linearnego układu termokinetycznego w zależności od oporu falowego, współczynnika przeniesienia oraz długości i obciążenia układu

L.p.	Układ, dane	Warunki	Opór wejściowy
1	 <p style="text-align: center;">Z, γ, l</p>	$\beta > 0$	$W_w = Z \frac{\beta \operatorname{ch} \gamma l + \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l + \beta \operatorname{sh} \gamma l}$
2		$\beta = 0$	$W_w = Z \operatorname{th} \gamma l$
3		$\beta = \infty$	$W_w = Z \operatorname{cth} \gamma l$
4	 <p style="text-align: center;">$B = \frac{W_0}{Z}$</p>	$L \rightarrow \infty$ β dowolne	$W_w = Z$
5		$L = 0$ β dowolne	$W_w = W_0$

W przypadku znacznej większości modeli złączy stykowych nie istnieją dokładne rozwiązania analityczne równań opisujących rozkład przyrostu temperatury, wyrażone za pomocą funkcji elementarnych, a nieliczne przypadki szczególne, w których rozkład przyrostu temperatury mógłby być wyrażony funkcjami wyższych rzędów (Greena, gamma Eulera, Bessela, Webera, Neumana, Hankela i funkcjami hipergeometrycznymi) nie mają znaczenia praktycznego i obliczenia wartości przyrostów temperatury są ponadto w tych przypadkach dość pracochłonne.

Z powyższego etanu rzeczy wynika:

- konieczność opracowania metody numerycznej wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury w dowolnym linearnym układzie termokinetycznym,
- ograniczenie zastosowania metody analitycznej do przybliżonego wyznaczenia rozkładu przyrostu temperatury w prostych układach termokinetycznych.

W tabelicy 3.4 zestawiono wyprowadzone przez autora funkcje rozkładu przyrostu temperatury w trzech linearnych układach termokinetycznych. Układ 1 reprezentuje jednorodny złącze z przewodami jednorodnymi, przy czym przyjęto stałą gęstość strat mocy w złączu. Funkcja opisująca rozkład przyrostu temperatury zawiera 3 człony reprezentujące przyrosty składowe przyrostu temperatury złącza, wymuszone stratami mocy w złączu, stratami mocy w przewodzie 1 i przewodzie 2. Podkreślić należy złożoność uzyskanych zależności i w związku z tym małą przydatność do obliczeń praktycznych.

Przykłady wykorzystania superpozycji do wyznaczenia rozkładu przyrostu temperatury w liniowych układach termokinetycznych

L.p.	Układ termokinetyczny, dane	Rozkład przyrostu temperatury	Funkcje pomocnicze
1		$\vartheta(x) = P_N \cdot W \left[\bar{T} \left(1 + (\beta_1 H_3 - 1) \operatorname{ch} \gamma x + H_3 \operatorname{sh} \gamma x \right) + B_1 \left(1 - \operatorname{ch} \gamma_1 l_1 + H_1 \operatorname{sh} \gamma_1 l_1 \right) (\operatorname{ch} \gamma x - \frac{1}{\beta_2} \operatorname{sh} \gamma x) + B_2 \left(1 - \operatorname{ch} \gamma_2 l_2 + H_2 \operatorname{sh} \gamma_2 l_2 \right) (\operatorname{ch} \gamma (l-x) - \frac{1}{\beta_2} \operatorname{sh} \gamma (l-x)) \right]$ $\beta_1 = \frac{Z_1}{2} \operatorname{cth} \gamma_1 l_1, \quad \beta_2 = \frac{Z_2}{2} \operatorname{cth} \gamma_2 l_2$ $\beta_3 = \frac{\beta_1 \operatorname{ch} \gamma l + \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l + \beta_1 \operatorname{sh} \gamma l}, \quad \beta_4 = \frac{\beta_2 \operatorname{ch} \gamma l + \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l + \beta_2 \operatorname{sh} \gamma l}$	$H_1 = \frac{\operatorname{ch} \gamma_1 l_1 + \beta_1 \operatorname{sh} \gamma_1 l_1 - 1}{\beta_1 \operatorname{ch} \gamma_1 l_1 + \operatorname{sh} \gamma_1 l_1}$ $H_2 = \frac{\operatorname{ch} \gamma_2 l_2 + \beta_2 \operatorname{sh} \gamma_2 l_2 - 1}{\beta_2 \operatorname{ch} \gamma_2 l_2 + \operatorname{sh} \gamma_2 l_2}$ $H_3 = \frac{\operatorname{ch} \gamma l + \beta_3 \operatorname{sh} \gamma l - 1}{(\beta_1 + \beta_2) \operatorname{ch} \gamma l + (\beta_1 \beta_2) \operatorname{sh} \gamma l}$ $B_1 = \frac{P_1 W_1}{P_N \cdot W}, \quad B_2 = \frac{P_2 W_2}{P_N \cdot W}, \quad \bar{T} = \frac{P}{P_N}$
2		$\vartheta(x) = P_N \cdot W \left[\left(1 - \frac{(1-\beta) \operatorname{ch} \gamma x}{\beta \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} \right) + A \left[\operatorname{ch} \frac{2cx}{l} - \frac{(\operatorname{ch} c + \frac{2c}{\beta l} \operatorname{sh} c) \operatorname{ch} \gamma x}{\beta \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} \right] \right]$	$P(x) = P_N \left(1 + \frac{\operatorname{ch} \frac{2cx}{l}}{\operatorname{sh}^2 \frac{\gamma}{2}} \right)$ $A = \left[\left(1 - \frac{\beta c^2}{\gamma \beta l \Gamma} \right) \operatorname{sh}^2 \frac{c}{2} \right]^{-1}$ $B = \frac{P_1 W_1}{P_N \cdot W}$
3*		$\vartheta(x) = \bar{T} \cdot P_N W \left[1 - \frac{(1-\beta) \operatorname{ch} \gamma x}{\beta \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2} + \operatorname{ch} \frac{\gamma l}{2}} \right]$	$B = \frac{P_1 W_1}{P_N \cdot W}$

* Rozkład 3 wynika również z literatury [14] opisującej jednorodny tor prądowy z przewężeniem

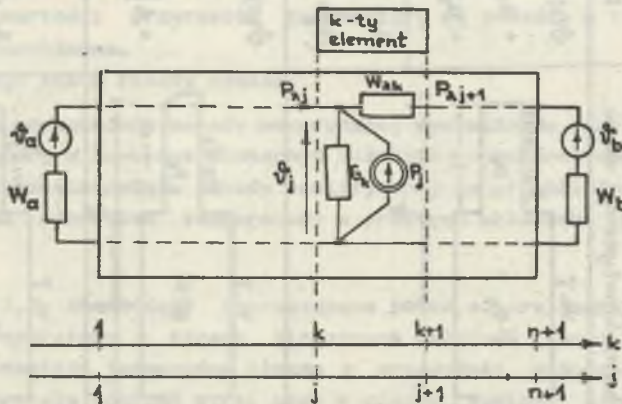
Układ 2 reprezentuje symetryczne złącze proste zgodne, łączące jednakowe nieskończenie długie przewody. Pierwszy człon funkcji opisującej rozkład przyrostu temperatury złącza wyraża przyrost składowy, jaki powstałby w złączu idealnym. Drugi człon uwzględnia przyrost składowy wywołany różnicą strat mocy w złączu rzeczywistym i idealnym.

Układ 3 reprezentuje jednorodne złącze ze stałą gęstością strat mocy, łączące jednakowe jednorodne nieskończenie długie przewody. Układ 3 stanowi szczególny przypadek układu 1. Możliwe jest również wyprowadzenie układu 3 jako szczególnego przypadku układu 2. Układ 3 może reprezentować złącze zgodne, przeciwne i zerowe, łączące jednakowe, nieskończenie długie przewody, przy uśrednieniu gęstości strat mocy w złączach.

3.5. Metoda numeryczna wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury w niejednorodnym liniowym i linearnym układzie termokinetycznym

Linearne złącze stykowe tworzy wraz z przewodami niejednorodnymi - w ogólnym przypadku - linearny układ termokinetyczny¹⁾, który można analizować metodą elementów skończonych, przy wykorzystaniu superpozycji. Odpowiada to oczywiście założeniu liniowości układu, tj. niezależności parametrów źródeł i oporów cieplnych od rozprywu mocy i rozkładu przyrostów temperatury.

Schemat zastępczy linearnego układu termokinetycznego stanowi linia o oporach rozłożonych i rozłożonych źródłach mocy. Na końcach linii mogą być wymuszone przyrosty temperatury i może występować obciążenie skupionymi oporami cieplnymi (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Schemat zastępczy linearnego układu termokinetycznego dla numerycznej analizy rozkładu przyrostu temperatury

¹⁾ Linearne układy termokinetyczne odwzorowują również inne urządzenia elektryczne lub ich elementy, np. kabel o zmiennych warunkach wymiany ciepła wzdłuż długości, tory prądowe aparatów elektrycznych itp.

Ze względu na organizację rozwiązania numerycznego konieczne jest wprowadzenie podwójnej dyskretnej osi rzędnych. Indeks (współrzedną) j przypisano źródłom mocy.

Indeks k oznacza miejsce występowania elementów pasywnych (oporów cieplnych) a także miejsce występowania wielkości składowych pochodzących od źródła mocy lub źródła temperatury, w procesie obliczania metodą superpozycji. Szczegółową organizację obliczeń numerycznych rozkładu przyrostu temperatury i rozptywu mocy w linearnym układzie termokinetycznym przedstawiono w opracowaniu niepublikowanym [10], dostępnym w Pol. Śl.¹⁾.

Stosując superpozycję wyznacza się przyrost temperatury w dowolnym miejscu j jako sumę przyrostów składowych:

$$\dot{\vartheta}_j = \dot{\vartheta}_k = \sum_{j=1}^n [\dot{\vartheta}_j^{(k)} + \dot{\vartheta}_a^{(k)} + \dot{\vartheta}_b^{(k)}], \quad (3.5-1)$$

przy czym $\dot{\vartheta}_j^{(k)}$ dla $j = 1 \dots n$ oznacza przyrosty wywołane w miejscu k przez każde źródło mocy; $\dot{\vartheta}_a^{(k)}$ i $\dot{\vartheta}_b^{(k)}$ - oznaczają przyrosty wywołane w miejscu k przez źródło temperaturowe.

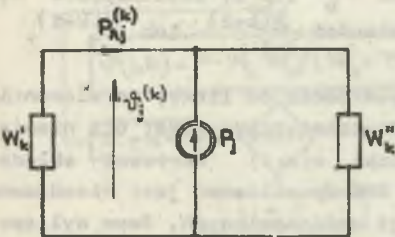
Według metody superpozycji układ zawierający n źródeł mocy i 2 źródła temperatury zastępuje się $n+2$ układami składowymi, zawierającymi tylko jedno źródło (mocy lub temperatury).

Dla każdego układu składowego można uzyskać schemat zastępczy, w którym występują źródło i opory zastępcze reprezentujące elementy pasywne układu składowego. Schemat zastępczy dla źródła w miejscu $j = k$ pokazuje rys.3.4.

Występujące w schemacie rys.3.4 opory W_k' i W_k'' są oporami wejściowymi łańcuchów czwórników pasywnych znajdujących się po obu stronach źródła.

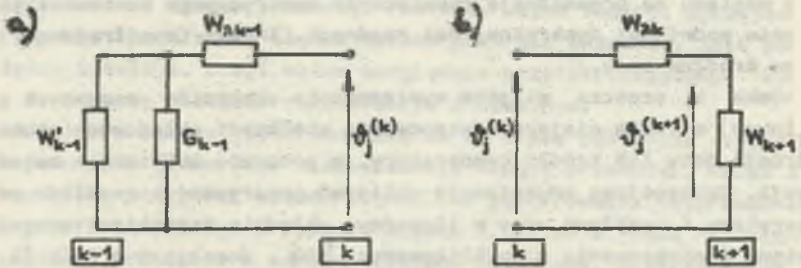
Schemat zastępczy (rys. 3.4) ilustruje wyznaczenie składowego przyrostu temperatury $\dot{\vartheta}_j^{(k)}$ w miejscu występowania źródła, tj. dla $j = k$. Składowe

przyrosty temperatury w miejscach oddalonych od źródła, które je wymusza, można wyznaczyć opierając się na schematach zastępczych pokazanych na rysunku 3.5.



