



Politechnika Wroclawska

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY

INSTYTUT MASZYN, NAPĘDÓW I POMIARÓW ELEKTRYCZNYCH

ROZPRAWA DOKTORSKA

ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATUR W UZWOJENIU STOJANA

TURBOGENERATORA Z TRANSPOZYCJĄ ROEBELA

O POŚREDNIM WODOROWYM SYSTEMIE CHŁODZENIA

mgr inż. Dariusz Gurazdowski

Promotor: dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr.

Wrocław 2006

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI.....	2
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	8
1.1. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY	9
2. PRĘT UZWOJENIA STOJANA TURBOGENERATORA	11
2.1. PODZIAŁ PRĘTA NA PRZEWODY ELEMENTARNE.....	11
2.2. PRZEPLÓT ROEBELA	13
2.2.1. <i>Zasada budowy</i>	13
2.2.2. <i>Typ przepłotu</i>	14
2.3. PRĘT UZWOJENIA STOJANA BADANEGO TURBOGENERATORA.....	17
3. STRUMIEŃ SKOJARZONY Z PRĘTEM UZWOJENIA STOJANA.....	19
3.1. WPŁYW PRZEPLÓTU NA STRUMIEŃ SKOJARZONY Z PRĘTEM UZWOJENIA STOJANA	20
3.1.1. <i>Przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-180-0</i>	20
3.1.2. <i>Przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-360-0</i>	21
3.1.3. <i>Przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-540-0</i>	22
3.2. STRUMIEŃ SKOJARZONY Z PRĘTEM BADANEGO TURBOGENERATORA.....	24
3.2.1. <i>Pręt warstwy dolnej – przepłotu typu 90+360+90</i>	24
3.2.2. <i>Pręt warstwy górnej – przepłotu typu 0+300+0</i>	25
4. GEOMETRIA PRĘTA UZWOJENIA STOJANA.....	27
4.1. PODZIAŁ PRĘTA NA SEGMENTY	27
4.1.1. <i>Segmenty modelujące geometrie pręta</i>	27
4.1.2. <i>Segmenty modelujące transpozycję pręta</i>	28
4.2. UKŁAD KOORDYNACYJNY.....	29
4.2.1. <i>Globalny układ koordynacyjny</i>	29
4.2.2. <i>Lokalny układ koordynacyjny</i>	29
4.3. STREFA CZOŁOWA PRĘTA.....	31
4.3.1. <i>Modelowanie ewolwenty</i>	31
5. OBLICZENIA ELEKTROMAGNETYCZNE.....	34
5.1. MODEL MATEMATYCZNY DO OBLICZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH UZWOJENIA STOJANA	34
5.1.1. <i>Zastosowanie metody przewodów elementarnych</i>	34
5.1.2. <i>Schemat zastępczy dwuwarstwowego uzwojenia stojana</i>	36
5.1.3. <i>Indukcyjności własne i wzajemne przewodów elementarnych pręta uzwojenia stojana</i>	39
5.2. MACIERZ IMPEDANCJI PRĘTA UZWOJENIA STOJANA	40
5.2.1. <i>Metoda obliczenia macierzy impedancji pręta</i>	40
5.2.2. <i>Macierz transpozycji przewodów elementarnych</i>	43

5.2.3.	<i>Obliczenie wypadkowej macierzy impedancji pręta.....</i>	44
5.3.	NAPIĘCIE INDUKOWANE W POŁĄCZENIACH CZOŁOWYCH PRZEWODÓW ELEMENTARNYCH	47
5.3.1.	<i>Zastosowanie metody odbić zwierciadlanych</i>	47
5.3.2.	<i>Trójwymiarowy model geometryczny strefy czołowej uzwojenia stojana i wirnika turbogeneratora.....</i>	50
5.3.3.	<i>Zastosowanie metody Biota – Savarta – Laplace’a</i>	52
5.3.4.	<i>Wzajemne oddziaływanie prętów – definicja siatki dyskretyzacyjnej</i>	54
5.3.5.	<i>Napięcie indukowane w strefie czołowej pręta.....</i>	56
5.3.6.	<i>Wyniki obliczeń napięć indukowanych w przewodach elementarnych</i>	57
5.4.	ROZKŁAD GĘSTOŚCI PRĄDU W PRĘCIE UZWOJENIA STOJANA.....	59
5.4.1.	<i>Rozkład gęstości prądu w przewodach elementarnych pręta warstwy dolnej</i>	59
5.4.2.	<i>Rozkład gęstości prądu w przewodach elementarnych pręta warstwy górnej</i>	59
6.	STRATY MOCY	61
6.1.	STRAT MOCY W STREFIE ŻŁOBKOWEJ UZWOJENIA STOJANA.....	61
6.1.1.	<i>Podział strat.....</i>	61
6.1.2.	<i>Straty podstawowe w pręcie</i>	62
6.1.3.	<i>Straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w pręcie</i>	63
6.1.4.	<i>Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia</i>	63
6.1.5.	<i>Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem głównym</i>	65
6.2.	OBLICZENIA STRAT MOCY W UZWOJENIU STOJANA BADANEGO TURBOGENERATORA	68
6.2.1.	<i>Obliczenie strat w pręcie warstwy dolnej.....</i>	68
6.2.2.	<i>Obliczenie strat w pręcie warstwy górnej</i>	71
7.	OBLICZENIA CIEPLNE.....	75
7.1.	METODA OBLICZANIA PRZEPEŁYWU CIEPŁA	75
7.1.1.	<i>Podstawowe prawa przepływu ciepła.....</i>	75
7.1.2.	<i>Podział metod stosowanych do obliczeń przepływu ciepła</i>	76
7.1.3.	<i>Metoda schematów cieplnych.....</i>	77
7.2.	SYSTEM WENTYLACYJNY BADANEGO TURBOGENERATORA	78
7.2.1.	<i>Pięciokomorowy system chłodzenia</i>	79
7.3.	MODEL MATEMATYCZNY DO OBLICZEŃ CIEPLNYCH UZWOJENIA STOJANA W STREFIE ŻŁOBKOWEJ	80
7.3.1.	<i>Podział pręta w strefie żłobkowej.....</i>	80
7.3.2.	<i>Schemat zastępczy</i>	81
7.3.3.	<i>Algorytm obliczeń cieplnych.....</i>	82
7.4.	ROZKŁAD TEMPERATUR W STREFIE ŻŁOBKOWEJ UZWOJENIA STOJANA.....	84
7.4.1.	<i>Rozkład temperatur w pręcie warstwy dolnej i górnej.....</i>	84
7.5.	WERYFIKACJA METODY OBLICZEŃ	87
7.5.1.	<i>Porównanie obliczeń z pomiarami turbogeneratorsa obciążonego mocą 450 MVA.....</i>	87
7.5.2.	<i>Porównanie obliczeń z pomiarami turbogeneratorsa obciążonego mocą 524 MVA.....</i>	90

8. ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATUR W STREFIE ŻŁOBKOWEJ UZWOJENIA STOJANA.....	93
8.1. WPŁYW PRZEPLOTU PRZEWODÓW ELEMENTARNYCH NA ROZKŁAD TEMPERATUR W PRĘCIE UZWOJENIA STOJANA.....	93
8.1.1. <i>Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepłotem typu 0+360+0</i>	<i>93</i>
8.1.2. <i>Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepłotem typu 90+360+90 ..</i>	<i>96</i>
8.1.3. <i>Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepłotem typu 0+334+0</i>	<i>98</i>
8.1.4. <i>Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepłotem typu 0+540+0 ...</i>	<i>100</i>
8.2. OCENA OBLICZEŃ	102
9. ZAKOŃCZENIE	104
9.1. PODSUMOWANIE.....	104
9.2. WNIOSKI.....	105
9.3. NAJWAŻNIEJSZE OSIĄGNIĘCIA	105
LITERATURA	106
ZAŁĄCZNIK.....	110
Z.1. PROGRAM BAR.....	111
Z.1.1. MENU PROGRAMU	112
Z.1.2. DANE WEJŚCIOWE	112
Z.1.3. DANE WYJŚCIOWE	118

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

B	– indukcja magnetyczna
B_δ	– indukcja w szczelinie powietrznej
b	– szerokość przewodu elementarnego
b_n	– szerokość żłobka
D	– średnica wewnętrzna stojana
D_R	– średnica zewnętrzna wirnika.
D_S	– średnica zewnętrzna stojana
dOP	– macierz transpozycji lewoskrętnej dla przeplotu typu „dublowanego”
dP	– macierz transpozycji prawoskrętnej dla przeplotu typu „dublowanego”
E	– macierz jednostkowa
f	– częstotliwość napięcia zasilającego
H	– wysokość pręta
H_z	– natężenie pola magnetycznego w zębie
h	– wysokość przewodu elementarnego
h_n	– wysokość żłobka
I_{DC}	– prąd przewodu elementarnego przy równomiernym rozkładzie gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta
I_n	– prąd znamionowy pręta
$\underline{I}_{BB,k}$	– prąd k -tego przewodu elementarnego pręta dolnego
$\underline{I}_{TB,k}$	– prąd k -tego przewodu elementarnego pręta górnego
J_{ac}	– gęstość prądu przy przepływie prądów cyrkulacyjnych
J_{dc}	– gęstość prądu przy braku wpływu prądów cyrkulacyjnych
k_{CCL}	– współczynnik strat wywołanych prądami cyrkulacyjnymi
k_r	– wypadkowy współczynnik wzrostu rezystancji
k_{rp}	– współczynnik wzrostu rezystancji p -tej warstwy przewodów elementarnych
kOP	– macierz transpozycji lewoskrętnej dla przeplotu typu „krzyżowanego”
kP	– macierz transpozycji prawoskrętnej dla przeplotu typu „krzyżowanego”
L	– długość rdzenia
$L_{CS,TB,k}, L_{CS,BB,k}$	– indukcyjność własna k -tego przewodu elementarnego strefy czołowej pręta górnego i dolnego dla strony nienapędowej maszyny
$L_{NC,TB,k}, L_{NC,BB,k}$	– indukcyjność własna k -tego przewodu elementarnego strefy czołowej pręta górnego i dolnego dla strony napędowej maszyny
$L_{SP,TB,k}, L_{SP,BB,k}$	– indukcyjność własna k -tego przewodu elementarnego strefy żłobkowej pręta górnego i dolnego
$M_{CS,TB,kl}, M_{CS,BB,kl}$	– wypadkowa indukcyjność wzajemna między przewodami k i l w strefie czołowej pręta górnego i dolnego dla strony nienapędowej

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$M_{NC,TB,kl}$, $M_{NC,BB,kl}$	– wypadkowa indukcyjność wzajemna między przewodami k i l w strefie czołowej pręta górnego i dolnego dla strony napędowej
$M_{SP,TB,kl}$, $M_{SP,BB,kl}$	– wypadkowa indukcyjność wzajemna między przewodami k i l w strefie żłobkowej, należącymi do pręta górnego i dolnego
$M_{SP,TBBB,kl}$, $M_{SP,BBTB,kl}$	– wypadkowa indukcyjność wzajemna między przewodami k i l w strefie żłobkowej, należącymi do prętów różnych warstw
m	– liczba przewodów elementarnych w kolumnie pręta
m_K	– liczba kanałów wentylacyjnych
m_S	– liczba sekcji cieplnych
N_c	– liczba kolumn w pręcie
n	– liczba przewodów elementarnych w pręcie
OP	– macierz transpozycji lewoskrętnej
P	– macierz transpozycji prawoskrętnej
P_b	– straty podstawowe w strefie żłobkowej pręta uzwojenia stojana
P_{bcc}	– straty podstawowe oraz straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w strefie żłobkowej pręta uzwojenia stojana
P_{cc}	– straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych
P_{ec}	– straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta uzwojenia stojana
P_{Fe}	– straty ciepłne wydzielane w zębie rdzenia (żelazie)
P_J	– straty ciepłne wydzielane w jarzmie rdzenia (żelazie)
P_{rf}	– straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem głównym (podłużnym) prostopadłym do boku pręta
P_t	– straty całkowite w strefie żłobkowej pręta uzwojenia stojana
q_{Cu}	– strumień cieplny płynący między węzłami pręta
q_{CuC}	– strumień cieplny płynący między prętem a kanałem wentylacyjnym
q_{CuCB}	– strumień cieplny płynący między prętem dolnym a kanałem wentylacyjnym
q_{CuFe}	– strumień cieplny płynący między prętem a zębem
q_{CuW}	– strumień cieplny płynący między prętem górnym a szczeliną powietrzną
q_{Fe}	– strumień cieplny płynący między węzłami zęba
q_{FeC}	– strumień cieplny płynący między zębem a kanałem wentylacyjnym
q_{FeW}	– strumień cieplny płynący między zębem a szczeliną powietrzną
q_{JC}	– strumień cieplny płynący między jarzmem a kanałem wentylacyjnym
q_{JCu}	– strumień cieplny płynący między jarzmem a prętem dolnym
q_{SC}	– strumień cieplny płynący między przekładką a kanałem wentylacyjnym
q_{SCu}	– strumień cieplny płynący między przekładką a prętami

Wykaz ważniejszych oznaczeń

q_{SFe}	– strumień cieplny płynący między przekładką a zębem
$R_{CS, TB, k}, R_{CS, BB, k}$	– rezystancja k -tego przewodu elementarnego strefy czołowej pręta górnego i dolnego dla strony nienapędowej maszyny
$R_{NC, TB, k}, R_{NC, BB, k}$	– rezystancja k -tego przewodu elementarnego strefy czołowej pręta górnego i dolnego dla strony napędowej maszyny
$R_{SP, TB, k}, R_{SP, BB, k}$	– rezystancja k -tego przewodu elementarnego strefy żłobkowej pręta górnego i dolnego
$R_{th1} \dots R_{th24}$	– zastępczy opór cieplny
S_n	– moc pozorna turbogeneratorsa
T	– temperatura przekładki izolacyjnej między warstwowej
T	– wypadkowa macierz transpozycji
Td	– przyrost temperatury pręta wyznaczony względem temp. zimnego gazu
t_p	– długość podziałki transpozycji
$U_{Ev, NC, TB, k}; U_{Ev, NC, BB, k}$	– napięcie indukowane w k -tym przewodzie elementarnym pręta górnego i dolnego strefy czołowej dla strony nienapędowej
$U_{Ev, CS, TB, k}; U_{Ev, CS, BB, k}$	– napięcie indukowane w k -tym przewodzie elementarnym pręta górnego i dolnego strefy czołowej dla strony napędowej
U_n	– napięcie znamionowe turbogeneratorsa
Z_T	– wypadkowa macierz impedancji pręta
$\underline{Z}_{BB, BB, kl}$	– impedancja między przewodami elementarnymi k i l znajdującymi się w obszarze pręta dolnego
$\underline{Z}_{TB, BB, kl}, \underline{Z}_{BB, TB, kl}$	– impedancje wzajemne między przewodami elementarnymi k i l znajdującymi się w prętach różnych warstw uzwojenia
$\underline{Z}_{TB, TB, kl}$	– impedancja między przewodami elementarnymi k i l znajdującymi się w obszarze pręta górnego
α	– cieplny współczynnik zmiany rezystywności
δ_0	– szerokość szczeliny powietrznej
ϑ	– temperatura
Λ	– przewodność cieplna
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła
μ_0	– przenikalność magnetyczna próżni
ρ_{ϑ}	– rezystywność w temperaturze ϑ
ρ_0	– rezystywność w temperaturze ϑ_0
ϕ_k	– strumień magnetyczny indukujący napięcie w k -tym przewodzie elementarnym strefy czołowej pręta
$\phi_{k,r}$	– strumień magnetyczny skojarzony z k -tym przewodem elementarnym
∇	– operator nabra

1. WSTĘP

Pierwsze próby wykorzystania energii elektrycznej w Polsce rozpoczęły się w ostatnich dwóch dekadach XIX w. Próby takie podejmowały przede wszystkim zakłady przemysłowe, cukrownie itp., instalując niewielkie, kilkudziesięcio - kilowatowe generatory napędzane maszynami parowymi lub silnikami Diesla oraz małe elektrownie wodne. W przypadku małej granicy plastyczności i wytrzymałości na rozrywanie ówczesnych materiałów większe moce można było uzyskać dla mniejszych prędkości obrotowych. Początkowo budowano turbogeneratory o prędkościach obrotowych 1000 i 1500 obr/min. W miarę ulepszania właściwości wytrzymałościowej stali na wirniki zwiększyły się wymiary i moce graniczne turbogeneratorów. Największe moce, jakie uzyskano dla prędkości 1500 obr/min, wynosiły kilkadziesiąt MW. Poczynając od ok. 1930 r., zaprzestano budowy turbogeneratorów czterobiegunowych, z wyjątkiem maszyn o bardzo małych mocach, mniejszych niż 5MW.

W procesie projektowania maszyn elektrycznych, a zwłaszcza o tak dużych mocach, jakie występują w turbogeneratorach, dąży się do wykorzystania materiałów czynnych. Wielkościami decydującymi o wykorzystaniu tych materiałów jest indukcja magnetyczna (dla magnetowodu) oraz okład prądowy i gęstość prądu dla obwodów elektrycznych. O wykorzystaniu materiałów czynnych decyduje nie tylko indukcja magnetyczna czy gęstość prądu, ale w bardzo dużym stopniu ich równomierny rozkład w całej objętości maszyny. Zagadnienia nierównomiernego ich obciążenia znane były od bardzo dawna m. in. dobór odpowiedniego przepłotu przewodów elementarnych minimalizującego straty dodatkowe w pręcie uzwojenia stojana. Zagadnienie to zostało opisane po raz pierwszy przez Roebela w 1912 r.

Publikacje na temat strat dodatkowych od prądów cyrkulacyjnych zarówno w pręcie uzwojenia jak i od samego przepłotu powstały w latach 60. i 70. ubiegłego stulecia, głównie za granicą. W publikacjach tych opisano metody wyznaczenia strat dodatkowych od prądów cyrkulacyjnych oraz prądów wirowych w pręcie uzwojenia [20, 24, 25, 32, 44]. Brak możliwości obliczeniowych sprowadzał zagadnienie doboru przepłotu do analizy teoretycznej.

Pole magnetyczne sprzężone z prętem uzwojenia turbogeneratorsa w strefie żłobkowej oraz połączeń czołowych opisano w pracach [1, 15, 22, 25, 33, 41, 43]. W publikacjach [15, 40] przedstawiono metodę wyznaczania rozkładu prądów wzdłuż wysokości pręta uzwojenia maszyny dużej mocy dla dwóch kolumn przewodów elementarnych z uwzględnieniem oddziaływania indukcji obcej od wirnika i uzwojenia stojana w strefie czołowej maszyny. W pracach tych nie uwzględniono zastosowania czterech kolumn przewodów elementarnych oraz wpływu przepłotu na rozkład prądu w tych przewodach. W pracach [12, 13] opisano teoretyczną analizę wpływu przepłotu przewodów elementarnych na strumień skojarzony z prętem turbogeneratorsa. W polskiej literaturze, w zakresie tej problematyki, brakuje opracowań dotyczących analizy i optymalizacji przepłotu przewodów elementarnych. Można jedynie znaleźć podstawowe informacje na temat rodzaju stosowanego przepłotu i jego wpływ na minimalizację strat dodatkowych w pręcie uzwojenia [5, 22, 44]. Brakuje również opracowań opisujących wpływ przepłotu na rozkład temperatury w pręcie uzwojenia stojana. Obliczenia cieplne uzwojenia stojana są opisane przede wszystkim w literaturze [14, 22, 24, 30, 44]. W pracach [22, 51] uwzględniono wpływ transpozycji na obliczenia cieplne, w postaci współczynnika strat od prądów cyrkulacyjnych oraz współczynnika przewodności cieplnej różnego w kierunku poprzecznym i wzdłużnym pręta. Takie uproszczenie nie pozwala jednak zbadać wpływ przepłotu na równomierność rozkładu temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratorsa. W literaturze spotyka się modele cieplne traktujące pręt jako obszar bez podziałów na przewody elementarne, upraszczając w ten sposób zagadnienie nierównomiernego rozkładu gęstości prądu i strat wzdłuż wysokości pręta [14, 22, 24, 30, 37, 50].

Zagadnienia równomiernego obciążenia materiałów czynnych nabierały szczególnego znaczenia od czasu zastosowania nowych technik obliczeniowych, za pomocą których można wyznaczyć z dużą dokładnością parametry magnetyczne i elektryczne w każdym miejscu maszyny. Dzięki nowym, cyfrowym technikom obliczeniowym możliwa stała się analiza zjawisk w prętach uzwojenia bardzo dużej mocy o skomplikowanych strukturach, np. ułożonych w wielu kolumnach przewodów elementarnych zmieniających swoje położenie nie tylko na prostoliniowej części w żłobkach, ale również na bardzo skomplikowanej linii połączeń czołowych. Obliczenie obciążeń oraz strat umożliwia zbudowanie modelu cieplnego maszyny i wyznaczenie rozkładu temperatury. Niniejsza praca dotyczy tych zagadnień, a zastosowanie cyfrowych technik obliczeniowych umożliwia znaczne rozbudowanie modeli matematycznych z nadzieją wykorzystania ich wyników w konstrukcji nowoczesnych maszyn elektrycznych.

1.1. Cel, teza i zakres pracy

Celem naukowym pracy jest analiza wpływu transpozycji przewodów elementarnych na rozkład gęstości prądu i temperatury w pręcie uzwojenia stojana turbogeneratorsa, tzn. określenie sposobu kształtowania przepłotu, aby zminimalizować źródła strat i uzyskać równomierny rozkład temperatury.

Istotą problemu jest opracowanie metody umożliwiającej wyznaczenie optymalnego przepłotu przewodów elementarnych tworzących pręt uzwojenia stojana turbogeneratorsa. Optymalizacja przepłotu polega na takim doborze rodzaju transpozycji, aby rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta był możliwie równomierny. Równomierny rozkład gęstości prądu minimalizuje źródła strat energii i zapewnia równomierny rozkład temperatury w pręcie uzwojenia.

Praca obejmuje analizę pola magnetycznego sprzężonego z prętem uzwojenia turbogeneratorsa w strefie żłobkowej oraz połączeń czołowych, wpływ transpozycji prętów elementarnych na ich sprzężenia magnetyczne i na rozkład temperatury wzdłuż długości i wysokości prętów warstwy górnej i dolnej. Na podstawie wyznaczonych indukowanych napięć możliwe jest określenie prądów cyrkulacyjnych oraz strat wywołanych tymi prądami. Opracowany model cieplny umożliwia określenie rozkładu temperatury, a zwłaszcza temperatury maksymalnej występującej w pręcie uzwojenia stojana.

Sformułowano następującą tezę pracy:

Na podstawie opracowanego modelu matematycznego ujmującego zjawiska elektromagnetyczne i cieplne można wyznaczyć rozkład temperatur wzdłuż wysokości i długości w części żłobkowej prętów turbogeneratorsa z przepłotem przewodów elementarnych. Obliczenie pola temperatur umożliwia dobór takiego przepłotu przewodów elementarnych, aby uzyskać równomierny rozkład temperatur w przewodnikach i nie przekroczyć temperatury maksymalnej

W celu rozwiązania postawionego problemu zbudowano modele matematyczne do obliczeń elektromagnetycznych i termicznych. Obliczenia elektromagnetyczne pozwoliły wyznaczyć rozkład gęstości prądów wzdłuż wysokości pręta uzwojenia stojana turbogeneratorsa a obliczenia termiczne rozkład temperatur w pręcie. Do obliczeń elektromagnetycznych zastosowano metodę przewodów elementarnych, Biota – Savarta – Laplace’a i odbić zwierciadlanych.

Do obliczeń rozkładu temperatur w uzwojeniu stojana maszyny wykorzystano metodę schematów cieplnych. Rozkład temperatury w pręcie był rezultatem rozptywu ciepła od miedzianego przewodu elementarnego przez izolacje oraz rdzeń i zależał od efektywności przejścia tego ciepła przez czynnik chłodzący. Lepsze, dokładniejsze rozpoznanie zjawisk elektromagnetycznych oraz pola temperaturowego w pręcie ma istotne znaczenie w prognozowaniu narażeń elektrycznych, termicznych i termomechanicznych uzwojeń. Wyniki pracy mogą być bardzo cenne dla ośrodków i biur technicznych zajmujących się projektowaniem uzwojeń stojanów turbogeneratorów.

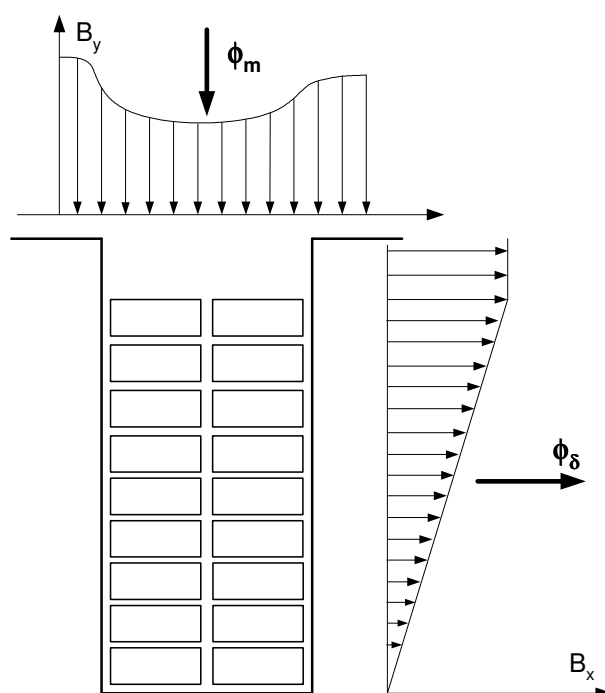
Zakres pracy obejmuje:

- badanie stanu zagadnień związanych z transpozycją Roebela i korzyści wynikających z zastosowania przelotu przewodów elementarnych w części żłobkowej i pozażłobkowej maszyny,
- opracowanie modelu matematycznego opisującego geometrię uzwojenia stojana i wirnika turbogeneratorsa,
- opracowanie modelu matematycznego do obliczeń elektromagnetycznych dla strefy żłobkowej uzwojenia stojana i wykonanie obliczeń rozkładu gęstości prądów wzdłuż wysokości pręta dla wybranej transpozycji przewodów elementarnych,
- opracowanie modelu matematycznego do obliczeń elektromagnetycznych dla strefy czołowej uzwojenia wykorzystującego metodę odbić zwierciadlanych i Biota – Savarta – Laplace’a, umożliwiającego wyznaczenie napięcia w przewodach elementarnych strefy czołowej od strumienia magnetycznego pozostałych prętów uzwojenia,
- analizę rozkładu gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta stojana dla określonej transpozycji przewodów elementarnych w pręcie uzwojenia,
- opracowanie metody wyznaczania rozkładu strat dodatkowych wzdłuż długości i wysokości pręta strefy żłobkowej uzwojenia oraz analizę obliczeń strat dla określonej transpozycji przewodów elementarnych w pręcie uzwojenia,
- opracowanie modelu matematycznego do obliczeń cieplnych dla strefy żłobkowej uzwojenia stojana turbogeneratorsa, z użyciem metodę schematów cieplnych,
- weryfikację opracowanych modeli i obliczeń przez porównanie z pomiarami wybranego typu turbogeneratorsa,
- analizę rozkładu temperatury wzdłuż długości oraz wysokości pręta warstwy górnej i dolnej dla różnych transpozycji przewodów elementarnych,
- sformułowanie wniosków i ocenę uzyskanych wyników obliczeń.

2. PRĘT UZWOJENIA STOJANA TURBOGENERATORA

W maszynach elektrycznych dużej mocy, o dużych przekrojach występuje zjawisko nierównomiernego sprzężenia magnetycznego z warstwami pręta uzwojenia. Z tego powodu pręty uzwojenia w tych maszynach wykonuje się z wiązki równoległych odizolowanych wzajemnie przewodów elementarnych połączonych na końcu skuwkami [5, 6, 8, 12, 13, 22].

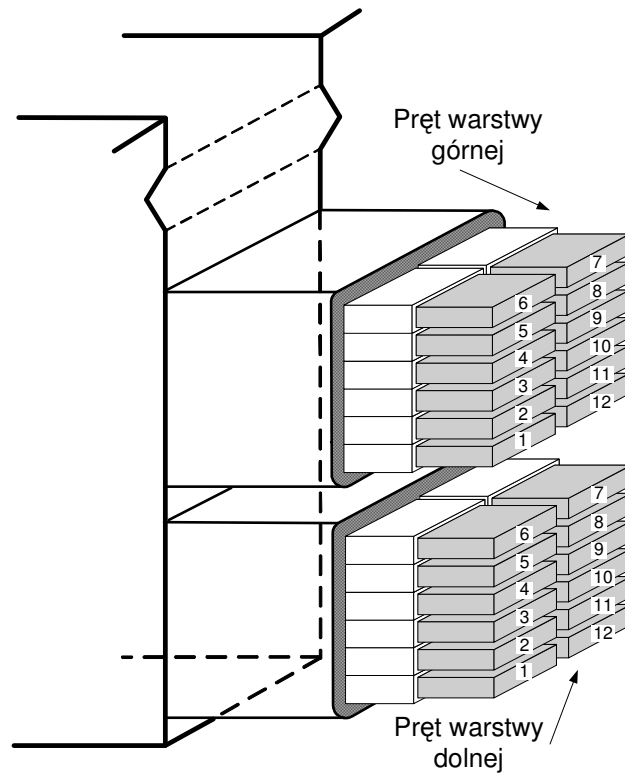
Niejednakowe sprzężenie magnetyczne przewodów elementarnych wywołuje różnice indukowanych napięć i prądy cyrkulacyjne zamykające się w obrębie pręta [5, 13, 22, 26, 27, 43]. Prądy te można wyeliminować lub znacznie ograniczyć przez wyrównanie sprzężeń magnetycznych przewodów elementarnych względem strumienia podłużnego (głównego) oraz strumienia rozproszenia (rys. 2.1). Sposób wyrównania sprzężenia magnetycznego przewodów elementarnych przez zastosowanie ich przeplotu zostało pokazane i opatentowane przez Roebela w 1912 roku.



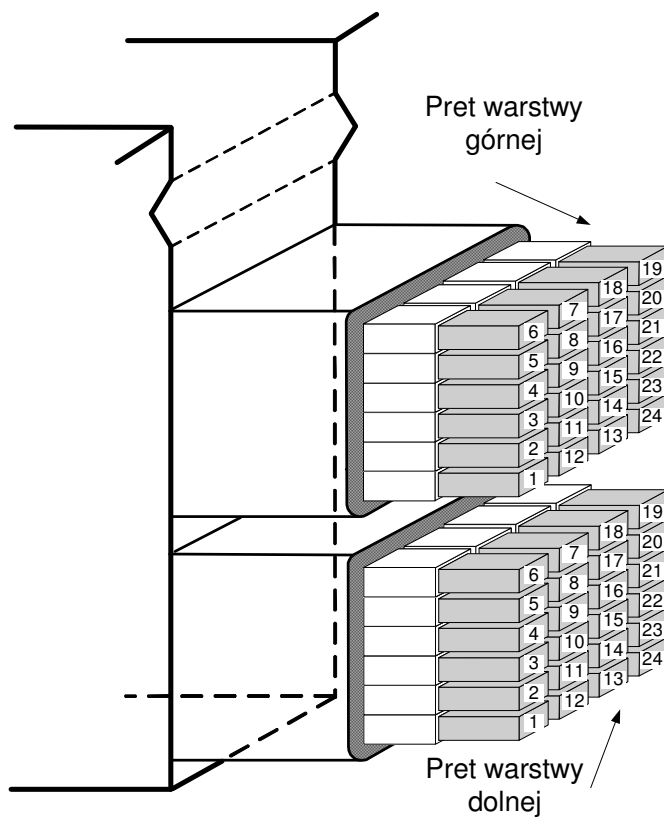
Rys. 2.1 Sprzężenie przewodów elementarnych ze składową główną oraz rozproszeniową strumienia magnetycznego

2.1. Podział pręta na przewody elementarne

Pręt uzwojenia stojana dzieli się na warstwy wzdłuż wysokości oraz na kolumny wzdłuż szerokości żłobka. [12, 13]. Sposób rozmieszczenia i przyjętą numerację przewodów elementarnych w pręcie pokazano odpowiednio dla 12 przewodów i 2 kolumn na rysunku 2.2 oraz dla 24 przewodów i 4 kolumn na rysunku 2.3.

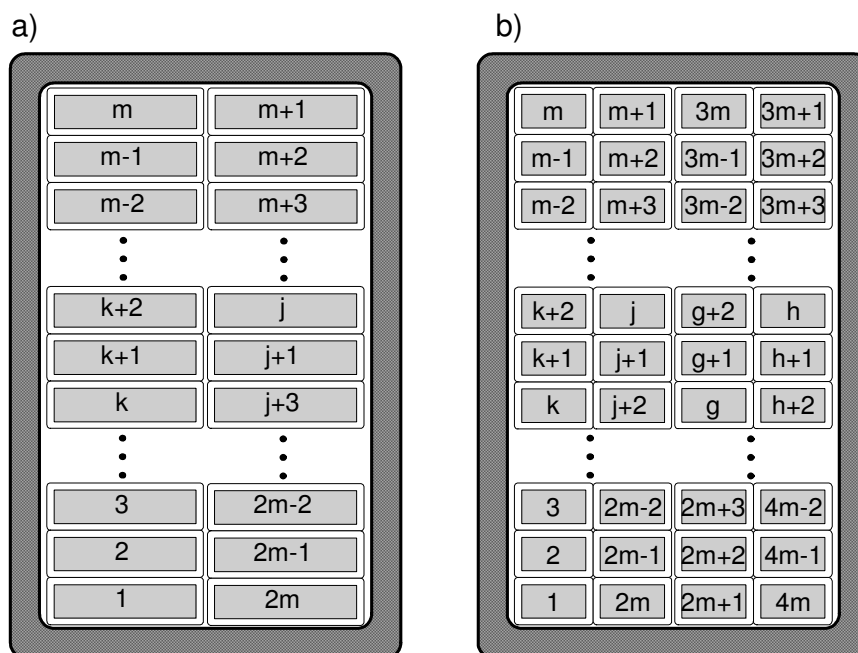


Rys. 2.2 Podział pręta warstwy górnej i dolnej na dwie kolumny przewodów elementarnych



Rys. 2.3 Podział pręta warstwy górnej i dolnej na cztery kolumny przewodów elementarnych

W pracy przyjęto sposób numerowania przewodów elementarnych pręta od strony nienapędowej maszyny przedstawiony na rysunku 2.4. W wyniku przeplecenia Roebela przewody zmieniają swoją pozycję na wysokości i szerokości pręta wzdłuż osi maszyny.

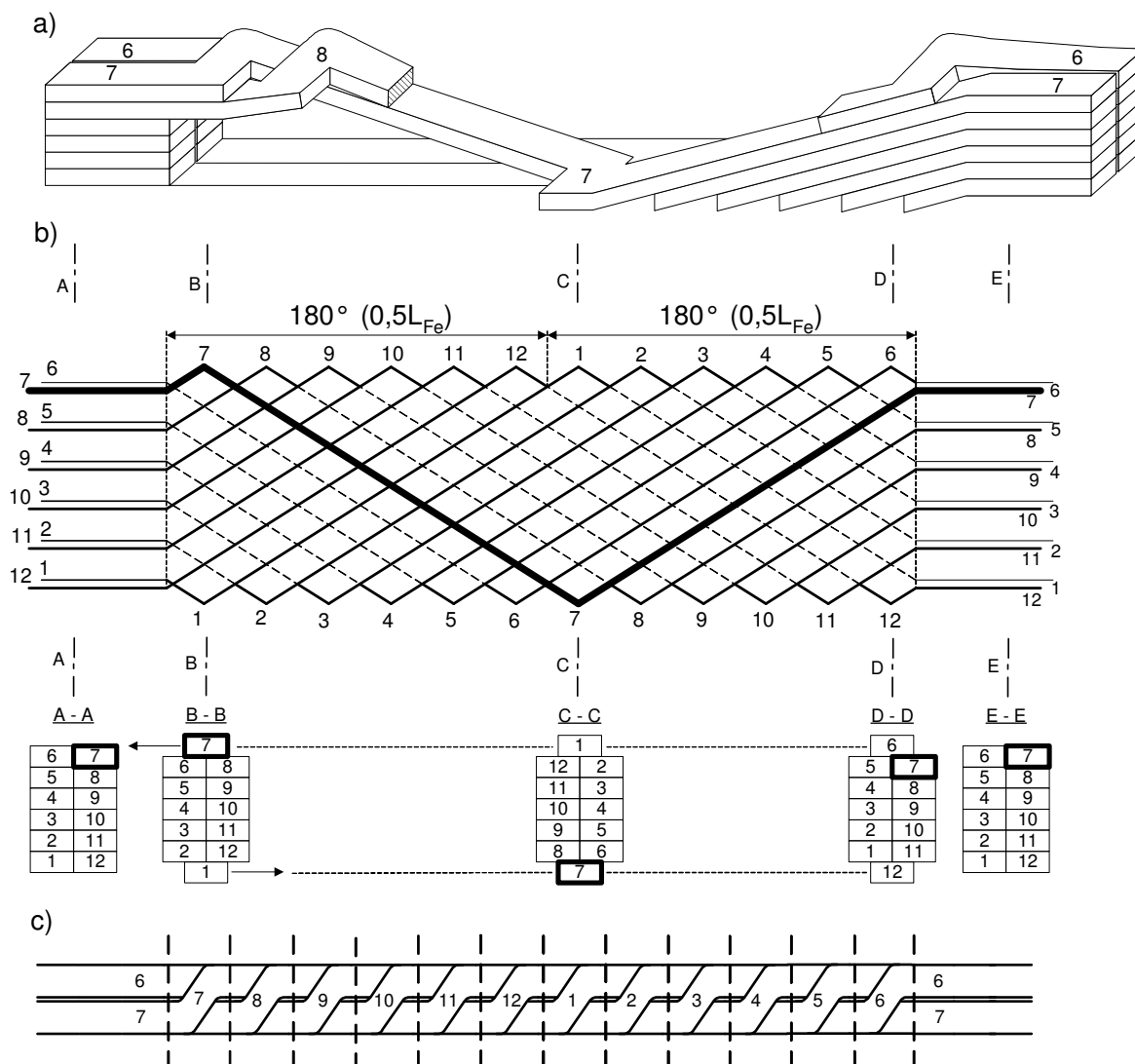


Rys. 2.4 Numeracja przewodów elementarnych ułożonych w kolumnach: a) dwóch, b) czterech

2.2. Przeplot Roebela

2.2.1. Zasada budowy

Przeplot Roebela (transpozycja) powoduje zmianę położenia przewodów elementarnych wzdłuż wysokości i szerokości pręta uzwojenia stojana [5, 12, 22]. Zasadę budowy pręta uzwojenia stojana z transpozycją Roebela przedstawiono na rysunku 2.5 (przeplot 360° w strefie żłobkowej maszyny). Pręt zbudowano z 12 przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach. Wzdłuż strefy żłobkowej kolejne przewody – górny z kolumny lewej oraz dolny z kolumny prawej – przechodzą do kolumn sąsiednich, wykonując tzw. obrót wokół osi pręta o kąt transpozycji 360°. W procesie takiej transpozycji każdy przewód wykonał jeden pełny obieg wokół osi pręta. Dlatego ten sposób przeplotu nazywa się transpozycją 360°. Wszystkie przewody elementarne przed i po transpozycji zajmują to samo położenie w pręcie uzwojenia stojana. Na połowie długości pręta przewody elementarne wykonują transpozycje 180°, połowę obrotu. W celu prześledzenia drogi przebiegu przewodu elementarnego posłużono się tzw. schematem przeplotu (rys. 2.5b). Pogrubiona linia na rysunku 2.5b przedstawia drogę przewodu numer 7 w obszarze strefy żłobkowej pręta. Na początku i w połowie długości strefy żłobkowej następuje gięcie przewodu – zmiana kolumny.

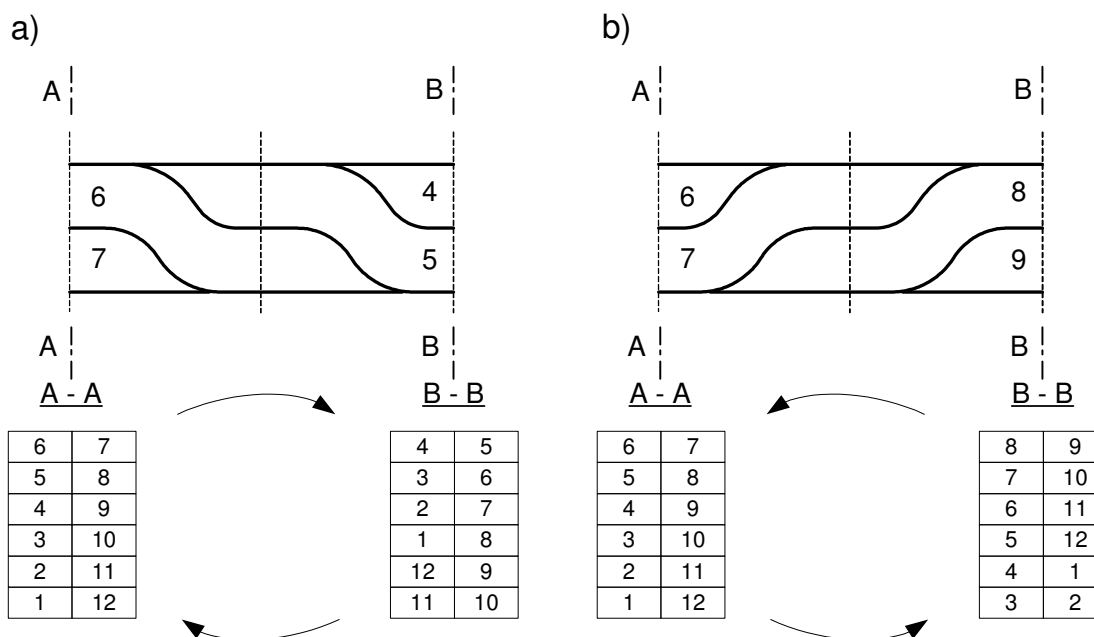


Rys. 2.5 Budowa pręta z przeplotem Roebela typu 0-360-0 dla 12 przewodów elementarnych:
a) widok przestrzenny, b) schemat przeplotu, c) widok z góry

2.2.2. Typ przeplotu

Typ przeplotu określa zmianę położenia przewodu elementarnego w strefie żłobkowej i połączeniach czołowych maszyny. Zapis, przeplot typu 90+360+0, oznacza, że na jednym połączeniu czołowym przewody elementarne wykonują obieg wokół osi pręta o kąt 90° , w części żłobkowej o 360° , a na drugim połączeniu czołowym przewody nie zmieniają swojego położenia. Przeplot przedstawiony na rysunku 2.5, opisany symbolem 0-360-0, oznacza, że na obydwu połączeniach czołowych przewody elementarne nie zmieniają swojego położenia, natomiast w strefie żłobkowej wykonują obieg o kąt 360° . Znak plus lub minus określa umowny kierunek skrętu przewodów (plus – skręt przewodów w prawo, minus – skręt przewodów w lewo). W zależności od kierunku skrętu przeplot Roebela dla dwóch kolumn przewodów elementarnych dzieli się na [13]:

- prawoskrętny (rys. 2.6a),
- lewoskrętny (rys. 2.6b).



Rys. 2.6 Przeplot przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach:
a) prawoskrętny, b) lewoskrętny

W przypadku pręta o 4 kolumnach przewodów elementarnych przeplot Roebela wykonują się na dwa sposoby:

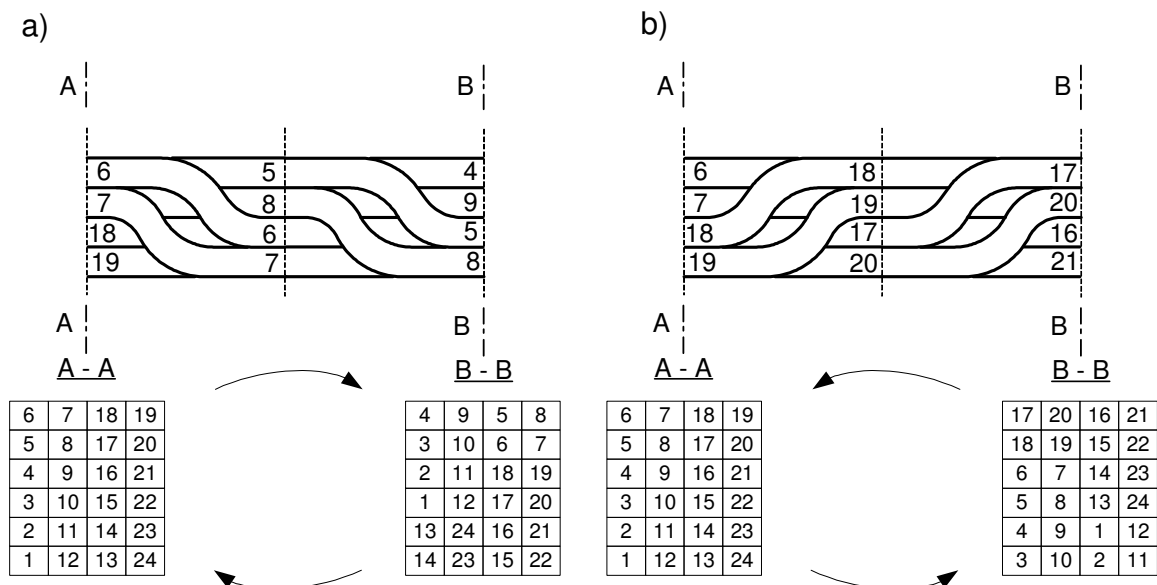
- przeplot typu „dublowanego”,
- przeplot typu „krzyżowanego”.

Ze względu na kierunek skrętu przewodów elementarnych zarówno przeplot typu „dublowanego” jak i „krzyżowanego” podzielono na:

- prawoskrętny,
- lewoskrętny.

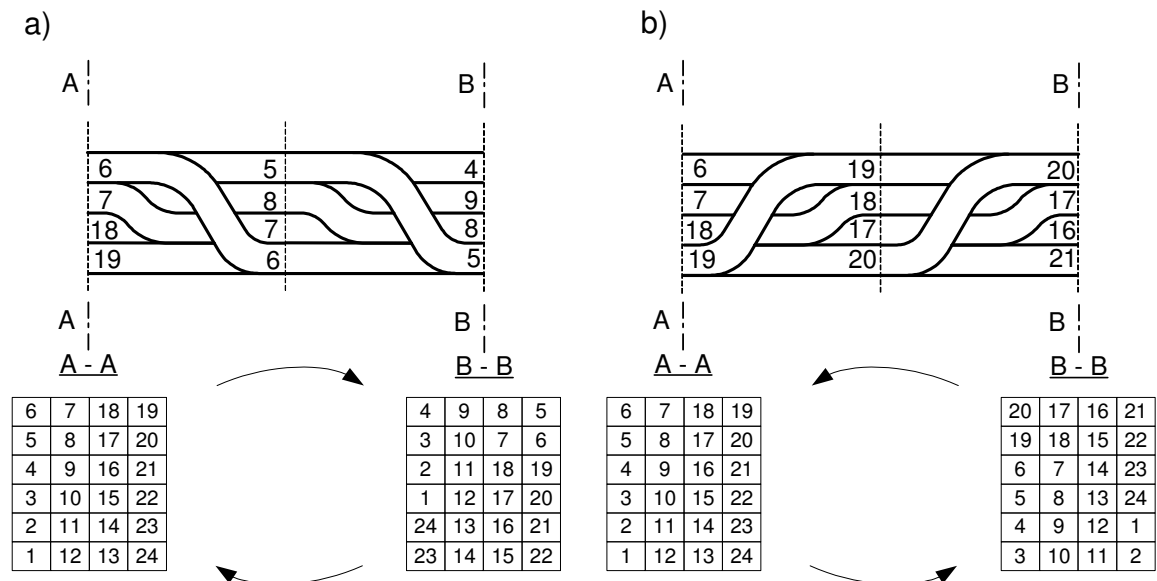
Przykład prawoskrętnego i lewoskrętnego przeplotu typu „dublowanego” wykonanego dla 24 przewodów elementarnych pokazano na rysunku 2.7. W wyniku prawoskrętnego przeplotu następuję przesunięcie przewodów elementarnych z kolumny pierwszej do trzeciej oraz przewodów z kolumny drugiej do czwartej.

