

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

**BERNARD BARON
ZBIGNIEW GACEK
WIKTOR KIŚ**

P. 3347/93

**OBLICZANIE ROZKŁADU
POLA ELEKTRYCZNEGO,
WYMIAROWANIE UKŁADÓW
IZOLACYJNYCH
I WYZNACZANIE TEMPERATUR
W PRZEWODACH SZYNOWYCH
IZOLOWANYCH SPRĘŻONYM SF₆**

ELEKTRYKA

Z. 131

**GLIWICE
1993**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1196

P.3347/93

BERNARD BARON
ZBIGNIEW GACEK
WIKTOR KIS



**OBLICZANIE ROZKŁADU
POLA ELEKTRYCZNEGO,
WYMIAROWANIE UKŁADÓW
IZOLACYJNYCH
I WYZNACZANIE TEMPERATUR
W PRZEWODACH SZYNOWYCH
IZOLOWANYCH SPRĘŻONYM SF₆**

GLIWICE

1993

OPINIODAWCY
Prof. zw. dr hab. inż. Romuald Włodek
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski
REDAKTOR DZIAŁU — Doc. dr inż. Zofia Cichowska
SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Leśko

REDAKCJA

Mgr Anna Błażkiewicz

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

AUTORZY POSZCZEGÓLNYCH ROZDZIAŁÓW

Bernard Baron — 3;
Zbigniew Gacek — 1, 2, 4, 6, zał. 1 i 2;
Wiktor Kiś — 5

PL ISSN 0072-4688

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 150+55 Ark. wyd. 12 Ark. druk. 10 Papier offsetowy kl.11,70x100.80g
Oddane do druku 25.11.93 Podpis. do druku 25.11.93 Druk ukończ. w lutym 1994
Zam 522|93 Cena zł 42.000,—

Fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	9
2. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES MONOGRAFII	12
3. MODELOWANIE MATEMATYCZNE POLA ELEKTRYCZNEGO W PRZEWODACH SZYNOWYCH	14
3.1. Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w trójfazowych ekranowanych przewodach szynowych	14
3.1.1. Sformułowanie układu równań całkowych pierwszego rodzaju	14
3.1.2. Konstrukcja algorytmu obliczeniowego	16
3.1.3. Opis użytkowania programu PRZEWEK_3	20
3.2. Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w obszarach oddziaływania izolatorów o symetrii obrotowej	26
3.2.1. Sformułowanie układu równań całkowych drugiego rodzaju	26
3.2.2. Konstrukcja algorytmu obliczeniowego dla izolatorów o symetrii obrotowej	30
3.2.3. Algebraizacja równań całkowo-brzegowych dla izolatora dyskowego .	39
3.2.4. Obliczenie pola elektrycznego na powierzchniach granicznych i wewnątrz izolatora dyskowego	43
3.2.5. Opis użytkowania programu IZO_DYSK	46
3.2.6. Algebraizacja równań całkowo-brzegowych dla izolatora kielichowego	50
3.2.7. Obliczenie pola elektrycznego na powierzchniach granicznych i wewnątrz izolatora kielichowego	56
3.2.8. Opis użytkowania programu IZO_KIEL	58
4. WYMIAROWANIE I KSZTAŁTOWANIE UKŁADÓW IZOLACYJNYCH W PRZEWODACH SZYNOWYCH 123-420 kV	62
4.1. Założenia techniczne do obliczania izolacji przewodów szynowych ...	62
4.1.1. Założenia wstępne	62
4.1.2. Założenia dotyczące warunków pracy izolacji	63
4.2. Wymiarowanie izolacji gazowej	66

4.2.1. Wymagane właściwości i ocena wytrzymałości elektrycznej izolacji gazowej ciśnieniowej	66
4.2.2. Kryteria wymiarowania izolacji gazowej przewodów szynowych 123-420 kV i algorytm obliczeń numerycznych	70
4.2.3. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych i dane do obliczeń optymalizacyjnych	76
4.3. Wymiarowanie i kształtowanie izolacji stałej	83
4.3.1. Wymagane właściwości izolatorów wsporczych i grodziowych	83
4.3.2. Kryteria doboru i wymiarowania izolatorów w gazoszczelnych przewodach szynowych 123-420 kV	84
4.3.3. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych i dane do obliczeń optymalizacyjnych	87
5. WYZNACZANIE TEMPERATUR ELEMENTÓW HERMETYZOWANYCH PRZEWODÓW SZYNOWYCH	94
5.1. Założenia metodyczne i zakres obliczeń	94
5.2. Bilans cieplny i model obudowy dla stanu cieplnie ustalonego	96
5.3. Bilans cieplny dla przewodu szynowego obciążonego prądem zwarciovym	107
5.4. Algorytmy obliczeniowe	109
5.5. Charakterystyka programu obliczeniowego NAGRZEW	116
6. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ	122
LITERATURA	126
ZALĄCZNIK 1. Ocena przybliżonych współzależności wymiarów geometrycznych trójbiegunowych i jednobiegunowych przewodów szynowych	133
ZALĄCZNIK 2. Wyniki obliczeń numerycznych wymiarów izolatorów wsporczych i grodziowych w przewodach szynowych 123-420 kV	137

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	9
2. ПРЕДМЕТ, ЦЕЛЬ И ОБЛАСТЬ МОНОГРАФИИ	12
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ШИНОПРОВОДАХ	14
3.1. Математическое моделирование электрического поля в трехфазных экранированных шинпроводах	14
3.1.1. Постановка системы интегральных уравнений первого рода	14
3.1.2. Конструкция расчетного алгоритма	16
3.1.3. Описание использования программы PRZEWEK_3	20
3.2. Математическое моделирование электрического поля в областях воздействия изоляторов с радиальной симметрией	26
3.2.1. Постановка системы интегральных уравнений второго рода	26
3.2.2. Конструкция расчетного алгоритма для изоляторов с радиальной симметрией	30
3.2.3. Алгебраическое представление интегрально-краевых уравнений для конического изолятора	39
3.2.4. Расчет электрического поля на граничных поверхностях и внутри дискового изолятора	43
3.2.5. Описание использования программы IZO_DYSK	46
3.2.6. Алгебраическое представление интегрально-краевых уравнений для конического изолятора	50
3.2.7. Расчет электрического поля на граничных поверхностях и внутри конического изолятора	56
3.2.8. Описание использования программы IZO_KIEL	58
4. ДИМЕНСИОНИРОВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СХЕМ В ШИНОПРОВОДАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 123–420 кВ	62
4.1. Технические допущения для расчетов изоляции шинпроводов	62
4.1.1. Предварительные элегазовой изоляции	62
4.1.2. Допущения относительно режима работы изоляции	63
4.2. Дименсинирование элегазовой изоляции	66

4.2.1. Требуемые свойства и оценка электрической прочности элегазовой изоляции	66
4.2.2. Критерии dimensionирования элегазовой изоляции шинопроводов напряжением 123-420 кВ и алгоритм цифровых расчетов	70
4.2.3. Совокупность допустимых решений и данные для оптимизирующих расчетов	76
4.3. Dimensionирование и формирование твердой изоляции	83
4.3.1. Требуемые свойства опорных и секционных изоляторов	84
4.3.2. Критерии выбора и dimensionирования изоляторов в газонаполненных шинопроводах напряжением 123-420 кВ	87
4.3.3. Совокупность допустимых решений и данные для оптимизационных расчетов	94
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ЭЛЕМЕНТОВ ГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ ШИНОПРОВОДОВ	
5.1. Методические допущения и объем расчетов	94
5.2. Тепловой баланс и цель моделирующая установившийся тепловой режим	96
5.3. Тепловой баланс для шинопровода загруженного током короткого замыкания	107
5.4. Расчетные алгоритмы	109
5.5. Характеристика расчетной программы NAGRZEW	116
6. ПОДВЕДЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	122
ЛИТЕРАТУРА	126
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Оценка приближенных взаимозависимостей геометрических размеров трехфазных и однофазных шинопроводов	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты цифровых расчетов опорных и секционных изоляторов в шинопроводах напряжением 123-420 кВ	137

CONTENTS

1. INTRODUCTION	9
2. OBJECT, PURPOSE AND SCOPE OF THE MONOGRAPH	12
3. MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTRIC FIELD IN SOLID CONDUCTORS	14
3.1. Mathematical modelling of electric field in the three-phase shielded buses	14
3.1.1. Formulation of a system of first kind integral equations	14
3.1.2. Construction of the computation algorithm	16
3.1.3. Specification of operational use of the PRZEWEK_3 program	20
3.2. Mathematical modelling of electric field in the vicinity of spacers indicated rotary symmetry	26
3.2.1. Formulation of a system of second kind integral equations	26
3.2.2. Construction of the computation algorithm for spacers indicated rotary symmetry	30
3.2.3. Algebraization of integral-bounded equations for a disc-type spacer	39
3.2.4. Computation of electric field on interfaces and inside the disc-type spacer	43
3.2.5. Specification of operational use of the IZO_DYSK program	46
3.2.6. Algebraization of integral-bounded equations for a conical-type spacer	50
3.2.7. Computation of electric field on interfaces and inside the conical-type spacer	56
3.2.8. Specification of operational use of the IZO_KIEL program	58
4. DIMENSIONING AND SHAPING OF INSULATING SYSTEMS IN THE 123-420 kV BUSES	62
4.1. Brief foredesign for computation of the insulation of solid conductors	62
4.1.1. Preliminary brief foredesign	62

4.1.2. Brief foredesign concerned operating conditions of the insulation	63
4.2. Dimensioning of the gaseous insulation	66
4.2.1. Requisite properties and estimation of electric strength of the gas compressed insulation	66
4.2.2. Dimensioning criteria for gaseous insulation of the 123-420 kV buses and the algorithm of numerical calculations	70
4.2.3. The set of permissible solutions and data for optimizing calculations	76
4.3. Dimensioning and shaping of the solid insulation	83
4.3.1. Requisite properties of the post-type and barrier-type spacers ...	83
4.3.2. Choice and dimensioning criteria for spacers in the enclosed gas insulated 123-420 kV buses	84
4.3.3. The set of permissible solutions and data for optimizing calculations	87
5. EVALUATION OF TEMPERATURE OF ELEMENTS IN THE ENCLOSED GAS INSULATED BUSES	94
5.1. Methodical assumptions and the scope of calculations	94
5.2. The thermal balance and the circuit model for a thermally steady state	96
5.3. The thermal balance for the solid conductor loaded with short-circuit current	107
5.4. Computational algorithms	109
5.5. Characteristic of the NAGRZEW program	116
6. SUMMARY AND TENDENCY OF FUTURE RESEARCH	122
REFERENCES	126
ANNEX 1. Estimation of approximate interrelations between geometrical dimensions of three-phase and unipolar buses	133
ANNEX 2. Computational results of post-type and barrier-type spacers dimensions in the 123-420 kV buses	137

1. Wstęp

Przewody szynowe służą do przesyłania i rozdziału energii elektrycznej w obrębie jednego lub kilku obiektów elektroenergetycznych. Składają się one z szyn (torów prądowych), izolatorów, odprowadzeń i rozgałęzień, konstrukcji podtrzymujących (wsporczych), osłon i ekranów (w wypadku przewodów osłoniętych) oraz innych elementów konstrukcyjnych i pomocniczych. Przewody szynowe można klasyfikować ze względu na ich główne cechy konstrukcyjne (np. giętkie, sztywne), zakres zastosowania (np. stacyjne, elektrowniane) i sposób montażu (patrz [19]).

Przewody szynowe izolowane sprężonym sześciofluorkiem siarki (SF_6) należą do grupy nowych i niekonwencjonalnych wysokonapięciowych urządzeń przesyłowo-rozdziałczych, stosowanych coraz szerzej w światowej energetyce. W krajach wysoko rozwiniętych prowadzone są prace nad ich rozwojem, mające na celu uzyskanie jeszcze lepszych efektów techniczno-ekonomicznych.

Celowość zastosowania takich urządzeń w krajowej energetyce nie jest już obecnie kwestionowana, gdyż może to przynieść znaczące korzyści techniczne i organizacyjno-eksploatacyjne. W Polsce istnieje wiele obiektów energetycznych, w których zastosowanie przewodów szynowych z izolacją gazowo-ciśnieniową pozwoliłoby rozwiązać problem budowy połączeń elektroenergetycznych w trudnych warunkach technicznych i terenowych, a jednocześnie zwiększyć bezpieczeństwo pracy i niezawodność takich połączeń. W wielu przypadkach zastosowanie przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 stanowi jedyną możliwość modernizacji i rozbudowy układów elektroenergetycznych, szczególnie w połączeniu z zainstalowaniem importowanych rozdzielnic gazoszczelnych.

Pod względem konstrukcyjnym powyższe przewody szynowe należą do grupy przewodów sztywnych szczelnie osłoniętych, a dokładniej - ekranowanych i hermetyzowanych. Konstrukcje te są modyfikowane w miarę postępu rozwiązań konstrukcyjnych wysokonapięciowych rozdzielnic osłoniętych z izolacją gazowo-ciśnieniową. Obecnie są one budowane na napięcia w przedziale od 72

do 1200 kV, najczęściej jednak od 123 do 525 kV. Są to zarówno przewody wysokonapięciowe, jak i wieloprądowe, ponieważ ich obciążalność długotrwała przekracza 1000 A.

Podstawową zaletą przewodów szynowych izolowanych sprężonych SF_6 jest zdolność do przenoszenia znacznie większych mocy niż porównywalnymi kablami klasycznymi. Przewody te mają również wiele innych zalet, spośród których najważniejsze są:

- łatwość instalowania w trudnym terenie (zwłaszcza silnie zurbanizowanym i gęsto zaludnionym) oraz w miejscach, gdzie występuje wiele skrzyżowań z mostami, autostradami, rzekami, a także skrzyżowań z innymi liniami elektroenergetycznymi;
- łatwość wyprowadzania lub wprowadzania mocy (zwłaszcza na terenach elektrowni, elektrociepłowni i dużych zakładów przemysłowych);
- łatwość modernizowania i rozbudowy układów elektroenergetycznych elektrowni i zakładów przemysłowych, gdy występują ograniczenia miejsca;
- możliwość bezkolizyjnego rozwiązywania skrzyżowań linii i zbliżeń z takimi obiektami jak chłodnie kominowe w elektrowniach, składowiska węgla itp.;
- możliwość budowy połączeń w terenie o dużych różnicach poziomów (np. w górach lub przy elektrowniach pompowo-szczytowych).

Przewody szynowe z izolacją gazowo-ciśnieniową odznaczają się ponadto małymi kosztami eksploatacyjnymi i dużym bezpieczeństwem pracy. Nie są one źródłem niekorzystnych oddziaływań eksploatacyjnych, takich jak promieniowanie, zakłócenia radiowo-telewizyjne itd. Cechą charakterystyczną tych rozwiązań konstrukcyjnych jest duża niezawodność, nawet w trudnych warunkach środowiskowych i eksploatacyjnych.

Podobnie jak rozdzielnie osłonięte z SF_6 , przewody szynowe z izolacją gazowo-ciśnieniową buduje się jako urządzenia jednobiegunowe (każda faza w osobnej obudowie) lub jako trójbiegunowe (wszystkie trzy fazy we wspólnej obudowie). W dotychczasowych rozwiązaniach przeważają konstrukcje z oddzielnymi obudowami dla każdej z faz.

Elementami przewodzącymi prąd, a jednocześnie elektrodami układów izolacyjnych występujących w przewodach szynowych, są szyny prądowe i uziemione obudowy. Szynę prądową stanowi zazwyczaj rura miedziana lub rura wykonana ze stopów aluminium. Obudowy (osłony, ekrany) mają postać wytłaczanych lub spawanych rur, wykonywanych głównie ze stopów aluminiowych, o średnicach zewnętrznych zawierających się w granicach 165-762 mm (odpowiednio dla napięć 72-1200 kV). W zależności od zastosowania mogą być

one pokrywane warstwą ochronną i łączone albo poprzez spawanie poszczególnych odcinków, albo skręcanie za pomocą kołnierzy.

Izolację główną stanowi czysty sześciofluorek siarki, o ciśnieniu roboczym w granicach od 0,29 do 0,51 MPa (w temperaturze 20°C). Korzystne właściwości elektryczne sprężonego SF₆ pozwalają na stosowanie niewielkich odstępów izolacyjnych, w wyniku czego uzyskuje się małe wymiary poprzeczne przewodów - nawet przy bardzo wysokich napięciach roboczych. Układy izolacyjne są jednak bardzo wrażliwe na nierównomierność pola elektrycznego, gdyż poziom wartości natężenia tego pola jest zazwyczaj znacznie wyższy niż w konwencjonalnych układach izolacji zewnętrznej (powietrznej). Narzuca to konieczność szczególnie starannego doboru oraz wymiarowania izolacji gazowej i izolatorów odstępnikowych, a tym samym dysponowania wiarygodnymi wynikami obliczeń numerycznych pola elektrycznego w różnych obszarach projektowanego przewodu szynowego (patrz rozdziały 3 i 4).

Ważnym zadaniem w praktyce projektowej urządzeń elektroenergetycznych są obliczenia cieplne, na podstawie których wyznacza się m.in. spodziewane temperatury poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Z uwagi na wzajemne oddziaływanie szyn oraz prądy indukowane w obudowach, wyznaczanie bilansu cieplnego przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF₆ jest zagadnieniem złożonym. Źródłem ciepła są bowiem zarówno szyny, jak i obudowy, a ponadto wymiana ciepła następuje pomiędzy ośrodkami gazowymi o różnych właściwościach cieplnych (SF₆, powietrze). Stąd też, w celu dokładnego wyznaczenia temperatury w przewodach i ich otoczeniu konieczna jest szczegółowa analiza rozkładu pola elektromagnetycznego. Konstruktorskie obliczenia cieplne można jednak wykonywać opierając się na znacznie prostszej metodyce obliczeniowej, w której wykorzystuje się odpowiednio uproszczony model matematyczny zjawisk termokinetycznych (patrz rozdział 5).

2. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES MONOGRAFII

Niniejsza praca jest próbą monograficznego ujęcia trzech wybranych zagadnień metodologiczno-projektowych: obliczania rozkładu pola elektrycznego, wymiarowania układów izolacyjnych i wyznaczania temperatur w wysokonapięciowych przewodach szynowych izolowanych sprężonym SF_6 . Zagadnienia te były przedmiotem kilkunastu prac badawczych z grupy tematycznej 1.4 kierunku I CPBP 02.18 ("Wybrane zagadnienia poznawcze energetyki"), wykonanych przez autorów na Politechnice Śląskiej w latach 1986-1990. Opracowano je na podstawie corocznych niepublikowanych sprawozdań z realizacji tematu badawczego 1.4.3, pt.: "Modelowanie nowych konstrukcji przewodów wieloprądowych" (patrz spis literatury, pozycje [5] do [9], [13] do [16] i [26] do [29]). Stanowią one fragment znacznie szerszej problematyki z zakresu projektowania, konstruowania, badania i eksploataowania przedmiotowych przewodów szynowych¹⁾.

Przewody szynowe z izolacją gazowo-ciśnieniową są obecnie produkowane jedynie przez nieliczne wielkie firmy, np. AEG, Merlin-Gerín, Siemens, ABB, Westinghouse. W publikacjach i zagranicznych pracach naukowych brak jest wystarczających informacji, m.in z zakresu metodologii obliczania i konstruowania takich urządzeń. Dotyczy to zarówno zagadnień teoretycznych i metod obliczeniowych, jak i nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Publikacje i katalogi firm produkujących przewody szynowe zawierają na ogół jedynie opisy metod badawczych i ogólnych rozwiązań technicznych. Nie są podawane metody obliczeń, wyniki prób i szczegóły rozwiązań technologicznych. Jedynie materiały CIGRE (Komitet 21, Grupa Robocza 21.12) prezentują uproszczone metody obliczeń cieplnych. Celem monografii jest częściowe wypełnienie luki

1) Szczegółowy wykaz prac wykonanych przez kilka ośrodków krajowych w ramach grupy tematycznej 1.4 kierunku I CPBP 02.18 podany jest w końcowym raporcie, opracowanym przez koordynatora zadania prof. zw.dr hab.inż. Tadeusza Beldowskiego, pt.: "Tory wieloprądowe z izolacją gazową SF_6 "; Raport opracach wykonanych w latach 1986-1990. Warszawa, styczeń 1991.

informacyjnej w powyższej problematyce, a w szczególności - opracowanie narzędzi przydatnych do komputerowego wspomagania procesu projektowania krajowych przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 . Jest to jeden z warunków zastosowania tej nowej techniki przesyłowo-rozdzielczej i izolacyjnej w krajowej energetyce.

Monografia składa się z trzech zasadniczych rozdziałów, podsumowania, obszernego spisu literatury i dwóch załączników. W rozdziale 3 przedstawione są modele matematyczne oraz algorytmy i programy komputerowe, służące do obliczeń rozkładu pola elektrycznego w jedno- i trójfazowych ekranowanych przewodach szynowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu izolatorów odstępnikowych o symetrii obrotowej. W rozdziale 4 przedstawione są zasady, algorytmy i komputerowe programy obliczeniowe, a następnie rezultaty wymiarowania izolacji gazowo-ciśnieniowej oraz izolatorów odstępnikowych (wsporczych i grodziowych), przeznaczonych do instalowania w przewodach szynowych o napięciach roboczych od 123 do 420 kV. W rozdziale 5 przedstawione są zasady, algorytmy i programy komputerowe obliczeń cieplnych przedmiotowych przewodów szynowych w stanie cieplnie ustalonym i w warunkach zwarciowych, wykonanych na podstawie prostego obwodowego modelu fenomenologicznego. Kolejne załączniki zawierają: opis sposobu postępowania i wyniki oceny przybliżonych współzależności wymiarów geometrycznych trójbiegunowych i jednobiegunowych przewodów szynowych (zał.1) oraz syntetyczne zestawienie wyników obliczeń numerycznych parametrów pola elektrycznego wewnątrz i na powierzchniach izolatorów odstępnikowych (zał.2).

Szczegółowy zakres rozważań dotyczących kolejnych zagadnień przedmiotowych jest podany w rozdziałach 3, 4 i 5. Oddzielnymi problemami, dotyczącymi przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 , lecz nie rozważanymi w monografii, są:

- wyznaczanie rozkładu pola elektromagnetycznego w celu obliczania strat mocy czynnej,
- obliczanie sił elektrodynamicznych,
- dobór oraz wymiarowanie izolatorów przepustowych SF_6 /powietrze i SF_6 /olej,
- specyficzne narażenia przepięciowe i ochrona przeciwporażeniowa,
- analiza zbioru rozwiązań dopuszczalnych i kosztów budowy,
- system obliczeniowy do optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych,
- zagadnienia montażowe i technologiczno-materiałowe,
- próby i badania laboratoryjne,
- zagadnienia eksploatacyjne.

3. MODELOWANIE MATEMATYCZNE POLA ELEKTRYCZNEGO W PRZEWODACH SZYNOWYCH

3.1. Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w trójfazowych ekranowanych przewodach szynowych

Rozpatrywane są układy przewodów równoległych o wspólnej osłonie ekranującej, przy założeniu, że odstęp między przewodami są małe w porównaniu z ich długością. Pozwala to na zastosowanie dwuwymiarowego modelu pola elektrycznego. Do analizy pola elektrycznego stosuje się metodę równań całkowych pierwszego rodzaju, równoważną problemowi Dirichleta dla dwuwymiarowego równania Laplace'a.

3.1.1. Sformułowanie układu równań całkowych pierwszego rodzaju

Niech na płaszczyźnie R^2 dany jest skończony obszar D_{N_p} o brzegu \mathcal{C}^{N_p} , w którym zadany jest układ $D_1 (i=1, 2, \dots, N_{p-1})$ rozłącznych obszarów jednospójnych. Brzegi tych obszarów \mathcal{C}^i są krzywymi zamkniętymi, kawałkami gładkimi. Poszukuje się rozwiązania $V(X)$ zagadnienia Dirichleta dla dwuwymiarowego równania Laplace'a:

$$\Delta V(X) = \frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x_2^2} = 0 \quad \text{dla } X \in D_{N_p} \quad (3.1)$$

z warunkami brzegowymi

$$V(X) = V_1 \quad \text{dla } X \in \mathcal{C}^i \quad (i=1, 2, \dots, N_{p-1}) \quad (3.2)$$

zerującego się na osłonie

$$V(X) = V_{N_p} = 0 \quad \text{dla } X \in \mathcal{C}^{N_p} \quad (3.3)$$

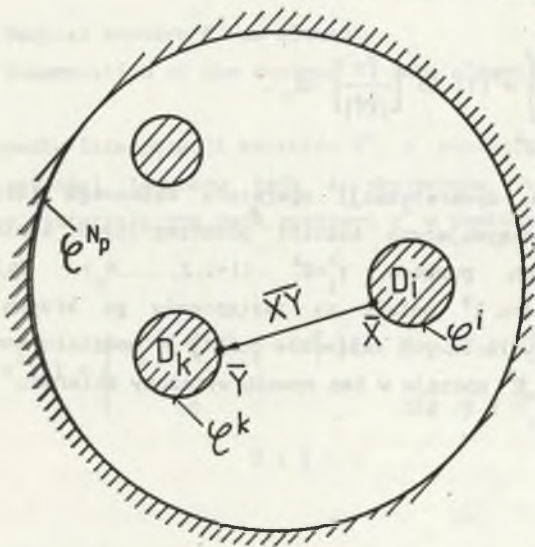
w postaci potencjału logarytmicznego warstwy pojedynczej:

$$V(X) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^{N_p} \int_{\mathcal{C}^k} \sigma^k(Y) \ln \left[\frac{1}{|\overline{XY}|} \right] dl_Y \quad (3.4)$$

gdzie: $|\overline{XY}| = [(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2]^{1/2}$; (3.4a)

dl_y - miara konturu \mathcal{C}^k ze względu na współrzędne punktu Y .

Dla tak sformułowanego problemu poszukuje się funkcji gęstości ładunków $\sigma^k(X)$ (dla $k=1,2,\dots,N_p$) na brzegach \mathcal{C}^k , aby potencjał $V(X)$ określony wzorem (3.4) spełniał warunki (3.2) i (3.3).



Rys. 3.1. Układ przewodów wewnątrz ekranu

Fig.3.1. The configuration of electric conductors inside a shield

Wymaga to rozwiązania następującego układu równań całkowych pierwszego rodzaju:

$$\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{N_p} \int_{\mathcal{C}^k} \sigma^k(Y) \ln \left[\frac{1}{|\overline{XY}|} \right] dl_Y = 2 \epsilon_0 V_l \quad (3.5)$$

dla $X \in \mathcal{C}^l$ ($l=1,2,\dots,N_p$).

W teorii równań całkowych (np. [6] i [17]) wykazuje się istnienie i jednoznaczność rozwiązań powyższego układu równań. Znajomość rozkładu gęstości powierzchniowej ładunków, zapewniających stałość potencjałów na konturach \mathcal{C}^k , a tym samym będących rozwiązaniem układu równań całkowych (3.5), jest równoważna rozwiązaniu równania Laplace'a (3.1) wraz z warunkami brzegowymi (3.2) i (3.3).

3.1.2. Konstrukcja algorytmu obliczeniowego

Chcąc zrealizować komputerowo proces obliczeń układu równań całkowych (3.5), należy dokonać dyskretyzacji występujących w nim operacji całkowych, typu potencjał logarytmiczny warstwy pojedynczej:

$$V\sigma = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\tilde{N}_p} \int_{\mathcal{C}^k} \sigma^k(Y) \ln \left[\frac{1}{|\overline{XY}|} \right] dl_Y \quad (3.6)$$

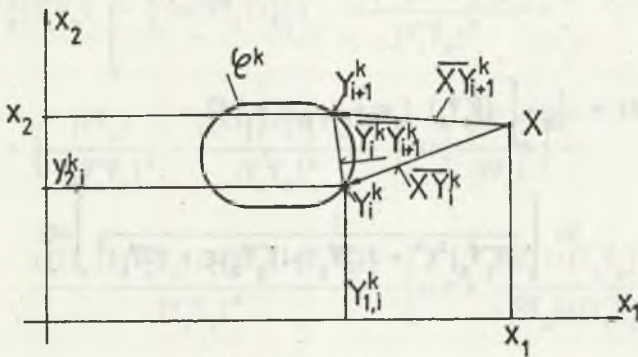
Czynnością niezbędną do dyskretyzacji operatora całkowego (3.6) jest określenie funkcji aproksymujących kształt poszczególnych konturów \mathcal{C}^k przewodów dla zadanych punktów $Y_1^k \in \mathcal{C}^k$ ($i=1,2,\dots,N_p$). Najprostsza interpolacja danego konturu \mathcal{C}^k polega na zastąpieniu go krzywą łamaną, składającą się z odcinków łączących sąsiednie punkty Y_1^k podziału konturu \mathcal{C}^k . Zbiór punktów $Y(y_1, y_2) \in \mathcal{C}^k$ zostaje w ten sposób wyrażony zbiorem:

$$\mathcal{C}^k = \bigcup_{i=1}^{N_k} \mathcal{C}_i^k \quad (3.7)$$

gdzie:

$$\mathcal{C}_i^k = \left\{ \begin{array}{l} (y_1, y_2): y_1 = y_{1,1}^k + (y_{1,1+1}^k - y_{1,1}^k) \xi ; \\ y_2 = y_{2,1}^k + (y_{2,1+1}^k - y_{2,1}^k) \xi ; \\ 0 < \xi < 1 \end{array} \right\} \quad (3.7a)$$

($k=1,2,\dots,N_p$)



Rys.3.2. Podział konturu \mathcal{C}^k na elementy

Fig.3.2. Segmentation of the contour \mathcal{C}^k into elements

W przypadku interpolacji konturów \mathcal{C}^k w postaci wyrażonej wzorem (3.7), funkcje gęstości ładunków będą aproksymowane funkcją sklejaną stopnia pierwszego, interpolującą dane gęstości σ_1^k w punktach Y_1^k konturu \mathcal{C}^k . Oznacza to, że:

$$\sigma_1^k(Y) = \begin{cases} \sigma_1^k + (\sigma_{i+1}^k - \sigma_1^k)\xi & \text{dla } Y \in \mathcal{C}_i^k \\ 0 & \text{dla } Y \notin \mathcal{C}_i^k \end{cases} \quad (3.8)$$

$$0 < \xi < 1$$

gdzie

$\sigma_1^k = \sigma^k(Y_1^k)$ - gęstości ładunku w punkcie Y_1^k konturu \mathcal{C}^k , zwane zmienną węzłową.

Uwzględniając podstawienie (3.7a) we współrzędnych y_1, y_2 występujących w jądrze operacji (3.6) oraz oznaczenia podane na rys.3.2., otrzymuje się następującą przybliżoną postać operatora całkowego:

$$V\sigma = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^{M_k} W(Y_1^k, Y_{l+1}^k, X) \quad (3.9)$$

gdzie:

$$W(Y_1, Y_2, X) = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 |\bar{Y}_1 \bar{Y}_2| [\sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1)\xi] \cdot \ln \left[\frac{1}{|\bar{Y}_1 \bar{Y}_2|^2 \xi^2 + 2(\bar{X}\bar{Y}_1) \cdot (\bar{Y}_1 \bar{Y}_2) \xi + |\bar{X}\bar{Y}_1|^2} \right] d\xi; \quad (3.10)$$

σ_1, σ_2 - gęstości ładunków w punktach Y_1 i Y_2 ;

$$\bar{X}\bar{Y}_1 = (y_{1,1} - x_1)\bar{k}_1 + (y_{2,1} - x_2)\bar{k}_2 ; \quad (3.11a)$$

$$\bar{Y}_1 \bar{Y}_2 = (y_{1,2} - y_{1,1})\bar{k}_1 + (y_{2,2} - y_{2,1})\bar{k}_2 ; \quad (3.11b)$$

$$(\bar{X}\bar{Y}_1) \cdot (\bar{Y}_1 \bar{Y}_2) = (y_{1,1} - x_1)(y_{1,2} - y_{1,1}) + (y_{2,1} - x_2)(y_{2,2} - y_{2,1}) ; \quad (3.11c)$$

$$(\bar{X}\bar{Y}_1) \cdot (\bar{Y}_1 \bar{Y}_2) = (y_{1,2} - y_{1,1})(y_{2,1} - x_2) - (y_{2,2} - y_{2,1})(y_{1,1} - x_1) . \quad (3.11d)$$

Całkę (3.10) i przybliżenia operacji całkowej (3.6) można obliczyć w postaci kombinacji funkcji standardowych. Należy podkreślić, że całka (3.10) jest wprawdzie całką niewłaściwą, gdy punkt X leży na prostej generowanej przez punkty Y_1 i Y_2 , lecz jest jednocześnie całką zbieżną. Tak więc, w zależności od usytuowania punktu X , po rozwiązaniu całki (3.10) przez części i podstawieniu do wzoru (3.9) otrzymuje się operator całkowy:

$$V\sigma = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M C(Y_{1-1}^k, Y_1^k, Y_{1+1}^k, X) \sigma_1^k \quad (3.12)$$

gdzie: $C(Y_1, Y_2, Y_3, X) = F(Y_2, Y_3, X) + F(Y_2, Y_1, X) ; \quad (3.13)$

$$\begin{aligned}
 F(Y_1, Y_2, X) = \frac{1}{\pi} |\overline{Y_1 \overline{Y_2}}| \left\{ -\frac{1}{2} \ln |\overline{X \overline{Y_1}}| + \frac{1}{4} \left(3 + \frac{2(\overline{X \overline{Y_1}}) \cdot (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})}{|\overline{Y_1 \overline{Y_2}}|^2} + \right. \right. \\
 \left. \left. + \left(\frac{|\overline{X \overline{Y_2}}|}{2|\overline{Y_1 \overline{Y_2}}|^2} - \frac{|(\overline{X \overline{Y_1}}) \times (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})|^2}{|\overline{Y_1 \overline{Y_2}}|^4} \right) \ln \left(\frac{|\overline{X \overline{Y_1}}|}{|\overline{X \overline{Y_2}}|} \right) - \right. \\
 \left. - \frac{|(\overline{X \overline{Y_1}}) \times (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})| [(\overline{X \overline{Y_2}}) \cdot (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})]}{|\overline{Y_1 \overline{Y_2}}|^4} \left[\arctg \frac{(\overline{X \overline{Y_2}}) \cdot (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})}{|(\overline{X \overline{Y_2}}) \times (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})|} - \right. \right. \\
 \left. \left. - \arctg \frac{(\overline{X \overline{Y_1}}) \cdot (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})}{|(\overline{X \overline{Y_2}}) \times (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})|} \right] \right\} \quad \text{dla } (\overline{X \overline{Y_1}}) \times (\overline{Y_1 \overline{Y_2}}) \neq 0 ; \quad (3.14a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F(Y_1, Y_2, X) = \frac{1}{\pi} |\overline{Y_1 \overline{Y_2}}| \left[-\frac{1}{2} \ln |\overline{X \overline{Y_1}}| + \frac{1}{4} \left(3 + \frac{2(\overline{X \overline{Y_1}}) \cdot (\overline{Y_1 \overline{Y_2}})}{|\overline{Y_1 \overline{Y_2}}|^2} \right) + \right. \\
 \left. + \frac{|\overline{X \overline{Y_2}}|}{2|\overline{Y_1 \overline{Y_2}}|^2} \ln \left(\frac{|\overline{X \overline{Y_1}}|}{|\overline{X \overline{Y_2}}|} \right) \right] \quad \text{dla } X=Y_1, Y_2 ; (\overline{X \overline{Y_1}}) \cdot (\overline{Y_1 \overline{Y_2}}) = 0 \quad (3.14b)
 \end{aligned}$$

$$F(Y_1, Y_2, X) = \frac{1}{\pi} |\overline{Y_1 \overline{Y_2}}| \left[-\frac{1}{2} \ln |\overline{X \overline{Y_1}}| + \frac{3}{4} \right] \quad \text{dla } X = Y_1 ; \quad (3.14c)$$

$$F(Y_1, Y_2, X) = \frac{1}{\pi} |\overline{Y_1 \overline{Y_2}}| \left[-\frac{1}{2} \ln |\overline{X \overline{Y_1}}| + \frac{1}{4} \right] \quad \text{dla } X = Y_2 . \quad (3.14d)$$

W ten sposób otrzymano ogólne wyrażenie (3.12) na przybliżony operator typu potencjał logarytmiczny warstwy pojedynczej (3.6). Funkcje kształtu $F(Y_1, Y_2, X)$ dla tego przybliżenia wyrażają się poprzez funkcje \ln i \arctg , o argumentach będących funkcją iloczynów skalarnych i wektorowych odpowiednich wektorów $\overline{X \overline{Y_1}}$, $\overline{X \overline{Y_2}}$ i $\overline{Y_1 \overline{Y_2}}$, generowanych przez współrzędne punktów:

$$Y_1 = Y_1^k, \quad Y_2 = Y_{1+1}^k \quad (k=1, 2, \dots, N_p) \quad (i=1, 2, \dots, M_k)$$

podziału konturów \mathcal{C}^k poszczególnych przewodów oraz dowolnie usytuowanego punktu X .

Rozpisując układ równań całkowych (3.5) w punktach $X = Y_j^1$, które posłużyły do przybliżenia operacji całkowej (3.6), otrzymuje się przybliżenie równania całkowego (3.5) następującym układem równań algebraicznych ze względu na niewiadome gęstości węzłowe σ_1^k :

$$\sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{M_k} C(Y_{i-1}^k, Y_i^k, Y_{i+1}^k, Y_j^1) \sigma_1^k = 2 \varepsilon_0 V_1 \quad (3.15)$$

gdzie $i=1,2,\dots,N_p$ oraz $j=1,2,\dots,M_1$.

Biorąc pod uwagę rozwiązanie układu równań algebraicznych (3.15) ze względu na gęstości węzłowe ładunków σ_1^k w punktach Y_1^k podziału konturów przewodu \mathcal{C}^k oraz przybliżenie operatora (3.6) dane wzorem (3.12), otrzymuje się zgodnie ze wzorem (3.4) następujące przybliżenie potencjału $V(X)$ w dowolnym punkcie X rozpatrywanego układu:

$$V(X) = \frac{1}{2\varepsilon_0} \sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{M_k} C(Y_{i-1}^k, Y_i^k, Y_{i+1}^k, Y_j^1) \sigma_1^k \quad (3.16)$$

W ten sposób otrzymano przybliżone rozwiązanie problemu Dirichleta dla dwuwymiarowego równania Laplace'a w układzie przewodów ekranowanych. Rozwiązanie to można wykorzystać do badania rozkładu natężenia pola elektrycznego w układzie przewodów ekranowanych, wyrażonym jako:

$$E(X) = -\text{grad } V(X). \quad (3.17)$$

Znajomość gęstości powierzchniowych ładunków σ_1^k jest równoważna znajomości natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów ($E_{n1}^k = \sigma_1^k / \varepsilon_0$). Jest to istotne ze względu na poszukiwanie maksymalnych wartości natężenia pola z bezpośredniego rozwiązania układu równań algebraicznych (3.15), bez konieczności korzystania ze wzorów (3.16) i (3.17).

3.1.3. Opis użytkowania programu PRZEWEK_3

Na podstawie algorytmu skonstruowanego w podrozdz.3.1.2 opracowano i uruchomiono program PRZEWEK_3, służący do modelowania dwuwymiarowego pola elektrycznego w układzie przewodów ekranowanych. Program PRZEWEK_3 dany jest w postaci tekstu źródłowego w języku Turbo Pascal (v. 6.0) oraz w postaci wynikowej, wymagającej współpracy z koprocesorem (ze względu na dużą

złożoność obliczeń). Program wymaga minimum 512 kB pamięci operacyjnej i może współpracować z kartą graficzną CGA, HERCULES, EGA lub VGA.

Program uruchamiany jest z poziomu systemu operacyjnego przez podanie nazwy PRZEWEK_3. Po załadowaniu pojawia się strona tytułowa programu, a po naciśnięciu dowolnego klawisza - okno danych (rys.3.3) dla walcowego układu przewodów ekranowanych. Znajdują się w nim dane: promienie przewodów i ekranu, wartości skuteczne napięć międzyprzewodowych i względem ekranu oraz liczności punktów podziału konturu przewodów N_1 , N_2 , N_3 i ekranu N_4 . W celu zmiany danych wpisuje się żadaną wartość w miejscu podświetlonym (wskazanym przez kursor). Po naciśnięciu klawisza <ESC> przywracana jest poprzednia wartość danej.

Program umożliwia modelowanie pola elektrycznego układu przewodów ekranowanych o dowolnych kształtach, poprzez podanie współrzędnych punktów podziału przewodu za pośrednictwem klawiatury. W tym celu należy podświetlić napis TAK za pośrednictwem kursora i nacisnąć klawisz <Enter> (<Return>). W dolnej części okna (rys.3.4) pojawi się wtedy tablica, do której należy wprowadzić współrzędne punktów. Zmianę numeru przewodu uzyskuje się poprzez naciśnięcie klawisza <TAB> lub <Shift> <TAB>¹⁾.

Pod oknem danych znajduje się następujące menu, wywoływane klawiszami funkcyjnymi:

- F1 (Pomoc) - pomoc dla użytkownika (rys.3.5 i rys.3.6);
- F2 (Pisz) - zapis na dysk danych do pliku o nazwie określonej przez użytkownika i rozszerzeniu charakterystycznym dla programu, tj. *.P3D;
- F3 (Czytaj) - wczytanie z dysku danych, zapisanych w pliku o nazwie podanej przez użytkownika i rozszerzeniu charakterystycznym dla programu j.w.;
- F4 (Druk) - wydruk danych na drukarce;
- F5 (Obliczenia) - rozpoczęcie obliczeń;
- F10 (Powrót) - powrót do głównego menu.

Po wykonaniu obliczeń pojawia się menu, umożliwiające wybór dalszej pracy - poprzez odpowiednie klawisze i potwierdzenie klawiszem <Enter> (<Return>) (rys.3.7). W przypadku współpracy z dyskiem (opcje F2 i F3) naciśnięcie klawisza <Esc> powoduje wyjście z danej opcji.

¹⁾ W tym przypadku nie będzie realizowany wykres linii sił pola.

Po wykonaniu obliczeń wybiera się jedną z opcji (rys.3.7):

- a) wydruk wartości E_n , tj. natężenia pola na powierzchni przewodów;
- b) wykres natężenia pola na powierzchni przewodów ¹⁾,
- c) wykres linii sił pola ²⁾,
- d) powrót (wybranie tej opcji powoduje przejście do okna danych).

W celu umożliwienia przeglądu wykresów zapisanych na dysku do programu PRZEWEK_3 dołączono program RYSLIN - uruchamiany z poziomu systemu operacyjnego. Po uruchomieniu tego programu pojawia się okno, w którym wybiera się katalog, gdzie należy poszukiwać zbiorów dotyczących wykresów linii sił pola (rys.3.8) i nacisnąć klawisz <Enter>. Po przejściu do właściwego katalogu pojawia się kolejne okno (rys.3.9), w którym klawiszami kursorów można wybierać odpowiednie zbiory dotyczące linii sił pola z odpowiednimi rozszerzeniami.

1) Na wykresie zaznaczono:

- linią cienką ciągłą - natężenie pola na przewodzie 1,
- linią cienką przerywaną - natężenie pola na przewodzie 2,
- linią grubą ciągłą - natężenie pola na przewodzie 3.

2) Ze względu na długi czas wykonywania obliczeń przewidziano możliwość zapisu linii sił pola do pliku o nazwie podanej przez użytkownika i rozszerzeniu charakterystycznym dla programu i karty graficznej (np. *.P3H - dla karty HERCULES; *.P3E - dla karty EGA). W przypadku współpracy z dyskiem, program nie wymaga dodatkowej obsługi przez użytkownika. Ilość wykresów w okresie $T = 20$ ms podaje użytkownik.

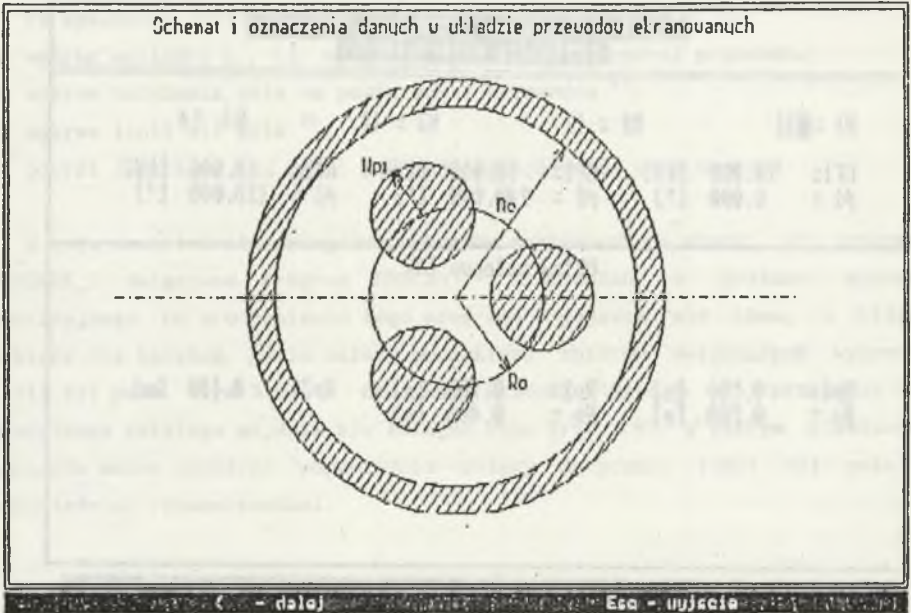
Rozkład pola elektrycznego w układzie przewodów ekranowanych			
$N1 = 12$	$N2 = 12$	$N3 = 12$	$N4 = 24$
$Uf1 = 10.000$ [kV]	$Uf2 = 10.000$ [kV]	$Uf3 = 10.000$ [kV]	
$\phi1 = 0.000$ [°]	$\phi2 = 240.000$ [°]	$\phi3 = 120.000$ [°]	
Układ walcowy TAK			
$Rp1 = 0.100$ [m]	$Rp2 = 0.100$ [m]	$Rp3 = 0.100$ [m]	
$Ro = 0.200$ [m]	$Re = 0.400$ [m]		
F1-Pomoc F2-Pisz F3-Czytaj F4-Drukuj F5-Obliczenia F10-Powrot			

Rys. 3. 3.