Rys. 3.4. Schemat zastępczy układu składowego dla wyznaczenia przyrostu temperatury od źródła mocy w miejscu jego występowania

¹⁾Opracowanie autora "Metoda numeryczna wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury w niejednorodnym linearnym układzie termokinetycznym".



Rys. 3.5. Schematy zastępcze dla wyznaczenia składowego przyrostu temperatury wymuszonego przez źródło j w miejscu $k-1$ (schemat a) oraz miejscu $k+1$ (schemat b)

Metoda numeryczna obliczenia rozkładu przyrostu temperatury sprowadza się zatem do:

$n+1$ -krotnego wyliczenia oporów wejściowych widzianych z $n+1$ miejsc układu,

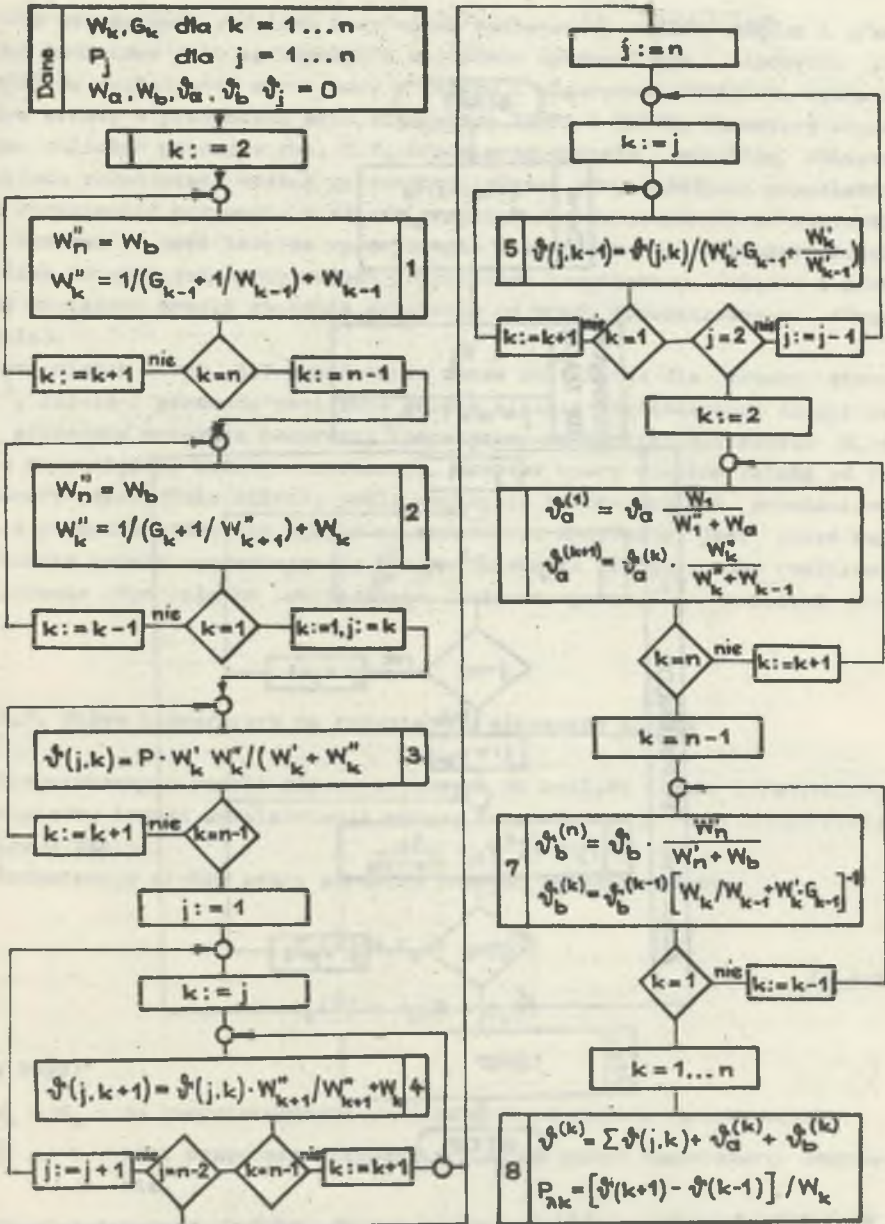
n -krotnego wyliczenia wielkości $\dot{\varphi}_j^{(k)}$ dla $k = j$, wynikających ze schematu zastępczego (rys. 3.4),

$n(n-1)$ -krotnego wyliczenia wielkości $\dot{\varphi}_j^{(k+1)}$ lub $\dot{\varphi}_j^{(k-1)}$ wynikających ze schematów zastępczych (rys. 3.5),

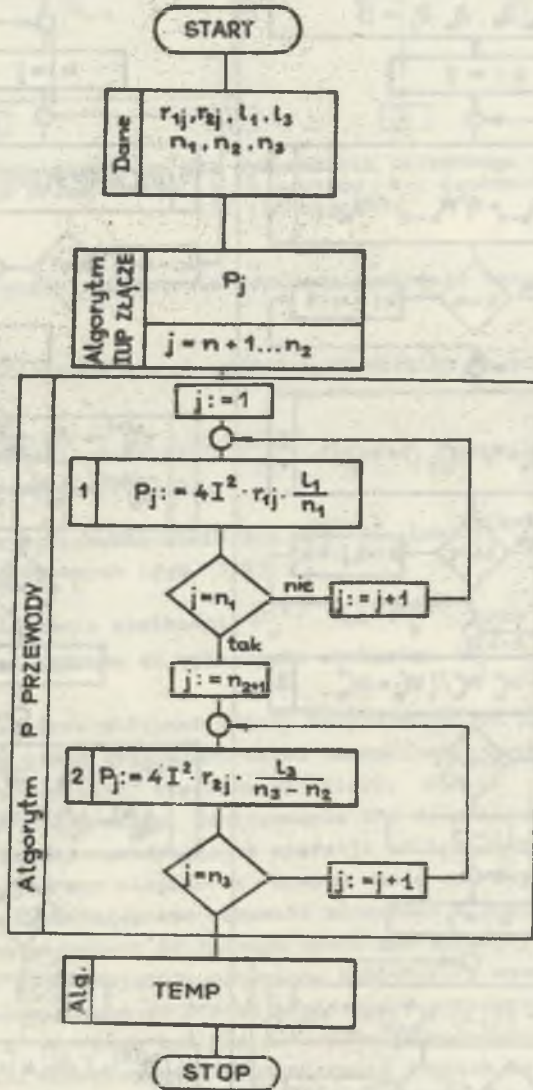
$2n$ -krotnego wyliczenia wielkości $\dot{\varphi}_a^{(k)}$ lub $\dot{\varphi}_b^{(k)}$, przy czym sposób wyliczenia jest podobny do wyliczenia wielkości $\dot{\varphi}_j^{(k+1)}$ lub $\dot{\varphi}_j^{(k-1)}$.

Dokładność wyników obliczeń zależy bezpośrednio od liczby n elementów skończonych, na które podzielono układ termokinetyczny. Nawet dla niewielkiej liczby n uzyskuje się znaczną liczbę $n(n+1)$ wartości składowych przyrostów temperatury. Zastosowanie EMC do obliczeń jest nieodzowne ze względu na liczbę występujących operacji obliczeniowych. Samo wyliczenie oporów dla jednego miejsca k wymaga wielu operacji matematycznych, związanych z przekształceniem schematu złożonego z łańcucha niejednakowych czwórników pasywnych do jednego oporu zastępczego. Szczegółową strukturę algorytmu wyznaczającego przyrosty temperatury wymuszone przez źródła mocy oraz pochodzące od źródeł temperatury przedstawiono na rys. 3.6.

Opory W_a i W_b mogą być dla przewodów jednorodnych wyznaczone zgodnie z tabl. 3.3. Dla przewodów nieskończenie długich są one równe oporom falowym przewodów. Przyrosty temperatury $\dot{\varphi}_a$ i $\dot{\varphi}_b$ są równe przyrostom temperatury przewodów jednorodnych w miejscu dostatecznie odległym od złącza.



Rys. 3.6. Algorytm TEMP obliczeń rozkładu temperatury i rozprywu mocy dla liniowego układu termokinetycznego



Rys. 3.7. Organigram obliczeń numerycznych rozkładu temperatury wzdłuż liniowego i liniowego układu złącze-przewody. Współrzędne $1 \dots n_1$ opisują przewód 1, $n_1 + 1 \dots n_2$ opisują złącze, $n_2 + 1 \dots n_3$ - przewód 2

3.6. Wyznaczenie przyrostu temperatury w linearnym i liniowym układzie złącze-przewody

Dla wyznaczenia rozkładu przyrostów temperatury wzdłuż złącza i przewodów konieczne jest sprzęgnięcie uprzednio opracowanego algorytmu IUP ZŁĄCZE do wyznaczenia strat mocy w złączu z algorytmem PRZEWODY, wyznaczającym straty w przewodach oraz algorytmem TEMP1 i TEMP2. Strukturę organigramu obliczeń pokazuje rys. 3.7. Organigram określa przebieg obliczeń rozkładu temperatury wzdłuż przewodów i złącza przy założeniu niezależności rezystancji przewodów i złącza oraz ich oporów cieplnych od temperatury. Stanowi to dość istotne uproszczenie w stosunku do rzeczywistości, możliwe do przyjęcia przy małych przyrostach temperatury (złącze i przewody obciążone prądem znacznie mniejszym od prądu dopuszczalnego długotrwale).

Organigram z rys. 3.7 przedstawia zatem obliczenia dla złącza zimnego¹⁾. Złącze i przewody obciążone prądem bliskim obciążalności długotrwałej przewodów wykazują przyrosty temperatury rzędu kilkudziesięciu K, co daje niepomijalne zmiany rezystancji. Również opory cieplne zależą od temperatury szczególnie silnie, jeśli występuje istotny udział promieniowania w procesie oddawania ciepła do otoczenia. Konieczne jest zatem uzupełnienie modelu wyznaczającego parametry złącza zimnego, aby realizował obliczenie dla złącza obciążonego (złącze gorące)¹⁾ znacznym prądem.

3.7. Wpływ temperatury na rezystancję elementów złącza

Przystosowanie modeli złączy stykowych do analizy złączy gorących wymaga między innymi uwzględnienia wpływu temperatury na rezystancje występujące w złączu.

Rezystancję styków można określić znanymi zależnościami:

$$\begin{aligned} r_a(\vartheta) &= r_a(1 + \alpha_a \vartheta) \\ r_b(\vartheta) &= r_b(1 + \alpha_b \vartheta) \end{aligned} \quad (3.7-1)$$

przy czym:

- α_a i α_b - są temperaturowymi współczynnikami zmiany rezystancji,
- ϑ - jest przyrostem temperatury styku ponad temperaturę otoczenia,
- r_a , r_b - są gęstościami rezystancji w temperaturze otoczenia.

¹⁾ Terminy proponowane przez autora.

Rezystancja zestykowa, scharakteryzowana gęstością r_c , w temperaturze otoczenia (złącze zimne) zmienia się wskutek:

- nagrzania styków a i b o przyrost ψ ponad temperaturę otoczenia,
- nagrzania zestyków elementarnych o przyrost ψ_c ponad temperaturę styków.

Problemem zależności rezystancji zestykowej od temperatury zajmuje się wiele publikacji. H. Höft w swej monografii [11] poświęconej fizyce zestyku przytacza wzór Hilgartha [44], ważny przy pominięciu zjawiska rekryształizacji w zestyku:

$$r_c(\psi_c) = r_c(T_s) \left[1 + 0,2 \ln \left(1 + \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} \psi_c \right) \right]. \quad (3.7-2)$$

w którym:

ψ_c - jest maksymalnym przyrostem temperatury zestyku elementarnego ponad temperaturę styków T_s ,

$r_c(T_s)$ - jest rezystancją zestyku elementarnego o temperaturze równej temperaturze styku T_s .