Dla lewoskrętnego przeplotu zachodzi przesunięcie w odwrotnym kierunku, tj. z kolumny trzeciej do pierwszej oraz z kolumny czwartej do drugiej.



Rys. 2.7 Przeplot typu „dublowanego” dla przewodów elementarnych ułożonych w czterech kolumnach: a) prawoskrętny, b) lewoskrętny

Przykład prawoskrętnego i lewoskrętnego przeplotu typu „krzyżowanego” wykonanego dla 24 przewodów elementarnych przedstawiono na rysunku 2.8.



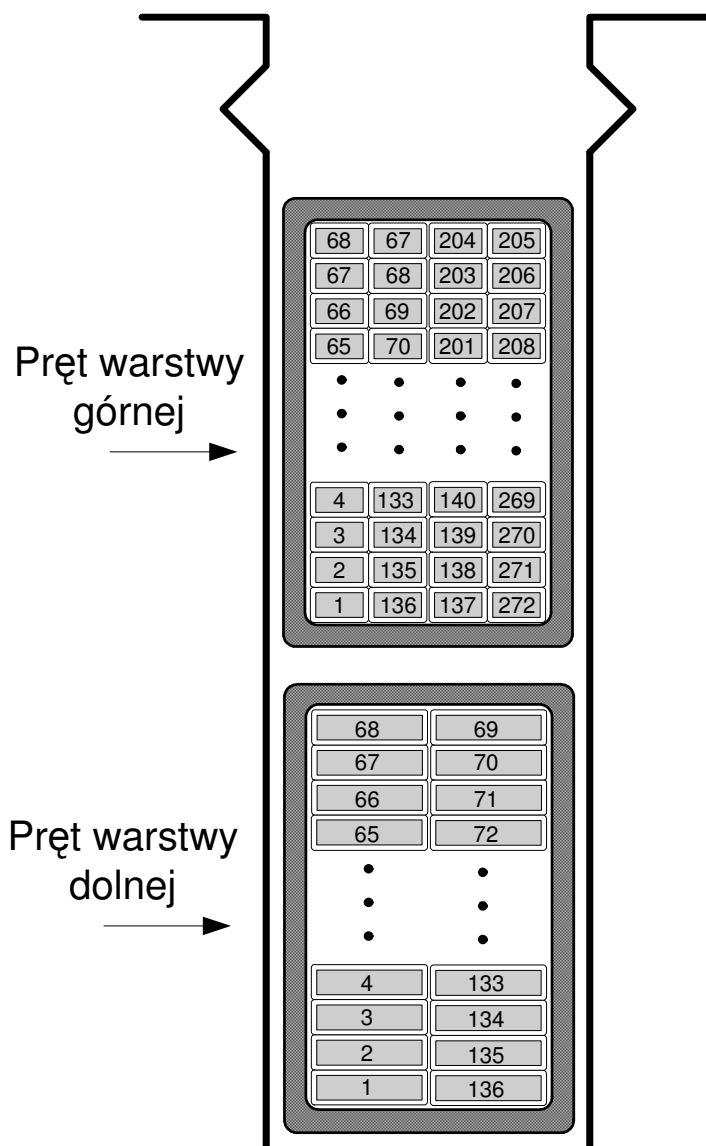
Rys. 2.8 Przeplot typu „krzyżowanego” dla przewodów elementarnych ułożonych w czterech kolumnach: a) prawoskrętny, b) lewoskrętny

W wyniku prawoskrętnego przeplotu następuje przesunięcie przewodów elementarnych z kolumny pierwszej do czwartej oraz przewodów z kolumny drugiej do trzeciej. Dla lewoskrętnego przeplotu zachodzi przesunięcie w odwrotnym kierunku, tj. z kolumny czwartej do pierwszej oraz z kolumny trzeciej do drugiej.

Przeplot prawoskrętny dla dwóch kolumn przewodów elementarnych oraz przeplot prawoskrętny typu „dublowanego” i „krzyżowanego” dla czterech kolumn występują w prętach uzwojenia stojana badanego turbogeneratora.

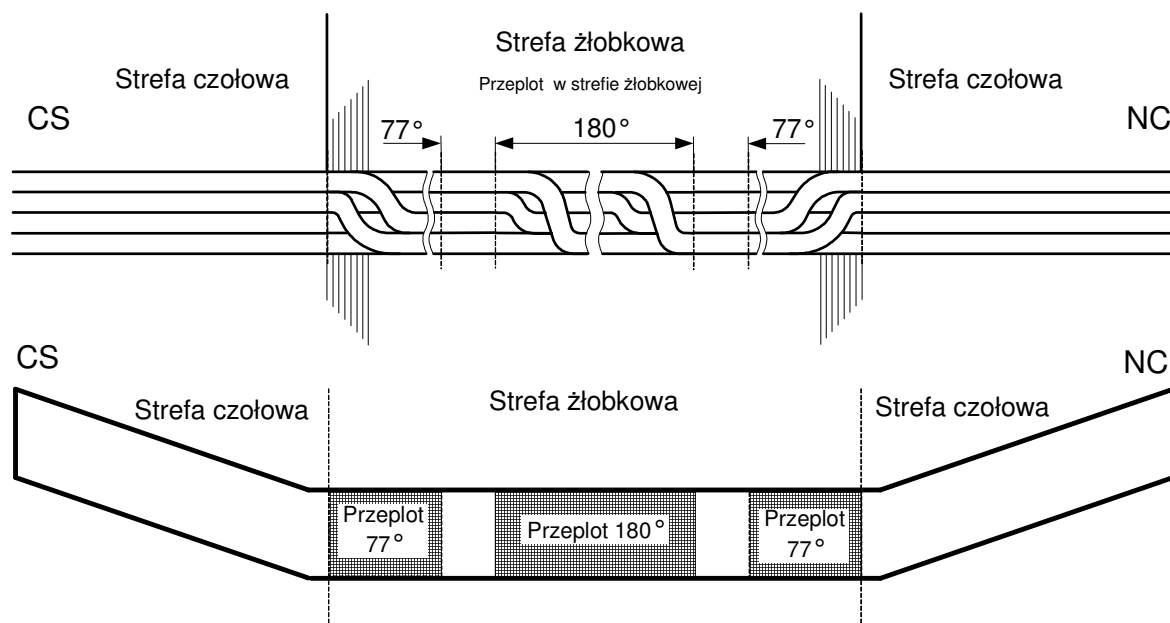
2.3. Pręt uzwojenia stojana badanego turbogenerators

Pręt warstwy górnej uzwojenia stojana badanego turbogenerators ma 272 przewody elementarne ułożone w 4 kolumnach po 68 przewodów. Pręt warstwy dolnej ma 136 przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach. Podział pręta warstwy górnej i dolnej na przewody przedstawiono na rysunku 2.9.



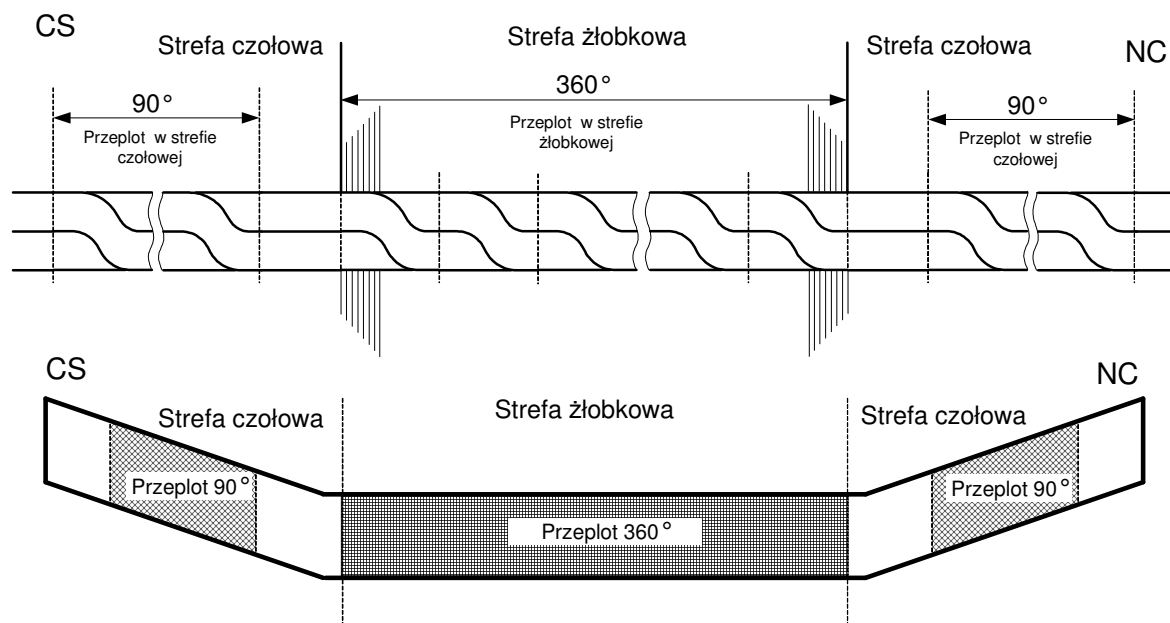
Rys. 2.9 Podział pręta warstwy górnej i dolnej na przewody elementarne

Pręty warstwy górnej i dolnej mają dwa różne typy przeplotu Roebela. Dla warstwy górnej jest to niepełny przeplot typu 0+334+0, wykonany dla 4 kolumn przewodów w obszarze strefy żłobkowej (rys. 2.10). Przeplot rozdzielono na trzy pośrednie, o różnych kątach transpozycji, tj. 77° , 180° , 77° , których suma daje kąt 334° . Częstkowe przeploty oddzielono od siebie prostymi odcinkami, które nie zawierają przeplotu. Przeplot środkowy o kącie transpozycji 180° wykonano jako przeplot „dublowany”, natomiast skrajne o kącie transpozycji 77° jako „krzyżowane” (rys. 2.10).



Rys. 2.10 Uproszczony widok przeplotu pręta górnego (0+334+0)

Pręt warstwy dolnej badanego turbogenerators ma przeplot typu 90+360+90, wykonany na dwóch kolumnach przewodów elementarnych (rys. 2.11). W obu strefach czołowych przewody wykonują obieg wokół osi pręta o kąt transpozycji 90°, natomiast w strefie żłobkowej o kąt 360°. Przeplot 360° zrealizowano na długości strefy żłobkowej, natomiast 90° na odcinku ewolwentowym pręta w strefie czołowej maszyny.

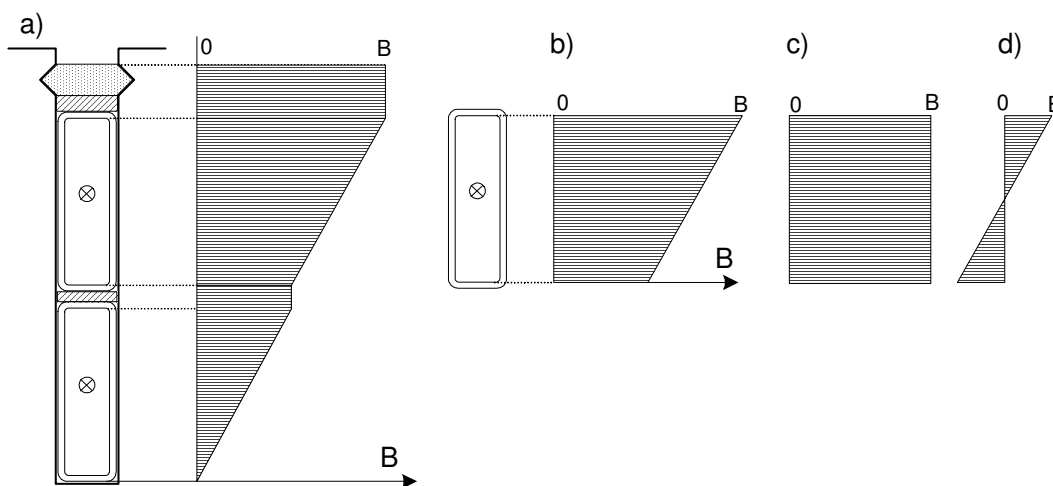


Rys. 2.11 Uproszczony widok przeplotu pręta dolnego (90+360+90)

3. STRUMIENŃ SKOJARZONY Z PRĘTEM UZWOJENIA STOJANA

Przyjmując nienasycony stan magnetowodu o nieskończenie dużej przenikalności oraz ciągły rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości żłobka, strumień rozproszenia w strefie żłobkowej od dwóch prętów uzwojenia można przedstawić za pomocą wykresu, jak na rysunku 3.1a [6, 12, 20, 22]. Strumień sprzężony z prętem górnym (rys. 3.1b) można rozdzielić na dwie składowe:

- składową obcą (rys. 3.1c) wywołaną przepływem pręta dolnego,
- składową własną (rys. 3.1d) wywołaną prądem własnym skupionym w osi pręta.



Rys. 3.1 Rozkład strumienia rozproszenia (strumień tangensjalny) wzdłuż wysokości żłobka:
 a) strumień w żłobku, b) składowa tangensjalna strumienia w części czołowej,
 c) składowa tangensjalna (styczna) obca strumienia w części czołowej,
 d) składowa tangensjalna(styczna) własna strumienia w części czołowej

W strefie połączeń czołowych strumień rozproszenia ma podobny charakter. Dominująca jest składowa własna strumienia rozproszenia, którą można przyjąć za stałą na całej długości strefy czołowej uzwojenia. Składowa obca może być wywołana np. przepływem połączeń czołowych magnesnicy i zależy od odległości od beczki wirnika, występowania w tej strefie elementów ferromagnetycznych i w ogólnym przypadku może być zmienna wzdłuż połączeń czołowych [20]. Opis strumienia skojarzonego z prętem uzwojenia stojana wykonano dla pięciu typów przeplotu przewodów elementarnych:

- przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-180-0 (rys. 3.2, 3.3),
- przeplot w strefie żłobkowej typu 0-360-0 (3.4, 3.5),
- przeplot w strefie żłobkowej typu 0-540-0 (3.6, 3.7),
- przeplot w strefie żłobkowej i czołowej typu 90+360+90 (3.8, 3.9),
- niepełny przeplot w strefie żłobkowej typu 0+300+0 (3.10),

3.1. Wpływ przeplotu na strumień skojarzony z prętem uzwojenia stojana

Wpływ przeplotu na strumień skojarzony z prętem uzwojenia stojana pokazano na przykładzie pręta o izolowanych 12 przewodach elementarnych.

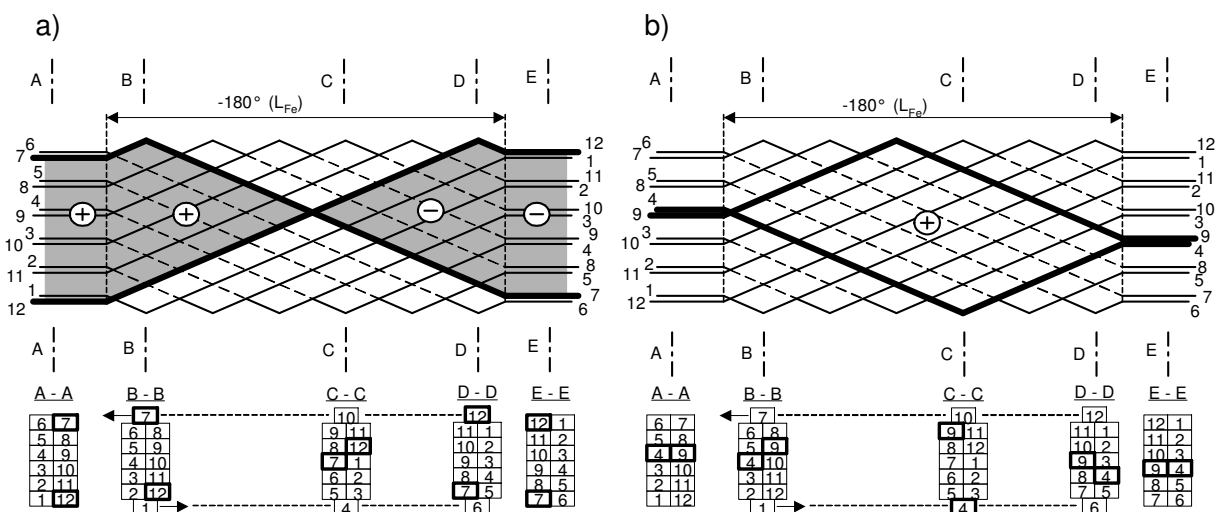
Skojarzony z prętem strumień obcy pokazano dla par przewodów elementarnych:

- położonych na wyjściu w maksymalnej od siebie odległości, tj. 7 i 12,
- sąsiadujących ze sobą prętów, tj. 4 i 9.

Ze względu na odpowiedni rozkład wzdłuż wysokości pręta, skojarzenie strumienia własnego pokazano na przykładzie par prętów elementarnych oddalonych od siebie o połowę wysokości pręta tj. 9 i 12. Miarą sprzężenia magnetycznego oraz indukowanego napięcia w analizowanych poszczególnych parach przewodów elementarnych jest pole powierzchni pomiędzy nimi. Przypisany znak (+) lub (-) oznacza prawoskrętny lub lewoskrętny obieg indukowanego napięcia w analizowanym konturze przewodów obejmujących tą powierzchnię. Dla poczynionych założeń przyjęto, że pełna kompensacja napięć występuje wówczas, gdy powierzchnie pól dodatnich i ujemnych są sobie równe dla wszystkich par przewodów elementarnych strefie żłobkowej oraz połączeń czołowych.

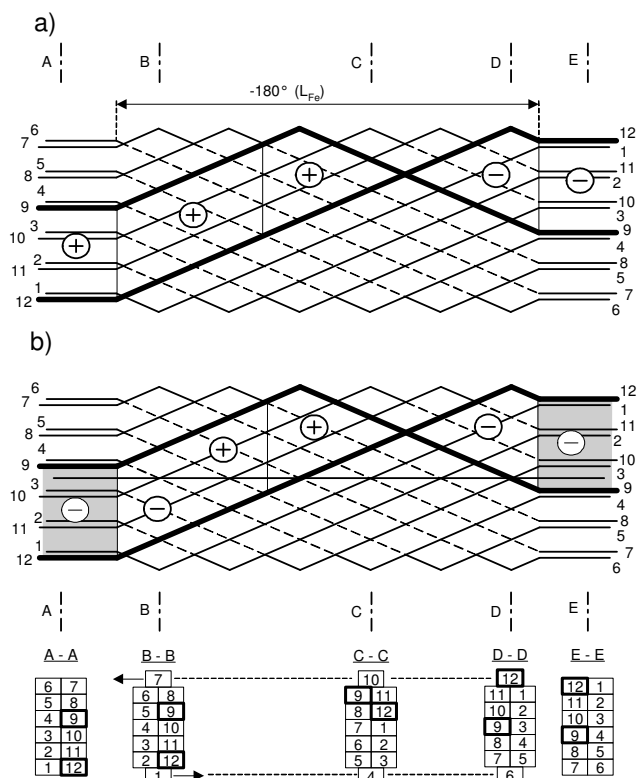
3.1.1. Przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-180-0

Schemat przeplotu przewodów elementarnych typu 0-180-0 pokazano na rysunkach 3.2 i 3.3. Oznacza on, że tylko w strefie żłobkowej przewody elementarne zmieniają swoje położenie, np. przewód 7, znajdujący się u góry żłobka na początku tej strefy, po przepleceniach znajduje się na dole żłobka na jej końcu.



Rys. 3.2 Skojarzenia magnetyczne od strumienia obcego (przeplot typu 0-180-0):

- a) między skrajnymi przewodami elementarnymi 7 i 12,
b) między środkowymi przewodami elementarnymi 4 i 9

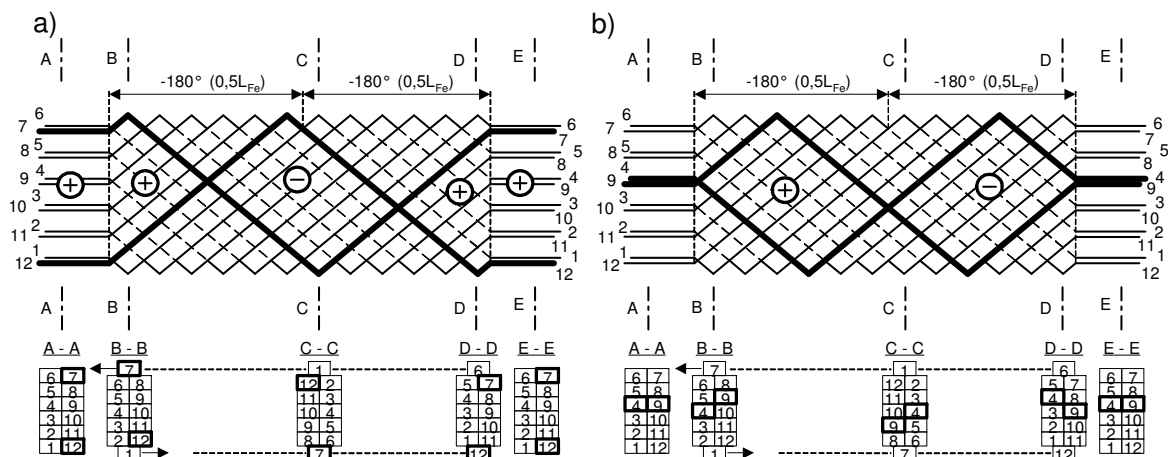


Rys. 3.3 Skojarzenia magnetyczne (przeplot typu 0-180-0):
 a) od strumienia obcego między skrajnym 12 i środkowym 9 przewodem elementarnym,
 b) od strumienia własnego między skrajnym 12 i środkowym 9 przewodem elementarnym

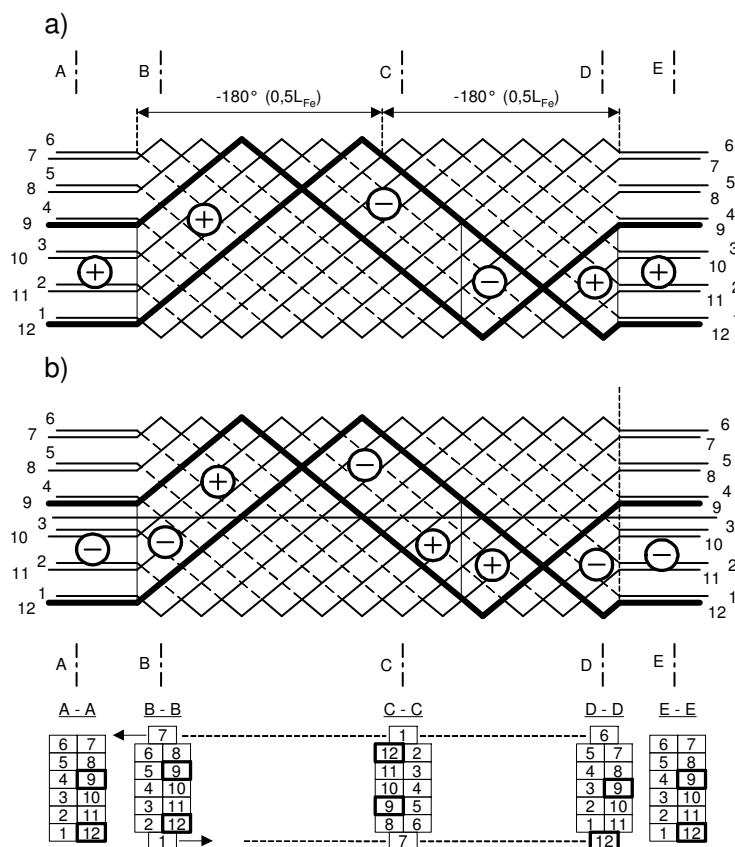
Na podstawie zaznaczonych pól objętych przewodami elementarnymi skrajnymi (7 i 12) widać, że następuje kompensacja strumieni skojarzonych między tymi przewodami (pola dodatnie są równe polom ujemnym) w strefie żłobkowej i połączeń czołowych (obszary zacienione na szaro; rys. 3.2). Między przewodami środkowymi (4 i 9) występuje tylko pole dodatnie, oznacza to, że w pętli tej wyindukuje się napięcie wywołujące wirujący prąd cyrkulacyjny (rys. 3.2). Na podstawie analizy skrajnych przypadków położenia prętów elementarnych można wnioskować, że w pozostałych parach następuje tylko częściowa kompensacja strumienia rozproszenia obcego w strefie żłobkowej tym mniejsza, im bliżej środka leżą te pary. Natomiast w częściach czołowych uzyskuje się całkowitą kompensację strumienia rozproszenia obcego, gdyż pola obszarów w tych częściach utworzone zarówno przez skrajne (7 i 12), jak i pośrednie (9 i 12) przewody elementarne mają jednakową powierzchnię i przeciwne znaki (rys. 3.2a, 3.3a). Na rysunku 3.3b pokazano sprzężenie magnetyczne par przewodów 9 i 12 od strumienia rozproszenia własnego. Jak wynika z porównania pól, strumień ten jest kompensowany w tym typie przeplotu w strefie żłobkowej.

3.1.2. Przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-360-0

Schemat przeplotu przewodów elementarnych typu 0-360-0 pokazano na rysunkach 3.4 i 3.5. Z porównania pól między skrajnymi (7 i 12), środkowymi (4 i 9) oraz pośrednimi (9 i 12) przewodami elementarnymi wynika, że następuje pełna kompensacja napięć indukowanych od obcego (rys. 3.4) i własnego (rys. 3.5b) strumienia rozproszenia w strefie żłobkowej. W strefie czołowej występuje niezrównoważone napięcie indukowane zarówno od strumienia obcego jak i strumienia własnego (rys. 3.4a, 3.5). W związku z tym w pętli utworzonej przez przewody elementarne płyną prądy cyrkulacyjne pod wpływem niezrównoważonego napięcia w strefie czołowej.



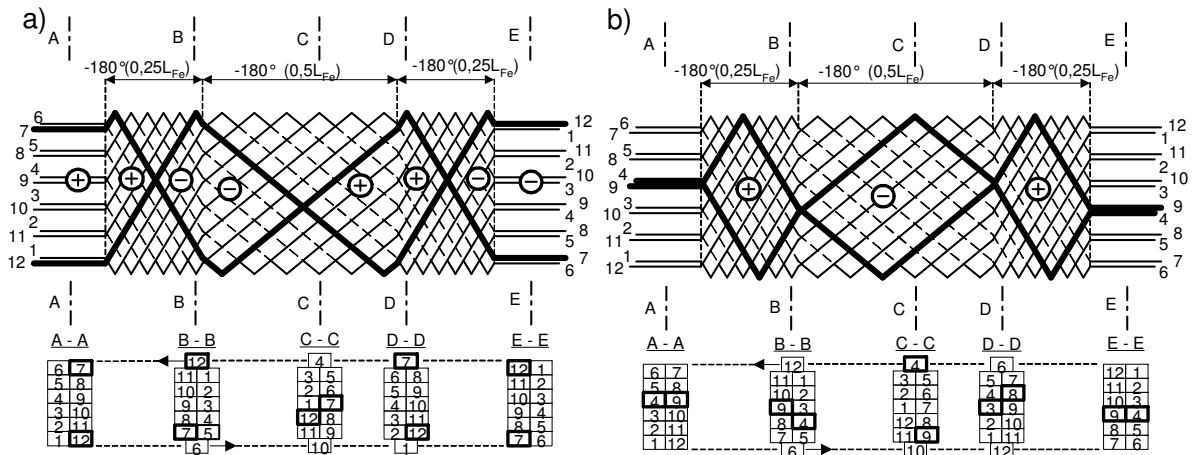
Rys. 3.4 Skojarzenia magnetyczne od strumienia obcego (przeplot typu 0-360-0):
 a) między skrajnymi przewodami elementarnymi 7 i 12,
 b) między środkowymi przewodami elementarnymi 4 i 9



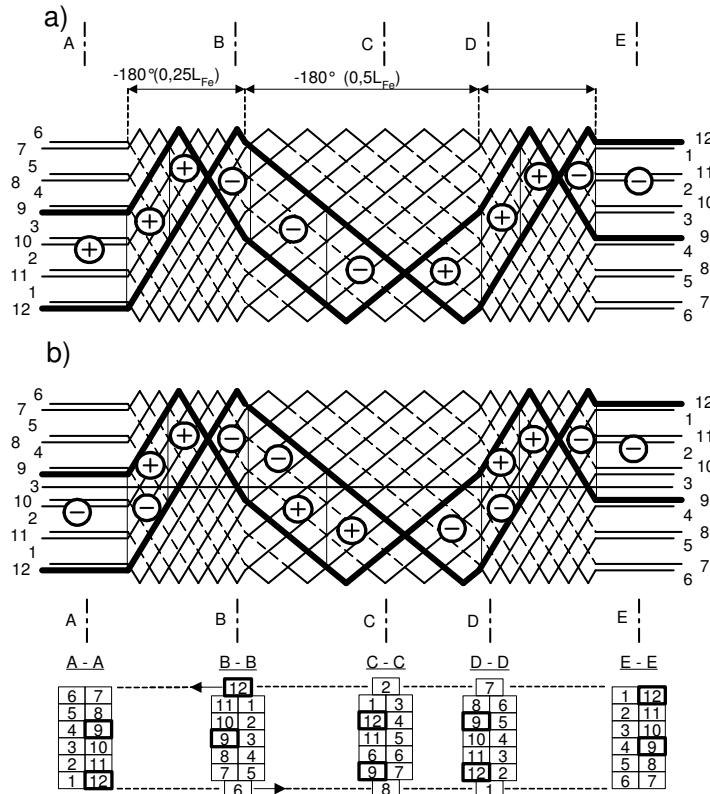
Rys. 3.5 Skojarzenia magnetyczne (przeplot typu 0-360-0):
 a) od strumienia obcego między skrajnym 12 i środkowym 9 przewodem elementarnym,
 b) od strumienia własnego między skrajnym 12 i środkowym 9 przewodem elementarnym

3.1.3. Przeplot tylko w strefie żłobkowej typu 0-540-0

Schemat przeplotu przewodów elementarnych typu 0-540-0 pokazano na rysunkach 3.6 i 3.7, gdzie każdy przewód elementarny obiega wokół osi boku uzwojenia 1,5 – krotnie.



Rys. 3.6 Skojarzenia magnetyczne od strumienia obcego (przeplot typu 0-540-0):
 a) między skrajnymi przewodami elementarnymi 7 i 12,
 b) między środkowymi przewodami elementarnymi 4 i 9



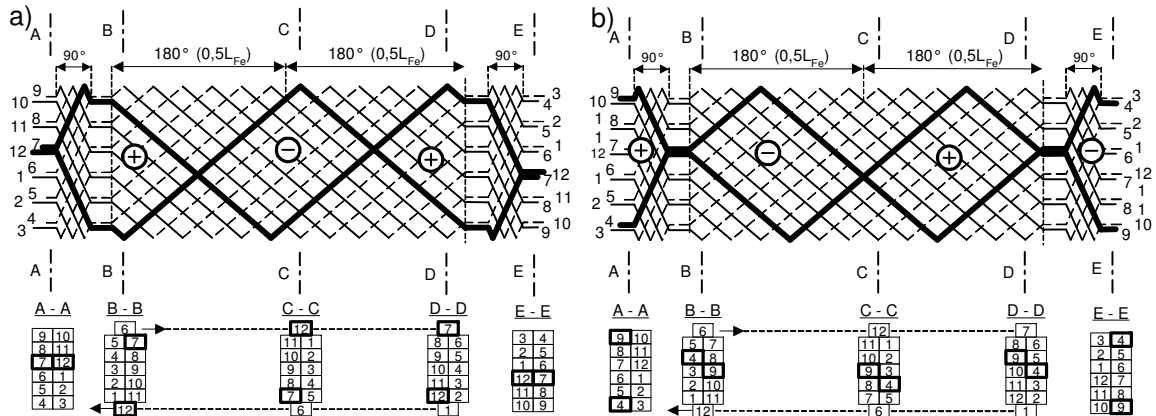
Rys. 3.7 Skojarzenia magnetyczne (przeplot typu 0-540-0):
 a) od strumienia obcego między skrajnym 12 i środkowym 9 przewodem elementarnym,
 b) od strumienia własnego między skrajnym 12 i środkowym 9 przewodem elementarnym

Dzięki dodatkowemu obrotowi przewodów elementarnych o 180° w stosunku do przeplotu 360° , zwroty napięć w lewym oraz w prawym połączeniu czołowym są przeciwne (rys. 3.6a, 3.7a). Z porównania pól między pośrednimi (9 i 12) przewodami elementarnymi wynika, że nie następuje pełna kompensacja napięć indukowanych od własnego strumienia rozproszenia w części czołowej (rys. 3.7b – obszary o skojarzeniu ujemnym).

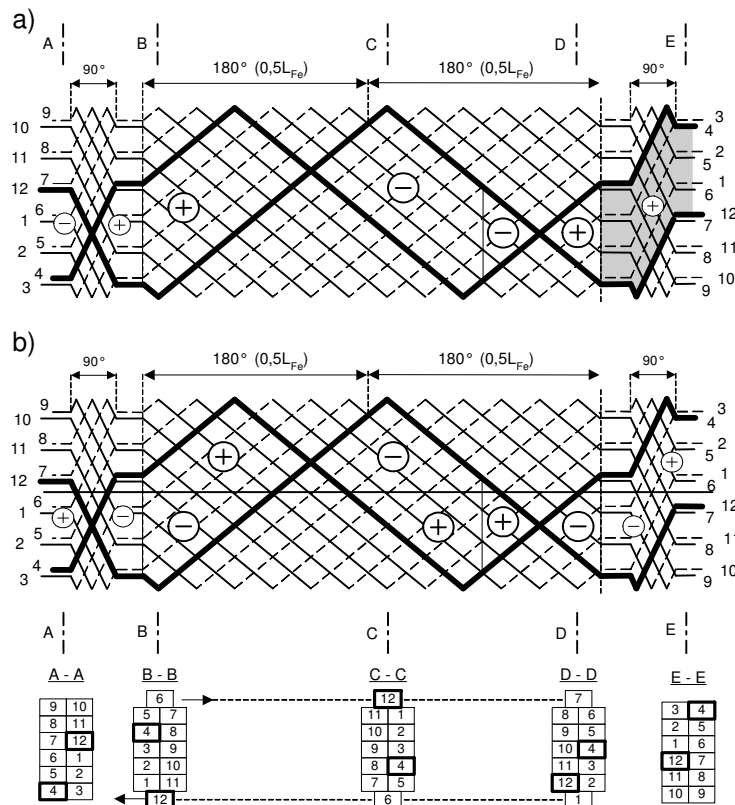
3.2. Strumień skojarzony z prętem badanego turbogeneratora

3.2.1. Pręt warstwy dolnej – przepłot typu 90+360+90

Analizę strumienia skojarzonego z prętem dolnym przedstawiono na podstawie schematu przepłotu 90+360+90, wykonanego dla 12 przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach. Zmniejszenie liczby analizowanych przewodów zwiększa czytelność schematu i nie zmienia zjawisk magnetycznych zachodzących w pręcie turbogeneratora.



Rys. 3.8 Skojarzenia magnetyczne od strumienia obcego (przepłot typu 90+360+90):
 a) między środkowymi przewodami elementarnymi 7 i 12,
 b) między skrajnymi przewodami elementarnymi 4 i 9



Rys. 3.9 Skojarzenia magnetyczne (przepłot typu 90+360+90):
 a) od strumienia obcego między skrajnym 4 i środkowym 12 przewodem elementarnym,
 b) od strumienia własnego między skrajnym 4 i środkowym 12 przewodem elementarnym

Skojarzony z prętem dolnym strumień obcy pokazano dla par przewodów elementarnych:

- położonych na wyjściu w maksymalnej odległości od siebie, tj. 4 i 9,
- sąsiadujących ze sobą prętów, tj. 7 i 12.

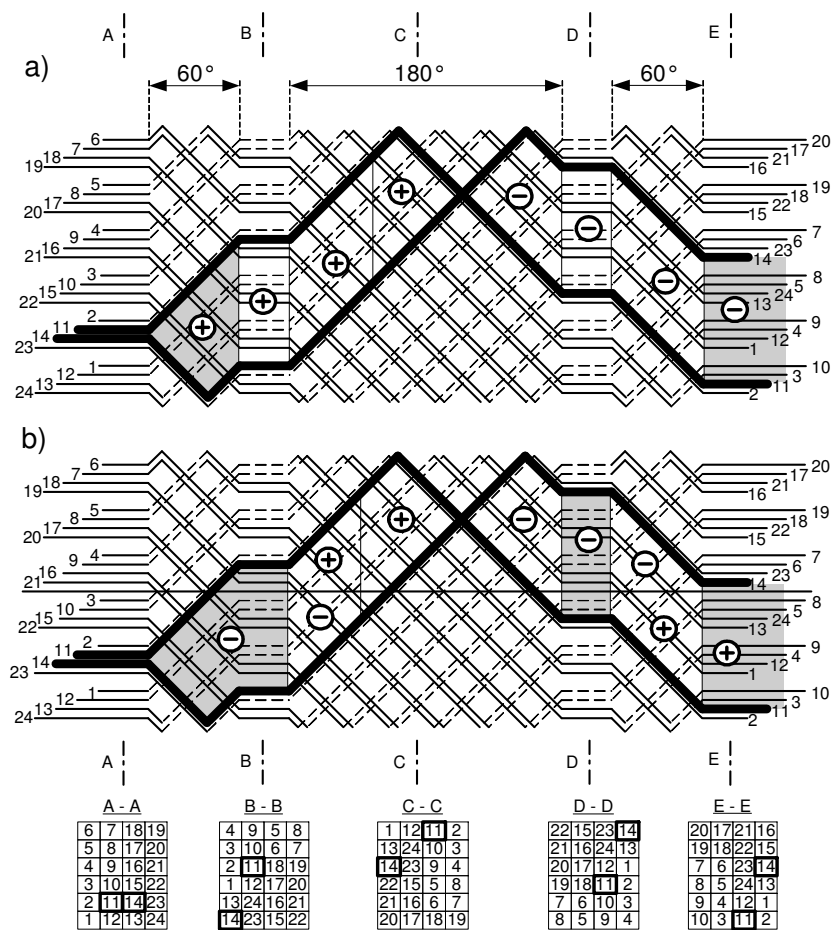
Ze względu na odpowiedni rozkład wzdłuż wysokości pręta, skojarzenie strumienia własnego pokazano na przykładzie par prętów elementarnych oddalonych od siebie o połowę wysokości pręta, tj. 9 i 12. Przeplot typu 90+360+90 zawiera w każdej części czołowej dodatkową transpozycję o kącie 90°. Schemat tego przeplotu przedstawiono na rysunkach 3.8 i 3.9. Z porównania pól między skrajnymi (4 i 9) oraz środkowymi (7 i 12) przewodami elementarnymi wynika, że następuje pełna kompensacja napięć indukowanych od strumienia rozproszenia strefy żłobkowej (rys. 3.8). Pola obszarów tej strefy utworzone przez skrajne (4 i 9) i środkowe (7 i 12) przewody elementarne mają jednakową powierzchnię i przeciwne znaki. W pętli utworzonej przez przewody 4 i 9 strefy czołowej następuje również pełna kompensacja napięć indukowanych od obcego strumienia rozproszenia, natomiast dla sąsiadujących przewodów (7 i 12) brak kompensacji. W pętli utworzonej przez te przewody płyną prądy cyrkulacyjne pod wpływem niezerównoważonego napięcia strefy czołowej. Na podstawie analizy skrajnych przypadków położenia prętów elementarnych można wnioskować, że w pozostałych parach następuje tylko częściowa kompensacja napięć od strumienia obcego w strefie czołowej, tym mniejsza im bliżej środka leżą te pary (rys. 3.8).

Przeplot 360° z dodatkową transpozycją 90° w strefie czołowej daje lepsze rezultaty, niż przeplot bez tej transpozycji. Pole powierzchni utworzone przez przykładową parę przewodów elementarnych (7 i 12) ulega zmniejszeniu w stosunku do pola, jakie występowałoby dla przeplotu typu 0+360+0.

3.2.2. Pręt warstwy górnej – przeplot typu 0+300+0

Analizę strumienia skojarzonego z prętem górnym przedstawiono dla 24 przewodów elementarnych ułożonych w czterech kolumnach. Schemat niepełnego przeplotu Roebela wykonano dla kąta transpozycji 300° (przeplot typu 0+300+0) zamiast 334° (przeplot typu 0+334+0). Dla 24 przewodów elementarnych ułożonych w 4 kolumnach możliwe jest wykonanie niepełnego przeplotu co 30°, tj. przeplot typu 0+330+0, 0+300+0, 0+270+0, 0+240+0, itd.

Wpływ przeplotu typu 0+300+0 (24 przewody elementarne) na strumień skojarzony z prętem uzwojenia stojana jest taki sam jak przeplotu typu 0+334+0 (272 przewody elementarne). Skojarzony z prętem górnym strumień obcy i własny pokazano dla par przewodów elementarnych sąsiadujących ze sobą, tj. 11 i 14 (rys. 3.10). Strefę żłobkową podzielono na pięć części. W pierwszej i piątej części przewody elementarne przesunięte są o kąt 60°, w drugiej i czwartej nie zmieniają położenia, a w trzeciej przesunięte są o kąt 180°. Stosując tzw. niepełny przeplot Roebela w części żłobkowej, uzyskano niepełną kompensację napięć indukowanych w tej strefie. Niezerównoważoną wartość napięcia wykorzystuje się do kompensacji napięć indukowanych w obydwu połączeniach czołowych. Pola powierzchni oczek w tych strefach muszą mieć przeciwny znak w stosunku do nieskompensowanego pola powierzchni w części żłobkowej. Z porównania pól między 11 i 14 przewodem elementarnym (rys. 3.10a) wynika, że w strefie żłobkowej znajduje się niezerównoważone napięcie indukowane od obcego strumienia rozproszenia (obszar dodatni zacieniowany na szaro), którego znak jest przeciwny do niezerównoważonego napięcia strefy czołowej (obszar ujemny zacieniowany na szaro). Podobna sytuacja zachodzi dla indukcji własnej. Z porównania pól między 11 i 14 przewodem elementarnym (rys. 3.10b) wynika, że w strefie żłobkowej znajduje się niezerównoważone napięcie indukowane od własnego strumienia rozproszenia (obszar ujemny zacieniowany na szaro), którego znak jest przeciwny do niezerównoważonego napięcia strefy czołowej (obszar dodatni zacieniowany na szaro).

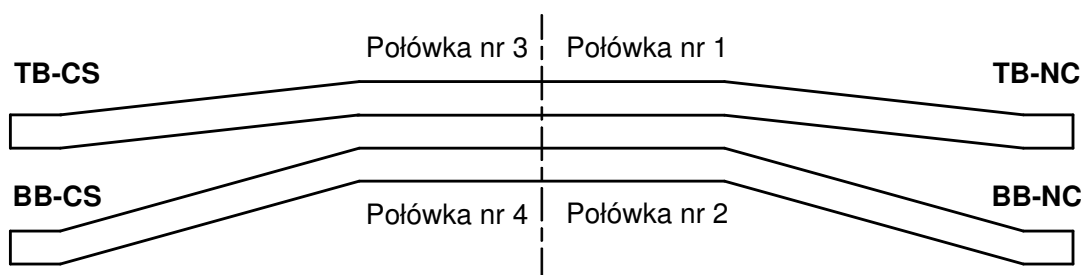


Rys. 3.10 Skojarzenia magnetyczne (przeplot typu 0+300+0):
 a) od strumienia obcego między 11 i 14 przewodem elementarnym,
 b) od strumienia własnego między 11 i 14 przewodem elementarnym

4. GEOMETRIA PRĘTA UZWOJENIA STOJANA

Geometria pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana turbogenerators opisano równaniami zapisanymi w programie komputerowym Bar¹. W programie tym oblicza się niezależnie połówki pręta w następującej kolejności:

- połówka nr 1 (TB – pręt górny, NC – strona nienapędowa maszyny),
- połówka nr 2 (BB – pręt dolny, NC – strona nienapędowa maszyny),
- połówka nr 3 (TB – pręt górny, CS – strona napędowa maszyny),
- połówka nr 4 (BB – pręt dolny, CS – strona napędowa maszyny).



Rys. 4.1 Podział pręta uzwojenia stojana turbogenerators

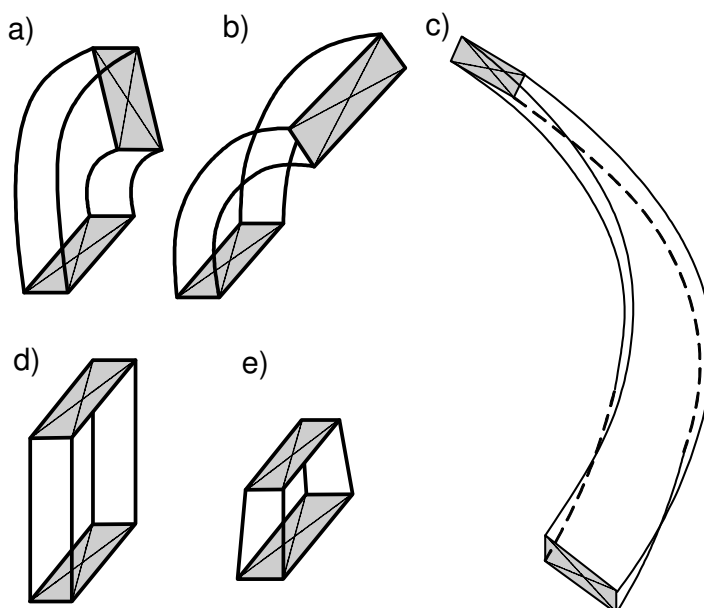
4.1. Podział pręta na segmenty

4.1.1. Segmenty modelujące geometrie pręta

Pręt warstwy górnej i dolnej jest zbudowany z tzw. segmentów geometrycznych wyznaczających jego kształt. W pręcie wyróżniono 5 różnych typów segmentów:

- radialny (gięcie radialne pręta, rys. 4.2a),
- tangensjalny (gięcie tangensjalne pręta, rys. 4.2b),
- ewolwentowy (ewolwenta pręta, rys. 4.2c),
- prostoliniowy (część prosta pręta, rys. 4.2d),
- redukcyjny (redukcja wysokości pręta, rys. 4.2e).

¹ Program Bar opracowano w ramach prac nad rozprawą doktorską.



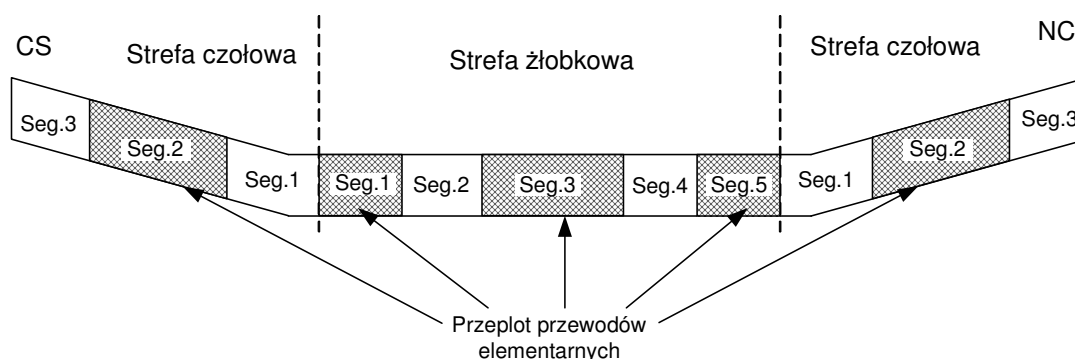
Rys. 4.2 Segmenty tworzące geometrie pręta uzwojenia stojana: a) segment radialny, b) tangencjalny, c) ewolwentowy, d) prostoliniowy, e) redukcyjny

4.1.2. Segmenty modelujące transpozycję pręta

W pręcie stojana, oprócz segmentów geometrycznych, występują również segmenty transpozycji. Segmenty te pozwalają zamodelować przeplot przewodów elementarnych w danej części pręta oraz obszary bez przeplotu. W pręcie warstwy górnej i dolnej może występować maksymalnie 11 segmentów transpozycji:

- 3 segmenty w strefie czołowej po stronie nienapędowej (CS),
- 5 segmentów w strefie żłobkowej (SP),
- 3 segmenty w strefie czołowej po stronie napędowej (NC).