Rozkład pola elektrycznego w układzie przewodów ekranowanych			
$N1 = 12$	$N2 = 12$	$N3 = 12$	$N4 = 24$
$Uf1 = 10.000$ [kV]	$Uf2 = 10.000$ [kV]	$Uf3 = 10.000$ [kV]	
$\phi1 = 0.000$ [°]	$\phi2 = 240.000$ [°]	$\phi3 = 120.000$ [°]	
Układ walcowy III			
Współrzędne punktów podziału przewodu numer 1			
$Xc1, 1] = 0.000$		$Yc1, 1] = 0.000$	
$Xc1, 2] = 0.000$		$Yc1, 2] = 0.000$	
$Xc1, 3] = 0.000$		$Yc1, 3] = 0.000$	
$Xc1, 4] = 0.000$		$Yc1, 4] = 0.000$	
$Xc1, 5] = 0.000$		$Yc1, 5] = 0.000$	
$Xc1, 6] = 0.000$		$Yc1, 6] = 0.000$	
$Xc1, 7] = 0.000$		$Yc1, 7] = 0.000$	
F1-Pomoc F2-Pisz F3-Czytaj F4-Drukuj F5-Obliczenia F10-Powrot			

Rys. 3. 4.

Schemat i oznaczenia danych u układzie przewodów ekranowanych



Rys. 3. 5.

OZNACZENIA DANYCH

- r_{pi} - promień przewodu roboczego ($i=1,2,3$)
- r_e - promień wewnętrznej powierzchni ekranu
- r_o - promień położenia osi przewodów walcowych
- $U_{\phi i}$ - napięcie fazowe przewodu względem ziemi ($i=1,2,3$)
- ϕ_i - faza napięcia ($i=1,2,3$)
- N_i - ilość punktów podziału przewodu ($i=1,2,3,4$)
- x, y - współrzędne punktów konturowych

← poprzednia strona ESC = powrót

Rys. 3. 6.

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej

ROZKŁAD POLA ELEKTRYCZNEGO
W UKŁADZIE PRZECHODÓW EKRANOWANYCH

Nateżenie pola na powierzchni przewodów - wydruk
Nateżenie pola na powierzchni przewodów - wykres
Linie sił pola - wykres
Powrót

Autorzy: Bernard Baron
Adam Gawłowski
Sławomir Paulikowski

Gliwice 1989

Rys. 3. 7.

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej

PRZEGLĄDANIE LINII SIŁ POLA

Bieżący katalog: C:\TURB055\TOREKRAN\PRZEWEK
Wpisz katalog:

Autorzy: Bernard Baron
Adam Gawłowski
Sławomir Paulikowski

Gliwice 1989

Rys. 3. 8.

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej

PRZEGLĄDANIE LINII SIŁ POLA



Autorzy: Bernard Baron
Adam Gawłowski
Sławomir Pawlikowski

Gliwice 1989

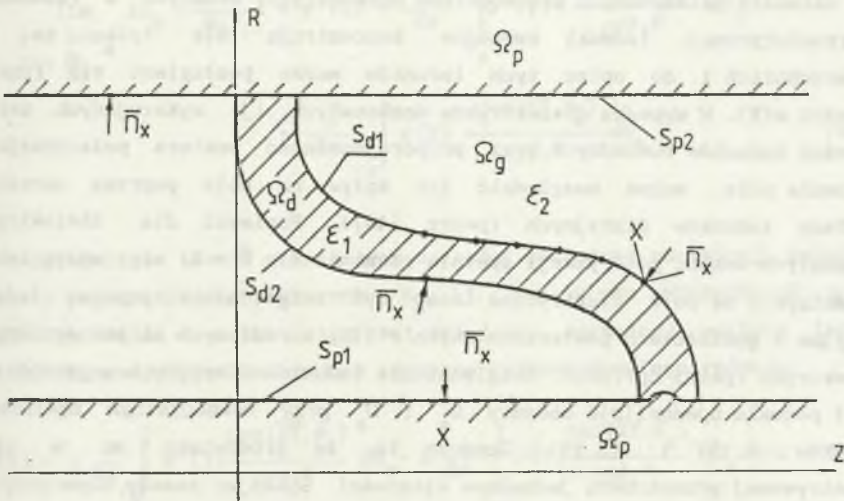
+++ - wybór ← - potwierdzenie Esc - wyjście

Rys. 3. 9.

3.2. Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w obszarach oddziaływania izolatorów o symetrii obrotowej

3.2.1. Sformułowanie układu równań całkowych drugiego rodzaju

Dany jest dowolny ekranowany układ elektroizolacyjny o symetrii obrotowej (rys.3.10). Symbolami S_{d1} i S_{d2} oznacza się powierzchnie izolatora wykonanego z dielektryku idealnego o przenikalności elektrycznej względnej ϵ_1 , natomiast symbolem S_p - powierzchnie przewodzące toru prądowego i ekranu. Przestrzeń między ekranem a torem prądowym jest wypełniona gazem doskonałym o przenikalności elektrycznej względnej ϵ_2 .



Rys.3.10. Ekranowany układ elektroizolacyjny o symetrii obrotowej
 Fig.3.10. A shielded insulating system indicated rotary symmetry

Potencjał elektryczny $V(X)$ wewnątrz obszarów Ω_g i Ω_d spełnia równanie Laplace'a z warunkami ciągłości na powierzchniach S_d styku dielektryków:

$$\lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S_d \\ x' \in \Omega_d}} V(X') = \lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S_p \\ x' \in \Omega_g}} V(X') \quad S_d = \Omega_g \cap \Omega_d = S_{d1} \cup S_{d2} \quad (3.18)$$

$$\lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S_d \\ x' \in \Omega_d}} \epsilon_1 \frac{dV(X')}{dn_x} = \lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S_d \\ x' \in \Omega_g}} \epsilon_2 \frac{dV(X')}{dn_x} \quad (3.19)$$

oraz warunek ekwipotencjalności na powierzchni przewodzącej:

$$V(X) = V_1 \quad \text{dla } X \in S_{p1} \quad (3.20a)$$

$$V(X) = V_2 \quad \text{dla } X \in S_{p2}$$

Oprócz warunku ekwipotencjalności powierzchni przewodzących (wzór (3.20a)) można również uwzględnić warunek zerowania się pochodnej normalnej potencjału od strony wewnętrznej osłony przewodu:

$$\lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S_p \\ x' \in \Omega_p}} \frac{dV(X')}{dn_x} = 0 \quad (3.20b)$$

W układzie naładowanych przewodników doskonałych, będących w równowadze elektrostatycznej, ładunki swobodne koncentrują się tylko na ich powierzchniach i do opisu tych ładunków można posługiwać się funkcją gęstości $\sigma(Y)$. W wypadku dielektryków doskonałych, tj. wykazujących zerowe gęstości ładunków swobodnych oraz proporcjonalność wektora polaryzacji i natężenia pola, można uwzględnić ich wpływ na pole poprzez określone rozkłady ładunków fikcyjnych (patrz [46]). Ponieważ dla dielektryków doskonałych wektor polaryzacji spełnia równanie $\text{div } \vec{P} = 0$, więc wpływ takich dielektryków na pole elektryczne może być uwzględniony poprzez ładunki fikcyjne o gęstościach powierzchniowych $\sigma'(Y)$, określonych na powierzchni S_d dielektryku (patrz np. [68]). Uwzględnienie ładunków fikcyjnych o gęstościach $\sigma'(Y)$ pozwala ujednoczyć obszary Ω_d i Ω_g przy równoczesnym spełnieniu warunków (3.18) i (3.19). Oznacza to, że środowisko ma w całej rozpatrywanej przestrzeni jednakowe własności. Stosując zasadę superpozycji, prototyp rozwiązania mieszanego zagadnienia brzegowego dla równania Laplace'a poszukuje się w postaci:

$$V(X) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_p} \frac{\sigma(Y)}{|\vec{XY}|} dS_Y + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_d} \frac{\sigma'(Y)}{|\vec{XY}|} dS_Y. \quad (3.21)$$

W konstrukcji wzorów (3.21) powierzchnie całkowania S_p i $S_d = S_{d1} \cup S_{d2}$ są rozłączne, natomiast powierzchnie graniczne dielektryku stałego i przewodników - wspólne ($S_{dp} = \Omega_p \cap \Omega_d$ na rys. 3.10). Nie oznacza to jednak konieczności rozróżniania w modelu obliczeniowym dwóch różnych gęstości ładunków: $\sigma(X)$ i $\kappa(X)$. Dlatego też w dalszych obliczeniach rozważa się wyłącznie jedną gęstość $\sigma(X)$.

Zgodnie z teorią o granicznych wartościach pochodnej normalnej potencjału warstwy pojedynczej na styku obszarów Ω_d i Ω_g , tj. na powierzchni S_d , otrzymuje się (np. [46]):

$$\lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S_d \\ x' \in \Omega_d}} 2\epsilon_0 \frac{dV(X')}{dn_{x'}} = -\kappa(X) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_d} \sigma'(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_x)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y + \frac{1}{2\pi} \int_{S_p} \sigma(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_x)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y. \quad (3.21a)$$

$$\lim_{\substack{X' \rightarrow X \in S_d \\ X' \in \Omega_g}} 2\epsilon_0 \frac{dV(X')}{dn_{X'}} = \sigma'(X) + \frac{1}{2\pi} \int_{S_d} \sigma'(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_X)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y + \\ + \frac{1}{2\pi} \int_{S_p} \sigma(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_X)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y. \quad (3.21b)$$

Uwzględniając teorię granicznych wartości pochodnej normalnej potencjału warstwy pojedynczej na powierzchni S_d , tj. na styku obszarów Ω_d i Ω_g , (patrz np. [46]), z warunku ciągłości składowej normalnej wektora indukcji (3.19) otrzymuje się następujące równanie całkowe drugiego rodzaju:

$$\sigma'(X) - \lambda \frac{1}{2\pi} \int_{S_d} \sigma'(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_X)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y - \lambda \frac{1}{2\pi} \int_{S_p} \sigma(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_X)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y = 0 \quad (3.22)$$

$$\text{dla } X \in S_d, \text{ gdzie: } \lambda = (\epsilon_1 - \epsilon_2)/(\epsilon_1 + \epsilon_2). \quad (3.22a)$$

Rozpisując warunek ekwipotencjalności (3.20) na powierzchni przewodnika, otrzymuje się z kolei następujące równanie całkowe pierwszego rodzaju:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{S_d} \frac{\sigma'(Y)}{|\vec{XY}|} dS_Y + \frac{1}{2\pi 2} \int_{S_{p_k}} \frac{\sigma(Y)}{|\vec{XY}|} dS_Y = 2 \epsilon_0 V_k \quad (3.23)$$

$$\text{dla } k = 1, 2; \quad X \in S_p; \quad S_p = S_{p1} \cup S_{p2}.$$

Otrzymano w ten sposób układ równań całkowych (3.22) i (3.23), odpowiednio II i I rodzaju, ze względu na niewiadome gęstości $\sigma'(Y)$ i $\sigma(Y)$. Przy rozwiązaniu tego układu występują trudności, związane ze złym uwarunkowaniem równania (3.23) (patrz [2], [3], [15]). Do pokonania tych trudności zastosowano metodę regularyzacji (patrz np. [15]), polegającą na sprowadzeniu równania (3.23) do równania całkowego drugiego rodzaju. Wykorzystano w tym celu warunek (3.20b). Zgodnie z teorią o granicznych wartościach pochodnej normalnej potencjału (3.21) na powierzchni przewodzącej S_p (od strony wewnętrznej obszaru Ω_p), uzyskuje się w ten sposób równanie:

$$\lim_{\substack{x' \rightarrow x \in S \\ x' \in \Omega_d}} -2\varepsilon_0 \frac{dV(X')}{dn_{x'}} = \sigma(X) - \frac{1}{2\pi} \int_{S_p} \sigma(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_x)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y - \\ - \frac{1}{2\pi} \int_{S_d} \sigma'(Y) \frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_x)}{|\vec{XY}|^2} dS_Y = 0$$

dla $X \in S_p$ (3.21a)

Mnożąc równanie (3.23) przez parametr $\alpha > 0$ i dodając go stronami do równania (3.23a), otrzymuje się następujące równanie całkowe drugiego rodzaju:

$$\sigma(X) - \frac{1}{2\pi} \int_{S_p} \sigma(Y) \left[\frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_x)}{|\vec{XY}|^2} - \frac{\alpha}{|\vec{XY}|} \right] dS_Y - \\ - \frac{1}{2\pi} \int_{S_d} \sigma'(Y) \left[\frac{\cos(\vec{XY}, \vec{n}_x)}{|\vec{XY}|^2} - \frac{\alpha}{|\vec{XY}|} \right] dS_Y = 2\alpha \varepsilon_0 V_k$$

(3.24)

dla $X \in S_{p_k}$; $k=1,2$; $S_p = S_{p_1} \cup S_{p_2}$; $S_d = S_{d_1} \cup S_{d_2}$.

Układ równań (3.22) i (3.24) stanowi układ zupełny równań całkowych Fredholma drugiego rodzaju. W książce [70] wykazano, że posiada on jednoznaczne rozwiązanie. Dobór parametru $\alpha > 0$ jest obojętny z punktu widzenia istnienia rozwiązania, ale nie jest obojętny na rozkład liczb charakterystycznych operacji całkowych układu równań. Wpływa to istotnie na zbieżność metody kolejnych przybliżeń, jak również na stabilność rozwiązania algebraicznego układu równań - dyskretyzującego układ równań całkowych (3.22) i (3.24).

3.2.2. Konstrukcja algorytmu obliczeniowego dla izolatorów o symetrii obrotowej

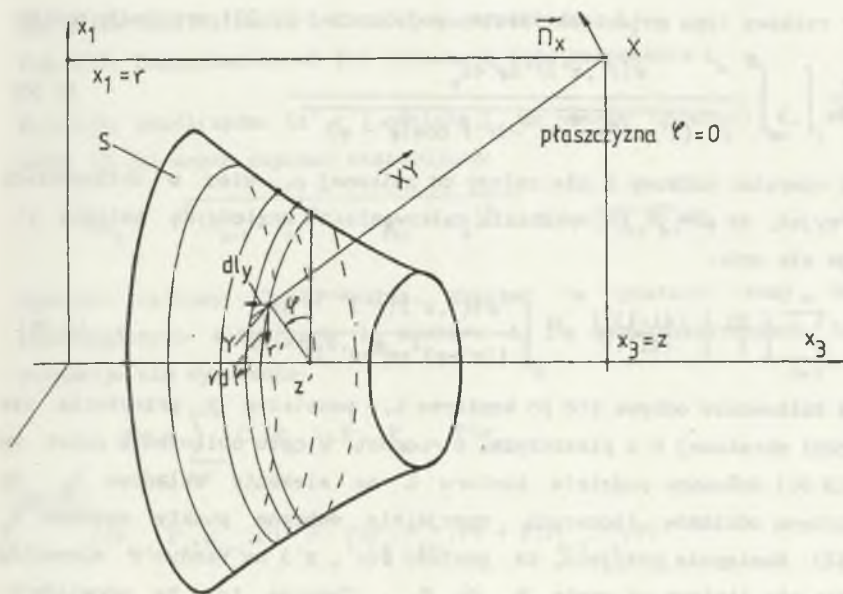
W celu przybliżonego rozwiązania układu równań całkowych (3.22) i (3.24) należy określić operacje przybliżone dla operacji całkowych, występujących w tym układzie. Powyższe operatory całkowe składają się z pochodnej potencjału warstwy pojedynczej (w równaniu (3.22)) oraz ich kombinacji z potencjałem warstwy pojedynczej (w równaniu (3.24)). W dalszej kolejności dokonana będzie aproksymacja potencjału warstwy pojedynczej:

$$V\sigma = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\sigma(Y) dS_Y}{|\overline{XY}|} \quad (3.25)$$

oraz jego pochodnych w kierunku wektora \vec{n}_x , wyrażonych następująco:

$$V_n \sigma = \frac{1}{2\pi} \int_S \sigma(Y) \frac{\cos(\overline{XY}, \vec{n}_x)}{|\overline{XY}|^2} dS_Y \quad (3.26)$$

przy założeniu symetrii obrotowej powierzchni S, na których zadana jest warstwa $\sigma(Y)$.



Rys.3.11. Powierzchnia obrotowa względem osi z

Fig.3.11. A rotary surface towards the z-axis

Rozpatruje się dowolną powierzchnię S, kawałkami gładką, o symetrii obrotowej względem osi z (rys.3.11), na której zadana jest funkcja ciągła gęstości $\sigma(Y)$. W celu zbadania operatorów całkowych typu (3.25) i (3.26) wprowadza się walcowy układ współrzędnych:

$$x_1 = r \cos \varphi ; x_2 = r \sin \varphi ; x_3 = z , \quad (3.27)$$

w którym dowolny punkt $Y \in S$ opisują współrzędne prostokątne:

$$y_1 = r' \cos \varphi' ; y_2 = r' \sin \varphi' ; y_3 = z' . \quad (3.28)$$

Zakłada się również, że funkcja gęstości $\sigma(Y)$ zadana na powierzchni obrotowej S (rys. 3.11) nie zależy od zmiennej φ' , tj. gęstości $\sigma(Y) = \sigma(r', z')$. Zgodnie ze wzorami (3.27) i (3.28) moduł wektora wodzącego między dowolnym punktem X przestrzeni a dowolnym punktem powierzchni obrotowej Y wynosi:

$$|\vec{XY}| = \sqrt{(z' - z)^2 + r^2 + r'^2 - 2r'r \cos(\varphi' - \varphi)} . \quad (3.29)$$

Operator całkowy typu potencjał warstwy pojedynczej (3.25) przyjmuje postać:

$$V\sigma = \frac{1}{2\pi} \int_1^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sigma(r', z') r' d\varphi' dl_Y}{\sqrt{(z' - z)^2 + r^2 + r'^2 - 2r'r \cos(\varphi' - \varphi)}} . \quad (3.30)$$

Ponieważ operator całkowy V nie zależy od zmiennej φ , więc w obliczeniach można przyjąć, że $\varphi = 0$. Po wykonaniu całkowania ze względu na zmienną φ' otrzymuje się wzór:

$$V\sigma = \sum_{l=0}^{\infty} \binom{2l}{l} \frac{(4l-1)!!}{(4l)!!} r^{2l} \int_L \frac{\sigma(r', z') (r')^{2l+1} dl_Y}{[(z' - z)^2 + r^2 + r'^2]^{2l+1/2}} , \quad (3.31)$$

w którym całkowanie odbywa się po konturze L , powstałym z przecięcia się powierzchni obrotowej S z płaszczyzną $\varphi = \text{const}$. W celu obliczenia całek we wzorze (3.31) dokonano podziału konturu L na elementy składowe L_k , za pośrednictwem odcinków łączących specjalnie dobrane punkty węzłowe P_k (rys. 3.12). Następnie przyjęto, że gęstość $\sigma(r', z')$ na każdym z elementów L_k zmienia się liniowo od węzła P_k do P_{k+1} . Oznacza to, że obowiązuje zależność:

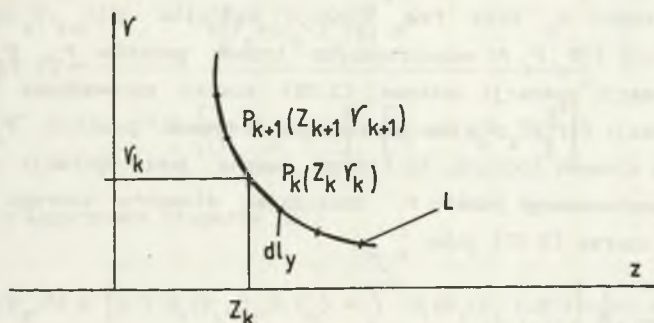
$$\sigma(z', r') = \sigma_k + (\sigma_{k+1} - \sigma_k) \xi \quad (3.32)$$

gdzie:

$$r' = r_k + (r_{k+1} - r_k) \xi; \quad (3.33a)$$

$$z' = z_k + (z_{k+1} - z_k) \xi \quad \text{dla} \quad 0 < \xi < 1, \quad (3.33b)$$

σ_k - zmienna węzłowa odpowiadająca punktowi P_j .



Rys.3.12. Podział konturu L na elementy składowe L_k

Fig.3.12. Segmentation of the contour L into components L_k

Wyrażając współrzędne (z', r') odcinka L_k za pomocą zmiennej ξ , miarę dl_y całki (3.31) można zapisać następująco:

$$dl_y = \sqrt{(z_{k+1} - z_k)^2 + (r_{k+1} - r_k)^2} d\xi = |\vec{P}_{k+1} - \vec{P}_k| d\xi \quad (3.34)$$

Operator całkowy (3.25) można zapisać w postaci sumy całek po poszczególnych elementach L_k konturu L. Po przekształceniach tej sumy otrzymuje się wyrażenie:

$$V\sigma = \sum_k C(P_{k-1}, P_k, P_{k+1}, P)\sigma_k \quad (3.35)$$

gdzie:

$$C(P_{k-1}, P_k, P_{k+1}, P) \stackrel{\text{def}}{=} F(P_k, P_{k+1}, P) + F(P_{k-1}, P_k, P) \quad (3.36)$$

$$F(P_1, P_2, P) = |\vec{P}_1 - \vec{P}_2| \sum_{i=0}^{\infty} \binom{2i}{1} \frac{(4i-1)!!}{4^i (4i)!!} r^{2i} \cdot \int_0^1 \frac{4^i (1-\xi) [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i+1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i+1/2}} \quad (3.37)$$

(z_1, r_1) , (z_2, r_2) , (z, r) - współrzędne punktów P_1 , P_2 i P funkcji F.

Wzór (3.35) daje przybliżenie operacji całkowej (3.25) za pośrednictwem zmiennych węzłowych σ_k oraz tzw. funkcji kształtu $C(P_{k-1}, P_k, P_{k+1}, P)$, złożonej z funkcji $F(P_1, P_2, P)$ współrzędnych trzech punktów P_1, P_2 i P . Problem aproksymacji operacji całkowej (3.25) został sprowadzony więc do konstrukcji funkcji $F(P_1, P_2, P)$ dla współrzędnych trzech punktów: P_1 i P_2 (wyznaczających element konturu, na którym zadana jest operacja całkowa) oraz dowolnie usytuowanego punktu P . Oznaczając elementy szeregu stojące przed całką we wzorze (3.37) jako:

$$G_1 = \sum_{i=0}^{\infty} \binom{2i}{i} \frac{(4i-1)!!}{4^i (4i)!!} \quad \text{oraz} \quad G_0 = 1, \quad (3.38)$$

w procesie obliczeń numerycznych można uwzględnić następującą rekurencję:

$$G_1 = G_{1-1} \frac{(4i-3)(4i-1)}{(4i)^2} \quad (3.39)$$

Ponieważ całki będące elementami szeregu (3.37), w postaci:

$$C_1(P_1, P_2, P) = |\overline{P_1 P_2}| r^{2i} = \int_0^1 \frac{4^i (1-\xi) [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i+1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i+1/2}} \quad (3.40)$$

nie są osobliwe, do ich obliczenia można zastosować numeryczną metodę trapezów. Dążąc do minimalizacji liczby operacji matematycznych należy zauważyć, że funkcja podcałkowa całki (3.40) w postaci:

$$D_1(P_1, P_2, P, \xi) = |\overline{P_1 P_2}| \cdot \frac{4^i (1-\xi) [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i+1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i+1/2}} \quad (3.41)$$

spełnia - ze względu na wskaźniki "i" - następującą rekurencję:

$$D_1(P_1, P_2, P, \xi) = D_{1-1}(P_1, P_2, P, \xi) R(P_1, P_2, P, \xi) \quad (3.42)$$

gdzie:

$$R(P_1, P_2, P, \xi) = \frac{4 \left[r_1 + (r_2 - r_1) \xi \right]^2 r^2}{\left\{ r^2 + \left[r_1 + (r_2 - r_1) \xi \right]^2 + \left[z_1 - z + (z_2 - z_1) \xi \right]^2 \right\}^2} \quad (3.43)$$

Zgodnie z algorytmem trapezów [2]:

$$C_1(P_1, P_2, P) \cong \left[0,5 D_1(P_1, P_2, P, \xi_0) + \sum_{l=1}^{N_x-1} D_1(P_1, P_2, P, \xi_l) \right] \frac{1}{N_x} \quad (3.44)$$

przy czym: $\xi_l = \frac{l}{N_x}$ - punkty podziału przedziału całkowania $[0, 1]$ całki (3.37), dla $l = 0, 1, \dots, N_x$.

W celu określenia pochodnej potencjału warstwy pojedynczej w kierunku wektora jednostkowego \vec{n}_x (wzór (3.26)) zadanej na powierzchni o symetrii obrotowej, przyjmuje się identyczne założenia jak w przypadku wyznaczania potencjału. Dodatkowo zakłada się, że wektor jednostkowy \vec{n}_x jest normalny do powierzchni obrotowej względem osi x_3 (rys. 3.11).

W walcowym układzie współrzędnych (z, r, φ) składowa n_φ wektora normalnego do powierzchni obrotowej jest zerowa ($n_\varphi = 0$). W rozpatrywanym przypadku związku między składowymi wektora jednostkowego normalnego do powierzchni obrotowej w walcowym i prostokątnym układzie współrzędnych mają postać następującą:

$$n_z = n_{x_3}; \quad n_r = n_{x_1} \cos \varphi + n_{x_3} \sin \varphi; \quad n_\varphi = -n_{x_1} \sin \varphi + n_{x_2} \cos \varphi = 0 \quad (3.45)$$

$$n_{x_3} = n_z; \quad n_{x_1} = n_r \cos \varphi; \quad n_{x_2} = n_r \sin \varphi \quad (3.46)$$

Uwzględniając wzory (3.27), (3.28), (3.29), (3.45) i (3.46), można dokonać następującego przekształcenia:

$$\begin{aligned} \cos(\vec{XY}, \vec{n}_x) &= \frac{1}{|\vec{XY}|} \left[(y_1 - x_1) n_{x_1} + (y_2 - x_2) n_{x_2} + (y_3 - x_3) n_{x_3} \right] = \\ &= \frac{[r' \cos(\varphi' - \varphi) - r] n_r + (z' - z) n_z}{\sqrt{(z' - z)^2 + r + r'^2 - 2r'r \cos(\varphi' - \varphi)}} \quad (3.47) \end{aligned}$$

Uwzględniając z kolei wzory (3.29) i (3.47), operator całkowy (3.26) można wyrazić w postaci:

$$V_n \sigma = \frac{1}{2\pi} \int_L \int_{-\pi}^{\pi} \sigma(z', r') \frac{[r' \cos(\varphi' - \varphi) - r] n_r + (z' - z) n_z}{[(z' - z)^2 + r^2 + r'^2 - 2r' r \cos(\varphi' - \varphi)]^{3/2}} r' d\varphi' dL_Y. \quad (3.48)$$

Ze wzoru (3.48) wynika, że operator całkowy (3.26) nie zależy od zmiennej φ , więc w obliczeniach można przyjąć, że $\varphi = 0$. Po wykonaniu całkowania ze względu na φ' otrzymuje się wyrażenie:

$$V_n \sigma = 0,5 n_r(z, r) \sum_{l=1}^{\infty} \binom{2l}{l} \frac{(4l-1)!!}{(4l-2)!!} r^{2l-1} \int_L \frac{\sigma(z', r') r'^{2l+1} dL_Y}{[(z' - z)^2 + r^2 + r'^2]^{2l+1/2}} +$$

$$+ \sum_{l=0}^{\infty} \binom{2l}{l} \frac{(4l+1)!!}{(4l)!!} r^{2l} \int_L \frac{\sigma(z', r') [(z' - z) n_z(z, r) - r n_r(z, r)]}{[(z' - z)^2 + r^2 + r'^2]^{2l+3/2}} \cdot r'^{2l+1} dL_Y, \quad (3.49)$$

w którym całkowanie odbywa się ze względu na współrzędne (z', r') po konturze L powierzchni obrotowej S w płaszczyźnie $\varphi = \text{const}$. Przybliżenia operacji całkowej (3.49) dokonuje się na podstawie wzorów (3.32)-(3.34). Jest ona wykonywana identycznie jak w przypadku operacji (3.31) i ma następującą postać:

$$V_n \sigma \cong \sum_{k=1}^N CN(P_{k-1}, P_k, P_{k+1}, P, n_z, n_r) \sigma_k \quad (3.50)$$

gdzie:

$$CN(P_1, P_2, P_3, P, n_z, n_r) = FN(P_2, P_3, P, n_z, n_r) + FN(P_2, P_1, P, n_z, n_r); \quad (3.51)$$

(z, r) , (z_1, r_1) , (z_2, r_2) - współrzędne punktów P , P_1 i P_2 ;

$$\begin{aligned}
 FN(P_1, P_2, P, n_z, n_r) &= 0,5 |P_1 P_2| n_r \sum_{i=1}^{\infty} \binom{2i}{1} \frac{(4i-1)!!}{(4i-2)!!} \frac{r^{2i-1}}{4^i} \cdot \\
 &\cdot \int_0^1 \frac{4^i (1-\xi) [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i+1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i+1/2}} + \\
 &+ |P_1 P_2| \sum_{i=0}^{\infty} \binom{2i-2}{i-1} \frac{(4i-3)!!}{(4i-4)!!} \frac{r^{2i-2}}{4^i} \cdot \\
 &\cdot \int_0^1 \frac{4^i (1-\xi) [(z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi)n_z - rn_r] [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i-1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i-1/2}}. \quad (3.52)
 \end{aligned}$$

Oznaczając współczynniki szeregów we wzorze (3.52) po prawej stronie całek jako:

$$H_1 = \binom{2i}{1} \frac{(4i-1)!!}{(4i-2)!!} \frac{1}{4^i}; \quad L_1 = \binom{2i-2}{i-1} \frac{(4i-3)!!}{(4i-4)!!} \frac{1}{4^i} \quad i=1, 2, \dots \quad (3.53)$$

w procesie obliczeń numerycznych można zastosować następujące wzory rekurencyjne:

$$H_1 = H_{1-1} \frac{(4i-3)(4i-1)}{4i(4i-4)}; \quad (3.54)$$

$$L_1 = L_{1-1} \frac{(4i-5)(4i-3)}{(4i-4)^2}, \quad i=1, 2, \dots \quad (3.55)$$

Całki, będące elementami szeregu, oznaczone następująco:

$$C_1^{(1)}(P_1, P_2, P, \vec{n}) = 0,5 |\vec{P}_1 \vec{P}_2| n_r r^{2i-1} 4^i \cdot \int_0^1 \frac{(1-\xi) [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i+1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i+1/2}} \quad (3.56)$$

$$C_1^{(2)}(P_1, P_2, P, \vec{n}) = |\vec{P}_1 \vec{P}_2| r^{2i-2} 4^i \cdot \int_0^1 \frac{(1-\xi) [(z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi)n_z - rn_r] [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^{2i-1} d\xi}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{2i-1/2}} \quad (3.57)$$

nie są całkami osobliwymi. Do ich obliczenia można zastosować metodę numeryczną trapezów. Dążąc do minimalizacji liczby operacji matematycznych wykorzystano właściwości, polegające na tym, że funkcje podcałkowe całek (3.56) i (3.57) spełniają - ze względu na wskaźnik "i" - następującą zależność rekurencyjną:

$$D_1^{(1)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) = D_{i-1}^{(1)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) R(P_1, P_2, P, \xi) \quad (3.58)$$

$$D_1^{(2)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) = D_{i-1}^{(2)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) R(P_1, P_2, P, \xi) \quad i=1,2,\dots \quad (3.59)$$

gdzie:

$$D_1^{(1)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) = 4 \cdot 0,5 |\vec{P}_1 \vec{P}_2| n_r r \cdot \frac{(1-\xi) [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^3}{\left\{ r^2 + [r_1 + (r_2 - r_1)\xi]^2 + [z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi]^2 \right\}^{5/2}} \quad (3.60)$$

$$D_1^{(2)}(P_1, P_2, P, n, \xi) = 4 |\vec{P}_1 \vec{P}_2| \cdot *$$

$$(1-\xi) \left[(z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi)n_z - rn_r \right] \left[r_1 + (r_2 - r_1)\xi \right] \quad (3.61)$$

$$\left\{ r^2 + \left[r_1 + (r_2 - r_1)\xi \right]^2 + \left[z_1 - z + (z_2 - z_1)\xi \right]^2 \right\}^{3/2}$$

natomiast $R(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi)$ wyraża się wzorem (3.43). Zgodnie z algorytmem trapezów:

$$C_1^k(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) \cong \left[0,5 D_1^{(k)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi) + \sum_{l=1}^{N_x-1} D_1^{(k)}(P_1, P_2, P, \vec{n}, \xi_l) \right] \frac{1}{N_x} \quad (3.62)$$

gdzie $\xi_l = \frac{l}{N_x}$ - punkty podziału przedziału całkowania $[0,1]$
całek (3.56) i (3.57),

$$l = 0, 1, \dots, N_x.$$

W realizacji numerycznej operatora całkowego (3.26) główną rolę odgrywa funkcja $FN(P_1, P_2, P, n_z, n_r)$. Pozwala ona bowiem, zgodnie ze wzorami (3.50) i (3.51), otrzymać przybliżenie tego operatora całkowego.

3.2.3. Algebraizacja równań całkowo-brzegowych dla izolatora dyskowego

Do badania pola elektrycznego izolatora dyskowego o symetrii obrotowej stosowany jest algorytm zbudowany w podrozdz. 3.2.2 na podstawie metody równań całkowych. Dla zadanych promieni toru prądowego przewodu $r_1 = R_1$ i ekranu $r_2 = R_2$ kształt izolatora dyskowego wyznacza się przez podanie jego szerokości $a = A_2$ na styku z ekranem oraz promienia krzywizny $r_{01} = R_{01}$ (rys.3.13). Ponadto wprowadza się w modelu promienie wypustów sterujących $r_{02} = R_{02}$, $r_{03} = R_{03}$ na styku przewodu z dielektrykiem oraz $r_{04} = R_{04}$ i $r_{05} = R_{05}$ - poza dielektrykiem na powierzchni przewodu. Do analitycznego zapisu powierzchni obrotowej izolatora oraz elementów przewodzących przewodu niezbędne są współrzędne położenia środków okręgów, odpowiadających krzywiznom o promieniach od r_{p1} do r_{p6} . W układzie współrzędnych takim jak na rys.3.13 wyrażają się one następująco:

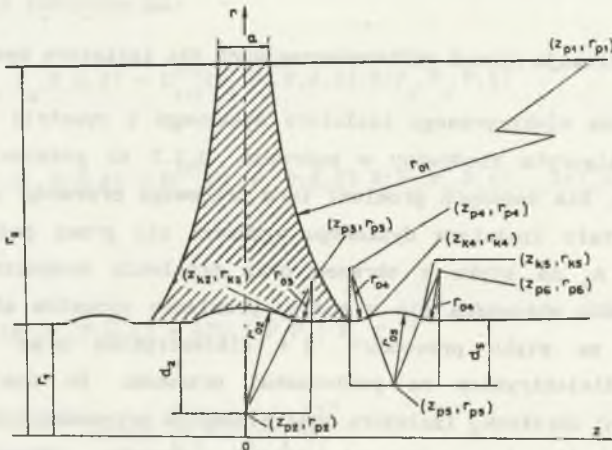
$$\left. \begin{aligned}
 z_{P1} &= a/2 + r_{01} & , r_{P1} &= r_2 \\
 z_{P2} &= 0 & , r_{P2} &= r_1 - d_2 \\
 z_{P3} &= \sqrt{(r_{02} + r_{03})^2 - (r_{03} + d_2)^2} & , r_{P3} &= r_1 + r_{03} \\
 z_{P4} &= z_{P1} - \sqrt{(r_{01})^2 - (r_2 - r_1)^2} & , r_{P4} &= r_1 + r_{04} \\
 z_{P5} &= z_{P4} + \sqrt{(r_{04} + r_{05})^2 - (r_{04} + d_5)^2} & , r_{P5} &= r_1 - d_5 \\
 z_{P6} &= z_{P4} + 2(z_{P5} - z_{P4}) & , r_{P6} &= r_{P4}
 \end{aligned} \right\} (3.63)$$

Ponadto, niezbędne są współrzędne zszycia łuków okręgów r_{02} , r_{03} , r_{04} i r_{05} z odcinkami prostych. Zgodnie z oznaczeniami na rys.3.13 wynoszą one:

$$\left. \begin{aligned}
 z_{k2} &= z_{P3} r_{02} / (r_{02} + r_{03}), & r_{k2} &= r_1 - d_2 + r_{02} (r_{03} + d_2) / (r_{02} + r_{03}) \\
 z_{k4} &= z_{P5} + r_{04} (z_{P5} - z_{P4}) / (r_{04} + r_{05}), & r_{k4} &= r_{P4} - r_{04} (r_{04} + d_5) / (r_{04} + r_{05}) \\
 z_{k5} &= z_{P4} - r_{04} (z_{P5} - z_{P4}) / (r_{04} + r_{05}), & r_{k5} &= r_{k4}
 \end{aligned} \right\} (3.64)$$

Analityczny zapis powierzchni dielektryku ze względu na zmienną "r" ma postać:

$$f_1(r) = z_{P1} - \sqrt{(r_{01})^2 - (r - r_{P1})^2}, \quad r_1 < r < r_2 \quad (3.65)$$



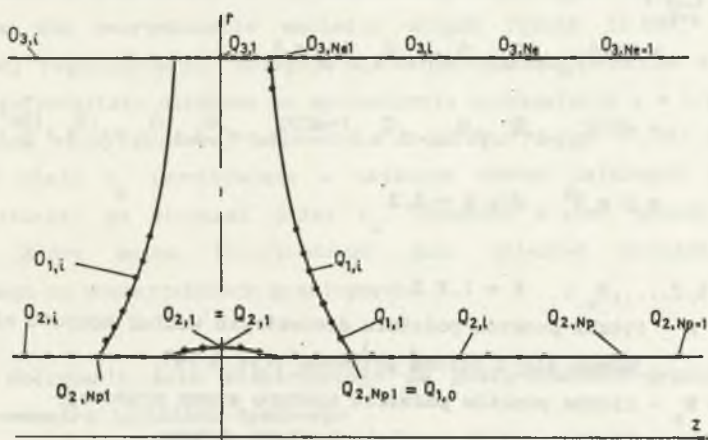
Rys.3.13. Szkic wymiarowy izolatora dyskowego o symetrii obrotowej

Fig.3.13. Dimensional sketch of a disc-type spacer indicated rotary symmetry

Jeśli powierzchnia przewodu ma wypust sterujący na styku z dielektrykiem oraz poza nim (patrz rys.3.13), analityczny zapis powierzchni przewodu ze względu na zmienną "z" ma postać:

$$f_2(z) = \begin{cases} r_{P2} + \sqrt{(r_{O2})^2 - z^2} & , \quad 0 < z < z_{k2} \\ r_{P3} - \sqrt{(r_{O3})^2 - (z - z_{P3})^2} & , \quad z_{k2} < z < z_{P3} \\ r_1 & , \quad z_{P3} < z < z_{P4} \\ r_{P4} - \sqrt{(r_{O4})^2 - (z - z_{P4})^2} & , \quad z_{P4} < z < z_{k4} \\ r_{P5} + \sqrt{(r_{O5})^2 - (z - z_{P5})^2} & , \quad z_{k4} < z < z_{k5} \\ r_{P6} - \sqrt{(r_{O6})^2 - (z - z_{P6})^2} & , \quad z_{k6} < z < z_{P6} \\ r_1 & , \quad z > z_{P6} \end{cases} \quad (3.66)$$

Do algebraizacji równań całkowych (3.22) i (3.24), opisujących pole izolatora dyskowego, stosuje się przybliżenie (3.35) i (3.50) odpowiednich operatorów całkowych występujących w tych równaniach. Polega ona na rozpisaniu równań całkowych w wybranych punktach Q_{k1} i O_{k1} konturów dielektryku oraz szyny prądowej i ekranu (rys.3.7).



Rys.3.14. Punkty podziału konturów dielektryku i elementów przewodzących przewodu szynowego

Fig.3.14. Division points of contours of dielectric and conductive elements of a solid conductor

Uwzględniając ponadto symetrię układu ze względu na zmienną z, tj.

$$\sigma_1^k = \sigma(Q_{k1}) = \sigma(Q_{k1}) , \quad (3.67)$$

otrzymuje się następujący algebraiczny układ równań, ze względu na zmienne węzłowe σ_1^k :

$$\begin{aligned} \sigma_1^k - \lambda \left[\text{CN}(Q_{2,N_{p1}}, Q_{1,1}, Q_{1,2}, Q_{k,1}, n_z, n_r) + \text{CN}(O_{1,N_{p1}}, O_{1,1}, O_{1,2}, O_{k,1}, n_z, n_r) \right] \sigma_1^k - \\ - \lambda \text{CN}(O_{2,2}, O_{2,1}, O_{2,2}, Q_{k,1}, n_z, n_r) \sigma_1^2 - \lambda \text{CN}(O_{3,2}, O_{3,1}, O_{3,2}, Q_{k,1}, n_z, n_r) \sigma_1^3 - \\ - \lambda \sum_{i=1}^3 \sum_{j=2}^{N_1} \left[\text{CN}(Q_{1,j-1}, Q_{1,j}, Q_{1,j+1}, Q_{k,1}, n_z, n_r) \right] \sigma_j^1 = 0 \quad \text{dla } k=1 \end{aligned} \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1^k - \left[\text{CN}(Q_{2,N_{p1}}, Q_{1,1}, Q_{1,2}, Q_{k,1}, n_z, n_r) + \text{CN}(O_{2,N_{p1}}, O_{1,1}, O_{1,2}, O_{k,1}, n_z, n_r) \right] - \\ - \alpha \text{C}(Q_{2,N_{p1}}, Q_{1,1}, Q_{1,2}, Q_{k,1}) - \alpha \text{N}(O_{2,N_{p1}}, O_{1,1}, O_{1,2}, O_{k,1}) \sigma_1^1 - \\ - \left[\text{CN}(O_{2,2}, O_{2,1}, O_{2,2}, Q_{k,1}, n_z, n_r) - \alpha \text{C}(O_{2,2}, O_{2,1}, O_{2,2}, Q_{k,1}) \right] \sigma_1^2 - \\ - \left[\text{CN}(O_{3,2}, O_{3,1}, O_{3,2}, Q_{k,1}, n_z, n_r) - \alpha \text{C}(O_{3,2}, O_{3,1}, O_{3,2}, Q_{k,1}) \right] \sigma_1^3 - \\ - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=2}^{N_1} \left[\text{CN}(Q_{1,j-1}, Q_{1,j}, Q_{1,j+1}, Q_{k,1}, n_z, n_r) + \right. \\ \left. + \text{CN}(O_{1,j-1}, O_{1,j}, O_{1,j+1}, Q_{k,1}, n_z, n_r) \right] - \\ - \alpha \text{C}(Q_{1,j-1}, Q_{1,j}, Q_{1,j+1}, Q_{k,1}) + \alpha \text{C}(O_{1,j-1}, O_{1,j}, O_{1,j+1}, Q_{k,1}) \sigma_j^1 = \\ = 2 \alpha V_1^k \quad \text{dla } k = 2, 3 \end{aligned} \quad (3.69)$$

gdzie:

$$i = 1, 2, \dots, N_k ; \quad k = 1, 2, 3$$

$N_1 = N$ - liczba punktów podziału dielektryku wzdłuż konturu nie stykającego się z osłoną przewodu (rys.3.14);

$N_2 = N_p$ - liczba punktów podziału konturu szyny prądowej;

$N_3 = N_e$ - liczba punktów podziału konturu ekranu;

N_{p1} - liczba punktów podziału konturu osłony na styku z dielektrykiem;

$$V_1^k = \begin{cases} 0 & \text{dla } k=3, \\ V_b & \text{dla } k=2; \end{cases}$$

$n_z = n_z(Q_{k,1})$, $n_r = n_r(Q_{k,1})$ - składowe wektorów jednostkowych normalnych do powierzchni granicznych,

$\alpha = 1/r_1$ - krzywizna szyny prądowej przewodu.

Oznaczając elementy macierzy układu równań (3.68) i (3.69) przez a_{mn} , zmienne gęstości ładunku przez:

$$x_n = \sigma_1^k \quad \text{gdzie} \quad n = 1 + \sum_{l=1}^{k-1} N_l, \quad (3.70)$$

a wyrazy wolne przez:

$$b_n = \begin{cases} 0 & \text{dla } n = 1, \dots, N \\ V_b & n = N+1, \dots, N+N_p \\ 0 & n = N+N_p+1, \dots, N+N_p+N_e \end{cases} \quad (3.71)$$

powyższy układ równań można zapisać w postaci:

$$\sum_{n=1}^{N+N_p+N_e} a_{mn} x_n = b_m \quad (3.72)$$

Do rozwiązania układu równań (3.72) zastosowano metodę eliminacji Gaussa. Ze względu na złe uwarunkowanie macierzy układu równań (3.69), dokonano specyficznej regularyzacji, polegającej na odpowiednim doborze stałej α . Zadawalające rezultaty uzyskano po wprowadzeniu podstawienia $\alpha = 1/r_1$ (gdzie r_1 - promień szyny prądowej przewodu). Z układu równań (3.68) i (3.69) wyrugowano stałą ϵ_0 (występującą w układzie równań całkowych (3.22) i (3.24)), dzieląc go stronami przez ϵ_0 . Uzyskano w ten sposób zmienne $\sigma_1^k = \sigma_1^k / \epsilon_0$, które można interpretować jako składowe natężenia pola elektrycznego na powierzchniach granicznych.

3.2.4. Obliczanie pola elektrycznego na powierzchniach granicznych i wewnątrz izolatora dyskowego

Natężenie pola elektrycznego na powierzchniach przewodzących wyznacza się bezpośrednio z rozwiązania układu równań algebraicznych (3.72), jako gęstości powierzchniowe ładunku, ponieważ:

$$E_1^k = \sigma_1^k = x_n \quad (3.73)$$

gdzie: $n = i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l$

$$k = 2, 3, \quad i = 1, 2, \dots, N_k.$$

Jest ono wyznaczane w punktach $Q_{k,1}$ podziału powierzchni, dla których obowiązuje równanie całkowe (3.24) i układ równań (3.69).