W oparciu o wzór Hilgartha można zatem napisać:

$$r_c(\psi) = r_c \left(1 + \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} \psi \right) \left[1 + 0,2 \ln \left(1 + \frac{\alpha_a + \alpha_b}{2} \psi_c \right) \right] \quad (3.7-3)$$

Wyznaczenie maksymalnego przyrostu temperatury zestyku elementarnego stanowi złożone zagadnienie, rozwiązywane w różnych publikacjach przy szeregu założeń upraszczających.

H. Höft wyprowadza [11] zależność określającą ustaloną wartość przyrostu temperatury metalicznego zestyku elementarnego ponad temperaturę styku:

$$\psi_c = \sqrt{\frac{V^2}{4L_\infty} + \left(\frac{L_0}{L_\infty} T_s \right)^2} - \frac{L_0}{L_\infty} T_s, \quad (3.7-4)$$

gdzie:

V - spadek napięcia na zestyku elementarnym,

L_0, L_∞ - liczby Lorentza w temperaturze styku T_s oraz w bardzo wysokiej temperaturze,

$L_T = \frac{\lambda_T}{\sigma_T}$ - przy czym λ_T jest przewodnością cieplną, σ_T - konduktywnością, T - temperaturę bezwzględną.

Dla małych wartości spadku napięcia ($V < 100$ mV przy błędzie przybliżenia mniejszym od 5%) H. M5ft [11] podejmuje prostą zależność przybliżoną (dla $L_0 = L_\infty = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ v}^2/\text{K}^2$)

$$\psi_c = 1750 \text{ v}^2, \quad (3.7-5)$$

ważną dla spadku napięcia V wyrażonego w woltach.

Zestyki elementarne z warstwą obcą wykazują mniejsze przyrosty temperatury niż zestyki metaliczne, przy tym samym spadku napięcia V . Zestyki elementarne w złączach elektroenergetycznych pracują zwykle przy dużych siłach docisku, wykazując wtedy własności zbliżone do wykazywanych przez zestyki metaliczne.

Wyznaczenie przyrostu temperatury zestyków elementarnych wg zależności wyprowadzonych dla zestyku metalicznego w przypadku złącza elektroenergetycznych jest bezpieczne.

Temperatura zestyków elementarnych w złączu w stanie długotrwałym może być opisana zależnością:

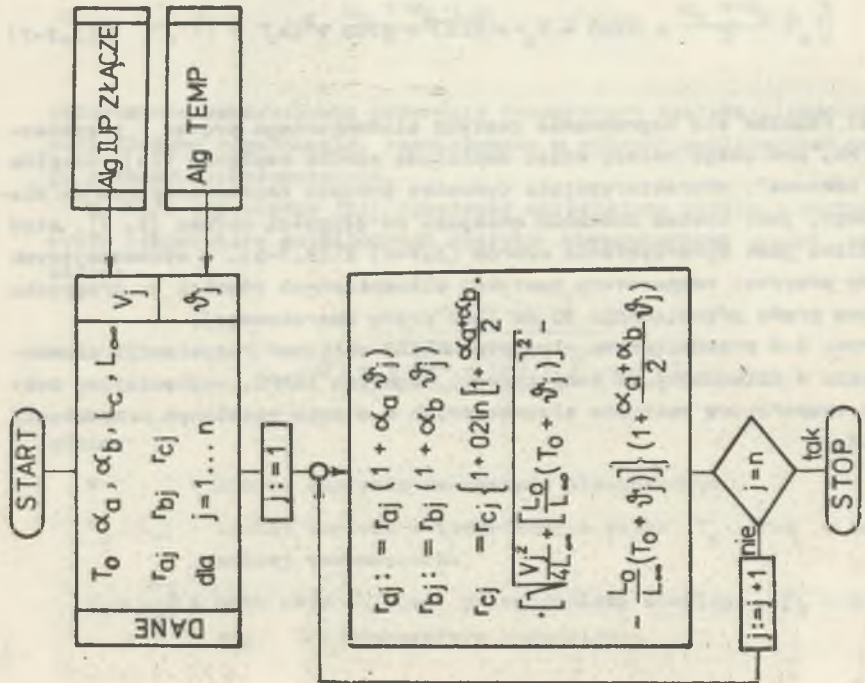
$$T(x) = T_0 + \psi(x) + \psi_c(x) \quad (3.7-6)$$

Dla przypadku małych spadków napięcia $V(x) < 100$ mV można uzyskać:

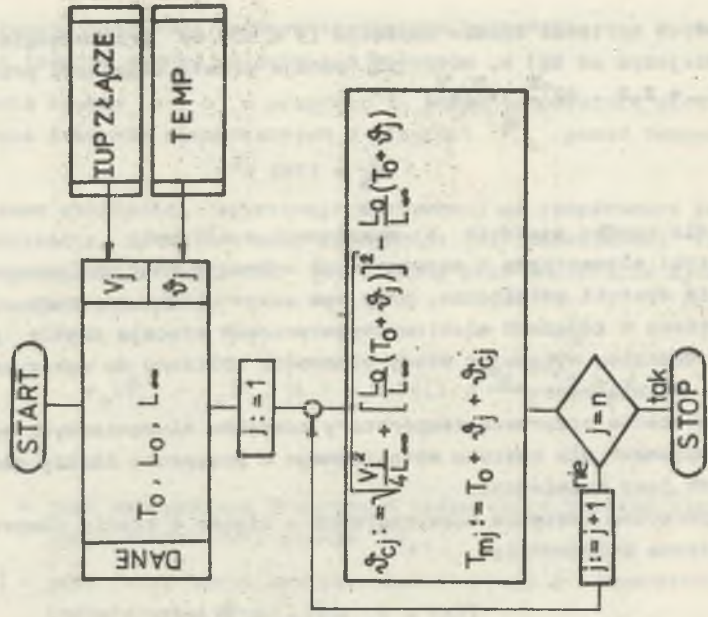
$$T(x) = T_0 + \psi(x) + 1750 \text{ v}^2(x) \quad (3.7-7)$$

Jeśli rozważa się nagrzewanie zestyku elementarnego prądem przemianym 50 Hz, pod uwagę należy wziąć amplitudę spadku napięcia $V(x)$. Ciężina "stała czasowa", charakteryzująca dynamikę procesu nagrzewania zestyku elementarnego, jest bowiem znacznie mniejsza od długości okresu [3, 7], stąd też możliwe jest wykorzystanie wzorów (3.7-4) i (3.7-5), wyznaczających ustalony przyrost temperatury zestyków elementarnych również w przypadku przepływu prądu przemiennego 50 Hz (lub prądu zwiarcowego).

Na rys. 3.8 przedstawiono algorytm DELTAR obliczeń rezystancji elementów złącza w zależności od temperatury. Algorytm TEMPC, wyznaczający maksymalną temperaturę zestyków elementarnych w stanie ustalonym, przedstawia rys. 3.9.



Rys. 3.8. Algorytm DELTA, wyznaczający rezystancje w złączu obciążonym (gorącym)



Rys. 3.9. Algorytm TEMP obliczeń temperatury ze-
styków elementarnych

3.8. Wyznaczenie rozkładu temperatury w nieliniowym linearnym układzie złącze-przewody

Organigram obliczeń wielkości cechujących nieliniowy linearny układ złącze-przewody (rozpływ prądu, rozkład spadku napięcia i strat mocy, rozkład przyrostu temperatury) można oprzeć na organigramie obliczeń dla układu liniowego i uwzględnieniu nieliniowości rezystancji oraz oporów cieplnych drogą iteracji.

Organigram za rys. 3.7 uzupełnia się o blok DELTAR, korygujący rezystancje przewodów, styków oraz rezystancję zestykową zależnie od przyrostu temperatury oraz blok DELTAW, korygujący opory cieplne zależnie od przyrostu temperatury (rys. 3.10).

Iteracja trwa aż do osiągnięcia żądanej dokładności wyznaczenia jednej z wielkości, np. przyrostu temperatury.

Dla zapewnienia stabilności procesu iteracyjnego konieczne jest wprowadzenie dodatkowej pętli stopniowo regulującej wartość prądu I w układzie; w kilku-kilkunastu krokach.

Funkcje korekcyjne dla korekty oporów i konduktancji cieplnych są zależne od sposobu i warunków wymiany ciepła.

Dla procesu przewodzenia ciepła można przyjąć stałość oporów cieplnych w_j , zakładając:

$$F_w = 1 \quad (3.8-1)$$

Konduktancje cieplne G_j , reprezentujące wymianę ciepła z otoczeniem, koryguje się zależnie od sposobu wymiany ciepła.

Przykładowo, w układzie oddającym ciepło do otoczenia drogą konwekcji naturalnej i promieniowania zachodzi zależność:

$$G_j = G_{cj} + G_{\epsilon j}, \quad (3.8-2)$$

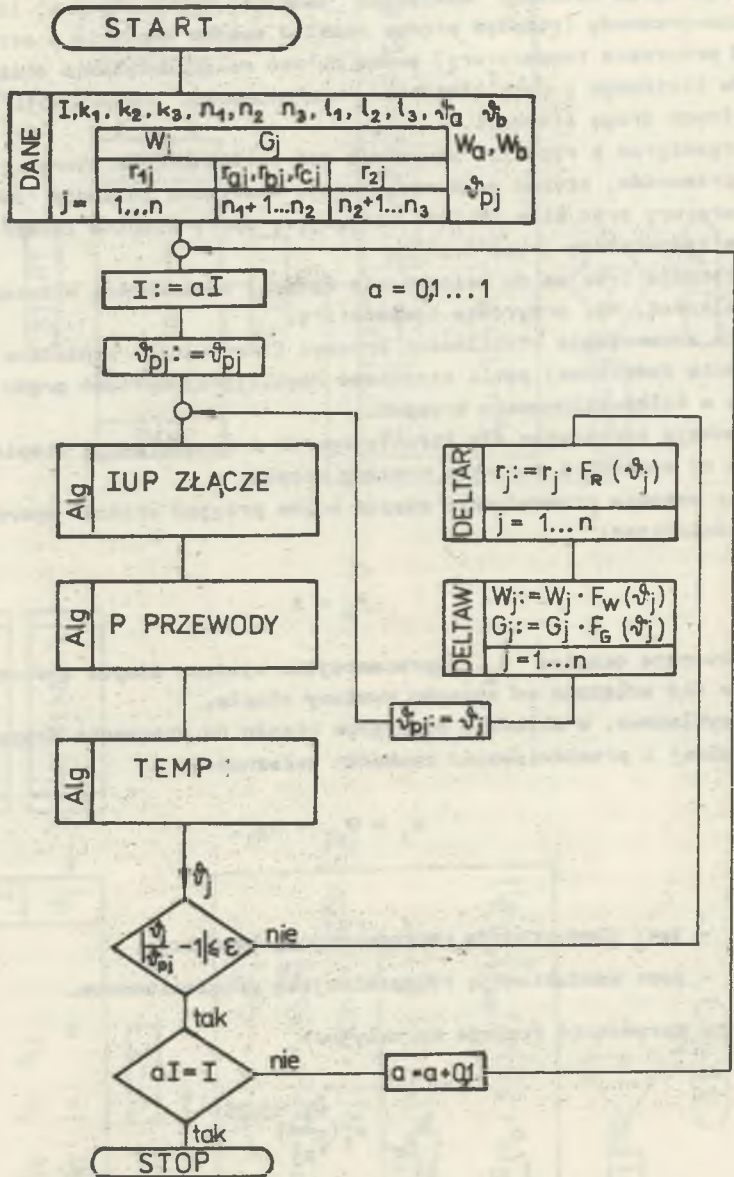
gdzie:

G_{cj} - jest konduktancją reprezentującą konwekcję,

$G_{\epsilon j}$ - jest konduktancją reprezentującą promieniowanie.

Można tu wprowadzić funkcje korekcyjne:

$$F_{G_c} = \left(\frac{q_1}{p_j} \right)^{0.25} \quad (3.8-3)$$



Rys. 3.10. Organigram obliczeń rozkładu przyrostu temperatury nieliniowego, linearnego układu termokinetycznego złącza-przewody

oraz

$$F_{G\varepsilon} = \frac{(T_0 + \psi_j^h)^4 - T_0^4}{(T_0 + \psi_{pj}^h)^4 - T_0^4} \cdot \frac{\psi_{pj}^h}{\psi_j^h} \quad (3.8-4)$$

gdzie T_0 jest temperaturą otoczenia w K.