W programie Bar automatycznie dokonuje się podział pręta na segmenty transpozycji w zależności od zadanego typu przeplotu. Na rysunku 4.3 pokazano możliwe umiejscowienie segmentów w pręcie. Obszar zakreskowany oznacza segment modelujący przeplot przewodów elementarnych, natomiast niezakreskowany segment bez przeplotu.



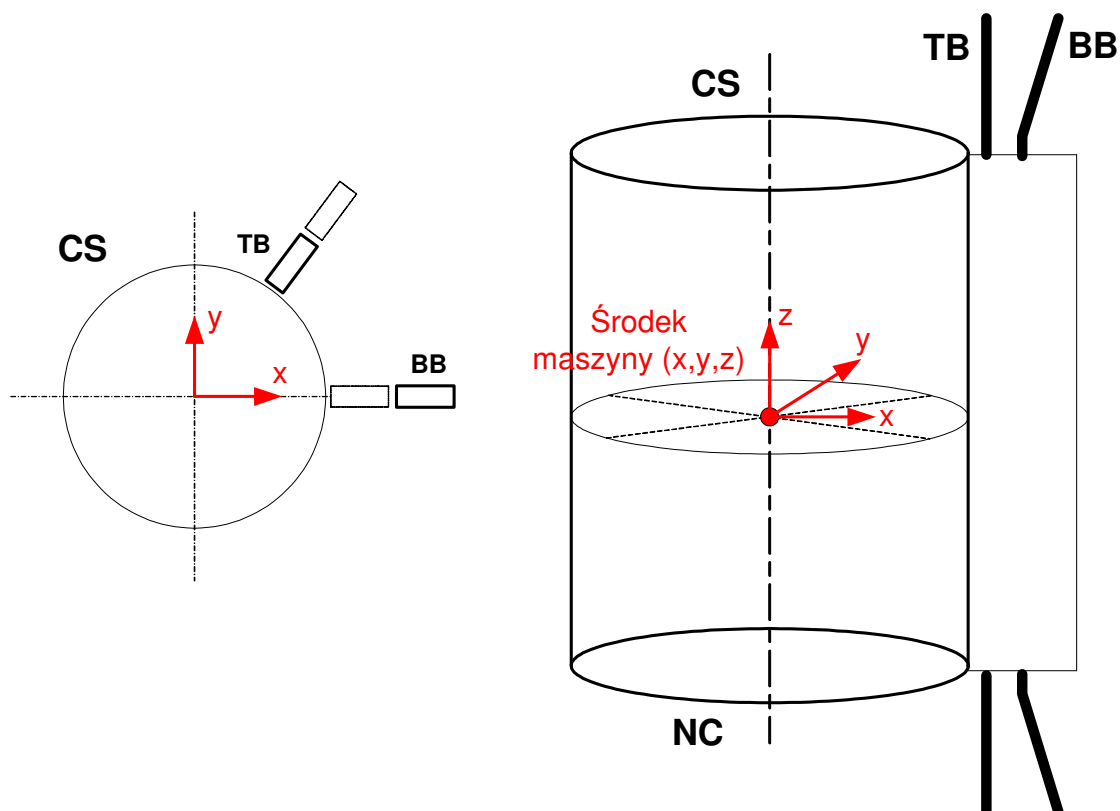
Rys. 4.3 Rozmieszczenie segmentów tworzących przeplot przewodów elementarnych

4.2. Układ koordynacyjny

W pracy zdefiniowano globalny i lokalny układ koordynacyjny, który określa położenie i kierunek każdego segmentu geometrycznego pręta, w przestrzeni trójwymiarowej 3D.

4.2.1. Globalny układ koordynacyjny

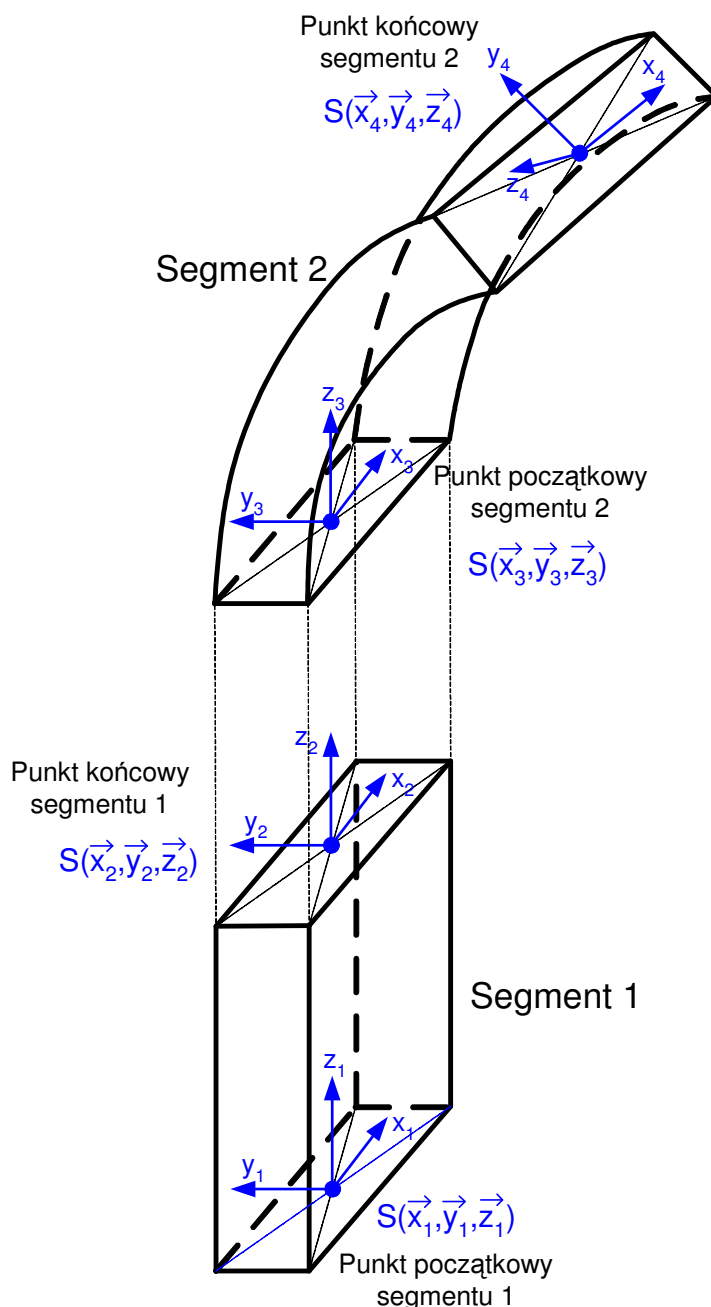
Współrzędne globalnego układu koordynacyjnego mają początek w punkcie $P(x=0, y=0, z=0)$, stanowiącym środek turbogeneratora (rys. 4.4). Współrzędne te określają położenie punktu początkowego i końcowego poszczególnych segmentów pręta.



Rys. 4.4 Współrzędne globalnego układu koordynacyjnego

4.2.2. Lokalny układ koordynacyjny

Lokalny układ koordynacyjny stanowią wektory jednostkowe określające kierunek poszczególnych segmentów pręta. Lokalny system współrzędnych przypisany jest do punktu początkowego i końcowego każdego z segmentów. Przykład takiego układu współrzędnych przedstawiono na rysunku 4.5. Współrzędne punktu początkowego segmentu 2 i punktu końcowego segmentu 1 są takie same.

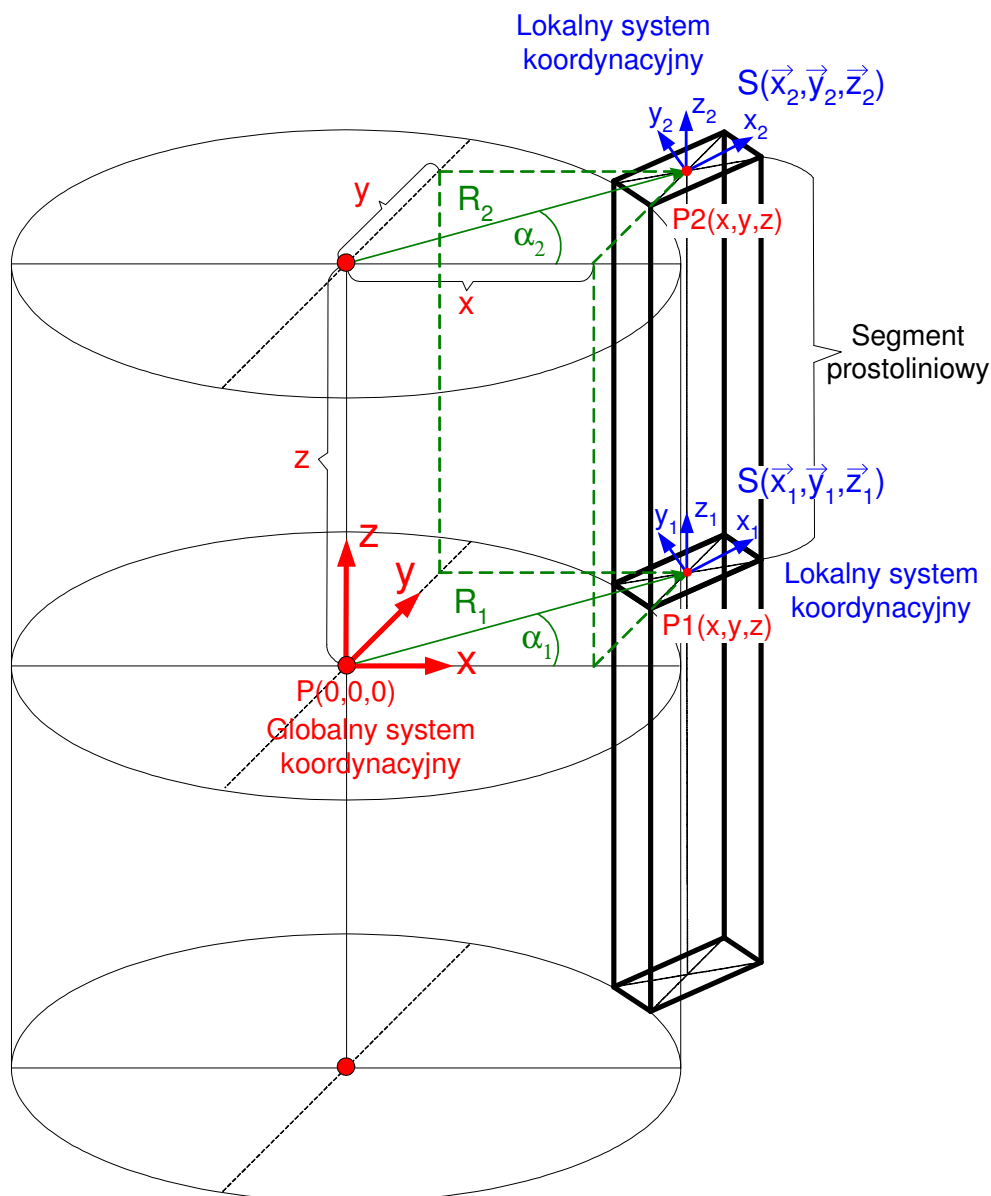


Rys. 4.5 Współrzędne lokalnego układu koordynacyjnego

Położenie segmentu w przestrzeni jest określone za pomocą punktu końcowego i początkowego, zawierającego dane globalnego i lokalnego systemu koordynacyjnego:

- współrzędne x, y, z opisujące lokalizacje punktu w przestrzeni 3D,
- promień R i kąt α opisujące lokalizacje punktu w cylindrycznym układzie współrzędnych,
- wektory jednostkowe $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ opisujące kierunek segmentu w przestrzeni 3D.

Na rysunku 4.6 pokazano opis położenia w przestrzeni 3D prostoliniowego segmentu pręta warstwy górnej uzwojenia stojana turbogeneratora.

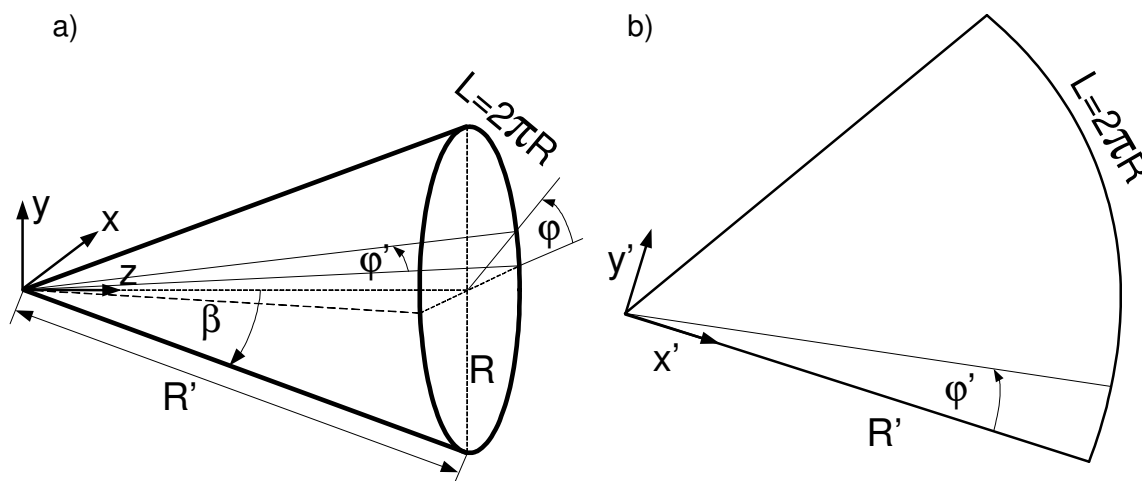


Rys. 4.6 Lokalizacja w przestrzeni 3D prostoliniowego segmentu pręta uzwojenia stojana

4.3. Strefa czołowa pręta

4.3.1. Modelowanie ewolwenty

Obliczenie kształtu ewolwenty wykonano stosując zamianę przestrzennego układu 3D strefy czołowej na układ płaski 2D [15, 43]. Zamianę zrealizowano przez tzw. rozwinięcie powierzchni bocznej stożka na płaszczyznę (rys. 4.7). Rozwinięcie zastosowano do stożka, względem którego jest wyginany pręt uzwojenia stojana w strefie czołowej turbogeneratora.



Rys. 4.7 Zamiana układu 3D na układ płaski 2D (rozwiniecie powierzchni bocznej stożka na płaszczyznę)

Parametrem pozwalającym na zmianę układu 3D na 2D jest kąt β , zawarty między tworzącą a wysokością stożka, stąd otrzymano:

$$R = R' \sin \beta \quad (4.1)$$

$$\varphi = \frac{\varphi'}{\sin \beta} \quad (4.2)$$

Parametrami szukanymi są współrzędne punktu końcowego ewolwenty (4.3),

$$x(l), y(l), z(l) \quad \text{lub} \quad r(l), \varphi(l), z(l) \quad (4.3)$$

wyznaczone z zachowaniem warunku stałej odległości (δ) między sąsiednimi prętami tych samych warstw na całej długości ewolwenty (l). Na rysunku 4.8 przedstawiono geometrie ewolwenty pręta uzwojenia stojana po zmianie układu 3D na układ płaski 2D. W układzie tym obowiązują następujące zależności:

$$x'(t) = R_0'(\cos t + t \cdot \sin t) \quad (4.4)$$

$$y'(t) = R_0'(\sin t - t \cdot \cos t) \quad (4.5)$$

$$r'(t) = \sqrt{x'^2 + y'^2} = R_0' \sqrt{1 + t^2} \quad (4.6)$$

$$\varphi'(t) = t - \arctan t \quad (4.7)$$

$$dl = R_0' t \cdot dt \quad (4.8)$$

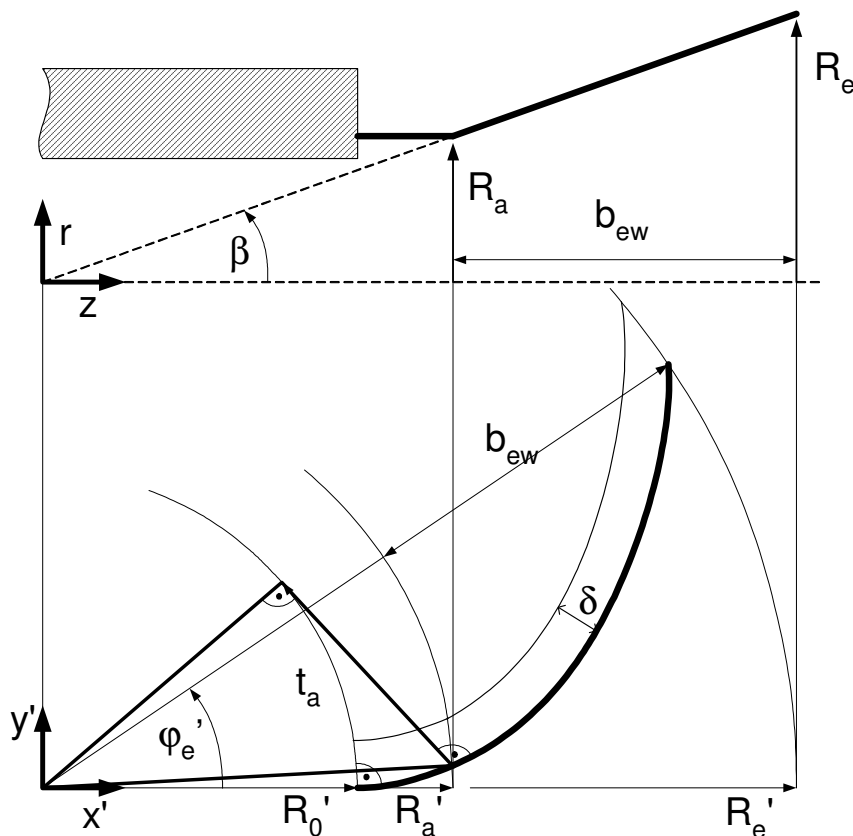
Na podstawie (4.4) ÷ (4.8) wyznaczono:

$$R_0' = \sqrt{\frac{R_a'^2}{t_a'^2 + 1}} \quad (4.9)$$

$$t(l) = \sqrt{2 \frac{l}{R_0'} + t_a'^2} \quad (4.10)$$

$$r'(l) = R_0' \sqrt{1 + 2 \frac{l}{R_0'} + t_a'^2} \quad (4.11)$$

$$\varphi'(l) = \sqrt{2 \frac{l}{R_0'} + t_a'^2} - \arctan \sqrt{2 \frac{l}{R_0'} + t_a'^2} \quad (4.12)$$



Rys. 4.8 Wyznaczanie kształtu ewolwenty pręta uzwojenia stojana na płaszczyźnie (układ płaski 2D)

Z równań układu płaskiego (4.9) ÷ (4.12) określono współrzędne punktu końcowego ewolwenty w układzie cylindrycznym:

$$r(l) = r'(l) \sin \beta \quad (4.13)$$

$$\varphi(l) = \frac{l}{\sin \beta} (\varphi'(l) - \varphi_a') \quad (4.14)$$

$$z(l) = z_a + \frac{(r(l) - R_a)}{\tan \beta} \quad (4.15)$$

Odpowiednio skompilowane równania w programie Bar umożliwiają wyznaczenie parametrów każdego punktu strefy czołowej pręta turbogeneratora.

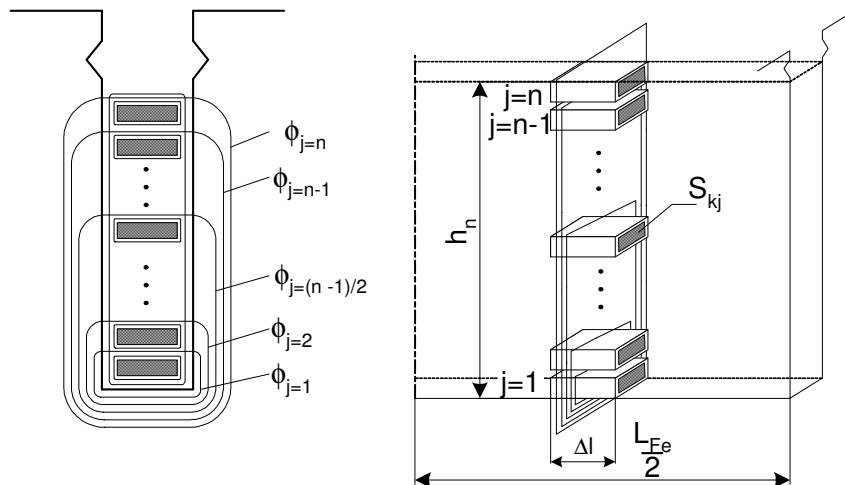
5. OBLICZENIA ELEKTROMAGNETYCZNE

5.1. Model matematyczny do obliczeń elektromagnetycznych uzwojenia stojana

5.1.1. Zastosowanie metody przewodów elementarnych

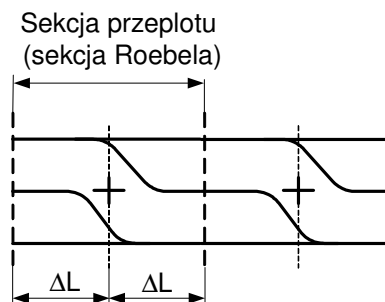
W wyniku zastosowania przeplotu Roebela przewody elementarne są umieszczone na różnej wysokości w żłobku z jednoczesnym wyrównaniem ich sprzężeń magnetycznych.

Transpozycja przewodów elementarnych może być wykonywana w strefie żłobkowej i czołowej pręta. Do określenia sprzężeń magnetycznych w strefie żłobkowej (środowisku ferromagnetycznym) oraz strefie czołowej (środowisku niemagnetycznym) zastosowano tzw. „metodę przewodów elementarnych” [8, 15, 43, 44]. Pręt w żłobku jest traktowany jak sieć elektryczna o n gałęziach równoległych, powiązanych wzajemnie sprzężeniami magnetycznymi. Poprzeczny podział pręta na przewody – gałęzie oraz podłużny na słupki o długości Δl pokazano na rysunku 5.1.



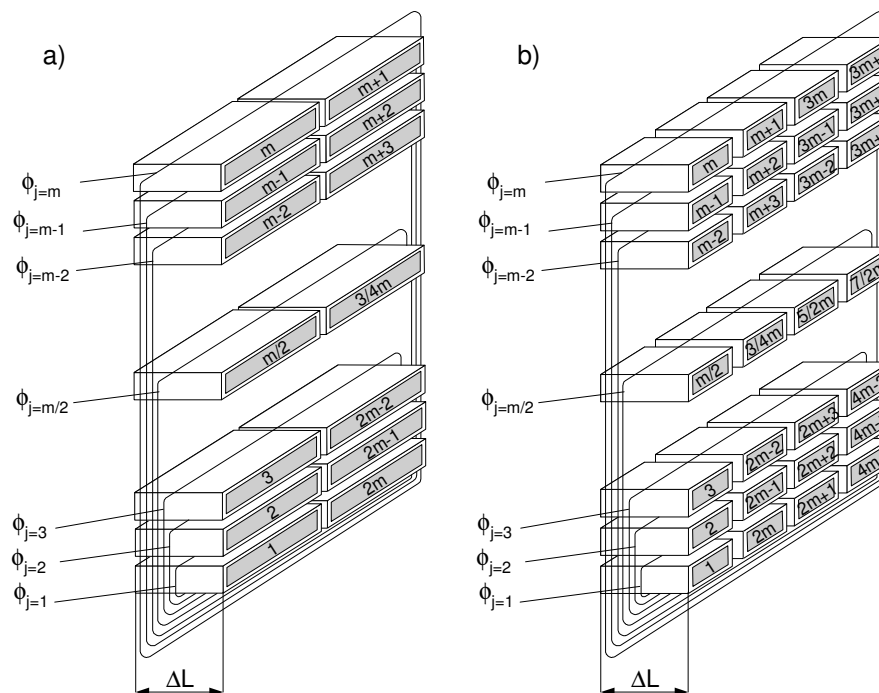
Rys. 5.1 Obraz linii strumienia magnetycznego dla słupka przewodów elementarnych

Zakłada się, że gęstość prądu w każdej gałęzi można uznać za stałą. W odniesieniu do prętów turbogeneratora liczba gałęzi równoległych odpowiada liczbie przewodów elementarnych danego pręta. Pręt uzwojenia na długości podzielono na tzw. słupki odcinków przewodów elementarnych (Δl), których liczba zależy od rodzaju zastosowanej transpozycji. Na długości słupka Δl sprzężenie magnetyczne jest stałe. Długość ta (rys 5.2) odpowiada połowie długości tzw. sekcji przeplotu.



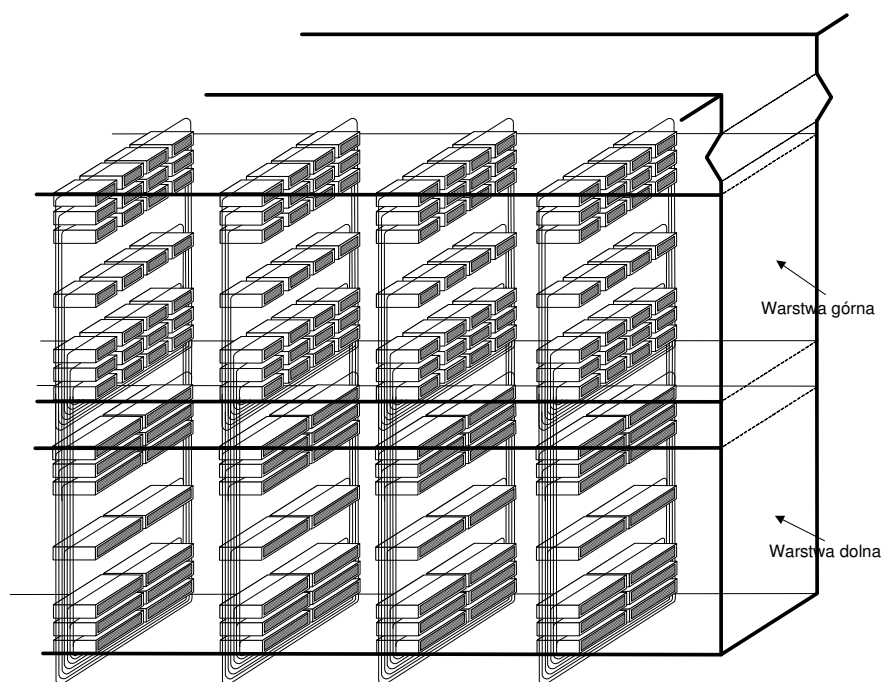
Rys. 5.2 Sekcja przeplotu Roebela

Schemat strumieni magnetycznych sprzęgających przewody elementarne wycinka pręta turbogeneratora podzielonego na dwie i cztery kolumny przewodów elementarnych przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3 Obraz linii strumienia magnetycznego i ich sprzężeń dla słupki przewodów elementarnych pręta turbogeneratora: a) podział pręta na 2 kolumny przewodów elementarnych, b) podział pręta na 4 kolumny przewodów elementarnych

Podział pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana turbogeneratora na słupki przewodów elementarnych przedstawiono na rysunku 5.4.

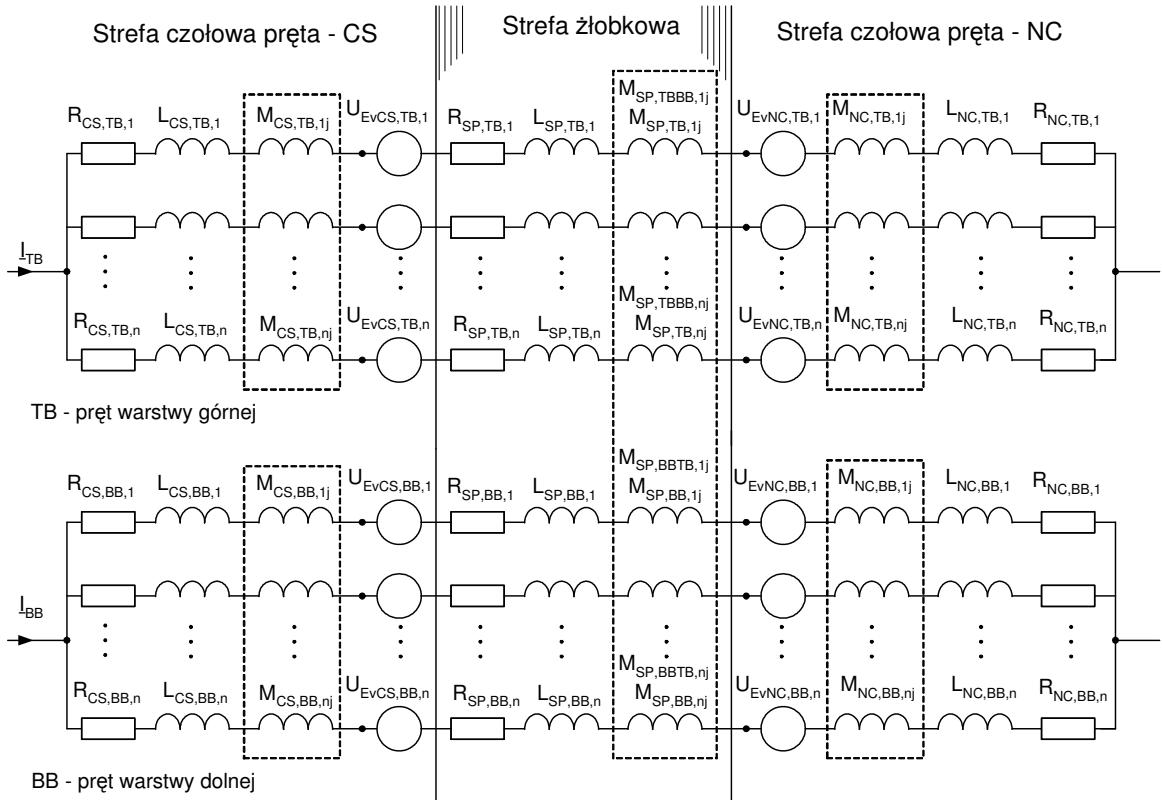


Rys. 5.4 Podział pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana turbogeneratora na słupki przewodów elementarnych

5.1.2. Schemat zastępczy dwuwarstwowego uzwojenia stojana

Schemat zastępczy prętów dwuwarstwowego uzwojenia twornika, gdzie zastosowano metodę przewodów elementarnych, pokazano na rysunku 5.5 [8, 43]. Model uzwojenia jest podzielony na trzy strefy:

- czołową po stronie nienapędowej (CS),
- żłobkową (SP),
- czołową uzwojenia po stronie napędowej maszyny (NC).



Rys. 5.5 Schemat zastępczy pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana turbogeneratora

W modelu przyjęto za m oraz n odpowiednio liczbę przewodów elementarnych w kolumnie oraz w przecie uzwojenia. k -ty przewód elementarny ($k \in 1 \dots n$) pręta górnego i dolnego w poszczególnych strefach schematu zastępczego opisano następującymi parametrami:

- wypadkową rezystancją:

$$R_{CS, TB, k}; R_{CS, BB, k}, R_{SP, TB, k}; R_{SP, BB, k}, R_{NC, TB, k}; R_{NC, BB, k}$$

- wypadkową indukcyjnością własną:

$$L_{CS, TB, k}; L_{CS, BB, k}, L_{SP, TB, k}; L_{SP, BB, k}, L_{NC, TB, k}; L_{NC, BB, k}$$

- wypadkową indukcyjnością wzajemną między przewodami k i l należącymi do tego samego pręta uzwojenia:

$$M_{CS, TB, kl}; M_{CS, BB, kl}, M_{SP, TB, kl}; M_{SP, BB, kl}, M_{NC, TB, kl}; M_{NC, BB, kl}$$

- wypadkową indukcyjnością wzajemną między przewodami k i l należącymi do prętów różnych warstw uzwojenia:

$$M_{SP,TBBB,kl} ; M_{SP,BBTB,kl}$$

- wypadkowym napięciem indukowanym od pola magnetycznego wirnika oraz pozostałych prętów uzwojenia stojana:

$$U_{Ev,NC,TB,k} ; U_{Ev,NC,BB,k} , U_{Ev,CS,TB,k} ; U_{Ev,CS,BB,k}$$

W części czołowej oprócz rezystancji, indukcyjności własnej i wzajemnej występują źródła napięcia ($U_{Ev,CS,TB,k} ; U_{Ev,CS,BB,k} ; U_{Ev,NC,TB,k} ; U_{Ev,NC,BB,k}$) indukowane od pola magnetycznego wirnika oraz pozostałych prętów uzwojenia stojana. Wypadkowe wartości rezystancji, indukcyjności własnej, wzajemnej oraz napięcia dla określonego przewodu elementarnego k ($k \in 1 \dots n$), pręta górnego i dolnego są sumą ich składowych w poszczególnych strefach:

$$\begin{aligned} R_{TB,k} &= R_{CS,TB,k} + R_{SP,TB,k} + R_{NC,TB,k} \\ R_{BB,k} &= R_{CS,BB,k} + R_{SP,BB,k} + R_{NC,BB,k} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} L_{TB,k} &= L_{CS,TB,k} + L_{SP,TB,k} + L_{NC,TB,k} \\ L_{BB,k} &= L_{CS,BB,k} + L_{SP,BB,k} + L_{NC,BB,k} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} M_{TB,k} &= M_{CS,TB,kl} + M_{SP,TB,kl} + M_{NC,TB,kl} \\ M_{BB,k} &= M_{CS,BB,kl} + M_{SP,BB,kl} + M_{NC,BB,kl} \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} U_{Ev,TB,k} &= U_{Ev,CS,TB,k} + U_{Ev,NC,TB,k} \\ U_{Ev,BB,k} &= U_{Ev,CS,BB,k} + U_{Ev,NC,BB,k} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} M_{TBBB,k} &= M_{SP,TBBB,kl} \\ M_{BBTB,k} &= M_{SP,BBTB,kl} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Indukcyjności wzajemne przewodów elementarnych prętów różnych warstw ($M_{TBBB,k} ; M_{BBTB,k} ; 5.5$) określono tylko w strefie żłobkowej pręta. Wypadkowe impedancje przewodów elementarnych warstwy dolnej i górnej tego samego pręta są określone zależnościami:

$$\underline{Z}_{TB TB,kl} = \begin{cases} R_{TB,k} + j\omega L_{TB,k} & \text{dla } k = l \\ j\omega M_{TB,kl} & \text{dla } k \neq l \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\underline{Z}_{BB BB,kl} = \begin{cases} R_{BB,k} + j\omega L_{BB,k} & \text{dla } k = l \\ j\omega M_{BB,kl} & \text{dla } k \neq l \end{cases} \quad (5.7)$$

natomiast impedancje wzajemne między przewodami elementarnymi znajdującymi się w prętach różnych warstw uzwojenia opisują zależności:

$$\underline{Z}_{TB BB,kl} = j\omega M_{TB BB,kl} \quad (5.8)$$

$$\underline{Z}_{BB TB,kl} = j\omega M_{BB TB,kl} \quad (5.9)$$

Równania napięciowe i prądowe odpowiadające schematowi zastępczemu opisywanego modelu mają postać

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{TB} &= \underline{Z}_{TBTB,11} \underline{I}_{TB,1} + \dots + \underline{Z}_{TBTB,1n} \underline{I}_{TB,n} + \underline{Z}_{TBTB,1n} \underline{I}_{TB,n} + \dots + \underline{Z}_{TBBB,1n+1} \underline{I}_{BB,1} + \underline{U}_{Ev,TB,1} \\
 \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 \underline{U}_{TB} &= \underline{Z}_{TBTB,n1} \underline{I}_{TB,1} + \dots + \underline{Z}_{TBTB,nn} \underline{I}_{TB,n} + \underline{Z}_{TBBB,nn+1} \underline{I}_{BB,1} + \dots + \underline{Z}_{TBBB,nn} \underline{I}_{BB,n} + \underline{U}_{Ev,TB,n} \\
 \underline{U}_{BB} &= \underline{Z}_{BBTB,n+11} \underline{I}_{TB,1} + \dots + \underline{Z}_{BBTB,nn+1n} \underline{I}_{TB,n} + \underline{Z}_{BBBB,nn+1n+1} \underline{I}_{BB,1} + \dots + \underline{Z}_{BBBB,nn+1n} \underline{I}_{BB,n} + \underline{U}_{Ev,BB,1} \\
 \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots & \qquad \qquad \qquad \vdots \\
 \underline{U}_{BB} &= \underline{Z}_{BBTB,2n1} \underline{I}_{TB,1} + \dots + \underline{Z}_{BBTB,2nn} \underline{I}_{TB,n} + \underline{Z}_{BBBB,2nn+1} \underline{I}_{BB,1} + \dots + \underline{Z}_{BBBB,2nn} \underline{I}_{BB,n} + \underline{U}_{Ev,BB,n}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

$$\underline{I}_{TB,1} + \dots + \underline{I}_{TB,n} = \underline{I}_{TB} \tag{5.11}$$

$$\underline{I}_{BB,1} + \dots + \underline{I}_{BB,n} = \underline{I}_{BB} \tag{5.12}$$

i zapisane mogą być w postaci macierzowej

$$\begin{bmatrix}
 & & & & & & -1 & 0 \\
 & [\underline{Z}_{TBTB}] & & [\underline{Z}_{TBBB}] & & & \vdots & \vdots \\
 & & & & & & -1 & 0 \\
 & & [\underline{Z}_{BBTB}] & & [\underline{Z}_{BBBB}] & & 0 & -1 \\
 & & & & & & \vdots & \vdots \\
 & & & & & & 0 & -1 \\
 -1 & \dots & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \dots & 0 & -1 & \dots & -1 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \underline{I}_{TB,1} \\
 \vdots \\
 \underline{I}_{TB,n} \\
 \underline{I}_{BB,1} \\
 \vdots \\
 \underline{I}_{BB,n} \\
 \underline{U}_{TB} \\
 \underline{U}_{BB}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -\underline{U}_{Ev,TB,1} \\
 \vdots \\
 -\underline{U}_{Ev,TB,n} \\
 -\underline{U}_{Ev,BB,1} \\
 \vdots \\
 -\underline{U}_{Ev,BB,n} \\
 -\underline{I}_{TB} \\
 -\underline{I}_{BB}
 \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

W wyniku rozwiązania tego równania otrzymuje się prądy w poszczególnych przewodach elementarnych. Dla prętów o dużej liczbie przewodów elementarnych równanie macierzowe przybiera duże rozmiary – ponad 100 tysięcy elementów, co zwiększa czas obliczeń. W celu zmniejszenia rozmiarów macierzy dokonano podziału na dwa równania składowe odpowiadające prętowi warstwy górnej i dolnej uzwojenia w następującej postaci:

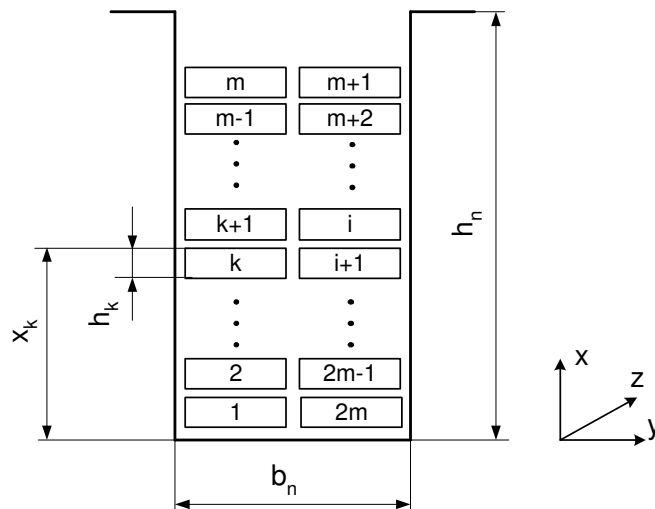
$$\begin{bmatrix}
 \underline{Z}_{TBTB,11} & \dots & \underline{Z}_{TBTB,1n} & -1 \\
 \vdots & & \vdots & \vdots \\
 \underline{Z}_{TBTB,n1} & \dots & \underline{Z}_{TBTB,nn} & -1 \\
 -1 & \dots & -1 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \underline{I}_{TB,1} \\
 \vdots \\
 \underline{I}_{TB,n} \\
 \underline{U}_{TB}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -\underline{U}_{Ev,TB,1} - \underline{U}_{TB,BB,1} \\
 \vdots \\
 -\underline{U}_{Ev,TB,n} - \underline{U}_{TB,BB,n} \\
 -\underline{I}_{TB}
 \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

$$\begin{bmatrix}
 \underline{Z}_{BBTB,11} & \dots & \underline{Z}_{BBTB,1n} & -1 \\
 \vdots & & \vdots & \vdots \\
 \underline{Z}_{BBTB,n1} & \dots & \underline{Z}_{BBTB,nn} & -1 \\
 -1 & \dots & -1 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \underline{I}_{BB,1} \\
 \vdots \\
 \underline{I}_{BB,n} \\
 \underline{U}_{BB}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 -\underline{U}_{Ev,BB,1} - \underline{U}_{BB,TB,1} \\
 \vdots \\
 -\underline{U}_{Ev,BB,n} - \underline{U}_{BB,TB,n} \\
 -\underline{I}_{BB}
 \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

W równaniach tych oddziaływanie prądów warstwy dolnej i górnej uwzględniono odpowiednio napięciami: $\underline{U}_{TB,BB,1\dots n}$ i $\underline{U}_{BB,TB,1\dots n}$

5.1.3. Indukcyjności własne i wzajemne przewodów elementarnych pręta uzwojenia stojana

Rezystancje występujące w równaniu macierzowym napięć i prądów wyznaczyć można na podstawie wymiarów geometrycznych i rezystywności poszczególnych części przewodów elementarnych. Indukcyjności własne i wzajemne tej macierzy zależą od geometrii żłobka i pozycji zajmowanej przez dany przewód na jego wysokości (rys. 5.6).



Rys. 5.6 Określenie położenia przewodów elementarnych w żłobku do wyznaczenia indukcyjności własnej i wzajemnej macierzy impedancji pręta turbogeneratora

Indukcyjności własne i wzajemne występujące w równaniach macierzowych pręta warstwy górnej i dolnej (5.14, 5.15) wyznaczono dla strefy żłobkowej na podstawie równań [8, 15]:

$$L_{kk} = \Delta l \mu_0 \left(\frac{1}{3} \frac{h_k}{b_n} + \frac{h_n - x_k}{b_n} \right) \quad (5.16)$$

$$M_{ki} = \Delta l \mu_0 \left(\frac{1}{2} \frac{h_k}{b_n} + \frac{h_n - x_k}{b_n} \right) \quad \text{dla } x_k > x_i \quad (5.17)$$

oraz równań dla strefy czołowej uzwojenia za pomocą równań:

$$L_{kk} = \frac{\Delta l \mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{\rho_{kk}} \quad (5.18)$$

$$M_{ki} = \frac{\Delta l \mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{\rho_{ki}} \quad (5.19)$$

$$R \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{D_S - D_R}{2} \quad (5.20)$$

przy czym :

ρ_{ki} – średnia odległość między środkami przewodów elementarnych $R \gg \rho_{kk}$

i $R \gg \rho_{ki}$,

R – tzw. „promień zastępczy przewodu powrotnego”,

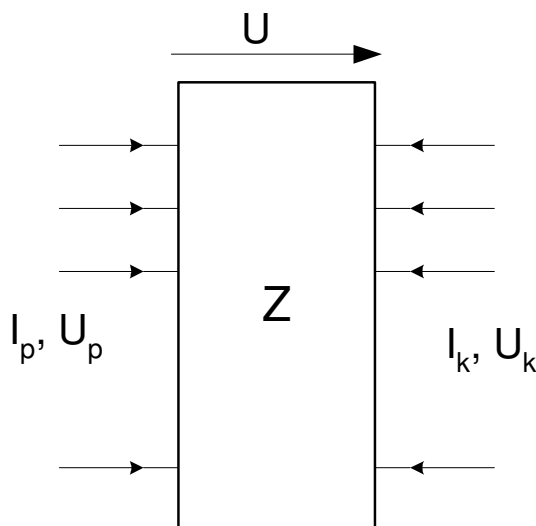
D_S – średnica zewnętrzna stojana,

D_R – średnica zewnętrzna wirnika.

5.2. Macierz impedancji pręta uzwojenia stojana

5.2.1. Metoda obliczenia macierzy impedancji pręta

Sposób wyznaczania wypadkowej macierzy impedancji pręta stojana turbogenerators omówiono na przykładzie 12 przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach. Uproszczony model pręta przedstawiono na rysunku 5.7 [15]. Pręt zamodelowano jako prostokątny blok z danymi wejściowymi ($U_p; I_p$) i wyjściowymi ($U_k; I_k$). Parametrem charakteryzującym prostokątny blok jest impedancja zastępcza Z .



Rys. 5.7 Uproszczony model pręta

Dla przedstawionego modelu pręta obowiązują następujące równania:

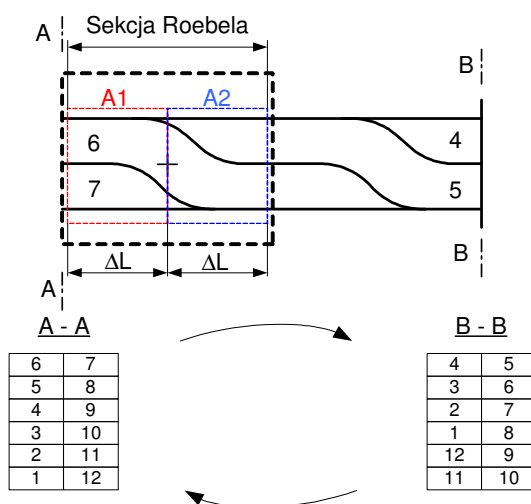
$$U = Z I_p \quad (5.21)$$

$$U = U_p - U_k \quad (5.22)$$

$$I_p = -I_k \quad (5.23)$$

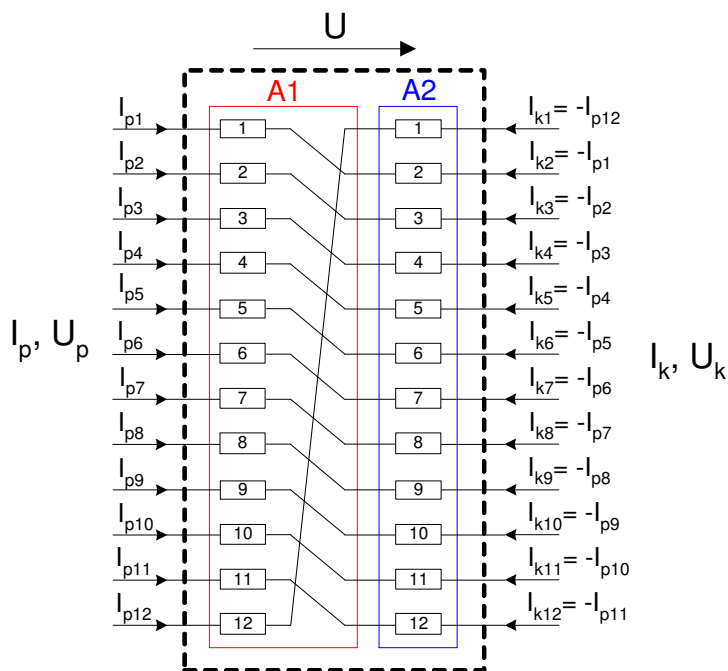
$$\begin{cases} U_k = U_p - Z I_p \\ I_k = -I_p \end{cases} \quad (5.24)$$

Wzdłuż długości pręt podzielono na jednakowe odcinki związane z typem przepłotu Roebela (sekcje Roebela – przepłotu, rys. 5.8)



Rys. 5.8 Sekcja Roebela

Na rysunku 5.9 pokazano przykład modelu sekcji przepłotu obszaru A1 i A2 dla 12 przewodów elementarnych.