Zgodnie z teorią granicznych wartości pochodnej normalnej potencjału warstwy pojedynczej (patrz wzory (3.21 a i b)), znając macierz a_{ij} i rozwiązania x_j układu równań (3.72), można wyznaczyć składowe normalne wektora natężenia pola elektrycznego:

- od strony wewnętrznej dielektryku:

$$E_{w,i}^k = \frac{1}{2} \left[-x_i + \sum_{j=1}^{N+N_p+N_e} \frac{1}{\lambda} (e_{ij} - a_{ij}) x_j \right] \quad (3.74)$$

- od strony zewnętrznej dielektryku:

$$E_{z,i}^k = \frac{1}{2} \left[x_i + \sum_{j=1}^{N+N_p+N_e} \frac{1}{\lambda} (e_{ij} - a_{ij}) x_j \right] \quad (3.75)$$

gdzie: $i = 1, 2, \dots, N,$

$$e_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i=j, \\ 0 & \text{dla } i \neq j, \end{cases}$$

$$\lambda = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + \epsilon_2) - \text{patrz wzór (3.22).}$$

Powyzsze zależności dotyczą punktów $Q_{1,1}$ podziału konturu dielektryku, dla których obowiązuje równanie całkowe (3.22) oraz równanie (3.68).

Znajomość gęstości $\sigma_1^k = x_n$ dla $k=1, 2, 3, \quad i=1, 2, \dots, N_k$ i $n=i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l$ jako rozwiązania układu równań (3.72) oraz wzorów (3.35) i (3.50), aproksymujących operatory całkowe (3.25) i (3.26), pozwala wyznaczyć potencjał i składowe natężenia pola elektrycznego w dowolnym kierunku. Korzysta się w tym celu z wektora jednostkowego (s_z, s_r) , znajdującego się w dowolnym punkcie $P(z, r)$ wewnątrz rozpatrywanego obszaru izolatora.

Potencjał w dowolnym punkcie $P(z, r)$ wyraża się wzorem:

$$\begin{aligned}
 V(P) = & \frac{1}{2} \left[C(Q_{2,N_{p1}}, Q_{1,1}, Q_{1,2}, P) + C(Q_{2,N_{p1}}, Q_{1,1}, Q_{1,2}, P) X_1 + \right. \\
 & + \frac{1}{2} C(O_{2,2}, Q_{2,1}, Q_{2,2}, P) X_{N+1} + \frac{1}{2} C(O_{3,2}, Q_{3,1}, Q_{3,2}, P) X_{N+N_p+1} + \\
 & \left. + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \sum_{l=2}^{N_l} \left[C(Q_{k,l-1}, Q_{k,l}, Q_{k,l+1}, P) + C(O_{k,l-1}, Q_{k,l}, Q_{k,l+1}, P) X_j \right] \right. \quad (3.76)
 \end{aligned}$$

przy czym $j = i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l$, (3.77)

gdzie:

$C(\cdot)$ - funkcja kształtu opisana wzorem (3.76),

$Q_{k,l}, O_{k,l}$ - punkty podziału konturów elementów przewodzących i dielektryku.

Składowa natężenia pola elektrycznego w dowolnym punkcie $P(z, r)$ oraz w dowolnym kierunku, wyznaczonym przez wektor jednostkowy $s = \left\{ s_z(P), s_r(P) \right\}$,

wyraża się wzorem:

$$\begin{aligned}
 E_s(P) = & \frac{1}{2} \left[CN(Q_{2,N_{p1}}, Q_{1,1}, Q_{1,2}, P, s_z, s_r) + \right. \\
 & + CN(O_{2,N_{p1}}, O_{1,1}, O_{1,2}, P, s_z, s_r) X_1 + \\
 & + \frac{1}{2} CN(O_{2,2}, Q_{2,1}, Q_{2,2}, P, s_z, s_r) X_{N+1} + \\
 & + \frac{1}{2} CN(O_{3,2}, Q_{3,1}, Q_{3,2}, P, s_z, s_r) X_{N+N_p+1} + \\
 & \left. + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \sum_{j=2}^{N_l} \left[CN(Q_{k,l-1}, Q_{k,l}, Q_{k,l+1}, P, s_z, s_r) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + CN(O_{k,l-1}, O_{k,l}, O_{k,l+1}, P, s_z, s_r) \right] X_j \right] \quad (3.78)
 \end{aligned}$$

gdzie: $CN(\cdot)$ - funkcja kształtu opisana wzorem (3.51).

Wzory (3.76) i (3.38) można wykorzystać do badania rozkładów pola elektrycznego w obszarze izolatora dyskowego.

3.2.5. Opis użytkowania programu IZO_DYSK

Na podstawie algorytmu skonstruowanego w podrozdz.3.2.3 opracowano i uruchomiono program IZO_DYSK, służący do modelowania dwuwymiarowego pola elektrycznego izolatora dyskowego. Program ten jest dany w postaci tekstu źródłowego w języku Turbo Pascal (v. 5.5). Ze względu na dużą złożoność obliczeń wymaga on 640 kB pamięci operacyjnej i współpracy z koprocesorem. Program może współpracować z kartą graficzną CGA, HERCULES lub EGA.

Program uruchamiany jest z poziomu systemu operacyjnego przez podanie nazwy IZO_DYSK. Po załadowaniu pojawia się strona tytułowa programu. Po naciśnięciu dowolnego klawisza pojawia się okno danych (rys.3.15) dla izolatora dyskowego (por. z rys.3.13 i 3.14), wywołane klawiszem funkcyjnym F1. W oknie danych znajdują się przykładowe dane: promień przewodu R_1 i ekranu R_2 , grubość ścianki izolatora A przy powierzchni ekranu, promień krzywizny izolatora R_{01} , promienie wypustów sterujących R_{02} i R_{03} , położenie D_2 środka łuku R_{02} (rys.3.17), napięcia fazowe przewodu V , przenikalność elektryczna względna materiału izolatorowego $Eps1$ i gazu $Eps2$, liczba punktów podziału powierzchni dielektryku na N elementów, liczba punktów podziału powierzchni przewodu na N elementów ($Np1$ na styku przewód - dielektryk; $Np2$ na styku przewód - gaz), liczba punktów podziału powierzchni ekranu Ne ($Ne1$ na styku dielektryk - ekran; $Ne2$ na styku ekran - gaz).

W celu zmiany danych wpisuje się żadaną wartość w miejscu podświetlonym (wskazanym przez kursor). Po naciśnięciu klawisza <ESC> przywracana jest poprzednia wartość danej. Pod oknem danych znajduje się menu wywoływane klawiszami funkcyjnymi:

- F1 (Pomoc) - pomoc dla użytkownika (rys.3.15 i 3.17),
- F2 (Pisz) - zapis na dysk danych do pliku o nazwie określonej przez użytkownika i rozszerzeniu charakterystycznym dla programu, *.IDD;
- F3 (Czytaj) - wczytanie z dysku danych, zapisanych w pliku o nazwie podanej przez użytkownika i rozszerzeniu j.w.;
- F4 (Druk) - wydruk danych na drukarce;
- F5 (Obliczenia)- rozpoczęcie obliczeń;
- F10 (Powrót) - powrót do głównego menu.

Po naciśnięciu klawisza F3 pojawia się okno (rys.3.16), w którym występują zbiory danych z rozszerzeniem *.IDD oraz zbiory danych wraz z wygenerowaną

macierzą dyskretyzującą operator całkowy układu równań (z rozszerzeniem *.IDM). Klawiszami kursora można wybrać dowolny zbiór i wybór ten potwierdzić klawiszem <Enter> (<Return>).

Po wykonaniu obliczeń pojawia się menu (rys.3.17), w którym dokonuje się wyboru, poprzez klawisze kursora i potwierdzenia <Enter>, następujących opcji:

- a) zapisu danych i wygenerowanej macierzy układu równań,
- b) obliczania natężenia pola na powierzchni przewodu,
- c) obliczania składowych normalnej i stycznej natężenia pola na powierzchni dielektryku,
- d) powrotu do danych wejściowych.

Po wyborze opcji zapisu danych i macierzy należy podać nazwę katalogu i nazwę zbioru z rozszerzeniem *.IDM, który będzie zapisany we wskazanym katalogu. Wybór opcji do obliczania pola na powierzchni elementów przewodzących przewodu powoduje wyświetlenie tablicy, w której - w trakcie wykonywania obliczeń - pojawiają się na ekranie kolejne wartości natężenia pola w punktach węzłowych. Po obliczeniu wszystkich wartości na dole ekranu pojawia się menu, wywoływane następującymi klawiszami:

↓ lub ↑ - przeglądanie tabeli wyników obliczeń,

F4 - drukowanie wyników obliczeń,

F5 - wykreślanie wyników obliczeń,

Esc - powrót.

Wywołanie wykresu natężenia pola na powierzchniach przewodzących przewodu (klawisz F5) powoduje pojawienie się pod rysunkiem dodatkowego menu, które wywołuje się następującymi klawiszami: D (drukuj rysunek), Esc - powrót. Wybór opcji do obliczenia składowej normalnej i stycznej natężenia pola na powierzchni dielektryku powoduje pojawienie się tablicy 3, w której - w trakcie wykonywania obliczeń - pojawiają się na ekranie kolejne wartości natężenia pola w N punktach węzłowych powierzchni dielektryku. Po obliczeniu wszystkich N wartości na dole ekranu pojawia się menu, wywoływane klawiszami:

↓ lub ↑ - przeglądanie tabeli wyników obliczeń,

F4 - drukowanie wyników obliczeń,

F5 - wykres,

Esc - powrót.

Promień przewodu	R1 =	0.10 n
Promień ekranu	R2 =	0.25 n
Szerokość izolatora na powierzchni ekranu	A =	0.03 n
Napięcie fazowe przewodu względem ekranu	V =	242.47 kV
Przenikalność dielektryczna względna izolatora	Eps1 =	4.00
Przenikalność dielektryczna względna gazu	Eps2 =	1.00
Promień krzywizny izolatora dyskowego	Ro1 =	1.00 n
Promienie wypustów sterujących	Ro2 =	0.03 n
	Ro3 =	0.01 n
Położenie łuku R02	D2 =	0.03 n
Liczba punktów podziału powierzchni dielektryka	N =	25
Liczba punktów podziału powierzchni przewodu	Np =	30
Numer punktu zmiany gęstości podziału na pow. przewod.	Np1 =	10
	Np2 =	20
Liczba punktów podziału powierzchni ekranu	Ne =	15
Numer punktu zmiany gęstości podziału na pow. ekranu	Ne1 =	5
	Ne2 =	12

F1-powodo F2-pisz F3-bzycia F4-drukuj F5-obliczenia F10-powrot

Rys. 3. 15.

Promień przewodu	R1 =	0.10 n
Promień ekranu	R2 =	0.25 n
Szerokość izolatora na powierzchni ekranu	A =	0.03 n
Napięcie	V =	242.47 kV
Przenikalność dielektryczna względna izolatora	Eps1 =	4.00
Przenikalność dielektryczna względna gazu	Eps2 =	1.00
Promień krzywizny izolatora dyskowego	Ro1 =	1.00 n
Promienie wypustów sterujących	Ro2 =	0.03 n
	Ro3 =	0.01 n
Położenie łuku R02	D2 =	0.03 n
Liczba punktów podziału powierzchni dielektryka	N =	25
Liczba punktów podziału powierzchni przewodu	Np =	30
Numer punktu zmiany gęstości podziału na pow. przewod.	Np1 =	10
	Np2 =	20
Liczba punktów podziału powierzchni ekranu	Ne =	15
Numer punktu zmiany gęstości podziału na pow. ekranu	Ne1 =	5
	Ne2 =	12

+++ - wybór ← - potwierdzenie F8 - zmiana stacji ESO - zaniechanie

Rys. 3. 16.

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej

MODELOWANIE POLA ELEKTRYCZNEGO
IZOLATORA DYSKOWEGO

Zapis nacierzy układu równan

Naczerzenie pola na powierzchni przewodu

Składowe normalne i stycznaz naczerzenia pola na powierzchni dielektryka

Powrot do danych

Autorzy: Bernard Baron
Adam Gawłowski

Gliwice 1990

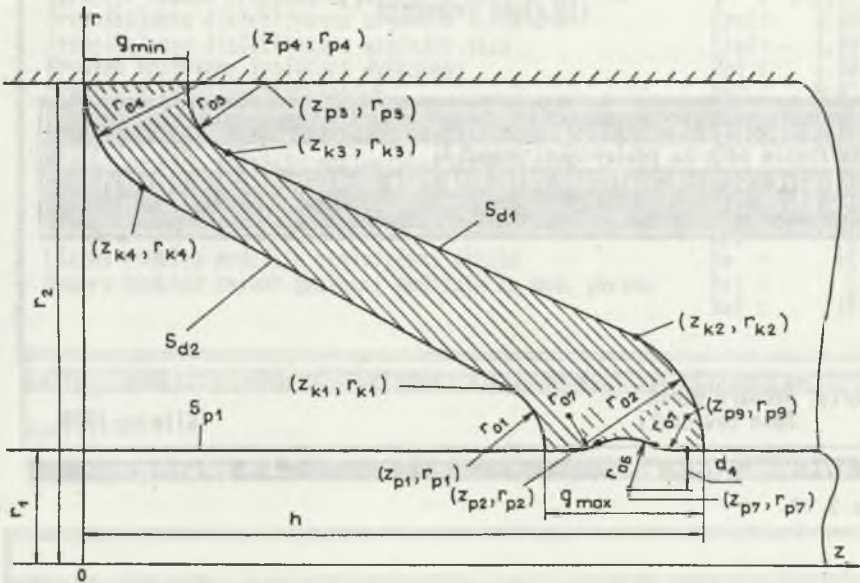
Home; End - wybor

potwierdzenie

Rys. 3. 17.

3.2.6. Algebraizacja równań całkowo-brzegowych dla izolatora kielichowego

Do badania pola elektrycznego izolatora kielichowego o symetrii obrotowej zastosowany jest algorytm, zbudowany w podrozdz.3.1 na podstawie metody równań całkowych.



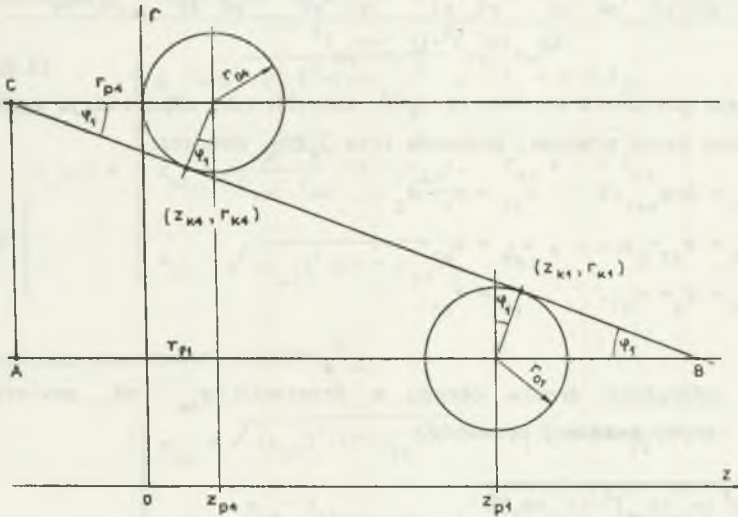
Rys.3.18. Szkic wymiarowy izolatora kielichowego o symetrii obrotowej
 Fig.3.18. Dimensional sketch of a conical-type spacer indicated rotary symmetry

Dla danych promieni szyny prądowej przewodu $r_1 = R_{01}$ i osłony $r_2 = R_{02}$, kształt izolatora kielichowego wyznacza się przez podanie czterech promieni: $r_{01} = R_{01}$, $r_{02} = R_{02}$, $r_{03} = R_{03}$ i $r_{04} = R_{04}$, a ponadto - grubości ścianki przy powierzchni szyny prądowej przewodu $g_{max} = G_{max}$ i powierzchni osłony $g_{min} = G_{min}$ oraz długości osiowej $h = H$. W modelu rozważa się również wypusty wewnętrznego ekranu sterującego o promieniach $r_{06} = R_{06}$ i $r_7 = R_{07}$ (rys.3.18). Do analitycznego zapisu powierzchni obrotowej izolatora kielichowego niezbędne są współrzędne położenia okręgów, odpowiadające krzywiznom o promieniach od r_{01} do r_{04} . W układzie współrzędnych (z, r) jak na rys.3.18 wyrażają się one następująco:

$$z_{p1} = h - g_{\max} - r_{o1}, \quad r_{p1} = r_1, \quad z_{p2} = h - r_{o2}, \quad r_{p2} = r_1,$$

$$z_{p3} = g_{\min} + r_{o3}, \quad r_{p3} = r_2, \quad z_{p4} = r_{o4}, \quad r_{p4} = r_2. \quad (3.79)$$

Niezbędne są również współrzędne zszycia łuków okręgów z odcinkami prostych, leżących na stycznych do tych okręgów. Współrzędne te, wynikające z uwarunkowań geometrycznych przedstawionych na rys.3.19, można zapisać następująco:



Rys.3.19. Konstrukcja geometryczna powierzchni izolatora kielichowego
Fig.3.19. Geometrical construction of the conial-type spacer surface

$$\left. \begin{aligned} z_{k1} &= z_{p1} + r_{o1} \sin \varphi_1, & r_{k2} &= r_{p1} + r_{o1} \cos \varphi_1, \\ z_{k4} &= z_{p4} - r_{o4} \sin \varphi_1, & r_{k4} &= r_{p4} - r_{o4} \cos \varphi_1, \\ z_{k2} &= z_{p2} + r_{o2} \sin \varphi_2, & r_{k2} &= r_{p2} + r_{o2} \cos \varphi_2, \\ z_{k3} &= z_{p3} - r_{o3} \sin \varphi_2, & r_{k3} &= r_{p3} - r_{o3} \cos \varphi_2, \end{aligned} \right\} (3.80)$$

gdzie $\sin \varphi_1$ wynika z rozwiązania równania:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\sin \varphi_1}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_1}} = \frac{AC}{AB} = \frac{r_{p4} - r_{p1}}{z_{p1} - z_{p4} + \frac{r_{o1} + r_{o4}}{\sin \varphi_1}} \quad (3.80a)$$

i wynosi:

$$\sin \varphi_1 = \frac{-(z_{p1} - z_{p4})(r_{o1} + r_{o4}) + (r_{p4} - r_{p1}) \sqrt{(z_{p1} - z_{p4})^2 + (r_{p4} - r_{p1})^2 - (r_{o1} + r_{o4})^2}}{(z_{p1} - z_{p4})^2 + (r_{p4} - r_{p1})^2} \quad (3.81)$$

Analogicznie wyznacza się $\sin \varphi_2$, którego zapis analityczny ma postać:

$$\sin \varphi_2 = \frac{-(z_{p2} - z_{p3})(r_{o2} + r_{o3}) + (r_{p3} - r_{p2}) \sqrt{(z_{p2} - z_{p3})^2 + (r_{p3} - r_{p2})^2 - (r_{o2} + r_{o3})^2}}{(z_{p2} - z_{p3})^2 + (r_{p3} - r_{p2})^2} \quad (3.82)$$

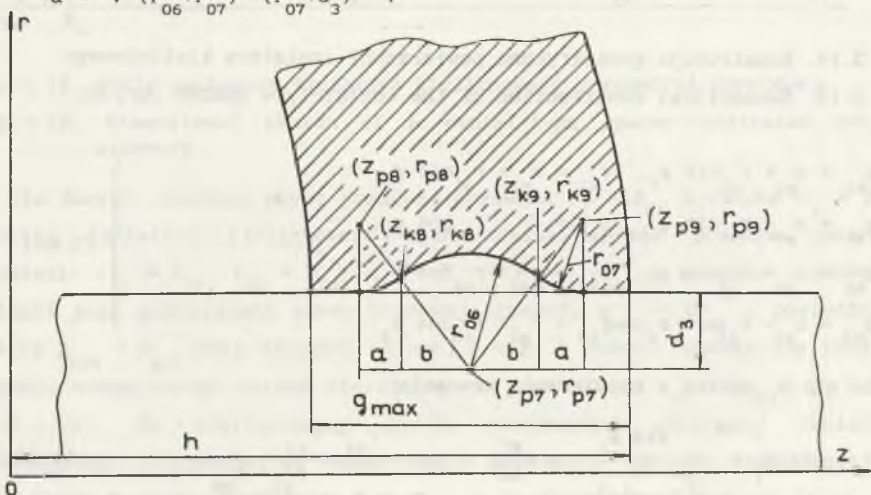
Współrzędne położenia środków okręgów, których łuki odpowiadają wypustom na powierzchni szyny prądowej przewodu (rys. 3.20), wynoszą:

$$\left. \begin{aligned} z_{p7} &= h - g_{\max} / 2, & r_{p7} &= r_1 - d_3 \\ z_{p8} &= z_{p7} - a, & z_{p9} &= z_{p7} + a, \\ z_{p8} &= r_1 + r_{o7}, & r_{p9} &= r_{p8}' \end{aligned} \right\} (3.83)$$

gdzie:

d_3 - odległość środka okręgu o promieniu r_{o6} od powierzchni szyny prądowej przewodu,

$$a = \sqrt{(r_{o6} + r_{o7})^2 - (r_{o7} + d_3)^2}$$



Rys. 3.20. Konstrukcja geometryczna wypustu na powierzchni przewodu

Fig. 3.20. Geometrical construction of the spline on a surface of the conductor

Współrzędne punktów zszycia łuków o promieniach r_{o6} i r_{o7} wynoszą:

$$z_{k8} = z_{k7} - b \quad \text{i} \quad z_{k9} = z_{p7} + b \quad (3.84)$$

gdzie:

$$b = r_{o6} (z_{p7} - z_{p8}) / (r_{o6} + r_{o7}) .$$

Analityczny zapis ukształtowania geometrycznego powierzchni bocznej dielektryku S_{d1} (rys.3.18) ma postać:

$$f_1(r) = \begin{cases} z_{p2} + \sqrt{(r_{o2})^2 - (r - r_{p2})^2}, & r_1 < r < r_{k1} \\ z_{k2} + \frac{z_{k3} - z_{k2}}{r_{k3} - r_{k2}} (r - r_{k2}), & r_{k1} < r < r_{k3} \\ z_{p3} - \sqrt{(r_{o3})^2 - (r - r_{p3})^2}, & r_{k3} < r < r_2 \end{cases} \quad (3.85)$$

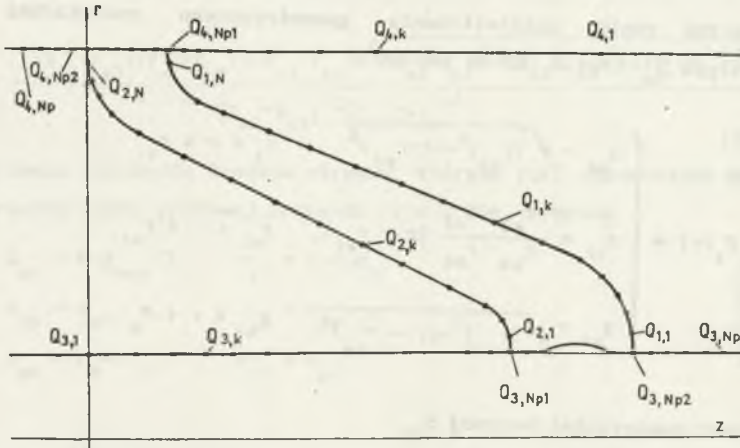
natomiast powierzchni bocznej S_{d2} :

$$f_2(r) = \begin{cases} z_{p1} + \sqrt{(r_{o1})^2 - (r - r_{p1})^2}, & r_1 < r < r_{k1} \\ z_{k1} + \frac{z_{k4} - z_{k1}}{r_{k4} - r_{k1}} (r - r_{k1}), & r_{k1} < r < r_{k4} \\ z_{p4} - \sqrt{(r_{o4})^2 - (r - r_{p4})^2}, & r_{k4} < r < r_2 \end{cases} \quad (3.86)$$

Analityczny zapis ukształtowania powierzchni szyny prądowej przewodu S_{p1} (rys.3.18) ma postać:

$$f_3(z) = \begin{cases} r_1, & z < z_{p8} \\ r_{p8} - \sqrt{(r_{o7})^2 - (z - z_{p8})^2}, & z_{p8} < z < z_{k8} \\ r_{p7} - \sqrt{(r_{o6})^2 - (z - z_{p7})^2}, & z_{k8} < z < z_{k9} \\ r_{p9} - \sqrt{(r_{o7})^2 - (z - z_{p9})^2}, & z_{p9} < z < z_{p9} \\ r_1, & z_{p9} < z. \end{cases} \quad (3.87)$$

Do algebraizacji równań całkowych (3.22) i (3.24), opisujących pole elektryczne dla izolatora kielichowego, stosuje się również przybliżenie (3.35) i (3.50) odpowiednich operatorów całkowych występujących w tych równaniach. Polega ona na rozpisaniu równań całkowych w wybranych punktach $Q_{k,i}$ konturów dielektryku i elementów przewodzących przewodu (rys. 3.21).



Rys. 3.21. Punkty podziału dielektryku izolatora kielichowego i elementów przewodzących przewodu szynowego

Fig. 3.22. Division points of a dielectric of the conical-type spacer and conductive elements of the solid conductor

Opisane postępowanie umożliwia wygenerowanie następującego algebraicznego układu równań, rozważanego ze względu na niewiadome gęstości σ_1^k w punktach $Q_{k,i}$:

$$\sigma_1^k - \lambda \sum_{l=1}^4 \sum_{j=2}^{N_1} CN(Q_{1,j-1}, Q_{1,j}, Q_{1,j+1}, Q_{k,l}, n_z, n_r) \sigma_j^1 = 0$$

dla $k = 2, 3$ oraz $i = 1, 2, \dots, N_k$ (3.88)

$$\sigma_1^k - \sum_{l=1}^4 \sum_{j=2}^{N_1} \left[CN(Q_{1,j-1}, Q_{1,j}, Q_{1,j+1}, Q_{k,l}, n_z, n_r) - \alpha C(Q_{1,j-1}, Q_{1,j}, Q_{1,j+1}, Q_{k,l}, n_z, n_r) \sigma_j^1 \right] = 2 \alpha V_1^k$$

dla $k = 3, 4$ oraz $i = 1, 2, \dots, N_k$

gdzie: $n_z = n_z(Q_{k,1})$ i $n_r = n_r(Q_{k,1})$ - składowe wektora jednostkowego, normalnego do powierzchni granicznych,

$$V_i^k = \begin{cases} 0 & \text{dla } k=4 \\ V_b & \text{dla } k=3 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_k,$$

$\alpha = 1/r_1$ - krzywizna szyny prądowej

$N_1 = N$ - liczba punktów na powierzchni dielektryku S_{d1} ,

$N_2 = N$ - liczba punktów na powierzchni dielektryku S_{d2} ,

$N_3 = N_p$ - liczba punktów podziału szyny prądowej,

$N_4 = N_p$ - liczba punktów podziału osłony przewodu.

Oznaczając elementy macierzy układu równań (3.88) i (3.89) przez C_{mn} , zmienne gęstości ładunku przez:

$$x_n = \sigma_1^k \quad \text{dla } n = i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l, \quad (3.90)$$

a wyrazy wolne przez:

$$d_n = \begin{cases} 0 & \text{dla } n = 1, \dots, N_1 + N_2 \\ V_b & \text{dla } n = N_1 + N_2 + 1, \dots, N_1 + N_2 + N_3 \\ 0 & \text{dla } n = N_1 + N_2 + N_3 + 1, \dots, N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \end{cases} \quad (3.91)$$

powyższy układ równań można zapisać następująco:

$$\sum_{n=1}^N C_{mn} x_n = d_n \quad (3.92)$$

przy czym: $N_c = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$. (3.92a)

Do rozwiązania układu równań (3.92) zastosowano metodę eliminacji Gaussa. Ze względu na złe uwarunkowanie macierzy układu równań (3.89) dokonano regularyzacji, polegającej na doborze stałej α . Zadowalające rezultaty uzyskano po wprowadzeniu podstawienia $\alpha = 1/r_1$ (gdzie r_1 - promień szyny prądowej przewodu). W układzie równań (3.88) i (3.89) wyrugowano stałą ϵ_0 (występującą w układzie równań całkowych (3.22) i (3.24)), dzieląc go przez ϵ_0 . Uzyskano w ten sposób zmienne $\sigma_1^k := \sigma_1^k / \epsilon_0$, które można interpretować jako składowe natężenia pola elektrycznego na powierzchniach granicznych.

3.2.7. Obliczanie pola elektrycznego na powierzchniach granicznych i wewnątrz izolatora kielichowego

Natężenie pola elektrycznego na powierzchniach przewodzących wyznacza się bezpośrednio z rozwiązania układu równań algebraicznych (3.92) jako gęstości powierzchniowe:

$$E_i^k = \sigma_i^k = x_n$$

gdzie:
$$n = i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l \quad (3.93)$$

$$k = 3, 4, \quad i = 1, 2, \dots, N_k.$$

Jest ono wyznaczone w punktach $Q_{k,i}$ podziału powierzchni dla których obowiązuje równanie całkowe (3.24) i układ równań (3.89).

Zgodnie z teorią granicznych wartości pochodnej normalnej potencjału warstwy pojedynczej (patrz wzory 3.21 a i b), znając macierz $c_{m,n}$ i rozwiązania x_n układu równań (3.92) można wyznaczyć składowe normalne wektora natężenia pola elektrycznego:

- od strony wewnętrznej dielektryku:

$$E_{w,i}^k = \frac{1}{2} \left[-x_m + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\lambda} (e_{mn} - c_{mn}) x_n \right], \quad (3.94)$$

- od strony zewnętrznej dielektryku:

$$E_{z,i}^k = \frac{1}{2} \left[x_n + \sum_{n=1}^N \frac{1}{\lambda} (e_{mn} - c_{mn}) x_n \right] \quad (3.95)$$

gdzie:

$$N_c = N_1 + N_2 + N_3$$

$$m = i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l \quad \text{dla } k = 1, 2$$

$$e_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{dla } m = n \\ 0 & \text{m} \neq n \end{cases}$$

$$\lambda = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + \epsilon_2) - \text{patrz wzór (3.22).}$$

Powyzsze zaleznosci dotycza punktów $Q_{k,1}$ podzialu konturów dielektryku, dla których obowiazuje rownanie calkowe (3.22). W ogolnym ujeciu skladowe natężenia pola elektrycznego, normalne do powierzchni przewodzących (wzór (3.39)) oraz dielektryku (wzory (3.94) i (3.95)), mogą być więc wyznaczone z rozwiązania układu równań (3.92) i jego macierzy, dyskretyzujących równania calkowe (3.22) i (3.24).

Znając gęstości ładunku (3.90), uzyskane po rozwiązaniu układu równań (3.92), oraz posługując się wzorami (3.50) i (3.35) aproksymującymi operatory calkowe (3.25) i (3.26), można wyznaczyć następujące wielkości: potencjał i skladowe natężenia pola elektrycznego w dowolnym kierunku. Wielkości te są ukierunkowane przez wektor jednostkowy $s = \{s_z(P), s_r(P)\}$, znajdujący się w dowolnym punkcie P wewnątrz analizowanego obszaru, jednakże z wyłączeniem powierzchni granicznych elementów przewodzących i dielektryku stałego.

Potencjał w punkcie $P(z,r)$ wyraża się wzorem:

$$V(P) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{N_1} C(Q_{k,i-1}, Q_{k,i}, Q_{k,i+1}, P) x_n \quad (3.96)$$

gdzie:

$$n = i + \sum_{l=1}^{k-1} N_l, \quad (3.96a)$$

$C(\cdot)$ - funkcja kształtu opisana wzorem (3.36),

$Q_{k,i}$ - punkty określające współrzędne podziału elementów przewodzących i dielektryku.

Skladową natężenia pola elektrycznego w danym punkcie $P(z,r)$ i w dowolnym kierunku, wyznaczonym przez wektor jednostkowy $s = \{s_z(P), s_r(P)\}$, wyraża się wzorem:

$$E_s(P) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{N_1} CN(Q_{k,i-1}, Q_{k,i}, Q_{k,i+1}, P, s_z(P), s_r(P)) x_n \quad (3.97)$$

gdzie: $CN(\cdot)$ - funkcja kształtu opisana wzorem (3.51).

Wzory (3.96) i (3.97) można wykorzystać do badania rozkładów pola elektrycznego w obszarze izolatora kielichowego.

3.2.8. Opis użytkowania programu IZO_KIEL

Na podstawie algorytmu skonstruowanego w podrozdz.3.2.5 opracowano i uruchomiono program IZO_KIEL służący do modelowania dwuwymiarowego pola elektrycznego izolatora kielichowego. Program ten jest dany w postaci tekstu źródłowego w języku Turbo Pascal (v. 5.5). Ze względu na dużą złożoność obliczeń wymaga on 640 kB pamięci operacyjnej i współpracy z koprocesorem. Program może współpracować z kartą graficzną CGA, HERCULES, EGA lub VGA.

Program uruchamiany jest z poziomu systemu operacyjnego przez podanie nazwy IZO_KIEL. Po załadowaniu pojawia się strona tytułowa programu. Po naciśnięciu dowolnego klawisza pojawia się okno danych dla izolatora kielichowego (rys.3.22). W oknie danych znajdują się przykładowe dane: promień toru prądowego przewodu R_1 i ekranu R_2 , długość osiowa izolatora H , minimalna grubość ścianki izolatora G_{min} , maksymalna grubość ścianki izolatora G_{max} , napięcie fazowe przewodu V , przenikalność elektryczna względna materiału izolatorowego ϵ_1 , przenikalność elektryczna względna gazu ϵ_2 , promień krzywizny izolatora przy powierzchni toru prądowego R_{01} i R_{02} , promień krzywizny izolatora przy powierzchni ekranu R_{03} i R_{04} , promień krzywizny wypustu ekranu sterującego na styku z izolatorem R_{06} i R_{07} , położenie łuków o promieniach R_{01} i R_{02} względem toru prądowego D_1 , położenie łuku wypustu o promieniu R_{06} względem toru prądowego (D_4), liczba punktów podziału powierzchni dielektryku (N), liczba punktów podziału powierzchni przewodzących (N_p), numery punktów zmiany gęstości podziału na powierzchni toru prądowego i ekranu przewodu (N_{p1} , N_{p2}).

W celu zmiany danych wpisuje się żadaną wartość w miejscu podświetlonym (wskazanym przez kursor). Po naciśnięciu klawisza <ESC> przywracana jest poprzednia wartość danej. Pod oknem danych znajduje się menu wywoływane klawiszami funkcyjnymi:

- F2 (Pisz) - zapis na dysk danych do pliku o nazwie określonej przez użytkownika i rozszerzeniu charakterystycznym dla programu (*.IKD);
- F3 (Czytaj) - wczytanie z dysku danych, zapisanych w pliku o nazwie podanej przez użytkownika i rozszerzeniu j.w.;
- F4 (Druk) - wydruk danych na drukarce;
- F5 (Obliczenia) - rozpoczęcie obliczeń;
- F10 (Powrót) - powrót do głównego menu.

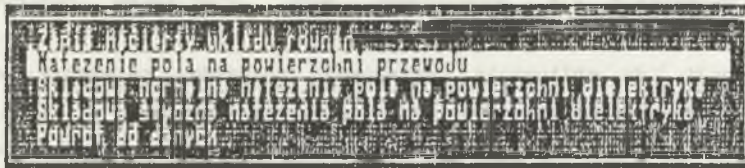
Isolator kielichowy - dane

Promień przewodu	R1 = 0,010 m
Promień ekranu	R2 = 0,25 m
Wysokość izolatora	H = 0,30 m
Grubość izolatora przy powierzchni ekranu	Gmin = 0,02 m
Grubość izolatora przy powierzchni przewodu	Gmax = 0,04 m
Napięcie fazowe przewodu względem ekranu	U = 242,49 kV
Przenikalność dielektryczna względna izolatora	Eps1 = 4,00
Przenikalność dielektryczna względna gazu	Eps2 = 1,00
Promienie krzywizny izolatora przy powierzchni przewodu	Ro1 = 0,04 m
	Ro2 = 0,06 m
Promienie krzywizny izolatora przy powierzchni ekranu	Ro3 = 0,02 m
	Ro4 = 0,03 m
Promienie krzywizny wypustu przewodu na słyku z izolatorem	Ro6 = 0,02 m
	Ro7 = 0,01 m
Polożenie łuku o promieniu RO1 i RO2 względem przewodu	D1 = 0,00 m
Polożenie łuku o promieniu RO1 i RO2 względem ekranu	D2 = 0,00 m
Polożenie łuku wypustu o promieniu RO6 względem przewodu	D3 = 0,02 m
Liczba punktów podziału powierzchni dielektryka	N = 25
Liczba punktów podziału powierzchni przewodu	Np = 30
Numery punktów zmiany gęstości podziału na pow. przewod.	Np1 = 14
	Np2 = 24

Rys. 3. 22.

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przenyslowej Politechniki Slaskiej

MODELOWANIE POLA ELEKTRYCZNEGO
IZOLATORA KIELICHOWEGO



Autorzy: Bernard Baron
Adam Gajlowski

Gliwice 1990

Rys. 3. 23c

Po naciśnięciu klawisza F3 pojawia się okno, w którym występują zbiory danych z rozszerzeniem *.IKD oraz zbiory danych wraz z wygenerowaną macierzą, dyskretyzującą operator całkowy układu równań (z rozszerzeniem *.IKM). Klawiszami kursora można wybrać dowolny zbiór i wybór ten potwierdzić klawiszem <Enter> (<Return>).

Po wykonaniu obliczeń pojawia się menu (rys.3.23), w którym - poprzez klawisze kursora i potwierdzenia <Enter> - dokonuje się wyboru następujących opcji:

- a) zapisu macierzy układu równań,
- b) obliczania natężenia pola na powierzchni przewodu,
- c) obliczania składowej normalnej natężenia pola na powierzchni dielektryku,
- d) obliczania składowej stycznej natężenia pola na powierzchni dielektryku,
- e) powrót do danych wejściowych.

Po wyborze opcji zapisu macierzy należy podać nazwę katalogu i nazwę zbioru (z rozszerzeniem *.IKM), który będzie zapisany we wskazanym katalogu. Wybór opcji do obliczania pola na powierzchni przewodu powoduje wyświetlenie tablicy, w której - w trakcie wykonywania obliczeń - pojawiają się na ekranie kolejne wartości natężenia pola w punktach węzłowych. Po obliczeniu wszystkich N_p wartości na dole ekranu pojawi się menu wywoływane następującymi klawiszami:

- ↓ lub ↑ - przeglądanie tabeli wyników obliczeń,
F4 - drukowanie wyników obliczeń,
F5 - wykreślanie wyników obliczeń,
Esc - powrót.

Wywołanie wykresu natężenia pola na powierzchni przewodu (klawisz F5) powoduje pojawienie się dodatkowego menu, wywołanego następującymi klawiszami: D (drukuj rysunek) i Esc (powrót).

Wybór opcji do obliczania składowej normalnej natężenia pola na powierzchni dielektryku powoduje pojawienie się tablicy, w której - w trakcie wykonywania obliczeń - pojawiają się na ekranie kolejne wartości natężenia w N punktach węzłowych powierzchni dielektryku. Po obliczeniu wszystkich zadanych wartości na dole ekranu pojawia się menu, wywoływane klawiszami:

- ↓ lub ↑ - przeglądanie tabeli wyników obliczeń,
F4 - drukowanie wyników i obliczeń,
F5 - wykreślanie,
Esc - powrót.

Po naciśnięciu klawisza F5 pojawia się menu, pozwalające na wybór następujących wykresów:

- a) rozkładu składowej normalnej natężenia pola na powierzchni dielektryku (EN1),
- b) rozkładu składowej normalnej natężenia pola na powierzchni dielektryku (EN2).

Wybór opcji obliczania składowej stycznej natężenia pola na powierzchni dielektryku powoduje pojawienie się tablicy, w której - w trakcie wykonywania obliczeń - pojawiają się na ekranie kolejne wartości natężenia pola w N punktach węzłowych powierzchni dielektryku. Po obliczeniu wszystkich N zadanych wartości na dole ekranu pojawia się menu, wywoływane klawiszami:

↓ lub ↑ - przeglądanie tabeli wyników obliczeń

F4 - drukowanie wyników obliczeń,

F5 - wykreślanie,

Esc - powrót.

Po naciśnięciu klawisza F5 pojawia się menu, pozwalające na wybór następujących wykresów:

- a) rozkładu potencjału na powierzchni dielektryku,
- b) rozkładu składowej stycznej natężenia pola na powierzchni dielektryku (ES1 i ES2).

4. WYMIAROWANIE I KSZTAŁTOWANIE UKŁADÓW IZOLACYJNYCH W PRZEWODACH SZYNOWYCH 123-420 kV

4.1. Założenia techniczne do obliczania izolacji przewodów szynowych

4.4.1. Założenia wstępne

Przedmiotem rozważań jest izolacja elektryczna hermetyzowanych (gazoszczelnych) przewodów szynowych wieloprądowych (napowietrznych lub wewnątrzprzewodowych), o napięciach znamionowych od 110 do 400 kV i prądach znamionowych do 6300 A. Elektrodamy obliczeniowego układu izolacyjnego są:

- szyna prądowa w postaci rury (wykonana z aluminium, stopu aluminium lub miedzi), o grubości ścianki od 5 do 15 mm;
- osłona zewnętrzna, w postaci rury (wykonana z aluminium, stopu miedzi lub innego materiału, np. stali nierdzewnej), o grubości ścianki od 2 do 6 mm.

Podstawowym układem geometrycznym elektrod jest układ walcowy współosiowy, identyczny w trzech fazach przewodu szynowego. Jednobiegunowe przewody szynowe (z indywidualną osłoną dla każdej fazy) mogą być ułożone w jednej płaszczyźnie lub w układzie trójkąta równobocznego. Ze względu na trudności w zakresie realizacji obliczeń pola elektrycznego, a przede wszystkim wskutek braku wiarygodnych danych wytrzymałościowych, przewody trójbiegunowe z szynami prądowymi rozmieszczonymi wewnątrz wspólnej osłony nie są w zasadzie rozpatrywane¹⁾.

Obliczeniom sprawdzającym podlega izolacja gazowa ciśnieniowa SF₆ o ciśnieniu roboczym 0,25 MPa (wybrany z przedziału 0,2-0,4 MPa), współpracująca praktycznie równolegle z żywicznymi izolatorami odstępnikowymi (wsporczyimi i grodziowymi), o określonych parametrach elektrycznych, geometrycznych i materiałowych. Izolację główną przewodu szynowego stanowią gazowe odstępy

¹⁾ Ograniczone rozważania w tym zakresie dotyczą jedynie wymiarowania izolacji gazowej przewodów trójbiegunowych w układzie trójkąta równobocznego (patrz podrozdz. 4.2.2 i zał.1). Wykorzystano w tym celu wyniki badań i obliczeń dla przewodów szynowych jednobiegunowych.

izolacyjne między elektrodami walcowymi, a izolację pomocniczą - spełniająca również istotne funkcje mechaniczne i uszczelniające - izolatory wsporcze i grodziowe, wykonane z lanej kompozycji epoksydowej (z wypełniaczem korundowym). Zagadnienia dotyczące przetwórstwa i własności tych kompozycji nie są rozważane.

Zakłada się, że:

- przewód szynowy może składać się z kilku a nawet kilkudziesięciu przedziałów gazoszczelnych (zależnie od długości, przeznaczenia i rodzaju konstrukcji),
- izolatory grodziowe (uszczelniające kolejne przedziały) nie różnią się istotnie od izolatorów wsporczych pod względem parametrów geometrycznych i materiałowych,
- poszczególne odcinki szyny prądowej i osłony są spawane lub odpowiednio łączone mechanicznie na granicach przedziałów gazoszczelnych, co nie wpływa w istotny sposób na ukształtowanie i wymiary geometryczne elektrod przewodu.

Wymiarowanie gazoszczelnych przewodów szynowych jest dokonywane jedynie ze względu na wymagania elektryczne stawiane ich izolacji gazowej i izolatorom odstępnikowym. Wyniki obliczeń numerycznych w tym zakresie wymagają weryfikacji eksperymentalnej. Powinny być one skonfrontowane z rezultatami wymiarowania przewodów ze względu na inne wymagania techniczne - szczególnie odporność cieplną i wytrzymałość mechaniczną. Zagadnienia te są rozważane m.in. w opracowaniach [12] i [14] oraz opracowaniu [16], w którym opisany jest program wieloaspektowego optymalizowania konstrukcji przewodów pod względem technicznym i ekonomicznym.

4.1.2. Założenia dotyczące warunków pracy izolacji

Układy izolacji kombinowanej, w postaci sprężonego sześciofluorku siarki uwarstwionego z izolatorami odstępnikowymi, są praktycznie niezależne od wpływu większości narażeń zewnętrznych - w tym również środowiskowych. Należy jednak wyeliminować lub co najmniej znacznie ograniczyć bardzo niekorzystny wpływ zanieczyszczeń SF_6 (szczególnie w postaci^{lk} cząstek przewodzących pozostawionych wewnątrz osłony lub niedopuszczalnego zawilgocenia gazu) oraz wpływ pomontażowych zanieczyszczeń powierzchni izolatorów.

Pomimo hermetyczności konstrukcji, izolatory instalowane w gazoszczelnych przewodach szynowych pracują w dość nietypowych i trudnych warunkach. Obciążenia eksploatacyjne charakterystyczne dla izolacji takich przewodów można podzielić ogólnie na obciążenia elektryczne, ciepłe i mechaniczne (omówione dokładniej w opracowaniach [26] i [27]). Założony zakres obliczeń projektowych uzasadnia pominięcie w dalszych rozważaniach obciążeń ciepłych i mechanicznych¹⁾. Spośród obciążeń elektrycznych największe znaczenie praktyczne mają:

- napięcie robocze (sinusoidalnie zmienne) o częstotliwości 50 Hz,
- przepięcia piorunowe i łączeniowe, przedostające się z zewnątrz do przewodów szynowych.