Odpowiednie uzasadnienie teoretyczne powyższych wzorów można znaleźć w literaturze z zakresu termokinetiki, np. [9].

3.9. Uwagi o weryfikacji modeli opisujących stacjonarny rozkład temperatury

Modele opisujące stacjonarny rozkład temperatury w układzie złącze-przewody powstały dzięki wykorzystaniu analogii wielkości elektrycznych i cieplnych. Linearny układ termokinetyczny jest podobny do linii elektrycznej o parametrach rozłożonych z poprzecznie włączonymi źródłami prądowymi. Wykorzystanie sprawdzonych metod analizy układów elektrycznych o parametrach rozłożonych umożliwiło uzyskanie zarówno metody analitycznej, jak i metody numerycznej wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury.

Oparcie obu metod na sprawdzonej teorii linii elektrycznej stanowi podstawową przesłankę ich poprawności. Drugą przesłanką jest zgodność wyników obliczeń uzyskiwanych obu metodami (przy odpowiednio dużej liczbie elementów skończonych w metodzie numerycznej). Poprawności przedstawionego opisu analitycznego rozkładu temperatury w układzie złącze-przewody dowodzi zgodność opisu dla przypadku 3 w tabl. 3.4 z opisem znanym z literatury, np. [14].

Obie przedstawione w pracy metody wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury dają poprawne wyniki w przypadku obliczeń sprawdzających dla układów charakterystycznych o znanym rozkładzie przyrostu temperatury np. dla:

- układu jednorodnego o jednakowym przyroście temperatury,
- układu niejednorodnego o gęstości mocy wydzielanej odwrotnie proporcjonalnej do gęstości oporu cieplnego wymiany ciepła z otoczeniem, zapewniającego również jednakowy przyrost temperatury dla całego układu,
- układu zwartego na obu końcach,
- układu ze źródłami temperatury na obu końcach,
- układu z nieskończenie długimi przewodami jednorodnymi,
- układu zawierającego jedno punktowe źródło mocy i dwa jednakowe przewody bez strat mocy (odpowiada to przypadkowi występowania zestyku czołowego w torze prądowym, opisanemu w literaturze, np. [16]).

Autor przeprowadził obliczenia rozkładu przyrostu temperatury dla złożonego przypadku osprzętu kotwięco-odgałęźnego szyn zbiorczych 110 kV, zawierającego 3 złącza i 2 jednorodnych lecz różne przewody, uzyskując wyniki zbliżone z przeprowadzonymi wcześniej pomiarami¹⁾.

Przewiduje się kontynuowanie prac nad metodami wyznaczania rozkładu przyrostu temperatury, zmierzających do pełnej weryfikacji przedstawionych metod, za pomocą pomiarów laboratoryjnych oraz stworzenie prostej metody wyznaczania nagrzewania niejednorodnych układów termokinetycznych w stanach nieustalonych.

¹⁾ Pomiary wykonane w laboratorium EdF, Lignes Aeriennes w Clamart, obliczenia numeryczne wg algorytmu TEMP, program obliczeniowy ECHAUFFEMENT w Fortranie. Wyniki dostępne w IEiSU Pol. Śląskiej.

4. NIEKTÓRE PRZYPADKI ZASTOSOWANIA MODELI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

4.1. Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych jednorodnego złącza prostego na jego rezystancję

Poprawna konstruowanie złączy jednorodnych, szeroko rozpowszechnionych w różnych dziedzinach elektrotechniki, może być ułatwione znajomością zależności rezystancji złączy od ich parametrów konstrukcyjnych:

- rodzaju złącza (zgodne lub przeciwne),
- długości złącza przy zadanej szerokości powierzchni zestykowej,
- ukształtowania powierzchni zestykowej (przy niezmiennej wartości powierzchni),
- rezystancji jednego styku (przy zadanej rezystancji zestykowej oraz rezystancji drugiego styku).

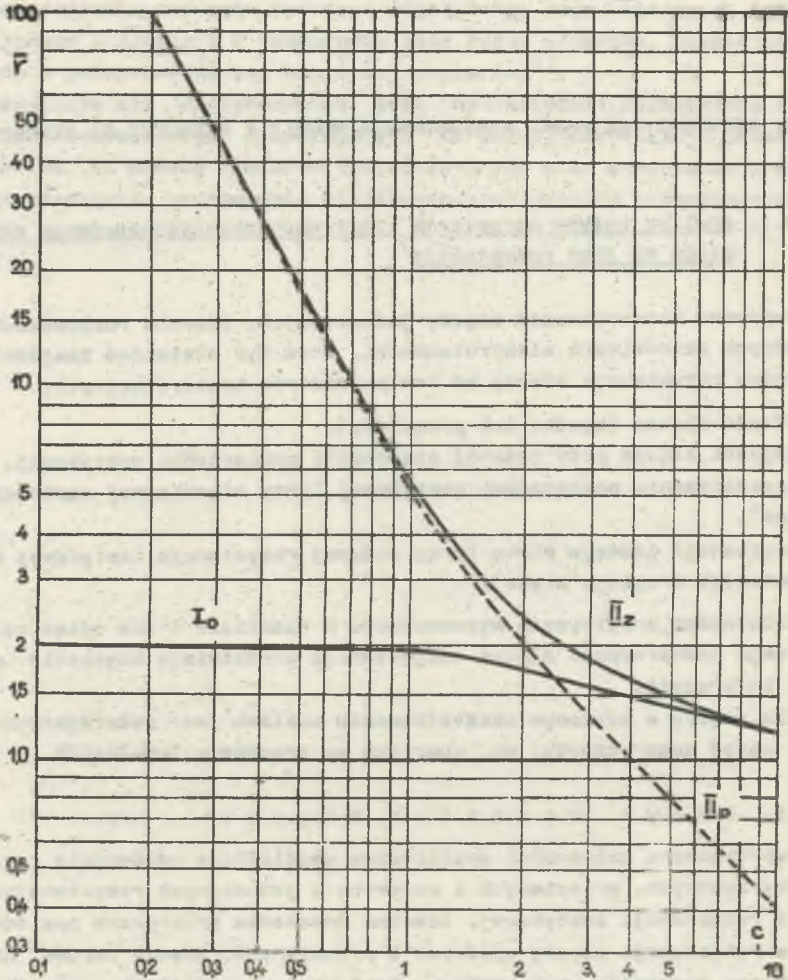
Zależności analityczne wyprowadzone w rozdziale 2 dla opisu modelu linearnego jednorodnego złącza rozgałęźnego umożliwiają uzyskanie potrzebnych informacji.

Dla złączy o złożonym ukształtowaniu możliwe jest wykorzystanie w tym celu metod numerycznych, np. opartych na programie IUP-ZŁĄCZE.

4.1.1. W p ł y w r o d z a j u z ł ę c z a

Wyprowadzone zależności analityczne umożliwiają porównanie rezystancji złączy zgodnych, przeciwnych i zerowych o jednakowych rezystancjach styków i rezystancji zestykowej. Istotne znaczenie praktyczne posiada porównanie rezystancji złączy zgodnych i przeciwnych. Złącza zerowe nie mają istotnego znaczenia praktycznego. Spotykane są w liniach napowietrznych, gdzie służą do naprawy przewodów wielodrutowych, w których wystąpiło przerwanie jednego lub kilku drutów, przywracając pełną wytrzymałość mechaniczną przewodów [12]. Porównanie rezystancji względnych złączy prostych jednorodnych w zależności od współczynnika podobieństwa c (rys.4.1) prowadzi do stwierdzenia, że złącza przeciwne umożliwiają uzyskanie mniejszej rezystancji (mniejszych strat mocy) przy identycznych parametrach jak złącza zgodne, zwłaszcza w obszarze wysokich wartości współczynnika c , cechujących złącza o niskiej rezystancji zestykowej w porównaniu z rezystancjami styków.

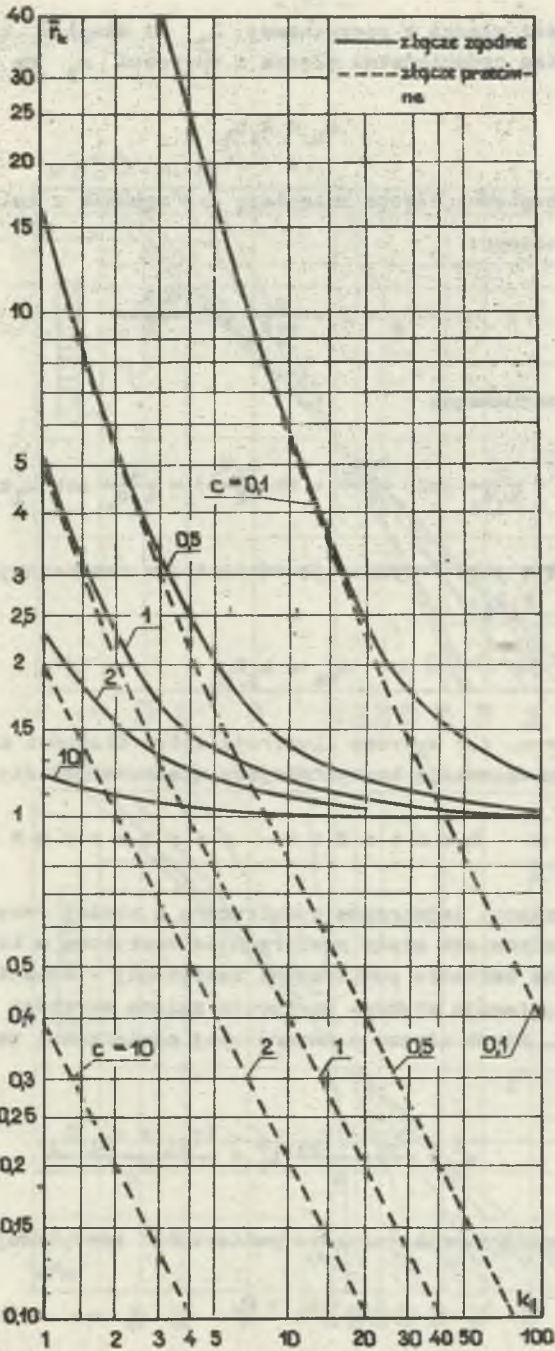
Należy zatem preferować złącza przeciwne wszędzie, gdzie jest to możliwe.



Rys. 4.1. Porównanie rezystancji względnej jednorodnego symetrycznego złącza zerowego I_0 , złącza zgodnego II_z i złącza przeciwnego II_p w zależności od współczynnika podobieństwa c

4.1.2. Wpływ długości powierzchni zestykowej

Przyjmując w złączu linearnym prostokątny kształt powierzchni zestykowej (lub walcowy, którego rozwinięcie stanowi prostokąt) można rozważyć wpływ długości złącza na jego rezystancję (przy zachowaniu stałej szerokości powierzchni zestykowej).



Rys. 4.2. Rezystancje względne złączy zgodnych i przeciwnych w zależności od długości złącza

Zmiana długości złącza z początkowej l_1 na długość $k_1 l_1$ zmienia wartość współczynnika podobieństwa złącza z wartości c_1 na wartość:

$$c_k = k_1 c_1 \quad (4.1-1)$$

Rezystancje względne złącza zmieniają się zgodnie z zależnościami:

+ dla złącza zgodnego:

$$\bar{r}_k = 1 + \frac{2}{k_1 c_1} \operatorname{cth} \frac{k_2 c_1}{2} \quad (4.1-2)$$

- dla złącza przeciwnego:

$$\bar{r}_k = \frac{2}{k_1 c_1} \left(\operatorname{cth} \frac{k_2 c_1}{2} + \operatorname{th} \frac{k_2 c_1}{2} \right) = \frac{4}{k_1 c_1} \operatorname{cth} k_1 c_1, \quad (4.1-3)$$

przy czym przyjęto jako rezystancję odniesienia rezystancję złącza idealnego o długości $k_1 l_1$:

$$R_{Nk} = k_1 R_{N1} \quad (4.1-4)$$

Pokazane na rys. 4.2 wykresy ilustrują wpływ długości złącza na ich rezystancję i uwidaczniają korzystniejsze własności złącza przeciwnych.