Rys. 5.9 Model sekcji Roebela pręta uzwojenia stojana turbogeneratora

Równanie (5.24) ma wówczas postać macierzową:

$$\begin{bmatrix} U_k \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & ZP \\ 0 & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & Z \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ -I_p \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$A1 = \begin{bmatrix} P & ZP \\ 0 & P \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$A2 = \begin{bmatrix} E & Z \\ 0 & E \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

a po przekształceniu:

$$\begin{bmatrix} U_k \\ I_k \end{bmatrix} = (A1 \ A2) \begin{bmatrix} U_p \\ -I_p \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

$$A1 \ A2 = \begin{bmatrix} P & PZ + ZP \\ 0 & P \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

gdzie E jest macierzą jednostkową:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

natomiast jako P oznaczono macierz transpozycji modelującą położenie przewodu elementarnego. Dla pręta o s sekcjach Roebela równanie (5.28) przyjmuje ogólną formę:

$$\begin{bmatrix} U_k \\ I_k \end{bmatrix} = (A1 \ A2)^s \begin{bmatrix} U_p \\ -I_p \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

$$(A1 \ A2)^s = \begin{bmatrix} T & Z_T \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

gdzie:

- T - wypadkowa macierz transpozycji,
- Z_T - wypadkowa macierz impedancji pręta opowiadająca macierzy impedancji w równaniach (5.14) i (5.15).

Pręt o 12 przewodach elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach, w którym wykonano przeplot 360° ma 12 sekcji transpozycji (sekcji Roebela) i można opisać równaniem:

$$\begin{bmatrix} U_{k1} \\ \vdots \\ U_{k12} \\ I_{k1} \\ \vdots \\ I_{k12} \end{bmatrix} = (A1 \ A2)^{12} \begin{bmatrix} U_{p1} \\ \vdots \\ U_{p12} \\ -I_{p1} \\ \vdots \\ -I_{p12} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

5.2.3. Obliczenie wypadkowej macierzy impedancji pręta

Korzystając z opisanego modelu matematycznego wykonano obliczenie wypadkowej macierzy impedancji pręta uzwojenia stojana badanego turbogeneratora (5.31). Ponieważ wymiary geometryczne przewodów na całej długości pręta są takie same, więc wpływ na rozptył prądów mają przede wszystkim reaktancje. Z tego względu wykonano obliczenia wypadkowej macierzy reaktancji pręta warstwy górnej i dolnej. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch typów transpozycji:

dla pręta dolnego:

- przepłot typu 0+0+0 (brak przepłotu w części żłobkowej i połączeń czołowych),
- przepłot typu 90+360+90,

dla pręta górnego:

- przepłot typu 0+0+0 (brak przepłotu w części żłobkowej i połączeń czołowych),
- przepłot typu 0+334+0.

W tabeli 5.1 zestawiono wymiary geometryczne żłobków i prętów uzwojenia stojana obliczanego turbogeneratora (TB – pręt górny, BB – pręt dolny).

Tabela 5.1 Wymiary prętów i żłobków obliczanego turbogeneratora

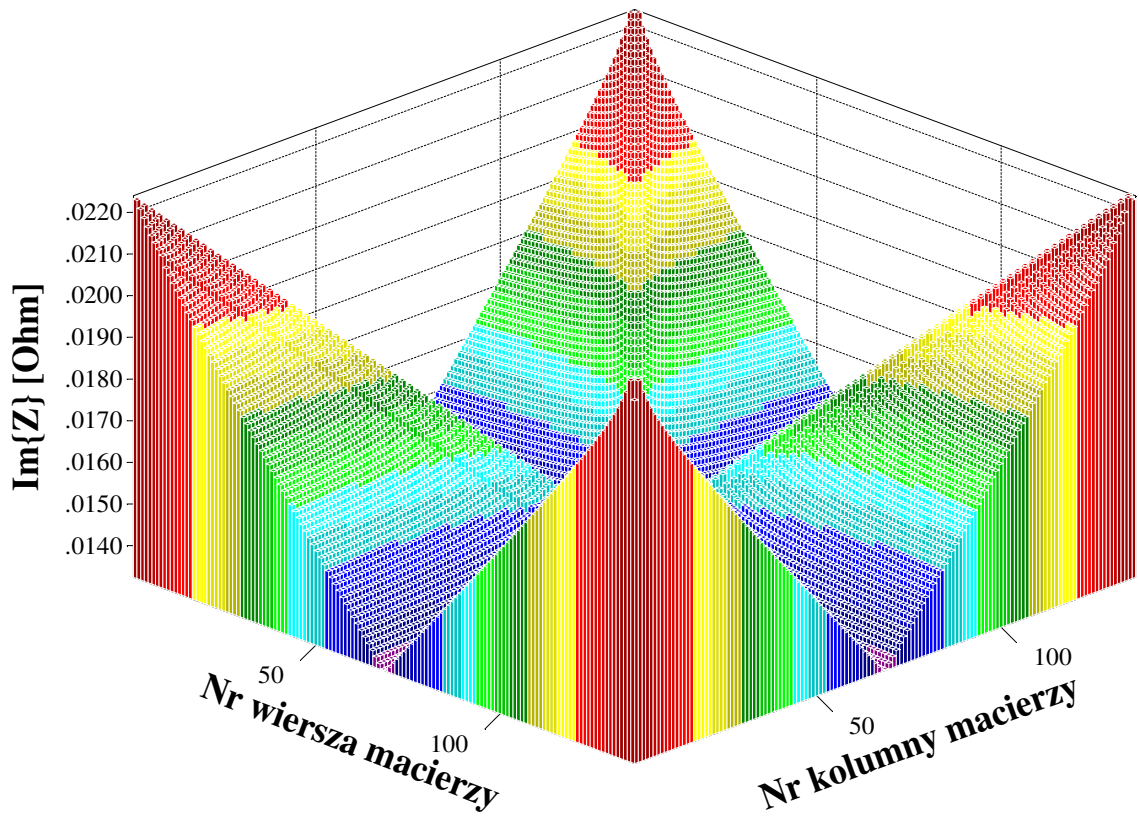
	b_n	h_n	n		N_c		H	
			TB	BB	TB	BB	TB	BB
mm	34,1	303,0	272	136	4	2	119,3	119,3

b_n – szerokość żłobka, h_n – wysokość żłobka, n – liczba przewodów elementarnych w pręcie, N_c – liczba kolumn w pręcie, H – wysokość pręta

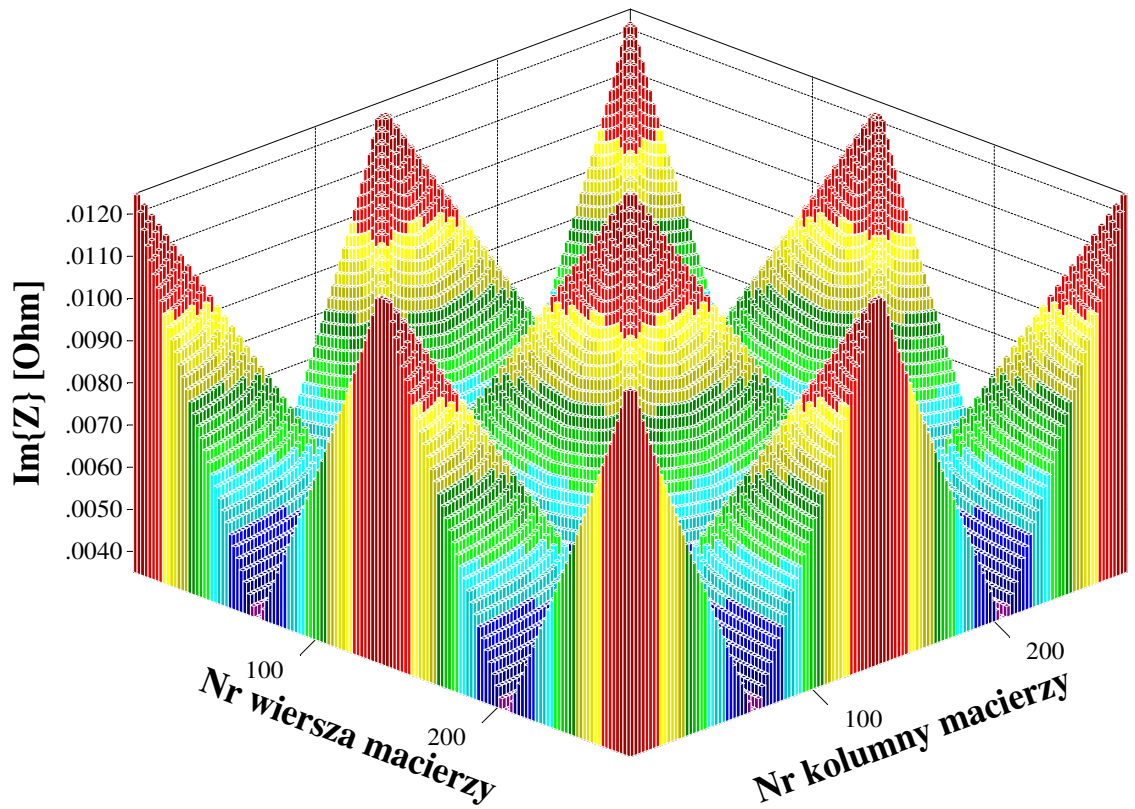
Wyniki obliczeń wypadkowej macierzy reaktancji pręta warstwy górnej i dolnej dla przepłotu typu 0+0+0 przedstawiono na rysunkach 5.10 i 5.11.

Rozkład macierzy reaktancji pręta dolnego i górnego dla przepłotu 0+0+0 ma podobny kształt. Zmiana wartości od minimalnej do maksymalnej następuje liniowo i wyrażona jest w postaci stożka. Czubek stożka wyznacza wartość maksymalną, natomiast minimalną jego podstawa. W wyniku różnej liczby kolumn przewodów elementarnych dla przepłotu typu wykresy przedstawione na rysunkach 5.10 i 5.11 różnią się liczbą stożków. Maksymalną wartość reaktancji mają przewody elementarne położone najniżej. Dla analizowanego turbogeneratora są to przewody elementarne 1 i 136 dla pręta dolnego oraz 1, 136, 137, 272 dla pręta górnego. Zastosowanie przepłotu zmienia rozkład macierzy (rys. 5.12, 5.13).

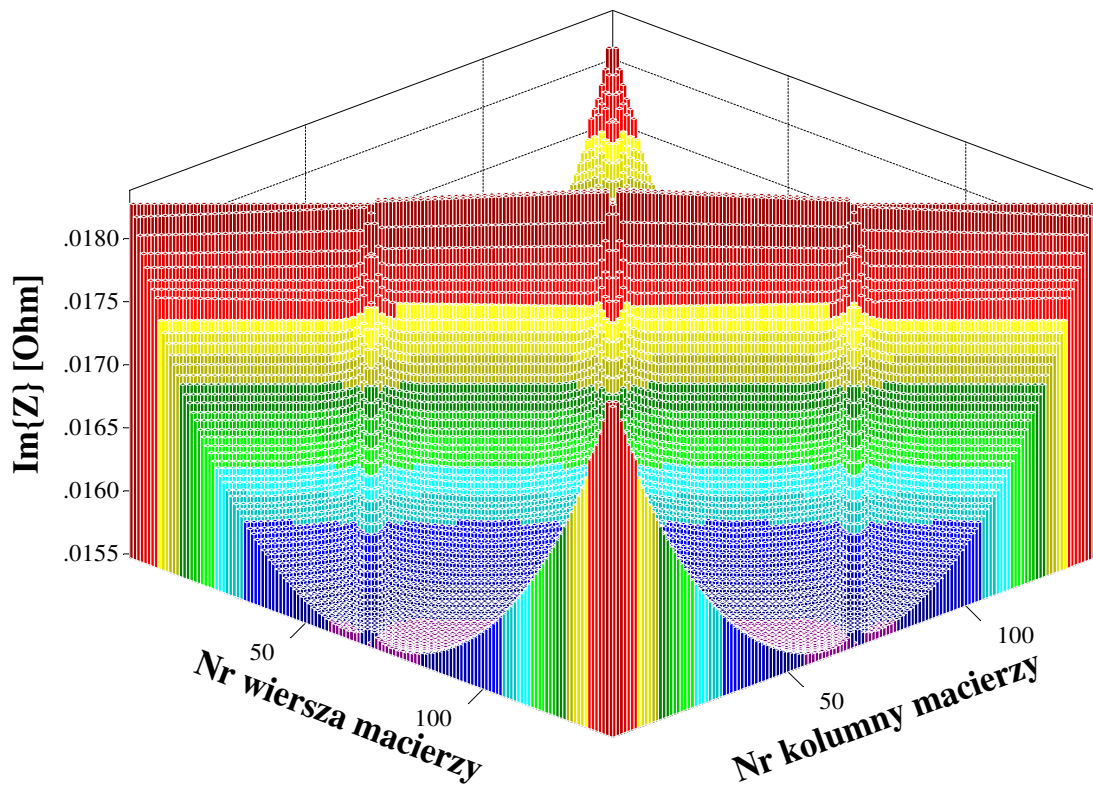
Wyniki obliczeń wypadkowej macierzy reaktancji pręta dolnego dla przepłotu typu 90+360+90 i pręta górnego dla przepłotu 0+334+0 przedstawiono na rysunkach 5.12 i 5.13.



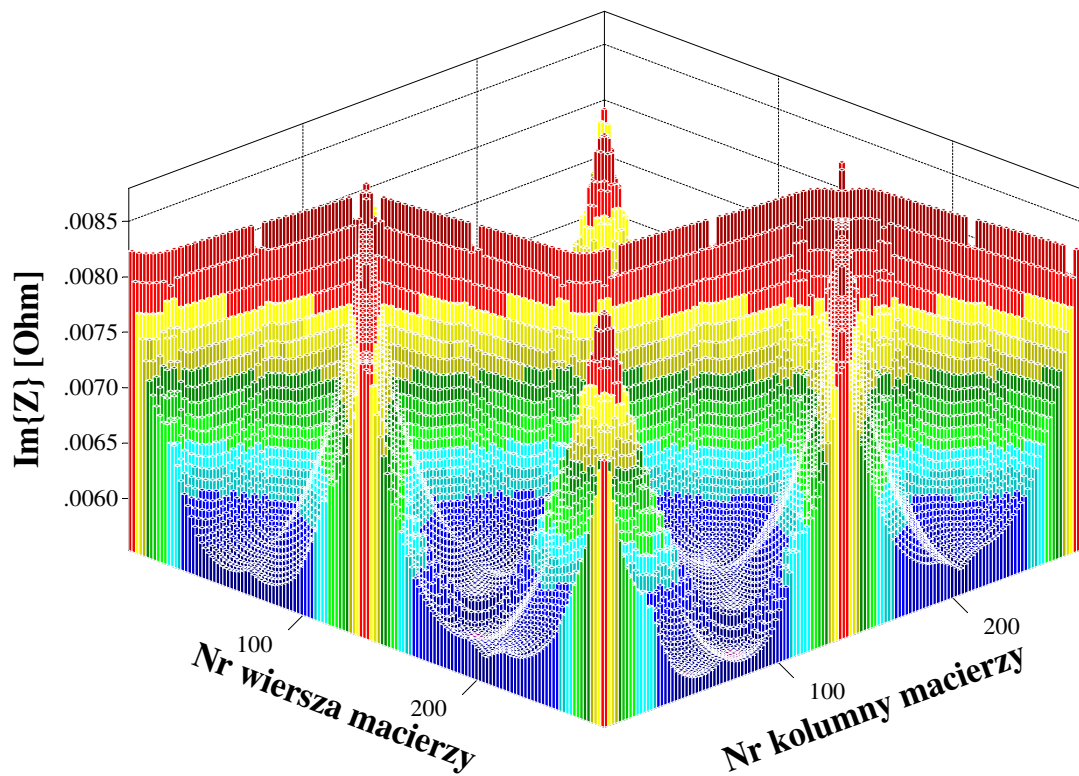
Rys. 5.10 Wypadkowa macierz reaktancji pręta dolnego dla przepłotu typu 0+0+0



Rys. 5.11 Wypadkowa macierz reaktancji pręta górnego dla przepłotu typu 0+0+0



Rys. 5.12 Wypadkowa macierz reaktancji pręta dolnego dla przepłotu typu 90+360+90



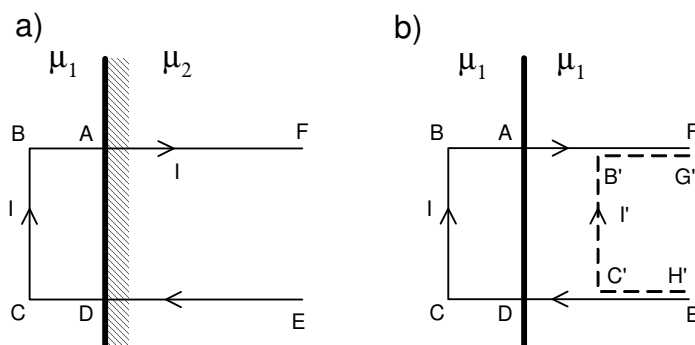
Rys. 5.13 Wypadkowa macierzy reaktancji pręta górnego dla przepłotu typu 0+334+0

5.3. Napięcie indukowane w połączeniach czołowych przewodów elementarnych

Połączenia czołowe uzwojenia stojana turbogenerators znajdują się w strefie strumienia rozproszenia wytwarzanego przez prądy płynące w tych połączeniach [20]. Rozwiązanie pola magnetycznego w strefie czołowej jest trudne ze względu na trójwymiarową strukturę połączeń czołowych i wytwarzanych przez nie pól, a także niesymetryczne usytuowanie części ferromagnetycznych i konstrukcyjnych, skomplikowanego kształtu połączeń czołowych i ich układu. Jednym ze strumieni rozproszonych, w strefie połączeń czołowych, o największej wartości jest strumień tangensjalny skierowany prostopadłe do pręta (boku) zezwoju [20, 41]. Rozkład indukcji od tego strumienia na wysokości pręta (boku) zmienia się wzdłuż połączenia czołowego, indukując napięcia w obszarze każdego przewodu elementarnego pręta w strefie czołowej. Niezrównoważone napięcia połączeń czołowych wymusza przepływ prądów cyrkulacyjnych w tych przewodach. Napięcie to przedstawiono dla k -tego przewodu elementarnego w równaniach macierzowych (5.14) i (5.15), odpowiednio: $\underline{U}_{Ev, TB, k}$ dla pręta górnego i $\underline{U}_{Ev, BB, k}$ dla pręta dolnego. Korzystając z metody Biota – Savarta – Laplace’a [7, 15, 37, 41] i odbić zwierciadlanych [4, 7, 23, 31, 41, 44] można wyznaczyć niezrównoważone napięcia w przewodach elementarnych strefy czołowej danego pręta.

5.3.1. Zastosowanie metody odbić zwierciadlanych

Metodę odbić zwierciadlanych zastosowano do budowy trójwymiarowego modelu geometrycznego uzwojenia strefy czołowej turbogenerators i zamodelowania występującego pola magnetycznego [4, 43, 44]. Analizę metody prowadzono dla jednowarstwowego uzwojenia stojana. Na podstawie uzyskanego modelu wyznaczono uproszczony model dwuwarstwowego uzwojenia stojana turbogenerators w strefie czołowej. Na rysunku 5.14 przedstawiono odbicie zwierciadlane dla zwoju jednowarstwowego uzwojenia stojana umieszczonego częściowo w powietrzu (μ_1) i żelazie (μ_2).

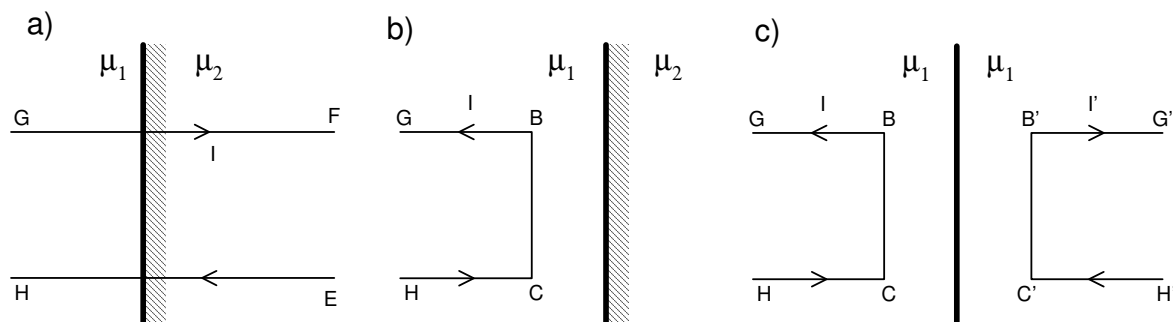


Rys. 5.14 Zastosowanie metody odbić zwierciadlanych dla jednowarstwowego uzwojenia stojana [4, 44]: a) układ zwoju przed zastosowaniem metody odbić zwierciadlanych, b) układ zwoju po zastosowaniu metody odbić zwierciadlanych

Środowisko strefy czołowej uzwojenia reprezentuje przenikalność μ_1 , natomiast strefy żłobkowej przenikalność μ_2 . Stosowanie metody odbić zwierciadlanych wymaga zachowania ciągłości powierzchni granicznej, względem której następuje odbicie. Ponieważ w tym przypadku założono brak szczeliny powietrznej, więc ciągłość powierzchni granicznej jest zachowana. Linia ciągła (rys. 5.14b) przedstawia obwód, w którym płynie prąd I , linia przerywana obwód z prądem I' (5.33):

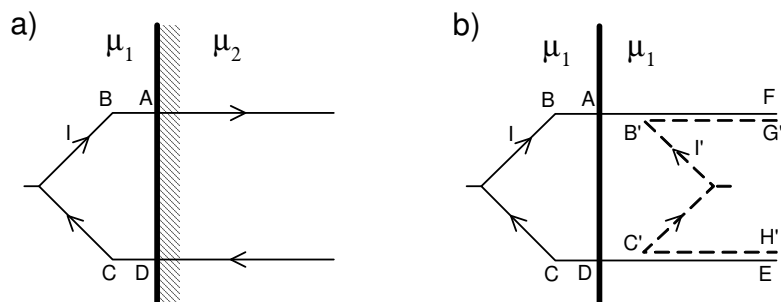
$$I' = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2} I = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} I = m' I \quad (5.33)$$

Przedstawiony na rysunku 5.14b układ zwoju uzyskano, stosując zasadę superpozycji, a następnie metodę odbić zwierciadlanych. Według zasady superpozycji układ z rysunku 5.14a podzielono na dwa cząstkowe obwody (rys. 5.15). Pierwszy zawiera dwa przewody o nieskończonej długości zawierające prąd I . Ponieważ obecność żelaza nie wpływa na pole magnetyczne, więc dla tego przypadku nie zastosowano metody odbić zwierciadlanych. Obecność żelaza wpływa natomiast na pole magnetyczne drugiego układu (rys. 5.15b). Dlatego w celu wyznaczenia tego pola w środowisku μ_1 zastosowano metodę odbić zwierciadlanych uzyskując układ G'B'C'H' (rys. 5.15c).



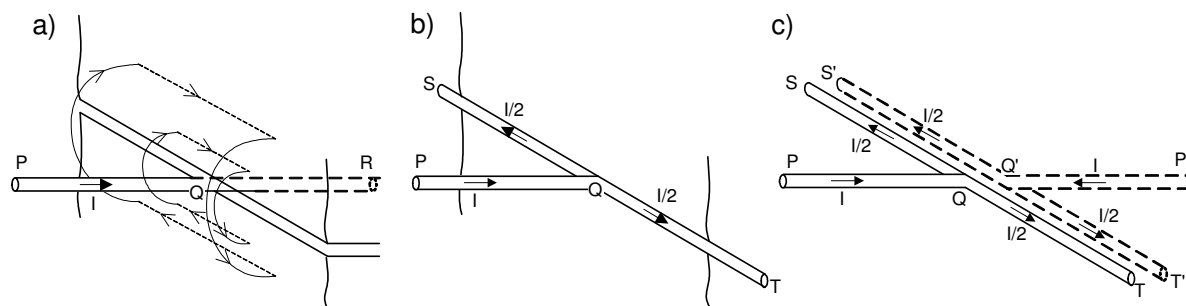
Rys. 5.15 Zasada superpozycji do jednowarstwowego uzwojenia stojana: a) układ obwodu pierwszego, b) układ obwodu drugiego, c) odbicie zwierciadlane dla obwodu drugiego

Na podstawie rysunków 5.15a i 5.15c uzyskano układ przedstawiony na rysunku 5.14b. Jest on ważny wówczas, gdy przenikalność środowiska mieści się w granicach $0 < \mu < \infty$. W identyczny sposób otrzymano obwód dwuwarstwowego uzwojenia stojana (rys 5.16).



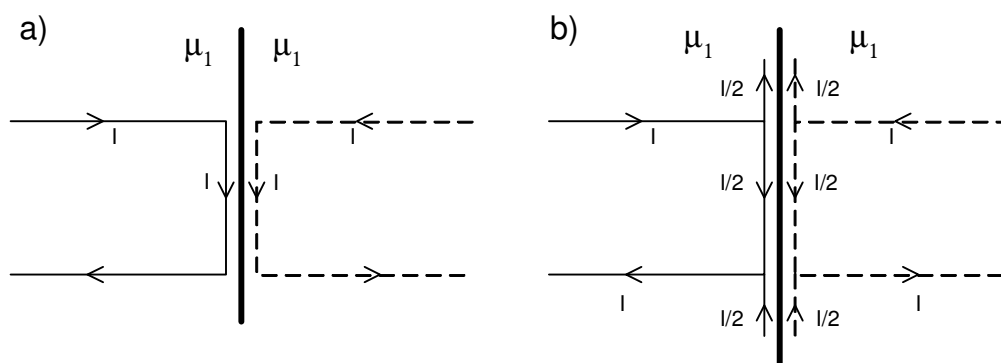
Rys. 5.16 Zastosowanie metody odbić zwierciadlanych do dwuwarstwowego uzwojenia stojana [4, 43, 44]: a) układ zwoju przed zastosowaniem metody odbić zwierciadlanych, b) układ zwoju po zastosowaniu metody odbić zwierciadlanych

Po zastosowaniu zasady superpozycji i metody odbić zwierciadlanych uzyskano model obwodu umożliwiający wyznaczenie pola magnetycznego w środowisku μ_1 od przewodów umieszczonych w pobliżu strefy z żelazem. Model ten nie uwzględnia jeszcze oddziaływania szczeliny powietrznej na rozkład pola magnetycznego. Przebieg linii pola w pobliżu szczeliny przedstawiono na rysunku 5.17a.



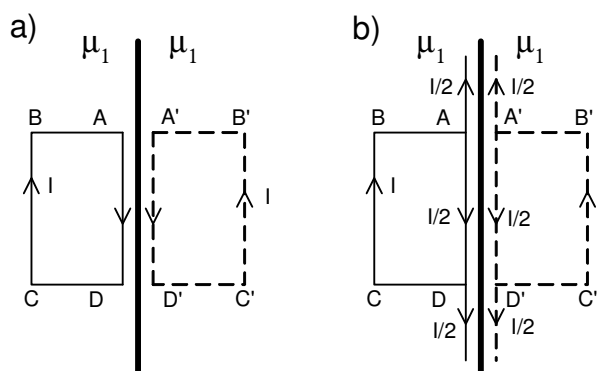
Rys. 5.17 Szczelina powietrzna odzwierciedlona za pomocą przewodnika z prądem [4, 43]:
 a) wpływ szczeliny powietrznej na pole magnetyczne od przewodnika przecinającego powierzchnię dzielącą dwa środowiska, b) obraz przewodnika z prądem odzwierciedlającego szczelinę powietrzną, c) zastosowanie metody odbić zwierciadlanych dla przewodnika zastępującego szczelinę powietrzną

Poza żelazem linie pola magnetycznego tworzą półokręgi, natomiast w żelazie, pole zamyka się po linii o najmniejszej reluktancji. Dlatego oddziaływanie szczeliny powietrznej na pole magnetyczne poza żelazem wyrażono, zastępując szczelinę przewodnikiem z prądem (rys 5.17b). Względem tego przewodnika zastosowano metodę odbić zwierciadlanych (rys. 5.17c), uzyskując obwód przedstawiony na rysunku 5.18.



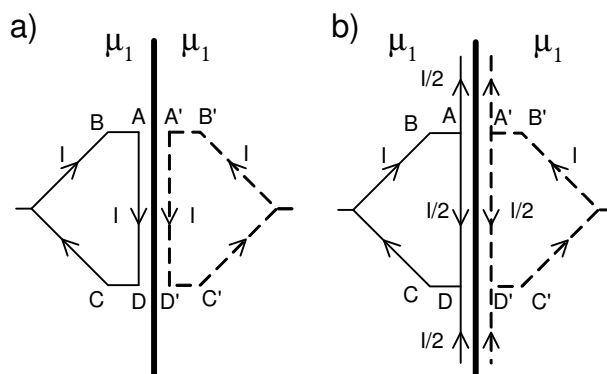
Rys. 5.18 Zastosowanie metody odbić zwierciadlanych dla przewodnika zastępującego szczelinę powietrzną [4]: a) układ zwoju dla maszyny o jednej parze biegunów, b) układ zwoju dla maszyny o liczbie par biegunów większej od jednośc

Na podstawie obwodu z rysunku 5.15c i 5.18a uzyskano model obwodu przedstawiony na rysunku 5.19a.



Rys. 5.19 Model jednowarstwowego uzwojenia stojana strefy czołowej maszyny, uwzględniający szczelinę powietrzną [4, 43, 44]: a) układ zwoju dla maszyny o jednej parze biegunów, b) układ zwoju dla maszyny o liczbie par biegunów większej od jednośc

Tak określony model jednowarstwowego uzwojenia stojana strefy czołowej maszyny umożliwia wyznaczenie pola magnetycznego w środowisku μ_1 . Model dwuwarstwowego uzwojenia stojana wyznaczono w identyczny sposób (rys. 5.20).



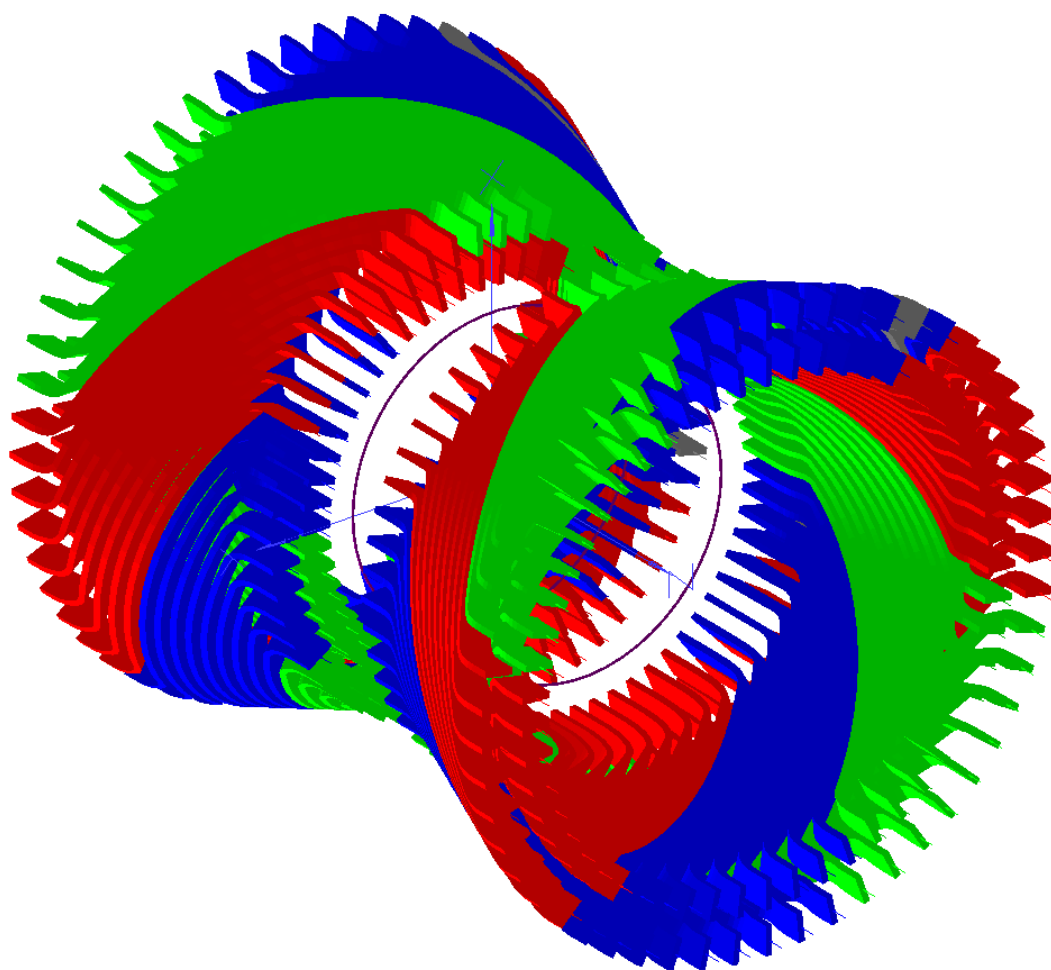
Rys. 5.20 Model dwuwarstwowego uzwojenia stojana strefy czołowej maszyny, uwzględniający szczelinę powietrzną [4, 43, 44]: a) układ zwoju dla maszyny o jednej parze biegunów, b) układ zwoju dla maszyny o liczbie par biegunów większej od jednośi

5.3.2. Trójwymiarowy model geometryczny strefy czołowej uzwojenia stojana i wirnika turbogeneratora

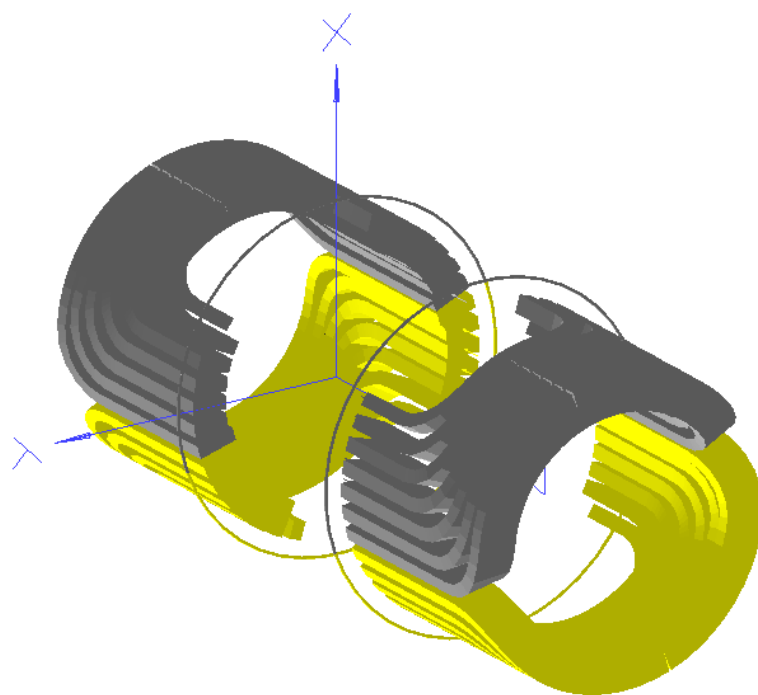
Trójwymiarowy model geometryczny uzwojenia stojana i wirnika w strefie czołowej turbogeneratora wyznaczono metodą odbić zwierciadlanych (rys. 5.20a). Na podstawie tej metody, korzystając z programu Bar, można obliczyć rozkład pola magnetycznego w obszarze danego pręta uzwojenia stojana. Na rysunku 5.21 przedstawiono przykładowy model połączeń czołowych uzwojenia stojana badanego turbogeneratora. W modelu tym przewodnik w kolorze brązowym reprezentuje oddziaływanie szczeliny powietrznej na rozkład pola magnetycznego w strefie czołowej maszyny. Przewodnik jest umieszczony na powierzchni rdzenia, którą określono jako płaszczyznę o zerowej współrzędnej w kierunku osi z .

Zgodnie z metodą odbić zwierciadlanych (rys. 5.20a) dla każdego zwoju maszyny powinien zostać określony przewodnik zastępujący oddziaływanie szczeliny powietrznej na rozkład pola magnetycznego. Prąd przepływający w takim przewodniku odpowiadałby prądowi zwoju. W zaprezentowanym modelu (rys. 5.21 i 5.22) zastąpiono wszystkie przewody jednym, podzielonym na 54 odcinki przewodzące prąd (liczba odcinków odpowiada liczbie żłobków stojana). Jego wartość obliczono jako sumę prądów od przewodników, jakie zastępuje dany odcinek.

Na rysunku 5.22 przedstawiono model połączeń czołowych uzwojenia wirnika badanego turbogeneratora.

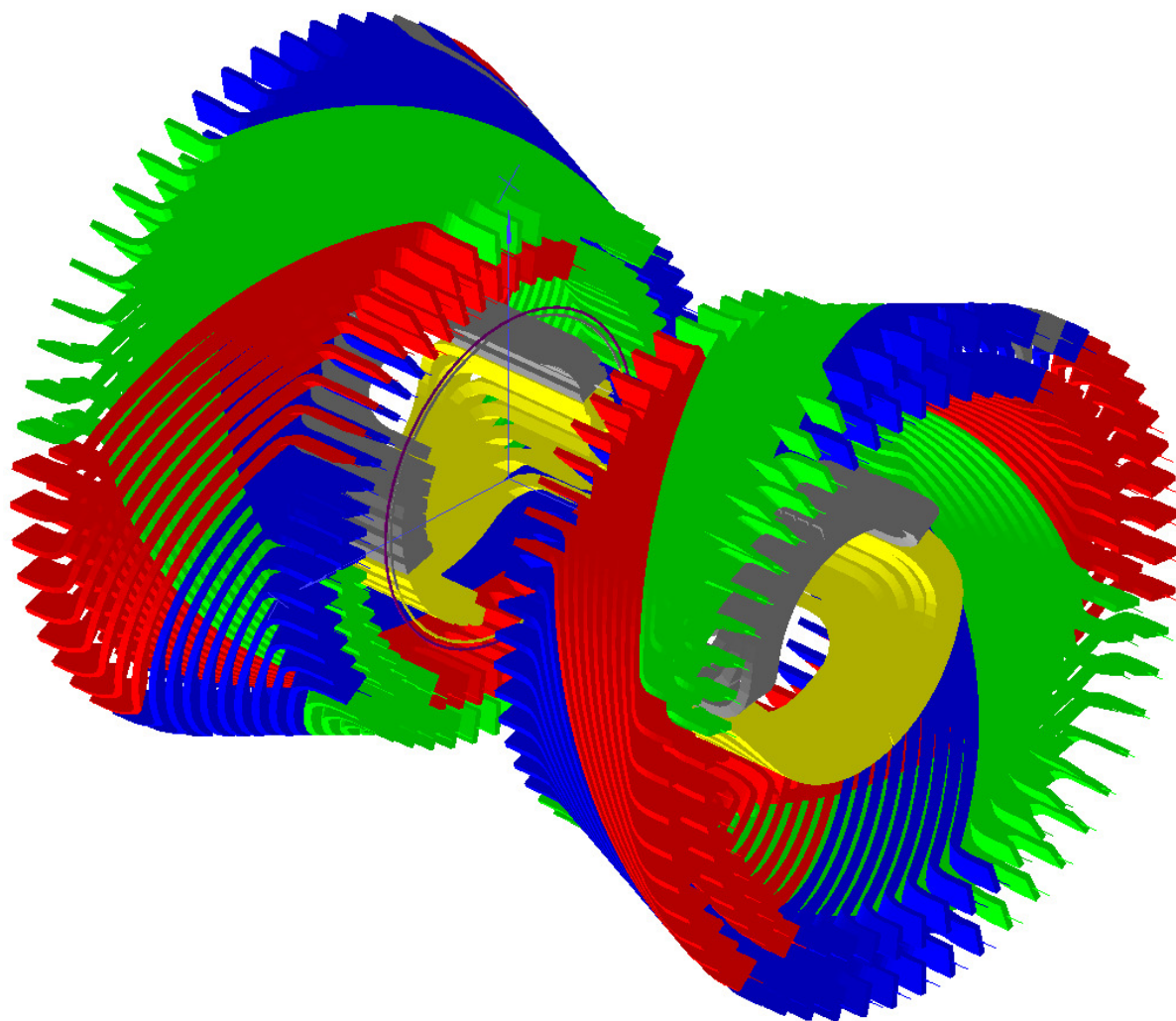


Rys. 5.21 Trójwymiarowy model geometryczny uzwojenia stojana w strefie czołowej turbogeneratora



Rys. 5.22 Przestrzenny model geometryczny uzwojenia wirnika w strefie czołowej turbogeneratora

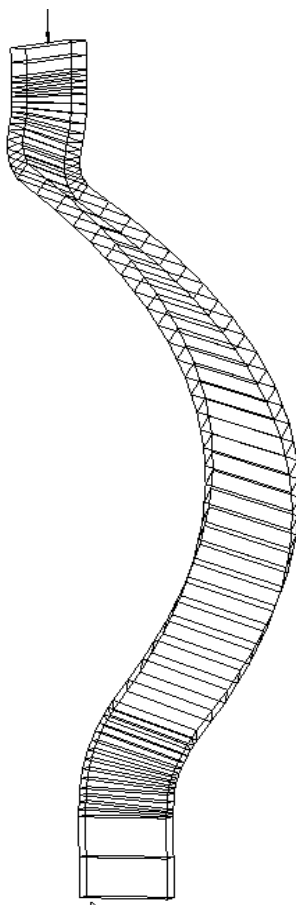
Model połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika z dwoma przewodnikami reprezentującymi oddziaływanie szczeliny powietrznej na rozkład pola magnetycznego w strefie czołowej maszyny przedstawiono na rysunku 5.23.



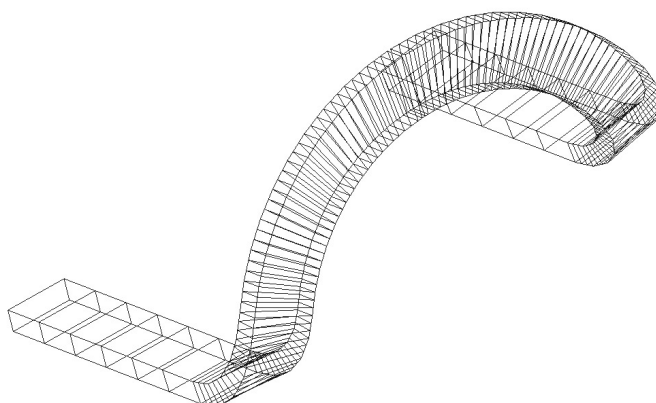
Rys. 5.23 Przestrzenny model geometryczny uzwojenia stojana i wirnika w strefie czołowej turbogenerators

5.3.3. Zastosowanie metody Biota – Savarta – Laplace’a

Metodę Biota – Savarta – Laplace’a [7, 15, 41] zastosowano do wyznaczenia przestrzennego wektora indukcji obcej od pozostałych prętów uzwojenia stojana i wirnika w strefie połączeń czołowych maszyny. Przez podzielenie uzwojenia w strefie czołowej na małe segmenty o kształcie prostopadłościanu (rys. 5.24 i 5.25) odzwierciedlono zarówno geometrie pręta stojana o profilu ewolwenty, jak i geometrię pręta wirnika [41]. Następnie metodą Biota – Savarta – Laplace’a, wyznaczono przestrzenny wektor indukcji magnetycznej w dowolnym punkcie strefy czołowej uzwojenia od każdego z tych segmentów (rys. 5.26).



Rys. 5.24 Podział pręta uzwojenia stojana w strefie czołowej na prostopadłościennie segmenty



Rys. 5.25 Podział pręta uzwojenia wirnika w strefie czołowej na prostopadłościennie segmenty

Wektor indukcji magnetycznej w punkcie P określono równaniem [41]:

$$B(P) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{J(Q)dV}{r_{PQ}^2} \times \vec{e}_{PQ} \quad (5.34)$$

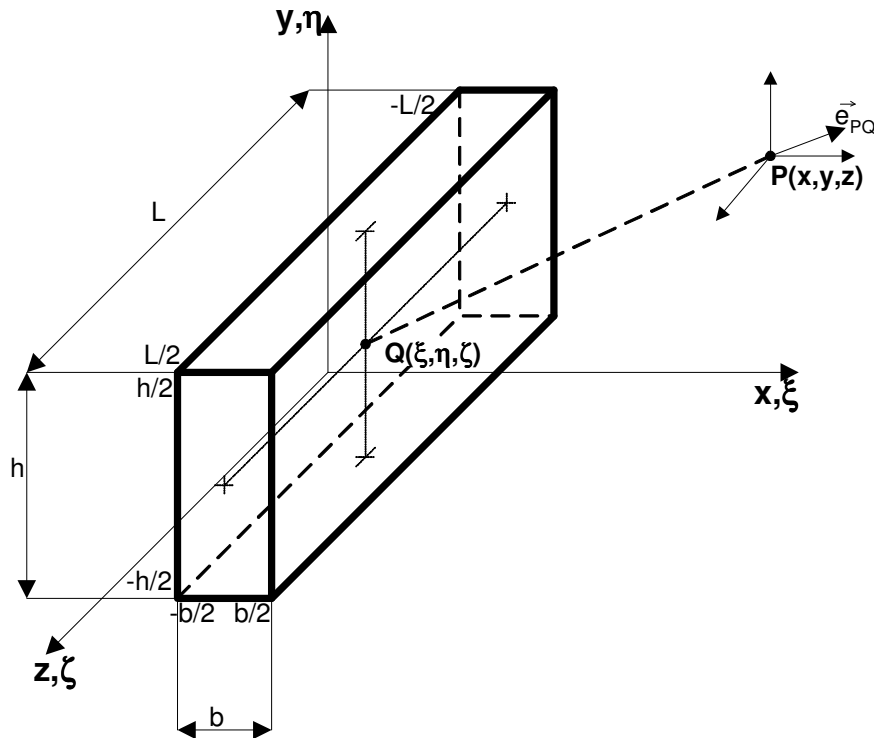
$$\vec{e}_{PQ} = \frac{P-Q}{|P-Q|} \quad (5.35)$$

Składowe wektora indukcji $B = (B_x, B_y, 0)$ w punkcie $P(x, y, z)$ od prostopadłościennego segmentu (rys. 5.26) o współrzędnych środka $Q(\xi, \eta, \zeta)$ obliczono z równań [41]:

$$B_x(x, y, z) = -\frac{\mu I}{4\pi bh} \int_{-l/2}^{l/2} d\zeta \int_{-b/2}^{b/2} d\xi \int_{-h/2}^{h/2} \frac{y - \eta}{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} d\eta \quad (5.36)$$

$$B_y(x, y, z) = \frac{\mu I}{4\pi bh} \int_{-l/2}^{l/2} d\zeta \int_{-b/2}^{b/2} d\xi \int_{-h/2}^{h/2} \frac{x - \eta}{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{3/2}} d\xi \quad (5.37)$$

Wypadkowy wektor indukcji magnetycznej w danym punkcie strefy czołowej obliczono, sumując cząstkowe wektory indukcji w tym punkcie od poszczególnych prostopadłościaków podzielonego pręta uzwojenia stojana turbogeneratora.