Ze względu na niewielką częstotliwość napięcie robocze w trójfazowej sieci elektroenergetycznej można traktować umownie jako wielkość deterministyczną, o określonej wartości skutecznej. Zgodnie z zaleceniami międzynarodowymi ([N1]-[N4]) i postanowieniami norm przedmiotowych ([N6] i [N7]), międzyprzewodowe napięcie robocze nie może przekroczyć podczas normalnej pracy przewodu szynowego najwyższego dopuszczalnego (długotrwałe) napięcia urządzenia U_m , skojarzonego z umownym napięciem znamionowym sieci U_n następująco:

Napięcie znamionowe sieci U_n , w kV	110	220	400
Najwyższe dopuszczalne napięcie urządzenia U_m , w kV	123	245	420

Jako najwyższe dopuszczalne długotrwałe napięcie izolacji przewodu szynowego względem ziemi przyjmuje się tzw. obliczeniowe napięcie robocze izolacji doziemnej $U_f = U_m / \sqrt{3}$, które nie może być przekroczone w normalnych warunkach pracy sieci.

Przepięcia piorunowe, przedostające się przewodami roboczymi linii napowietrznych do wnętrza przewodów szynowych, mogą osiągnąć duże wartości szczytowe i muszą być ograniczone za pomocą odgromników zaworowych do

1) Obciążenia te są jednak istotne w przypadku wykonywania pełnych obliczeń sprawdzających, ponieważ decydują o wymaganiach w zakresie odporności cieplnej i wytrzymałości mechanicznej konstrukcji izolatorowych.

poziomu 2-2,4 p.u. lub znacznie skuteczniej - za pomocą beziskiernikowych ochronników przeciwprzebieciowych do poziomu ok. 1,8 p.u.¹⁾

Spśród przebiegów wewnętrznych największe znaczenie w procesie wymiarowania izolacji hermetyzowanych przewodów szynowych mają przebiegi łączeniowe. Dotyczy to jednak wyłącznie konstrukcji o napięciu roboczym nie mniejszym niż 420 kV, ponieważ wartości szczytowe tych przebiegów nie przekraczają na ogół poziomu 3,5 p.u. Rzeczywisty poziom ochrony przeciwprzebieciowej przewodów izolowanych sprężonym SF₆ można obniżyć do wartości szczytowej 3 p.u. (odgromniki zaworowe magnetyczne) lub nawet do 1,7 p.u. (ochronniki beziskiernikowe).

W przewodach szynowych najwyższych napięć mogą wystąpić specyficzne przebiegi łączeniowe, spowodowane działaniem odłączników. Powstające wtedy przebiegi wyrównawcze mają postać:

- szybkozmiennych fal wędrownych, o częstotliwości zastępczej rzędu megaherców, odbijających się wielokrotnie od końców przewodu szynowego,
- wolnozmiennych przebiegów wyrównawczych, o częstotliwości zastępczej rzędu kilkudziesięciu kiloherców, występujących po nagłym zaniku napięcia od strony źródła zasilania przewodu.

W odróżnieniu od przebiegów piorunowych i częściowo łączeniowych, przebiegi dorywcze nie są groźne dla izolacji wysokonapięciowych przewodów szynowych.²⁾ Wartości szczytowe tych przebiegów nie przekraczają bowiem na ogół poziomu 1,4-1,5 p.u., który jest niższy od wymaganego poziomu wytrzymałości elektrycznej izolacji przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50-100 Hz [25]. Przebiegi te odgrywają jednak istotną rolę przy doborze napięć zapłonowych konwencjonalnych odgromników zaworowych.

1) Wskazuje to na możliwość dalszego obniżenia znormalizowanych napięć probierczych dla izolacji wewnętrznej różnorodnych urządzeń elektrycznych, chronionych za pomocą nowoczesnych środków ochrony przeciwprzebieciowej.

2) Przebiegi dorywcze mają postać słabo tłumionych przebiegów sinusoidalnie zmiennych o czasie trwania od 0,1 do kilku sekund. Są one powodowane przez niesymetryczne zwarcia doziemne, nagłe zmiany obciążenia oraz zjawiska rezonansowe i ferrerezonansowe (w sieciach SN).

4.2. Wymiarowanie izolacji gazowej

4.2.1. Wymagane właściwości i ocena wytrzymałości elektrycznej izolacji gazowej ciśnieniowej

Izolacja gazowa hermetyzowanego przewodu szynowego składa się z wielu gazowych odstępów izolacyjnych, przy czym sprężony SF_6 spełnia zarówno rolę czynnika izolującego, jak i chłodzącego. Gaz przeznaczony do napełnienia osłony przewodu oraz pobrany z urządzenia powinien być dostatecznie czysty i suchy, a wymagania w tym zakresie są bardzo ostre.¹⁾ Stosując SF_6 o ciśnieniu roboczym 0,2-0,4 MPa można efektywnie wykorzystać jego bardzo dobre własności elektroizolacyjne, a jednocześnie - uniknąć niebezpieczeństwa przejścia gazu w stan ciekły podczas pracy przewodu szynowego w warunkach napowietrznych.

Na skutek uwarunkowań funkcjonalnych i konstrukcyjnych układy izolacji gazowej w hermetyzowanych przewodach szynowych są układami o polu elektrycznym umiarkowanie nierównomiernym. W przypadku przewodów jednobiegunowych są one zbliżone do układów walców współosiowych, a w przypadku przewodów trójbiegunowych - do układu czterech walców równoległych niewspółosiowych. Cechą charakterystyczną powyższych układów jest ograniczona nierównomierność rozkładu pola elektrycznego między elektrodami, zwłaszcza w pobliżu szyny prądowej. Wymiary poprzeczne szyny prądowej w porównaniu z wymiarami osłony zewnętrznej (ekranu) przewodu szynowego powinny być tak dobrane, aby:

- 1) uniemożliwić wystąpienie jakichkolwiek wyładowań niezupełnych w normalnych warunkach roboczych (napiecie gaśnięcia wyładowań niezupełnych musi być mniejsze od największego dopuszczalnego napięcia roboczego izolacji);
- 2) zapewnić dostateczną wytrzymałość elektryczną przy znamionowych napięciach probierczych przemiennych i udarowych (patrz tabl.4.1) oraz ciśnieniu roboczym SF_6 podczas prób fabrycznych i pomontażowych;
- 3) zapewnić dostateczny zapas wytrzymałości izolacji rozhermetyzowanego (uszkodzonego) przedziału gazowego przy najwyższym dopuszczalnym napięciu roboczym i awaryjnym zmniejszeniu ciśnienia SF_6 do wartości 0,1 MPa.

¹⁾ Patrz normy przedmiotowe: PN-87/E-29010 Szesciofluorek siarki. Zanieczyszczenia w gazie w stanie dostawy. Wymagania i metody badań oraz PN-87/E-29011 Szesciofluorek siarki pobierany z urządzeń elektrycznych. Badania.

Tablica 4.1

Wartości znamionowych napięć probierczych izolacji wysokonapięciowych przewodów szynowych (wg [N6] i [N7])

Napięcie znamionowe sieci U_n	Najwyższe dopuszczalne napięcie urzędzenia U_m	Obliczeniowe napięcie robocze izolacji doziemnej $U_r = U_m / \sqrt{3}$	ZNAMIONOWE NAPIĘCIA PROBIERCZE U_{pri} IZOLACJI			
			doziemnej 1)		międzyfazowej 2)	
			przemienne 50Hz	udarowe piorunowe	udarowe łączeniowe	
Wartości skuteczne		Wartości skuteczne	Wartości szczytowe	Wartości szczytowe		
kV		kV				
110	123	71	185	262	450	-
220	245	141	360	509	850	-
400	420	242	-	-	1175	950
						1425

Uwagi:

- 1) Dla urządzeń przeznaczonych do sieci z uziemnionym punktem zerowym (jeśli współczynnik zwarcia doziemionego jest nie większy niż 1,4) oraz skutecznie chronionych przed przepięciami w każdych warunkach ruchowych.
- 2) J.w. lecz tylko dla aparatów, w których odstępy międzyfazowe są ustalone fabrycznie i wynikają z ich konstrukcji.

Większość gazowych odstępów izolacyjnych w osłoniętych przewodach szynowych można rozpatrywać w uproszczeniu jako odstęp obliczeniowy między elektrodami walcowymi współosiowymi o umiarkowanie nierównomiernym polu elektrycznym. Postępuje się tak nawet wówczas, gdy wewnątrz przewodu jednobiegunowego istnieją obszary, w których występują zakłócenia w przestrzennym rozkładzie pola elektrycznego (np. w pobliżu izolatorów lub łączy szyny prądowej).

Najbardziej wiarygodnych informacji o wytrzymałości takich układów izolacyjnych dostarczają badania eksperymentalne [45,53,54]. Zależności empiryczne uzyskane na podstawie badań umożliwiają obliczenie przemiennych i udarowych napięć przeskoku dla technicznego układu elektrod walcowych współosiowych, jeśli:

- ciśnienie robocze sześciofluorku siarki $p = 0,1-0,4$ MPa,
- średnica zewnętrzna szyny prądowej $d = 38-200$ mm,
- chropowatość powierzchni szyny prądowej nie przekracza $30 \mu\text{m}$.

Przy takich założeniach, spełnionych zazwyczaj w większości przewodów szynowych, wartość szczytową 50-procentowego natężenia przeskoku (w kV/mm) można obliczyć ze wzoru:

$$E_{50} = A_{ij}p + B_{ij} \quad (4.1)$$

w którym:

p - ciśnienie SF_6 , w MPa;

A_{ij} , B_{ij} - empiryczne współczynniki obliczeniowe, o wartościach zależnych od rodzaju (i) oraz biegunowości napięcia (j) między elektrodami:

rodzaj napięcia	przemienne	udarowe piorunowe		udarowe łączeniowe	
		+	-	+	-
biegunowość napięcia	dowolna	+	-	+	-
A_{ij} , w kV/mm·MPa	44	88	63	74	45
B_{ij} , w kV/mm	3,5	1,5	2,4	3	4,5

Wytrzymałość elektryczna izolacji gazowej (zbioru odstępów izolacyjnych) nie jest wielkością deterministyczną, lecz zmienną losową o rozkładzie prawdopodobieństwa zbliżonym do rozkładu podwójnie wykładniczego, a

dokładniej - do rozkładu wielkości minimalnych I typu [1,48,53]. Wymiarując pojedynczy odstęp gazowy należy posługiwać się największym natężeniem pola elektrycznego wytrzymywanym przez układ izolacyjny (w kV/mm), wyrażonym następująco:

$$E_w = E_{50} (1 - 3\sigma) \quad (4.2)$$

gdzie:

E_{50} - natężenie pola elektrycznego według wzoru (4.1);

$\sigma < 0,05$ - współczynnik zmienności natężenia przeskoku.¹⁾

"Trzysigmowy" przedział zmienności wytrzymywanego natężenia pola elektrycznego odpowiada w przybliżeniu ryzyku przeskoku w pojedynczym przedziale gazowym, nie przekraczającemu 0,1%. Zapewnia to dostateczną niezawodność izolacji gazowej całego przewodu szynowego, która stanowi układ o strukturze szeregowej.

Znając największe natężenie pola elektrycznego wytrzymywane przez odstęp gazowy, można obliczyć wartość szczytową napięcia wytrzymywanego (w kV), posługując się wzorem:

$$U_w = E_w \frac{a}{\beta} = 0,5 d E_w \ln \frac{D}{d} \quad (4.3)$$

w którym:

d - średnica zewnętrzna szyny prądowej, w mm;

D - średnica wewnętrzna osłony przewodu, w mm;

a = 0,5(D-d) - odstęp międzyelektrodowy, w mm;

$\beta(D/d) > 1$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego w układzie walcowym współosiowym (patrz [18]).

Na podstawie wzoru (4.3) można określić optymalne wymiary poprzeczne szyny prądowej lub osłony przewodu, bowiem dla $E_w = \text{const}$ istnieje maksimum napięcia wytrzymywanego przez odstęp gazowy o następujących średnicach elektrod: $d_{\text{opt}} = 2 U/E_{\text{max}}$ i $D_{\text{opt}} = 2 U e/E_{\text{max}}$ (gdzie $E_{\text{max}} = 2 U/d \ln \frac{D}{d}$ - największe natężenie pola elektrycznego w układzie walców współosiowych). Średnica szyny prądowej (d) w rzeczywistych przewodach może zmieniać się jednak w dość szerokich granicach, co nie powoduje istotnego zmniejszenia

¹⁾ Stosunek odchylenia standardowego do wartości oczekiwanej natężenia przeskoku. Największe rozrzuty, a tym samym największe wartości współczynnika zmienności, rejestrowane są podczas prób udarami łączeniowymi [69,73].

wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego. Przykładowo, dla przewodu wyposażonego w osłonę o średnicy $D = 300$ mm i szynę prądową o średnicy mieszczącej się w granicach $D/4,4 < d < D/1,83$ napięcie wytrzymywane zmniejsza się zaledwie o ok. 10 % w porównaniu z wartością maksymalną, wynikającą z zależności: $E_{\max} = 0,5 E_w d$.

4.2.2. Kryteria wymiarowania izolacji gazowej przewodów szynowych 123-420 kV i algorytm obliczeń numerycznych

Kryteria wymiarowania izolacji gazowej wysokonapięciowych hermetyzowanych przewodów szynowych są wyszczególnione w tabl. 4.2. Dotyczą one jednobiegunowych przewodów szynowych 123-420 kV z izolacją gazową ciśnieniową, w postaci sprężonego SF_6 .

Podstawowym kryterium wymiarowania izolacji gazowej takich przewodów jest warunek, aby odstęp gazowy wykazywał dostateczną wytrzymałość elektryczną przy ciśnieniu roboczym SF_6 i znamionowych napięciach probierczych (patrz tabl. 4.1). Przyjmując, że $d = \text{var}$ oraz uwzględniając wzory (4.1), (4.2) i (4.3), najmniejsza średnica wewnętrzna osłony przewodu szynowego - dopuszczalna ze względu na wymaganą wytrzymałość elektryczną izolacji gazowej - wynika z zależności:

$$D_{\text{obl}} > d \exp \left\{ \frac{2 U_{\text{pr1}}}{d(A_{1j} p + B_{1j})(1 - 3\sigma)} \right\}_{\max}, \quad (4.4)$$

w której:

U_{pr1} - wartość szczytowa znamionowego napięcia probierczego i-tego rodzaju, w kV. Pozostałe oznaczenia jak we wzorach (4.1), (4.2) i (4.3).

Po obliczeniu średnicy wewnętrznej osłony przewodu szynowego sprawdza się, czy odstęp izolacyjny o długości $a_{\text{obl1}} = 0,5(D_{\text{obl1}} - d)$ zapewni dostateczną wytrzymałość przy przemiennym napięciu roboczym i awaryjnym obniżeniu się ciśnienia SF_6 do wartości 0,1 MPa. Wartość skuteczną napięcia przemiennego (w kV), wytrzymywanego przez rozhermetyzowany przedział gazowy, oblicza się ze wzoru (4.3), przekształconego do postaci:

Etap obliczeń	Rodzaj kryterium obliczeniowego	Najmniejsza średnica wewnętrzna ostony przewodu szynowego	Oznaczenia i dane obliczeniowe	
			Najwyższe dopuszczalne napięcie urządzenia 2) U _m (w kV)	Znamionowe napięcie problemowe 3) U _{pri} (w kV)
1	Dostateczna wytrzymałość elektryczna (statyczna i udarowa) przy odniesieniu do znamionowych napięciach problemowych	$D_{obl1} \geq d \left\{ \exp \frac{2 U_{pri}}{d (A_{ij} p + B_{ij}) (1-36)} \right\}_{max}$	przemienne U _{pri1}	udarowe pionowej udarowe łączeniowe U _{pri2} U _{pri3}
2	Dostateczna wytrzymałość elektryczna przy przemiennym napięciu roboczym i dynamicznej zacji prządziątu gazowego (obniżeniu ciśnienia SF6 do 0,1 MPa)	$D_{obl2} \geq d \exp \frac{U_m}{4,1 d}$	262 509 —	450 850 1175 950
3	Dostateczna wytrzymałość elektryczna skrośna długotrwała izolatorów wsparczych i gładziowych	$D_{obl3} \geq \frac{2 \beta_{Lz} U_m}{\sqrt{3} E_d} + d$	44	88 63 74 45
4	Dobór typowych wymiarów poprzecznych przewodu	$D_{obl} = D_z - 2q \geq (D_{obl1}, D_{obl2}, D_{obl3})_{max}$	3,5	1,5 2,4 3 4,5

rodzaj napięcia (t)	przemienne	udarowe pionowe	udarowe łączeniowe
biegunowość (j)	dowolna	+	+
A _{ij} (w kV/mm.MPa)	44	88	63 74 45
B _{ij} (w kV/mm)	3,5	1,5	2,4 3 4,5

$\beta_{Lz} \approx 1,1 \dots 1,6$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego wewnątrz izolatora wsparczego lub gładziowego 6);
 $E_d = 2,5$ kV/mm - wartość skuteczna największego dopuszczalnego natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora 7);
 $D = 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500$ mm - średnice zewnętrzne typowych ostn przewodu;
 q - grubość ścianki ostony przewodu.

Uwagi: 1) Dla średnicy zewnętrznej szyny prądowej $d = var$, wybranej spośród wymiarów typowych rur. 2) Wartości skuteczne dla udarów łączeniowych. 3) Stosunek odchylenia standardowego do wartości oczekiwanej natężenia przeskoku, największy dla udarów łączeniowych. 4) Stosunek odchylenia standardowego do wartości oczekiwanej natężenia przeskoku, największy dla udarów łączeniowych. 5) Dla technicznego układu elektrod walbowych współosiowych, zależnie od rodzaju napięcia oraz jego biegunowości. 6) Wartość zależna od rodzaju konstrukcji izolatora (dyskowy lub kielichowy), stosunku średnic ostony i szyny prądowej przewodu oraz przeliczności elektrycznej kompozycji epoksydowej. 7) Na podstawie wyników badań starzeniowych krajowych kompozycji epoksydowych.

$$U'_m = \frac{1}{\sqrt{2}} (0,1A_1 + B_1)(1 - 3\sigma) \frac{a_{ob11}}{\beta_1} \cong 2,37 d \ln \frac{D_{ob11}}{d} \quad (4.5)$$

gdzie:

$\beta_1 = 2a_{ob11}/d \ln \frac{D_{ob11}}{d}$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego w układzie elektrod walcowych o zadanych wymiarach geometrycznych;

A_1, B_1 - współczynniki obliczeniowe takie jak we wzorze (4.1) dla napięcia przemiennego.

Jeśli napięcie obliczone ze wzoru (4.5) jest równe lub większe od $U_m/\sqrt{3}$, wynik sprawdzenia uznaje się za pozytywny i nie ma potrzeby dokonywania zmian średnicy D_{ob11} . W przeciwnym przypadku należy zwiększyć tę średnicę do takiej wartości, aby spełnić warunek:

$$D_{ob12} = d \exp \frac{U_m}{4,1 d} \quad (4.6)$$

Kolejny etap obliczeń polega na sprawdzeniu, czy odstęp gazowy o długości a_{ob11} lub $a_{ob12} = 0,5 (D_{ob12} - d)$ nie prowadzi do zastosowania izolatorów odstępnikowych o zbyt małych średnicach zewnętrznych. Mogłoby to spowodować wystąpienie niedopuszczalnie dużych wartości natężenia pola elektrycznego zarówno we wnętrzu, jak i na powierzchni izolatorów. Ze względu na brak wiarygodnych danych, dotyczących wytrzymałości elektrycznej skośnej i powierzchniowej izolatorów epoksydowych instalowanych w sprężonym SF_6 , można postawić jedynie wymaganie, aby wartość skuteczna największego roboczego natężenia pola elektrycznego (w kV/mm) wewnątrz każdego z izolatorów:

$$\text{Max EM}^* \cong \frac{2 \beta_{1z} U_m}{\sqrt{3} (D_{ob11} - d)} = \frac{\beta_{1z} U_m}{\sqrt{3} a_{ob11}} < E_d \quad (4.7a)$$

$$\text{lub Max EM}^* \cong \frac{2 \beta_{1z} U_m}{\sqrt{3} (D_{ob12} - d)} = \frac{\beta_{1z} U_m}{\sqrt{3} a_{ob12}} < E_d \quad (4.7b)$$

gdzie:

$\beta_{1z} \approx 1,1-1,6$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego wewnątrz izolatora odstępnikowego; ¹⁾

$E_d = 2,5$ kV/mm - wartość skuteczna największego dopuszczalnego długotrwale natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora. ²⁾

Ze wzoru (4.7a) lub (4.7b) wynika, że średnica wewnętrzna osłony (w mm), zmiarowana w trzecim etapie obliczeń, musi spełniać warunek:

$$D_{obl3} > \frac{2 \beta_{1z} U_m}{\sqrt{3} E_d} + d. \quad (4.8)$$

Średnicę obliczeniową osłony D_{obl} wyznacza się na podstawie największej ze średnic: D_{obl1} , D_{obl2} lub D_{obl3} . W końcowej fazie obliczeń określa się zbiór następujących wartości:

- ostatecznie przyjętą średnicę $D_{obl} = D_z - 2g$ przy uwzględnieniu typowych średnic zewnętrznych osłony $D_z = 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500$ mm) i grubości ścianki osłony przewodu ($g = 5-15$ mm),
- stosunek D_{obl}/d (m.in. w celu porównania z wartością optymalną, zbliżoną do liczby Eulera),
- współczynnik nierównomierności pola elektrycznego $\beta(D_{obl}/d)$ w gazowym odstępnie izolacyjnym,
- odstęp izolacyjny $a = 0,5 (D_{obl} - d)$, zapewniający dostateczną wytrzymałość elektryczną izolacji przewodu szynowego.

Przedstawiony powyżej algorytm obliczeń minimalnych wymiarów poprzecznych przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 umożliwił opracowanie użytkowego programu obliczeniowego IZOLACJA, napisanego w języku Turbo Pascal (wersja 5.5) w formie konwersacyjnej, przystosowanego do realizacji

¹⁾ Wartość współczynnika β_{1z} zależy od rodzaju konstrukcji izolatora (dyskowy lub klelichowy), stosunku średnic osłony i szyny prądowej przewodu oraz przenikalności elektrycznej zastosowanej kompozycji epoksydowej (patrz tabl. Z2.2).

²⁾ W obawie przed zbyt szybką degradacją własności izolatorów epoksydowych, większość wytwórców przyjmuje dość niski poziom tego natężenia (2-3 kV/mm). Najnowsze wyniki badań starzeniowych kompozycji epoksydowych [60], przewidywanych do wytwarzania izolatorów odstępnikowych, uzasadniają przyjęty poziom natężenia pola elektrycznego E_d .

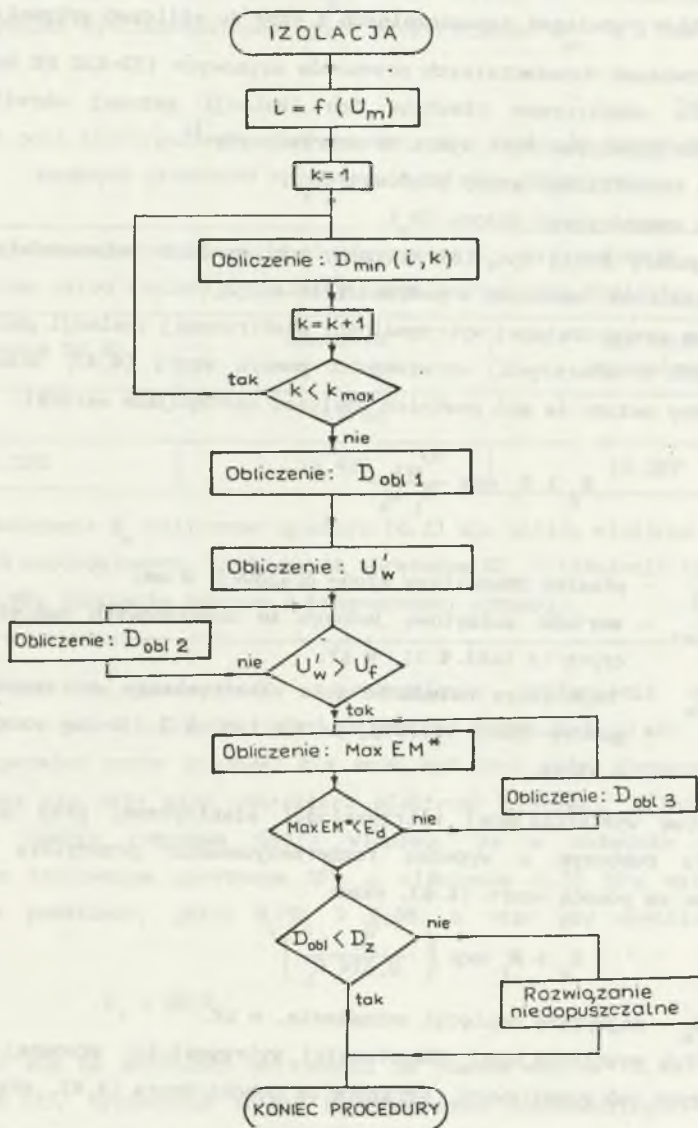
na mikrokomputerze klasy IBM PC. Schemat blokowy procedury IZOLACJA pokazano na rys.4.1. Dokładna charakterystyka i zasady użytkowania tego programu obliczeniowego, pozwalającego również na graficzną prezentację kilku wybranych funkcji, są przedstawione w opracowaniach [16] i [26].

Program obliczeniowy IZOLACJA umożliwia wyznaczenie zbioru najmniejszych dopuszczalnych średnic wewnętrznych osłony jednobiegunowego przewodu szynowego dla zadanych wartości: średnicy zewnętrznej szyny prądowej (d), napięcia roboczego przewodu (U_m), ciśnienia roboczego sprężonego SF_6 (p). Może on być również pośrednio wykorzystany do wymiarowania trójbiegunowych przewodów szynowych, z szynami prądowymi rozmieszczonymi w układzie trójkąta równobocznego wewnątrz wspólnej osłony. Obliczenia pola elektrycznego w takim układzie przewodów umożliwia wprawdzie program obliczeniowy PRZEWEK_3, zaprezentowany w podrozdz.3.1.3, jednak w obliczeniach inżynierskich można stosować również uproszczony sposób postępowania, opisany w załączniku 1. Polega on na wykorzystaniu przybliżonych, lecz prostych współzależności wymiarów geometrycznych elektrod i gazowych odstępów izolacyjnych w odpowiadających sobie przewodach szynowych trój- i jednobiegunowych (patrz rys.Z1.1). Na podstawie algorytmu zaproponowanego w załączniku 1 opracowano program obliczeniowy ODIZ_3, napisany w języku Turbo Pascal (wersja 5.5) i przystosowany do realizacji na mikrokomputerze klasy IBM PC. Schemat obliczeniowy, charakterystyka i zasady użytkowania tego programu są przedstawione w opracowaniu [16]. Program ten może być jednym ze składników pakietu optymalizacyjnych programów obliczeniowych.

Z pomiarów i obliczeń numerycznych wynika, że:

- rozkład natężenia pola elektrycznego między każdą z fazowych szyn prądowych a osłoną przewodu trójbiegunowego ma taki sam charakter jak w przewodzie jednobiegunowym,
- największe wartości natężenia pola elektrycznego między fazowymi szynami prądowymi i między każdą z szyn a osłoną są tego samego rzędu,
- średnica osłony przewodu trójbiegunowego (D_m) jest zwykle większa o ok. 80% od średnicy osłony odpowiadającego mu przewodu jednobiegunowego (D).

Należy podkreślić, że wymagania elektryczne stawiane izolacji trójbiegunowych przewodów szynowych nie decydują na ogół o wyborze i wymiarach konstrukcji. Najważniejszą rolę odgrywają w takim przypadku wymagania w zakresie odporności cieplnej i wytrzymałości elektrodynamicznej, stawiane przewodom szynowym [13,15,16].



Rys. 4.1. Schemat blokowy procedury IZOLACJA

Fig. 4.1. The block diagram of IZOLACJA procedure

4.2.3. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych i dane do obliczeń optymalizacyjnych

Zbiór rozwiązań dopuszczalnych przewodów szynowych 123-420 kV ze względu na wymagania elektryczne stawiane ich izolacji gazowej określa zbiór najmniejszych dopuszczalnych wymiarów poprzecznych:¹⁾

- promienia zewnętrznego szyny prądowej (R_1),
- promienia wewnętrznego osłony (R_2).

Powyższe wymiary muszą być tak dobrane, aby spełnić jednocześnie kolejne kryteria cząstkowe, omówione w podrozdziale 4.2.2:

a) kryterium wystarczającej wytrzymałości elektrycznej izolacji gazowej przy napięciach probierczych, wyrażone za pomocą wzoru (4.4), stąd promień wewnętrzny osłony (w mm) powinien spełniać następujące warunki:

$$R_2 > R_1 \exp \frac{U_{pr1}}{R_1 E_w} \quad (4.9)$$

gdzie:

- R_1 - promień zewnętrzny szyny prądowej, w mm;
- U_{pr1} - wartość szczytowa jednego ze znamionowych napięć probierczych (z tabl.4.1), w kV;
- E_w - największe natężenie pola elektrycznego wytrzymywane przez gazowy układ izolacyjny (z tabl.4.3 i wg wzoru (4.2)), w kV/mm,

b) kryterium wystarczającej wytrzymałości elektrycznej przy przemiennym napięciu roboczym w wypadku rozhermetyzowania przedziału gazowego, wyrażone za pomocą wzoru (4.6), skąd:

$$R_2 > R_1 \exp \left(- \frac{U_m}{8,224 R_1} \right) \quad (4.10)$$

gdzie U_m - najwyższe napięcie urządzenia, w kV,

c) kryterium wystarczającej długotrwałej wytrzymałości skrośnej izolatorów wsporczych lub grodziowych, wyrażone za pomocą wzoru (4.8), skąd:

$$R_2 > 0,3 U_m + R_1, \quad (4.11)$$

¹⁾ W dalszych rozważaniach stosuje się zmodyfikowane oznaczenia wymiarów geometrycznych przewodów, średnica zewnętrzna szyny prądowej $d = 2R_1$ średnica wewnętrzna osłony $D = 2R_2$

Jeśli największe dopuszczalne długotrwałe natężenie pola elektrycznego wewnątrz każdego z izolatorów $E_d = 2,5$ kV/mm, a uśredniona wartość współczynnika nierównomierności pola elektrycznego $\beta_{1z} = 1,3$ (patrz zał.Z2 i tabl.Z2.2).

Tablica 4.3

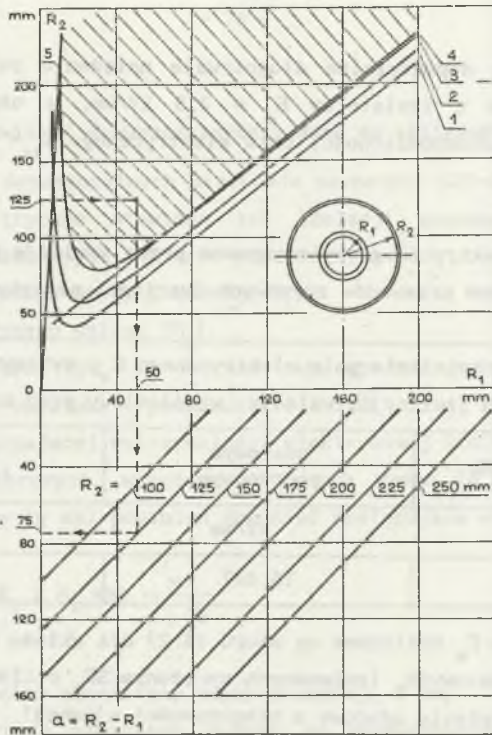
Natężenie pola elektrycznego wytrzymywane przez izolację gazową hermetyzowanych przewodów szynowych (wartości szczytowe)

Największe natężenie pola elektrycznego E_w , wytrzymywane przez układ izolacyjny walcowy współosiowy przy napięciu		
przebiegiem 50 Hz	udarowym piorunowym	udarowym łączeniowym
kV/mm		
12,325	15,427	13,387
Uwaga: Natężenie E_w obliczone wg wzoru (4.2) dla układu elektrod walcowych współosiowych, izolowanych sprężonym SF_6 o ciśnieniu roboczym $p = 0,25$ MPa (napięcie udarowe o biegunowości ujemnej)		

Ze względu na konieczność zapobiegnięcia wystąpieniu wyładowań niezupełnych w sześciofluorku siarki podczas normalnej pracy przewodu szynowego, promień szyny prądowej nie może być zbyt mały. Oznacza to, że szyna prądowa nie może mieć charakteru elektrody ulotowej. Z badań laboratoryjnych (patrz rozprawa [63]) wiadomo, że w układzie walcowym współosiowym izolowanym sprężonym SF_6 o ciśnieniu 0,25 MPa wyładowanie ulotowe nie powstanie, jeśli $R_1/R_2 > 0,05$, a więc gdy spełniony jest warunek:

$$R_2 < 20 R_1 \quad (4.12)$$

Opierając się na warunkach wyrażonych za pomocą wzorów (4.9), (4.10), (4.11) i (4.12), wyznaczono zbiory najmniejszych dopuszczalnych wymiarów poprzecznych przewodów szynowych 123-420 kV (rys. 4.2, 4.3 i 4.4). Zbiory różnych kombinacji promieni R_1 i R_2 , wybranych z obszarów półpłaszczyzn zakreskowanych na rysunkach liniami ukośnymi, należą do grupy rozwiązań dopuszczalnych ze względu na wymagania stawiane izolacji przewodów szynowych i są uwarunkowane:



Rys. 4.2. Najmniejsze dopuszczalne wymiary poprzeczne przewodów szynowych 123 kV izolowanych sprężonym SF_6 o ciśnieniu 0,25 MPa (wg [27] i

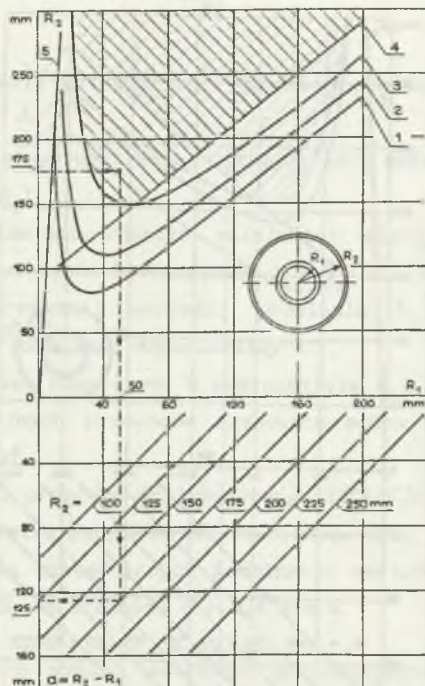
[29], ze względu na:

- 1 - wytrzymałość izolacji gazowej rozhermetyzowanego przedziału przy napięciu roboczym,
- 2 - wytrzymałość izolacji gazowej przy napięciu probierczym przemianowym,
- 3 - wytrzymałość izolacji gazowej przy napięciu probierczym udarowym piorunowym,
- 4 - wytrzymałość skrośną długotrwałą izolatora odstępnikowego (dla $R_2/R_1 < 2,5$),
- 5 - graniczną nierównomierność pola elektrycznego ($R_2 < 20 R_1$)

Fig. 4.2. The minimal permissible transverse dimensions of the 123 kV buses insulated with SF_6 compressed to 0,25 MPa (acc. to [27] and [29]

considering:

- 1 - electric strength of gaseous insulation of a decompressed clearance under operating voltage,
- 2 - electric strength of gaseous insulation under the power-frequency test voltage,
- 3 - electric strength of gaseous insulation under the lightning surge test voltage,
- 4 - long term across electric strength of the spacer (for $R_2/R_1 < 2,5$),
- 5 - limiting electric field nonuniformity ($R_2 < 20 R_1$)



Rys. 4.3. Najmniejsze dopuszczalne wymiary poprzeczne przewodów szynowych 245 kV izolowanych sprężonym SF_6 o ciśnieniu 0,25 MPa (wg [27] i [29]),

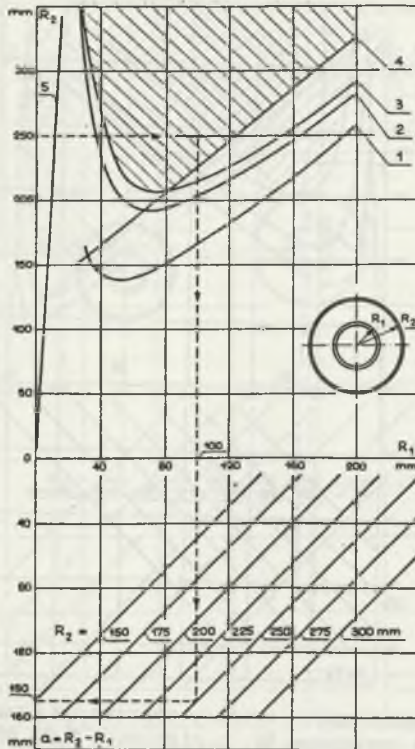
ze względu na:

- 1 - wytrzymałość izolacji gazowej rozhermetyzowanego przedziału przy napięciu roboczym,
- 2 - wytrzymałość izolacji gazowej przy napięciu probierczym przemiennym,
- 3 - wytrzymałość izolacji gazowej przy napięciu probierczym udarowym piorunowym,
- 4 - wytrzymałość skrośną długotrwałą izolatora odstępnikowego (dla $R_2/R_1 < 3,5$),
- 5 - graniczną nierównomierność pola elektrycznego ($R_2 < 20 R_1$)

Fig. 4.3. The minimal permissible transverse dimensions of the 245 kV buses insulated with SF_6 compressed to 0,25 MPa (acc. to [27] and [29])

considering:

- 1 - electric strength of gaseous insulation of a decompressed clearance under operating voltage,
- 2 - electric strength of gaseous insulation under the power-frequency test voltage,
- 3 - electric strength of gaseous insulation under the lightning surge test voltage,
- 4 - long term across electric strength of the spacer (for $R_2/R_1 < 3,5$),
- 5 - limiting electric field nonuniformity ($R_2 < 20 R_1$)



Rys. 4.4. Najmniejsze dopuszczalne wymiary poprzeczne przewodów szynowych 420 kV izolowanych sprężonym SF_6 o ciśnieniu 0,25 MPa (wg [27] i [29]),

ze względu na:

- 1 - wytrzymałość izolacji gazowej rozhermetyzowanego przedziału przy napięciu roboczym,
- 2 - wytrzymałość izolacji gazowej przy napięciu probierczym łączeniowym,
- 3 - wytrzymałość izolacji gazowej przy napięciu probierczym udarowym piorunowym,
- 4 - wytrzymałość skośną długotrwałą izolatora odstępnikowego (dla $R_2/R_1 < 2,5$),
- 5 - graniczną nierównomierność pola elektrycznego ($R_2 < 20 R_1$)

Fig. 4.4. The minimal permissible transverse dimensions of the 420 kV buses insulated with SF_6 compressed to 0,25 MPa (acc. to [27] and [29])

considering:

- 1 - electric strength of gaseous insulation of a decompressed clearance under operating voltage,
- 2 - electric strength of gaseous insulation under the switching surge test voltage,
- 3 - electric strength of gaseous insulation under the lightning surge test voltage,
- 4 - long term across electric strength of the spacer (for $R_2/R_1 < 2,5$),
- 5 - limiting electric field nonuniformity ($R_2 < 20 R_1$)

- wymaganiami w zakresie wytrzymałości udarowej piorunowej (dla mniejszych wartości R_1),
- wymaganiami w zakresie długotrwałej wytrzymałości skrośnej izolatorów (dla większych wartości R_1).

Na rysunkach przedstawiono również zależności między promieniami R_1 a długościami gazowych odstępów izolacyjnych $a = R_2 - R_1$, które można wyznaczyć bezpośrednio dla określonej wartości promienia R_2 (jak pokazano na przykładzie jednego z rozwiązań dopuszczalnych).

Zgodnie z założeniami dokonanymi w podrozdziale 4.2.3 dane wejściowe do obliczeń optymalizacyjnych przewodów szynowych można uzyskiwać w dwojaki sposób:

- a) w wyniku realizacji programu obliczeniowego IZOLACJA (w wypadku przewodu trójbiegunowego również programu obliczeniowego ODIZ_3),
- b) poprzez wybór kilku uzasadnionych kombinacji wartości promieni R_1 i R_2 (lub odpowiadających im średnic) z rys.4.2-4.4.

Tablica 4.4 zawiera wyniki obliczeń sprawdzających dla 9 wariantów rozwiązań dopuszczalnych przewodów szynowych 123, 245 i 420 kV; rozważano 3 rozwiązania dla każdego napięcia roboczego. Warianty te są zróżnicowane pod względem stopnia nierównomierności pola elektrycznego oraz zapasu wytrzymałości elektrycznej izolacji przy napięciu roboczym i napięciach probierczych. Najlepsze własności wykazują warianty oznaczone symbolami w2, w4 i w9, ponieważ charakteryzują się:

- umiarkowaną nierównomiernością pola elektrycznego w izolacji gazowej i stałej,
- dostatecznymi zapasami wytrzymałości elektrycznej doraźnej (przy napięciach probierczych) i długotrwałej (przy przemiennym napięciu roboczym).

Dopuszczalne rozwiązania konstrukcyjne izolatorów wsporczych i grodziowych dla powyższych wariantów wymiarowych zaproponowano w podrozdz.4.3.3.

Wybrane rozwiązania dopuszczalne gazoszczelnych przewodów szynowych 123 - 420 kV ze względu na wymagania elektryczne stawiane izolacji

Najwyższe dopuszczalne napięcie urazdzenia U_m	Oznaczenie wariantu rozwiązania	Główne wymiary poprzeczne			Współczynniki niedeterminowania pola elektrycznego		Współczynniki zapobiegające wytrzymałości elektrycznej				Rodzaj izolatora szynowego lub gazonowego		
		średnica zewnętrzna szyny (średnica przolewnej)	średnica wewnętrzna szyny izolacyjnego	Długość szynowego odstępca izolacyjnego $a = R_2 - R_1$	Parametr wymiarowy $m = \frac{R_2}{R_1}$	w odrodku gazowym $\beta = \frac{m-1}{U_{pr1}}$	przy napięciach probierczych		przy napięciu roboczym				
							średnica zewnętrzna szyny izolacyjnego U_{wz}	średnica wewnętrzna szyny izolacyjnego U_{wz}	średnica zewnętrzna szyny izolacyjnego U_{pr1}	średnica wewnętrzna szyny izolacyjnego U_{pr2}		średnica zewnętrzna szyny izolacyjnego U_{wz}	średnica wewnętrzna szyny izolacyjnego U_{wz}
		$2R_1$	$2R_2$		$m = \frac{R_2}{R_1}$	$\beta = \frac{m-1}{U_{pr1}}$	$\beta_{LZ} (m)$	$k_1 \cdot \frac{U_{wz}}{U_{pr1}}$	$k_2 \cdot \frac{U_{wz}}{U_{pr2}}$	$k_3 \cdot \frac{U_{wz}}{U_{pr3}}$	$k_4 \cdot \frac{U_{wz}}{U_m}$	$k_5 \cdot \frac{E_d}{MaxEM^*}$	
		mm											
123	w1	80	200	60	2,5	1,64	1,3	1,72	1,25	—	2,45	1,62	dyskowy
	w2	100	250	75	2,5	1,64	1,3	2,15	1,37	—	3,06	2,03	dyskowy
	w3	120	250	65	2,08	1,47	1,17	2,08	1,52	—	2,96	1,95	dyskowy
245	w4	100	350	125	3,5	2,0	1,6	1,51	1,13	—	2,40	1,38	dyskowy
	w5	120	350	115	2,92	1,79	1,09	1,55	1,17	—	2,16	1,86	dyskowy
	w6	150	350	100	2,33	1,58	1,25	1,53	1,15	—	2,13	1,41	dyskowy
420	w7/1	420	500	190	4,17	2,82	1,22	—	1,12	1,21	1,68	1,61	dyskowy
	w7/2						1,12	—	—	—	1,75	1,75	kiełichowy
	w8/1	150	500	175	3,33	1,94	1,55	—	1,18	1,27	1,77	1,16	dyskowy
w8/2							1,43	—	—	—	1,26	1,26	kiełichowy
w9/1	200	500	150	2,5	1,64	1,3	1,3	—	1,20	1,29	1,79	dyskowy	
w9/2							1,2	—	—	—	1,29	1,29	kiełichowy

Uwagi: 1) Na podstawie wyników obliczeń numerycznych; dla izolatorów dyskowych $\beta_{LZ} \approx 0,3 (m - 2,5) + 1,3$ a dla izolatorów kiełichowych $\beta_{LZ} \approx 0,32 (\beta - 1,6)$ (patrz tab. 2.3.2)
 2) Napięcia wytrzymałowe wg wzoru (4.3) dla odstępca gazowego o ciśnieniu roboczym 0,25 MPa i napięciach: przemennym (U_m), uderzeniowym (U_{uz}) i uderzeniowym łączeniowym ujemnym (U_{uz}); U_{pr1} , U_{pr2} , U_{pr3} - znamionowe napięcia probiercze (tabl. 4.1) porównowym ujemnym (U_{uz}) i uderzeniowym łączeniowym ujemnym (U_{uz}); U_{pr1} , U_{pr2} , U_{pr3} - znamionowe napięcia probiercze (tabl. 4.1)
 4) U_{wz} - napięcie wytrzymałowe przez niszczymyślaną przezroczystość szyny (4.5); 5) Max EM* - największe napięcie pola elektrycznego w izolatorze wg wzoru (4.7); $E_d = 2,5 \text{ kV/mm}$ - największe dopuszczalne długotrwale napięcie pola elektrycznego wewnątrz izolatora

4.3. Wymiarowanie i kształtowanie izolacji stałej

4.3.1. Wymagane właściwości izolatorów wsporczych i grodziowych

Izolatory wsporcze i grodziowe są ważnymi, a jednocześnie niewralgicznymi elementami składowymi izolacji gazoszczelnych przewodów szynowych. Oprócz zadań elektroizolacyjnych, spełniają one określone funkcje mechaniczne. Podstawowym zadaniem izolatorów wsporczych jest elektryczne izolowanie szyny prądowej od osłony zewnętrznej - przy jednoczesnym zapewnieniu trwałej współosiowości tych elementów konstrukcyjnych. W wypadku izolatorów grodziowych dochodzi ponadto zadanie, polegające na skutecznym i trwałym uszczelnieniu przedziałów gazoszczelnych przewodu.