4.1.3. Wpływ kształtu powierzchni zestykowej

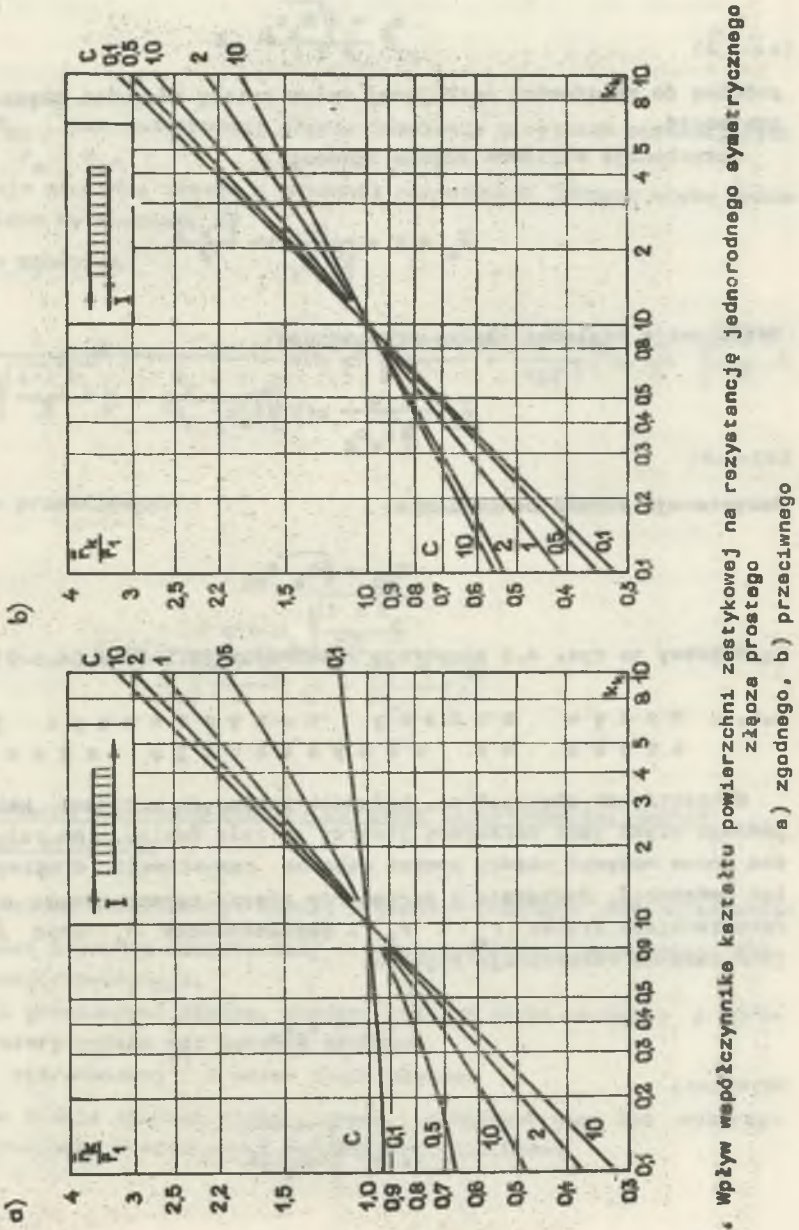
Rozważa się złącza jednorodne symetryczne o stałej rezystancji zestykowej R_c , czemu odpowiada stała powierzchnia zestykowa o kształcie prostokątnym. Ze zmianę kształtu powierzchni zestykowej - zmienia się długość złącza oraz rezystancje styków. Następuje zmiana wartości współczynnika podobieństwa c . Niech złącze o kwadratowej powierzchni zestykowej posiada współczynnik c_1

$$c_1^2 = \frac{r_{a1} + r_{b1}}{r_c} l_1^2 = \frac{(r_{a1} + r_{b1}) l_1}{R_c} \quad (4.1-5)$$

Definiuje się współczynnik kształtu powierzchni zestykowej

$$k_k = \frac{l}{b}, \quad (4.1-6)$$

gdzie b jest szerokością, l - długością prostokątnej powierzchni zestykowej.



rys. 4.3. Wpływ współczynnika kształtu powierzchni zestykowej na rezystancję jednorodnego symetrycznego złącza prostego
 a) zgodnego, b) przeciwnego

Uzyskuje się zależność opisującą współczynnik podobieństwa c_k złącza prostokątnego:

$$c_k = \sqrt{k_k c_1} \quad (4.1-7)$$

podobną do zależności opisującej wpływ zmiany długości złącza na jego rezystancję.

Rezystancja względna złącza zgodnego:

$$\bar{r}_k = 1 + \frac{2}{\sqrt{k_k c_1}} \operatorname{cth} \frac{\sqrt{k_k c_1}}{2} \quad (4.1-8)$$

Rezystancja względna złącza przeciwnego:

$$\bar{r}_k = \frac{4}{\sqrt{k_k c_1}} \operatorname{cth} \sqrt{k_k c_1} \quad (4.1-9)$$

Rezystancja złącza odniesienia:

$$R_{Nk} = \sqrt{k_k} R_{N1} \quad (4.1-10)$$

Wykresy na rys. 4.3 ilustrują zależności (4.1-8) i (4.1-9).

4.1.4. Wpływ zmiany rezystancji jednego styku na rezystancję złącza

W niektórych złączach np. końcówek kablowych z żyłami kabli przekrój jednego styku jest narzucony (tworzy go żyła kabla). Na rezystancję złącza można wpływać między innymi doбором rezystancji drugiego styku (tulei końcówki). Wychodząc z parametrów złącza symetrycznego o jednakowych rezystancjach styków r_a i r_b i współczynnika c_1 oraz $\delta_1 = 0$ przyjęto zmienną rezystancję styku a :

$$r_{ak} = k_r r_a \quad (4.1-11)$$

Uzyskano:

$$c_k = c_1 \sqrt{\frac{1 + k_r}{2}} \quad (4.1-12)$$

$$\delta_k = \frac{k_r - 1}{k_r + 1} \quad (4.1-13)$$

Złącze odniesienia stanowi idealne złącze stykowe o rezystancjach styków r_{ak} i r_b i rezystancji całkowitej

$$R_{Nk} = \frac{2 k_f}{1 + k_f} R_{N1}, \quad (4.1-14)$$

przy czym R_{N1} jest rezystancją złącza idealnego o stykach posiadających rezystancję $r_a = r_b$.

Rezystancja względna złącza o zmiennej rezystancji jednego styku będzie zatem określona wyrażeniem

- dla złącza zgodnego:

$$\bar{r}_k = 1 + \frac{2}{c_1 \sqrt{\frac{1+k_r}{2}} \left[1 - \left(\frac{k_r-1}{k_r+1} \right)^2 \right]} \operatorname{cth} \frac{c_1}{2} \sqrt{\frac{1+k_r}{2}} + \left(\frac{k_r-1}{k_r+1} \right)^2 \operatorname{th} \frac{c_1}{2} \sqrt{\frac{1+k_r}{2}} \quad (4.1-15)$$

- dla złącza przeciwnego:

$$\bar{r}_k = \frac{4 \operatorname{cth} c_1 \sqrt{\frac{1+k_r}{2}}}{c_1 \sqrt{\frac{1+k_r}{2}} \left[1 - \left(\frac{k_r-1}{k_r+1} \right)^2 \right]} \quad (4.1-16)$$

4.2. Określenie własności eksploatacyjnych elektroenergetycznych złączy stykowych

Dla racjonalnej eksploatacji złączy stykowych pożądane jest określenie:

- obciążalności prądowej długotrwałej oraz obciążalności zwarciowej złącza o żądanej rezystancji,
- rezystancji granicznych złącza, powyżej których styki osiągają przyrosty temperatury wyższe niż łączone przewody,
- odporności starzeniowej¹⁾ i czasu życia złącza.

Opracowane modele zjawisk elektrycznych i cieplnych mogą być wykorzystane dla określenia niektórych z wymienionych wielkości.

¹⁾ Termin proponowany przez autora.

4.2.1. Obciążalność prądowa długotrwała złącza

Bowża się złącze o zadanej rezystancji, zmierzając do wyznaczenia prądu dopuszczalnego długotrwałe, definiowanego jako prąd, przy którym etyki osiągną przyrost temperatury dopuszczalny długotrwałe (τ_{dd}^0), a zestyki elementarne osiągną temperaturę nie wyższą niż temperatura rekryształizacji materiału.

Powyższa definicja wynika z podstawowych i oczywistych wymagań:

- niewywierania niekorzystnego wpływu na łączone przewody i sąsiadujące urządzenia poprzez przepływ ciepła ze złącza,
- możliwie dużej stabilności parametrów złącza, zwłaszcza elektrycznych w czasie eksploatacji.

Stabilność własności elektrycznych złącza w czasie eksploatacji może być osiągnięta, jeśli zostanie zachowana liczba zestyków elementarnych i ich parametry.

W złączu może zachodzić szereg procesów fizycznych i chemicznych silnie uzależnionych od temperatury, mogących wpłynąć na liczbę i własności zestyków elementarnych [28, 33, 41, 55, 56, 65 i in].

Najważniejsze procesy fizyczne to:

- rekryształizacja ("mięknienie") materiału styku w temperaturach wyższych od T_r ,
- topienie materiału w zestyku elementarnym w temperaturze T_t ,
- odparowanie materiału w zestyku elementarnym w temperaturze T_p .

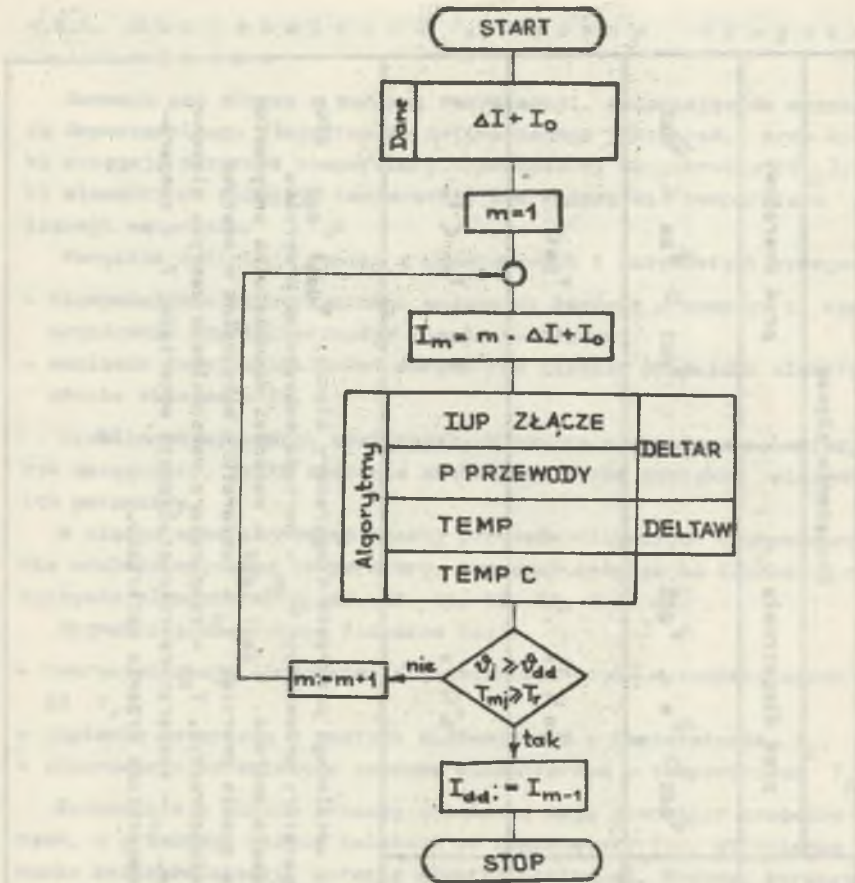
Zachodzące w złączu procesy chemiczne mają charakter procesów korozyjnych, o przebiegu silnie zależnym od temperatury (np. utlenianie powstawanie związków siarki, korozja elektrochemiczna). Procesy korozyjne zmniejszają przekrój zestyków elementarnych, powodując w końcowym stadium zmniejszenie ich liczby. Mogą tworzyć warstwy obce na powierzchniach zestykowych, powiększając rezystancję zestyków elementarnych. Należy zaznaczyć, że stabilność własności złącza może ponadto zależeć od innych czynników, np. mechanicznych.