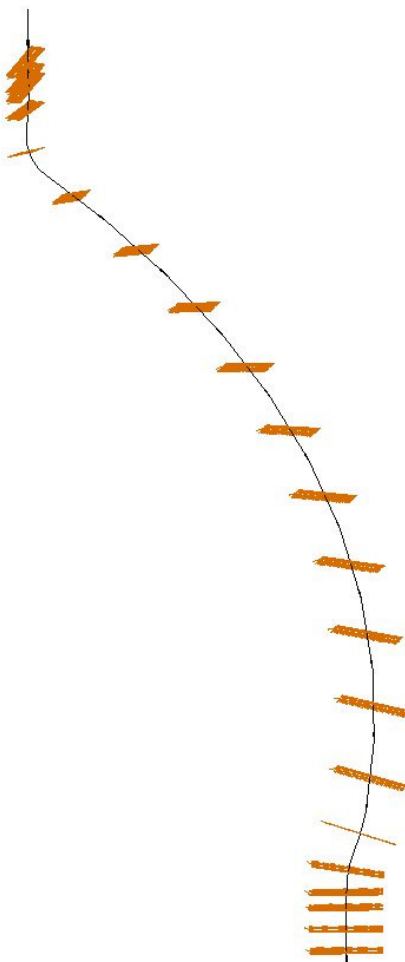


Rys. 5.26 Układ geometryczny prostopadłościennego segmentu pręta o środku w punkcie Q

5.3.4. Wzajemne oddziaływanie prętów – definicja siatki dyskretyzacyjnej

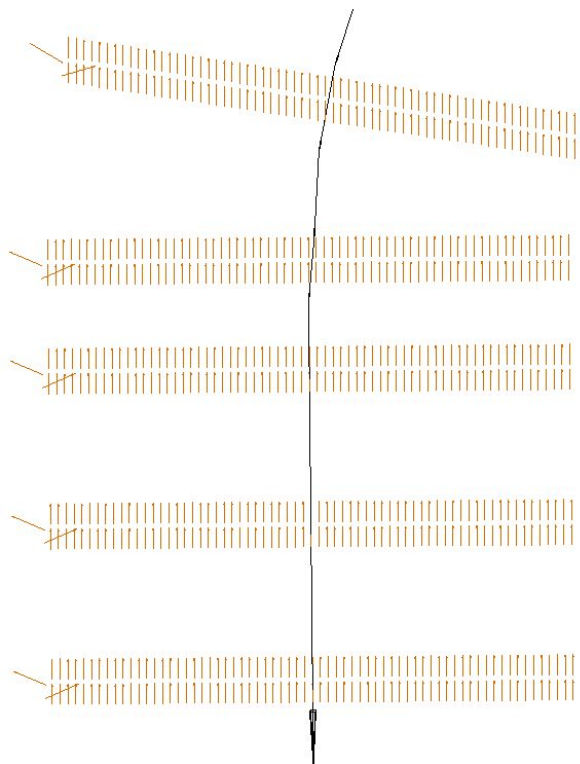
W celu wyznaczenia strumienia magnetycznego w danym pręcie uzwojenia stojana od wzajemnego oddziaływania strefy czołowej zdefiniowano siatkę punktów w obszarze obliczanego pręta. Następnie dla każdego punktu siatki obliczono metodą Biota – Savarta – Laplace’a przestrzenny wektor indukcji magnetycznej. Siatkę punktów utworzono przez podzielenie pręta w strefie czołowej na tzw. obszary będące jego przekrojem poprzecznym.

Na płaszczyźnie każdego obszaru zdefiniowano punkty stanowiące siatkę. Pręt uzwojenia, dla którego wykonuje się obliczenia musi być „wyłączony” z tych obliczeń. Liczba punktów dla każdego obszaru równa jest liczbie przewodów elementarnych w pręcie. Punkty te rozmieszczone są w dwóch lub czterech kolumnach, w zależności od liczby kolumn przewodów elementarnych. Na rysunku 5.27 pokazano linię środkową strefy czołowej pręta uzwojenia stojana turbogeneratora oraz przykładowe obszary na płaszczyźnie z punktami do wyznaczenia wektorów indukcji magnetycznej.



Rys. 5.27 Podział pręta na obszary stanowiące jego płaszczyzny przekroju

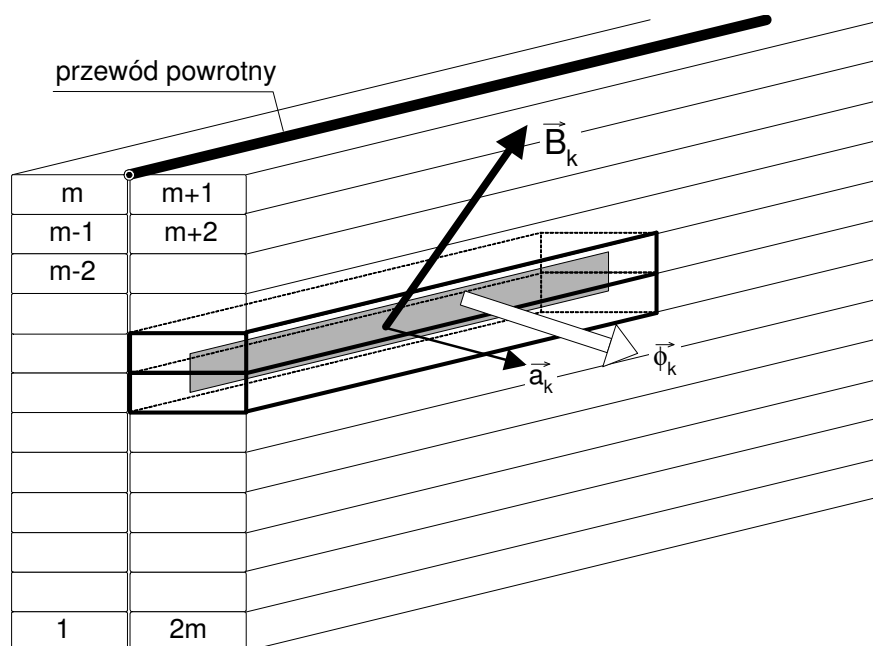
Dla wszystkich punktów każdego obszaru (przekroju poprzecznego) zdefiniowano ponadto wektory jednostkowe o kierunku stycznym do płaszczyzny przekroju pręta, tzn. wektory prostopadłe do boku pręta uzwojenia (rys 5.28).



Rys. 5.28 Obraz wektorów jednostkowych o kierunku stycznym do płaszczyzn przekroju

5.3.5. Napięcie indukowane w strefie czołowej pręta

W celu wyznaczenia napięcia indukowanego w strefie czołowej pręta od strumieni sprzężenia wzajemnego pozostałych prętów uzwojenia zakłada się „umowny przewód powrotny” [15], względem którego obliczane jest napięcie indukowane w przewodach elementarnych (rys. 5.29). Przewód powrotny umieszczono u góry pręta wzdłuż linii strefy czołowej pręta.



Rys. 5.29 Strumień tangensjalny skojarzony z k -tym przewodem elementarnym

Metodą Biota – Savarta – Laplace’a wyznaczono wypadkowe wektory indukcji magnetycznej \vec{B}_k we wszystkich punktach siatki (rys. 5.29), a następnie jego składową tangensjalną (składową prostopadłą do boku pręta) [15].

Strumień magnetyczny indukujący napięcie w każdym przewodzie elementarnym strefy czołowej pręta wyznaczono jako iloczyn składowej tangensjalnej indukcji magnetycznej i powierzchni, którą ona przecina (5.38).

$$\phi_k = \vec{B}_k \cdot \vec{a}_k \quad (5.38)$$

Strumień magnetyczny skojarzony z obliczanym k -tym przewodem elementarnym, wyznaczono:

dla lewej kolumny przewodów elementarnych

$$\phi_{k,r} = \sum_{j=k}^m \phi_j \quad \text{dla } k \leq m \quad (5.39)$$

dla prawej kolumny przewodów elementarnych

$$\phi_{k,r} = \sum_{j=m+1}^k \phi_j \quad \text{dla } k \geq m \quad (5.40)$$

natomiast napięcie indukowane w dowolnym k -tym przewodzie elementarnym opisano równaniem (5.41):

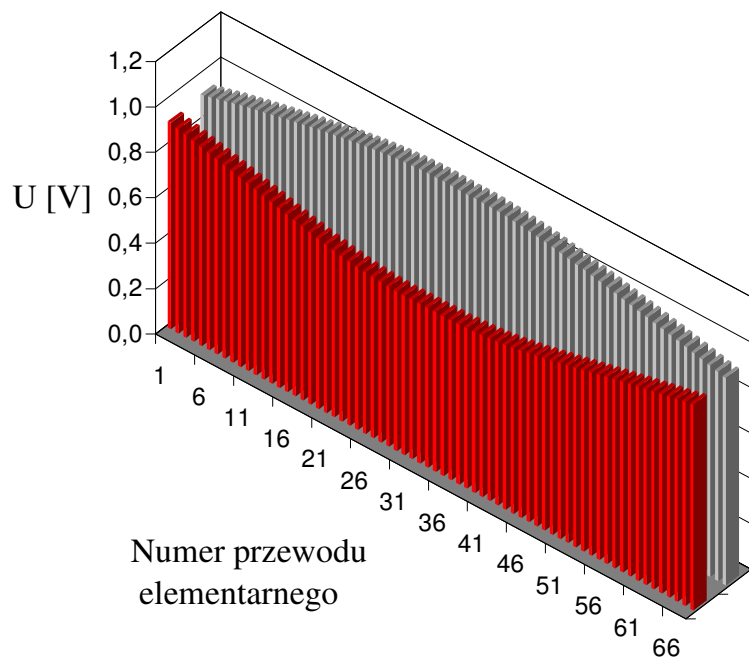
$$\underline{U}_{Ev,k} = j\omega\phi_{k,r} \quad (5.41)$$

Odpowiada ono napięciom: $U_{Ev,CS,TB,k}$, $U_{Ev,CS,BB,k}$, $U_{Ev,NC,TB,k}$, $U_{Ev,NC,BB,k}$, przedstawionym na schemacie zastępczym pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana (rys. 5.5).

5.3.6. Wyniki obliczeń napięć indukowanych w przewodach elementarnych

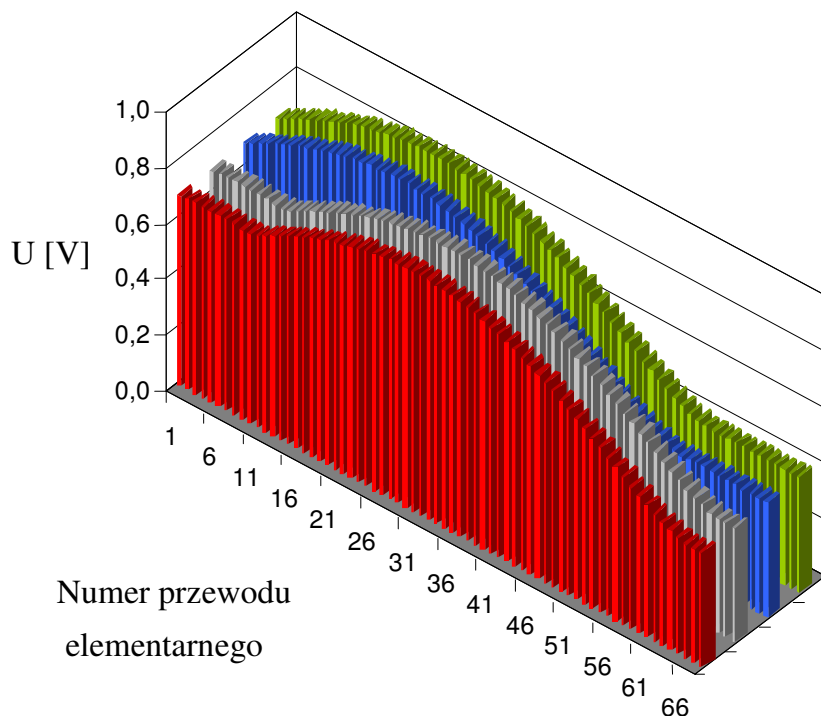
Na podstawie przedstawionego modelu obliczono napięcia indukowane w przewodach elementarnych pręta górnego i dolnego w strefie czołowej uzwojenia stojana turbogeneratorsa. Napięcia te indukowane są od strumieni sprzężenia wzajemnego przewodów elementarnych innych prętów uzwojenia stojana oraz od uzwojenia wirnika. Napięcia wyznaczono dla przeplotu Roebela typu 90+360+90 dla pręta dolnego i typu 0+334+0 dla pręta górnego.

Na rysunku 5.30 przedstawiono wykres napięć indukowanych w przewodach elementarnych strefy czołowej pręta dolnego. Na osi odciętych opisano liczbę przewodów elementarnych, które ułożone są w dwóch kolumnach. Liczba punktów siatki dyskretyzacyjnej w obszarze pręta dolnego dla strefy czołowej maszyny wynosi 5000, natomiast pręta górnego 10 000.



Rys. 5.30 Wykres napięć indukowanych w przewodach elementarnych strefy czołowej pręta warstwy dolnej (przeplotu typu 90+360+90)

Na rysunku 5.31 przedstawiono wykres napięć indukowanych w przewodach elementarnych strefy czołowej pręta górnego. Na wykresie tym przewody elementarne ułożone są w czterech kolumnach.



Rys. 5.31 Wykres napięć indukowanych w przewodach elementarnych strefy czołowej pręta warstwy górnej (przeplotu typu 0+334+0)

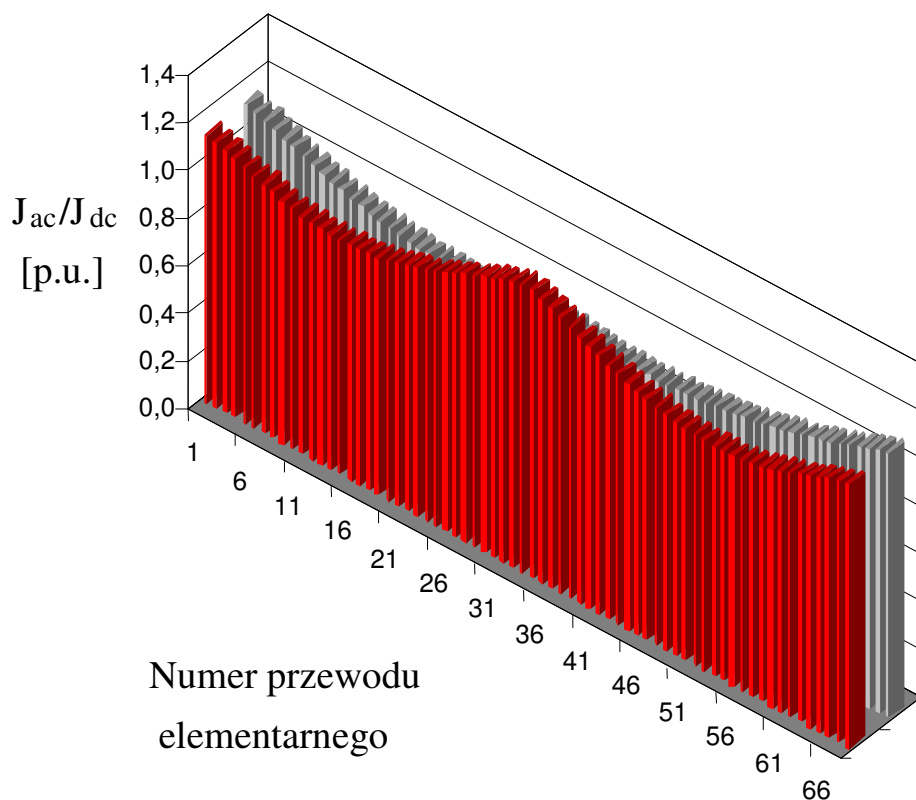
5.4. Rozkład gęstości prądu w pręcie uzwojenia stojana

Na podstawie opracowanego modelu matematycznego obliczono rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta warstwy dolnej i górnej uzwojenia stojana turbogeneratora (obliczenia wykonano za pomocą programu Bar). Na prezentowanych wykresach przyjęto następujące oznaczenia:

- J_{ac} – gęstość prądu dla prądów cyrkulacyjnych (różna wartość prądu w każdym przewodzie elementarnym),
- J_{dc} – gęstość prądu przy braku prądów cyrkulacyjnych (jednakowa wartość prądu w każdym przewodzie elementarnym).

5.4.1. Rozkład gęstości prądu w przewodach elementarnych pręta warstwy dolnej

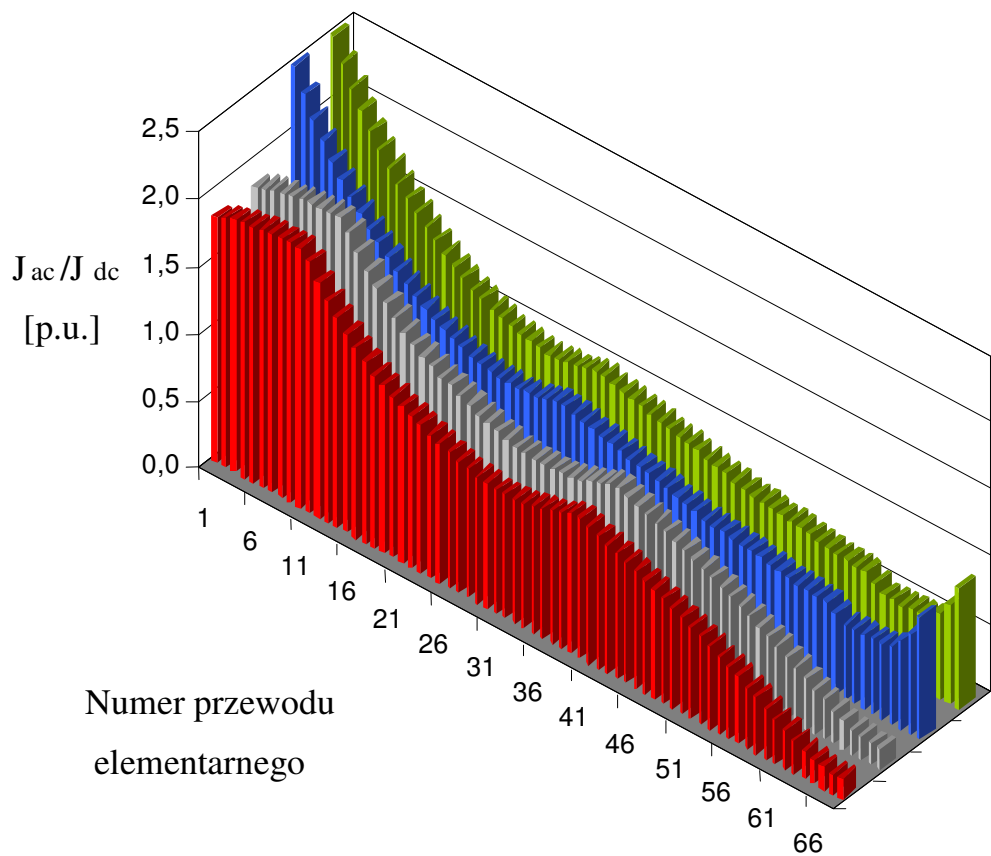
Rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta warstwy górnej przedstawiono dla dwóch kolumn przewodów elementarnych (rys. 5.32).



Rys. 5.32 Gęstość prądu w przewodach elementarnych warstwy dolnej pręta (przeplot typu 90+360+90)

5.4.2. Rozkład gęstości prądu w przewodach elementarnych pręta warstwy górnej

Rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta warstwy górnej przedstawiono dla czterech kolumn przewodów elementarnych w pręcie (rys. 5.33).



Rys. 5.33 Gęstość prądu w przewodach elementarnych warstwy górnej pręta (przeplot typu 0+334+0)

6. STRATY MOCY

6.1. Strat mocy w strefie żłobkowej uzwojenia stojana

6.1.1. Podział strat

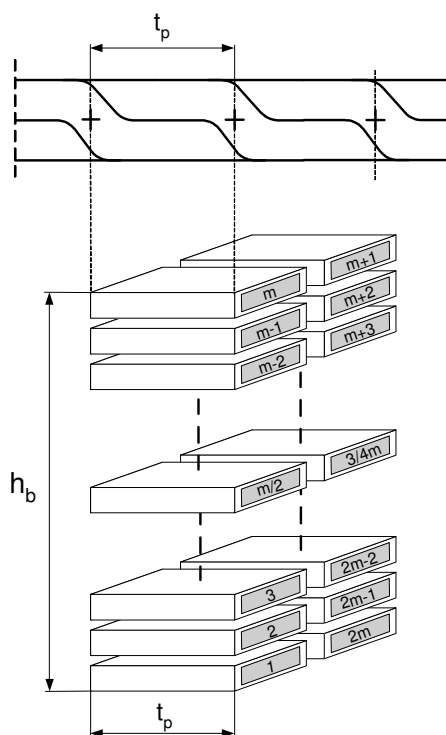
W części żłobkowej uzwojenia stojana sumaryczne straty można określić zależnością [22]:

$$P_t = P_b + P_{cc} + P_{ec} + P_{rf} \quad (6.1)$$

gdzie:

- P_b – straty podstawowe w pręcie, od równomiernej gęstości prądu [20],
- P_{cc} – straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w pręcie [9, 15, 20],
- P_{ec} – straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta w żłobku [20, 42, 44],
- P_{rf} – straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem głównym równoległym do boku pręta w żłobku (strumień podłużny) [36].

Do wyznaczenia poszczególnych strat w pręcie z przeplotem przewodów elementarnych podzielono go wzdłuż długości strefy żłobkowej na „słupki przewodów elementarnych” (rys. 6.1).



Rys. 6.1 Podział pręta na słupki przewodów elementarnych (t_p – podziałka transpozycji, h_b – wysokość pręta, m – liczba przewodów elementarnych w kolumnie)

Długość każdego słupka odpowiada podziałce transpozycji pręta (t_p). Na podstawie rozplywu prądów w przewodach elementarnych obliczono straty podstawowe i dodatkowe na długości każdego słupka, uzyskując rozkład strat wzdłuż wysokości pręta. Straty całkowite w strefie żłobkowej pręta obliczono jako sumę strat w poszczególnych przewodach elementarnych każdego słupka:

$$P_t = \sum_{k=1}^w \left(\sum_{i=1}^n P_{t(i,k)} \right) \quad (6.2)$$

gdzie:

- w – liczba słupków na jakie podzielono pręt danej warstwy,
- n – liczba przewodów elementarnych w pręcie danej warstwy,
- $P_{t(i,k)}$ – straty całkowite w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka

Straty całkowite w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka wynoszą:

$$P_{t(i,k)} = P_{bcc(i,k)} + P_{ec(i,k)} + P_{rf(i,k)} \quad (6.3)$$

gdzie:

- $P_{bcc(i,k)}$ – straty podstawowe oraz straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka,
- $P_{ec(i,k)}$ – straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku (wysokości) i -tego przewodu elementarnego k -tego słupka,
- $P_{rf(i,k)}$ – straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia równoległym do boku (wysokości) i -tego przewodu elementarnego k -tego słupka.

6.1.2. Straty podstawowe w pręcie

Rezystywność materiału jest funkcją temperatury według zależności [22]:

$$\rho_{\vartheta} = \rho_0 [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (6.4)$$

gdzie:

- ρ_{ϑ} – rezystywność w temperaturze ϑ ,
- ρ_0 – rezystywność w temperaturze ϑ_0 ,
- α – cieplny współczynnik zmiany rezystywności [22]

Dla $\vartheta_0 = 0$ °C, straty podstawowe w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka w temperaturze ϑ wyrażono jako [22]:

$$P_{b(i,k)} = I_{DC}^2 \frac{\rho_0 t_p}{h b} \frac{K + \vartheta}{K} \quad (6.5)$$

gdzie:

- I_{DC} – średni prąd przewodu elementarnego przy równomiernym rozkładzie gęstości prądu w pręcie,
- t_p – długość podziałki transpozycji,
- h – wysokość przewodu elementarnego,
- b – szerokość przewodu elementarnego,
- ρ_0 – rezystywność w temperaturze ϑ_0 ,
- K – stała dla miedzi $K = 235$,
- ϑ – temperatura przewodu elementarnego, [°C].

6.1.3. Straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w pręcie

Prądy cyrkulacyjne powodują nierównomierny rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta. Straty mocy od tych prądów wyznaczono za pomocą współczynnika strat od prądów cyrkulacyjnych k_{CCL} .

Współczynnik k_{CCL} zależy od zastosowanego przepłotu Roebela i został wyznaczony w pracy oddzielnie dla pręta warstwy dolnej i górnej turbogeneratorsa. Współczynnik ten jest zawsze większy od jedności, a jego wartość określa skuteczność zastosowanego przepłotu w zmniejszaniu prądów cyrkulacyjnych [9, 12]:

$$k_{CCL} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|I_i|}{I_{DC}} \right)^2 \quad (6.6)$$

$$I_{DC} = \frac{1}{n} |I_n| \quad (6.7)$$

gdzie:

- k_{CCL} – współczynnik strat wywołany prądami cyrkulacyjnymi,
- I_i – prąd i -tego przewodu elementarnego,
- I_n – prąd znamionowy pręta.

Straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych w pręcie danej warstwy określono:

$$P_{cc} = P_b (k_{CCL} - 1) \quad (6.8)$$

Straty od prądów cyrkulacyjnych w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka $P_{bcc(i,k)}$ wyznaczono razem ze stratami podstawowymi na podstawie prądu w tym przewodzie $I_{(i,k)}$.

$$P_{bcc(i,k)} = I_{(i,k)}^2 \frac{\rho_0 t_p}{h b} \frac{K + \vartheta}{K} \quad (6.9)$$

6.1.4. Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia

Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do bobku pręta można wyznaczyć za pomocą współczynnika wzrostu rezystancji zwanego współczynnikiem Fielda k_r , [15, 22, 42, 44]. Strumień rozproszenia skierowany prostopadle do boku pręta wywołuje przepływ prądów wirowych zamykających się w strefie żłobkowej uzwojenia. Współczynnik Fielda p -tej warstwy przewodów elementarnych, uwzględniający zwiększenie strat wskutek wypierania prądu w przewodach, dla prądu przemiennego wynosi [22]:

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + p(p-1)\psi(\xi) \quad (6.10)$$

gdzie:

- ξ – zredukowana wysokość pręta [22, 42, 44]

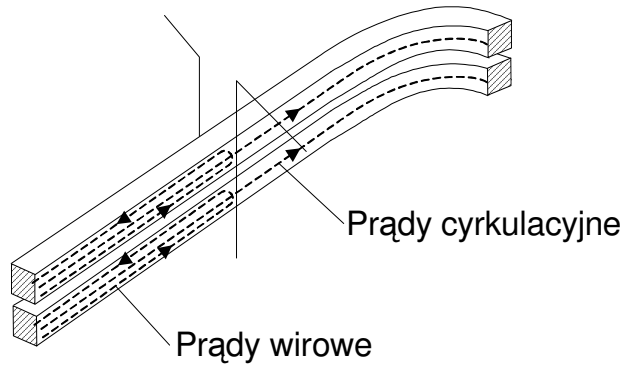
$$\varphi(\xi) = \xi \frac{sh(2\xi) + \sin(2\xi)}{ch(2\xi) - \cos(2\xi)} \quad (6.11)$$

$$\psi(\xi) = 2\xi \frac{sh(\xi) - \sin(\xi)}{ch(\xi) + \cos(\xi)} \quad (6.12)$$

Dla m warstw przewodów elementarnych na wysokości żłobka wartość średnia współczynnika Fielda wynosi [15, 22]:

$$k_r = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi) \quad (6.13)$$

Ponieważ przewody elementarne w uzwojeniu stojana są połączone równoległe, więc oprócz prądów wirowych mogą się pojawić także prądy cyrkulacyjne (rys. 6.2). Prądy te zamykają się przez sąsiednie przewody elementarne, płynąc zarówno w części żłobkowej, jak i czołowej maszyny. Wyrażenie (6.13) określające współczynnik wzrostu rezystancji nie uwzględnia przepływu prądów cyrkulacyjnych wywołanych strumieniem rozproszenia żłobkowego i czołowego.



Rys. 6.2 Prądy wirowe i cyrkulacyjne w przecie uzwojenia

Dlatego, jeżeli w poszczególnych warstwach żłobka przepływają prądy o różnej wartości i różnym przesunięciu fazowym, to współczynnik wzrostu rezystancji (6.13) p -tej warstwy przewodów elementarnych wyniesie według Emdego [44]:

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + \frac{I_u^2 + I_p I_u \cos \gamma}{I_p^2} \psi(\xi) \quad (6.14)$$

gdzie:

- I_p – sumaryczny przepływ rozpatrywanej p -tej warstwy przewodów,
- I_u – sumaryczny przepływ pod tą warstwą do dna żłobka,
- γ – kąt przesunięcia fazowego między I_p i I_u .

Po przekształceniu, wyrażenie (6.14) ma postać:

$$k_{rp} = \varphi(\xi) + \frac{I_{wR}^2 + I_{wI}^2 - I_{wR} I_{pR} - I_{wI} I_{pI}}{I_p I_p^*} \psi(\xi) \quad (6.15)$$

gdzie:

$$I_{pR} = \text{Re}\{I_p\}; I_{pI} = \text{Im}\{I_p\}$$

\underline{I}_w – sumaryczny przepływ od dna żłobka do rozpatrywanej p -tej warstwy.

$$\underline{I}_w = \sum_{i=1}^p \underline{I}_i \quad I_{wR} = \operatorname{Re}\{\underline{I}_w\}; I_{wI} = \operatorname{Im}\{\underline{I}_w\}$$

Wyznaczając współczynnik wzrostu rezystancji (6.15) dla poszczególnych warstw pręta, można obliczyć straty od prądów wirowych w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka:

$$P_{ec(i,k)} = P_{bcc(i,k)} (k_{r(i,k)} - 1) \quad (6.16)$$

gdzie:

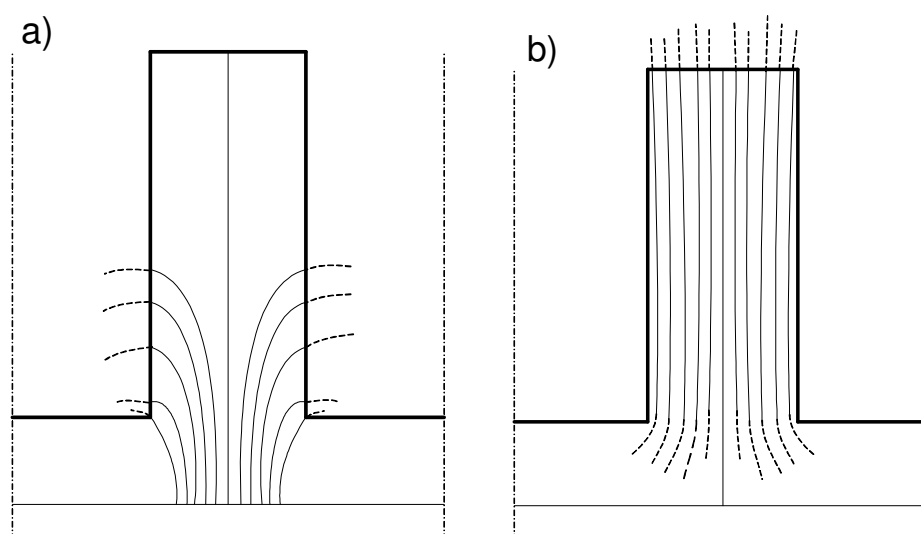
$k_{r(i,k)}$ - współczynnik wzrostu rezystancji w i -tym przewodzie elementarnym k -tego słupka.

Straty dodatkowe (P_{ec}) od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do bobku pręta w strefie żłobkowej uzwojenia są sumą strat dodatkowych poszczególnych przewodów elementarnych ($P_{ec(i,k)}$):

$$P_{ec} = \sum_{k=1}^w \left(\sum_{i=1}^n P_{ec(i,k)} \right) \quad (6.17)$$

6.1.5. Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem głównym

W pracy wyznaczono straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych podłużnym strumieniem magnetycznym (strumień główny) skierowanym promieniowo do pręta uzwojenia stojana w żłobku [38]. Strumień ten przedstawiono na rysunku 6.3 w postaci dwóch składowych. W wyniku jego oddziaływania powstają prądy wirowe w poszczególnych przewodach elementarnych pręta, powodując straty mocy. Największa wartość strat występuje w najwyższych położonych przewodach elementarnych pręta warstwy górnej.



Rys. 6.3 Obraz linii pola magnetycznego [38] : a) składowa strumienia wchodząca do żłobka, b) składowa strumienia wynikająca z nasycenia zęba

Strumień wnikający do żłobka, przedstawiony na rysunku 6.3a wyznaczono za pomocą metody *Conformal mapping* [38]. Według tej metody wartość indukcji magnetycznej w żłobku, przedstawionym w prostokątnym układzie współrzędnych (rys. 6.4), można wyrazić równaniami [38]:

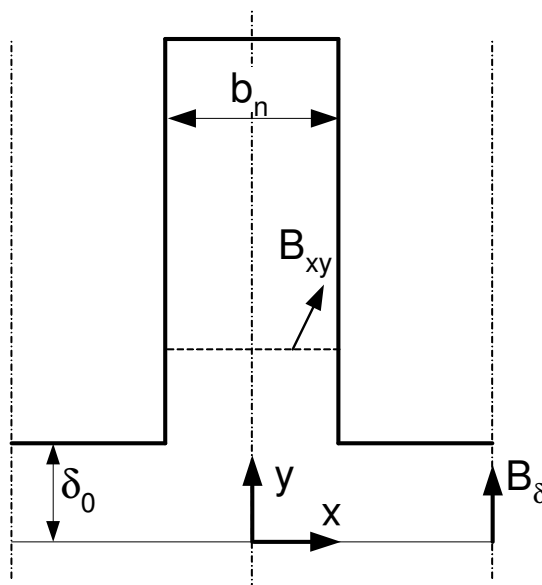
$$B_{N1}(x, y) = \frac{B_{\min}}{\cosh\left[\frac{(\pi y - 2\delta_0\alpha)}{b_n}\right]} \cos\left(\frac{\pi x}{b_n}\right) \quad (6.18)$$

$$B_{\min} = \frac{B_{\delta}}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_n}{2\delta_0}\right)^2}} \quad (6.19)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2\delta_0}{b_n}\right) \quad (6.20)$$

gdzie:

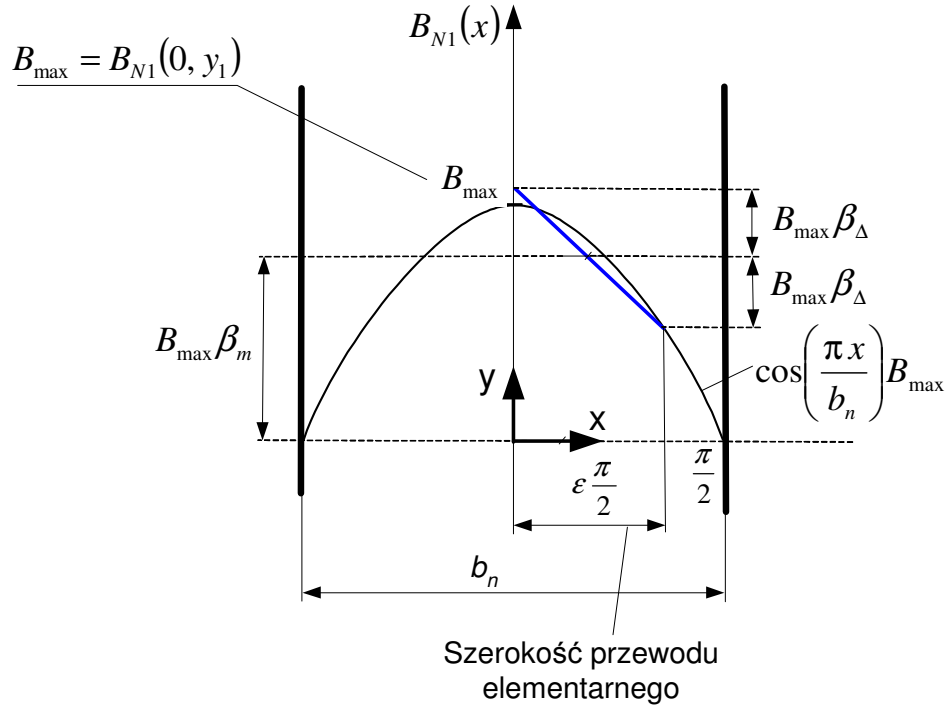
- B_{δ} – indukcja w szczelinie powietrznej,
- b_n – szerokość żłobka,
- δ_0 – szerokość szczeliny powietrznej.



Rys. 6.4 Schemat żłobka w prostokątnym układzie współrzędnych [38]

Rozkład strumienia w żłobku w kierunku osi x ma przebieg funkcji $\cos\left(\frac{\pi x}{b_n}\right)$.

W obliczeniach uproszczono ten rozkład i przyjęto liniową zależność na szerokości przewodu elementarnego (rys 6.5) [43].



Rys. 6.5 Uproszczony rozkład strumienia w żłobku w kierunku osi x

Strumień wnikający do żłobka przedstawiony na rysunku 6.3b wyznaczono na podstawie charakterystyki magnesowania:

$$B_{N2}(y, t) = \mu_0 H_z(y, t) \quad (6.21)$$

gdzie:

H_z – natężenie pola magnetycznego w zębie,

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

Straty mocy na długości przewodu elementarnego określono wyrażeniami [43] :

$$P_0 = \frac{1}{24} \frac{\omega^2 B_0^2 b^2}{\rho} l b h \quad (6.22)$$

$$P_E = \frac{1}{360} \frac{\omega^2 B_E^2 b^2}{\rho} l b h \quad (6.23)$$

gdzie:

$$B_0 = B_{N1}(0, y) \beta_m + B_{N2}(y)$$

$$B_E = B_{N1}(0, y) \beta_{\Delta}$$

l – długość przewodu elementarnego,

Dla i -tego przewodu elementarnego w k -tym słupku straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych podłużnym strumieniem magnetycznym skierowanym promieniowo do pręta uzwojenia stojana w żłobku wynoszą:

$$P_{f(i,k)} = P_{0(i,k)} + P_{E(i,k)} \quad (6.24)$$

Straty w pręcie są sumą strat w przewodach elementarnych poszczególnych słupków:

$$P_{rf} = \sum_{k=1}^w \left(\sum_{i=1}^n P_{rf(i,k)} \right) \quad (6.25)$$

6.2. Obliczenia strat mocy w uzwojeniu stojana badanego turbogeneratorsa

Pręt warstwy górnej i dolnej podzielono w strefie żłobkowej na słupki przewodów elementarnych o długości odpowiadającej podziałce transpozycji (rys. 6.1). Straty w pręcie obliczono osobno dla każdego przewodu elementarnego w słupku, otrzymując wykres strat wzdłuż długości i wysokości pręta warstwy górnej i dolnej w obszarze strefy żłobkowej maszyny. Pręt górny podzielono na 140, natomiast pręt dolny na 136 słupków. Obliczenia wykonano w programie Bar dla turbogeneratorsa obciążonego mocą 450 MVA. W uzwojeniu stojana zastosowano przeplot Roebela typu 0+334+0 dla pręta górnego (długość podziałki transpozycji $t_p=36,2$ mm) i typu 90+360+90 dla pręta dolnego (długość podziałki transpozycji $t_p=37,5$ mm). Straty w prętach obu warstw obliczono dla wybranego żłobka numer 3 (pręty należą do tej samej fazy).

Dla każdego z prętów wyznaczono:

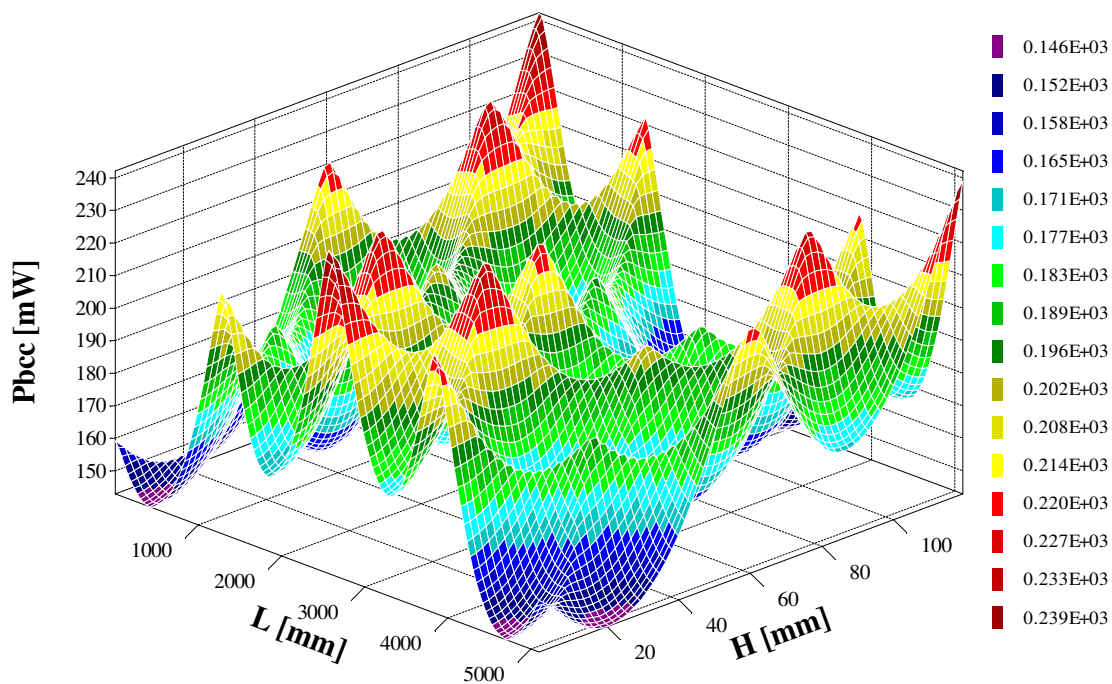
- straty dodatkowe od prądów cyrkulacyjnych oraz straty podstawowe,
- straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta w żłobku,
- straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem głównym równoległym do boku pręta w żłobku (strumień podłużny),
- straty całkowite.

Straty wyznaczono przy założeniu, że temperatura pręta górnego i dolnego wynosi $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ i jest stała na całej długości strefy żłobkowej uzwojenia stojana.

6.2.1. Obliczenie strat w pręcie warstwy dolnej

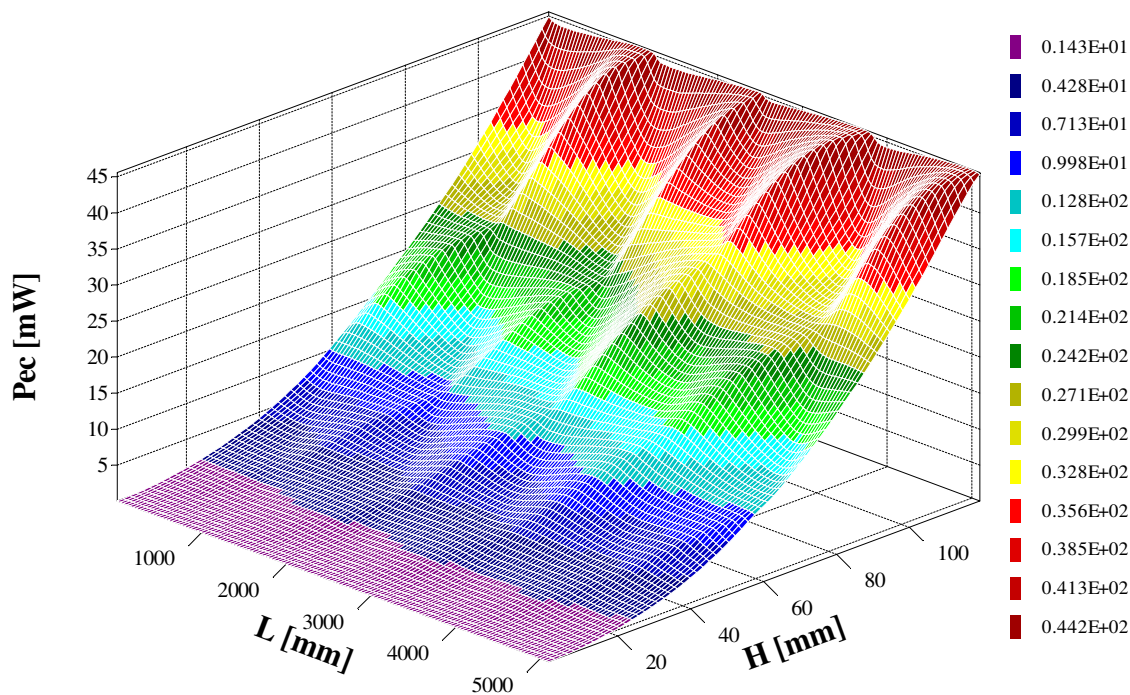
Wyniki obliczeń strat poszczególnych w pręcie warstwy dolnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogeneratorsa przedstawiono na wykresach 6.6 ÷ 6.9.

Pręt warstwy dolnej; żłobek 3



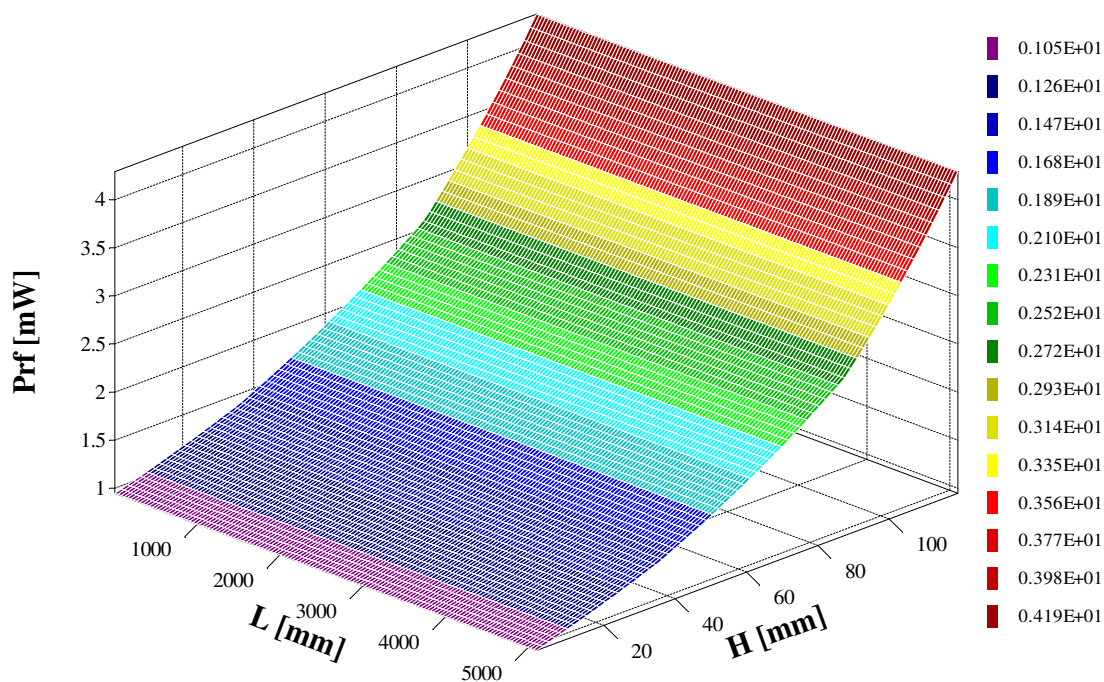
Rys. 6.6 Straty od prądów cyrkulacyjnych oraz straty podstawowe w pręcie warstwy dolnej dla żłobka numer 3 (przeplot 90+360+90)

Pręt warstwy dolnej; żłobek 3



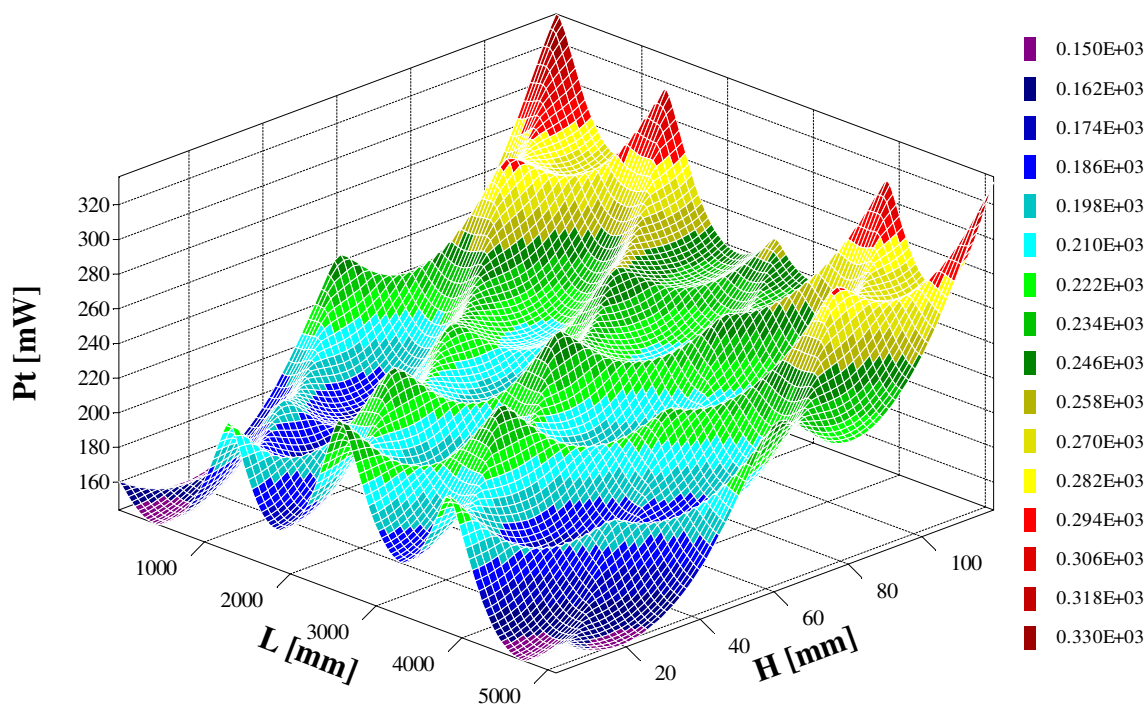
Rys. 6.7 Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta warstwy dolnej w żłobku numer 3 (przeplot 90+360+90)

Pręt warstwy dolnej; żłobek 3



Rys. 6.8 Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem podłużnym równoległym do boku pręta warstwy dolnej w żłobku numer 3 (przeplot 90+360+90)

Pręt warstwy dolnej; żłobek 3



Rys. 6.9 Straty całkowite w przecie warstwy dolnej dla żłobka numer 3 (przeplot 90+360+90)

W tabeli 6.1 zestawiono straty poszczególne w pręcie dolnym, umieszczonym w wybranym żłobku numer 3.