Izolatory wsporcze i grodziowe muszą spełniać określone wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej skrośnej i powierzchniowej, a ponadto w zakresie: odporności cieplnej, wytrzymałości mechanicznej statycznej i dynamicznej oraz jakości wykonania poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Współdecydują one o niezawodności, masie, koszcie i warunkach montażu przewodu szynowego. Ze względu na możliwość wystąpienia bardzo niekorzystnych wyładowań powierzchniowych oraz procesów starzeniowych, izolatory należy traktować jako najsłabsze ogniwo izolacji przewodów szynowych.

Najważniejsze wymagania techniczne stawiane izolatorom wsporczym i grodziowym w wysokonapięciowych przewodach szynowych izolowanych sprężonym SF_6 zestawiono w opracowaniach [27] i [28]. Wynika stąd, że jednoczesne spełnienie wszystkich tych wymagań jest praktycznie niemożliwe, a najtrudniejsze problemy techniczne i technologiczne związane z konstruowaniem i wytwarzaniem izolatorów polegają na:

- niedopuszczeniu do powstawania i rozwoju jakichkolwiek wyładowań niezupełnych,
- zapewnieniu dostatecznej wytrzymałości elektrycznej skrośnej i powierzchniowej.

Powyższe wymagania elektryczne można spełnić poprzez: dobór odpowiedniego materiału izolacyjnego stałego, odpowiednie ukształtowanie geometryczne powierzchni bocznych izolatorów i stosowanie wewnętrznych lub zewnętrznych ekranów sterujących w przewodach szynowych o napięciach roboczych nie mniejszych niż 420 kV.

Większość wymagań technicznych i technologicznych stawianych materiałom, służącym do wytwarzania izolatorów wsporczych i grodziowych, spełniają w dużym zakresie różnorodne kompozycje żywic epoksydowych, zawierające odpowiednio dobrane napełniacze nieorganiczne (patrz opracowania [21], [22], [23] i [74]). Wytrzymałość elektryczna izolatorów epoksydowych zależy od następujących czynników:

- jakości wykonania i montażu elementów konstrukcji (szczególnie na styku izolatorów z szyną prądową),
- stanu powierzchni izolatorów (stopnia szorstkości i zdolności do adhezji cząstek zanieczyszczeń),
- kształtu geometrycznego izolatorów.

Kształt geometryczny izolatorów odstępnikowych jest uzależniony od rodzaju konstrukcji przewodu szynowego, poziomu jego napięcia roboczego i innych czynników. W praktyce stosuje się najczęściej dwa podstawowe rodzaje izolatorów: dyskowe i kielichowe. Izolatory dyskowe są prostsze do wykonania, lecz ich niektóre właściwości mechaniczne mogą być gorsze od właściwości izolatorów kielichowych (np. odporność na zwarciove siły elektrodynamiczne). Nieodpowiednio ukształtowane izolatory dyskowe powodują znaczne zniekształcenia pola elektrycznego w pobliżu szyny prądowej.

Izolatory kielichowe są dość trudne do wykonania i wymagają zazwyczaj większej ilości materiału izolacyjnego. Charakteryzują się one dobrymi własnościami mechanicznymi i nie powodują - przy odpowiednim ukształtowaniu geometrycznym - dużych zniekształceń pola elektrycznego wewnątrz osłony przewodu. Izolatory kielichowe są uwarstwione prawie szeregowo z dielektrykiem gazowym, który odciąża w dużej mierze dielektryk stały. Dłuższa droga upływu pozwala na zwiększenie ich wytrzymałości powierzchniowej w porównaniu z alternatywnymi izolatorami dyskowymi. Cechy te mają istotne znaczenie w wypadku przewodów szynowych bardzo wysokich napięć, począwszy od 420 kV.

4.3.2. Kryteria doboru i wymiarowania izolatorów w gazoszczelnych przewodach szynowych 123-420 kV

Ogólna zasada obowiązująca w zakresie odpowiedniego kształtowania izolatorów odstępnikowych polega na wyborze stosownej kombinacji ich skoordynowanych wymiarów geometrycznych (średnic, kształtów profili krawędzi bocznych itd.) oraz - ewentualnie - wewnętrznych lub zewnętrznych ekranów

sterujących (np. promieni koła półtoroidu, głębokości wpustu ekranu w głaz szyny prądowej itd.). Dobierając kształt izolatora ze względu na stawiane mu wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej (tabl.4.5), należy kierować się następującymi kryteriami:

- 1) Rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego (wewnątrz i wokół powierzchni izolatora) powinien być możliwie najmniej nierównomierny.
- 2) Natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora w normalnych warunkach pracy urządzenia (przy napięciu roboczym) powinno być możliwie małe, a jego największa wartość nie może przekraczać poziomu uznanego za poziom dopuszczalny długotrwale.
- 3) Natężenie pola elektrycznego w dowolnym punkcie powierzchni izolatora nie powinno przekraczać największego natężenia pola elektrycznego w gazowym odstępie izolacyjnym.

Pierwsze kryterium ma na celu zapewnienie możliwie efektywnego wykorzystania właściwości elektroizolacyjnych sprężonego SF_6 i współpracującego z nim dielektryku stałego. Jest to o tyle istotne, że wytrzymałość sprężonego gazu nie różni się znacznie od wytrzymałości elektrycznej epoksydowych kompozycji izolatorowych.

Drugie kryterium wynika z konieczności zapewnienia izolatorom dostatecznej trwałości i odporności na różnorodne procesy podczas długotrwałej eksploatacji przewodu szynowego. Ze względu na trudności w zapewnieniu dostatecznej jednolitości kompozytów izolatorowych oraz bardzo dużej czystości SF_6 w czasie eksploatacji, największe dopuszczalne długotrwale natężenie pola elektrycznego wewnątrz epoksydowych izolatorów odstępnikowych jest przyjmowane na dość niskim poziomie, mieszczącym się w przedziale od 2 do 3,5 kV/mm (wartości skuteczne).

Trzecie kryterium wynika z konieczności ograniczenia do minimum ryzyka wystąpienia przeskoku powierzchniowego. W praktyce można to uzyskać wtedy, gdy największa wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatorów będzie mniejsza o ok. 5 % od największego natężenia pola w gazowym odstępie izolacyjnym. Kształt izolatora może być również ustalany w ten sposób, aby składowa wektora natężenia pola elektrycznego - styczna do powierzchni bocznej izolatora - nie przekraczała wartości największego natężenia pola elektrycznego, występującego:

- wewnątrz izolatora (kryterium ostrzejsze),
- w gazowym odstępie izolacyjnym (kryterium łagodniejsze).

Tablica 4.5

Kryteria wymiarowania izolatorów odstępnikowych w gazoszczelnych przewodach szynowych (wg [29] i [69])

KRYTERIUM OBLICZENIOWE		
	Rodzaj kryterium	Sformułowanie
1	Minimalne zakłócenie rozkładu pola elektrycznego w przewodzie	Rozkład przestrzenny pola elektrycznego w obszarze zainstalowania izolatora zbliżony do rozkładu w odstępie gazowym
2	Dostateczna wytrzymałość elektryczna skośna długotrwała izolatora przy napięciu roboczym	Największe natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora: $\text{Max EM}^* < E_d^{1)}$
3	Dostateczna wytrzymałość elektryczna powierzchniowa przy napięciu roboczym	Największe natężenie pola elektrycznego na powierzchni izolatora: $\text{Max EM}_z < 0.95 \text{ Max EM}^{2)}$
<p>Uwagi: 1) $E_d = 2,5 \text{ kV/mm}$ - największe dopuszczalne długotrwałe natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora; 2) Max EM - największe natężenie pola elektrycznego w odstępie gazowym</p>		

Obraz pola elektrycznego w pobliżu i wewnątrz izolatorów można zmieniać nie tylko poprzez zmianę ich ukształtowania geometrycznego i odpowiedni dobór parametrów dielektryku stałego (głównie przenikalności elektrycznej kompozycji), ale również poprzez stosowanie wewnętrznych lub zewnętrznych elektrostatycznych ekranów sterujących. Dzięki zastosowaniu jednego z takich ekranów rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego ulega częściowemu wyrównaniu. Zastosowanie ekranów sterujących jest jednak uzasadnione tylko w niektórych przewodach szynowych, o napięciu roboczym nie mniejszym niż 420 kV (patrz sprawozdania [27] i [28]).

4.3.3. Zbiór rozwiązań dopuszczalnych i dane do obliczeń optymalizacyjnych

Zbiór rozwiązań izolatorów odstępnikowych dla przewodów szynowych 123-420 kV, dopuszczalnych ze względu na stawiane im wymagania elektryczne, wyznacza się na podstawie podanych powyżej kryteriów doboru i wymiarowania. Wymiary geometryczne izolatora dyskowego lub kielichowego powinny być tak dobrane, aby można było spełnić jednocześnie:

- 1) kryterium możliwe najmniejszego zakłócenia rozkładu przestrzennego pola elektrycznego po wprowadzeniu izolatora między szynę prądową a osłonę przewodu,
- 2) kryterium dostatecznej wytrzymałości elektrycznej skrośnej długotrwałej izolatora przy napięciu roboczym,
- 3) kryterium dostatecznej wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej izolatora przy napięciu roboczym.

Ogólne kryterium 1) jest trudne do jednoznacznego sformułowania pod względem ilościowym, jakkolwiek pole elektryczne wewnątrz i wokół izolatora jest zawsze znacznie bardziej nierównomierne niż w przestrzeni wypełnionej wyłącznie sprężonym SF₆. Można go wyrazić, na przykład, poprzez dopuszczalną względną różnicę wartości współczynników nierównomierności pola elektrycznego wewnątrz izolatora i w odstępie gazowym (patrz podrozdz.4.2.2 i załącznik 2).

Kryterium 2) można wyrazić następująco:

$$\text{Max } EM^{\bullet} < E_d \quad (4.13)$$

gdzie:

Max EM^{\bullet} - największa wartość modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora w warunkach roboczych, w kV/mm;

$E_d = 2,5$ kV/mm - największe dopuszczalne długotrwałe natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatora.

Kryterium 3) jest równoznaczne z następującym warunkiem:

$$\text{Max } EM_z < \text{Max } EM \cong 0,95 \text{ Max } EM \quad (4.14)$$

w którym:

Max EM_z i Max EM - największa wartość modułu wektora natężenia pola elektrycznego odpowiednio na powierzchni bocznej izolatora (analizowana od strony ośrodka gazowego) i w gazowym odstępie izolacyjnym, w kV/mm.

Wartości modułów wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora i na jego powierzchniach bocznych można wyznaczyć jedynie eksperymentalnie. W tym celu wykonano wiele serii obliczeń numerycznych dla modeli obliczeniowych izolatorów dyskowych i kielichowych, odwzorowujących rzeczywiste konstrukcje izolacyjne w jednobiegunowych hermetyzowanych przewodach szynowych 123-420 kV. Wyniki tych obliczeń, zamieszczone w załączniku 2, stanowią jednocześnie informację o dopuszczalności rozwiązań przewodów szynowych, zaproponowanych w podrozdz. 4.2.3.

Z wykonanych obliczeń numerycznych wynika, że:

- przewody szynowe 123-420 kV, oznaczone w tabl. 4.4 jako warianty w2, w4 i w9, tworzą zbiór rozwiązań dopuszczalnych również ze względu na wymagania w zakresie ukształtowania geometrycznego rozważanych izolatorów wsporczych i grodziowych¹⁾;
- podstawowym rodzajem konstrukcji izolatora wsporczego i grodziowego, szczególnie dla przewodów szynowych o napięciach roboczych 123 i 245 kV, powinien być izolator dyskowy;
- izolatory kielichowe mogą być alternatywnym rozwiązaniem konstrukcyjnym jedynie w przewodach szynowych 420 kV (jeśli zadecydują lepsze właściwości elektroizolacyjne i większa odporność na oddziaływania dynamiczne);
- izolatory odstępnikowe w przewodach szynowych 123 i 245 kV nie wymagają stosowania elektrostatycznych ekranów sterujących;
- izolatory odstępnikowe w przewodach szynowych 420 kV mogą być wyposażone w odpowiednio ukształtowane zewnętrzne ekrany sterujące (ekrany wewnętrzne zwiększają natężenie pola elektrycznego wewnątrz izolatorów);
- w wypadku izolatorów kielichowych należy dążyć do takiego ich ukształtowania w pobliżu szyny prądowej, aby względny promień krzywizny ich zewnętrznej powierzchni bocznej był możliwie mały (w odniesieniu do największej grubości ścianki nie powinien przekraczać wartości 0,5).

Główne wymiary geometryczne analizowanych izolatorów dyskowych zestawiono w tabl. 4.6. Dla każdego z wariantów konstrukcyjnych zaproponowano dwa możliwe rozwiązania wymiarowe o tych samych średnicach zewnętrznych, różniących się jednak:

¹⁾ Jest to słuszne także dla pozostałych wariantów wymiarowych przewodów z tabl. 4.4, a w szczególności dla przewodów nie różniących się od wariantów w2, w4 i w9 długościami gazowych odstępów izolacyjnych. Zakres obliczeń numerycznych izolatorów nie obejmował jednak wszystkich kombinacji wymiarów poprzecznych przewodów wynikających ze zbiorów danych na rys. 4.2-4.4.

- a) obliczeniowymi grubościami ścianek przy powierzchni szyny prądowej i osłony przewodów (zaprezentowano wariant słabszy i mocniejszy pod względem wytrzymałości mechanicznej),
- b) długością promienia koła (R_{01}), kształtującego powierzchnię boczną izolatorów (patrz rys. Z2.1).

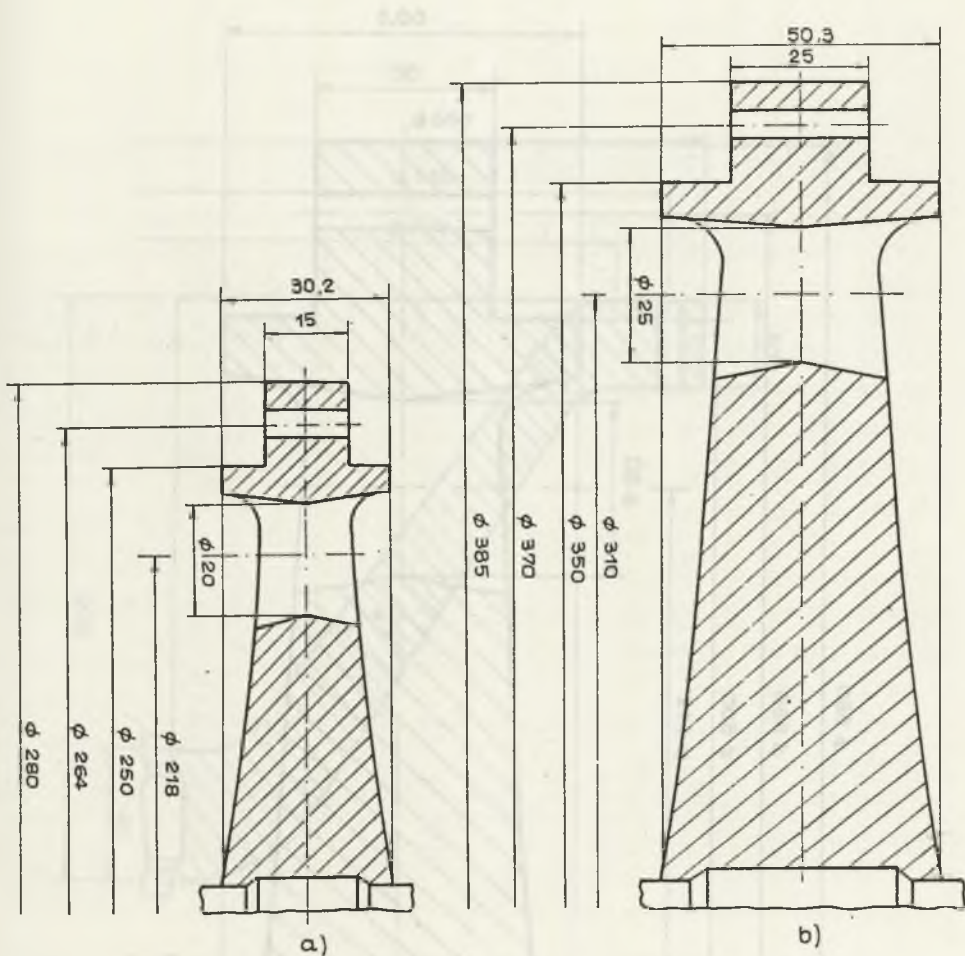
Szkice wymiarowe półprzekrojów izolatorów dyskowych o mniejszych grubościach ścianek przy osłonie przewodu są pokazane na rys. 4.5 i 4.6. Szkic wymiarowy półprzekroju dopuszczalnego rozwiązania izolatora grodziowego kielichowego dla przewodu szynowego 420 kV przedstawia rys. 4.7.

Zaproponowane rozwiązania wymiarowe izolatorów odstępnikowych należy traktować jako modele, umożliwiające określenie danych wejściowych do dalszych obliczeń sprawdzających i optymalizacyjnych (masa, cena). Nie są one projektami technicznymi, dlatego też nie podano szeregu istotnych detali konstrukcyjnych i wykonawczych (m.in. dopuszczalnych tolerancji wymiarowych oraz szczegółów uwarunkowanych sposobem mocowania i uszczelniania).

Na podstawie rezultatów wykonanych obliczeń numerycznych można było ustalić jedynie najważniejsze prawidłowości w zakresie wzajemnych uwarunkowań wybranych właściwości elektroizolacyjnych i ukształtowania geometrycznego izolatorów. Uściślenie tych prawidłowości będzie możliwe po wykonaniu obliczeń sprawdzających dla wielu różnorodnych modeli izolatorów odstępnikowych. Przed przystąpieniem do opracowywania dostatecznie udokumentowanego typoszeregu izolatorów wsporczych i grodziowych należy dokonać jednoznacznych ustaleń w zakresie materiałowym, technologicznym i konstrukcyjnym. Dotyczy to m.in. złączy szyn prądowych oraz połączeń i uszczelnień osłony zewnętrznej przewodów, współdecydujących o rozwiązaniach szczegółów konstrukcyjnych izolatorów.

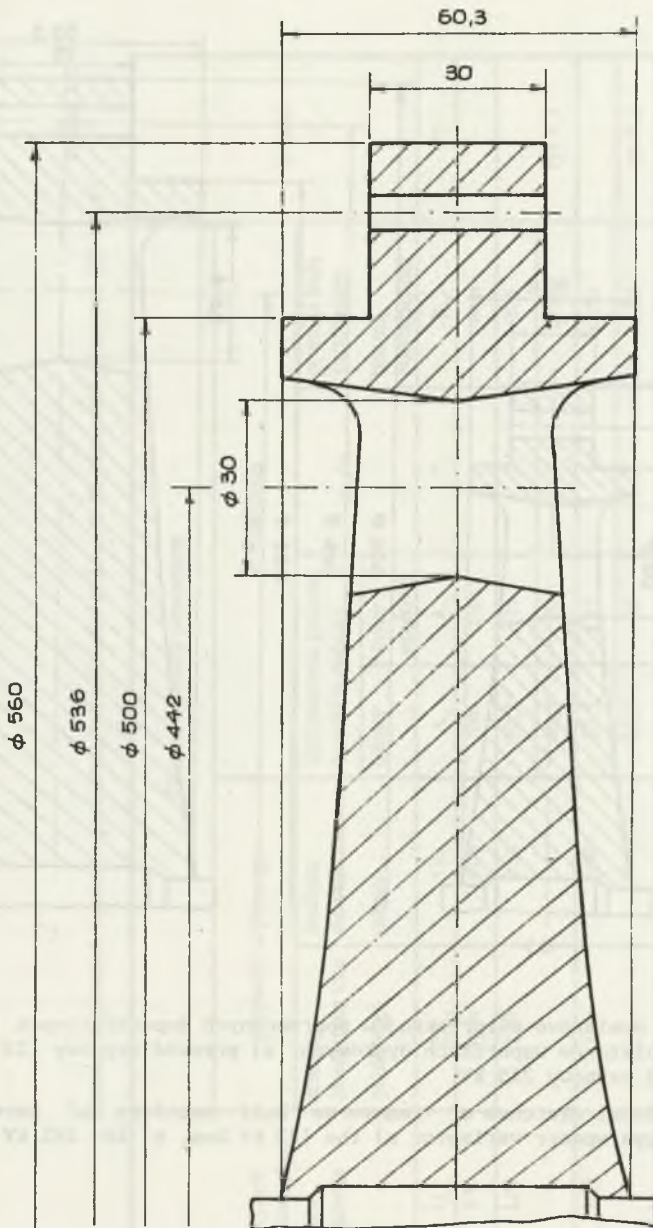
Tablica 4.6
Zestawienie głównych wymiarów geometrycznych izolatorów dyskowych dla przewodów szynowych 123-420 kV

Najwyższe dopuszczalne napięcie urządzenia	Główne wymiary poprzeczne										Uwagi
	przewodu szynowego					izolatora					
	średnica zewnętrzna toru prądowego	średnica wewnętrzna osłony	obliczeniowa grubość ścianki w pobliżu osłony		promień koła kształtujący bocznią powierzchnię	A_1/A_2	obliczeniowa grubość ścianki w pobliżu osłony		promień koła kształtujący bocznią powierzchnię	Uwagi	
			$2R_1$	$2R_2$			A_1	A_2			
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
123	100	250	30,2	15	2	2	375	290	1250	rys.4.5	
	100	350	40,3	20			2				
245	100	350	37,5	25	1,5	2	625	1500	rys.4.5		
	200	500	50,3	25			2				
420	200	500	45	30	1,5	2	750	1500	rys.4.5		
	200	500	60,3	30			2			750	



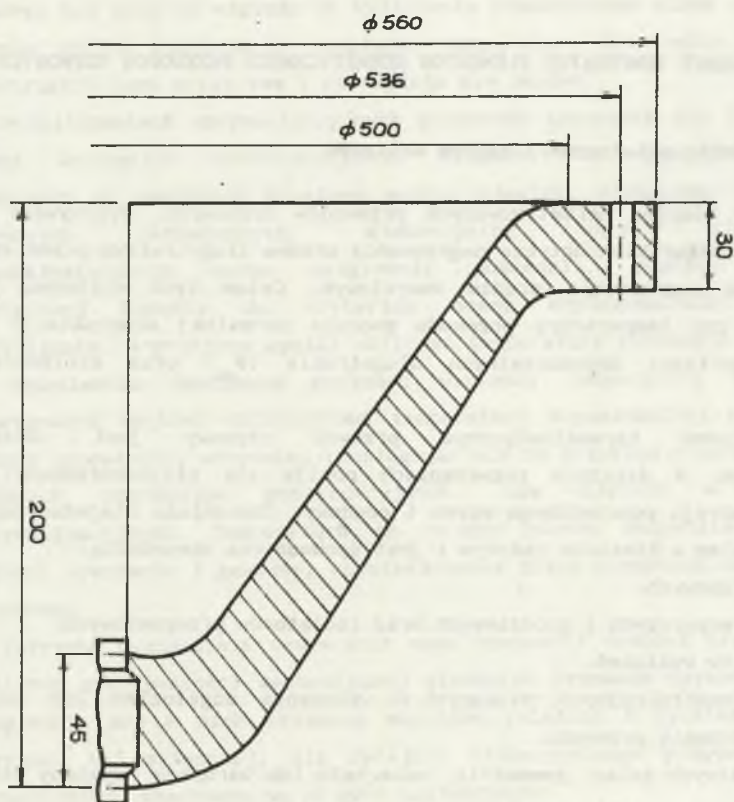
Rys. 4.5. Szkice wymiarowe półprzekrojów poprzecznych dopuszczalnych rozwiązań izolatorów wsporczych dyskowych: a) przewód szynowy 123 kV, b) przewód szynowy 245 kV

Fig. 4.5. Dimensional sketches of transverse half sections of permissible disc-type spacer variants: a) the 123 kV bus, b) the 245 kV bus



Rys. 4.6. Szkic wymiarowy półprzekroju poprzecznego dopuszczalnego rozwiązania izolatora wsporczeo dyskowego w przewodzie szynowym 420 kV

Fig. 4.6. The dimensional sketch of a tranverse half section of the permissible post disc-type spacer variant for the 420 kV bus



Rys. 4.7. Szkic wymiarowy półprzekroju poprzecznego dopuszczalnego rozwiązania izolatora kielichowego w przewodzie szynowym 420 kV

Fig. 4.7. The dimensional sketch of a transverse half section of the permissible conical-type spacer variant for the 420 kV bus

5. WYZNACZANIE TEMPERATUR ELEMENTÓW HERMETYCZNYCH PRZEWODÓW SZYNOWYCH

5.1. Założenie metodyczne i zakres obliczeń

Obliczenia cieplne hermetyzowanych przewodów szynowych, wykonywane dla potrzeb konstruktorskich dotyczą nagrzewania prądem długotrwałym przemiennym (50 Hz) oraz nagrzewania prądem zwarciowym. Celem tych obliczeń jest sprawdzenie, czy temperatura przewodu podczas normalnej eksploatacji nie przekroczy wartości dopuszczalnych długotrwanie (ϑ_{dd}) oraz krótkotrwanie (ϑ_{dz}).

Pod względem termokinetycznym przewód szynowy jest obiektem niejednorodnym. W dalszych rozważaniach pomija się niejednorodności na obwodzie przekroju poprzecznego szyny i obudowy. Zasadnicza niejednorodność występuje bowiem w kierunku osiowym i jest spowodowana obecnością:

- połączeń stykowych,
- izolatorów wsporczych i grodziowych oraz izolatorów przepustowych,
- kompensatorów wydłużeń,
- elementów konstrukcyjnych, służących do wykonania odgałęzień lub zmiany kierunku ułożenia przewodu,
- innych lokalnych zmian, geometrii, materiału lub warunków wymiany ciepła (zależnie od szczegółów konstrukcyjnych przewodu).

Konsekwencją niejednorodności osiowej jest nierównomierny rozkład temperatury wzdłuż przewodu szynowego, wykazujący najczęściej wyraźne ekstrema. Należy podkreślić, że wartości maksymalne temperatury w rzeczywistych przewodach szynowych są na ogół wyższe od wartości obliczanych przy założeniu jednorodności przewodu.

Metodę i algorytm obliczania osiowego rozkładu temperatury w przewodzie szynowym niejednorodnym, z uwzględnieniem nieliniowości parametrów termokinetycznych, przedstawiono w opracowaniach [14] i [42]. Zaproponowano tam program obliczeniowy o nazwie TORn, napisany w języku Turbo Pascal (wersja 5.0) i przystosowany do współpracy z mikrokomputerami typu IBM PC,

przeznaczony do wykonywania ukierunkowanych badań konstruktorskich. Umożliwia on wprawdzie stosunkowo szczegółowy opis struktury konstrukcyjnej przewodu, ale wymaga wprowadzania do bazy danych dużej liczby informacji. Dlatego też oraz ze względu na wydłużenie sumarycznego czasu obliczeń (dużą liczbę opcji) wyznaczanie rozkładów temperatury dla celów optymalizacji konstrukcji jest uciążliwe i nie wydaje się celowe.

W obliczeniach optymalizacyjnych przewodów szynowych nie bierze się pod uwagę szczegółów konstrukcyjnych. Uzasadnia to wykonywanie obliczeń cieplnych na podstawie prostego modelu zjawisk, właściwego dla przewodów szynowych jednorodnych. Niekorzystny wpływ niejednorodności termokinetycznych można uwzględnić pośrednio, poprzez wprowadzenie ilościowej korekty do kryterium oceny dopuszczalności technicznej rozwiązania. W praktyce wyniki obliczeń temperatury porównuje się zazwyczaj z odpowiednio obniżonym poziomem wartości temperatury dopuszczalnej. Skorygowaną wartość obliczeniową temperatury dopuszczalnej należy ustalić jednak odpowiednio wcześniej (posługując się na przykład programem TORn) dla zadanych szczegółów konstrukcyjnych, nie ujętych w obliczeniach optymalizacyjnych. Temperatura ta zależy przede wszystkim od rodzaju, jakości wykonania i gęstości rozmieszczenia złącz szynowych wzdłuż przewodu szynowego.

Potrzeba wyznaczania temperatur może zachodzić również przy wykonywaniu obliczeń wytrzymałości mechanicznej elementów przewodu szynowego, ponieważ uwzględnia się w nich składową naprężeń związaną z dylatacją termiczną. Wartości tej składowej, dla skrajnie niekorzystnego przypadku dylatacji ograniczonej, szacowane są od góry następująco:

$$\sigma_d = \epsilon_1 E, \quad (5.1)$$

gdzie:

$\epsilon_1 = \Delta l/l$ - wydłużenie względne szyny lub obudowy w warunkach dylatacji swobodnej, proporcjonalne do przyrostu temperatury ponad temperaturę odniesienia (w której $\sigma_d = 0$),

E - moduł Younga.

Wartości te są zwykle zbyt duże, dlatego w praktyce stosuje się kompensatory wydłużeń o odpowiedniej charakterystyce. Kompensatory obniżają naprężenia dylatacyjne przewodu, zgodnie z przybliżoną zależnością:

$$\sigma_d = \begin{cases} k_k \Delta l & \text{dla } \Delta l < \Delta L_k \\ k_k \Delta L_k + \frac{\Delta l - \Delta L_k}{l} E & \text{dla } \Delta l > \Delta L_k \end{cases}, \quad (5.2)$$

w której:

ΔL - zakres kompensatora,

k_k - współczynnik sprężystości kompensatora (dla charakterystyki liniowej),

l - długość odcinka kompensowanego.

Konstruktora mogą również interesować przemieszczenia szyny względem obudowy z uwagi na ocenę stopnia zagrożenia spowodowanego dodatkowymi naprężeniami mechanicznymi w izolatorach.

5.2. Bilans cieplny i model obwodowy dla stanu cieplnie ustalonego

Podstawą budowy modelu matematycznego zjawisk termokinetycznych, zachodzących w elementach przewodów szynowych (i jego reprezentacji obwodowej) jest bilans cieplny. Szczegółowe obliczenia konstruktorskie prowadzone są na podstawie dwuwymiarowego modelu zjawisk, opisującego osiowy i promieniowy rozkład temperatury w przewodzie szynowym. Taki model obwodowy i odpowiadający mu program obliczeniowy przedstawiony jest w opracowaniu [14]. Rodzaj i zakres obliczeń wykonywanych w ramach systemu służącego do optymalizacji konstrukcji przewodów szynowych uzasadnia korzystanie z modelu jednowymiarowego, tzn. rozpatrywanego w kierunku promieniowym.

W bilansie cieplnym elementarnego lub jednostkowego wycinka jednobiegunowego (współosiowego) przewodu szynowego występują z reguły trzy grupy składowych:

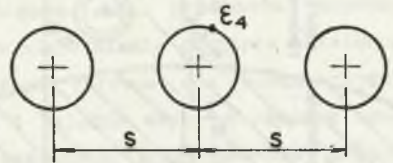
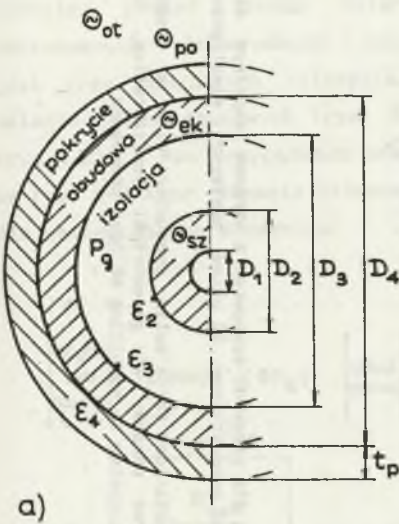
- ciepło wytworzone wewnątrz rozważanego wycinka,
- ciepło przepływające przez powierzchnie graniczne wycinka,
- ciepło akumulacyjne, zużywane na nagrzewanie wycinka przewodu.

W przypadku przewodu szynowego o obudowie wspólnej (trójbiegunowego) przyjęto, że temperatury poszczególnych szyn prądowych są jednakowe. Przyjęcie takiego założenia upraszczającego, uzasadnionego w zastosowaniach technicznych, oznacza, że:

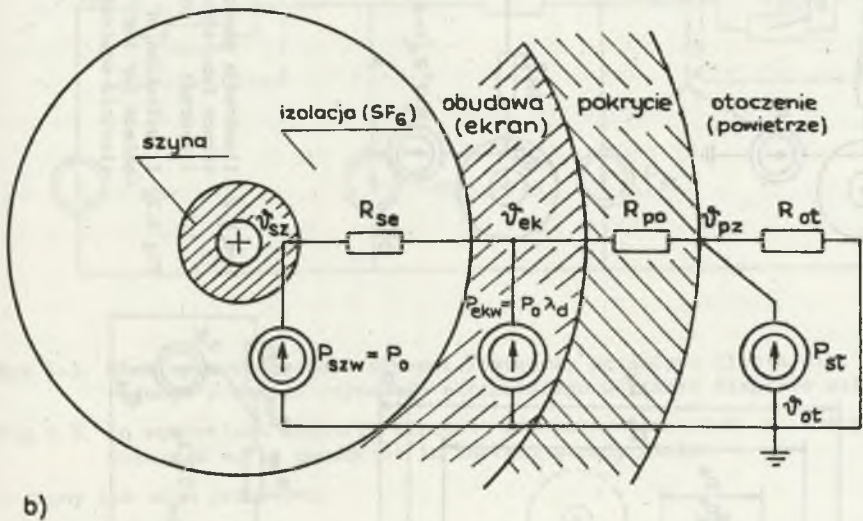
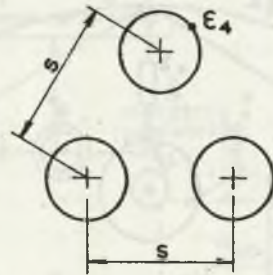
- pomija się wymianę ciepła między szynami,
- rozważa się łącznie wymianę ciepła między szynami a obudową, tzn. nie rozróżnia się udziału poszczególnych szyn prądowych.

Przewód fazowy

Układ płaski przewodów fazowych

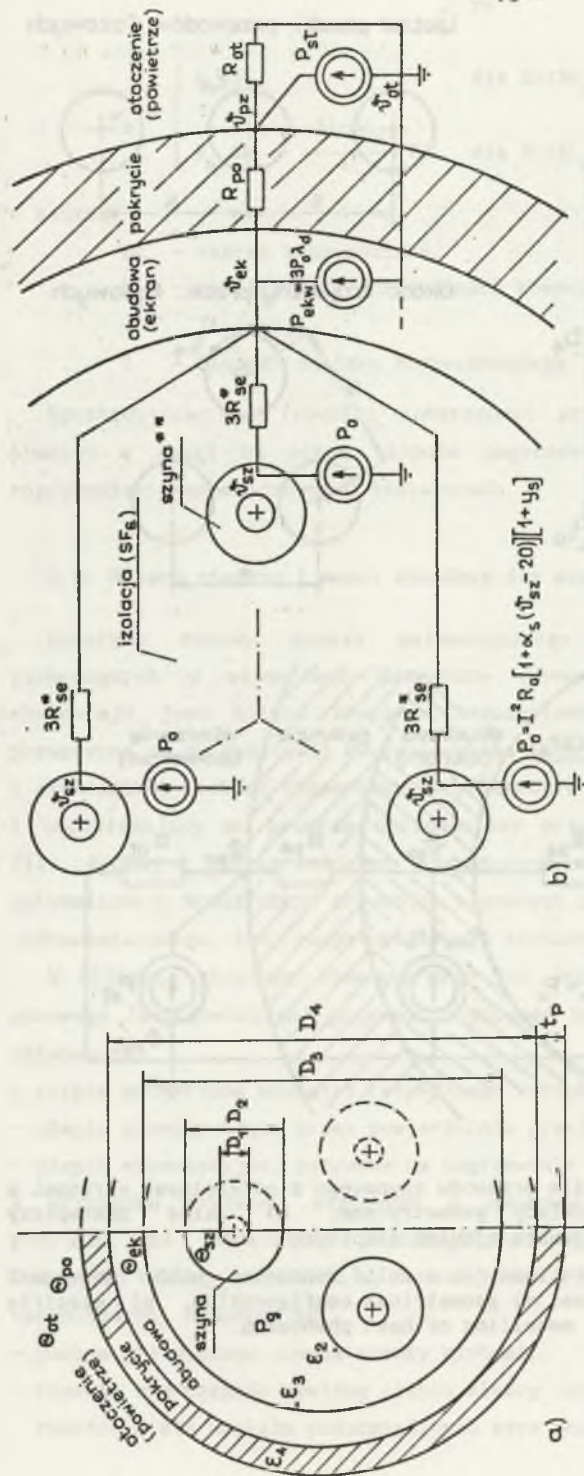


Układ trójkątny przewod. fazowych



Rys. 5.1. Ilustracja oznaczeń dla przewodu szynowego z oddzielnymi ekranami w każdej fazie: a) układy geometryczne, b) układ zastępczy elektryczny do modelowania zjawisk cieplnych

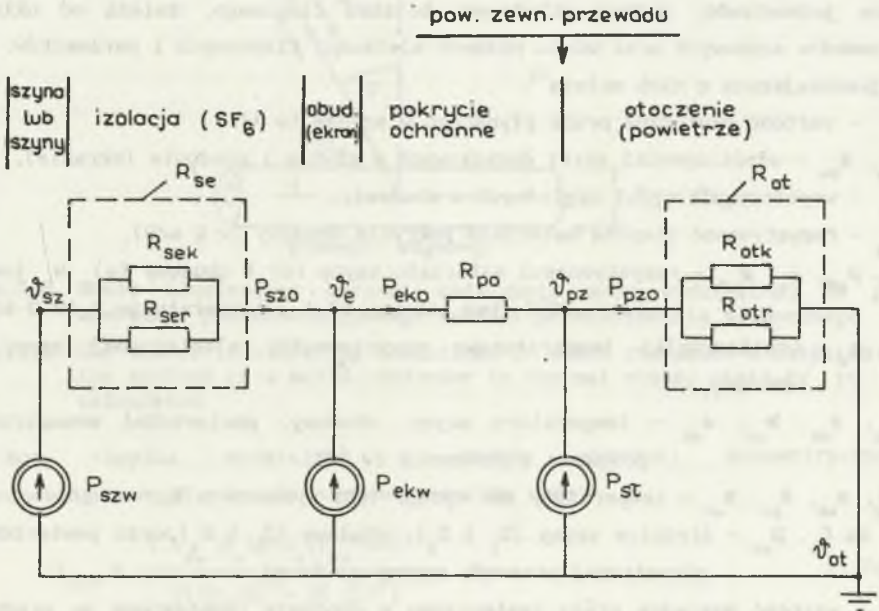
Fig. 5.1. Illustration of denotations for a solid conductor with individual shields in every phase: a) geometrical configuration, b) electric equivalent system to modelling of heat phenomena



Rys. 5.2. Ilustracja oznaczeń dla przewodu szynowego z ekranem wspólnym dla trzech faz: a) układ geometryczny, b) układ zastępczy elektryczny (roboczy)

Fig. 5.2. Illustration of denotations for a solid conductor with a common shield for the three phases: a) geometrical configuration, b) electric equivalent system to modelling of heat phenomena

Formalna postać równań bilansu cieplnego dla przewodów szynowych ekranowanych - jednorodnych i znajdujących się w stanie cieplnie ustalonym - jest przy powyższych założeniach jednakowa zarówno dla koncentrycznych układów jednobiegunowych (rys. 5.1), jak i układów szyn ze wspólną obudową (rys.5.2). W obu przypadkach można więc zastosować model obwodowy pokazany na rys. 5.3 oraz równania bilansowe mocy jednostkowych (w W/m), obowiązujące dla następujących elementów:



Rys.5.3. Elektryczny obwodowy schemat zastępczy przepływu ciepła dla jednorodnego przewodu szynowego ekranowanego w stanie cieplnie ustalonym

Fig.5.3. An equivalent electric circuit of heat flow for a homogeneous shielded solid conductor in thermal steady state

- szyny lub szyn prądowych:

$$P_{szw} - P_{szo} = 0, \quad (5.3)$$

- ekranu:

$$P_{szo} + P_{ekw} - P_{eko} = 0, \quad (5.4)$$

- powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego:

$$P_{eko} + P_{sl} - P_{pzo} = 0, \quad (5.5)$$

- całej konstrukcji przewodu:

$$P_{szw} + P_{ekw} + P_{sl} - P_{pzo} = 0, \quad (5.6)$$

gdzie:

P_{szw} , P_{szo} - moc wydzielana w szynie i moc oddawana z szyny,

P_{ekw} , P_{eko} - moc wydzielana w obudowie i moc oddawana z obudowy,

P_{st} - moc promieniowania słonecznego, wydzielana na powierzchni przewodu,

P_{pzo} - moc oddawana z powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego.

Moce jednostkowe, będące składowymi bilansu cieplnego, zależą od układu przewodów szynowych oraz wielu różnych wielkości fizycznych i parametrów. Do najważniejszych z nich należą¹⁾:

I - wartość skuteczna prądu płynącego w szynie (w A),

k_{ds} , k_{de} - współczynniki strat dodatkowych w szynie i obudowie (ekranie),

λ_d - współczynnik strat względnych w obudowie,

ρ_{tp} - rezystywność cieplna materiału pokrycia obudowy (w K·m/W),

ρ_s , $\rho_{s\theta}$, ρ_e , $\rho_{e\theta}$ - rezystywności materiału szyny (s) i obudowy (e) w temperaturze 20°C (bez indeksu θ) i w temperaturze θ (w $\Omega \cdot m$),

α_s , α_e - współczynniki temperaturowe rezystywności elektrycznej szyny i obudowy,

θ_{sz} , θ_{ek} , θ_{pz} , θ_{ot} - temperatury szyny, obudowy, powierzchni zewnętrznej przewodu i otoczenia (w °C),

θ_{sz} , θ_{ek} , θ_{pz} , θ_{ot} - temperatury jak wyżej, lecz wyrażone w K,

D_1 do D_4 , D_{pz} - średnice szyny (D_1 i D_2), obudowy (D_3 i D_4) oraz powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego (w m),

k_1 - wartość względna prądu zastępczego w obudowie (odniesiona do prądu w szynie),

H - intensywność promieniowania słonecznego (w W/m^2),

k_r - współczynnik pochłaniania promieni słonecznych przez powierzchnię zewnętrzną przewodu szynowego,

t_p - grubość pokrycia powierzchni obudowy przewodu (w m),

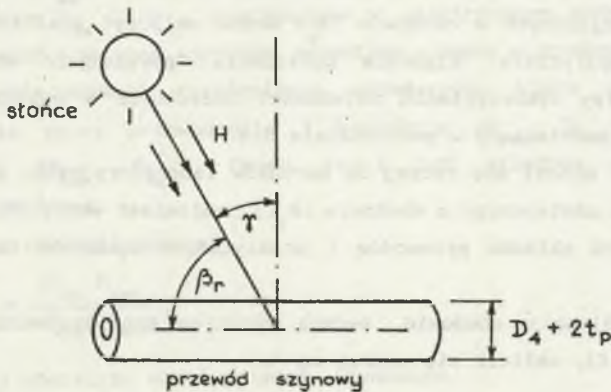
β_r - kąt padania promieni słonecznych względem osi przewodu (w °),

R_{se} , R_{po} , R_{ot} - opory cieplne izolacji gazowej SF₆, pokrycia ochronnego obudowy i powietrza wokół przewodu szynowego (w m·K/W),

R_{sek} , R_{ser} , R_{otk} , R_{otr} - składowe oporów cieplnych związane z konwekcją (indeksy "k") lub promieniowaniem (indeksy "r"),

¹⁾ Oznaczenia takie jak na rys.5.1 - 5.4.

$\epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ - współczynniki emisyjności powierzchni szyny, obudowy po stronie wewnętrznej i obudowy po stronie zewnętrznej,
 S_{sz}, S_{ek} - pole powierzchni przekroju szyny i obudowy (w m^2),
 s - odległość między osiami szyn prądowych fazowych (w m).



Rys.5.4. Szkic ilustrujący warunki obliczania mocy wydzielonej na powierzchni przewodu szynowego wskutek promieniowania słonecznego

Fig.5.4. The sketch illustrating conditions in which the power dissipated on the surface of a solid conductor in thermal steady state is to be calculated

Moc cieplną wydzielaną w szynie prądowej koncentrycznego (jednobiegunowego) przewodu szynowego wyraża wzór:

$$P_{szw} = \frac{I_{ds}^2 k_{\rho_s} [1 + \alpha_s (\theta_{sz} - 20)]}{\pi [(D_2/2)^2 - (D_1/2)^2]} \quad (5.7a)$$

natomiast moc cieplną wydzielaną w szynach prądowych układu o wspólnej obudowie można oszacować następująco:

$$P_{szw}^* \approx 3P_{szw} \quad (5.7b)$$

Moc wydzielana w obudowie (ekranie) jest wyrażana albo w zależności od prądu, za pomocą wzoru:

$$P_{ekw} = \frac{(k_1 I)^2 k_{de} \rho_e [1 + \alpha_e (\theta_{ek} - 20)]}{\pi [(D_4/2)^2 - (D_3/2)^2]} \quad (5.8)$$

albo jako krotność mocy cieplnej (5.7a), przy czym:

- dla układu koncentrycznego

$$P_{ekw} = \lambda_d P_{szw} \quad (5.9a)$$

- dla układu o wspólnej obudowie

$$P_{ekw}^{\bullet} = 3\lambda_d P_{szw} \quad (5.9b)$$

Wartości współczynników: strat dodatkowych w szynie (k_{ds}) i obudowie (k_{de}) oraz strat względnych w obudowie (λ_d) można obliczyć analitycznie lub też oszacować empirycznie. Algorytm obliczania powyższych współczynników, opracowany przy wykorzystaniu zależności zalecanych w publikacjach [57] i [59], jest przedstawiony w podrozdziale 5.4.