Oczywisty jest zatem wymóg ograniczenia nagrzania złączy dla ograniczenia niekorzystnych procesów fizycznych i chemicznych. Zbiór wymagań dotyczących nagrzania złączy elektroenergetycznych autor zestawiał w tabelicy 4.1.

Wyznaczenie wartości obciążalności długotrwałej złącza może być oparte na zbiorze opracowanych algorytmów obliczeń numerycznych. Organigram obliczeń przedstawia rys. 4.4. Opracowany program RACCORD umożliwia dokonanie wyliczeń (po nieznacznej modyfikacji).

Ograniczenia temperatur osiągniętych w złączach stykowych

Wymagania fizyczne	Obciążenie złącza	
	prąd długotrwały	prąd zwarciovowy
Wyeliminowanie wpływu złącza na przewody i osiedlenie urządzeń	$\psi_{dd1} > \psi_m < \psi_{dd2}$	$\psi_{dz1} > \psi_{zm} < \psi_{dz2}$
Stabilność własności elektrycznych złącza	$T_m < T_r$	$T_{zm} < T_t$
Wyeliminowanie możliwości szybkiego zniekształcenia złącza	$T_m < T_t$	$T_{zm} < T_p$
<p><u>Oznaczenie:</u> ψ_m - wartość maksymalna ustalonego przyrostu temperatury złącza, ψ_{dd1}, ψ_{dd2} - dłu- gotrwałe przyrosty temperatury przewodów, ψ_{zm} - wartość maksymalne przyrostu temperatury złącza w czasie zwarcia, ψ_{dz1}, ψ_{dz2} - wartości dopuszczalne przyrostów temperatury przewodów w czasie zwarcia, T_m - temperatura maksymalna w zestyku elementarnym w stanie długotrwałym, T_{zm} - temperatura maksymalna w zestyku elemen- tarnym w czasie zwarcia, T_r - temperatura rekrytalizacji materiału, T_t - tempera- tura topienia, T_p - temperatura wrzenia materiału.</p>		



Rys. 4.4. Organigram numerycznego wyznaczenia obciążalności prądowej długotrwałej linearnego złącza stykowego

Dla prostych złączy jednorodnych, łączących jednorodne przewody, można podać przybliżoną zależność między obciążalnością prądową złącza I_{dd} i łączonych przewodów $I_{dd_1}^{1)}$:

$$I_{dd} \geq I_{dd_1} \sqrt{\frac{\bar{F} \cdot R_N}{R_1} \cdot \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{\psi_{dd}}{\psi_{dd_1}}} \quad (4.2-1)$$

1) Uzasadnienie wyniku z zależności podanych w pracy [11].

w której:

- R - rezystancja względna złącza,
- R_N - rezystancja złącza idealnego,
- R_1 - rezystancja przewodu o tej samej długości co złącze,
- F_1, F_2 - powierzchnia zewnętrzne odcinka przewodu i złącza,
- $\dot{v}_{dd}, \dot{v}_{dd_1}$ - dopuszczalne długotrwałe przyrosty temperatury złącza i przewodu.

Zależność (4.2-1) może być stosowana dla złączy przewodów gołych, przy wymianie ciepła z otoczeniem drogą konwekcji i promieniowania dla zbliżonych przyrostów \dot{v}_{dd} i \dot{v}_{dd_1} (praktycznie - dla złączy przewodów linii napowietrznych i złączy szynowych). Prosty sposób sprawdzenia temperatury zestyków elementarnych w jednorodnym złączu prostym zgodnym podano w opracowaniu [11].

4.2.2. Wyznaczenie rezystancji granicznej złącza ze względu na nagrzewanie długotrwałe

Wyznaczenie granicznej rezystancji złącza, przy której styki osiągną dopuszczalny długotrwałe przyrost temperatury \dot{v}_{dd} , umożliwia ocenę jakości złącza w oparciu o pomiar jego rezystancji w toku okresowych badań eksploatacyjnych¹⁾.

W ogólnym przypadku złącza linearnego niejednorodnego wyznaczenie rezystancji granicznej ze względu na nagrzanie ustalone może być dokonane metodami numerycznymi przy wykorzystaniu algorytmów wyznaczających rozkłady prądu, spadków napięcia, przyrostów temperatury.

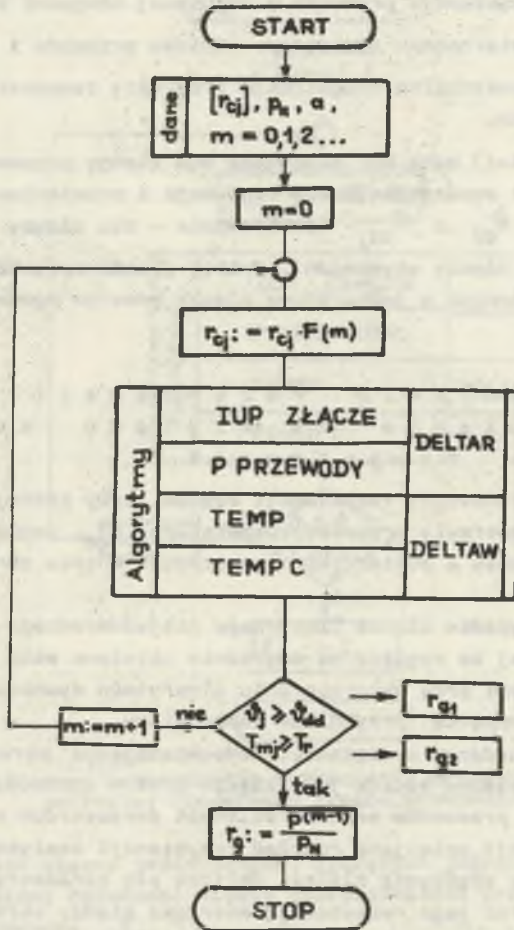
Dla złącza o zadanym obciążeniu, odpowiadającym warunkom pomiarowym (np. złącze rozgałęźne badane jako złącza proste zgodne), określonej rezystancji styków i przewodów oraz określonych parametrach termokinetycznych zmienia się funkcję opisującą rozkład rezystancji zestykowej, symulując w ten sposób proces starzenia złącza. Oblicza się parametry elektryczne i cieplne złącza oraz jego rezystancję mierzoną między określonymi punktami.

Rezystancję graniczną złącza definiuje się dla 2 przypadków:

- osiągnięcia dopuszczalnego długotrwałe przyrostu temperatury styków (rezystancja R_{g1}),
- osiągnięcia dopuszczalnej długotrwałe temperatury zestyków elementarnych (rezystancja R_{g2}).

¹⁾ Metodykę badań i oceny złączy w oparciu o bezdotykowy pomiar temperatury przedstawił autor w opracowaniu [105], przekazany ZPBE "Energopomiar" we wrześniu 1980 r.

Proces obliczeń prowadzi się tak długo (zmieniając w każdym cyklu funkcję opisującą rezystancję zestykową), aż zostanie osiągnięty jeden z warunków granicznych. Organizacja procesu obliczeniowego wykorzystującego opracowane uprzednio algorytmy przedstawiona jest na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Organigram numerycznego wyznaczenia granicznych rezystancji względnych złączy linearych

Funkcja opisująca wzrost rezystancji zestykowej złącza może być przyjęta jako proporcjonalna, np.:

$$F(m) = 1 + ma \quad (4.2-2)$$

gdzie m jest krokiem iteracji, a - stopniem wzrostu rezystancji (np. $a = 0,01$) w każdym kroku, jeśli warunki starzenia każdego zestyku elementar-

nego w złączu są zbliżone, a więc można oczekiwać podobnych zmian rezystancji każdego zestyku elementarnego. Stopień wzrostu rezystancji a decyduje o dokładności obliczeń (a także liczbie niezbędnych kroków iteracji).

W szczególnych przypadkach, gdy znana jest analityczna postać funkcji przyrostu temperatury złącza w stanie ustalonym, możliwe jest analityczne wyznaczenie rezystancji granicznej \bar{r}_{g1} .

Dla przypadku złącza prostego łączącego jednakowe nieskończone długie przewody (np. złącza w linii napowietrznej), przy założeniu stałej gęstości strat mocy w złączu, można uzyskać zależność dla przyrostu temperatury złącza (poz. 3, tabl. 3.4):

$$\psi(x) = \bar{r} p_{N^w} - \frac{\bar{r} p_{N^w} - p_1 w_1}{\frac{\delta_1}{2} \operatorname{sh} \frac{x}{2} + \operatorname{ch} \frac{x}{2}} \operatorname{ch} x, \quad (4.2-3)$$

przy czym dla $\bar{r} p_{N^w} > p_1 w_1$ wartość maksymalną przyrostu ψ_m uzyskuje się dla $x = 0$, $\operatorname{ch} x = 1$.

Przyjmując dla przypadku granicznego

$$\psi_m = \psi_{dd}, \quad \bar{r} = \bar{r}_{g1} \quad (4.2-4)$$

uzyskuje się zależność:

$$\bar{r}_{g1} = \frac{\psi_{dd} \left(\frac{\delta_1}{2} \operatorname{sh} \frac{\delta_1}{2} + \operatorname{ch} \frac{\delta_1}{2} \right) - p_1 w_1}{p_{N^w} \left(\frac{\delta_1}{2} \operatorname{sh} \frac{\delta_1}{2} + \operatorname{ch} \frac{\delta_1}{2} - 1 \right)} \quad (4.2-5)$$

Często przyjmuje się założenie, że dopuszczalny długotrwale przyrost temperatury złącza może być równy dopuszczalnemu przyrostowi temperatury łączonych przewodów. Zatem przy założeniu:

$$\psi_{dd} = p_1 w_1 \quad (4.2-6)$$

uzyskuje się prostą zależność:

$$\bar{r}_{g1} = \frac{p_1 w_1}{p_N w} = B \quad (4.2-7)$$

Łącząc uzyskaną zależność ze wzorem na rezystancję względną symetrycznego i zgodnego złącza prostego:

$$\bar{r} = 1 + \frac{2}{c} \operatorname{cth} \frac{c}{2} \quad (4.2-8)$$

można wyznaczyć wartość graniczną współczynnika podobieństwa c_{g1} z zależności:

$$B = 1 + \frac{2}{c_{g1}} \operatorname{cth} \frac{c_{g1}}{2} \quad (4.2-9)$$

Przy projektowaniu złącza dąży się do uzyskania rezystancji złącza \bar{r} mniejszej od granicznej \bar{r}_{g1} :

$$\bar{r} < \frac{\bar{r}_{g1}}{k_b}, \quad (4.2-10)$$

gdzie:

\bar{r} - żądana rezystancja względna złącza projektowanego,

k_b - współczynnik bezpieczeństwa zależy od przeznaczenia złącza uwzględniający wzrost rezystancji w toku eksploatacji.