Tabela 6.1 Straty mocy w obszarze strefy żłobkowej pręta dolnego (żłobek 3)

Straty mocy	P_b	P_{cc}	P_{ec}	P_{rf}	P_t
kW	1,633	0,019	0,279	0,0389	1,971

P_b – straty podstawowe, P_{cc} – straty od prądów cyrkulacyjnych, P_{ec} – straty od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta, P_{rf} – straty od prądów wirowych wywołanych strumieniem podłużnym równoległym do boku pręta, P_t – straty całkowite

Suma wszystkich strat dodatkowych wynosi 0,338 kW i stanowi około 17% strat całkowitych w pręcie (P_t). Największy udział w stratach dodatkowych zaobserwowano dla strat od prądów wirowych (P_{ec}). Stanowią one około 82% wszystkich strat dodatkowych.

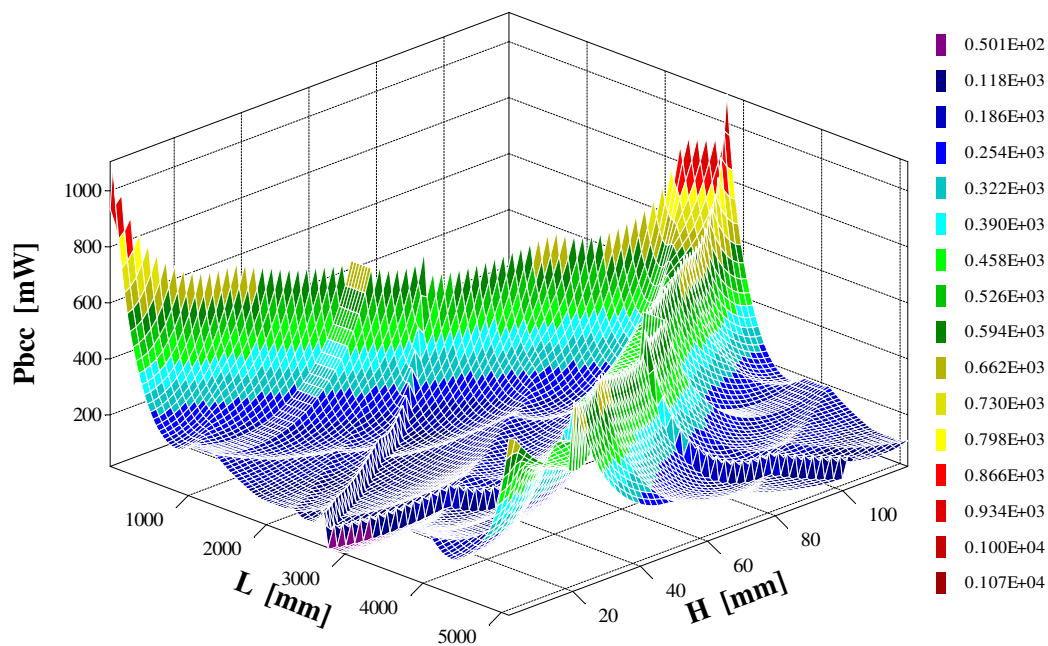
Wypadkowy współczynnik wzrostu rezystancji k_r dla całego pręta osiąga wartość 1,171. Dla zastosowanego przeplotu typu 90+360+90 współczynnik strat od prądów cyrkulacyjnych k_{ccl} jest niewielki i wynosi 1,012. Dlatego straty od prądów cyrkulacyjnych stanowią 5% strat dodatkowych i około 1% całkowitych strat w pręcie.

W wyniku oddziaływania prądów cyrkulacyjnych, stosunek gęstości prądów J_{ac} / J_{dc} dla różnych przewodów elementarnych może być mniejszy od jedności. Straty P_{bcc} w takich przewodach elementarnych będą mniejsze niż straty, jakie powstałyby przy równomiernym rozkładzie prądu. Na rysunku 6.7 przedstawiono rozkład strat P_{bcc} wzdłuż długości i wysokości pręta. Największa różnica między minimalną i maksymalną wartością na długości wybranego słupka wynosi 95 mW (240 – 145 = 95 mW). Straty od prądów wirowych (P_{ec}) osiągają maksymalną wartość dla najwyżej położonych przewodów elementarnych pręta tj. ok. 45 mW (rys. 6.7). Natomiast wartość minimalną dla najniżej położonych przewodów elementarnych pręta ok. 1mW. Straty od prądów wirowych wywołanych strumieniem promieniowym (P_{rf}) nie zależą od zastosowanego przeplotu, wykres przyjmuje kształt paraboliczny (rys.6.8). Wartość maksymalna wynosi 4,3 mW, a minimalna 1 mW. W wyniku oddziaływania strat dodatkowych, straty podstawowe ulegają zwiększeniu przede wszystkim w górnych obszarach pręta (rys. 6.9). Wartość maksymalna strat całkowitych P_t na długości słupka wynosi 340 mW, natomiast minimalna 147 mW.

6.2.2. Obliczenie strat w pręcie warstwy górnej

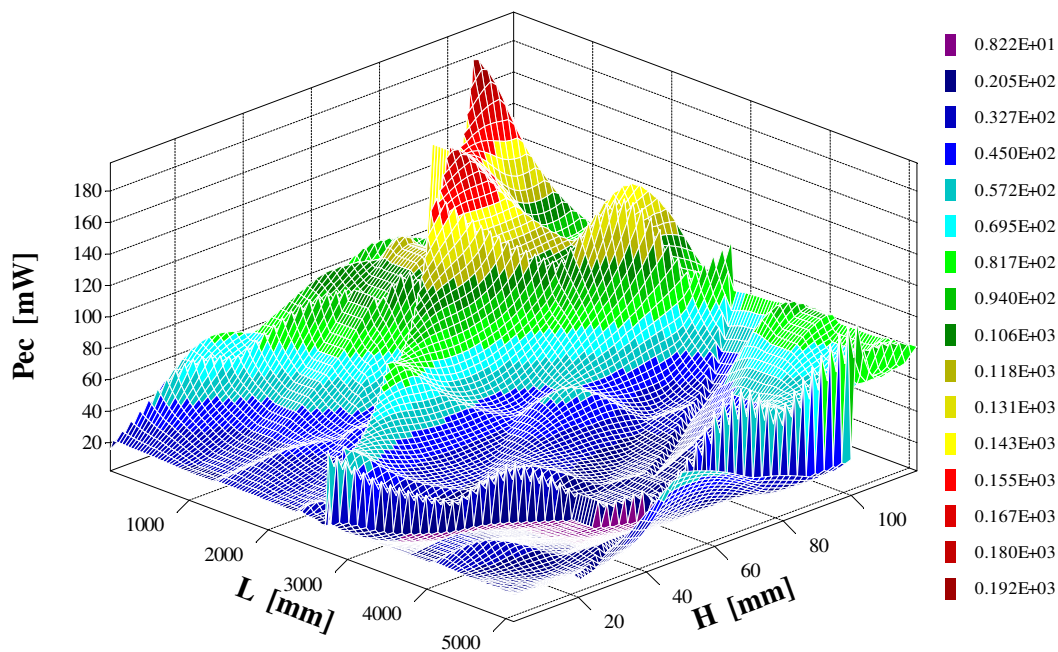
Wyniki obliczeń strat poszczególnych w pręcie warstwy górnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogenerators przedstawiono na wykresach 6.10 ÷ 6.13.

Pręt warstwy górnej ; żłobek 3



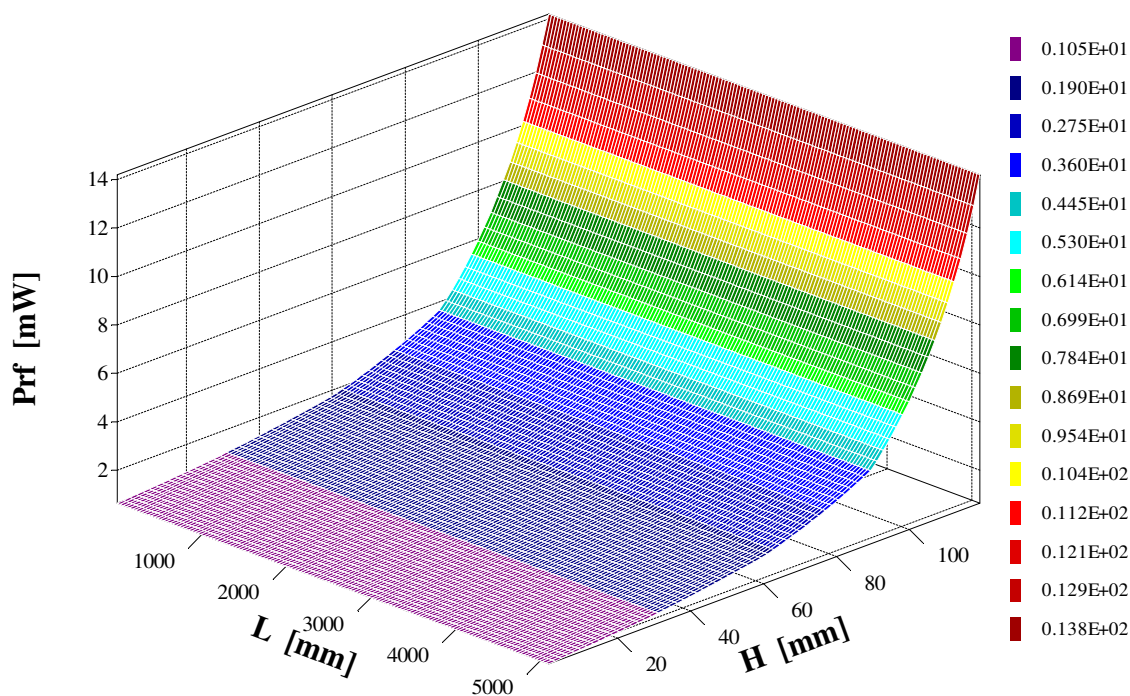
Rys. 6.10 Straty od prądów cyrkulacyjnych oraz straty podstawowe w przecie warstwy górnej dla żłobka numer 3 (przeplot 0+334+0)

Pręt warstwy górnej ; żłobek 3



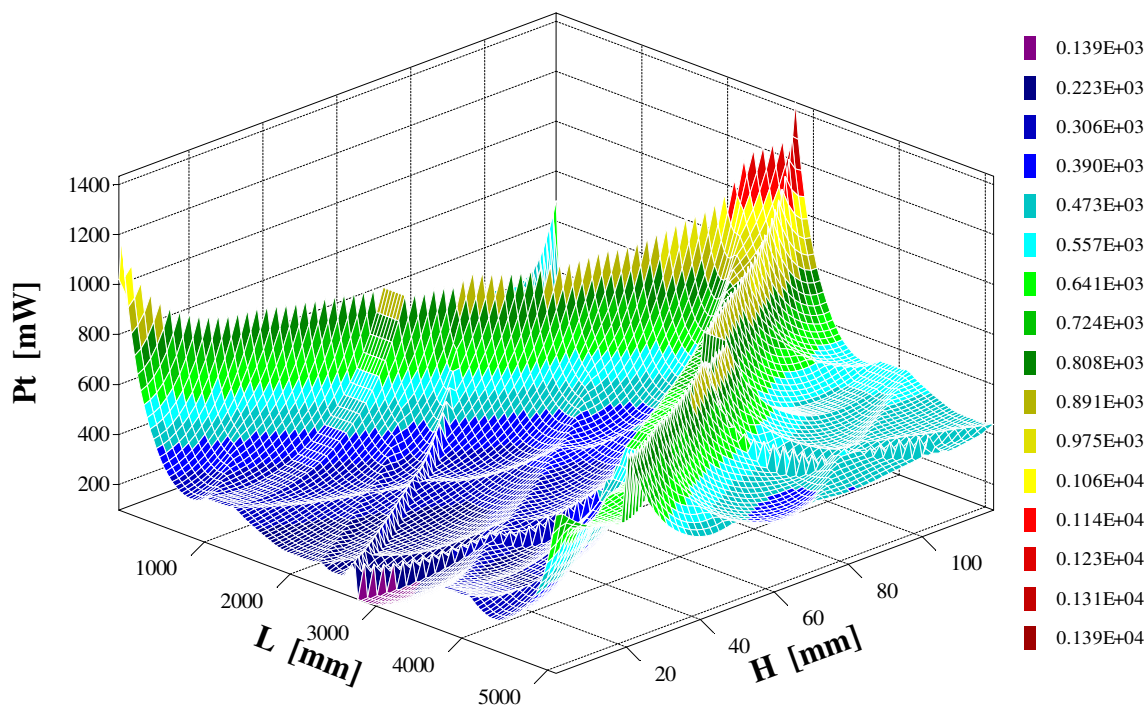
Rys. 6.11 Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta warstwy górnej w żłobku numer 3 (przeplot 0+334+0)

Pręt warstwy górnej ; żłobek 3



Rys. 6.12 Straty dodatkowe od prądów wirowych wywołanych strumieniem podłużnym równoległym do boku pręta warstwy górnej w żłobku numer 3 (przeplot 0+334+0)

Pręt warstwy górnej ; żłobek 3



Rys. 6.13 Straty całkowite w pręcie warstwy górnej dla żłobka numer 3 (przeplot 90+360+90)

W tabeli 6.2 zestawiono poszczególne straty pręta górnego, umieszczonego w wybranym żłobku numer 3.

Tabela 6.2 Straty mocy w obszarze strefy żłobkowej pręta górnego (żłobek 3)

Straty mocy	P_b	P_{cc}	P_{ec}	P_{rf}	P_t
kW	1,786	0,510	2,295	0,125	3,966

P_b – straty podstawowe, P_{cc} – straty od prądów cyrkulacyjnych, P_{ec} – straty od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszonym prostopadłym do boku pręta, P_{rf} – straty od prądów wirowych wywołanych strumieniem podłużnym równoległym do boku pręta, P_t – straty całkowite

Suma wszystkich strat dodatkowych wynosi 2,93 kW i stanowi około 74% strat całkowitych (P_t) w przecie. Straty od prądów wirowych (P_{ec}) wynoszą 78% strat dodatkowych i 58% strat całkowitych w przecie. Wypadkowy współczynnik wzrostu rezystancji k_r dla całego pręta osiąga wartość 1,865. Dla zastosowanego niepełnego przepłotu typu 0+334+0 współczynnik strat od prądów cyrkulacyjnych k_{CCL} wynosi 1,284. Dlatego, straty od prądów cyrkulacyjnych stanowią 17% strat dodatkowych i około 13% całkowitych strat w przecie.

Ze względu na niepełny przepłot Roebela w strefie żłobkowej uzwojenia uzyskano bardzo nieregularny wykres strat P_{bcc} wzdłuż długości i wysokości pręta. Największa wartość P_{bcc} występuje w połowie długości maszyny dla najwyżej położonych przewodów elementarnych pręta. Różnica między minimalną i maksymalną wartością strat na długości wybranego słupka wynosi 930 mW (1070 – 140 = 930 mW).

Niepełny przepłot Roebela wpływa na wykres strat od prądów wirowych (P_{ec}). Jego kształt jest bardzo nieregularny zarówno wzdłuż wysokości, jak i długości pręta (rys. 6.11). Straty od prądów wirowych wywołanych strumieniem promieniowym (P_{rf}) nie zależą od zastosowanego przepłotu i wykres strat przyjmuje kształt paraboliczny (rys.6.12).

Wartość maksymalna wynosi 14 mW, a minimalna 2 mW. Wykres strat całkowitych ma podobny przebieg do wykresu strat P_{bcc} , przedstawionego na rysunku 6.11. Wartość strat całkowitych P_t ulega zwiększeniu w połowie długości maszyny w górnych obszarach pręta (rys. 6.13) i ich wartość maksymalna wynosi 1400 mW.

7. OBLICZENIA CIEPLNE

7.1. Metoda obliczania przepływu ciepła

7.1.1. Podstawowe prawa przepływu ciepła

Przepływ ciepła może się odbywać przez [40]:

- przewodzenie,
- konwekcje,
- promieniowanie.

Przewodzenie ciepła polega na przekazywaniu energii przez bezpośrednio zderzające się drobiny i atomy lub dyfuzje swobodnych elektronów. Występuje ono przede wszystkim w ciałach stałych. Przepływ ciepła może być ustalony lub nieustalony. W pierwszym przypadku temperatury w poszczególnych punktach rozpatrywanego układu nie zmieniają się w czasie. Konwekcja występuje tylko w cieczach i gazach, polega na przenoszeniu energii przez przepływ i mieszanie się strug płynu o różnej temperaturze, czemu towarzyszy w niewielkim zakresie przewodzenie ciepła.

Promieniowanie jest to emisja fal elektromagnetycznych w tym zakresie długości fal, w którym występują istotne efekty przekazywania energii. Strumień przewodzonego ciepła jest proporcjonalny do gradientu temperatury, zgodnie z prawem Fouriera [14, 40]:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}\vartheta = -\lambda \nabla \vartheta \quad (7.1)$$

gdzie:

- \vec{q} – wektor strumienia przewodzonego ciepła,
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła,
- ϑ – temperatura,
- ∇ – operator nabra.

W prostokątnym układzie współrzędnych

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (7.2)$$

gdzie:

- $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – wektory jednostkowe w kierunku osi współrzędnych.

Pole temperatury jest skalarem, jego gradient jest wektorem, którego składowe wynikają z równania (7.2). Równoczesne wykorzystanie prawa Fouriera i bilansu energii prowadzi do równania różniczkowego Fouriera – Kirchhoffa opisującego pole temperatury w nieruchomych izotropowych ciałach stałych, jeżeli proces przebiega izobarycznie [14, 22, 30, 37, 40].

$$\rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + p_v \quad (7.3)$$

gdzie:

- ρ – gęstość właściwa,
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła,
- p_v – straty mocy wydzielane w jednostce objętości.

przy założeniu $di = c_p d\vartheta$ równanie (7.3) przyjmuje postać [40]:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) + \frac{p_v}{\rho c_p} \quad (7.4)$$

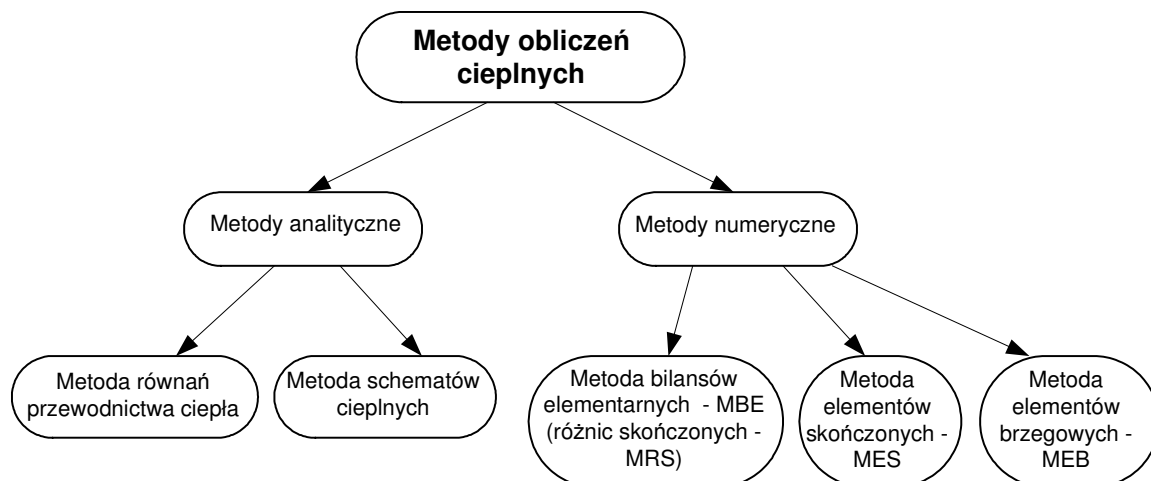
gdzie:

- ρ – gęstość właściwa,
- c_p – ciepło właściwe,
- a – współczynnik wyrównywania temperatury.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (7.5)$$

7.1.2. Podział metod stosowanych do obliczeń przepływu ciepła

Rozwiązania zagadnienia ustalonego przepływu ciepła można poszukiwać w sposób analityczny lub numeryczny (rys 7.1).



Rys. 7.1 Podział metod do obliczeń rozkładu temperatury

Metody analityczne [14, 22, 30, 37] prowadzą do rozwiązań ogólnych, lecz muszą być zastosowane liczne założenia upraszczające. Metody uproszczone z racji poglądowego charakteru wyjaśniają zjawisko od strony jakościowej, są natomiast mało dokładne. Każde rozszerzenie założeń (np. uwzględnienie wpływu temperatury na własności cieplne) znacznie zwiększa stopień trudności rozwiązania analitycznego. Nie wywołuje natomiast istotnego utrudnienia podczas stosowania metod numerycznych [14, 16, 40]. Wadą metod numerycznych jest przybliżony charakter rozwiązania oraz to że wyniki uzyskuje się nie w postaci wzorów matematycznych, lecz w postaci zbiorów wartości liczbowych dotyczących konkretnego przypadku. Charakterystyczną cechą metod numerycznych jest układ fizyczny, będący przedmiotem rozważań, traktowany jako układ dyskretny, a nie ciągły. Ta dyskretyzacja dotyczy zmiennych przestrzennych oraz czasu. Metody analityczne rozwiązywania zagadnień przepływu ciepła także wykorzystują pewne algorytmy numeryczne, np. do obliczania wartości funkcji specjalnych. W tym sensie metody te są także przybliżone. Zachowują one jednak założenie o ciągłości zmiennych, opisujących rozważany problem.

Metoda równań przewodnictwa ciepła umożliwia wyznaczenie rozkładu temperatury w sposób ciągły przez rozwiązanie równań różniczkowych. W tym celu uzwojenie dzieli się na wiele elementów, o stosunkowo prostym kształcie, dla każdego elementu układa się równanie różniczkowe z odpowiednimi warunkami brzegowymi. Metoda bilansów elementarnych [40] nie wymaga natomiast znajomości równania różniczkowego przewodzenia ciepła. Polega na podzieleniu rozpatrywanej przestrzeni na dostatecznie dużą liczbę części (elementów geometrycznych) i sporządzeniu bilansów energii dla tych elementów. Prowadzi to do sformułowania układu równań algebraicznych, określających temperatury w charakterystycznych punktach reprezentujących poszczególne elementy (tzw. węzły).

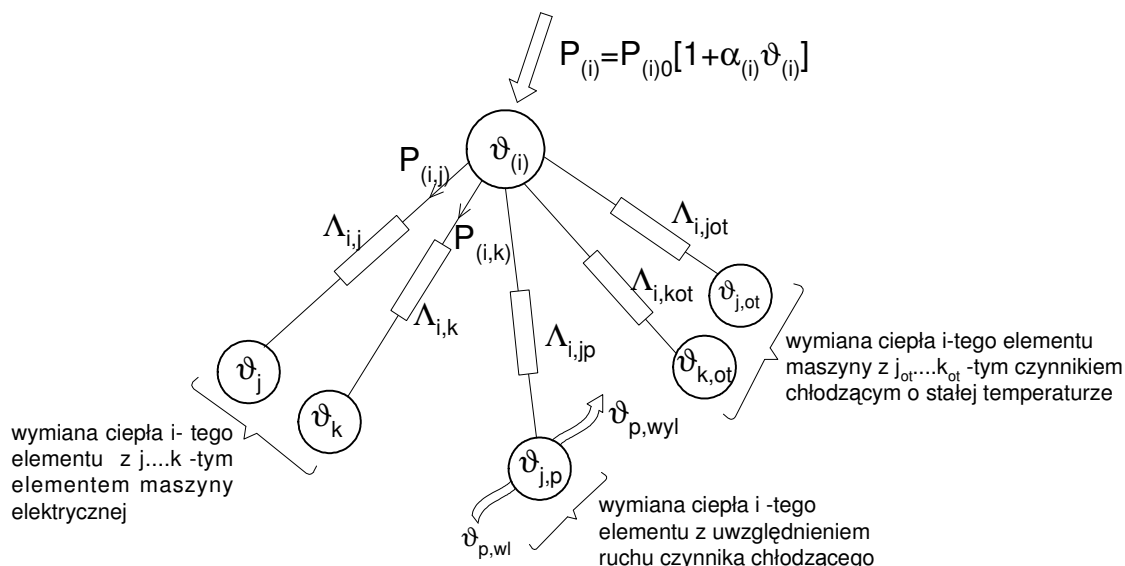
W trakcie obliczania strumienia ciepła zakłada się liniowy rozkład temperatury między sąsiednimi węzłami. Do podobnego, często identycznego układu równań dochodzi się w metodzie różnic skończonych (MRS), zastępując ilorazami różnicowymi pochodne występujące w równaniach różniczkowych przewodzenia ciepła. Metodę bilansów elementarnych można uważać za wariant metody różnic skończonych, wynikającej z wprowadzenia ilorazów różnicowych zamiast pochodnych do równania Fouriera – Kirchhoffa (7.3). Metoda bilansów elementarnych jest jednak bardziej uniwersalna i łatwiejsza do realizacji. Zazwyczaj przyjmuje się elementy różnicowe ograniczone ściankami płaskimi, w przypadkach szczególnych może być jednak celowy podział na elementy ograniczone częściowo wycinkami powierzchni cylindrycznej lub kulistej.

Metoda elementów brzegowych [14, 40] opiera się na podziale różnicowym powierzchni ciała. Punkty węzłowe występują więc tylko na powierzchni. Liczba elementów geometrycznych i węzłów jest znacznie mniejsza niż w innych metodach. Oblicza się rozkład temperatury na powierzchni ciała. W razie potrzeby można w następnym etapie obliczyć temperatury wewnętrzne. MEB polega na przekształceniu danego zagadnienia brzegowego w równoważne mu równanie całkowe. Dyskretyzacja tego równania całkowego oraz rozwiązanie tak otrzymanego układu równań algebraicznych umożliwia wyznaczenie wartości poszukiwanej funkcji w punktach węzłowych.

W pracy korzystano z metody analitycznej schematów cieplnych, wyznaczając rozkład temperatur w uzwojenia stojana badanego turbogeneratora ze względu na przepływ Roebela w prętach.

7.1.3. Metoda schematów cieplnych

Obliczenie średnich przebiegów temperatury w maszynie elektrycznej można uzyskać, stosując tzw. metodę modułowych schematów [37]. Moduły cieplne, opisujące średnią temperaturę elementów maszyny, wynikają z analitycznego rozwiązania równania różniczkowego przewodnictwa cieplnego. Zastosowanie tej metody wymaga podziału rozpatrywanego pręta uzwojenia na obszary, wewnątrz których temperatura jest stała. Otrzymuje się w ten sposób cieplny schemat zastępczy pręta, wzorowany na schemacie elektrycznym. Zastępczy schemat cieplny maszyny elektrycznej, złożony z n węzłów cieplnych źródłowych zależnych od temperatury $P = P_{i0} [1 + \alpha_{(i)} \vartheta_{(i)}]$, które są powiązane z innymi elementami maszyny przewodnościami cieplnymi $\Lambda_{(i,j)}$ oraz czynnikiem chłodzącym $\Lambda_{(i,jot)}$ przedstawiono na rysunku 7.2.



Rys. 7.2 Ciepły schemat zastępczy *i*-tego elementu maszyny elektrycznej

W stanie ustalonym dla *i*-tego węzła cieplnego obowiązuje następujące równanie bilansu cieplnego [37]:

$$P_{(i0)}[1 + \alpha_i \vartheta_i] - \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \Lambda_{(i,j)} [\vartheta_i - \vartheta_j] - \sum_{\substack{i=1 \\ j=i}}^n \Lambda_{(i,jot)} [\vartheta_i - \vartheta_{jot}] = 0 \quad (7.6)$$

które można zapisać w postaci:

$$\left[\sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \Lambda_{(i,j)} + \sum_{\substack{i=1 \\ j=i}}^n \Lambda_{(i,jot)} - \alpha_i P_{(i0)} \right] \vartheta_i - \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \Lambda_{(i,j)} \vartheta_j = P_{(i0)} + \sum_{\substack{i=1 \\ j=i}}^n \Lambda_{(i,jot)} \vartheta_{jot} \quad (7.7)$$

gdzie:

- P_{i0} – strata mocy w *i*-tym węźle w temperaturze 0 °C,
- $\Lambda_{(i,j)}$ – przewodność cieplna między *i*-tym i *j*-tym węzłem cieplnym,
- $\Lambda_{(i,jot)}$ – przewodność cieplna między *i*-tym węzłem i czynnikiem chłodzącym,
- ϑ_i – temperatura *i*-tego węzła,
- ϑ_{jot} – temperatura *j*-tego węzła czynnika chłodzącego,
- α_i – cieplny współczynnik zmiany rezystywności *i*-tego węzła.

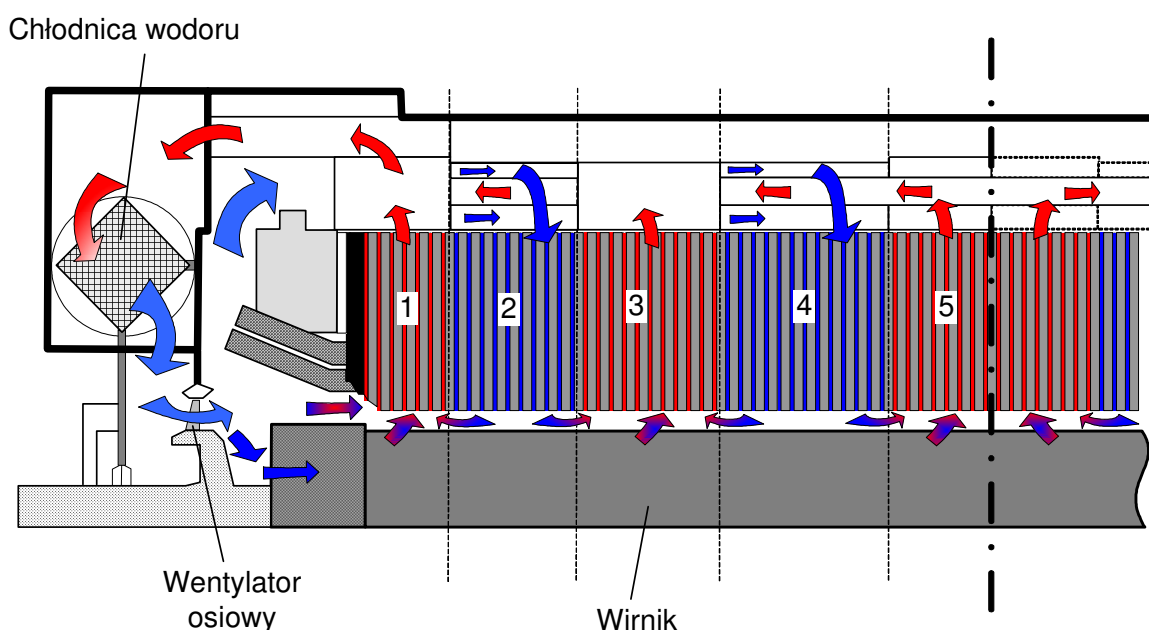
7.2. System wentylacyjny badanego turbogeneratorsa

Obliczenia rozkładu temperatury w strefie żłobkowej uzwojenia stojana muszą być poprzedzone analizą rozptywu czynnika chłodzącego wzdłuż długości rdzenia i promieniowych kanałów wentylacyjnych turbogeneratorsa. Analizę wykonuje się na podstawie modelu wentylacyjnego maszyny. Znajomość rozptywu czynnika chłodzącego umożliwia wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła, niezbędnego dla prawidłowego określenia parametrów zastępczego schematu cieplnego uzwojenia stojana turbogeneratorsa. Badany turbogenerators ma tzw. pięciokomorowy system chłodzenia.

7.2.1. Pięciokomorowy system chłodzenia

Badany turbogenerator ma symetryczny układ wentylacyjny [22, 30]. Płaszczyzna symetrii przechodzi prostopadłe do osi wału maszyny w połowie jej długości. Pakiet blach i pręty uzwojenia stojana są chłodzone gazem (wodorem) przepływającym przez promieniowe kanały wentylacyjne w pięciu równoległych strugach (pięciu komorach) w każdej z połówek maszyny – stąd nazwa tego systemu wentylacyjnego. Strugi gazu płyną pod wpływem ciśnienia wytworzonego przez działanie beczki wirnika i zamocowanych osiowo na końcach wirnika dwóch wentylatorów. Gaz tłoczony przez wentylator dzieli się na trzy strugi.

Pierwsza wpływa do szczeliny powietrznej, druga przepływa przez przeloty pomiędzy połączeniami czołowymi, chłodzi te połączenia, przepływa do komory połączeń czołowych, a stąd do przestrzeni pomiędzy pakietem blach i zewnętrznym płaszczem maszyny. Trzecia wpływa do wirnika w obszarze pozażłobkowym pomiędzy kołpakiem a wałem, znajdując dostęp do wydrążonych w uzwojeniu (prętach elementarnych) kanałów oraz do podżłobków umieszczonych bezpośrednio pod głównymi żłobkami wirnika.



Rys. 7.3 Przepływ czynnika chłodzącego w turbogeneratorze o pięciokomorowym systemie chłodzenia

Strugę gazu skierowaną do wirnika dzieli się na trzy strugi. Pierwsza przepływa podżłobkami w kierunku środka wirnika – komory 5, gdzie wylatuje z wirnika do szczeliny powietrznej. Druga przepływa przez żłobkową część uzwojenia wirnika w wydrążonych w prętach kanałach, aż do końca komory 3, gdzie wlatuje do szczeliny powietrznej przez promieniowe otwory w przewodach elementarnych i klinach. Pozostała struga gazu przepływa przez wydrążone przewody elementarne w części pozażłobkowej uzwojenia, pojawiając się w szczelinie powietrznej przez tzw. „krótkie żłobki” w końcowej części wirnika.

Część gazu przeznaczoną do chłodzenia stojana jest wprowadzana bezpośrednio do szczeliny powietrznej w strefie końcowej rdzenia, gdzie razem z chłodzącym gazem z części pozażłobkowej wirnika wpływa do promieniowych kanałów wentylacyjnych komory 1 (rys. 7.3). Pozostała część chłodzącego gazu jest kierowana osiowymi kanałami do środka maszyny, gdzie zostaje podzielona na dwie części (komora 2 i 4). Pierwsza część transportowana jest do wnętrza rdzenia przez promieniowe kanały wentylacyjne komory 2, aż do szczeliny powietrznej. Druga część przepływa w podobny sposób, aż do szczeliny powietrznej komory 4, gdzie następuje rozdział na dwa strumienie (strumień lewy i prawy).

Rozdzielone strumienie gazu płyną wzdłuż szczeliny powietrznej w kierunku stref sąsiednich komór, gdzie łączą się z gorącym gazem wylatującym ze żłobków wirnika. Następnie gaz promieniowymi kanałami wentylacyjnymi komory 1, 3, 5 jest transportowany w kierunku zewnętrznego płaszcza maszyny, skąd osiowymi kanałami ostatecznie wpływa do chłodnic.

7.3. Model matematyczny do obliczeń cieplnych uzwojenia stojana w strefie żłobkowej

Obliczenia rozkładu temperatury w prętach warstwy dolnej i górnej uzwojenia stojana turbogenerators o pośrednim pięciokomorowym systemie chłodzenia prowadzono metodą schematów cieplnych [10, 14, 18, 22, 30, 37]. Zastosowana metoda wymaga podziału rozpatrywanego pręta uzwojenia na obszary, wewnątrz których temperatura jest stała. Otrzymuje się w ten sposób cieplny schemat zastępczy pręta, wzorowany na schemacie elektrycznym (rys. 7.5).

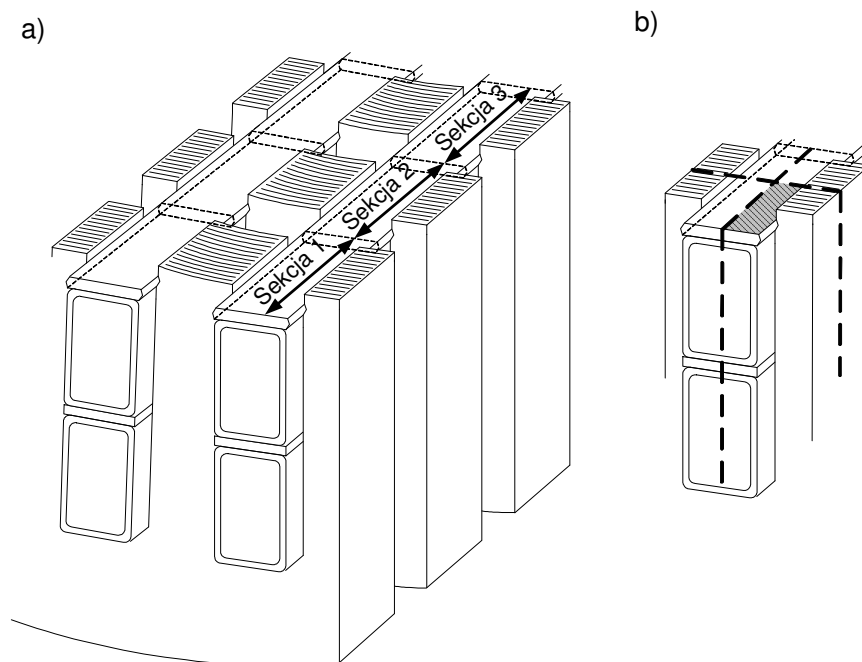
7.3.1. Podział pręta w strefie żłobkowej

Ze względu na układ wentylacyjny oraz zastosowaną metodę schematów cieplnych pręty warstwy górnej i dolnej podzielono na tzw. sekcje cieplne, a sekcje podzielono na obszary zastąpione przez węzły cieplne (rys. 7.4). Dla każdej sekcji zbudowano sieć cieplną uwzględniającą źródła ciepła oraz rozptył czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych. Liczba sekcji (m_s) obliczana jest ze wzoru (7.8):

$$m_s = m_k - 1 \quad (7.8)$$

gdzie:

m_k – liczba kanałów wentylacyjnych.

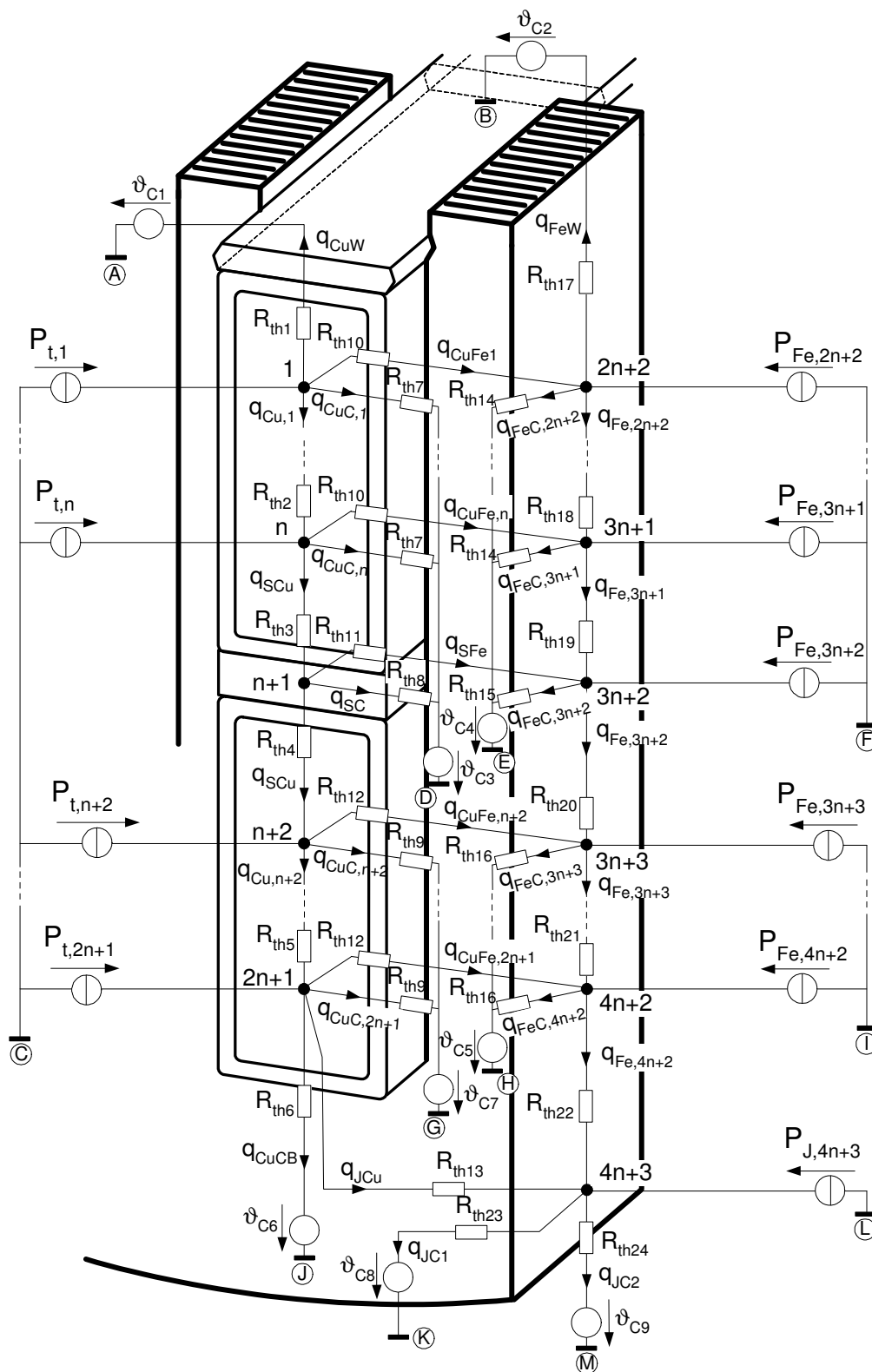


Rys. 7.4 Podział pręta uzwojenia stojana turbogenerators : a) sekcje cieplne, b) strefy

Każda sekcja obejmuje pakiet blach wraz z połową promieniowego kanału wentylacyjnego otaczającego ten pakiet (z lewej i prawej strony). W połowie sekcji zachodzi symetryczny rozptył ciepła względem płaszczyzny równoległej i prostopadłej do boku pręta górnego i dolnego (rys. 7.4). Ze względu na symetrię możliwe jest utworzenie modelu cieplnego dla $\frac{1}{4}$ sekcji nazwanej strefą.

7.3.2. Schemat zastępczy

Zgodnie z metodą schematów cieplnych strefę każdej sekcji podzielono na obszary zastąpione za pomocą węzłów cieplnych. Otrzymuje się w ten sposób cieplny schemat zastępczy (rys. 7.5) pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana.



Rys. 7.5 Zastępczy schemat cieplny sekcji pręta uzwojenia stojana w strefie żłbkowej turbogeneratora

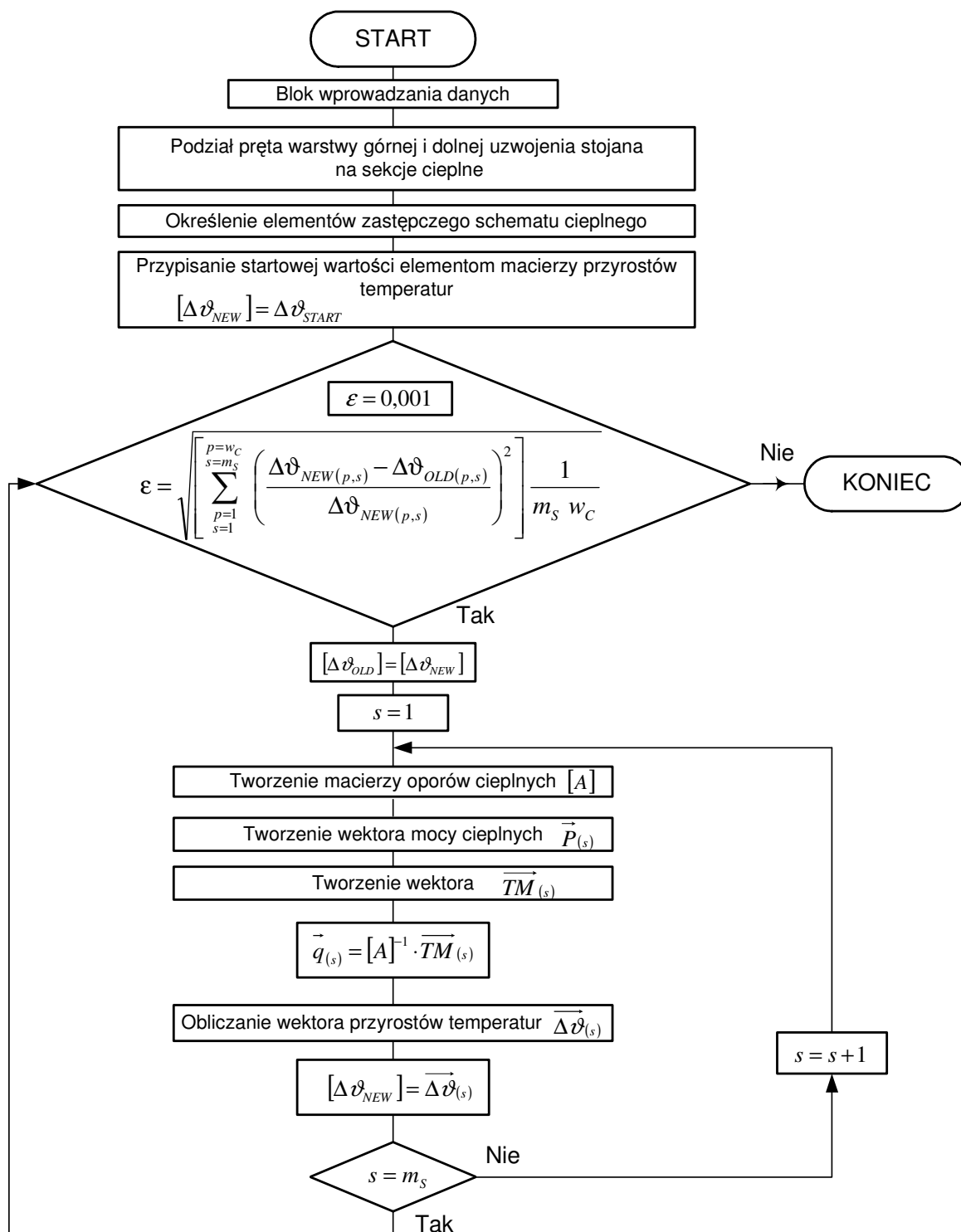
Schemat ma $4n + 3$ węzłów cieplnych dla każdej sekcji, gdzie n określa liczbę węzłów w pręcie. Liczba ta jest identyczna dla każdej sekcji. Dla badanego uzwojenia przyjęto w pręcie górnym i dolnym każdej sekcji jednakową liczbę węzłów cieplnych, tj. 12 (pręt górny węzły numer: $1 \dots n$, pręt dolny węzły numer: $n+1 \dots 2n+1$) ułożonych w równych odstępach od siebie. Jeden węzeł cieplny umieszczono w środku przekładki między prętami (węzeł numer: $n+1$). Dla zęba rdzenia stojana przyjęto 25 węzłów (węzły o numerach: $2n + 2 \dots 4n + 2$). W schemacie zastępczym uwzględniono również przekazywanie ciepła do jarzma, które przedstawiono w postaci pojedynczego węzła numer $4n + 3$. Dzięki podziałowi pręta na sekcje cieplne można określić wpływ przepłotu Roebela na rozkład temperatury w pręcie. Rozpływ ciepła w pręcie jest rezultatem przewodnictwa przez izolacje i rdzeń, przejmowania ciepła od przewodów i blach do czynnika chłodzącego w promieniowych kanałach wentylacyjnych.