Wzór (5.8) odnosi się raczej do warunków laboratoryjnych, gdy znana jest wartość prądu zastępczego o obudowie ($k_1 I$), natomiast wzory (5.9) są słuszne dla wszystkich układów przewodów i praktycznych sposobów łączenia końców obudów.

Moc wydzielaną w obudowie, będącą wynikiem promieniowania słonecznego (patrz rys.5.4), oblicza się według wzoru:

$$P_{sl} = H k_r (D_4 + 2t_p) \sin \beta_r \quad (5.10)$$

Intensywność promieniowania słonecznego (H) w obszarach leżących na szerokości geograficznej Polski (od 50 do 55°) przyjęto z nadmiarem na poziomie 1000 W/m². W obliczeniach szczegółowych można uwzględnić jeszcze wpływ wysokości położenia terenu nad poziomem morza, porę dnia i roku oraz stopień zanieczyszczenia atmosfery [58].

Moc przekazywaną z szyny prądowej (lub szyn) do ekranu wyraża tzw. ciepłne prawo Ohma, skąd:

- dla układu koncentrycznego

$$P_{szo} = \frac{\vartheta_{sz} - \vartheta_{ek}}{R_{se}} \quad (5.11a)$$

- dla układu o wspólnej obudowie

$$P_{szo}^{\bullet} = \frac{\vartheta_{sz} - \vartheta_{ek}}{R_{se}^{\bullet}} \quad (5.11b)$$

Moc przekazywaną z powierzchni zewnętrznej przewodu do otoczenia wyraża się analogicznie:

- dla układu koncentrycznego

$$P_{pzo} = \frac{\vartheta_{pz} - \vartheta_{ot}}{R_{ot}} \quad (5.12a)$$

- dla układu o wspólnej obudowie

$$P_{pzo}^* = \frac{\vartheta_{pz} - \vartheta_{ot}}{R_{ot}^*} \quad (5.12b)$$

Opory cieplne R_{se} i R_{ot} , występujące w elektrycznym modelu obwodowym zjawisk ciepłych, dotyczą warunków przepływu ciepła w środowisku gazowym. Wynika stąd konieczność rozróżnienia składowych, które charakteryzują wymianę ciepła przez przewodzenie i konwekcję (R_{sek} , R_{otr}) oraz przez promieniowanie (R_{ser} , R_{otr}). Opory te i ich składowe są wzajemnie uzależnione, ponieważ:

- opór cieplny izolacji gazowej

$$R_{se} = \frac{R_{sek} R_{ser}}{R_{sek} + R_{ser}} \quad (5.13)$$

- opór cieplny powietrza wokół przewodu szynowego

$$R_{ot} = \frac{R_{otk} R_{otr}}{R_{otk} + R_{otr}} \quad (5.14)$$

Opory składowe, związane z przepływem ciepła na drodze promieniowania, oblicza się według wzorów o ogólnej strukturze:

$$R_r = \frac{\theta_1 - \theta_2}{5,69 \cdot 10^{-8} (\theta_1^4 - \theta_2^4) \pi D_m \frac{1/e+k_{pow}}{(1/\epsilon_m - 1)}} \quad (5.15)$$

Powyższy wzór przyjmuje różne postacie szczegółowe, zależnie od podstawień właściwych dla rozważanego układu elementów konstrukcyjnych przewodu i ich otoczenia.

Dla oporów między szyną a obudową, w układzie z obudowami oddzielnymi dla każdej szyny fazowej, obowiązuje relacja $R_r = R_{ser}$ oraz podstawienia:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \theta_{sz} \\ \theta_2 &= \theta_{ek} \\ D_m &= D_2 \\ e &= \epsilon_2 \\ k_{pow} &= D_2/D_3 \\ \epsilon_m &= \epsilon_3 \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

Dla oporów między powierzchnią zewnętrzną obudowy a otoczeniem, w układzie ze wspólną obudową i przy pominięciu sprzężenia cieplnego z obudowami faz sąsiednich, obowiązuje relacja $R_r = R_{eor}$ oraz podstawienia:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \theta_{pz} , \\ \theta_2 &= \theta_{ot} , \\ D_m &= D_{pz} , \\ e &= 1 , \\ k_{pow} &= 1 , \\ \epsilon_m &= \epsilon_4 . \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Dla oporów między szynami trzech faz a obudową, w układzie ze wspólną obudową [39], obowiązuje relacja $R_r = R_{ser}$ oraz podstawienia wg wzoru (5.16), z wyjątkiem:

$$\left. \begin{aligned} k_{pow} &= 3D_2/D_3 , \\ D_m &= 3D_2 . \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

Dla oporów między powierzchnią zewnętrzną obudowy a otoczeniem, w układzie z obudowami oddzielnymi i przy uwzględnieniu sprzężenia cieplnego obudów [57], obowiązuje relacja $R_r = R_{eor}$ oraz podstawienia wg wzoru (5.17), z wyjątkiem:

$$e = 1 - D_{pz} / 6\pi s . \quad (5.19)$$

Opory cieplne dla konwekcji opisuje się w literaturze technicznej z dziedziny termokinetyki (patrz [35], [36], [54], [66], [75]) wzorami, wynikającymi z analizy podobieństwa zjawisk wymiany ciepła. Dla sześciofluorku siarki między szyną a obudową, w układzie z obudowami oddzielnymi dla każdej szyny fazowej:

$$R_{sek} = \frac{\ln(D_3/D_2)}{1,292 \left\{ (\theta_{sz} - \theta_{ek}) \left(\frac{D_3 - D_2}{2} \right)^3 g_2^2 c_{p2} \lambda_2^4 / \eta_2 \right\}^{0,2}} , \quad (5.20)$$

natomiast dla powietrza na zewnątrz obudowy przewodu:

$$R_{otk} = \frac{1}{\alpha_{ot} \pi D_{pz}} , \quad (5.21)$$

przy czym współczynnik oddawania ciepła drogą konwekcji:

$$\alpha_{ot} = C_{\alpha} (GrPr)^{m_{\alpha}} \lambda_1 / D_{pz} \quad (5.22)$$

jest uzależniony od iloczynu liczb kryterialnych:

$$GrPr = 9,81(\vartheta_{pz} - \vartheta_{ot}) D_{pz}^3 g_1^2 c_{p1} / 273 \eta_1 \lambda_1 \quad (5.23)$$

za pośrednictwem bezwymiarowych parametrów C_{α} i m_{α} , o następujących wartościach:

GrPr	C_{α}	m_{α}
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	0,333

We wzorach (5.20) do (5.23) występują wielkości fizyczne, charakteryzujące własności gazu, zależne od temperatury.

Dla powietrza są to:

- gęstość (w kg/m^3)

$$g_1 = 1,29 \frac{273}{273 + (\vartheta_{pz} + \vartheta_{ot})/2}, \quad (5.24)$$

- lepkość dynamiczna (w $Pa \cdot s$)

$$\eta_1 = 17,2 \cdot 10^{-6} \frac{387}{387 + (\vartheta_{pz} + \vartheta_{ot})/2} \left(\frac{273 + (\vartheta_{pz} + \vartheta_{ot})/2}{273} \right)^{3/2}, \quad (5.25)$$

- przewodność cieplna (w $W/m \cdot K$)

$$\lambda_1 = 2,44 \cdot 10^{-2} \frac{398}{398 + (\vartheta_{pz} + \vartheta_{ot})/2} \left(\frac{273 + (\vartheta_{pz} + \vartheta_{ot})/2}{273} \right)^{3/2}, \quad (5.26)$$

- pojemność cieplna

$$c_{p1} \approx \text{const.} \approx 1000 \text{ (w } J/kg \cdot K). \quad (5.27)$$

Dla sześćciufluorku siarki są to następujące wielkości fizyczne:

- gęstość gazu w określonej temperaturze napełniania ($21^{\circ}C$), uzależniona następująco od ciśnienia:

Ciśnienie P_g (w MPa)	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0
Gęstość g_2 (w kg/m^3)	6,14	12,4	18,8	32,3	69,6

- lepkość dynamiczna (w $\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

$$\eta_2 = 14,4 \cdot 10^{-6} \frac{548}{548 + (\theta_{sz} + \theta_{ek})/2} \left(\frac{273 + (\theta_{sz} + \theta_{ek})/2}{273} \right)^{3/2}, \quad (5.28)$$

- przewodność cieplna (w $\text{W/m}\cdot\text{K}$)

$$\lambda_2 = 6,54 \cdot 10^{-5} \left(273 + \frac{(\theta_{sz} + \theta_{ek})}{2} \right)^{0,942}, \quad (5.29)$$

- pojemność cieplna (w $\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

$$c_{p2} = 879 + 0,12 \left(273 + \frac{(\theta_{sz} + \theta_{ek})}{2} \right). \quad (5.30)$$

W obliczeniach inżynierskich (patrz [57] oraz [18], [39] i [59]) stosuje się zazwyczaj prostsze zależności, w których parametry fizyczne gazu nie występują jawnie, a zgodność wyników obliczeń i pomiarów zależy od doboru właściwych współczynników korekcyjnych, np. $a_c = 2,2$, $n_p = 0,6$ oraz $n_c = 0,8$ we wzorach (5.31) i (5.33). Opory cieplne związane z konwekcją w przewodach szynowych ekranowanych wyznacza się z następujących wzorów:

- dla SF_6 między szyną a obudową w układzie z obudowami oddzielnymi dla każdej fazy:

$$R_{\text{sek}} = \frac{\theta_{sz} - \theta_{ek}}{24,4(1,02 \cdot 10^{-5} P_g)^n D_2^{0,75} (\theta_{sz} - \theta_{ek})^{1,25} \left[\ln(D_3/D_2) + a_c \right] \left[1 + (D_2/D_3)^{0,6} \right]^{1,25}}, \quad (5.31)$$

- dla powietrza na zewnątrz obudowy:

$$R_{\text{otk}} = \frac{\theta_{pz} - \theta_{ot}}{8,523 \left\{ \frac{(\theta_{pz} - \theta_{ot})^4}{(\theta_{pz} + \theta_{ot})/2} \right\}^{1/3}} \pi D_{pz}, \quad (5.32)$$

- dla SF_6 między szynami a wspólna obudową:

$$R_{\text{sek}} = \frac{\theta_{sz} - \theta_{ek}}{3 \cdot 24,4 (1,02 \cdot 10^{-5} P_g)^n D_2^{0,75} (\theta_{sz} - \theta_{ek})^{1,25} \left[\ln(D_3/n_c 3D_2) + a \right] \left[1 + 3^{0,8} (D_2/D_3)^{0,6} \right]^{1,25}} \quad (5.33)$$

Powierzchnia zewnętrzna obudowy przewodu szynowego może być pokryta specjalną warstwą ochronną. Według publikacji [59] oporność cieplną warstwy pokrycia można obliczyć ze wzoru:

$$R_{po} = \frac{\rho_{tp}}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t}{D_4} \right) \quad (5.34)$$

Omówione powyżej zależności wykorzystano do opracowania algorytmów obliczeniowych, opisanych w podrozdz.5.4.

5.3. Bilans cieplny dla przewodu szynowego obciążonego prądem zwarciovym

Bilans cieplny dla szyny prądowej, nagrzewanej prądem zwarciovym ma postać (5.35), zgodną z modelem obwodowym pokazanym na rys.5.5a:

$$\frac{k_{ds} \rho_{s\theta}}{S_{sz}} i^2 dt - S_{sz} g_3 c_{3\theta} d\theta_{szz} - \alpha_{se} F_{sz} (\theta_{szz} - \theta_{ek}) dt = 0, \quad (5.35)$$

przy czym indeks "z" w symbolu temperatury i mocy wydzielanej w szynie oznacza wielkości w warunkach zwarciovych. W obliczeniach uwzględnia się zależności rezystywności ($\rho_{s\theta}$) i - rzadziej - ciepła właściwego ($c_{3\theta}$) materiału szyny od temperatury, wyrażone następująco:

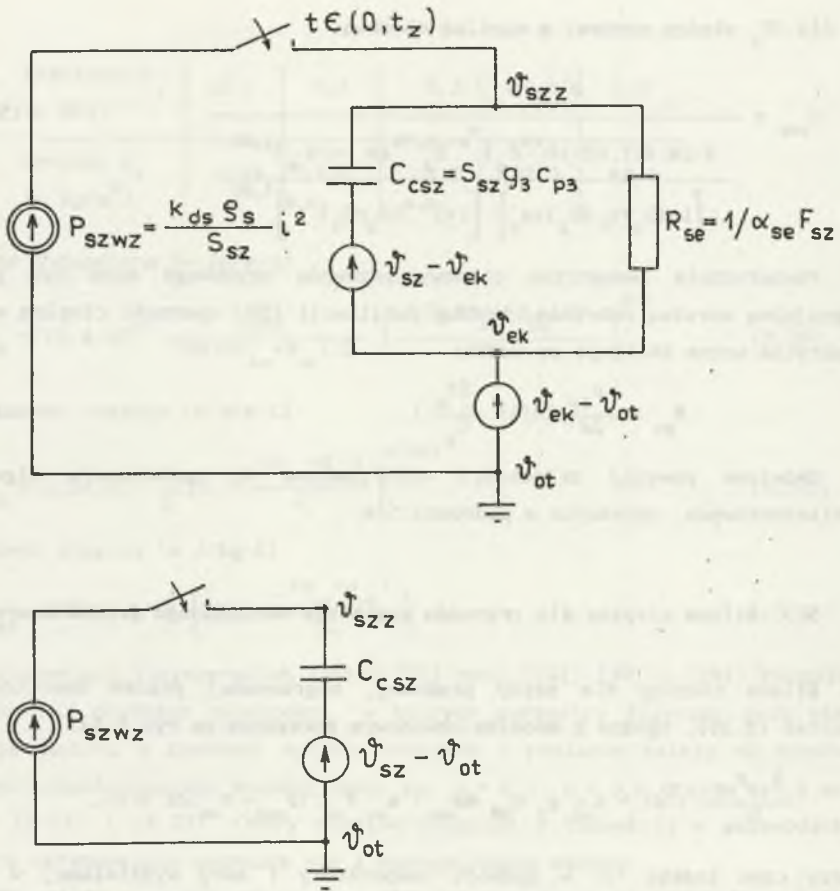
$$\rho_{s\theta} = \rho_s [1 + \alpha_s (\theta_{szz} - 20)] \quad (5.36)$$

oraz

$$c_{3\theta} = c_{p3} (1 + b\theta_{szz}). \quad (5.37)$$

Pomija się natomiast nieistotne zależności temperaturowe dla obwodu i powierzchni przekroju oraz gęstości materiału szyny. Wstawiając wzory (5.36) i (5.37) do wzoru (5.35), po przekształceniach otrzymuje się równanie:

$$\frac{d\theta_{szz}}{dt} = \frac{k_{ds} \rho_{s\theta} i^2 - S_{sz} \alpha_{se} F_{sz} (\theta_{szz} - \theta_{ek})}{S_{sz}^2 g_3 c_{3\theta}} \quad (5.38)$$



Rys. 5.5. Model obwodowy nagrzewania szyny prądowej przewodu szynowego prądem zwarciovym: a) z uwzględnieniem przepływu ciepła do obudowy, b) przy założeniu nagrzewania adiabatycznego

Fig. 5.5. An equivalent electric model of heating of a current-carrying conductor loaded with short-circuit current: a) with regard to heat flow into the shield, b) assuming adiabatic heating process

Aby wyznaczyć przebieg czasowy temperatury szyny prądowej podczas trwania zwarcia, należy rozwiązać równanie (5.38), stosując np. metodę numeryczną Rungego-Kutty. W praktyce nie jest to jednak konieczne, ponieważ na ogół wystarcza znajomość najwyższej temperatury, do jakiej nagrzeje się szyna wskutek zwarcia. Przyjmując bezpieczne uproszczenie, że nagrzewanie szyny odbywa się adiabatycznie ($\alpha_{se} = 0$ i w konsekwencji model przedstawiony na rys. 5.5b), po scałkowaniu równania (5.35) otrzymuje się zależność:

$$\vartheta_{szz} = \vartheta_{sz} + \Delta\vartheta_{szz} = \vartheta_{sz} + \left(\frac{1}{\alpha_s} + \vartheta_{sz} \right) \left\{ \exp \left(\frac{(1+y_s)\alpha_s \rho_s}{c_{p3} g_3 S_{sz}^2} \int_0^{t_z} i^2 dt \right) - 1 \right\}, \quad (5.39)$$

w której ϑ_{sz} oznacza temperaturę początkową dla stanu zwarcia, równą osiągniętej podczas obciążenia zadaniem prądem roboczym. W praktyce projektowej parametrem opisującym prąd zwarciaowy pod względem cieplnym jest tzw. prąd zwarciaowy cieplny zastępczy I_c , wynikający z definicji:¹⁾

$$I_c^2 t_z = \int_0^{t_z} i^2 dt. \quad (5.40)$$

Po wprowadzeniu tej wielkości zależność (5.39) przyjmuje postać dogodną do zastosowań technicznych:

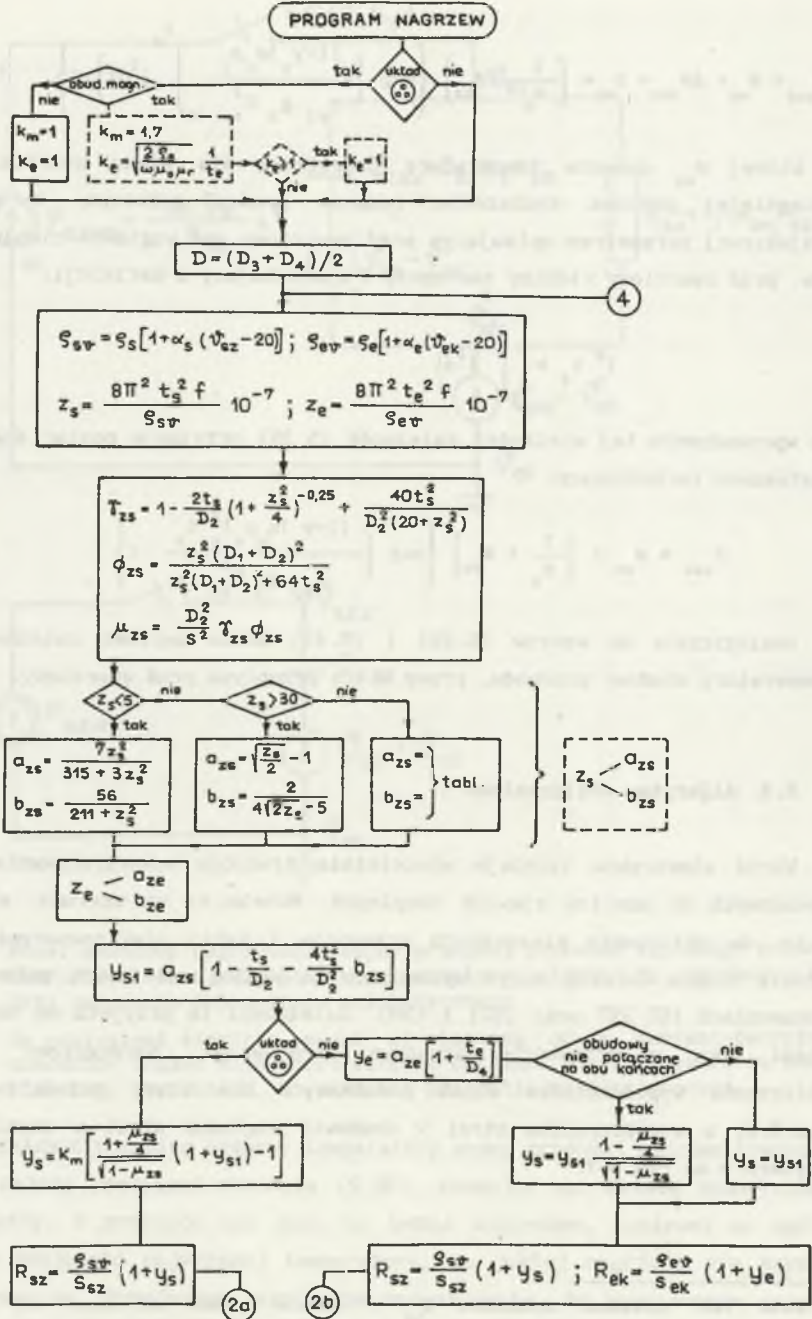
$$\vartheta_{szz} = \vartheta_{sz} + \left(\frac{1}{\alpha_s} + \vartheta_{sz} \right) \left\{ \exp \left(\frac{(1+y_s)\alpha_s \rho_s I_c^2 t_z}{c_{p3} g_3 S_{sz}^2} - 1 \right) \right\}. \quad (5.41)$$

Analogicznie do wzorów (5.39) i (5.41) można zapisać zależności dla temperatury obudowy przewodu, przez którą przepływa prąd zwarciaowy.

5.4. Algorytmy obliczeniowe

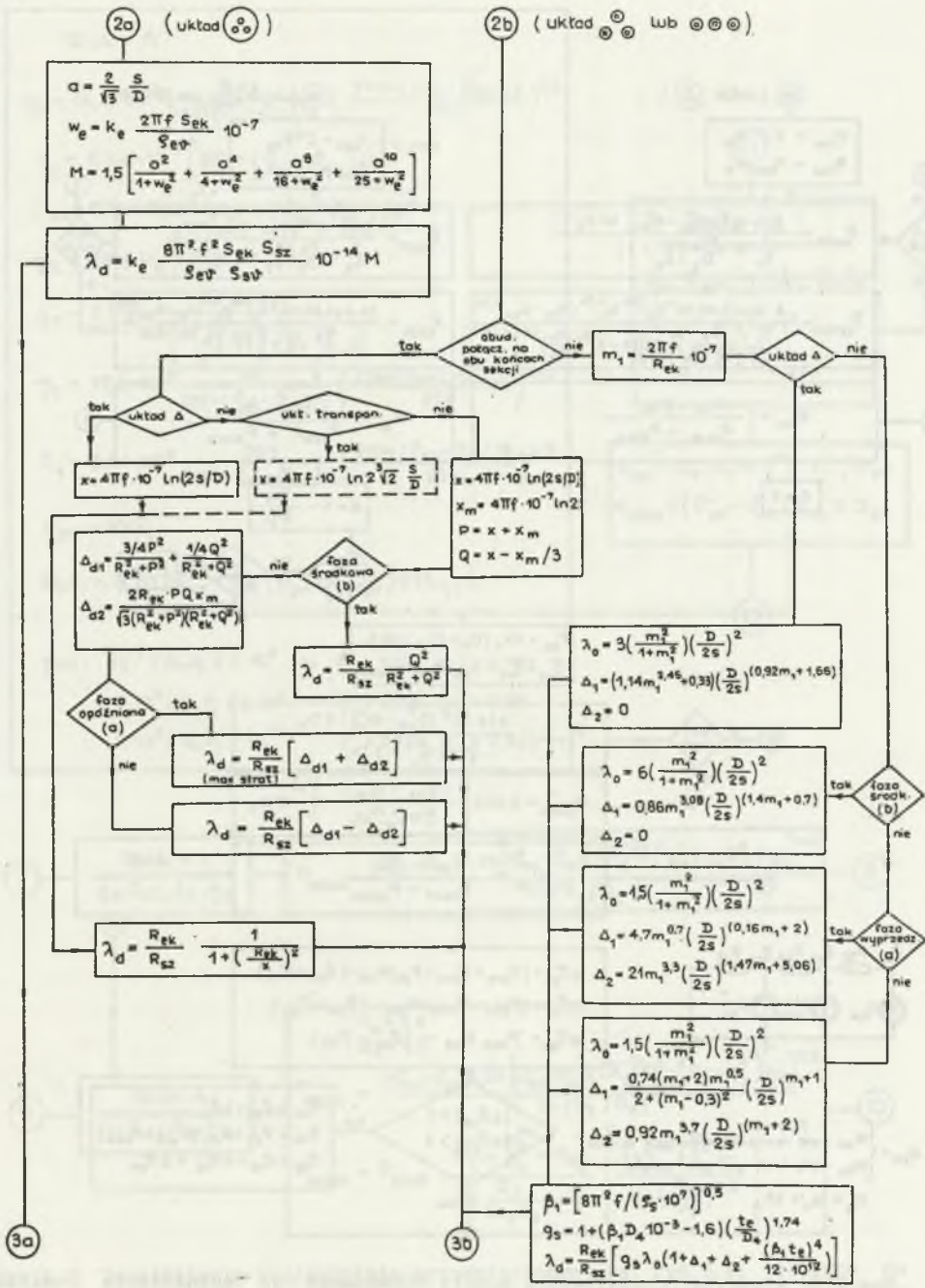
Wśród elektryków istnieje wieloletnia tradycja wykorzystywania modeli obwodowych do analizy zjawisk cieplnych. Modele te są szeroko stosowane m.in. do obliczania klasycznych przewodów i kabli elektroenergetycznych. Źródła ciepła (straty mocy) wyznaczane są według zależności zalecanych w dokumentach IEC 287 oraz [57] i [59]. Zależności te przyjęto do obliczania strat mocy w przewodzie szynowym ekranowanym. Szczegółowy algorytm obliczania współczynnika strat dodatkowych dla szyny przedstawiono na rys.5.6, a współczynnika strat w obudowie względem strat w szynie lub w szynach - na rys.5.7.

¹⁾ Norma [NB] wprowadza oznaczenie I_{th} i określa sposób obliczania tej wielkości zgodnie z IEC-865 [N5]. Dla niżej omawianego programu jest to jedna z wielkości wejściowych, dlatego też jej wartość nie jest obliczana.



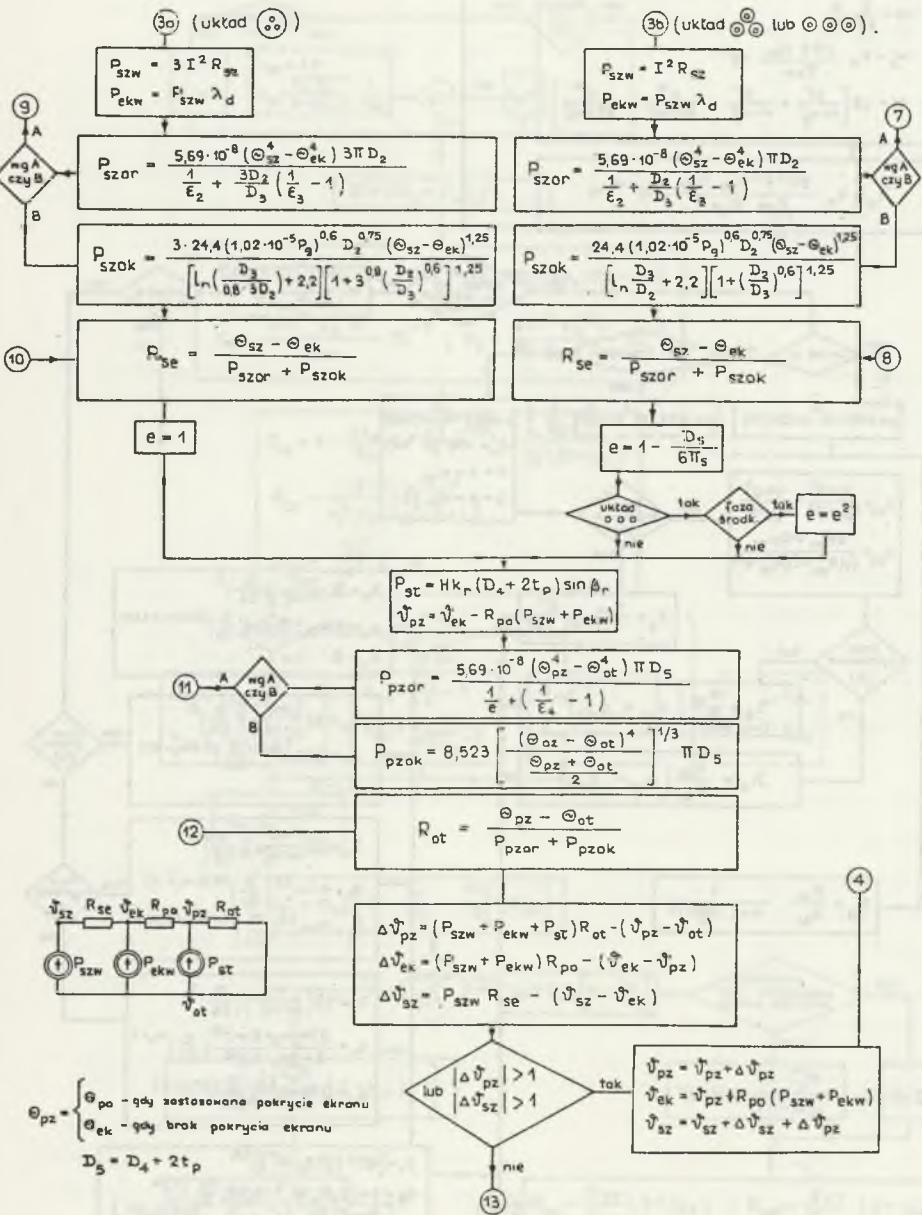
Rys. 5.6. Algorytm obliczania współczynnika strat dodatkowych w szynie przewodu ($k_{ds} = 1 + y_s$)

Fig. 5.6. The algorithm assigned to calculate a coefficient of additional heat losses inside the current-carrying conductor ($k_{ds} = 1 + y_s$)



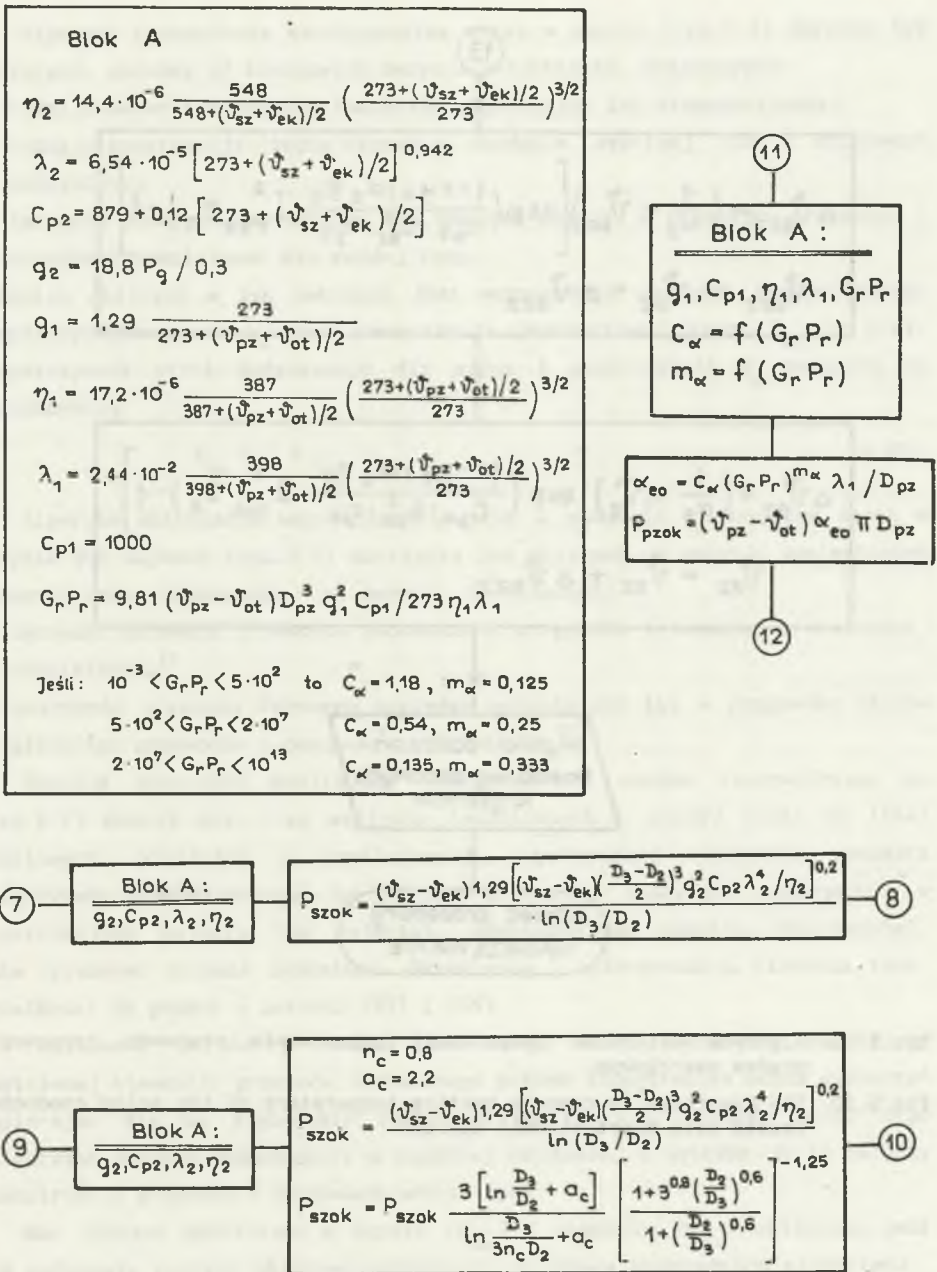
Rys.5.7. Algorytm obliczania współczynnika strat w obudowie (λ_d) względem strat w szynie lub szynach

Fig.5.7. The algorithm assigned for calculate a coefficient of losses int he shield (λ_d) towards losses inside the current-carrying conductor or current-carrying conductors



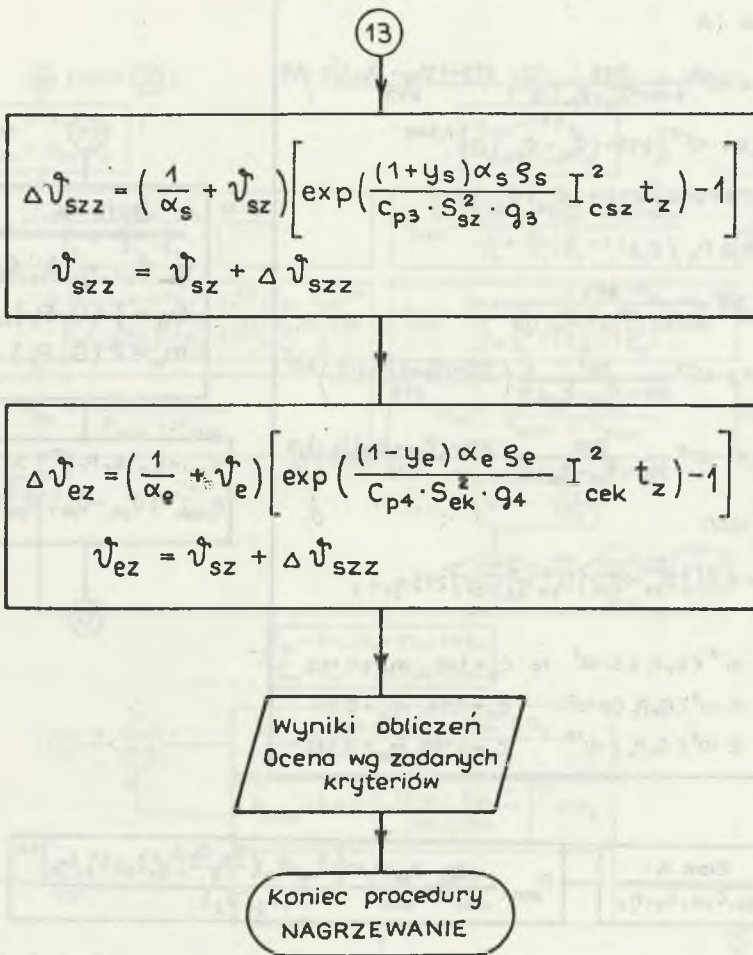
Rys.5.8. Algorytm rozwiązywania modelu obwodowego do wyznaczania rozkładu temperatury w kierunku promieniowym

Fig.5.8. The algorithm assigned to solve the circuit model of temperature distribution in the radial direction



Rys. 5.9. Odgałęzienia w algorytmie przedstawionym na rys.5.8, służące do obliczeń alternatywnych (opartych na analizie podobieństwa zjawisk cieplnych)

Fig.5.9. Branches in the algorithm presented in Fig.5.8, assigned to alternative calculations (based on heat similarity analysis)



Rys. 5.10. Algorytm obliczania temperatury nagrzewania przewodu szynowego prądem zwarciovym

Fig. 5.10. The algorithm to compute heating temperature of the solid conductor loaded with short-circuit current

Algorytm wyznaczania współczynnika strat w szynie (rys.5.6) określa tok obliczeń, zależny od kluczowych decyzji projektanta, dotyczących:

- rodzaju materiału obudowy (materiał magnetyczny lub niemagnetyczny),
- rodzaju konstrukcji (szyny fazowe w obudowie wspólnej lub w obudowach oddzielnych,
- łączenia (lub nie) ekranów na obu końcach sekcji, w przypadku przewodów z obudowami oddzielnymi dla każdej fazy.

Efektom obliczeń w tym zakresie jest wyznaczenie wartości bezwymiarowego współczynnika strat y_s oraz rezystancji jednostkowej szyny R_{sz} (w Ω/m). Współczynnik strat dodatkowych dla szyny i współczynnik y_s związane są zależnościami:

$$k_{ds} = 1 + y_s \quad (5.42)$$

Algorytm obliczania współczynnika strat w obudowie λ_d względem strat w szynie lub szynach (rys.5.7) uzależnia tok obliczeń od decyzji wymienionych powyżej oraz - dodatkowo - od decyzji, dotyczących:

- sposobu ułożenia przewodów fazowych w przypadku przewodów o obudowach oddzielnych,¹⁾
- położenia przewodu fazowego względem pozostałych faz w przypadku układu płaskiego przewodów o obudowach oddzielnych²⁾.

Decyzja dotycząca możliwości transponowania obudów (przewidziana na rys.5.7) odnosi się - ze względów technicznych - raczej tylko do linii kablowych. Wielkości i współczynniki, występujące wyłącznie wewnątrz algorytmów przedstawionych na rys.5.6 i rys.5.7 (lecz nie występujące w instrukcjach wejścia lub wyjścia), oznaczone są jedynie odpowiednimi, nie opisanymi słownie symbolami. Określenia i interpretacja fizyczna tych wielkości są podane w pracach [57] i [59].

Podstawowe parametry modelu obwodowego oraz wartości temperatury ustalonej elementów przewodu obciążonego prądem długotrwałym można wyznaczyć opierając się na algorytmie pokazanym na rys.5.8. Ścieżka 3a-13 tego algorytmu dotyczy konstrukcji o wspólnej obudowie, a ścieżka 3b-13 dotyczy konstrukcji przewodu o obudowach oddzielnych.

Moc cieplna wydzielana w szynie (P_{szw}) i obudowie (P_{ekw}) obliczana jest na podstawie wyników obliczeń wykonanych za pomocą poprzednich algorytmów.

1) Trójkątny lub płaski układ trzech przewodów szynowych jednobiegowych.

2) Faza opóźniona, środkowa lub wyprzedzająca.

Umożliwiają to wzajemne powiązania poprzez punkty 2a, 2b, 3a i 3b oraz pętlę iteracyjną (poprzez punkt 4).

Wzory do obliczania mocy odprowadzanych drogą konwekcji z szyn P_{szok} oraz z obudowy P_{pzok} mają charakter analityczno-empiryczny. Ścieżki między parami punktów: 7 i 8, 9 i 10 oraz 11 i 12 (nie pokazane na rys.5.8) odnoszą się tylko do alternatywnego sposobu obliczeń, w którym wykorzystuje się zależności oparte na analizie podobieństwa zjawisk cieplnych. Są one przedstawione oddzielnie na rys.5.9.

Iteracja temperatur szyny (ϑ_{sz}), obudowy (ϑ_{ek}) i powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego (ϑ_{pz}) prowadzona jest dopóty, dopóki nie zostanie osiągnięta założona zgodność (z dokładnością np. do 1°C) aktualnie obliczanego rozkładu temperatury w kierunku promieniowym i rozkładu wynikającego z uwzględnienia cieplnego prawa Ohma.

Po zakończeniu iteracji temperatur ustalonych (patrz punkt 13 na rys.5.8) można obliczyć temperatury, do których nagrzej się szyna i obudowa wskutek przepływu prądu zwarciovego (rys.5.10). Temperaturom początkowym przewodu nadawane są wówczas wartości obliczone dla zadanych obciążeń długotrwałych. Przyjmuje się bowiem, że zwarcie nastąpiło w czasie, gdy przewód szynowy był obciążony prądem roboczym. Zależności określające przyrosty temperatury wskutek zwarcia uzyskano przy założeniu, że proces nagrzewania zachodzi adiabatycznie.

Wszystkie wyżej wyszczególnione algorytmy cząstkowe - po połączeniu ich w punktach oznaczonych jednakowym numerem - tworzą algorytm weryfikujący rozważany wariant konstrukcyjny przewodu szynowego pod względem kryterium nagrzewania prądami długotrwałym i zwarciovym.

5.5. Charakterystyka programu obliczeniowego NAGRZEW

Program do obliczania temperatur elementów hermetyzowanych przewodów szynowych oznaczono nazwą NAGRZEW. Jest on napisany w języku Turbo Pascal (wersja 5.0) i przeznaczony do realizacji na mikrokomputerze IBM PC. W wersji skompilowanej program zajmuje ok. 70 kB pamięci. Czas trwania obliczeń nie przekracza kilkunastu sekund. Program pracuje z dowolną kartą graficzną.

Stan cieplny ustalony opisano za pomocą modelu obwodowego przewodu szynowego jednorodnego, zgodnie z jego bilansem cieplnym. Temperatury

- ustalone oblicza się iteracyjnie, z uwzględnieniem nieliniowości temperaturowej modelu. W każdym kroku iteracyjnym obliczane są wartości:
- strat mocy wydzielanych w szynach i obudowach oraz mocy odprowadzanych z szyn i obudów,
 - rezystancji cieplnych modelu obwodowego (alternatywnie wg zależności inżynierskich lub za pomocą liczb kryterialnych podobieństwa zjawisk cieplnych),
 - temperatur dla bieżących wartości parametrów schematu elektrycznego modelu obwodowego.

W obliczeniach temperatur przewodu szynowego przy zwarciu uwzględniono obciążenie przewodu prądem roboczym długotrwałym, występujące przed zwarcie. Model obliczeniowy nagrzewania przewodu prądem zwarciovym oparto na założeniu, że proces nagrzewania w czasie trwania zwarcia zachodzi adlabatycznie.

Program może być wykorzystywany do obliczeń różnych układów konstrukcyjnych przewodów szynowych - zarówno o wspólnej obudowie szyn, jak i o obudowach oddzielnych. W przypadku obudów oddzielnych rozróżnia się płaskie ułożenie przewodów fazowych lub ułożenie w trójkąt równoboczny. Obudowy na obydwu końcach mogą być połączone lub nie połączone oraz uziemione lub nie uziemione.

Program uruchamia się przez wpisanie jego nazwy i naciśnięcie klawisza ENTER. Następną czynnością jest wprowadzanie danych wejściowych. Nazwy danych i jednostki w jakich należy je wprowadzać do komputera, są wypisane na ekranie monitora. Część listy danych nie mieszczących się na ekranie jest wyświetlana po naciśnięciu klawisza funkcyjnego F2.

W programie przewidziano dwie określone opcje materiałowe dla szyn i obudów (Cu i Al) oraz możliwość wprowadzenia przez użytkownika indywidualnych parametrów materiałowych (tablica 5.1).

Po wprowadzeniu danych wejściowych, w celu wykonania obliczeń należy nacisnąć klawisz funkcyjny F5. Wyniki obliczeń wyświetlane są na ekranie monitora. Zestawienie danych wejściowych i wyników obliczeń można wydrukować, naciskając w tym celu klawisz funkcyjny F4. W zależności od potrzeby obliczenia można kontynuować po zmianie danych wejściowych (klawisz F2) lub zakończyć realizację programu (klawisz F5).

Tablica 5.1

Niektóre dane materiałowe dla szyn prądowych i obudów przewodów szynowych

Materiał szyny (s) i obudowy (e)	Al	Cu	Inny
Rezystywność $\rho_{(s,e)}$, w $\Omega \cdot m$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Dane wprowadzane przez użytkownika
Temp. współcz. rezystywności $\alpha_{(s,e)}$, w 1/K	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	
Gęstość materiału $g_{(s,e)}$, w kg/m^3	$2,7 \cdot 10^3$	$8,97 \cdot 10^3$	
Ciepło właściwe $c_{(s,e)}$, w $W \cdot s/kg \cdot K$	900	380	
Temp. wsp. ciepła właściwego b , w 1/K	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,35 \cdot 10^{-4}$	
Temp. wsp. rozszerzalności liniowej $\epsilon_{(ls,le)}$, w 1/K	$23,7 \cdot 10^{-6}$	$16,6 \cdot 10^{-6}$	

Dane dotyczące gęstości SF₆ i ciśnienia roboczego tego gazu wprowadza się alternatywnie, zależnie od wybranego wariantu obliczeniowego: gęstość dla ścieżki A, ciśnienie dla ścieżki B. Program uwzględnia wpływ promieniowania słonecznego na nagrzewanie przewodu szynowego. Jeśli przewód nie jest narażony na działanie promieni słonecznych, współczynnikowi pochłaniania energii słonecznej i/lub kątowni między kierunkiem promieni słonecznych a osią przewodu należy przypisać wartości równe zero.

Listę przykładowych danych wejściowych, potrzebnych do wykonania obliczeń, ilustrują załączone wydruki. Wyniki obliczeń uzyskiwane dzięki realizacji programu NAGRZEW zestawiane są w dolnej części wydruków. Zwraca się przy tym uwagę, że:

- temperatura powierzchni zewnętrznej przewodu szynowego różni się od temperatury obudowy, jeśli obudowa pokryta jest warstwą ochronną,
- definicje współczynnika strat w obudowie i współczynnika strat dodatkowych w szynie są zróżnicowane.¹⁾

¹⁾ Pierwszy wyraża straty w obudowie odniesione do strat w szynie prądowej (lub szynach), natomiast drugi - ujmując ilościowo wpływ zjawiska naskórkowości i zbliżenia na straty w szynie.