Uzyskuje się zatem relację:

$$\frac{\operatorname{cth} \frac{c_{g1}}{2}}{c_{g1}} = \frac{1}{2} \left(\frac{B}{k_b} - 1 \right) \quad (4.2-11)$$

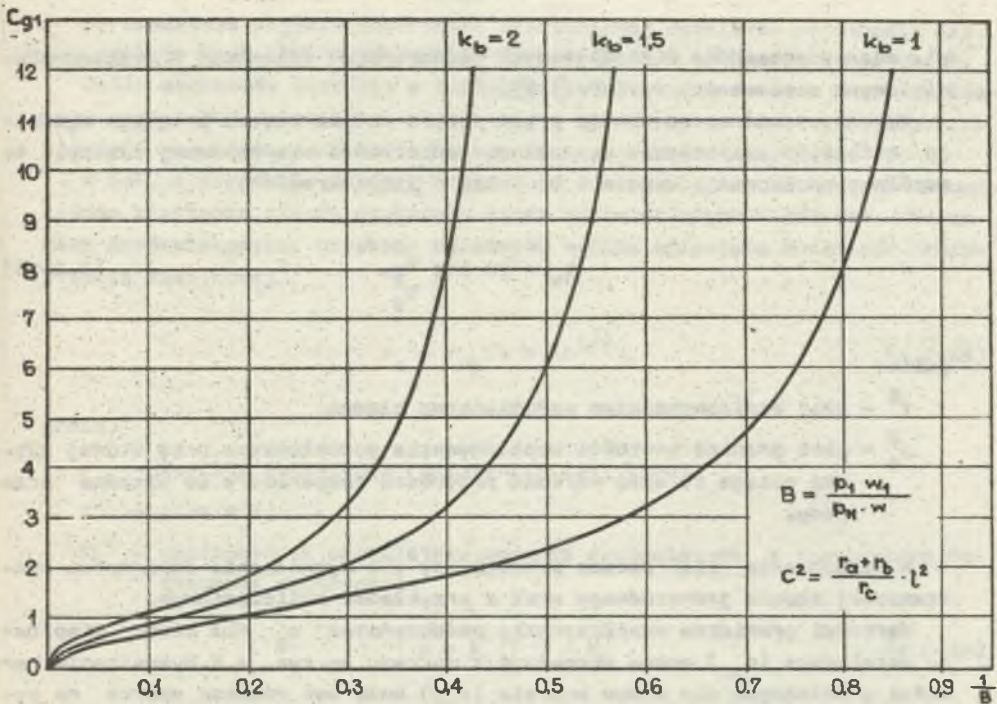
umożliwiająca wyznaczenie współczynnika c_{g1} , przy którym złącze uzyska żądaną rezystancję \bar{r} . Ze względu na uwikłanie współczynnika c_{g1} zależności $c_{g1} = f(B, k_b)$ wyznaczono numerycznie i przedstawiono na wykresie.

Przy uwzględnieniu zależności $c^2 = \frac{r_a + r_b}{r_c} l^2$ uzyskane wykresy (rys.

4.6) umożliwiającą:

- określenie wymaganej gęstości rezystancji zestykowej r_c złącza jednorodnego o zadanych rezystancjach styków r_a, r_b i zadanej długości oraz warunkach wymiany ciepła (B),
- określenie wymaganej długości złącza o zadanych gęstościach rezystancji r_a, r_b, r_c oraz określonych warunkach wymiany ciepła (B),
- określenie wymaganego parametru B (zależnego od wymiarów poprzecznych złącza i przewodu, zastosowanych materiałów, warunków wymiany ciepła) dla złącza o zadanej długości i rezystancji zestykowej r_c .

Podobne wykresy mogą być sporządzone dla złącza przeciwnego symetrycznego, a także dla złączy prostych niesymetrycznych w oparciu o wzory podane w tablicach 2.1 i 2.2



Rys. 4.6. Wyznaczenie granicznych wartości c_{g1} współczynnika podobieństwa c jednorodnego złącza prostego zgodnego w zależności od parametru B i współczynnika bezpieczeństwa k_b

4.2.3. Odporność starzeniowa i czas życia złącza

B. Dalle zaproponował [112] definicję odporności starzeniowej¹⁾ złącza k_v :

$$k_v = 10 \log \frac{r_{cg}}{r_c}, \quad (4.2-12)$$

przy czym:

r_{cg} - jest graniczną rezystancją zestykową, przy której złącze osiąga tę samą wartość przyrostu temperatury co łączone przewody,

r_c - jest rezystancją zestykową złącza.

Dla wyliczenia wartości odporności starzeniowej złączy przewodów linii napowietrznych WN B. Dalle wykorzystał program obliczeniowy opracowany

¹⁾ Termin zaproponowany przez autora na podstawie terminu francuskiego "capacite de vieillissement" i angielskiego "ageing capacity".

dla złączy przewodów wielodrutowych jednorodnych (al-malec) i stalowo-aluminiowych stosowanych w EDF [112].

Wykorzystanie opracowanego przez autora modelu złącza prostego zgodnie umożliwiło analityczne wyznaczanie odporności starzeniowej złączy. We wspólnym opracowaniu autora i B. Dalle [111] określono:

$$k_v = 10 \log \frac{c^2}{c_g^2}, \quad (4.2-13)$$

gdzie:

c^2 - jest współczynnikiem podobieństwa złącza,

c_g^2 - jest granicą wartości współczynnika podobieństwa, przy której złącze osiąga tę samą wartość przyrostu temperatury co łączone przewody.

W opracowaniu [111] podano szczegółowy tok wyznaczania odporności starzeniowej złącza jednorodnego wraz z przykładem obliczeniowym.

Wartości graniczne współczynnika podobieństwa c_g dla stanu cieplnego ustalonego (c_{g1}) można wyznaczyć z wykresu na rys. 4.6. Wyznaczenia wartości granicznych dla stanu zwarcia (c_{g2}) może być również oparte na wykresie z rys. 4.6, jednakże przy wyliczeniu parametru B z zależności:

$$B = \frac{P_1}{P_N} \cdot \frac{C}{C_1}, \quad (4.2-14)$$

gdzie:

P_1 - straty mocy w przewodzie na odcinku równym długości złącza,

P_N - straty mocy w złączu idealnym,

C - pojemność cieplna złącza,

C_1 - pojemność cieplna przewodu o tej samej długości co złącze.

Porównanie metody wyznaczania odporności starzeniowej zaproponowanej przez autora wraz z B. Dalle [111] z metodą numeryczną [112] pozwala na stwierdzenie znacznie niższej pracochłonności metody opartej na zależnościach analitycznych i możliwości wyliczeń bez użycia EMC¹⁾.

Stwierdzono zadowalającą zgodność wartości k_v uzyskanej przy zastosowaniu obu metod również dla złączy przewodów wielodrutowych, względem których opinie analityczny wielkości elektrycznych podany przez autora jest przybliżony.

¹⁾Metoda numeryczna B.Dalle [112] wymaga użycia dużej EMC.

Wprowadzenie pojęcia odporności starzeniowej umożliwia porównanie złączy różnego typu, spełniających to samo zadanie w tych samych warunkach.

Jeśli zachowany zostanie w porównywanych złączach ten sam przebieg czasowy narastania rezystancji zestykowej w wyniku procesów starzeniowych, to złącze o największej wartości k_v wykaże najdłuższy czas życia¹⁾.

W EdF, w ośrodku w Clamart prowadzone są badania laboratoryjne nad szybkością starzenia złączy stykowych linii napowietrznych w różnych warunkach środowiskowych. Uzyskano zależność ogólną opisującą zmienność rezystancji zestykowej²⁾

$$r_c = r_{cp} (1 + Kt^{1/3}), \quad (4.2-15)$$

gdzie:

r_{cp} - wartość początkowa rezystancji zestykowej,

t - czas w h,

K - współczynnik określający warunki środowiskowe i temperaturę wyznaczoną empirycznie

$$K = K_1(T_c) + K_2 \quad (4.2-16)$$

K_1 - składnik zależny od rodzaju materiału styków, warunków środowiskowych i temperatury zestyków elementarnych T_c ,

K_2 - składnik zależny od rodzaju materiału styków warunków środowiskowych i czasu.

W badaniach EdF²⁾ uzyskano wartości:

$$K = 0,12 \text{ dla } \bar{v} = 40 \text{ K}$$

$$K = 0,40 \text{ dla } \bar{v} = 75 \text{ K}$$

$$K = 0,73 \text{ dla } \bar{v} = 95 \text{ K,}$$

przy czym \bar{v} jest przyrostem temperatury złącza ponad temperaturę otoczenia. Badania starzeniowe przeprowadzono w warunkach oddziaływania wody morskiej na złącze.

Znajomość funkcji opisującej zmienność rezystancji zestykowej w wyniku procesu starzeniowego pozwala na analityczne powiązanie odporności starzeniowej k_v i czasu życia złącza t_v zależnościami analitycznymi:

1) Tu czas do osiągnięcia wartości granicznych dla rezystancji zestykowej.

2) Opracowanie B. Dalle niepublikowane.

$$k_V = 10 \log(1 + Kt_V^{1/3}) \quad (4.2-17)$$

$$t_V = 10^{(0.3 k_V - 3) \log K} \quad (4.2-18)$$

Wiążąc wartość odporności starzeniowej ze współczynnikiem podobieństwa c dla złącza oraz jego wartościami granicznymi c_{g1} i c_{g2} można wyznaczać dla określonych warunków środowiskowych i określonego obciążenia złącza (określona wartość K) zależność czasu życia złącza od parametrów konstrukcyjnych: wymiarów, ukształtowania, rodzaju materiałów, rezystancji zastawkowej.

4.3. Kierunki dalszych badań

Problematyka przedstawiona w niniejszej pracy wymaga uzupełnienia o analizę własności złączy stykowych przy przepływie prądów zwarciovych i piorunowych (złącza elektroenergetyczne) dla uzyskania możliwości:

- projektowania złączy o określonych właściwościach w stanie zwarciovym (określone nagrzanie styków i zastawków elementarnych),
- sprawdzenia przydatności złączy eksploatowanych do pracy w określonych warunkach zwarciovych,
- oceny wpływu prądów piorunowych na procesy starzeniowe w złączach.

Realizacja celu wymaga opracowania:

- metody wyznaczania nieustalonego rozkładu przyrostów temperatury wzdłuż układu złącze-przewody, przy przepływie prądu zwarciovego lub piorunowego,
- algorytmu dla obliczenia nagrzewania zastawków elementarnych przy przepływie prądu zwarciovego lub piorunowego, uwzględniającego stopienie i odparowanie materiału przy przekroczeniu określonych temperatur.

Pierwszy problem może być rozwiązany poprzez wykorzystanie metod analizy stanu nieustalonego w niejednorodnej linii długiej (np. analiza numeryczna metodą elementów skończonych [32, 84]) lub wykorzystanie modeli termokinetycznych Beukena [9]. Uprozczone rozwiązanie problemu, przy pominięciu ciepła wzdłuż złącza i oddawania ciepła do otoczenia może być uzyskane w prosty sposób na podstawie równania różniczkowego (3.2-1).

Autor sądzi, że drugi problem może być rozwiązany stosunkowo prostymi środkami matematycznymi, w oparciu o rozwiązanie pierwszego problemu i znajomość własności fizycznych materiału styków w złączu w szerokim przedziale temperatur (aż do temperatury wrzenia). Próby rozwiązania obu problemów, przy określonych uproszczeniach autor przedstawił w opracowaniu niepublikowanym¹⁾ [104], a opracowany w lutym 1982 r. program obliczeń

¹⁾ Dostępne w Inst. Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej ("Modelowanie elektroenergetycznych złączy stykowych" Gliwice 1979 r.).

RACCORD uwzględnia nagrzewanie styków i zestyków elementarnych prądem zwarciowym (dla temperatur niższych od temperatury topienia materiału).

Należy podkreślić podstawowe znaczenie badań nad starzeniem złączy stykowych i metodami określania czasu życia złączy. Badania takie mogą doprowadzić do zmniejszenia awaryjności złączy stykowych, umożliwiając:

- projektowanie złączy o żądanej trwałości,
- racjonalną eksploatację złączy wobec możliwości określenia ich trwałości.

Dotychczasowe rozeznanie zjawisk starzeniowych w złączach stykowych dowodzi możliwości zwiększenia trwałości złączy drogą poprawienia ich własności początkowych (np. zmniejszenia rezystancji zestykowej).

Cel ten może być osiąganym w złączach elektroenergetycznych poprzez odpowiednią technologię obróbki powierzchni zestykowych.

Konieczne jest uporządkowanie i uzupełnienia dotychczasowych badań nad technologią obróbki powierzchni zestykowych w złączach. Duży wpływ na trwałość złączy wywierają procesy starzenia mechanicznego złącza (relaksacja naprężeń, pełzanie materiału, mikroprzesunięcia itp.).