W schemacie cieplnym sekcji pręta uzwojenia stojana zdefiniowano następujące parametry:

- straty cieplne:
 - P_t – straty cieplne wydzielane w prętach (miedzi),
 - P_{Fe} – straty cieplne wydzielane w zębie (żelazie),
 - P_J – straty cieplne wydzielane w jarzmie (żelazie),
- strumień cieplny:
 - q_{CuW} – strumień cieplny płynący między prętem górnym a szczeliną powietrzną,
 - q_{FeW} – strumień cieplny płynący między zębem a szczeliną powietrzną,
 - q_{CuFe} – strumień cieplny płynący między prętem a zębem,
 - q_{CuC} – strumień cieplny płynący między prętem a kanałem wentylacyjnym,
 - q_{FeC} – strumień cieplny płynący między zębem a kanałem wentylacyjnym,
 - q_{SCu} – strumień cieplny płynący między przekładką a prętami,
 - q_{SC} – strumień cieplny płynący między przekładką a kanałem wentylacyjnym,
 - q_{SFe} – strumień cieplny płynący między przekładką a zębem,
 - q_{Fe} – strumień cieplny płynący między węzłami zęba,
 - q_{Cu} – strumień cieplny płynący między węzłami pręta,
 - q_{CuCB} – strumień cieplny płynący między prętem dolnym a kanałem wentylacyjnym,
 - q_{JCu} – strumień cieplny płynący między jarzmem a prętem dolnym,
 - q_{JC} – strumień cieplny płynący między jarzmem a kanałem wentylacyjnym,
- zastępczy opór cieplny ($R_{th1} \dots R_{th24}$),
- temperatura czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych, szczelinie powietrznej i zewnętrznej powierzchni jarzma ($\vartheta_{C1} \dots \vartheta_{C9}$).

7.3.3. Algorytm obliczeń cieplnych

Schemat blokowy algorytmu obliczeń cieplnych (rys 7.6) zbudowano na podstawie zastępczego schematu cieplnego uzwojenia stojana turbogeneratorsa (rys. 7.5). Rozkład temperatury w pręcie warstwy górnej i dolnej wyznacza się oddzielnie dla każdej sekcji, a wyniki obliczeń zapisuje się do macierzy $[\Delta\vartheta_{NEW}]$.



Rys. 7.6 Schemat blokowy algorytmu obliczeń cieplnych

Po wykonaniu obliczeń temperatury we wszystkich sekcjach (zmienna s równa się liczbie m_s) następuje sprawdzenie zmienności rozkładu temperatury zgodnie z zależnością (7.9):

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{p=1}^{p=w_C} \sum_{s=1}^{s=m_S} \left(\frac{\Delta\vartheta_{NEW(p,s)} - \Delta\vartheta_{OLD(p,s)}}{\Delta\vartheta_{NEW(p,s)}} \right)^2} \frac{1}{m_S w_C} \quad (7.9)$$

Jeśli wielkość ε jest mniejsza od 0,001, to obliczenia są zakończone, jeśli nie to następuje zapisanie macierzy $[\Delta\vartheta_{NEW}]$ do macierzy $[\Delta\vartheta_{OLD}]$ i obliczenia wykonuje się ponownie dla poszczególnych sekcji cieplnych.

W przedstawionym schemacie blokowym (rys. 7.6) zdefiniowano następujące parametry:

- w_C – liczba węzłów cieplnych,
- m_S – liczba sekcji cieplnych,
- $[\Delta\vartheta_{NEW}]$ – macierz temperatury poszczególnych sekcji cieplnych w bieżącym kroku iteracyjnym,
- $[\Delta\vartheta_{OLD}]$ – macierz temperatury poszczególnych sekcji cieplnych w poprzednim kroku iteracyjnym,
- $\Delta\vartheta_{START}$ – temperatura startowa,
- $[A]$ – macierz oporów cieplnych,
- \vec{P} – jednokolumnowa macierz mocy cieplnych,
- \vec{q} – jednokolumnowa macierz strumieni cieplnych,
- $\vec{\Delta\vartheta}$ – jednokolumnowa macierz przyrostów temperatury

7.4. Rozkład temperatur w strefie żłobkowej uzwojenia stojana

Korzystając z przedstawionego modelu, wykonano obliczenia rozkładu temperatur w strefie żłobkowej uzwojenia stojana. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu Bar dla badanego turbogeneratora ($S_n=450$ MVA).

Rozkłady temperatur wyznaczono na długości i wysokości obu warstw dla dwóch wybranych układów żłobków, w których w warstwie górnej i dolnej znajdują się pręty należące do tych samych (żłobki 3 i 12, rys. 7.7) oraz do różnych faz (żłobki 9 i 27, rys. 7.8). Na rysunkach oznaczono jako T_d [K] przyrost temperatury pręta wyznaczony względem temperatury zimnego gazu, natomiast L [m] jako długość strefy żłobkowej turbogeneratora. Oś opisana jako węzły cieplne opisuje węzły schematu cieplnego (rys. 7.5), w których obliczono przyrost temperatury.

Każdy z prętów podzielono na 12 węzłów cieplnych, rozmieszczonych wzdłuż wysokości pręta. Na rysunkach 7.7 i 7.8 w węzłach od 1 do 12 opisano przyrost temperatury wzdłuż wysokości pręta górnego, natomiast w węzłach od 14 do 25 wzdłuż wysokości pręta dolnego. W punkcie 13 określono przyrost temperatury w przekładce między prętami.

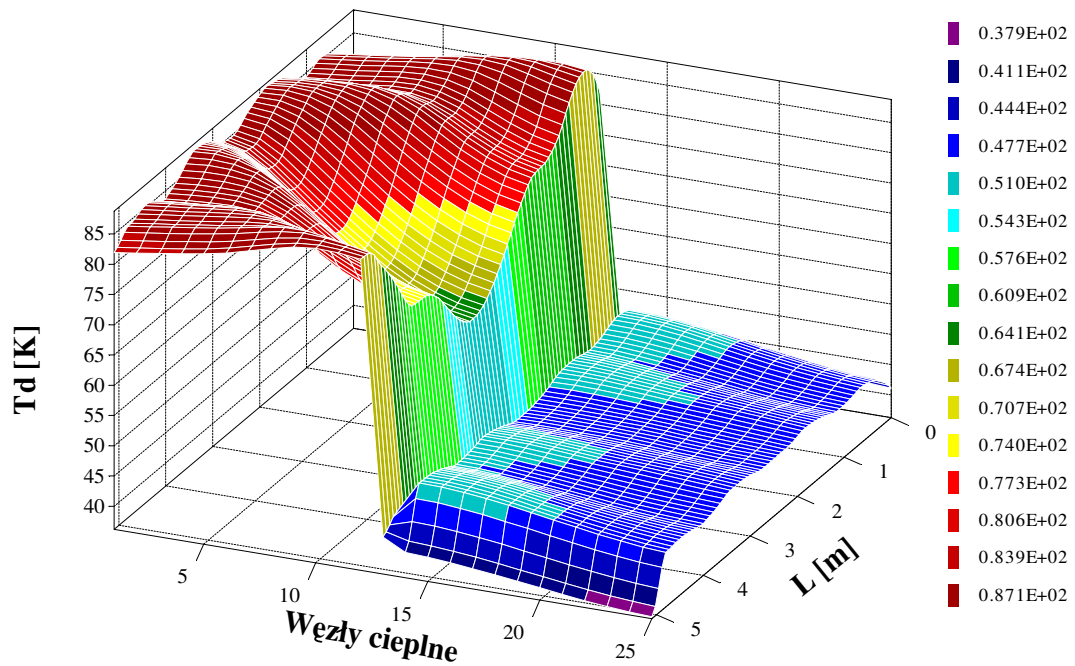
Z pomiarów prowadzonych podczas prób ruchowych wynika, iż dla mocy 450 MVA przyrost temperatury ciepłego gazu na wejściu do chłodnicy wynosi 13,5 K. Wartość tę wyznaczono w odniesieniu do zimnego gazu (temperatura gazu na wyjściu z chłodnicy) w stanie jałowym maszyny. Dlatego w obliczeniach przyjęto, że temperatura gazu w każdym kanale wentylacyjnym, szczelinie powietrznej i na zewnątrz rdzenia jest równa przyrostowi temperatury ciepłego gazu na wejściu do chłodnicy.

7.4.1. Rozkład temperatur w przecie warstwy dolnej i górnej

Wyniki obliczeń rozkładu temperatury wzdłuż długości i wysokości pręta warstwy dolnej i górnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogeneratora przedstawiono na wykresach 7.7 i 7.8.

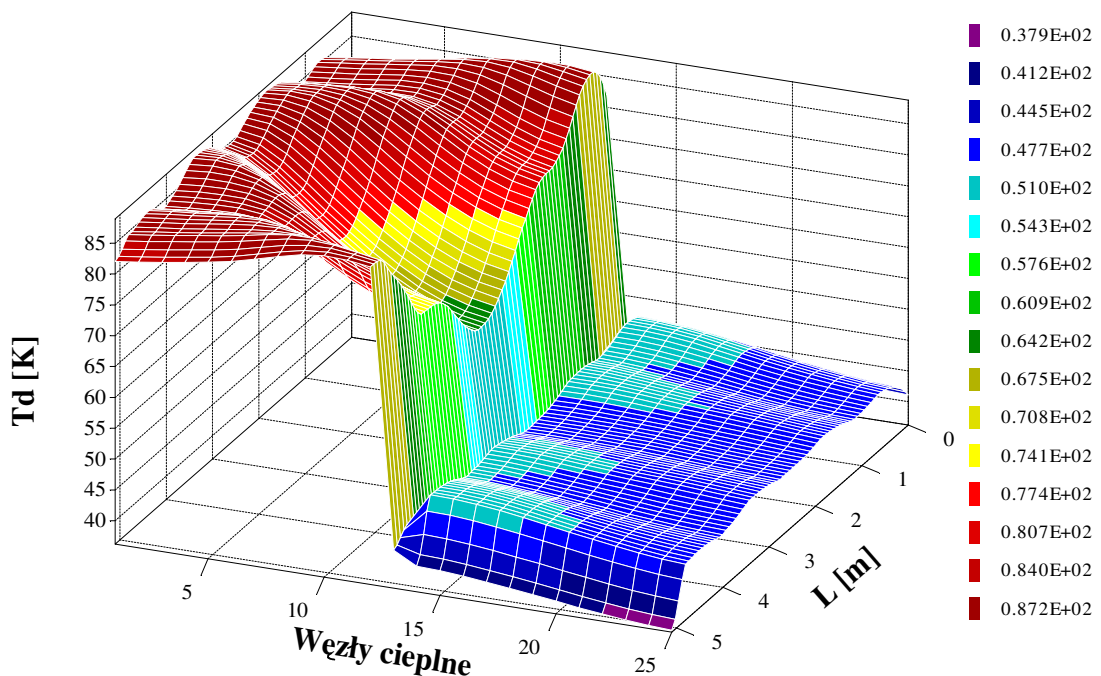
a)

Przyrost temperatury; żłobek 3



b)

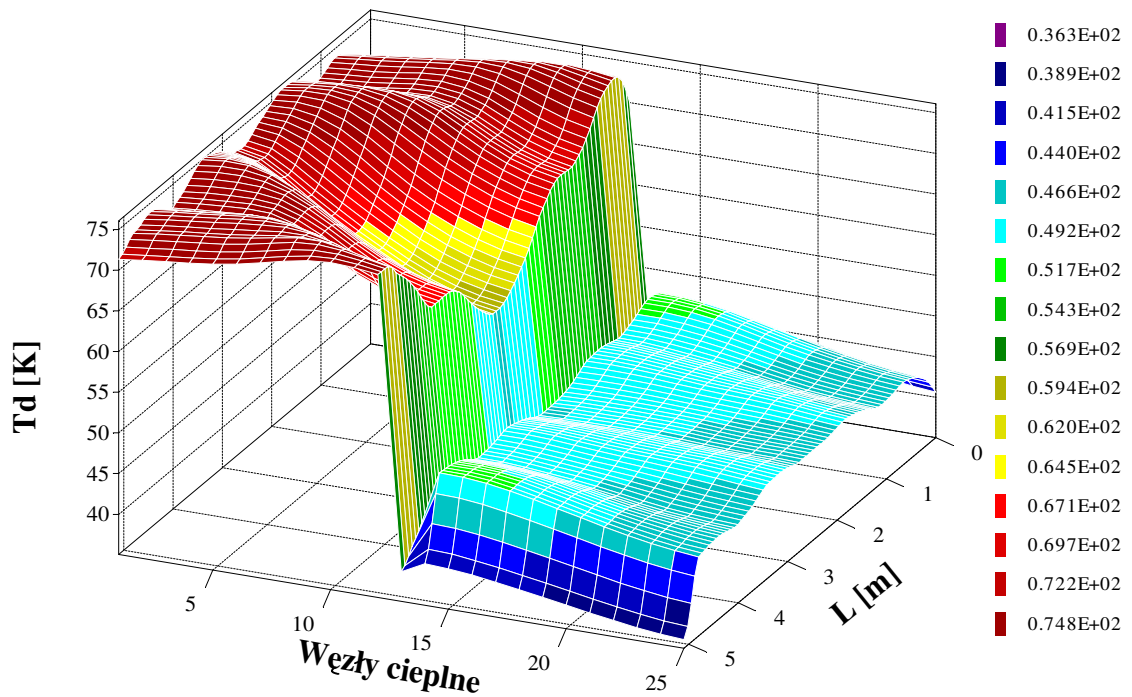
Przyrost temperatury; żłobek 12



Rys. 7.7 Rozkład temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o tych samych fazach w żłobku (pręt górny przeplot typu 0+334+0, pręt dolny przeplot typu 90+360+90):
a) żłobek 3, b) żłobek 12

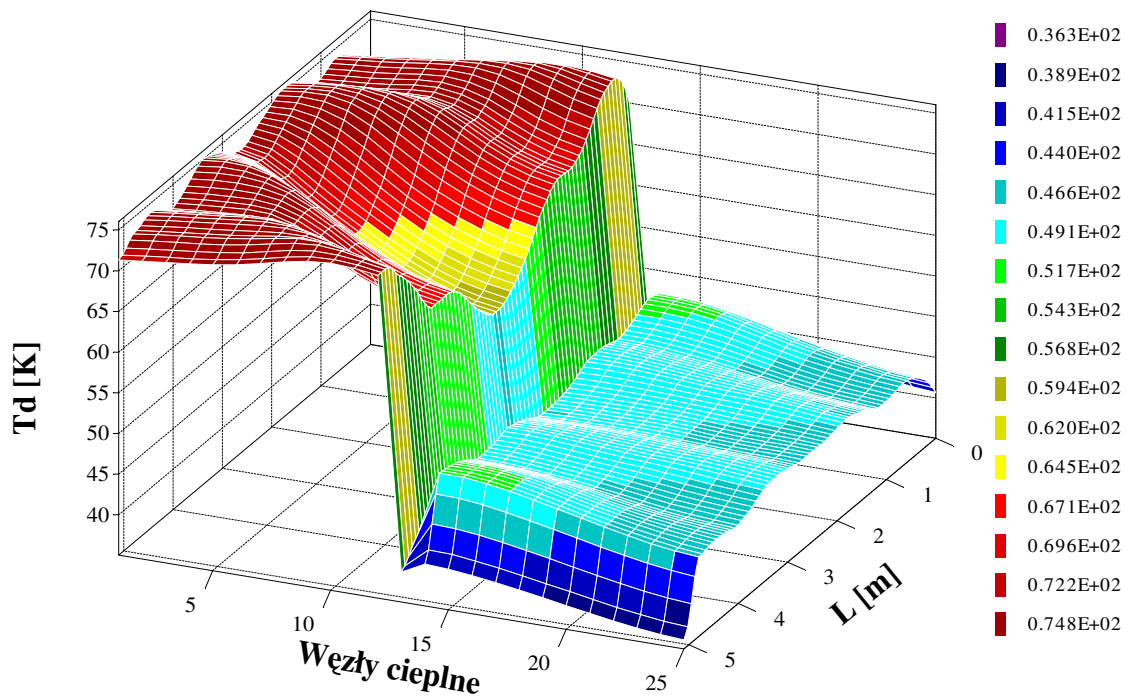
a)

Przyrost temperatury; żłobek 9



b)

Przyrost temperatury; żłobek 27



Rys. 7.8 Rozkład temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o różnych fazach w żłobku (pręt górny przeplot typu 0+334+0, pręt dolny przeplot typu 90+360+90):
a) żłobek 9, b) żłobek 27

Podział pręta na sekcje i węzły cieplne umożliwia wyznaczenie rozkładu temperatury z uwzględnieniem zastosowanego przepłotu przewodów elementarnych. Dla transpozycji typu 0+334+0 w pręcie warstwy górnej uzyskano nierównomierny rozkład temperatury. W połowie strefy żłobkowej uzyskano minimalny przyrost temperatury, tj. ok. 65 K dla żłobka 3 i 12, oraz ok. 58 K dla żłobka 9 i 27. Maksymalna temperatura w żłobku 3 i 12 wynosi ok. 88 K natomiast w żłobku 9 i 27 ok. 75 K. Ułożona między prętami przekładka, stanowi bardzo dobrą izolację termiczną, stąd przekazywanie ciepła z warstwy górnej do dolnej jest pomijalnie małe. Z analizy przedstawionych rozkładów wynika, że przynależność prętów do tych samych lub różnych faz w żłobku nie wpływa na kształt przebiegu, ale na ich wartość maksymalną i minimalną. Wyznaczone przebiegi temperatur w prętach dla żłobków 3, 12, 9, 27 zachowują jednakowy kształt. W modelu cieplnym nie uwzględniono przekazywania ciepła między poszczególnymi sekcjami.

7.5. Weryfikacja metody obliczeń

Pomiary temperatury w rzeczywistości wykonuje się za pomocą czujników rezystancyjnych (RTD) usytuowanych w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana. Nie ma możliwości zamontowania czujników bezpośrednio w uzwojeniu.

Poprawność zastosowanego modelu matematycznego zbadano porównując pomiary z obliczeniami temperatur w przekładce między prętami.

Badany turbogenerator testowano podczas prób ruchowych dla dwóch zakresów mocy: 450 MVA i 524 MVA ($U_n=21\text{kV}$; $f=60\text{Hz}$). W pracy prowadzono porównanie obliczeń z pomiarami dla obydwu zakresów. Obciążenie turbogeneratorsa mocą 450 MVA odpowiada przyrostom temperatur dla klasy izolacji B, natomiast 524 MVA klasy izolacji F.

Przedstawiony model cieplny umożliwia obliczenie rozkładu temperatur w przekładce między prętami uzwojenia stojana.

W tabeli 7.1 oraz 7.2 zestawiono wartości temperatur zmierzonych za pomocą czujników rezystancyjnych usytuowanych w 8 żłobkach w różnych miejscach, na długości strefy żłobkowej. Pozycje czujników określono jako odległość od krawędzi rdzenia do punktu umiejscowienia w kierunku osi z maszyny. W żłobkach 3, 12, 30, 48 są umieszczone pręty należące do tych samych fazy, natomiast w żłobku 18, 27, 36, 45 do różnych faz.

Na prezentowanych wykresach (rys. 7.9÷7.12) jako T [$^{\circ}\text{C}$] oznaczono temperaturę przekładki izolacyjnej, natomiast L [m] jest długością strefy żłobkowej turbogeneratorsa.

W obliczeniach założono, że przyrost temperatury gazu w promieniowych kanałach wentylacyjnych, szczelinie powietrznej i na zewnątrz rdzenia jest równy przyrostowi temperatury ciepłego gazu na wejściu do chłodnicy. Wartość tę wyznaczono w odniesieniu do zimnego gazu (temperatura gazu na wyjściu z chłodnicy) w stanie jałowym maszyny. Podczas prób ruchowych przyrost temperatury ciepłego gazu dla mocy 450 MVA wynosił 13,5 K, a dla mocy 524 MVA wynosił 21 K.

7.5.1. Porównanie obliczeń z pomiarami turbogeneratorsa obciążonego mocą 450 MVA

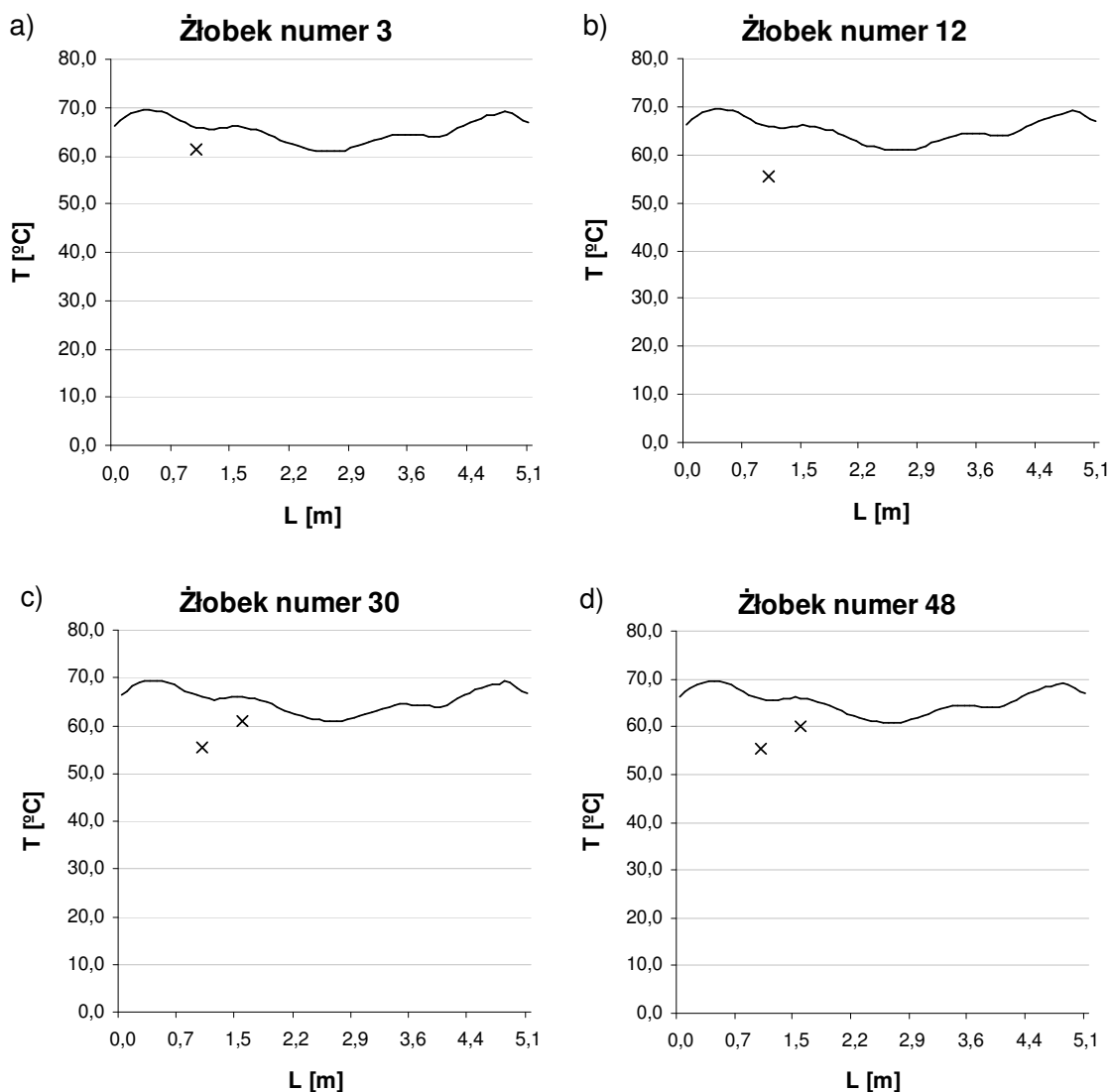
Porównanie temperatur obliczonych i zmierzonych w badanym turbogeneratorsie dla 14 różnych miejsc usytuowania czujników rezystancyjnych (RTD) przedstawiono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1 Porównanie temperatur obliczonych i zmierzonych wzdłuż przekładki międzywarstwowej dla różnych żłobków badanego turbogeneratora obciążonego mocą 450 MVA

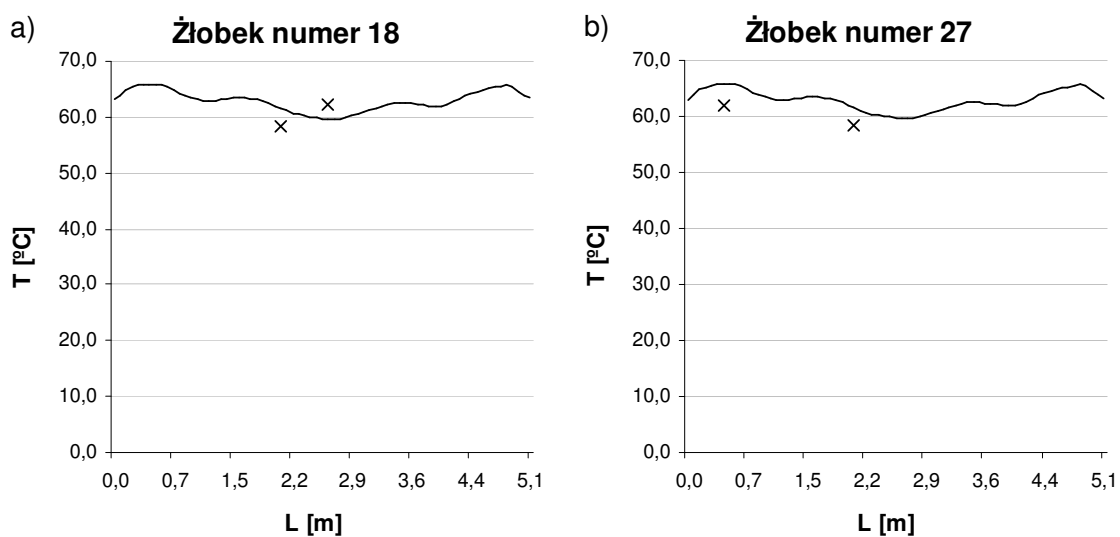
Lp.	Numer żłobka	Pozycja	T _o temperatura obliczona	T _z temperatura zmierzona	T _o – T _z	Błąd obliczeń
		m	°C	°C	°C	%
1	3	0,977	65,9	61,2	4,7	7,7
2	12	0,977	65,9	55,5	10,4	18,7
3	18	2,050	61,5	58,4	3,1	5,3
4	18	2,570	60,0	62,1	-2,1	-3,4
5	27	0,427	65,8	62,0	3,8	6,1
6	27	2,050	61,5	58,4	3,1	5,3
7	30	0,977	65,9	55,3	10,6	19,1
8	30	1,547	66,0	60,8	5,2	8,5
9	36	2,570	60,0	62,2	-2,2	-3,5
10	36	2,050	62,1	61,8	0,3	0,5
11	45	0,427	65,8	57,6	8,2	14,2
12	45	2,050	61,5	61,1	0,4	0,7
13	48	1,547	66,0	60,2	5,8	9,6
14	48	0,977	65,9	55,5	10,4	18,7

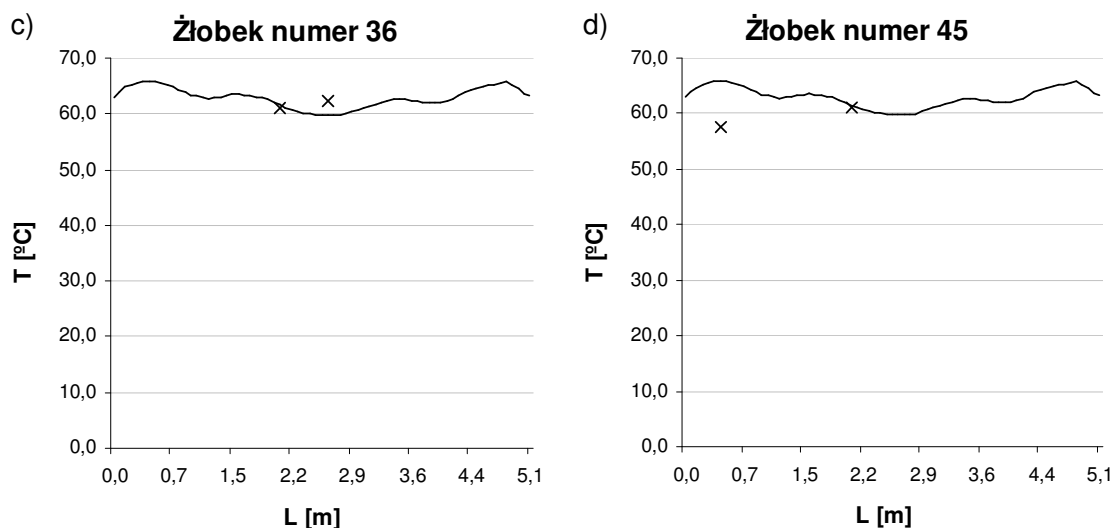
Na podstawie porównania wielkości pomierzonych i obliczonych można stwierdzić, że w dwóch punktach temperatura obliczona jest mniejsza od zmierzonej (żłobek 18 i 36 – rys. 7.10). Różnica temperatur wynosi $-2,1$ °C dla żłobka 18 i $-2,2$ °C dla żłobka 36 (błąd obliczeń w tabeli 7.1 przyjmuje wartość ujemną). Dla pozostałych 12 punktów temperatura obliczona jest większa od zmierzonej. Największa różnica występuje dla żłobka 30 i wynosi $10,6$ °C, stąd maksymalny błąd obliczeń równa się $19,1\%$. Natomiast najmniejsza różnica zachodzi dla żłobka 36 i wynosi $0,3$ °C, minimalny błąd obliczeń równa się $0,5\%$ (tabela 7.1). W związku z tym błąd obliczeń temperatur w przekładce między prętami zmienia się w przedziale od $0,5\%$ do $19,1\%$ i wynika przede wszystkim z uproszczeń modelu matematycznego dla obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych.

Wykresy obliczonych rozkładów temperatur wzdłuż przekładki międzywarstwowej w strefie żłobkowej uzwojenia stojana przedstawiono na rysunkach 7.9 i 7.10. Symbolem x zaznaczono wartości pomierzone (tabela 7.1). W żłobkach z prętami tych samych faz wykresy temperatur w przekładce mają identyczny przebieg. Wartość maksymalna wynosi ok. $69,5$ °C natomiast minimalna ok. $61,0$ °C (rys. 7.9). W żłobkach z prętami różnych faz uzyskano podobne wyniki obliczeń. Maksymalna wartość temperatury wynosi ok. $66,0$ °C a minimalna ok. $59,5$ °C (rys. 7.10).



Rys. 7.9 Rozkład temperatur w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej wzdłuż strefy żłobkowej uzwojenia o tych samych fazach w żłobku (turbogenerator obciążony mocą 450 MVA):
 a) żłobek numer 3, b) żłobek numer 12, c) żłobek numer 30, d) żłobek numer 48





Rys. 7.10 Rozkład temperatur w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej wzdłuż strefy żłobkowej uzwojenia o różnych fazach w żłobku (turbogenerator obciążony mocą 450 MVA): a) żłobek numer 18, b) żłobek numer 27, c) żłobek numer 36, d) żłobek numer 45

7.5.2. Porównanie obliczeń z pomiarami turbogenerators obciążonego mocą 524 MVA

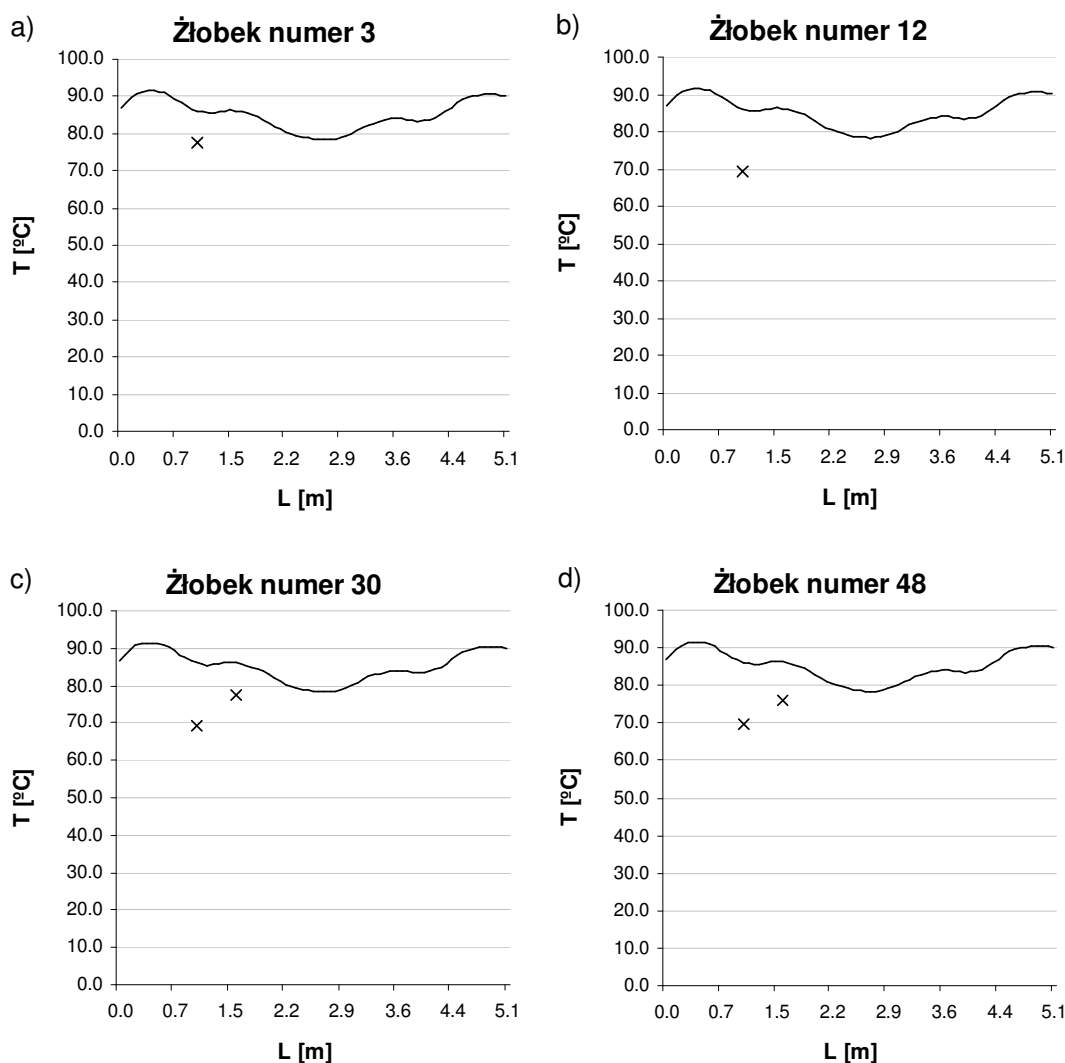
Porównanie temperatur obliczonych i zmierzonych w badanym turbogeneratorze dla 14 różnych miejsc usytuowania czujników rezystancyjnych (RTD) przedstawiono w tabeli 7.2.

Tabela 7.2 Porównanie temperatur obliczonych i zmierzonych wzdłuż przekładki międzywarstwowej dla różnych żłobków badanego turbogenerators obciążonego mocą 524 MVA

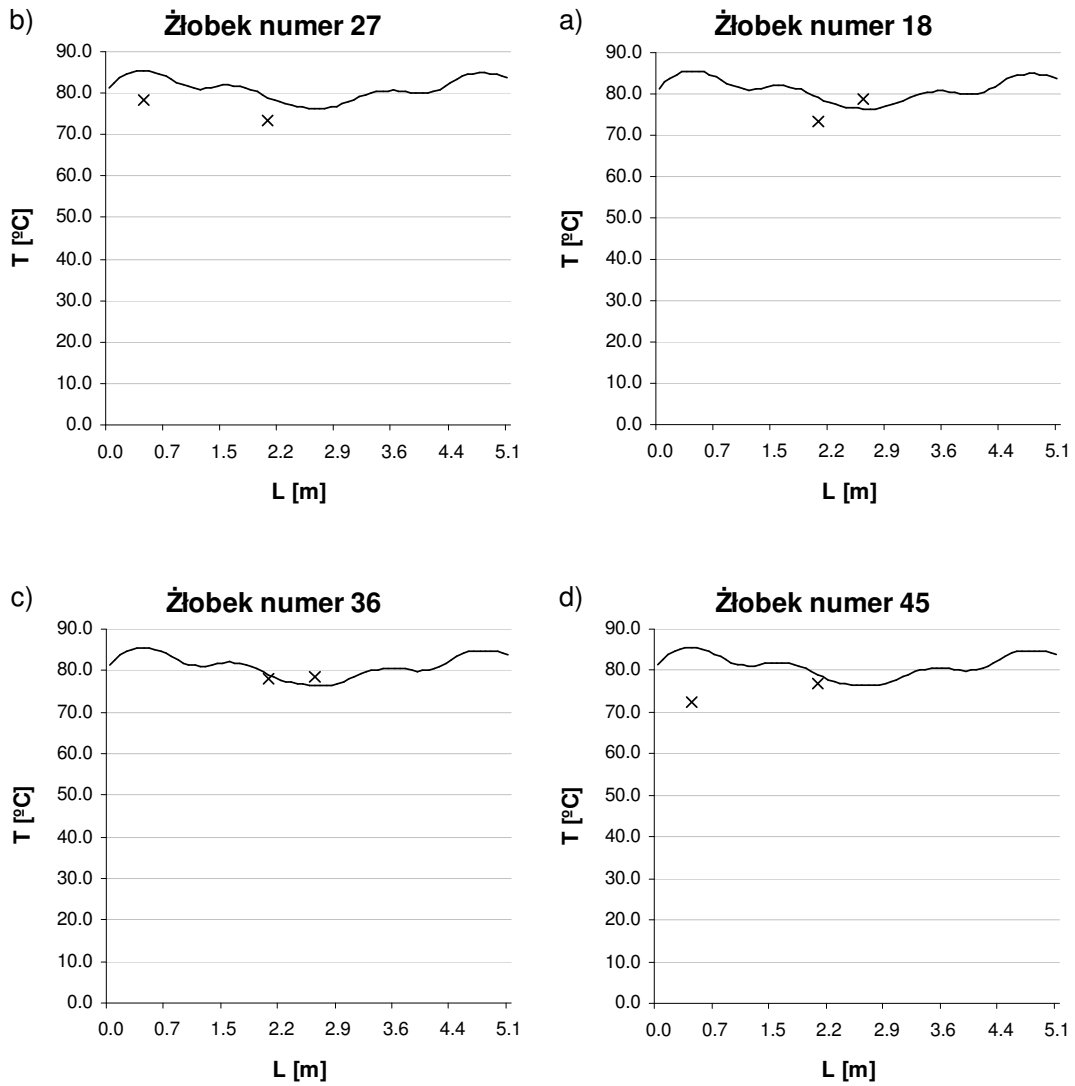
Lp.	Numer żłobka	Pozycja	T _o temperatura obliczona	T _z temperatura zmierzona	T _o – T _z	Błąd obliczeń
		m	°C	°C	°C	%
1	3	0,977	86,2	77,4	8,8	11,4
2	12	0,977	86,2	69,4	16,8	24,2
3	18	2,050	79,0	73,5	5,5	7,5
4	18	2,570	76,4	78,7	-2,3	-2,9
5	27	0,427	85,5	78,5	7,0	8,9
6	27	2,050	79,0	73,4	5,6	7,6
7	30	0,977	86,2	69,1	17,1	24,7
8	30	1,547	86,2	77,3	8,9	11,5
9	36	2,050	79,0	78,1	0,9	1,2
10	36	2,570	76,4	78,3	-1,9	-2,4
11	45	0,427	85,5	72,3	13,2	18,3
12	45	2,050	79,0	77,1	1,9	2,5
13	48	0,977	86,2	69,6	16,6	23,8
14	48	1,547	86,2	76,2	10,0	13,1

Z czternastu przedstawionych punktów pomiarowych, w dwóch punktach temperatura obliczona jest mniejsza od zmierzonej (żłobek 18 i 36 – rys. 7.12). Różnica temperatury zmierzonej i obliczonej wynosi $-2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla żłobka 18 i $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla żłobka numer 36 (błąd obliczeń w tabeli 7.2 przyjmuje wartość ujemną). Dla reszty punktów temperatura obliczona jest większa od zmierzonej. Największa różnica występuje dla żłobka 30 i wynosi $17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, stąd maksymalny błąd obliczeń równa się $24,7\%$. Natomiast najmniejsza różnica jest dla żłobka 36 i wynosi $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, minimalny błąd obliczeń równa się $1,2\%$ (tabela 7.2). W związku z tym błąd obliczeń temperatur w przekładce między prętami zmienia się w przedziale od $1,2\%$ do $24,7\%$.

Wykresy obliczonych rozkładów temperatur wzdłuż przekładki między warstwową w strefie żłobkowej uzwojenia stojana przedstawiono na rysunkach 7.11 i 7.12. Symbolem x zaznaczono wartości pomierzone (tabela 7.2). W żłobkach zawierających pręty tych samych faz wykresy temperatur mają identyczny przebieg. Wartość maksymalna wynosi ok. $91,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ natomiast minimalna ok. $79,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 7.11). W żłobkach z prętami różnych faz uzyskano podobny kształt przebiegu jak w żłobkach z prętami tych samych faz. Maksymalna wartość temperatury wynosi ok. $86,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a minimalna ok. $76,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 7.12).



Rys. 7.11 Rozkład temperatury w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej wzdłuż strefy żłobkowej uzwojenia o tych samych fazach w żłobku (turbogenerator obciążony mocą 524 MVA): a) żłobek numer 3, b) żłobek numer 12, c) żłobek numer 30, d) żłobek numer 48



Rys. 7.12 Rozkład temperatury w przekładce między prętami warstwy górnej i dolnej wzdłuż strefy żłobkowej uzwojenia o różnych fazach w żłobku (turbogenerator obciążony mocą 524 MVA):
 a) żłobek numer 18, b) żłobek numer 27, c) żłobek numer 36, d) żłobek numer 45

8. ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATUR W STREFIE ŻŁOBKOWEJ UZWOJENIA STOJANA

W zależności od typu przeplotu Roebela zmienia się rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości i długości pręta, powodując zmianę temperatury. W dużych generatorach, z długimi prętami, wzrost temperatury miedzi i żelaza stojana może prowadzić do trwałych deformacji uzwojeń stojana i zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej izolacji. Stąd analiza rozkładu temperatur w prętach dla różnych typów przeplotu Roebela może mieć istotne znaczenie w prognozowaniu uszkodzeń termicznych i termomechanicznych.

8.1. Wpływ przeplotu przewodów elementarnych na rozkład temperatur w pręcie uzwojenia stojana

Analizę rozkładu przyrostów temperatur w uzwojeniu stojana prowadzono dla wybranego typu turbogeneratorsa o pośrednim systemie chłodzenia obciążonego mocą 450 MVA.

Obliczenia cieplne wykonano za pomocą programu Bar, wykorzystując model cieplny z metodą schematów cieplnych.

Rozkłady temperatur wzdłuż długości i wysokości pręta obu warstw wyznaczono dla czterech typów przeplotu przewodów elementarnych:

- przeplotu tylko w strefie żłobkowej typu 0+360+0 (rys. 8.1, 8.2),
- przeplotu w strefie żłobkowej i czołowej typu 90+360+90 (8.3, 8.4),
- niepełnego przeplotu w strefie żłobkowej typu 0+334+0 (8.5, 8.6),
- przeplotu w strefie żłobkowej typu 0+540+0 (8.7, 8.8).

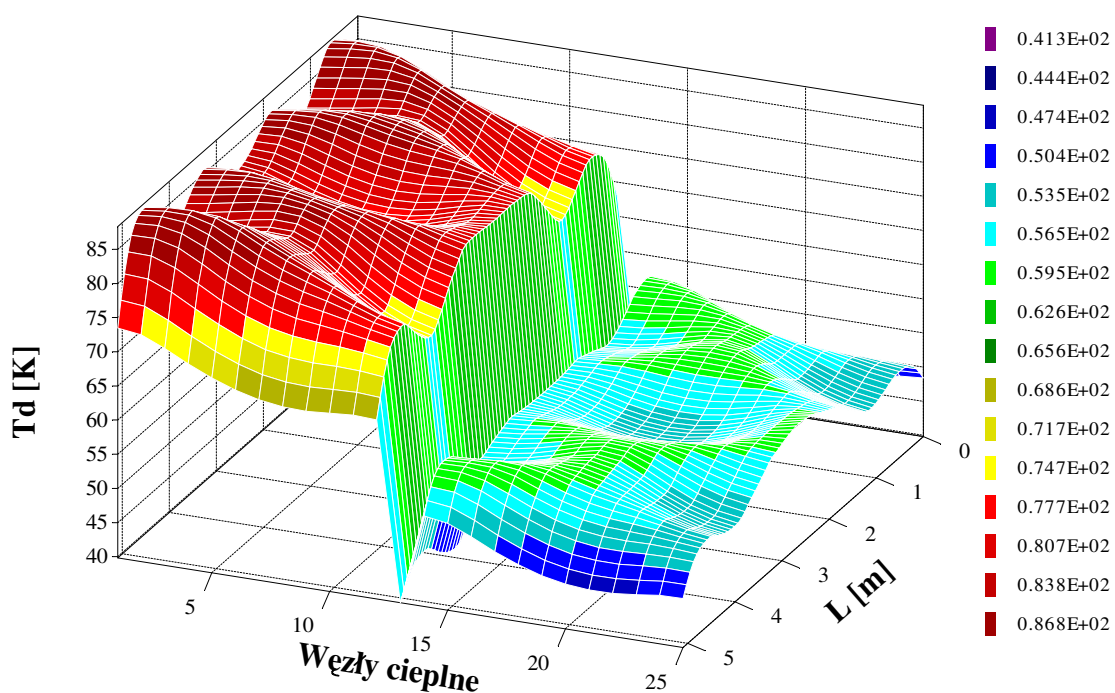
Obliczenia wykonano dla żłobków 3, 12, 9, 27. (rys. 8.1÷8.8). Pręty w żłobkach 3 i 12 należą do tych samych faz, natomiast w żłobkach 18 i 27 do różnych faz. Obliczenia rozkładu przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej dla różnych typów przeplotu Roebela przeprowadzono dla takich samych założeń jakie przyjęto w punkcie 7.4 pracy.

8.1.1. Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przeplotem typu 0+360+0

Wyniki obliczeń przyrostu rozkładu temperatur w prętach warstwy dolnej i górnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogeneratorsa dla przeplotu typu 0+360+0 przedstawiono na wykresach 8.1 i 8.2.