Weryfikacja empiryczna metody i algorytmu obliczeń cieplnych przewodów szynowych hermetyzowanych możliwa jest obecnie w ograniczonym zakresie. Wyniki badań empirycznych są rzadko publikowane z kompletnym i jednoznacznym opisem obiektu badań i warunków ich wykonania. Wyniki obliczeń przykładowych, przedstawione na wydrukach nr I i II, odnoszą się odpowiednio do:

- danych przewodu szynowego opisanego w raporcie [57]¹⁾,
- danych modelu przewodu szynowego, wykonanego w ramach prac [15], [16], [43], [60], [71].

Przedstawione wyniki obliczeń przykładowych są zgodne w dostatecznym stopniu z wynikami pomiarów.

¹⁾ Z wyjątkiem nie określonych tam wartości współczynników czerni.

NAGRZEWANIE PRZEWODÓW SZYNOWYCH JEDNORODNYCH
W STANIE USTALONYM I PRZY ZWARCIACH

DANE WEJŚCIOWE

Układ płaski, ekrany połączone na obu końcach	
Obliczenia według zależności podanych w Electrze	
Częstotliwości [Hz]	f = 60
Materiał szyny	szyna = Al
Konduktywność szyny [MS/m]	gamasz = 35.21
Temp.wsp.zmiany rezystancji szyny	alfasz = 0.004
Materiał obudowy	ekran = Al
Konduktywność obudowy [MS/m]	gamaek = 35.21
Temp.wsp.zmiany rezystancji obudowy	alfaek = 0.004
Grubość pokrycia obudowy [m]	tp = 0
Rezyst.ciepna pokrycia [k*m/W]	ropo = 0
Średnica zewnętrzna obudowy [m]	dzek = 0.762
Średnica wewnętrzna obudowy [m]	dwek = 0.7462
Średnica zewnętrzna szyny [m]	dzsz = 0.279
Średnica wewnętrzna szyny [m]	dwsz = 0.2536
Prąd szyny [kA]	Isz = 10.059
Temperatura otoczenia [C]	tetaot = 30
Ciśnienie SF6 [MPa]	p = 0.44
Kąt padania promieni słonecznych	fi = 0
Wsp.pochylenia prom.słonecznego	kr = 0
Emisyjność pow.zewn.przew.szynowego	epszek = 0.62
Emisyjność pow.wewn.obudowy	epswek = 0.3
Emisyjność szyny	eppsz = 0.3
Prąd zast.ciepny Is.w szynie [kA]	Icsz = 40
Prąd zast.ciepny Is.w obudowie [kA]	Icek = 40
Gęstość szyny [kg/m sześć]	gsz = 2700
Gęstość obudowy [kg/m sześć]	gek = 2700
Ciepło właściwe szyny [J/kg*K]	cpsz = 900
Ciepło właściwe obudowy [J/kg*K]	cpek = 900
Temp.wsp.rozszerz.linowej szyny	betalsz = 0.0000237
Temp.wsp.rozszerz.linowej obudowy	betaek = 0.0000237
Odległość między osiami przewodów [m]	s = 1.587
Temperatura montażu przew.szyn. [C]	tetam = 20

WYNIKI OBLICZEŃ

DLA WARUNKÓW ROBOCZYCH	
Współczynnik strat dodatkowych dla szyny	kds = 1.090
Współczynnik strat dla obudowy	lambdad = 0.481
Moc wydzielana w szynie [W/m]	Pwsz = 377.3
Moc wydzielana w obudowie [W/m]	Pwek = 181.6
Moc oddawana przez szynę [W/m]	Podsz = 377.2
Moc oddawana przez obudowę	Podek = 559.0
Temperatura szyny [C]	tetasz = 90.0
Temperatura obudowy [C]	tetaek = 58.3
Temperatura pow.zewn.przewodu szynowego [C]	tetapz = 58.3
DLA ZWARCIA	
Temperatura szyny po zwarciu [C]	tetaszww = 90.3
Temperatura obudowy po zwarciu [C]	tetaekzw = 58.4
Wydłużenie względne szyny	dlsz = 0.00167
Wydłużenie względne obudowy	dlek = 0.00091

NAGRZEWANIE PRZEWODÓW SZYNOWYCH JEDNORODNYCH
W STANIE USTALONYM I PRZY ZWARCIACH

DANE WEJŚCIOWE

Układ płaski, ekrany nie połączone na obu końcach	
Obliczenia według zależności podanych w Electrze	
Materiał szyny	szyna = Cu
Konduktywność szyny [MS/m]	gamasz = 55
Temp.wsp.zmiany rezystancji szyny	alfasz = 0.004
Materiał obudowy	ekran = Al
Konduktywność obudowy [MS/m]	gamaek = 35
Temp.wsp.zmiany rezystancji obudowy	alfaek = 0.0042
Grubość pokrycia obudowy [m]	tp = 0
Rezyst.ciepna pokrycia [k*m/W]	ropo = 0
Średnica zewnętrzna obudowy [m]	dzek = 0.316
Średnica wewnętrzna obudowy [m]	dwek = 0.3
Średnica zewnętrzna szyny [m]	dzsz = 0.06
Średnica wewnętrzna szyny [m]	dwsz = 0.05
Prąd szyny [kA]	I _{sz} = 1.25
Temperatura otoczenia [C]	tetaot = 40
Ciśnienie SF6 [MPa]	p = 0.25
Kąt padania promieni słonecznych	fi = 0
Wsp.pochylenia prom.słonecznego	kr = 0
Emisyjność pow.zewn.przew.szynowego	epszek = 0.8
Emisyjność pow.wewn.obudowy	epswek = 0.15
Emisyjność szyny	epssz = 0.15
Prąd zast.ciepny 1s.w szynie [kA]	I _{csz} = 40
Prąd zast.ciepny 1s.w obudowie [kA]	I _{cek} = 40
Gęstość szyny [kg/m sześć]	gsz = 8900
Gęstość obudowy [kg/m sześć]	gek = 2700
Ciepło właściwe szyny [J/kg*K]	cpsz = 380
Ciepło właściwe obudowy [J/kg*K]	cpek = 900
Temp.wsp.rozszerz.liniiowej szyny	betasz = 0.0000166
Temp.wsp.rozszerz.liniiowej obudowy	betalek = 0.0000237
Odległość między osiami przewodów [m]	s = 0.75
Temperatura montażu przew.szyn. [C]	tetam = 20

WYNIKI OBLICZEŃ

DLA WARUNKÓW ROBOCZYCH	
Współczynnik strat dodatkowych dla szyny	kds = 1.004
Współczynnik strat dla obudowy	lambdad = 0.041
Moc wydzielana w szynie [W/m]	Pwsz = 38.8
Moc wydzielana w obudowie [W/m]	Pwek = 1.6
Moc oddawana przez szynę [W/m]	Pods = 38.8
Moc oddawana przez obudowę	Podok = 40.4
Temperatura szyny [C]	tetasz = 63.9
Temperatura obudowy [C]	tetaek = 45.2
Temperatura pow.zewn.przewodu szynowego [C]	tetapz = 45.2
DLA ZWARCIA	
Temperatura szyny po zwarcu [C]	tetaszww = 78.7
Temperatura obudowy po zwarcu [C]	tetaekzw = 45.6
Wydłużenie względne szyny	dlsz = 0.00097
Wydłużenie względne obudowy	dlek = 0.00061

6. PODSUMOWANIE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Przedmiotem monografii są trzy wybrane zagadnienia dotyczące projektowania wysokonapięciowych przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF_6 , obejmujące:

- modelowanie matematyczne pola elektrycznego (rozdział 3),
- wymiarowanie i kształtowanie układów izolacyjnych (rozdział 4),
- wyznaczanie temperatur elementów konstrukcyjnych (rozdział 5).

Wymienione zagadnienia stanowią fragment szerokiej problematyki z zakresu projektowania, konstruowania, badania i eksploataowania rozważanych przewodów szynowych.

Modelowanie matematyczne pola elektrycznego wykonywane jest w sposób numeryczny, na podstawie metody równań całkowo-brzegowych pierwszego i drugiego rodzaju. Operatorami całkowymi w tych równaniach są: potencjał warstwy pojedynczej oraz jego pochodna w kierunku normalnym do powierzchni przewodzących i rozważanych modeli izolatorów. Do aproksymacji powyższych operatorów zastosowano metodę funkcji sklejanых. Uzyskano w ten sposób możliwość algebraizacji równań całkowych, a tym samym - obliczenia rozkładu pola elektrycznego w przewodach ekranowych o dowolnym ukształtowaniu elektrod oraz w obszarach oddziaływania izolatorów odstępnikowych o symetrii obrotowej.

Do praktycznego zastosowania wybrano trzy algorytmy obliczeniowe, służące do wyznaczania pola elektrycznego w układzie trójbiegunowym (bez uwzględniania wpływu izolatorów) oraz w układzie jednobiegunowym, wyposażonym - alternatywnie - w izolatory dyskowe i kielichowe. Dla każdego z tych algorytmów opracowano procedury obliczeniowe w postaci oryginalnych mikrokomputerowych programów użytkowych: PRZEWEK_3, IZO_DYSK i IZO_KIEL. Programy przedstawione są w wygodnej dla użytkownika formie konwersacyjnej. Pozwalają one na swobodne wprowadzanie podstawowych parametrów i wymiarów elementów konstrukcyjnych przewodów (szyn, osion, izolatorów) oraz na wydruk i graficzną prezentację wyników obliczeń. Realizacja tych programów możliwa

jest na mikrokomputerach klasy IBM PC z pamięcią operacyjną 640 kB, wyposażonych w koprocesor i typową kartę graficzną.

Celowe są dalsze badania teoretyczne i eksperymentalne, mające na celu uzyskanie użytecznych programów komputerowych, służących do wyznaczania rozkładu pola elektrycznego w następujących obszarach przedmiotowych przewodów szynowych:

- odcinkach krzywoliniowych i odgałęzieniach o różnym stopniu nierówności pola,
- układach trójbiegunowych z izolatorami odstępnikowymi o zróżnicowanym ukształtowaniu geometrycznym.

Wymiarowanie i kształtowanie układów izolacyjnych dotyczy izolacji gazowej ciśnieniowej i izolacji stałej przewodów szynowych o napięciach roboczych od 123 do 420 kV. Dobór izolacji przewodów dokonywany jest ze względu na wymagania w zakresie doraźnej i długotrwałej wytrzymałości elektrycznej. Analizowane są najważniejsze wymagane właściwości techniczne oraz zasady, kryteria i metody wymiarowania układów izolacyjnych. Rozkłady pola elektrycznego wyznaczano na podstawie rezultatów obliczeń numerycznych, będących wynikiem realizacji programów komputerowych IZO_DYSK i IZO_KIEL.

Najmniejsze dopuszczalne gazowe odstępy izolacyjne w przewodach jednobiegunowych, wynikające ze zbiorów najmniejszych dopuszczalnych wymiarów poprzecznych szyn prądowych i osłon przewodów, wyznaczano na podstawie wyników szczegółowych analiz i obliczeń numerycznych (program użytkowy IZOLACJA). Opracowano również program obliczeniowy ODIZ_3, służący do przybliżonego wymiarowania przewodów trójbiegunowych w układzie trójkąta równobocznego (zał.1).

Na podstawie dużej liczby eksperymentów numerycznych z zakresu modelowania rozkładu przestrzennego pola elektrycznego (zał.2) wyznaczono zbiory dopuszczalnych wymiarów geometrycznych izolatorów dyskowych i kielichowych w przewodach jednobiegunowych (w tym również izolatorów wyposażonych w wewnętrzne i zewnętrzne ekrany sterujące). Zaproponowane rozwiązania wymiarowe izolatorów wsporczych i grodziowych są modelami obliczeniowymi, ponieważ nie ma dotychczas jednoznacznych ustaleń konstrukcyjnych, materiałowych i technologicznych. Zaproponowane metody wymiarowania i kształtowania izolacji gazoszczelnych przewodów szynowych są przystosowane do wykonywania obliczeń optymalizacyjnych ze wspomaganie komputerowym, przy uwzględnieniu rozmaitych kryteriów technicznych oraz minimalizacji całkowitych spodziewanych kosztów rocznych.

Prace w zakresie projektowania układów izolacyjnych gazoszczelnych przewodów szynowych powinny być kontynuowane. W szczególności należy dążyć do:

- rozszerzenia zakresu eksperymentów numerycznych, stanowiących podstawę wymiarowania izolatorów dyskowych ze względu na obciążenia elektryczne,
- opracowania użytkowego programu komputerowego do obliczania izolacji gazowej i stałej w odcinkach krzywoliniowych i odgałęzieniach przewodów,
- określenia kryteriów doboru i praktycznego wymiarowania izolatorów odstępnikowych ze względu na wymagania w zakresie wytrzymałości mechanicznej, a następnie stworzenia stosownego algorytmu i programu obliczeniowego,
- opracowania algorytmów i programów obliczeniowych do wymiarowania izolatorów odstępnikowych o dowolnym ukształtowaniu geometrycznym, w tym również izolatorów niesymetrycznych.

Wyznaczanie temperatur elementów konstrukcyjnych przewodów szynowych dokonywane jest na podstawie programu obliczeniowego, w którym wykorzystano istnienie analogu wybranych wielkości cieplnych i elektrycznych. W obwodowym modelu obliczeniowym uwzględnia się nieliniowość temperaturową rezystywności materiału szyn i osłon oraz parametrów fizycznych sześćciofluorku siarki i powietrza otaczającego przewód. Model odnosi się bezpośrednio do przewodu szynowego, z założenia jednorodnego. Wpływ niejednorodności elementów składowych na temperaturę nagrzewania rzeczywistego przewodu szynowego jest uwzględniony pośrednio - poprzez ilościowe skorygowanie kryterium dopuszczalności technicznej rozważanego rozwiązania konstrukcyjnego.

Program obliczeniowy NAGRZEW umożliwia wyznaczenie temperatury szyny oraz temperatury osłony w warunkach obciążenia prądem roboczym i zwarciovym. Zakres stosowania procedury obliczeniowej obejmuje:

- przewody trójbiegunowe we wspólnej osłonie i z fazami rozmieszczonymi w układzie trójkąta równobocznego,
- przewody jednobiegunowe z indywidualną osłoną dla każdej z faz, ułożonych w jednej płaszczyźnie lub w układzie trójkąta równobocznego.

W wypadku przewodów jednobiegunowych rozpatruje się rozwiązania z ciągłymi ekranami fazowymi, połączonymi lub nie połączonymi na końcach przewodów.

Obliczenia nagrzewania przewodów szynowych prądem zwarciovym ograniczone są do wyznaczania temperatur szyny prądowej i osłony, występujących w chwili wyłączenia zwarcia. Z uwagi na zbyt długi czas obliczeń numerycznych zrezygnowano z wyznaczania przebiegu czasowego powyższych temperatur.

W dalszych pracach w zakresie projektowania przedmiotowych przewodów szynowych ze względu na wymaganą odporność cieplną należy dążyć do:

- zbadania ilościowego wpływu niejednorodności osiowych (złącz, izolatorów, odgałęzień itd.) na nagrzewanie się rzeczywistych konstrukcji przewodów,
- opracowania zbioru danych, umożliwiających szybkie i bezpośrednie skorygowanie kryterium temperaturowego dla typowych konstrukcji przewodów (zależnie od rodzaju, charakteru i stopnia niejednorodności),
- rozszerzenia zakresu zastosowania obwodowych modeli obliczeniowych do przewodów izolowanych mieszaniną sprężonych gazów oraz ułożonych w sposób nietypowy,
- uściślenia metod wyznaczania strat w szynach prądowych i osłonach przewodów, poprzez zastosowanie numerycznych procedur obliczania pola elektromagnetycznego.

LITERATURA

A. KSIĄZKI, ARTYKUŁY, OPRACOWANIA NIEPUBLIKOWANE

1. Александров Г.Н. и Зр.: Проектирование электрических аппаратов. Энергоатомиздат, Ленинград 1985.
2. Antoniewicz J.: Tablice funkcji dla inżynierów. PWN, Warszawa 1969.
3. Au A., Maksymiuk J., Pochanke Z.: Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1982.
4. Baer G.P. et al: 420 kV SF₆ - insulated Tubular Bus for the Wehr Pumped-storage Plant Electric Tests. IEEE PES Summer Meeting 1975, San Francisco. Pap.F75 576-8
5. Baron B.: Analiza numeryczna równań całkowo-brzegowych pól elektrycznych pewnej klasy modeli obliczeniowych. Zesz. Nauk. Polit. Śląskiej "Elektryka", z.97. Gliwice 1985 (monografia).
6. Baron B.: Analiza pola elektrycznego w układach torów prądowych. CPBP 02.18, temat 1.4.3 (rozdz.3). Polit.Śląska, Gliwice 1987 (niepubl.).
7. Baron B., Ulman J.: Modele matematyczne pola elektrycznego w przewodach szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.3. Polit.Śląska, Gliwice 1987 (niepubl.).
8. Baron B., Ulman J.: Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w przewodach szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.3. Polit.Śląska, Gliwice 1988 (niepubl.).
9. Baron B.: Modelowanie matematyczne pola elektrycznego w przewodach szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.3. PP-P "Prometal", Gliwice 1989-1990 (niepubl.).
10. Baron B., Gacek Z.: Computation of Electric Field Distribution Inside High Voltage Metalclad SF₆-Buses. VII ISH-91, vol.1, rep.12.09. Dresden 1991.

11. Baron B., Gacek Z.: Modelowanie numeryczne pola elektrycznego w wysokonapięciowych hermetyzowanych przewodach szynowych. Zesz.Nauk.Polit. Śląskiej "Elektryka", z.124, Gliwice 1991.
12. Bartodziej G., Kiś W.: Zastosowanie teorii linii elektrycznej jednorodnej do określania temperatur w torach prądowych skokowo niejednorodnych. Zesz.Nauk.Pol.Śląskiej "Elektryka", z.76, Gliwice 1981.
13. Bartodziej G., Kiś W., Otręba H.: Realizacja modelu fizycznego przewodów szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.4. Polit.Śląska, Gliwice 1987 (niepubl.).
14. Bartodziej G., Kiś W.: Realizacja modelu fizycznego przewodów szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.4. Polit.Śląska, Gliwice 1988 (niepubl.).
15. Bartodziej B., Kiś W i in.: Opracowanie algorytmów obliczeń optymalizacyjnych z oprogramowaniem podstawowym dla przewodu szynowego. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.4. Polit.Śląska, Gliwice 1989 (niepubl.).
16. Bartodziej G., Kiś W. i in.: Opracowanie systemu obliczeniowego do optymalizacji przewodów szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.4 (cz.I). Polit. Śląska, Gliwice 1990 (niepubl.).
17. Delves L.M., Walsh J.: Numerical Solution of Integral Equations. Clavendon Press, Oxford 1974.
18. Deepken H.C.: Calculated Heat Transfer Characteristics of Air and SF₆. IEEE Trans. on Power App. and Systems. Vol.P., PAS-89, No 8, 1970.
19. Долин А.П.: Современные токопроводы. Высшая Школа, Москва 1988.
20. Dryja M., Jankowscy J.i M.: Przegląd metod i algorytmów numerycznych; część II. WNT, Warszawa 1982.
21. Dubicki J.: Badania materiałów izolacyjnych dla przewodów szynowych wieloprądowych; ocena wstępna materiałów izolacyjnych dostępnych w kraju. CPBP 02.18, temat 1.4.3 (rozdz.6). Polit. Śląska, Gliwice 1986 (niepubl.).
22. Dubicki J., Rygał R.: Badanie materiałów izolacyjnych przewodów szynowych wieloprądowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.1. Polit. Częstochowska, Częstochowa 1987 (niepubl.).
23. Dubicki J., Rygał R.: Przygotowanie krajowych materiałów izolacyjnych dla przewodów szynowych z izolacją gazową SF₆. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.1. Polit. Częstochowska, Częstochowa 1988-1990 (niepubl.).
24. Fichtenholtz G.M.: Rachunek różniczkowy i całkowy. PWN, Warszawa 1978.
25. Gacek Z.: Izolacja gazowa ciśnieniowa przewodów wieloprądowych. CPBP 02.18, temat 1.4.3.(rozdz.4). Polit.Śląska, Gliwice 1986 (niepubl.).

26. Gacek Z., Szadkowski M.: Analiza kryteriów wymiarowania układów izolacyjnych przewodów szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.2. Polit. Śląska, Gliwice 1987 (niepubl.).
27. Gacek Z.: Określenie optymalnego ukształtowania izolatorów wsporczych i grodziowych dla przewodów szynowych izolowanych SF₆. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.2. Polit. Śląska, Gliwice 1988.
28. Gacek Z., Szadkowski M. i in.: Wymiarowanie i kształtowanie izolatorów grodziowych przewodów szynowych 123-420 kV; wykonanie serii eksperymentów numerycznych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.2. Polit. Śląska, Gliwice 1989 (niepubl.).
29. Gacek Z.: Analiza kryteriów wymiarowania i kształtowania układów izolacyjnych w przewodach szynowych 123-420 kV. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.2. Polit. Śląska, Gliwice 1990 (niepubl.).
30. Гацек З., Шевц Б.: Критерии и алгоритм определения размеров главной изоляции герметизированных шинопроводов. Межвузовый сборник научных трудов НЭТИ. Новосибирск 1989.
31. Gacek Z.: Wymiarowanie izolacji gazowej hermetyzowanych przewodów szynowych 123-420 kV. Zesz. Nauk. Polit. Śląskiej "Elektryka", z. 124, Gliwice 1991.
32. Gacek Z., Paszek G.: Preliminary Dimensioning of High voltage SF₆-insulated Buses. ICPADM-91, session I-24. Tokyo 1991.
33. Gacek Z., Szadkowski M.: Metodyka wstępnego wymiarowania wysokonapięciowych przewodów szynowych z SF₆. Zesz. Nauk. Polit. Śląskiej "Elektryka", z. 116, Gliwice 1991.
34. Goliński J., Łabus-Nawrat K., Łaś T.: Badania izolacji wewnętrznej. Technika badań wysokonapięciowych, t. II, rozdz. 19. WNT, Warszawa 1985.
35. Hering M.: Termokinetika dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
36. Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1979.
37. Hosemann G., Tsanakas D.: Dynamic Short-circuit Stress of Bus-bar Structures with Stiff Conductors. Parametric Studies and Conclusions for Simplified Calculation Methods. Electra No 68, 1980 (pp. 37-64).
38. Iglewski M., Madey J., Matwin S.: Pascal. WNT, Warszawa 1979.
39. Itaka K., Araki T., Hara T.: Heat Transfer Characteristics of Gas Spacer Cables. IEEE Trans. on Power App. Systems; Vol. PAS-97, No 5, 1978.
40. Jankowicz S.: Wybrane zagadnienia rozdzielnic osłoniętych wysokiego napięcia z sześciofluorkiem siarki. Prace Inst. Elektrotechniki, z. 140. Warszawa 1986.

41. Кан К.Н. и др.: Механическая прочность эпоксидной изоляции. Энергия. Ленинград 1973.
42. Kärner H., Voss H.J.: The Particle Influenced Breakdown of Insulated Surfaces in SF₆ under Oscillating Switching Impulse Voltage. III ISH-79, rep.32.04. Milan 1979.
43. Kiś W.: Porównanie wyników pomiarów i obliczeń nagrzewania modelu przewodu szynowego SF₆-124 kV. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.4 (cz.II). Polit.Śląska, Gliwice 1990 (niepubl.).
44. Kiś W.: Obliczanie nagrzewania przewodów szynowych ekranowanych i izolacją gazową SF₆ w stanie cieplnie ustalonym. Zesz.Nauk.Polit. Śląskiej "Elektryka", z.124, Gliwice 1991.
45. Knothe S.: Rozdzielnice wysokonapięciowe izolowane. WNT, Warszawa 1976.
46. Колечицкий Е.С.: Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. Энергоатомиздат, Москва 1983.
47. Krakowski M.: Elektrotechnika teoretyczna; cz.II. PWN, Warszawa - Poznań 1979.
48. Кучинский Г.С., Кузеветтер В.Е., Пинталь Ю.С.: Изоляция установок высокого напряжения. Энергоатомиздат, Москва 1987.
49. Kuffel E., Zaengl W.S.: High Voltage Engineering; Fundamentals. Pergamon Press, Oxford - New York 1988.
50. Kurdziel R.: Działania cieplne i dynamiczne prądów zwarciovych. WNT, Warszawa 1957.
51. Legras J.: Praktyczne metody analizy numerycznej. WNT, Warszawa 1974.
52. Michlin S.G., Smolicki C.L.: Metody przybliżonego rozwiązywania równań różniczkowych i całkowych. PWN, Warszawa 1972.
53. Mosch W., Hauschild W.: Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. VEB Verlag Technik, Berlin 1979.
54. Польшев А.И.: Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. Энергия, Ленинград 1979.
55. Praca zbiorowa: Compressed Gas Insulated Cables in Use Internationally. Electra No 94, May 1984.
56. Praca zbiorowa: Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1978.
57. Praca zbiorowa: Calculation of the Continuous Rating of Single Core, Rigid Type, Compressed Gas Insulated Cables in Still Air with No-solar Radiation; CIGRE Report. Electra No 100, May 1985.

58. Praca zbiorowa: Calculation of the Continuous Rating of Single Core, Rigid Type, Compressed Gas Insulated Cables in Still Air with No-solar Radiation; CIGRE Report. Electra No 106, May 1986.
59. Praca zbiorowa: Calculation of the Continuous Rating of Single Core, Rigid Type, Compressed Gas Insulated Cables in Still Air with No-solar Radiation; CIGRE Report. Electra No 125, July 1989.
60. Proga W.: Sprawozdanie z badań przewodu szynowego 123 kV izolowanego SF₆ (dok.techn.5263/89). CPBP 02.18, zadanie 1.4.8.1. Inst. Elektrotechniki, Warszawa 1989. (niepubl.).
61. Rygał R., Papużyński W.: Przygotowanie krajowych materiałów izolacyjnych dla przewodów szynowych. CPBP 02.18, zadanie 1.4.3.1. Polit. Częstochowska. Częstochowa 1990 (niepubl.).
62. Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła. WNT, Warszawa 1982.
63. Sangkasad S.: Dielectric Strength of Compressed SF₆ in Nonuniform Fields. Dr.Diss. ETH No 5738. Swiss Fed. Inst. of Technology. Zuerich 1976.
64. Sikora R.: Teoria pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa 1985.
65. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А.: Техника высоких напряжений. Высшая Школа, Минск 1982.
66. Staniszewski B.: Wymiana ciepła, podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979.
67. Strasser H. et al.: Effects of Arcs in Enclosures Filled with SF₆ and Steps taken to Restrict them in SF₆ Switchgear. IEEE Trans. on Power App. and Systems; vol.PAS-94, No 3. May/June 1975.
68. Szulkin P., Pogorzelski S.: Podstawy teorii pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa 1964.
69. Тиходеев Н.Н.: Перебача электрической энергии. Энергоатомиздат, Ленинград 1984.
70. Тозони О.В., Маергойц И.Д.: Расчёт трехмерных электромагнитных полей. Техника, Киев 1974.
71. Tsanakas D., Meyer W., Safigianni A.: Dynamische Kurzschlußbeanspruchung in Gleichstromanlagen. Archiv für Elektrotechnik 74 (1991), s.305-313.
72. Walkowiak C., Zyliński Z.: Projekt techniczny odcinka próbnego połączeń szynowych SF₆-110 kV. Energoprojekt, Warszawa; nr arch.1000 004. Warszawa 1988 (niepubl.).
73. Weedy B.M.: Underground Transmission of Electric Power. John Willey and Sons, New York 1980.

74. Winkler J.: Lane kompozycje epoksydowe w technice wysokich napięć. Prace Inst. Elektrotechniki, z.127, Warszawa 1983.
75. Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.

B. ZALECENIA MIĘDZYNARODOWE I NORMY

- N1. IEC Publ.517, 1975. High-voltage Metal Enclosed Switchgear for Rated Voltages Equal to or Higher than 72.5 kV.
- N2. IEC Publ.71-1, 1972. Insulation Coordination. Terms, Definitions, Principles and Rules.
- N3. IEC Publ.517, 1975 (Amendment No 1 of 1977). High Voltage Metal-enclosed Switchgear for Rated Voltages of 72.5 kV and Above.
- N4. IEC Publ.694, 1980. Common Clauses for High-voltage Switchgear and Controlgear Standards.
- N5. IEC Publ. 865, 1980. Calculation of the Effects of Short-circuit currents.
- N6. PN-81/E-05001 Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Znamionowe napięcia probiercze izolacji.
- N7. PN-86/E-05155 Urządzenia elektroenergetyczne. Wysokonapięciowe aparaty rozdzielcze i sterownicze. Wspólne wymagania i badania.
- N8. PN-90/E-05025. Obliczanie skutków prądów zwarciovych

C. INNE

- P1. SF₆-Rohrleiter-für Hochleistungsübertragung. SIEMENS Aktiengesellschaft. Bestell - Nr E 129/1928.
- P2. SF₆-isolierte Schaltanlagen. Schnitt elnes Schaltfeldes für 245/300 kV. SIEMENS Aktiengesellschaft. Bestell - Nr E 121/1372-220.
- P3. Metal-enclosed SF₆-insulated High Voltage Switchgear up to 765 kV. AEG Aktiengesellschaft Schaltanlagen. A22V.7.64/1287.
- P4. Gas-insulated Metal-enclosed Switchgear 7.2.5-145 kV. AEG Aktiengesellschaft Hochspannungstechnik. A.22.V.7.75/0787 EN.
- P5. SF₆-Gas-isolierte Schaltanlagen (GIS). Typ ELD. BBC Aktiengesellschaft Brown Boveri und Cie., Druckschrift Nr CH-A 161 321. D.
- P6. Turbo Pascal, version 6.0. Borland International. Scotts Valley, California 1990.

ZALĄCZNIK 1

OCENA PRZYBLIŻONYCH WSPÓLZALEŻNOŚCI WYMIARÓW GEOMETRYCZNYCH TRÓJBIEGUNOWYCH I JEDNOBIEGUNOWYCH PRZEWODÓW SZYNOWYCH

Dany jest jednobiegunowy przewód szynowy w postaci układu walcowego współosiowego, izolowanego sprężonym SF_6 , o zadanych średnicach szyny prądowej (d) i osłony zewnętrznej (D). Na tej podstawie należy oszacować wymiary geometryczne przewodu szynowego trójbiegunowego, z szynami prądowymi rozmieszczonymi w układzie trójkąta równobocznego wewnątrz wspólnej osłony (jak na szkicu z rys. Z1.1), równoważnego pod względem wytrzymałościowym.

Założenia obliczeniowe:

- przewód szynowy jednobiegunowy jest zasilany fazowym napięciem roboczym o wartości skutecznej $U_m / \sqrt{3}$,
- przewód szynowy trójbiegunowy jest zasilany symetrycznym trójfazowym napięciem roboczym o wartości skutecznej U_m (między szynami prądowymi) i $U_m / \sqrt{3}$ (między szyną a uziemioną osłoną),
- napięcie na jednej z szyn fazowych względem uziemionej osłony przewodu trójbiegunowego przechodzi przez wartość zerową,
- średnice fazowych szyn prądowych obydwu rodzajów przewodów szynowych są sobie równe ($d_f = d$).

Jako kryterium równoważności wytrzymałościowej gazowych odstępów izolacyjnych w obydwu konstrukcjach przewodów przyjęto równość największych wartości natężenia pola elektrycznego (dla zadanych warunków napięciowych i konfiguracji geometrycznej elektrod). Do oszacowania tych wartości zastosowano następujące wzory:

a) odstęp izolacyjny w jednobiegunowym przewodzie szynowym:

$$E_{\max} = \frac{2 U_m}{\sqrt{3} d \ln \frac{D}{d}}, \quad (Z1.1)$$

b) odstęp izolacyjny między szynami prądowymi w trójbiegunowym przewodzie szynowym:

$$E_{\Delta_{\max}} \cong U_m \left(\frac{1}{a_m} + \frac{0,36}{d} \right), \quad (Z1.2)$$

c) odstęp izolacyjny między szyną prądową a uziemioną osłoną trójbiegunowego przewodu szynowego:

$$E_{f_{\max}} \cong \frac{U_m}{\sqrt{3} d \ln \frac{a_f}{d}} \quad (Z1.3)$$

gdzie: U_m - najwyższe napięcie urządzenia, w kV;

d - średnica szyny prądowej w każdym z przewodów szynowych, w mm;

D - średnica osłony jednobiegunowego przewodu szynowego, w mm;

a_m - międzyfazowy odstęp izolacyjny w jednobiegunowym przewodzie szynowym, w mm;

a_f - odstęp izolacyjny między szyną prądową a uziemioną osłoną trójbiegunowego przewodu szynowego, w mm.

Wzór (Z1.1) jest wzorem dokładnym, natomiast dwa pozostałe - przybliżone.

Wzór (Z1.2) jest przekształconym wzorem empirycznym Haasa, a wzór (Z1.3) odnosi się do układu obliczeniowego walec - płyta uziemiona¹⁾.

Jeśli największe wartości natężenia pola elektrycznego, występujące w izolacji przewodu jednobiegunowego (E_{\max}) i między fazowymi szynami prądowymi przewodu trójbiegunowego ($E_{\Delta_{\max}}$) są do siebie zbliżone, długość ekwiwalentnego międzyfazowego odstępu izolacyjnego:

$$a_m \cong \frac{\sqrt{3} d \ln D/d}{2 - 0,36 \sqrt{3} \ln D/d} = \frac{d}{2 \left(\frac{1}{\sqrt{3} \ln D/d} - 0,18 \right)}. \quad (Z1.4)$$

Przybliżoną długość ekwiwalentnego odstępu izolacyjnego między szyną prądową a uziemioną osłoną przewodu trójbiegunowego można obliczyć porównując największe wartości natężenia pola, wyrażone za pomocą wzorów (Z1.1) i (Z1.3), skąd:

$$a_f \cong \frac{d}{4} \sqrt{\frac{D}{d}}. \quad (Z1.5)$$

1) Wzór (Z1.3) pozwala w prosty sposób oszacować (z nadmiarem) największe natężenie pola elektrycznego w układzie walcowym niewspółosiowym.

Ekwiwalentna średnica osłony przewodu trójbiegunowego jest sumą:

- średnicy koła ($2R$) opisanego na trójkącie równobocznym, którego wierzchołkami są podłużne osie symetrii fazowych szyn prądowych,
- średnicy szyny prądowej (d),
- podwojonej długości fazowego (doziemnego) odstepu izolacyjnego ($2a_f$).

Oznacza to, że:

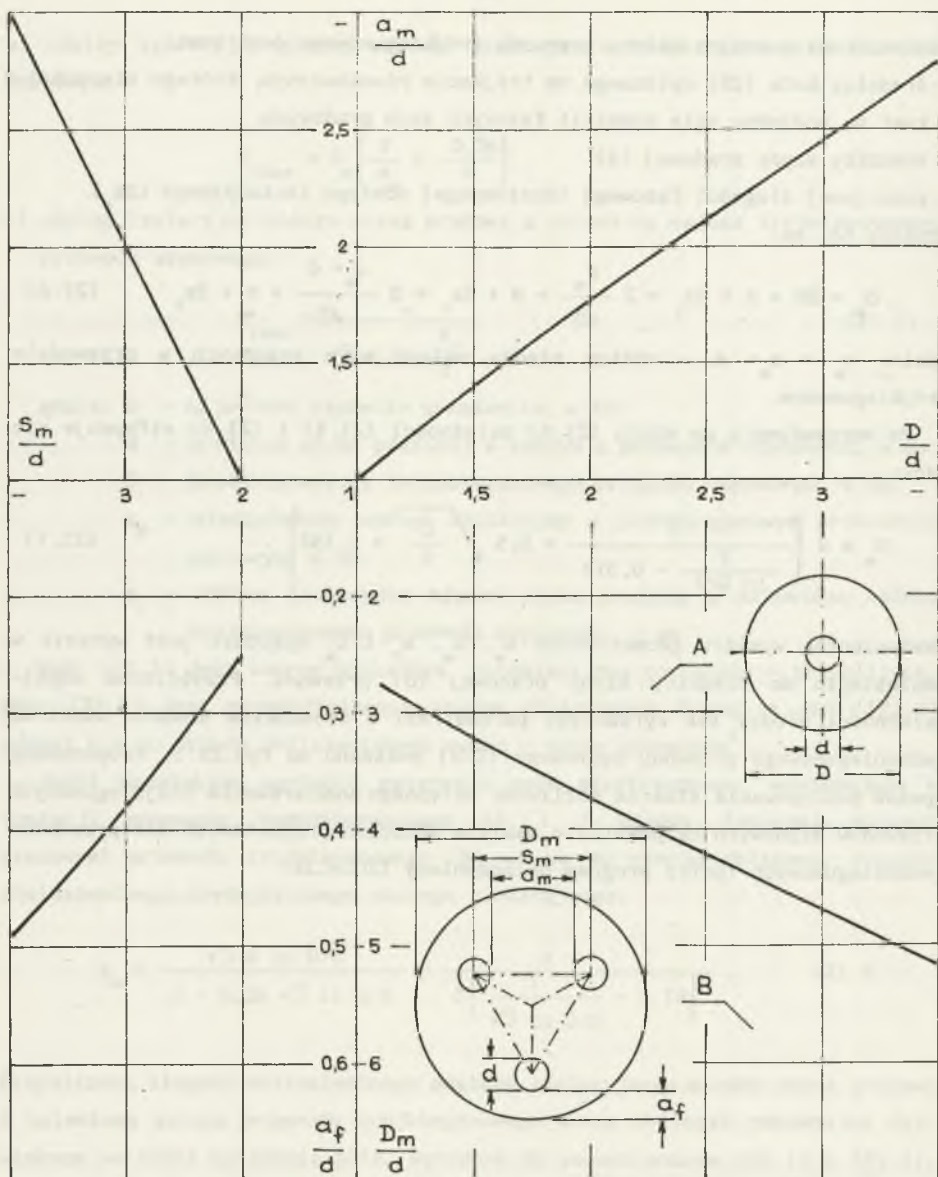
$$D_m = 2R + d + 2a_f = 2 \frac{s_m}{\sqrt{3}} + d + 2a_f = 2 \frac{a + d}{\sqrt{3}} + d + 2a_f \quad (Z1.6)$$

gdzie: $s_m = a + d$ - odstęp między osiami szyn prądowych w przewodzie trójbiegunowym.

Po wprowadzeniu do wzoru (Z1.6) zależności (Z1.4) i (Z1.5) otrzymuje się wzór:

$$D_m \cong d \left(\frac{1}{\frac{1}{\ln D/d} - 0,312} + 0,5 \sqrt{\frac{D}{d}} + 2,155 \right) \quad (Z1.7)$$

Ekwiwalentne wymiary geometryczne a_m , s_m , a_f i D_m wygodnie jest wyrazić w odniesieniu do średnicy szyny prądowej (d) przewodu. Przybliżone współzależności między tak wyrażonymi parametrami a stosunkiem średnic elektrod jednobiegunowego przewodu szynowego (D/d) pokazano na rys.Z1.1. Proponowany sposób postępowania stwarza możliwość wstępnego wymiarowania trójbiegunowych przewodów szynowych na podstawie wyników obliczeń projektowych dla przewodów jednobiegunowych (patrz program obliczeniowy IZOLACJA).



Rys.Z1.1. Przybliżone współzależności między wymiarami poprzecznymi elektrod i odstępów izolacyjnych w równoważnych pod względem wytrzymałościowym przewodach szynowych: jednobiegunowym (A) i trójbiegunowym (B)

Fig.Z1.1. Approximate interrelations between geometrical dimensions of electrodes and gas clearances in unipolar (A) and three-phase (B) buses

Załącznik 2

WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH WYMIARÓW IZOLATORÓW WSPORCZYCH I GRODZIOWYCH W PRZEWODACH SZYNOWYCH 123-420 kV

Obliczenia numeryczne dotyczą modeli izolatorów dyskowych i kielichowych, które odwzorowują konstrukcje izolacyjne w jednobiegunowych przewodach szynowych 123-420 kV. Modele te są zaprezentowane na rys.Z2.1. Obliczenia numeryczne, mające na celu analizę pola elektrycznego i wybór odpowiedniego ukształtowania geometrycznego izolatorów ze względu na kryteria określone w podrozdz.4.3.2, zrealizowano na mikrokomputerze IBM PC. Wykorzystano zbiór programów obliczeniowych opisanych w rozdziale 3 oraz opracowaniach [27] i [28]. W odniesieniu do poszczególnych modeli izolatorów stosowano:

- programy obliczeniowe IZO_DYSK (w wersjach 1, 2 i 3), umożliwiające wykonywanie obliczeń odpowiednio dla modeli izolatorów dyskowych bez ekranów sterujących oraz wyposażonych w półtoroidalne wewnętrzne i zewnętrzne ekrany sterujące (modele 1, 2 i 3);
- programy obliczeniowe IZO_KIEL (w wersjach 1 i 2), umożliwiające wykonywanie obliczeń odpowiednio dla modeli izolatorów kielichowych bez ekranów sterujących oraz wyposażonych w wewnętrzne półtoroidalne ekrany sterujące (modele 4 i 5).

Rezultatem każdego z obliczeń, wykonanego dla określonego modelu izolatora, jest zbiór przestrzennie uporządkowanych wartości:

- potencjału elektrycznego (nie analizowanego w dalszych rozważaniach),
- składowej stycznej i normalnej oraz modułu wektora natężenia pola elektrycznego wzdłuż powierzchni szyny prądowej (w ośrodku gazowym i wewnątrz izolatorów),
- składowej stycznej i normalnej oraz modułu wektora natężenia pola elektrycznego wzdłuż powierzchni izolatorów.

Dane do obliczeń numerycznych zestawiono w tabl.Z2.1. Średnice szyn prądowych i osłon przewodów przyjęto z tabl.4.4 (warianty w2, w4 i w9). Dla mo-

deli obliczeniowych 1, 2 i 3 z rys.Z2.1 (izolatory dyskowe) zmiennymi danymi wejściowymi były: grubość ścianki izolatora oraz promień koła R_{01} (kształtujący krawędź przekroju izolatora) przy powierzchni osłony przewodu. Dla modeli obliczeniowych 4 i 5 (izolatory kielichowe) danymi wejściowymi były: długość osiowa ($H = 225, 300$ i 375 mm) oraz grubość ścianki izolatora przy powierzchni osłony i szyny prądowej. Dla przewodów o napięciu roboczym 420 kV rozważano również modele izolatorów, wyposażonych w elektrostatyczne ekrany sterujące (wewnętrzne i zewnętrzne). Obliczenia wykonano dla dwóch wartości przenikalności elektrycznej względnej kompozycji epoksydowej ($\epsilon_1 = 4$ i $\epsilon_1 = 8$). Wyniki obliczeń parametrów pola elektrycznego dla rozważanych modeli izolatorów prezentowane są w formie graficznej.

W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki obliczeń wartości maksymalnych modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz kolejnych modeli:

- a) izolatorów dyskowych bez ekranów sterujących (rys.Z2.2 i Z2.3),
- b) izolatorów dyskowych z wewnętrznym półtoroidalnym ekranem sterującym (rys.Z2.4),
- c) izolatorów dyskowych z zewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi (rys.Z2.5).

Wszystkie wykresy mają postać zależności rozważanego parametru pola elektrycznego od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów dyskowych (mierzonych odpowiednio przy powierzchni szyny prądowej i osłony przewodu). W wypadku modeli izolatorów z ekranami sterującymi dodatkowym parametrem obliczeniowym jest stosunek głębokości wpuszczenia ekranu w głąb szyny prądowej do promienia ekranu sterującego (rys.Z2.4 i 5).