Celowe jest podjęcie badań nad wpływem obciążeń mechanicznych złączy elektroenergetycznych na procesy starzeniowe.

W zakresie prac normalizacyjnych konieczne jest wyraźne ustalenie wymagań stawianych elektroenergetycznym złączom stykowym:

- przy badaniach pomontażowych,
- przy okresowych badaniach eksploatacyjnych.

Wymagania winny określać własności złącza dla:

- stanu obciążenia długotrwałego,
- warunków zwarciowych.

Próbie określenia wymagań dla złączy przewodów elektroenergetycznych zawiera opracowanie autora [11], wspólne z B. Dalle, rozpowszechniane w energetyce francuskiej.

Zdając sobie sprawę z faktu, że jakość złączy - poprawnie zaprojektowanych - zależy od sposobu ich wykonania, należy przypisać duże znaczenie opracowaniu instrukcji technologicznych:

- montażu poszczególnych rodzajów złączy,
- badań pomontażowych i eksploatacyjnych złączy.

Istnieje możliwość szybkiego wdrożenia w Polsce niektórych sprawdzonych technologii dotyczących elektroenergetycznych złączy stykowych powszechnie stosowanych w innych krajach:

- stosowania smarów w złączach,
- stosowania odmiennych sposobów zaprasowania w złączach zaprasowanych (zaprasowanie z wgniotem dwustopniowym dla końcówek i złączek kablowych, zaprasowanie z odstępami dla złączy przewodów linii napowietrznych).

LITERATURA

Książki i monografie

- [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 5216 (skrypt), s. 73.
- [4] CHOLEWICKI T.: Elektrotechnika teoretyczna. WNT, Warszawa 1971.
- [5] Dwight H.B.: Electrical Coils and Conductors. New York 1945.
- [6] ERK A., SCHMELZLE M.: Grundlagen der Schaltgeratetechnik. Springer Verlag, Berlin 1974.
- [7] FÉCHANT L.: I. Conduction electrique dans les contacts courants forts II. Comportement des contacts dans l'appareillage de commande BT. Session de perfectionnement ESE. Paris. Phenomenes de contact electrique 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] KAETANOWIČ 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.: Projektowaniye wyključatielej pieriemennogo toka wysokego 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] POŁOŻY G.N. i in.: Metody przybliżonych obliczeń. WNT, Warszawa 1966.
- [19] STOLARZ S.: Materiały na styki elektryczne. WNT, Warszawa 1968.

Artykuły w czasopiśmie

- [19] BAER G.: Ermittlung und Aussagekraft statistischer Kontaktwiderstandskennwerte. Elektrie 1974, H. 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. Zeitschr. 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, H. 6, ss. 130-132.
- [26] BERGOLD K., FAIKUS K.: Zur Frage des Verschweißens einschaltender Kontakte. *ETZ-B*, Bd. 17, H. 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] BOUGGUES J.: Contacts semipermanents. *Courant faible: connecteurs Ecole Sup. d'Electr. SPE* 7, 1967.
- [31] BRON O.B., DZEKTSER N.N.: Contact connections of multiampere 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. *Prace 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., WALCZYK E.: Über das Verschweißen geschlossener Starkstrom-Flächenkontakte. *Proc. III Int. Conf. El. Contact Ph., Orino* 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'étude des contacts électriques séparables: synthèse bibliographique. *RGE*, t. 83, N° 1, 1974, ss. 3-26, N° 2, 1974, ss. 102-124.
- [43] HILGARTH G.: Über die Grenzstromstärken ruhender Starkstromkontakte. *ETZ-A*, Bd. 78, 1957, H. 6, ss. 211-217.
- [44] HILGARTH G.: Zusammenhang zwischen Kontaktpannung und Kontakttemperatur bei kurzzeitig belasteten 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 Elektrische Kontakte 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 asymmetric metallic current constriction. El. Contacts 1972, ss. 33-35.
- [51] HUS J.: The contacts resistance of lap joints. Proc. VII Conf. El. Contact Ph., Paris 1974, ss. 369-374.
- [52] JOHANN H.H.: Wärmeausgleich und Über-temperatur an Geräteanschlüssen. ETZ-A, Bd. 85, 1964, H. 1, ss. 14-21.
- [53] JOHANNET P.: Contacts permanents et semipermanents à 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 representing the ageing of electrical contacts versus time. IEEE Trans. PAS 1972, ss. 1211-1219.
- [56] JOHANNET P.: Les mecanismes de vieillissement dans les contacts électriques et l'influence 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 Hautechichten auf den Übergangswiderstand von Aluminium-Pressverbindungs-Armaturen. Elektro-App. Mitt. S/1967, ss. 5-8.
- [61] KUSZKE H.: Wpływ zużycia styku w złączkach zaprasowanych w przewodach stalowo-aluminiowych na rozptył prądu w połączeniu. Prace IESU Gliwice, Listopad 1977.
- [62] LANGERON H.P.: Proprietes fondamentales de metaux. Ecole Sup.d'Electr. SPE 7, 1976, ss. 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 über elektr. Kontakte Graz 1964, ss. 112-132.
- [67] MAYER U., MERL W.: Kontaktpflegemittel in der Elektrotechnik. ETZ-B, 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 degradation mechanisms and design criteria for reliable connectors. El. Contacts 1972, ss. 107-115.
- [71] NAYBOUR R.D., FARRELL T.: Degradation mechanisms 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 lineaire. Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. of Energy. 17, N° 3, 1970, ss. 389-396.
- [75] NISOL L.: Essai de synthese d'une technique et d'un art de la connexion electrique. Industrie et sciences N° 2, Juin 1975, ss. 1-19.
- [76] PAUKERT J.: Vliv technologie na prechodovy odpor kontaktu. Elektrot. Casopis. 19, 1968, Nr 3.
- [77] PEARSON R.: Designing mechanical connectors of aluminium cables. Electr. Review, 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 couplege 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] SCHONEBERG H.: Untersuchungen an ruhenden Stark-Stromkontakten unter besonderer Beruecksichtigung der plastischen Verformung. EAM, H.S/1967, ss. 1-5.
- [83] SCHRÖDER K.H.: Elektrische Kontakte in der Energietechnik (I, II, III) ETZ Bd. 199 (1979) H. 20, 21, 22.
- [84] SKOCZYLAS J.: Obliczanie rozkładu napięć w linii długiej metodą elementów skończonych. Mat. V. Sympozjum - "Metody matematyczne w elektrotechnice", 1976.r., ss. 459-463.
- [85] SNOWDOWN 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° 2, 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 O.: 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° 5215.
- [90] TURNER H.W., TURNER C.: Physics of electrical contacts. Electr. Times, 23.III, 30.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] WILLIAMSON J.B.P.: Basic properties of electric contacts. El. Contacts Orono 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. Proc. VII Int. Conf. El. Contact Ph. Paris 1974, ss. 382-386.

O p r a c o w a n i a n i e o p u b l i k o w a n e

- [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.: Methode d'evaluation des resistances des raccords de jonction, de derivation et d'extermite et doc. connecteurs. EdF, DER, doc. de travail HM 72/BG/MB/MC, Juin 1978.
- [101] BARTODZIEJ G., BLEUZEN M.: Examen de cocceteurs AMPACT. Elaboration d'une 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., BLEUZEN M.: Methode d'investigation de l'etat des contacts des raccords de lignes aeriennes. 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 rozptyłu prądów w niejednorodnym złączu płaskim. Oprac. nie publ. (maszynopis) IESU Pol. Śląskiej, Gliwice 1981.
- [107] BARTODZIEJ G.: Równanie rozptyłu 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. nie publ. (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 technique EdF-8M-72-4712-8D/G8/MC, pp. 17, 5.III.1982.
- [112] DALLE B.: Etude théorique et expérimentale de la capacité de vieillissement des raccords de conducteurs nus des lignes aériennes. Opracowanie CIGRE, 22-SI(W605)02 z dn. 5.V.1981.
- [113] HENGELHAUPT F.: Untersuchung des elektrischen Verhaltens von Abzweig-Pressverbindungen massiver Aluminium-leiter der Elektroinstallation. Diss. TH Karl-Marx-Stadt 1981.
- [114] KUSZKE H.: Opracowanie kryterium oceny stanu złączy linii napowietrznych najwyższych napięć na podstawie bezdotykowych pomiarów temperatury. Prace doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1977.

MODELE ELEKTRYCZNYCH ZŁĄCZY STYKOWYCH

Streszczenie

Celem pracy jest określenie zależności między parametrami konstrukcyjnymi złącza stykowego, jego obciążeniem elektrycznym, warunkami wymiany ciepła a temperaturą i rezystancją złącza. Znajomość tych zależności może być wykorzystana przy konstruowaniu złączy oraz ocenie jakości złączy w oparciu o pomiar dostępnych wielkości: temperatury, rezystancji, spadków napięcia.

Praca zawiera:

- klasyfikację złączy ze względu na ukształtowanie (złącza zgodne, przeciwnie i zerowe, złącza płaskie i linearne, niejednorodne i jednorodne),
- modele matematyczne opisujące rozpiływ prądu, rozkłady spadków napięć i strat mocy w złączach płaskich i liniarnych,
- wskazówki do modelowania fizycznego,
- modele i metody (analityczne i numeryczne) wyznaczające rozkłady stacjonarnego przyrostu temperatury w niejednorodnych i jednorodnych liniarnych układach termokinetycznych, zawierających złącza stykowe,
- przykłady wykorzystania modeli między innymi do wyznaczania obciążalności prądowej długotrwałej złącza, rezystancji granicznych złącza i odporności starzeniowej,
- określanie kierunków dalszych badań.

Praca dotyczy głównie złączy przewodów elektroenergetycznych. Opracowane modele mogą być wykorzystane przy analizie złączy stosowanych w innych dziedzinach elektrotechniki, w teletechnice i elektronice.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИИ

Резюме

Целью работы является определение зависимостей конструктивных параметров стыкового соединения, его электрической нагрузки, условий теплообмена от температуры и сопротивления соединения. Знакомство этих зависимостей можно использовать при конструировании соединений и при оценке их качества, на основе измерений доступных величин: температуры, сопротивления, потерь напряжения.

В работе помещены:

- классификация соединений в аспекте их конструкции (соединения прямой, обратной и нулевой последовательности, плоские и линейные, однородные и неоднородные),
- математические модели описывающие токораспределение, распределение потерь напряжения и потерь мощности в плоских и линейных соединениях,
- указания для физического моделирования,
- модели и методы (аналитические и цифровые) определяющие распределения стационарных приращений температуры в неоднородных и однородных линейных термомеханических схемах со стыковыми соединениями,
- примеры применений моделей, в том числе: для определения длительной нагрузаемости соединения, предельных сопротивлений соединения и стойкости к старению,
- определение направлений дальнейших исследований.

В основном работа относится к соединениям электроэнергетических проводов, но разработанные модели могут быть использованы при анализе стыков применяемых в других областях электротехники, в телетехнике и электронике.

THE MODELS OF ELECTRICAL CONTACT JOINTINGS

S u m m a r y

The aim of this paper is to determine the relations between the constructional parameters of a contact jointing, its electrical load, the heat exchange conditions and the jointing temperature and its resistance.

When known these relations may be utilized in jointing construction and also in jointing quality estimation while basing on the measurements of the accessible values i.e. the temperature, the resistance and the voltage drop.

The paper contains:

- the jointing classification according to shape (negative, positive and zerojoints, flat and linear joints, homogeneous and heterogeneous joints),
- the mathematical models describing the current flow directions, the voltage drop distributions, and the power losses distribution in flat or linear joints,
- the indications for physical modelling,
- the models and methods (both analytical and numerical) which define the distribution of stationary temperature rise in homogeneous and heterogeneous thermokinetic systems containing contact jointings,
- the examples of model applications, among others, to current carrying capacity determination, the joint boundary resistance, as well as the ageing capacity,
- indications for further investigations.

The paper is concerned mainly with power transmission conductors. These models may be used in the analysis of contact jointings used in electronics, telephone and teletype service and other fields of electrical engineering.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P 3347 | 82 | 80

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
MOŻNA NABYC W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

- 44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-290 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN —
Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.