Z wykonanych obliczeń numerycznych wynika, że:

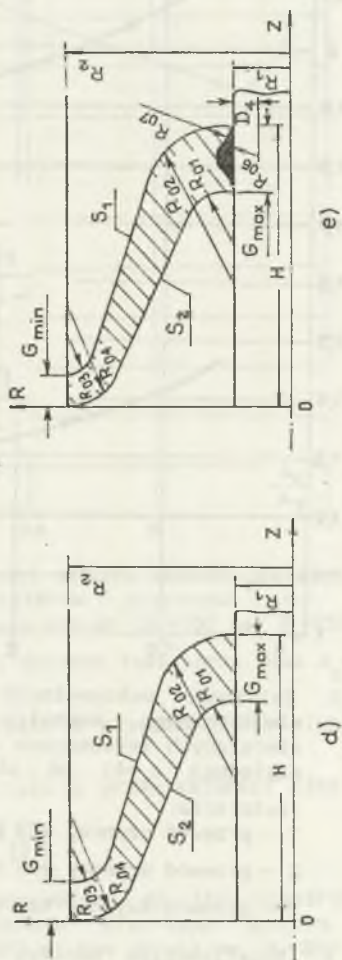
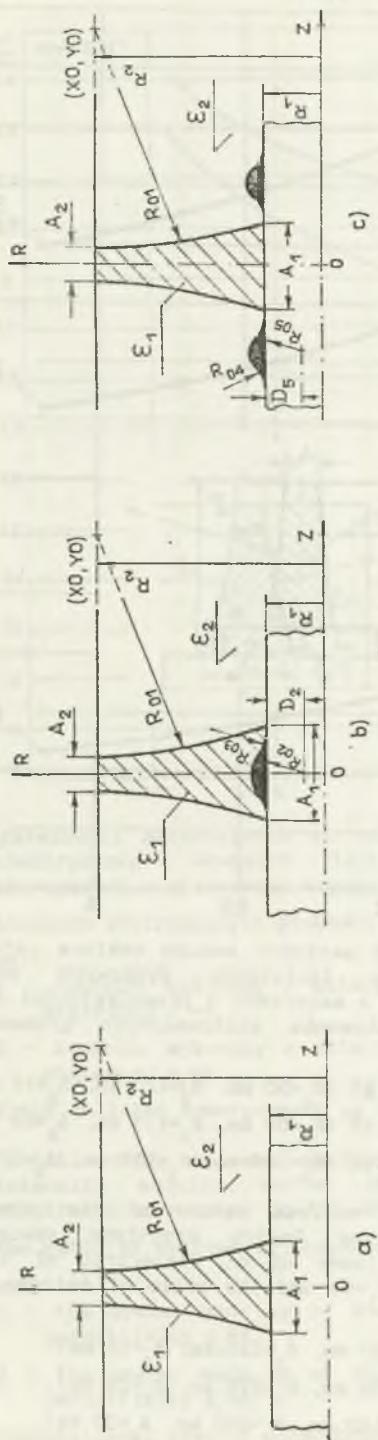
- a) poziom największego natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów dyskowych jest zależny od napięcia roboczego, średnic szyny prądowej i osłony przewodu oraz przenikalności elektrycznej kompozycji epoksydowej, a ponadto od parametru kształtu geometrycznego izolatora A_1/A_2 (maleje nieliniowo ze wzrostem tego parametru);
- b) poziom największego natężenia pola elektrycznego w rozpatrywanych modelach izolatorów dyskowych bez wewnętrznych ekranów sterujących oraz w modelach izolatorów dyskowych z zewnętrznymi ekranami sterującymi nie przekracza największego dopuszczalnego długotrwałe natężenia pola elektrycznego ($E_d = 2,5$ kV/mm);

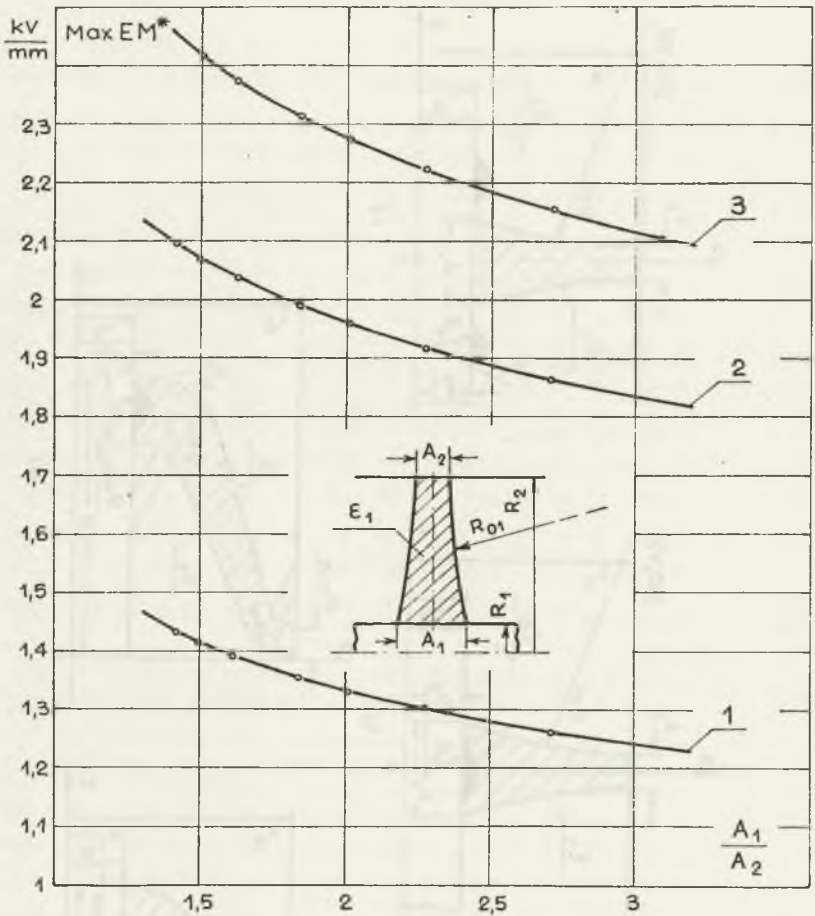
Rys.Z2.1. Rozpatrywane modele obliczeniowe izolatorów w gazoszczelnych przewodach szynowych:

- a) model 1 - izolator dyskowy bez ekranu sterującego, o krawędzi bocznej kształtowanej przez zmianę promienia koła R_{01} o środku leżącym na powierzchni osłony przewodu,
- b) model 2 - izolator jak w modelu 1, ale z wewnętrznym półtoroidalnym ekranem sterującym o promieniu koła toroidu R_{02} i stopniu jego zagłębienia D_2 ,
- c) model 3 - izolator jak w modelu 1, ale z zewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi o promieniach kół poroidów R_{05} i stopniu ich zagłębienia D_5 ,
- d) model 4 - izolator kielichowy bez ekranu sterującego, o długości osiowej H oraz krawędziach bocznych powierzchni S_1 i S_2 kształtowanych przez zmianę promieni kół R_{01} , R_{02} , R_{03} i R_{04} ,
- e) model 5 - izolator jak w modelu 4, ale z wewnętrznym półtoroidalnym ekranem sterującym (patrz model 2)

Fig.Z2.1. Computational models of spacers in SF_6 - insulated buses under consideration

- a) model 1 - the disc-type spacer without an electrostatic screen, with a lateral edge shaped by change-over the radius R_{01} of a circle which center is situated on the sheath of the bus,
- b) model 2 - the spacer like in model 1, but equipped with the internal half-toroidal electrostatic screen in which the radius of a toroid circle is R_{02} and the level of its caving is D_2 ,
- c) model 3 - the spacer like in model 1, but equipped with external half-toroidal electrostatic screens in which the radii of toroids are R_{05} and the level of their caving is D_5 ,
- d) model 4 - the conical-type spacer without an electrostatic screen, with axial length H and lateral edges of S_1 and S_2 surfaces shaped by change-over the radii of circles R_{01} , R_{02} , R_{03} and R_{04} ,
- e) model 5 - the spacer like in model 4, but equipped with the internal half-toroidal electrostatic screen (see the model 2)



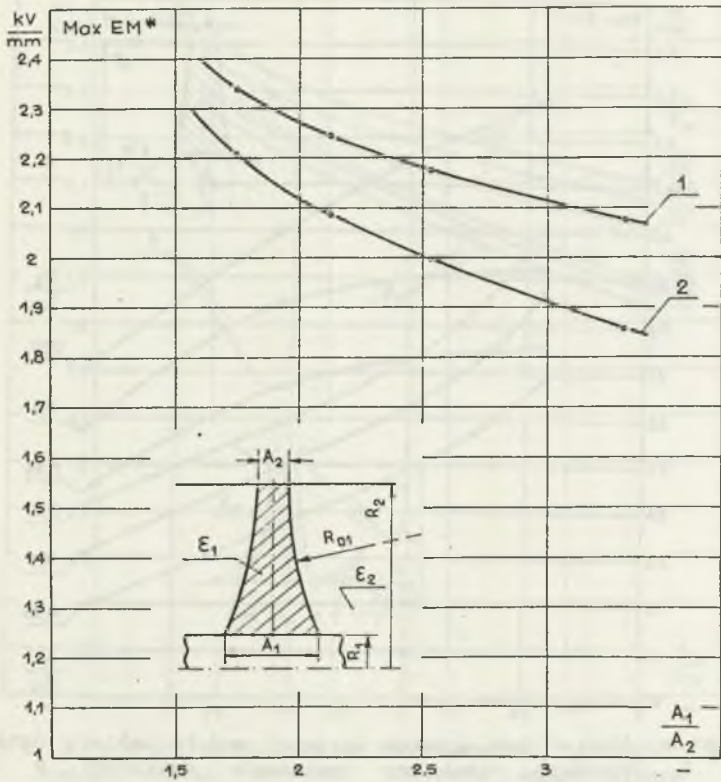


Rys.Z2.2. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów dyskowych bez ekranów sterujących (wykonanych z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$) od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów:

- 1 - przewód szynowy 123 kV ($R_1=50$ mm, $R_2=125$ mm, $A_2=15$ mm),
- 2 - przewód szynowy 245 kV ($R_1=50$ mm, $R_2=175$ mm, $A_2=25$ mm),
- 3 - przewód szynowy 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm, $A_2=30$ mm).

Fig.Z2.2. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector inside disc-type spacers without electrostatic screens (made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=4$) and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls:

- 1 - the 123 kV bus ($R_1=50$ mm, $R_2=125$ mm, $A_2=15$ mm),
- 2 - the 245 kV bus ($R_1=50$ mm, $R_2=175$ mm, $A_2=25$ mm),
- 3 - the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm, $A_2=30$ mm).



Rys. 22.3. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów dyskowych bez ekranów sterujących w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów (dla $A_2=20...30$ mm):

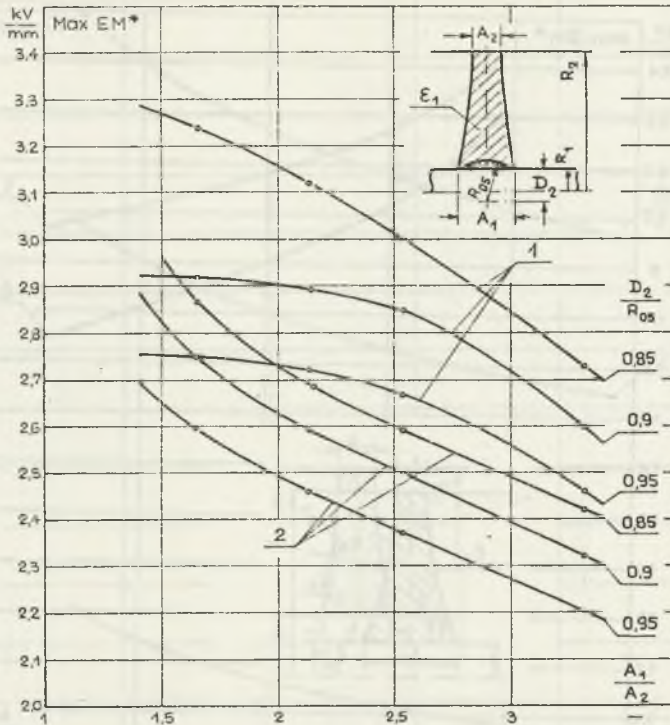
- 1 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$,
- 2 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=8$,

Wynik obliczeń numerycznych wg [29]

Fig. 22.3. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector inside disc-type spacers without electrostatic screens in the 420 kV bus ($R_1=10$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls (for $A_2=20...30$ mm):

- 1 - the spacer made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the spacer made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=8$,

Computational results according to [29]



Rys. Z2. 4. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów dyskowych z wewnętrznym półtoroidalnym ekranem sterującym w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów ($A_2=20...30$ mm) oraz od stosunku zagłębienia (D_2) do promienia (R_{02}) ekranu sterującego:

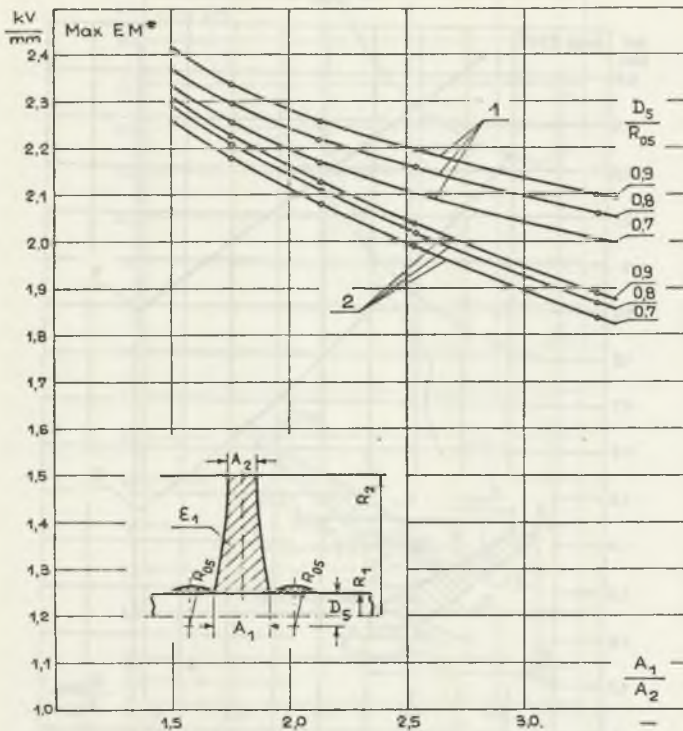
- 1 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$,
- 2 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=8$,

Wynik obliczeń numerycznych wg [29]

Fig. Z2. 4. Relationships between maximum values of the electric intensity modulus vector inside disc-type spacers with the internal electrostatic screen in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls for ($A_2=20...30$ mm) as well as the ratio of the caving (D_2) to the radius (R_{02}) of the screen:

- 1 - the spacer made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the spacer made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=8$,

Computational results according to [29]



Rys.22.5. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów dyskowych z zewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów ($A_2=20...30$ mm) oraz od stosunku zagłębienia (D_5) do promienia (R_{05}) ekranu sterującego:

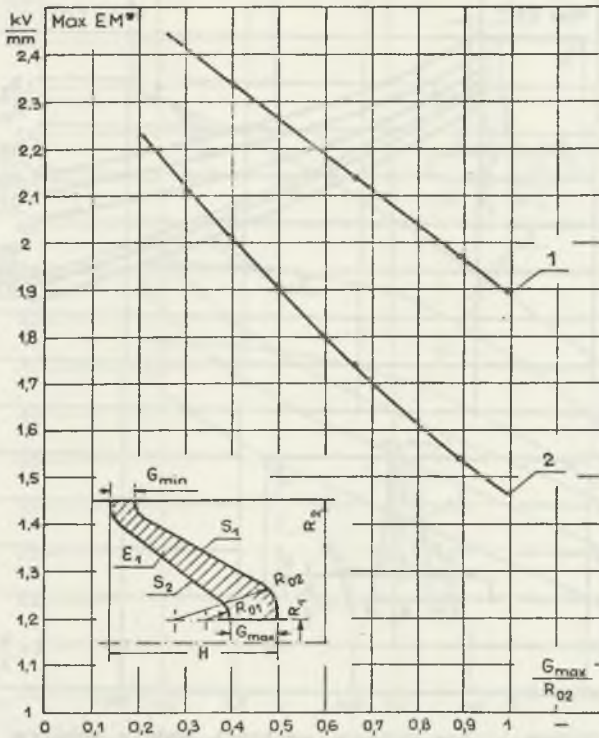
- 1 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$,
- 2 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=8$,

Wynik obliczeń numerycznych wg [29]

Fig.22.5. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector inside disc-type spacers with the external half-toroidal electrostatic screens in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls for ($A_2=20...30$ mm) as well as the ratio of the caving (D_5) to the radius (R_{05}) of the screen:

- 1 - the spacer made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the spacer made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=8$,

Computational results according to [29]



Rys.Z2.6. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów kielichowych ($H=225\dots375$ mm, $G_{\min}=15\dots30$ mm) bez ekranów sterujących w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku największej grubości ścianki i promienia kształtującego część zewnętrznej krawędzi bocznej izolatorów:

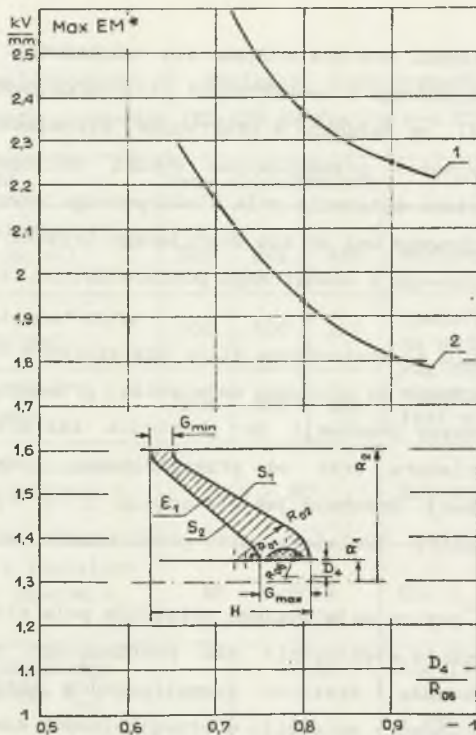
- 1 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$,
- 2 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=8$,

Wynik obliczeń numerycznych wg [29]

Fig.Z2.6. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector inside conical-type spacers ($H=225\dots375$ mm, $G_{\min}=15\dots30$ mm) without electrostatic screens in the 420 bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of maximum thickness of spacer's wall to the radius shaping a part of external lateral edge:

- 1 - the spacer made up of dielectric of the electric relative permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the spacer made up of dielectric of the electric relative permittivity $\epsilon_1=8$.

Computational results according to [29]



Rys.22.7. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów kielichowych z półtoroidalnym wewnętrznym ekranem sterującym w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku zagłębienia (D_4) do promienia (R_{06}) ekranu sterującego dla $G_{max}/R_{02}=0,666$:

- 1 - izolator kielichowy ($H=300$ mm, $G_{min}=20$ mm) wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1 = 4$,
- 2 - izolator kielichowy ($H=300$ mm, $G_{min}=20$ mm) wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1 = 8$.

Wyniki obliczeń numerycznych wg [29]

Fig.22.7. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus inside conical-type spacers with the internal half-toroidal electrostatic screen in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of the caving (D_4) to the radius (R_{06}) of the screen for $G_{max}/R_{02}=0,666$:

- 1 - the conical-type spacer ($H=300$ mm, $G_{min}=20$ mm) made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the conical-type spacer ($H=300$ mm, $G_{min}=20$ mm) made up of dielectric of the relative electric permittivity $\epsilon_1=8$.

Computational results according to [29]

c) powyższej właściwości nie stwierdzono dla większości analizowanych modeli izolatora dyskowego z wewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi (rys.Z2.4), co świadczy o praktycznej niecelowości ich stosowania.

W następnej kolejności przedstawiono wyniki obliczeń wartości maksymalnych modułów wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz modeli:

- a) izolatora kielichowego bez ekranu sterującego (rys.Z2.6),
- b) izolatora kielichowego z wewnętrznym półtoroidalnym ekranem sterującym (rys.Z2.7).

W przypadku modelu a) stwierdzono silne uzależnienie rozpatrywanego parametru pola elektrycznego od stosunku największej grubości ścianki izolatora (przy powierzchni szyny prądowej) do promienia kształtującego zewnętrzną krawędź boczną izolatora oraz od przenikalności elektrycznej względnej kompozycji epoksydowej. Podobnie jak dla modelu 1 z rys.Z2.1, największe natężenie pola wewnątrz izolatora nie przekraczało wartości uznanej za dopuszczalną.

W przypadku b), poziom największego natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora jest znacznie większy niż dla poprzedniego modelu. Poziom ten zależy od ukształtowania i wymiarów geometrycznych ekranu. Dla izolatora kielichowego, wykonanego z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1 = 4$, ryzyko przekroczenia największego dopuszczalnego długotrwałe natężenia pola $E_d = 2,5 \text{ kV/mm}$ jest nie do pominięcia.

Wyniki obliczeń numerycznych wykorzystano również do wyznaczenia wartości współczynnika nierównomierności pola elektrycznego β_{1z} (patrz wzór (4.7)), służącego do obliczania największego natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatora¹⁾:

$$\text{Max EM}^* = \frac{\beta_{1z} U_m}{\sqrt{3} (R_2 - R_1)} \quad (Z2.1)$$

Powyższy wzór jest analogiczny do wzoru, służącego do obliczania największego natężenia pola elektrycznego w gazowym odstępie izolacyjnym:

$$\text{Max EM} = \frac{U_m}{\sqrt{3} R_1 \ln R_2/R_1} = \frac{\beta U_m}{\sqrt{3} (R_2 - R_1)} \quad (Z2.2)$$

gdzie:

$\beta = \frac{m-1}{\ln m}$ - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego w gazowym odstępie izolacyjnym;

$m = R_2/R_1$ - parametr wymiarowy przewodu.

¹⁾ Konstrukcje wzorów (4.7) i (Z2.1) są identyczne, jednakże we wzorze (Z2-1) rozważa się promienie R_1 i R_2 , zamiast odpowiadających im średnic d_1 i D_2 .

Tablica Z2.1

Zestawienie danych wejściowych do obliczeń numerycznych wymiarów modeli izolatorów w przewodach szynowych 123-420 kV (patrz rys.Z2.1)

Lp.	Wielkość	Dane obliczeniowe			Uwagi
1.	Największe napięcie urządzenia U_m (w kV)	123	245	420	Wartości skuteczne
2.	Średnica zewnętrzna szyny prądowej $2R_1$ (w mm)	100	100	200	Wymiary poprzeczne uznane za najkorzystniejsze ze względu na własności elektryczne (patrz tabl.3.3)
3.	Średnica wewnętrzna osłony $2R_2$ (w mm)	250	300	500	
4.	Grubość ścianki izolatora dyskowego przy osłonie A_2 (w mm)	15 - 40			Zależnie od napięcia U_m
5.	Grubość ścianki izolatora dyskowego przy szynie A_1 (w mm)	$A1 = f(RO1)$			Dla $R_{01} = 225 - 1500$ mm
6.	Promień półtoroidalnego ekranu sterującego R_{02} i R_{05} (w mm)	-	-	25 -115	Dla izolatora dyskowego odpowiednio z wewnętrznym i zewnętrznym ekranem sterującym
7.	Głębokość wpuszczenia ekranu w głąb szyny prądowej D_2 i D_5 (w mm)	-	-	20 -112	
8.	Długość poosiowa izolatora kielichowego H (w mm)	-	-	225 -375	Dla izolatorów kielichowych o promieniach kół kształtujących krawędzie boczne: $R_{01} = 30 - 60$ mm $R_{02} = 45 - 75$ mm $R_{03} = 22,5$ mm $R_{04} = 30$ mm
9.	Minimalna grubość ścianki izolatora kielichowego G_{min} (w mm)	-	-	15 - 30	
10.	Maksymalna grubość ścianki izolatora kielichowego G_{max} (w mm)	-	-	30 - 40	
11.	Promień półtoroidalnego ekranu sterującego R_{06} (w mm)	-	-	20	Dla izolatora kielichowego z wewnętrznym ekranem sterującym
12.	Głębokość wpuszczenia ekranu w głąb szyny prądowej D_4 (w mm)	-	-	14 - 18	
13.	Przenikalność elektryczna względna ϵ_1	4 - 8			Zależnie od składu kompozycji epoksydowej

Po podzieleniu stronami zależności (Z2-1) przez zależność (Z2-2) otrzymuje się wyrażenie:

$$\beta_{1z} = \beta \frac{\text{Max EM}^*}{\text{Max EM}} \quad (Z2.3)$$

w którym wielkości β i Max EM są opisane prostymi zależnościami analitycznymi, lecz wielkość MAX EM* musi być wyznaczona eksperymentalnie.

Wyniki stosownych obliczeń numerycznych oraz obliczeń wykonanych według wzorów (Z2.2) i (Z2.3) zawiera tabl.Z2.2. Z rozważań wyeliminowano modele izolatorów z wewnętrznymi ekranami sterującymi, ze względu na zbyt duże ryzyko przekroczenia największego dopuszczalnego długotrwałe natężenia pola elektrycznego $E_d = 2,5$ kV/mm. Przyjmując średnią wartość przenikalności elektrycznej względnej kompozycji epoksydowej $\epsilon_1 = 6$, uśrednione wartości współczynnika nierównomierności natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów (bez ekranów sterujących lub z zewnętrznymi ekranami sterującymi) można oszacować następująco¹⁾:

Najwyższe dopuszczalne napięcie urządzenia U_m , w kV	Wartość współczynnika β_{1z} dla izolatora	
	dyskowego	kielichowego
123	1,3	(1,2)
245	1,6	(1,5)
420	1,3	1,2

Dla izolatorów wykonanych z określonej kompozycji epoksydowej współczynnik β_{1z} zależy prawie wyłącznie od parametru wymiarowego przewodu szynowego $m = R_2/R_1$. Przy przyjętych ograniczeniach, można stosować następujące zależności empiryczne:

- dla izolatorów dyskowych:

$$\beta_{1z} \cong 0,3 (m - 2,5) + 1,3 \quad (Z2.4)$$

- dla izolatorów kielichowych:

$$\beta_{1z} \cong 0,92 [0,3(m - 2,5) + 1,3] \quad (Z2.5)$$

Dużą część obliczeń numerycznych wykonano w celu wyznaczenia wartości maksymalnych modułu wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchniach modeli izolatorów dyskowych:

a) bez ekranów sterujących (rys.Z2.8),

¹⁾ Dane w nawiasach są wynikiem pojedynczych obliczeń numerycznych.

- b) z wewnętrznym półtoroidalnym ekranem sterującym (rys.Z2.9),
- c) z zewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi (rys.Z2.10).

Z analizy uzyskanych rezultatów wynika, że:

- największe natężenie pola elektrycznego na powierzchni izolatorów dyskowych występuje na ogół wokół ich nasady na szynę prądową,
- zależności tego natężenia od parametrów geometrycznych modeli izolatorów i ekranów sterujących są jakościowo zbliżone do stwierdzonych już zależności dla największego natężenia pola wewnątrz izolatorów,
- największe natężenie pola elektrycznego na powierzchni analizowanych modeli izolatorów nie przekracza (z dostatecznym zapasem) poziomu przyjętego za dopuszczalny¹⁾,
- warunek wyrażony za pomocą wzoru (4.14) jest spełniony także dla modeli izolatorów dyskowych z zewnętrznymi lub wewnętrznymi ekranami sterującymi.

Znacznie trudniej jest uzyskać równie korzystne właściwości powierzchniowe dla izolatorów kielichowych:

- a) bez ekranów sterujących (rys.Z2.11),
- b) z wewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi (rys.Z2.12).

Dotyczy to w szczególności ich zewnętrznych powierzchni bocznych, oznaczonych symbolem S_1 , gdzie największe natężenie pola elektrycznego - przy nieodpowiednio dobranych parametrach geometrycznych izolatorów lub ekranów - może przekroczyć poziom dopuszczalny (wartość 2,53 kV/mm dla analizowanego przewodu szynowego 420 kV). Takie niekorzystne przypadki stwierdzono dla większości modeli izolatorów kielichowych:

- w których parametr geometryczny G_{\max}/R_{02} osiąga znaczącą wartość (patrz krzywe 1 na rys.Z2.11),
- wyposażonych w wewnętrzne ekrany sterujące (patrz krzywe 1 na rys.Z2.12).

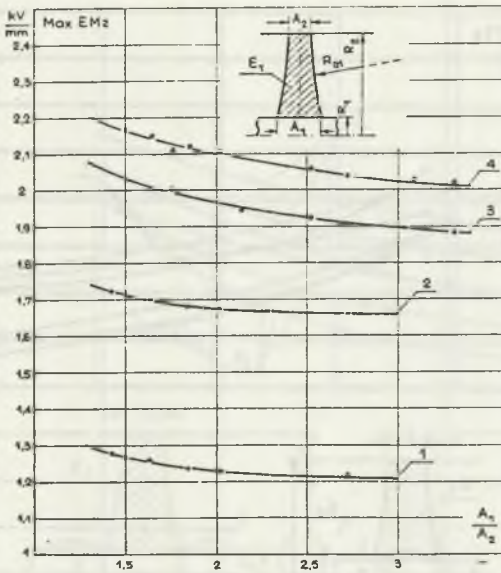
Z wykonanych obliczeń wynika, że poprawnie zaprojektowane izolatory kielichowe powinny mieć możliwie duży promień koła R_{02} (kształtującego profil powierzchni S_1). W rozważanym przypadku oznacza to, że $R_{02} > 60-80$ mm, jeśli dla $G_{\max} = 30-40$ mm i $\epsilon_1 = 6$ ma być spełniony warunek: $G_{\max}/R_{02} < 0,5$. Przy takich proporcjach wymiarowych izolatora największa wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni S_1 nie przekroczy poziomu uznanego za dopuszczalny.

¹⁾ Przyjmując 5-procentowy margines w odniesieniu do największego natężenia pola elektrycznego w gazowym odstępie izolacyjnym (wzory (4.14) i (22.2)), wartości dopuszczalne powierzchniowego natężenia pola elektrycznego dla przewodów 123, 245 i 420 kV odpowiednio wynoszą: 1,47; 2,15 i 2,52 kV/mm.

Wyniki obliczeń numerycznych maksymalnego modułu wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolatorów epoksydowych i współczynników nierównomierności pola w przewodach szynowych 123-420 kV (wg [27] i [28])

Najwyższe dopuszczalne napięcie urządzenia U_m kV	Główne wymiary poprzeczne		ϵ_1	Największe natężenie pola elektrycznego		Współczynniki nierównomierności pola elektrycznego		Charakterystyka izolatora
	Promień szyny prądowej R_1	Promień ostony R_2		Parametr wymiarowy $m = \frac{R_2}{R_1}$		w odstępnie gazowym $\beta = \frac{m-1}{\ln m}$	wewnątrz izolatora $\beta_{1/2} = \frac{\text{Max EM}^*}{\text{Max EM}}$	
				Max EM	Max EM*			
123	50	125	2,5	4	1,55	1,35	1,42	Dyskowy, bez ekranów sterujących ($A_1/A_2 = 1,5 - 2,5$)
				8		1,16	1,22	
245	50	175	3,5	4	2,26	1,97	1,74	Dyskowy, bez ekranów sterujących ($A_1/A_2 = 1,5 - 2,5$)
				8		1,67	1,49	
420	100	250	2,5	4	2,65	2,30	1,42	Dyskowy, z ekranami zewnętrznymi: ($A_1/A_2 = 1,75 - 3,5$; $D_5/R_{05} = 0,7 - 0,9$)
				8		1,98	1,32	
				4	2,18	1,35		
				8	2,02	1,25		
				4		2,15	1,33	Kielichowy, bez ekranów sterujących ($H = 225 - 375 \text{ mm}$; $G_{\min} = 15 - 30 \text{ mm}$; $G_{\max}/R_{02} = 0,4 - 0,9$)
				8	1,76	1,09		

Uwagi: 1) Przenikalność elektryczna względna kompozycji epoksydowej. 2) wg wzoru (Z2.2.). 3) Wartości średnie dla kolejnych modeli izolatorów, uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych. 4) Zgodnie ze wzorem (Z2.3.)



Rys.22.8. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatorów dyskowych bez ekranów sterujących od stosunku ekstremalnych grubości ścianek:

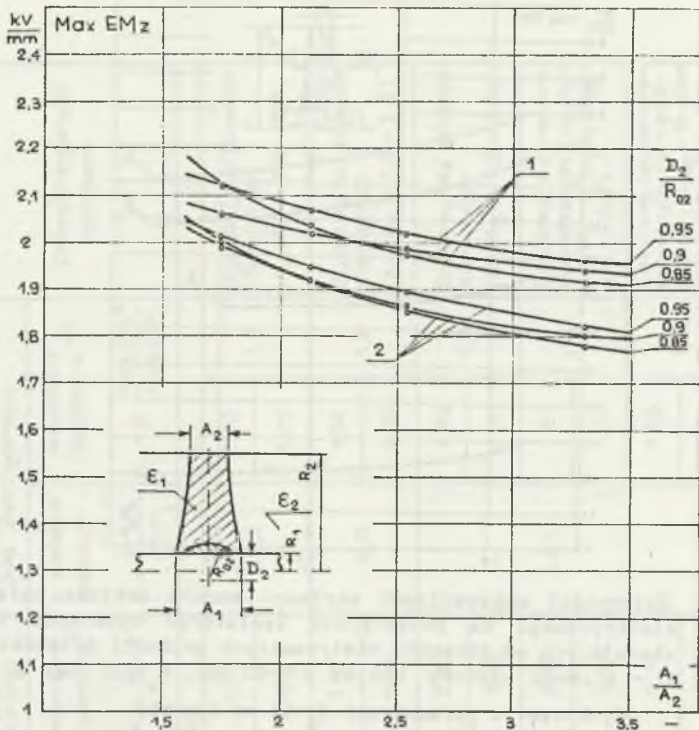
- 1 - przewód szynowy 123 kV ($R_1=50$ mm, $R_2=125$ mm) z izolatorami dyskowymi o parametrach $A_2=15$ mm i $\epsilon_1=4$,
- 2 - przewód szynowy 245 kV ($R_1=50$ mm, $R_2=175$ mm) z izolatorami dyskowymi o parametrach $A_2=25$ mm i $\epsilon_1=4$,
- 3 - przewód szynowy 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) z izolatorami dyskowymi o parametrach $A_2=20...30$ mm i $\epsilon_1=8$,
- 4 - przewód szynowy 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) z izolatorami dyskowymi o parametrach $A_2=20...30$ mm i $\epsilon_1=4$.

Wyniki obliczeń numerycznych wg [27] i [29]

Fig.22.8. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector on the surface of disc-type spacers without electrostatic screens and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls:

- 1 - the 123 kV bus ($R_1=50$ mm, $R_2=125$ mm) with the disc-type spacers which parameters are $A_2=15$ mm are $\epsilon_1=4$,
- 2 - the 245 kV bus ($R_1=50$ mm, $R_2=175$ mm) with the disc-type spacers which parameters are $A_2=25$ mm are $\epsilon_1=4$,
- 3 - the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) with the disc-type spacers which parameters are $A_2=20...30$ mm are $\epsilon_1=8$,
- 4 - the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) with the disc-type spacers which parameters are $A_2=20...30$ mm are $\epsilon_1=4$.

Computational results according to [27] and [29]



Rys. Z2.9. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatorów dyskowych z półtoroidalnym wewnętrznym ekranem sterującym w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów ($A_2=20\dots30$ mm) oraz stosunku zagłębienia (D_2) do promienia (R_{02}) ekranu sterującego:

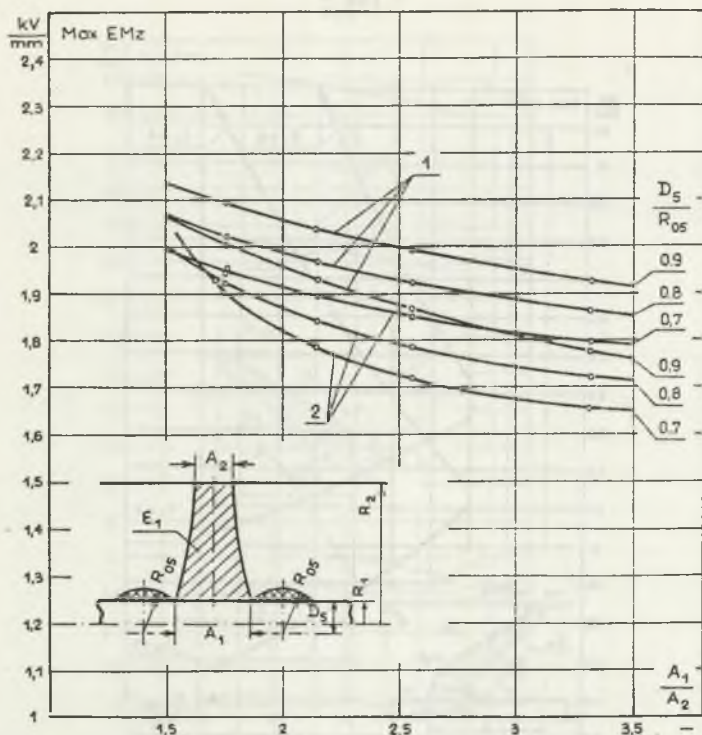
- 1 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$,
- 2 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=8$.

Wyniki obliczeń numerycznych wg [29]

Fig. Z2.9. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus on the surface of disc-type spacers with the internal half-toroidal electrostatic screen in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls (for $A_2=20\dots30$ mm) as well as the ratio of the caving (D_2) to the radius (R_{02}) of the screen:

- 1 - the spacer made up of dielectric of the relative electric relative permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the spacer made up of dielectric of the relative electric relative permittivity $\epsilon_1=8$.

Computational results according to [29]



Rys. Z2. 10. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchni izolatorów dyskowych z zewnętrznymi półtoroidalnymi ekranami sterującymi w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku ekstremalnych grubości ścianek izolatorów ($A_2=20...30$ mm) oraz stosunku zagłębienia (D_3) do promienia (R_{05}) ekranu sterującego:

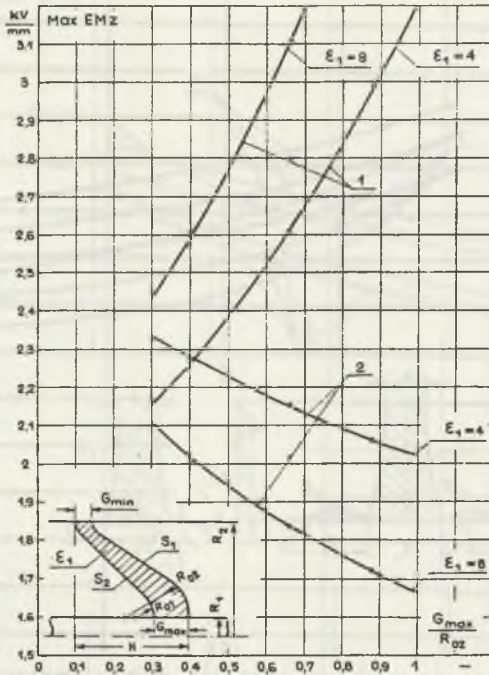
- 1 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=4$,
- 2 - izolator wykonany z materiału o przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon_1=8$.

Wyniki obliczeń numerycznych wg [29]

Fig. Z2. 10. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector on the surface of disc-type spacers with external half-toroidal electrostatic screens in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of extreme thicknesses of spacer's walls (for $A_2=20...30$ mm) as well as the ratio of the caving (D_5) to the radius (R_{05}) of the screen:

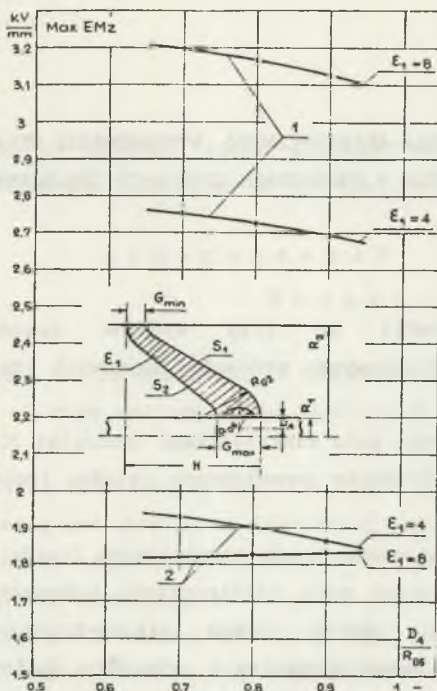
- 1 - the spacer made up of dielectric of the electric relative permittivity $\epsilon_1=4$,
- 2 - the spacer made up of dielectric of the electric relative permittivity $\epsilon_1=8$.

Computational results according to [27]



Rys.22.11. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchniach izolatorów kilichowych ($H=225...375$ mm, $G_{\min}=15...30$ mm) bez ekranów sterujących w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku największej grubości ścianki i promienia kształtującego zewnętrzną krawędź boczną izolatorów:
 1 - moduły wektora natężenia pola elektrycznego EMz1 na zewnętrznej powierzchni bocznej izolatora,
 2 - moduły wektora natężenia pola elektrycznego EMz1 na wewnętrznej powierzchni bocznej izolatora,
 Wyniki obliczeń numerycznych wg [29]

Fig.22.11. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector on the surface of conical-type spacers ($H=225...375$ mm, $G_{\min}=15...30$ mm) without electrostatic screens in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of maximum thickness of spacer's wall to the radius shaping a part of external lateral edge:
 1 - modula of the electric field intensity EMz1 on the external lateral surface of the spacer (S_1),
 2 - modula of the electric field intensity EMz2 on the internal lateral surface of the spacer (S_2).
 Computational results according to [29]



Rys.Z2.12. Zależności maksymalnych wartości modułu wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchniach izolatorów kielichowych ($H=300$ mm, $G_{\min}=20$ mm, $G_{\max}=40$ mm) z półtoroidalnym wewnętrznym ekranem sterującym w przewodzie szynowym 420 kV ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) od stosunku zagłębienia (D_4) do promienia (R_{06}) ekranu sterującego dla $G_{\max}/R_{02}=0,666$:

- moduły wektora natężenia pola elektrycznego EMz1 na zewnętrznej powierzchni bocznej izolatora (S_1),
- moduły wektora natężenia pola elektrycznego EMz2 na wewnętrznej powierzchni bocznej izolatora (S_2).

Wyniki obliczeń numerycznych wg [29]

Fig.Z2.12. Relationships between maximum values of the electric field intensity modulus vector on surfaces conical-type spacers ($H=300$ mm, $G_{\min}=20$ mm, $G_{\max}=40$ mm) with the internal half-toroidal electrostatic screen in the 420 kV bus ($R_1=100$ mm, $R_2=250$ mm) and the ratio of the caving (D_4) to the radius (R_{06}) of the screen for $G_{\max}/R_{02}=0,666$:

- 1 - modula of the electric field intensity vector EMz1 on the external lateral surface of the spacer (S_1),
- 2 - modula of the electric field intensity vector EMz1 on the internal lateral surface of the spacer (S_2),

Calculational results according to [29]

S t r e s z c z e n i e

Przedmiotem monografii są trzy wybrane zagadnienia dotyczące projektowania wysokonapięciowych: przewodów szynowych izolowanych sprężonym SF₆, obejmujące:

- modelowanie matematyczne pola elektrycznego (rozdział 3),
- wymiarowanie i kształtowanie geometryczne układów izolacyjnych (rozdział 4).
- wyznaczanie temperatur elementów konstrukcyjnych (rozdział 5).

Modelowanie matematyczne pola elektrycznego wykonywane jest w sposób numeryczny na podstawie metody równań całkowo-brzegowych pierwszego i drugiego rodzaju. Opracowano algorytmy i procedury obliczeniowe PRZEWEK_3, IZO_DYSK i IZO_KIEL, służące do wyznaczania rozkładu przestrzennego parametrów pola elektrycznego w modelach trój- i jednobiegunowych gazoszczelnych przewodów szynowych.

Wymiarowanie i kształtowanie układów izolacyjnych dotyczy izolacji ciśnieniowej i izolacji stałej przewodów szynowych o napięciach roboczych od 123 do 420 kV. Dobór izolacji przewodów dokonywany jest ze względu na wymagania elektryczne. Najmniejsze dopuszczalne gazowe odstępy izolacyjne wyznaczono opierając się na wynikach szczegółowych analiz i obliczeń numerycznych (programy IZOLACJA i ODIZ_3). Zaproponowane rozwiązania wymiarowe izolatorów odstępnikowych powstały na podstawie programów obliczeniowych, przedstawionych w rozdziale 2 monografii.

Wyznaczanie temperatur elementów konstrukcyjnych gazoszczelnych przewodów szynowych dokonywane jest na podstawie programu obliczeniowego, w którym wykorzystuje się analogie wybranych wielkości cieplnych i elektrycznych. Model obwodowy odnosi się wprawdzie do przewodu szynowego jednorodnego, lecz stwarza możliwości korygowania kryterium dopuszczalności technicznej określonego rozwiązania konstrukcyjnego. Program obliczeniowy NAGRZEW umożliwia wyznaczenie temperatury szyny prądowej oraz temperatury osłony gazoszczelnego przewodu szynowego w warunkach obciążenia prądem roboczym i zwarciovym.

COMPUTATION OF ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION, DIMENSIONING OF INSULATING SYSTEMS AND EVALUATION OF TEMPERATURE IN SF₆ - INSULATED BUSES

S u m m a r y

The object of the monograph is composed of three choice problems referred to design of high voltage solid conductors insulated with compressed SF₆, concerned:

- mathematical modelling of electric field (chapter 3),
- dimensioning and shaping of insulating systems (chapter 4),
- evaluation of temperature of constructional elements (chapter 5).

Mathematical modelling of electric field is realized with a numerical way, basing on a method of first and second kind of integral-bounded equations. The algorithms and computational procedures PRZEWEK_3, IZO_DYSK and IZO_KIEL have been worked up. These programs enable one to evaluate spatial distribution of electric field parameters inside three phase and unipolar models of gas insulated buses.

Dimensioning and shaping insulating systems deal with the compressed gas insulation and solid dielectric spacers for the 123-420 kV SF₆ - insulated buses. The choice of conductors insulation is made in respect of electric requirements. The minimal permissible gas clearances have been evaluated basing on detailed analyses and computational results (IZOLACJA and ODIZ_3 computer programs). The proposed permissible dimension variants of spacers have been obtained on the base of computer programs, described in the 3-rd chapter.

Evaluation of temperature of constructional elements of SF₆ - insulated buses is realized basing on the processing program in which definite heat and electric analogies could be utilized. The circuit model is admittedly referred to a homogeneous solid conductor, but it is possible to correct the technical permissibility for a particular constructional solution. The NAGRZEW program can be utilized to evaluate of the temperature of current-carrying conductors and shields of SF₆ - insulated buses loaded with the operating and short-circuit current.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ДИМЕНСИОНИРОВАНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СХЕМ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ШИНОПРОВОДАХ ИЗОЛИРОВАННЫХ СЖАТЫМ SF₆

Р е з ю м е

Предметом монографии являются три избранные вопросы проектирования высоковольтных шинопроводов изолированных сжатым SF₆, а именно:

- математическое моделирование электрического поля (глава 3)
- дименсионирование и геометрическое формирование изоляционных схем (глава 4)
- определение температур конструкционных элементов (глава 5).

Математическое моделирование электрического поля осуществляется численным путем, на основе интегрально-краевых уравнений первого и второго рода. Разработанные алгоритмы и расчетные процедуры PRZEWEK_3, IZO_DYSK и IZO_KIEL позволяют определить пространственное распределение параметров электрического поля в трех- и однофазных газонаполненных шинопроводах.

Дименсионирование и формирование изоляционных схем относится к изоляции сжатого элегаза и твердой изоляции шинопроводов напряжением 123-420 кВ. Подбор изоляции проводов осуществляется с точки зрения электрических требований. Минимальные допустимые газовые изоляционные промежутки определяются на основе результатов подробного анализа и компьютерных расчетов (программы IZOLACJA и ODIZ_3). Конструкции дистанционных изоляторов были получены с помощью расчетных программ приведенных в главе 2 монографии.

Определение температуры конструкционных элементов газонаполненных шинопроводов осуществляется на основе расчетной программы, в которой используются аналогии избранных тепловых и электрических величин. Хотя моделирующая цель и относится к однородному шинопроводу, то она создает возможность корректирования критерия технической допустимости определенного конструкционного решения. Программа NAGRZEW дает возможность определения температуры тиковедущей шины и температуры оболочки газонаполненных шинопроводов как в режиме рабочей нагрузки, так и в режиме короткого замыкания.