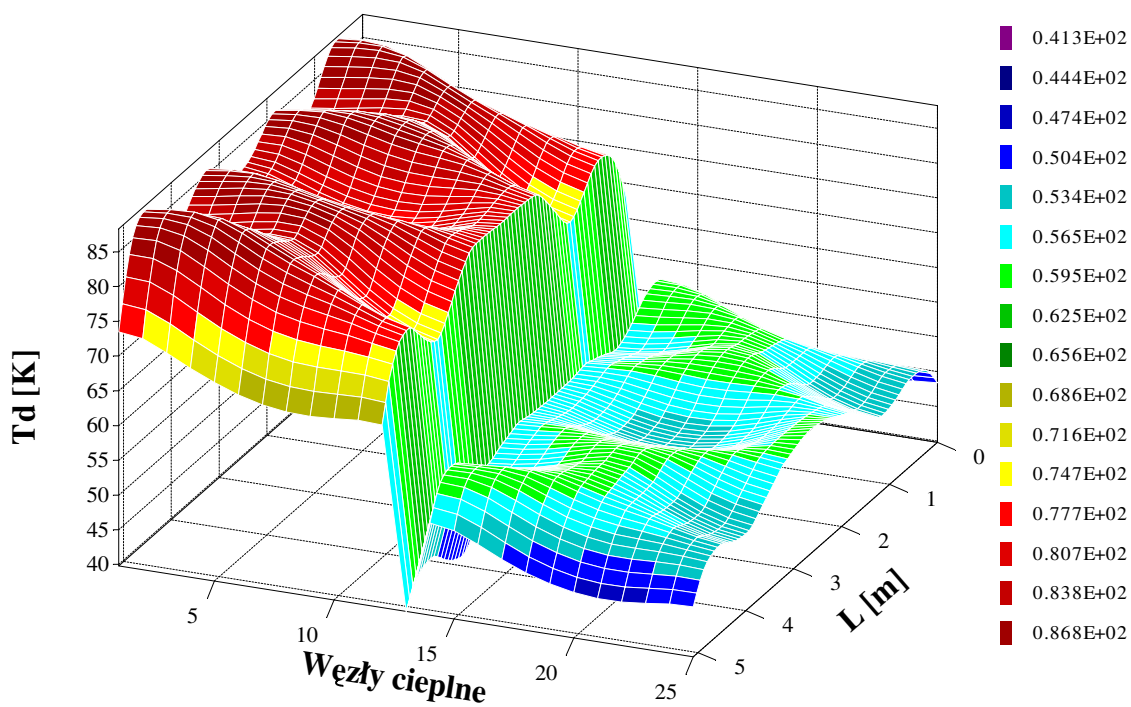
a)

Przeplot 0+360+0; żłobek 3



b)

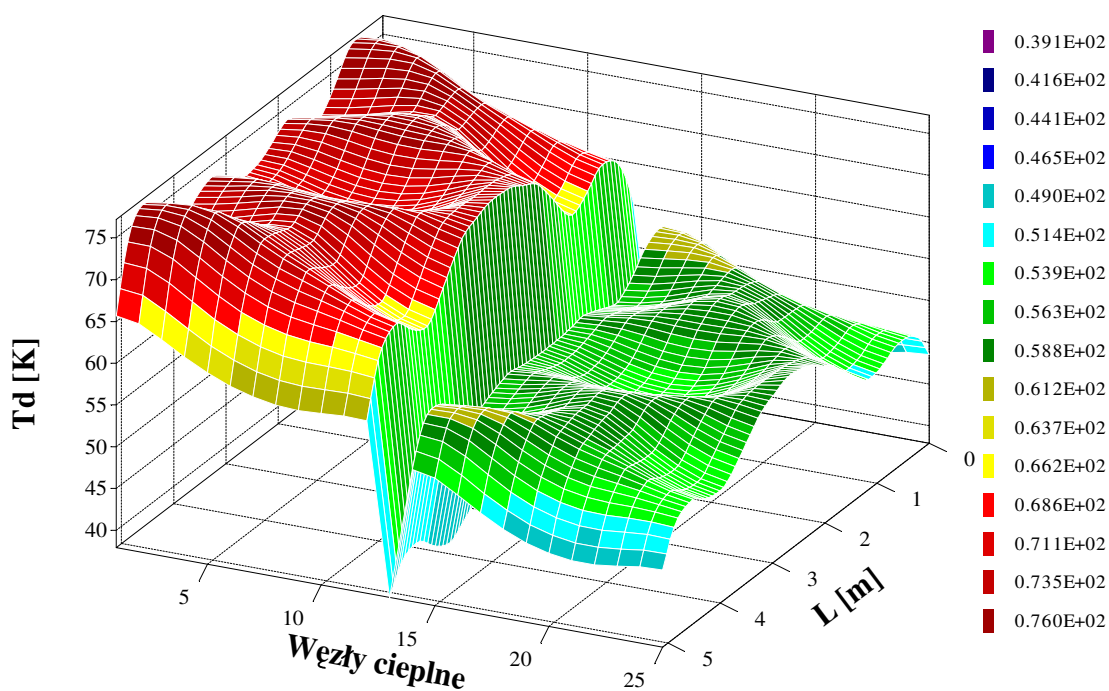
Przeplot 0+360+0; żłobek 12



Rys. 8.1 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o tych samych fazach w żłobku (transpozycja 0+360+0): a) żłobek 3, b) żłobek 12

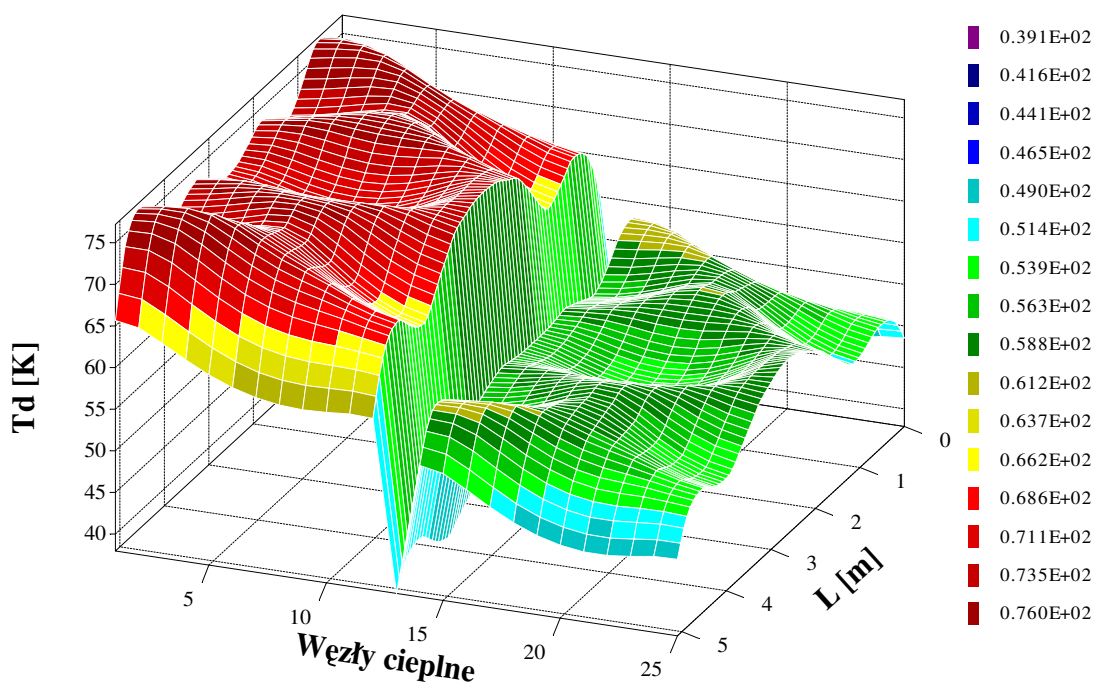
a)

Przeplot 0+360+0; żłobek 9



b)

Przeplot 0+360+0; żłobek 27



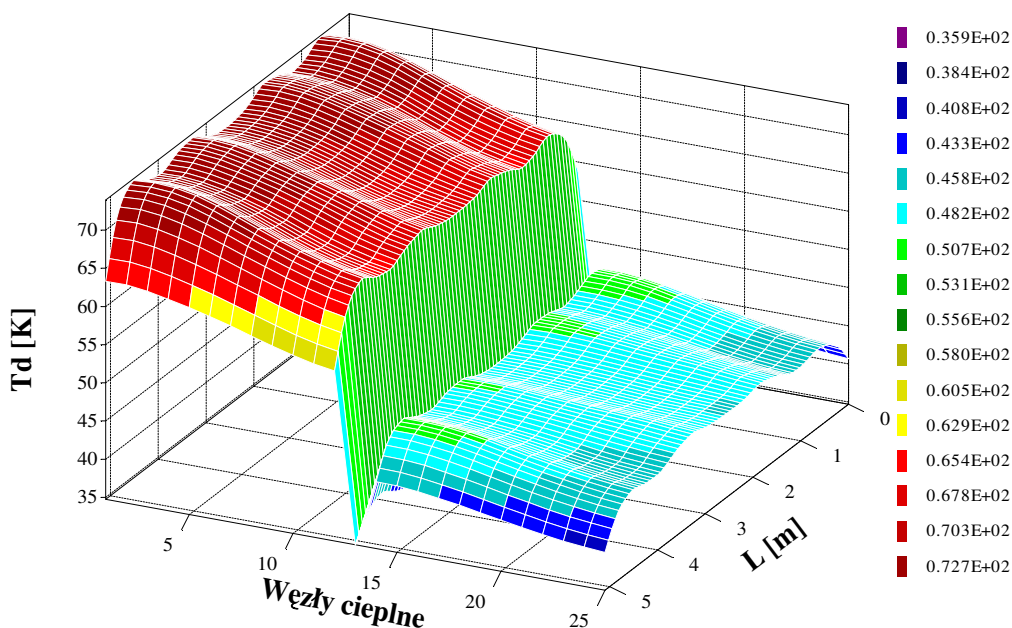
Rys. 8.2 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o różnych fazach w żłobku (transpozycja 0+360+0): a) żłobek 9, b) żłobek 27

8.1.2. Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepływem typu 90+360+90

Wyniki obliczeń przyrostu rozkładu temperatur w prętach warstwy dolnej i górnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogeneratorsa dla przepływu typu 90+360+90 przedstawiono na wykresach 8.3 i 8.4.

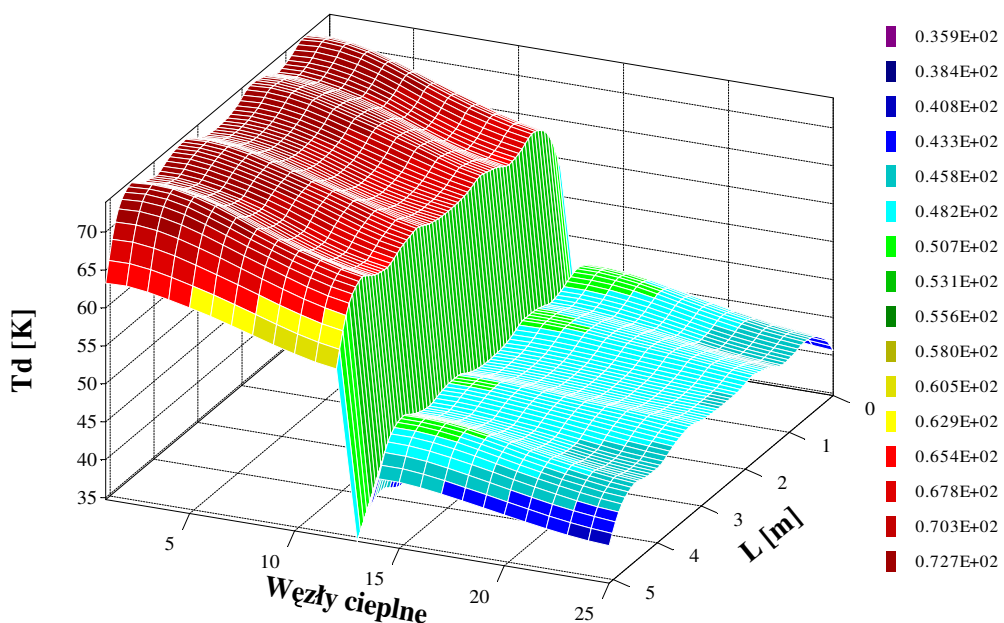
a)

Przeplot 90+360+90; żłobek 3



b)

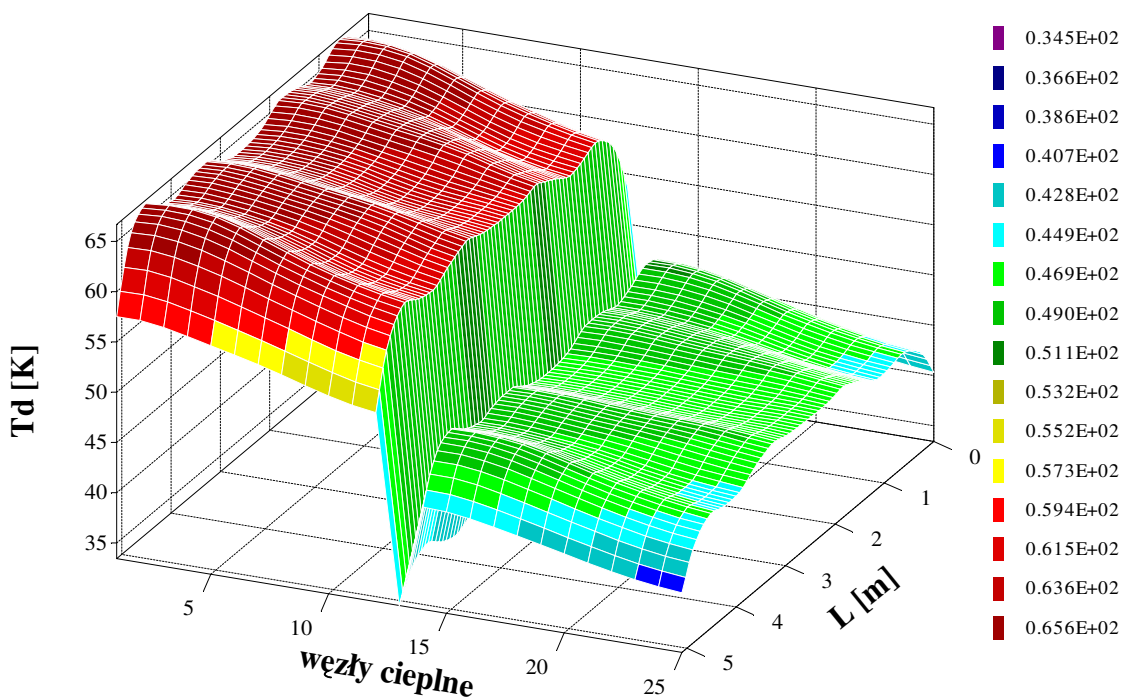
Przeplot 90+360+90; żłobek 12



Rys. 8.3 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o tych samych fazach w żłobku (transpozycja 90+360+90): a) żłobek 3, b) żłobek 12

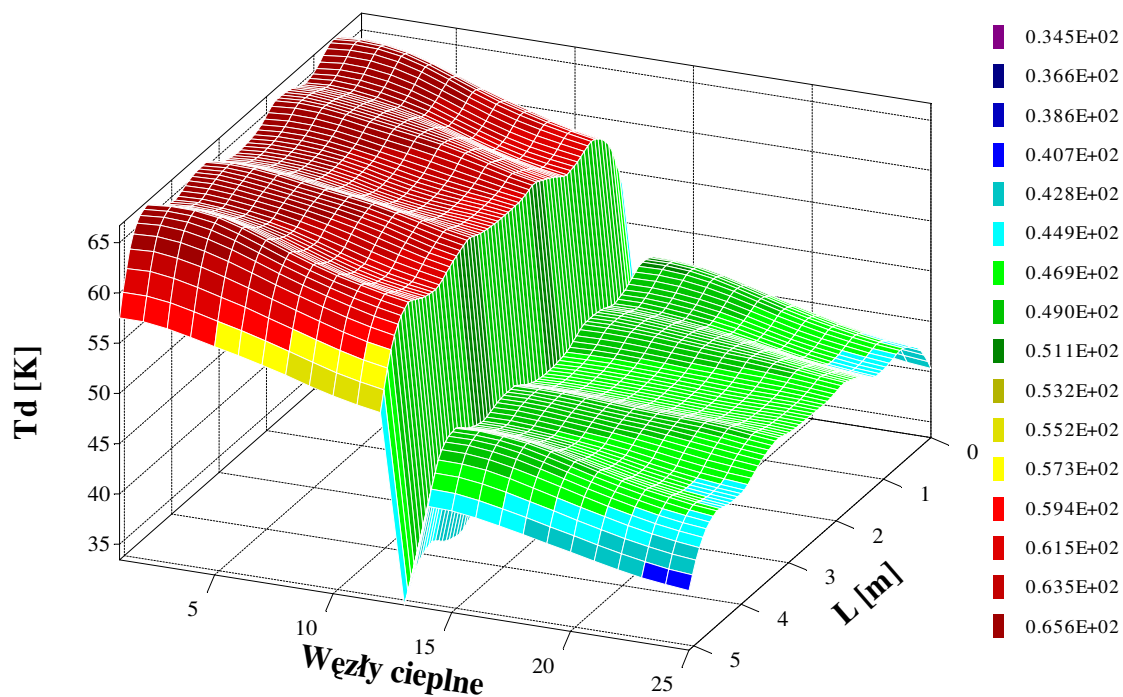
a)

Przeplot 90+360+90; żłobek 9



b)

Przeplot 90+360+90; żłobek 27



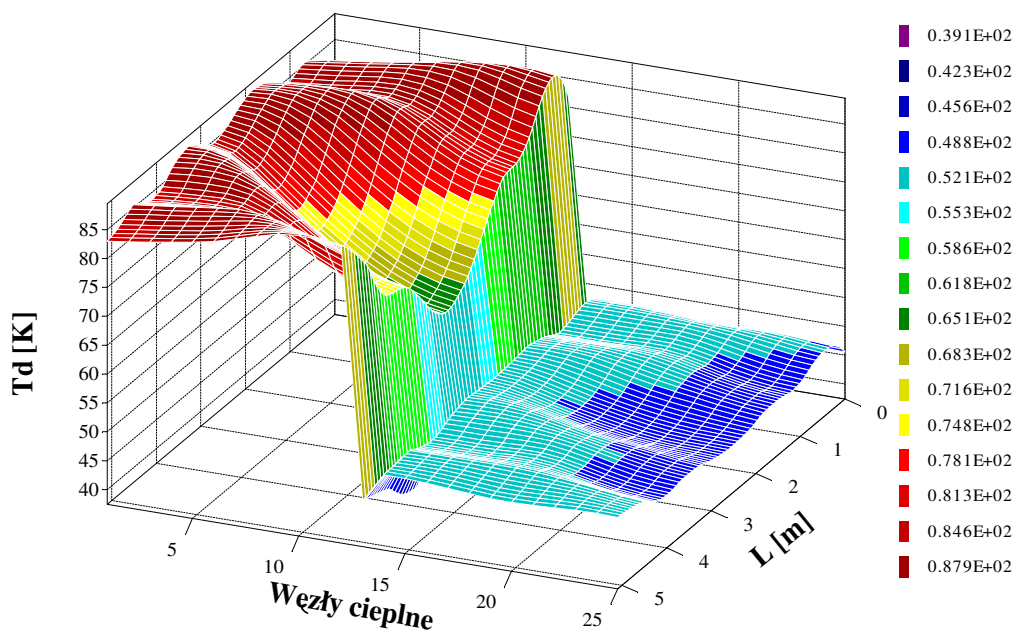
Rys. 8.4 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o różnych fazach w żłobku (transpozycja 90+360+90): a) żłobek 9, b) żłobek 27

8.1.3. Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepływem typu 0+334+0

Wyniki obliczeń rozkładu temperatur w prętach warstwy dolnej i górnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogeneratora dla przepływu typu 0+334+0 przedstawiono na wykresach 8.5 i 8.6.

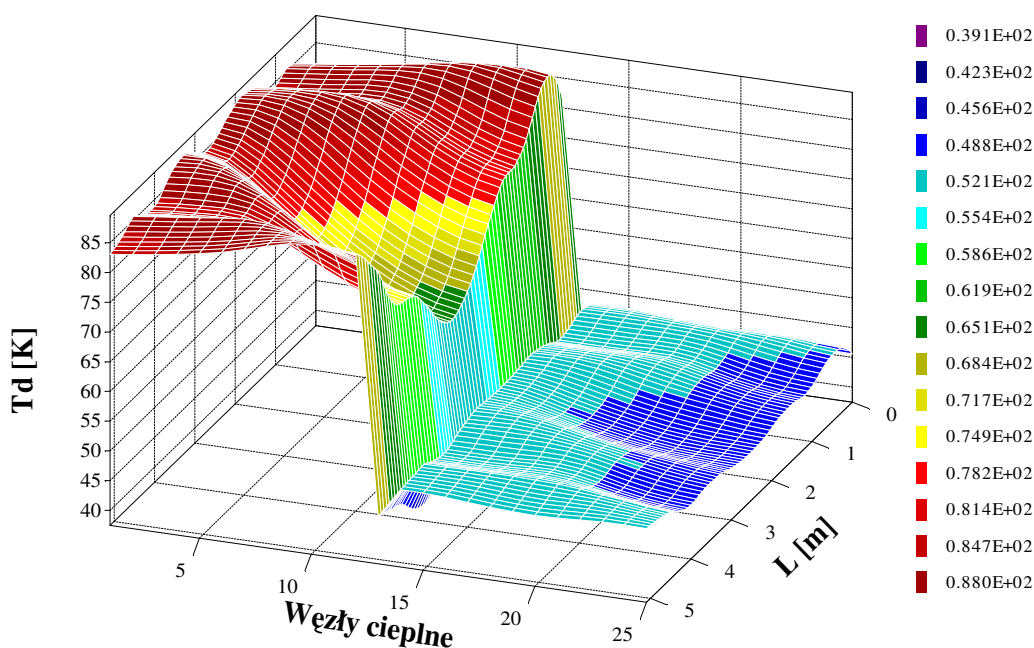
a)

Przeplot 0+334+0; żłobek 3



b)

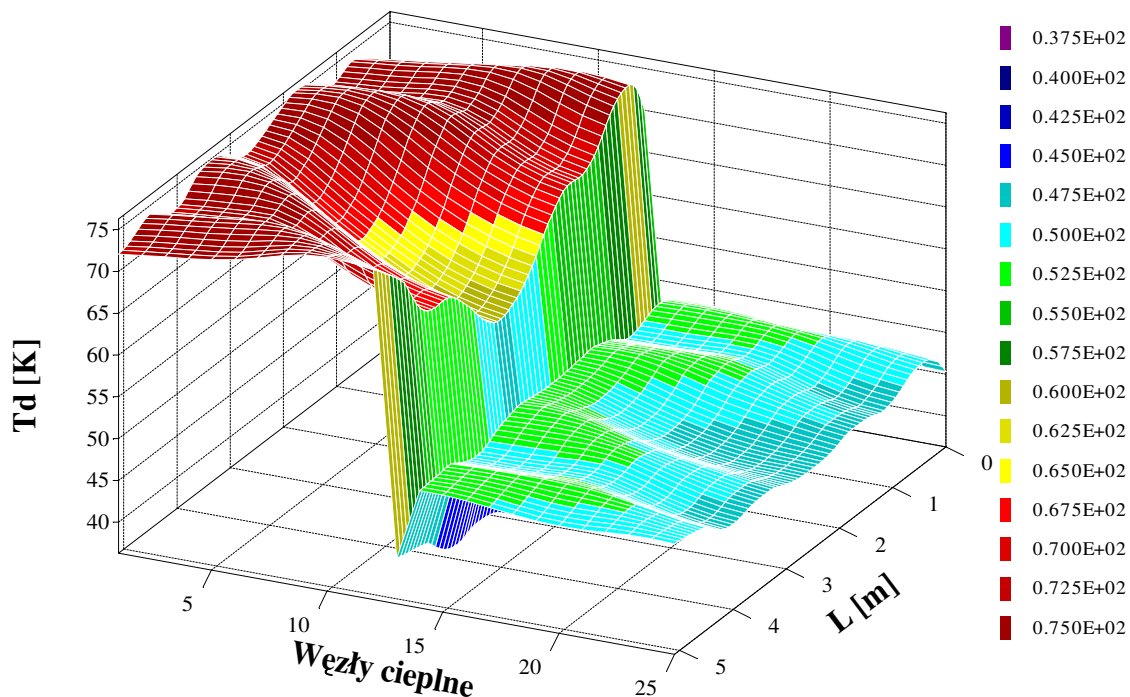
Przeplot 0+334+0; żłobek 12



Rys. 8.5 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o tych samych fazach w żłobku (transpozycja 0+334+0): a) żłobek 3, b) żłobek 12

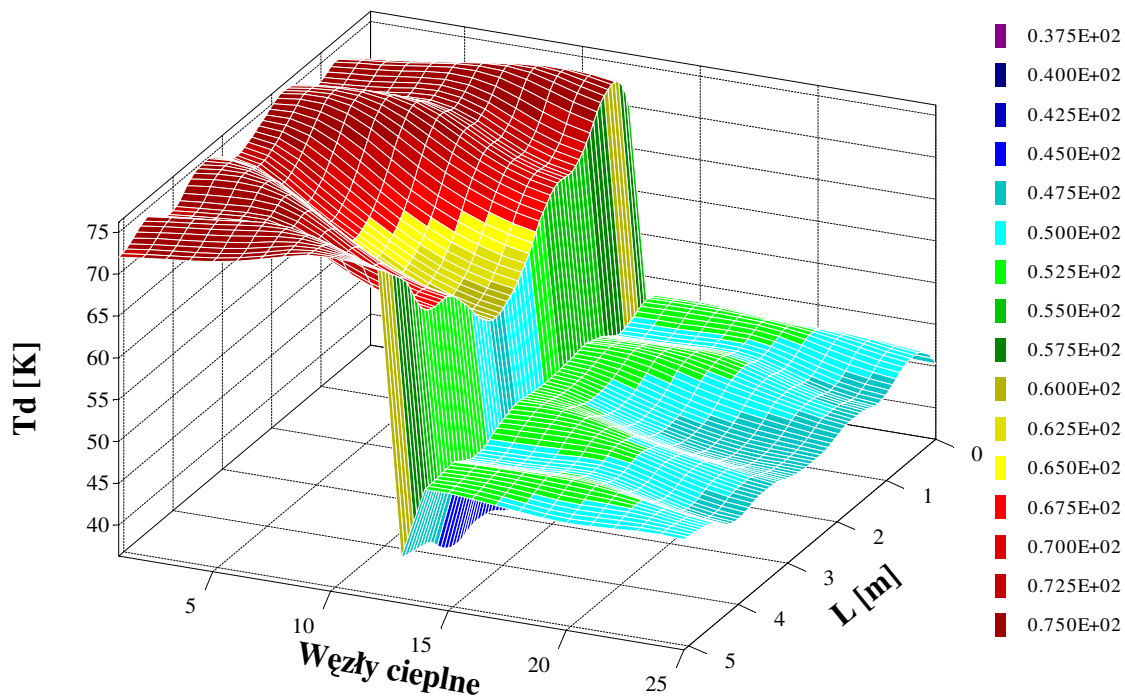
a)

Przeplot 0+334+0; żłobek 9



b)

Przeplot 0+334+0; żłobek 27



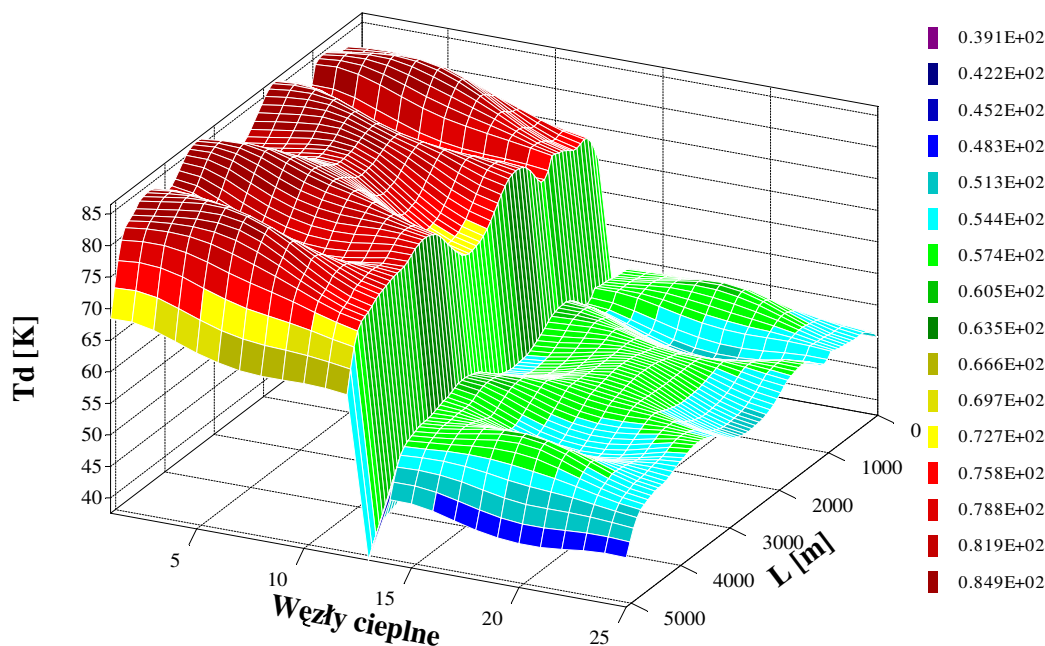
Rys. 8.6 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o różnych fazach w żłobku (transpozycja 0+334+0): a) żłobek 9, b) żłobek 27

8.1.4. Obliczanie przyrostu temperatur w prętach z przepływem typu 0+540+0

Wyniki obliczeń przyrostu rozkładu temperatur w prętach warstwy dolnej i górnej w obszarze strefy żłobkowej uzwojenia stojana badanego turbogeneratorsa dla przepływu typu 0+540+0 przedstawiono na wykresach 8.7 i 8.8.

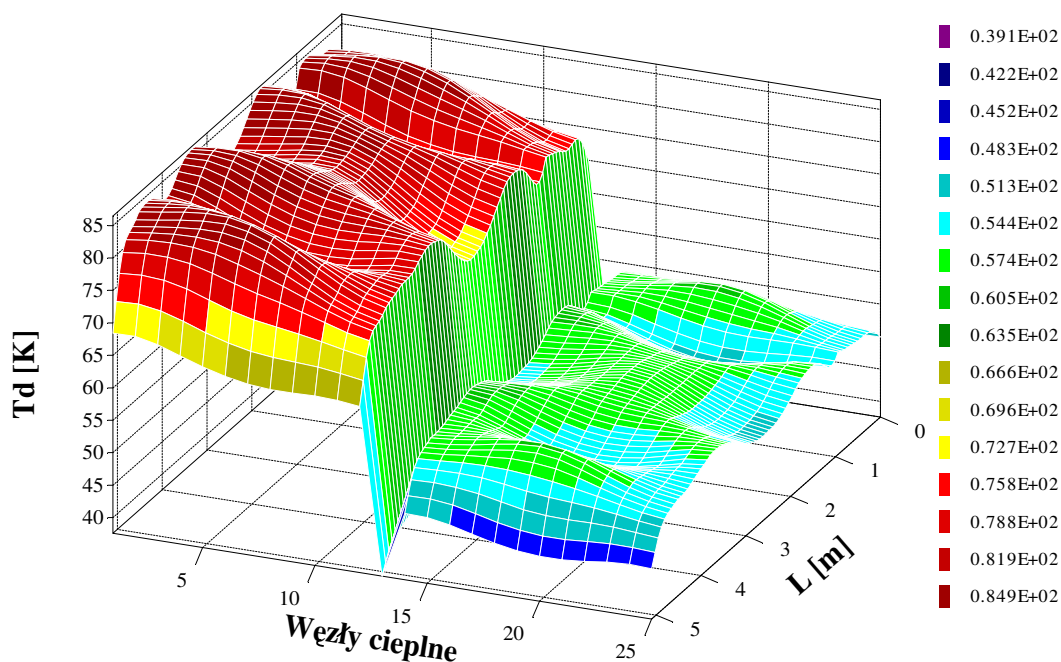
a)

Przeplot 0+540+0; żłobek 3



b)

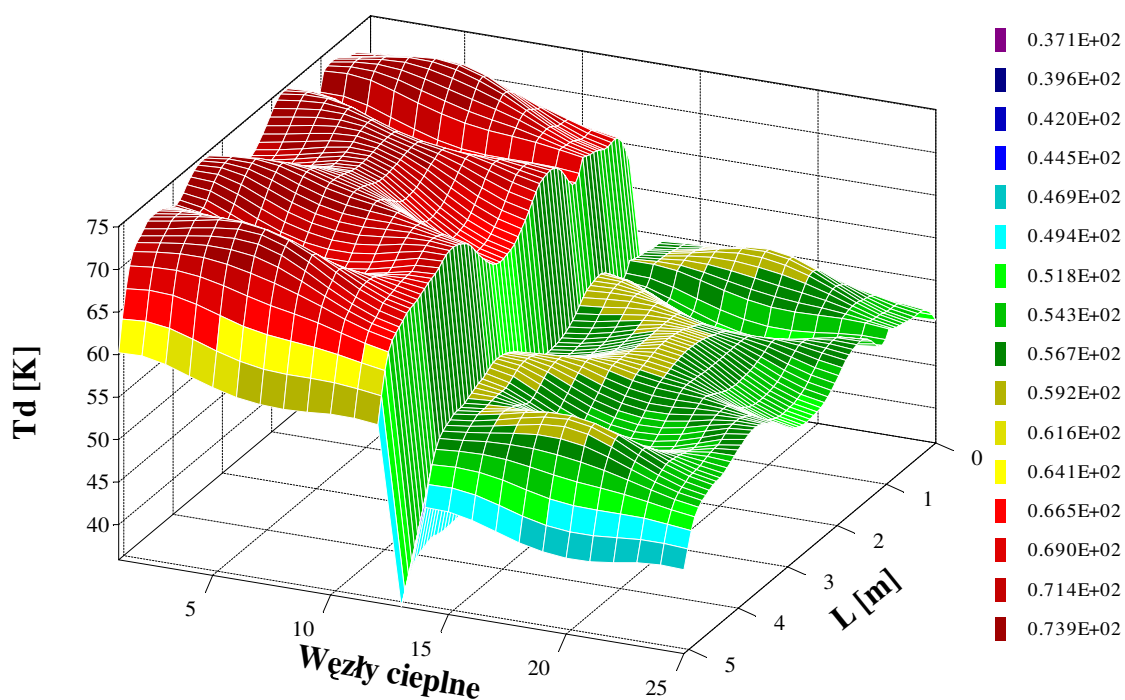
Przeplot 0+540+0; żłobek 12



Rys. 8.7 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o tych samych fazach w żłobku (transpozycja 0+540+0): a) żłobek 3, b) żłobek 12

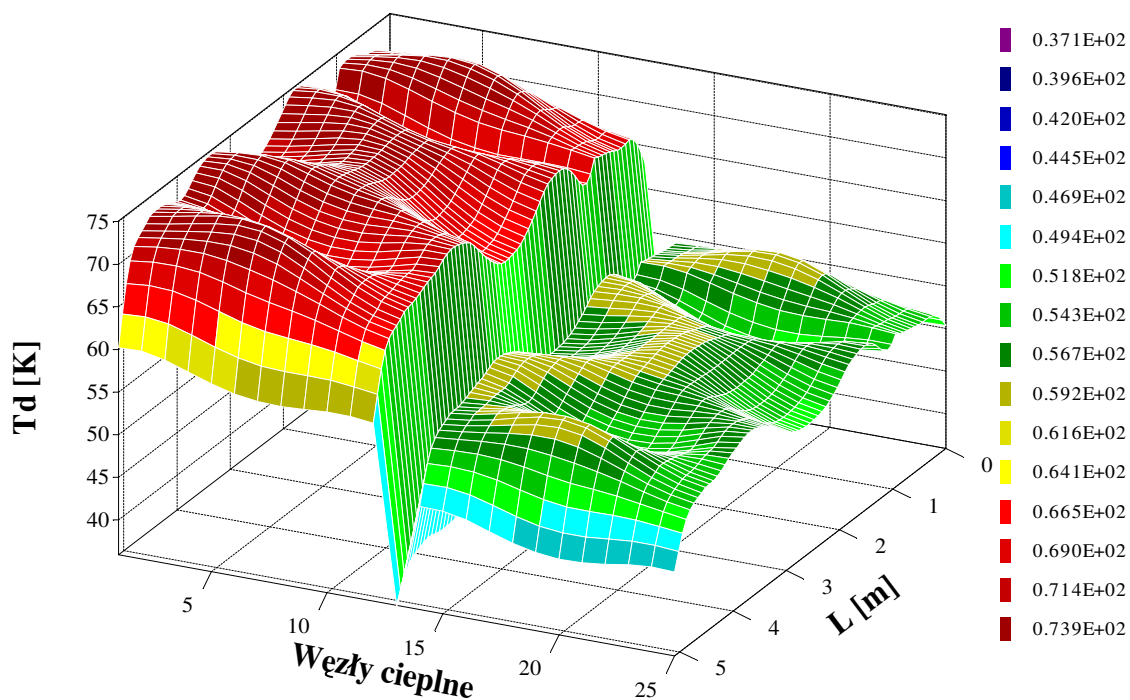
a)

Przeplot 0+540+0; żłobek 9



b)

Przeplot 0+540+0; żłobek 27



Rys. 8.8 Rozkład przyrostu temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej o różnych fazach w żłobku (transpozycja 0+540+0): a) żłobek 9, b) żłobek 27

8.2. Ocena obliczeń

Rozkład przyrostów temperatur w prętach warstwy górnej i dolnej z przeplotem 0+360+0 jest bardzo nierównomierny (rys. 8.1, 8.2). Maksymalny przyrost temperatury zaobserwowano w pręcie górnym i wynosi dla żłobka 3 i 12 ok. 88 K (rys. 8.1), a dla żłobka numer 9 i 27 ok. 77 K (rys. 8.2). Minimalna wartość temperatury w tym pręcie wynosi ok. 70 K w żłobkach 3 i 12 oraz żłobkach 9 i 27 ok. 66 K. Temperatura pręta dolnego jest znacznie niższa od temperatury pręta górnego. Maksymalny przyrost w prętach dolnych w żłobkach 3 i 12 wynosi ok. 57 K, a minimalny ok. 47 K. Pręty obu warstw są oddzielone przekładką izolacyjną, która stanowi dobrą izolację termiczną i nie występują straty. W związku z tym nie ma przekazywania ciepła z pręta górnego do pręta dolnego, zmiana temperatury między obu warstwami następuje skokowo (rys. 8.1, 8.2). Przyrost temperatury przekładki zmienia się wzdłuż długości maszyny w przedziale 40÷44 K dla żłobków 3 i 12 oraz w przedziale 38÷42 K dla żłobków 9 i 27. Wyższa temperatura pręta warstwy górnej od dolnej wynika przede wszystkim z większych strat dodatkowych, powstałych od prądów wirowych. Przepływ pręta dolnego oddziałuje negatywnie na pręt górny, zwiększając występujące w nim prądy wirowe i wytwarzane od nich straty. Przy zastosowaniu transpozycji 0+360+0 pręt dolny nie wpływa na powstające w pręcie górnym straty od prądów cyrkulacyjnych.

Przeplot 90+360+90 daje lepszy rozkład temperatur w porównaniu z przeplotem 0+360+0. Uzyskano bardziej równomierny rozkład wzdłuż długości i wysokości pręta warstwy górnej i dolnej oraz mniejsze wartości przyrostów temperatur (rys. 8.3, 8.4).

Lepszy rozkład temperatur jest efektem zastosowania dodatkowej transpozycji na czołach maszyny. Uzyskano korzystniejszą kompensację prądów cyrkulacyjnych w pręcie i mniejsze straty od tych prądów, w stosunku do kompensacji, jaka występuje przy braku tej transpozycji. Maksymalny przyrost temperatury w pręcie górnym wynosi ok. 74 K dla żłobka 3 i 12 (rys. 8.3) oraz ok. 67 K dla żłobka 9 i 27 (rys. 8.4). Natomiast wartość minimalnego przyrostu temperatury dla żłobka 3 i 12 wynosi ok. 65 K, a dla żłobka 9 i 27 ok. 53 K.

Wykresy temperatur w pręcie górnym i dolnym dla żłobka 3, 12 i 9, 27 różnią się wartością maksymalnych i minimalnych temperatur, natomiast kształt wykresu jest taki sam. Przynależność prętów do tej samej lub różnych faz w żłobku nie wpływa na kształt przebiegu, lecz na wartość uzyskanych przyrostów. Przyrost temperatur w przekładce między prętami zmienia się wzdłuż długości maszyny w przedziale 36÷39 K dla żłobków 3 i 12 oraz w przedziale 34÷38 K dla żłobków 9 i 27. Przekładka stanowi bardzo dobrą izolację termiczną. Temperatura pręta dolnego jest znacznie niższa od pręta górnego. Wartość maksymalna wynosi ok. 49 K, minimalna ok. 41 K i jest identyczna dla żłobka 3, 12, 9 i 27. Wyższa temperatura warstwy górnej od dolnej wynika przede wszystkim z większych strat dodatkowych od prądów wirowych i cyrkulacyjnych. Podobnie jak w przypadku przeplotu 0+360+0, przepływ pręta dolnego powoduje zwiększenie występujących w pręcie górnym prądów wirowych i wytwarzanych od nich strat. Przy zastosowaniu transpozycji 90+360+90 nie występują prądy cyrkulacyjne w strefie żłobkowej w wyniku całkowitej kompensacji napięć indukowanych od strumienia rozproszenia w tej strefie.

Przeplot typu 0+334+0 jest niepełnym przeplotem Roebela wykonanym tylko w strefie żłobkowej uzwojenia. Otrzymano w ten sposób niepełną kompensację napięć indukowanych w strefie żłobkowej, które kompensują niezrównoważone napięcie indukowane w strefach czołowych turbogenerатора. Wykresy temperatur w prętach przy zastosowaniu tego przeplotu mają nieregularny przebieg (rys. 8.5, 8.6). Minimalna wartość przyrostu temperatury w pręcie górnym wynosi ok. 65 K w żłobkach 3 i 12 (rys. 8.5) oraz ok. 58 K w żłobkach 9 i 27 (rys. 8.6). Maksymalna temperatura pręta górnego w żłobkach 3 i 12 wynosi ok. 88 K, natomiast w żłobkach 9 i 27 ok. 77 K. Na podstawie porównania rysunków 8.5 i 8.6 wynika, że przynależność prętów do tych samych lub różnych faz w żłobku nie wpływa na kształt

przebiegu temperatury, lecz na wartość uzyskanych przyrostów. Maksymalna wartość temperatury w prętach dolnych wynosi ok. 50 K, minimalna około 46 K i jest taka sama dla wszystkich obliczanych żłobków (żłobek 3, 12, 9, 27). Przepływ pręta warstwy dolnej powoduje zwiększenie strat dodatkowych od prądów wirowych występujących w pręcie górnym i większą wartość temperatury.

Rozkład przyrostu temperatur w prętach z przepłotem typu 0+540+0, przybiera podobny kształt jak w prętach z przepłotem typu 0+360+0. Występuje nierównomierny rozkład temperatur wzdłuż wysokości i długości pręta warstwy górnej i dolnej strefy żłobkowej uzwojenia (rys. 8.7, 8.8). Maksymalny przyrost w pręcie górnym wynosi dla żłobka 3 i 12 ok. 83 K (rys. 8.7), a dla żłobka 9 i 27 ok. 74 K (rys. 8.8). Minimalna wartość przyrostów temperatur równa się ok. 72 K dla żłobków 3 i 12 oraz ok. 66 K dla żłobków 9 i 27. Maksymalny przyrost temperatur w prętach dolnych dla żłobków 3, 9, 12, 27 jest taki sam i wynosi ok. 57 K. Przyrost temperatur w przekładce między warstwami zmienia się wzdłuż długości maszyny w przedziale $43 \div 39$ K dla żłobków 3 i 12 oraz w przedziale $42 \div 38$ K dla żłobków 9 i 27. Wykres rozkładu przyrostu temperatur w pręcie dolnym jest podobny do rozkładu w pręcie górnym. Różnica występuje dla maksymalnych i minimalnych wartościach temperatur. Większy przyrost temperatur w warstwie górnej wynika z oddziaływania przepływu pręta dolnego na występujące w pręcie górnym prądy wirowe i powstające od nich straty. Podobnie jak dla przepłotu 0+360+0 pręt dolny w strefie żłobkowej nie wpływa na powstające w pręcie górnym straty od prądów cyrkulacyjnych. Po zastosowaniu transpozycji 0+540+0 występuje całkowita kompensacja napięć indukowanych od strumienia rozproszenia w strefie żłobkowej maszyny.

9. ZAKOŃCZENIE

9.1. Podsumowanie

Przedmiotem rozważań w niniejszej pracy są zagadnienia sprzężeń magnetycznych z prętami uzwojenia stojana w strefie żłobkowej i czołowej turbogeneratorsa, wpływ transpozycji przewodów elementarnych na rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta, obliczenia i minimalizacje strat, wyznaczenie rozkładu temperatur w strefie żłobkowej uzwojenia stojana.

Głównym celem pracy było opracowanie metody obliczeń umożliwiającej wyznaczenie rozkładu temperatury w pręcie dla różnych transpozycji przewodów elementarnych w strefie żłobkowej i czołowej maszyny z uwzględnieniem niejednorodnego rozkładu źródeł ciepła w uzwojeniu oraz temperatury czynnika chłodzącego.

Zakres pracy obejmował część teoretyczną i praktyczną. W części teoretycznej opracowano modele matematyczne geometrii pręta, zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w uzwojeniu stojana korzystając z dostępnej literatury i bezpośrednich konsultacji z konstruktorami biura technicznego fabryki generatorów.

W części praktycznej opracowano algorytm i napisano program komputerowy **Bar**, w którym wykorzystano opracowane modele matematyczne. Wykonano obliczenia geometrii, elektromagnetyczne i cieplne uzwojenia. Wyniki obliczeń zweryfikowano przez porównanie z pomiarami temperatur występujących w pręcie obciążonego turbogeneratorsa fizycznego.

W pracy przedstawiono następujące wyniki obliczeń:

- napięć indukowanych w przewodach elementarnych strefy czołowej uzwojenia stojana od strumienia magnetycznego pozostałych prętów strefy,
- rozkładu gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta z transpozycją Roebela badanego turbogeneratorsa,
- wykresu strat dodatkowych w strefie żłobkowej pręta uzwojenia stojana badanego turbogeneratorsa,
- rozkładu temperatury wzdłuż wysokości i długości pręta warstwy górnej i dolnej dla różnych żłobków badanego turbogeneratorsa obciążonego mocą 450 MVA,
- rozkładu temperatury wzdłuż przekładki międzywarstwowej dla różnych żłobków badanego turbogeneratorsa obciążonego mocą 450 MVA i 524 MVA,
- analizę rozkładu temperatury w strefie żłobkowej pręta uzwojenia stojana badanego turbogeneratorsa dla różnych typów przepłotu Roebela.

9.2. Wnioski

Na podstawie opracowanego modelu matematycznego ujmującego:

- sprzężenia magnetyczne przewodów elementarnych zmieniających położenie wzdłuż pręta dla różnych przepływów w strefie żłobkowej oraz połączeń czołowych,
- indukowane napięcia oraz płynące prądy (gęstość prądów) w przewodach elementarnych turbogeneratorskiego,

wyznaczono straty w poszczególnych fragmentach prętów uzwojenia stojana.

Korzystając z opracowanego modelu matematycznego do obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych, z zastosowaniem metody schematów cieplnych, wyznaczono temperatury poszczególnych przewodów elementarnych dla ich różnych przepływów w strefie żłobkowej. W obliczeniach cieplnych uwzględniono przewodnictwo ciepła przez izolacje i rdzeń, przejmowanie ciepła od przewodów i blach do czynnika chłodzącego w kanałach wentylacyjnych, szczelinie powietrznej i zewnętrznej powierzchni stojana. Za pomocą analizy rozkładu przyrostu temperatur wykazano wpływ transpozycji przewodów elementarnych na rozptyw ciepła i możliwość kształtowania temperatur w przecie strefy żłobkowej turbogeneratorskiego za pomocą przepływu Roebela.

Obliczenia elektromagnetyczne i cieplne, wykonane za pomocą opracowanego programu komputerowego **Bar**, umożliwiają wyznaczenie pola temperatur w prętach uzwojenia stojana turbogeneratorskiego i dobór takiego przepływu przewodów elementarnych, aby rozkład temperatury był równomierny i nie przekraczał wartości dopuszczalnych – co dowodzi postawionej tezy pracy.

Porównanie wyników obliczeń z pomiarami temperatur w turbogeneratorskiej, pozwala stwierdzić ich zadowalającą zgodność oraz poprawność wykorzystanych w nich metod i opracowanych modeli matematycznych.

Zdaniem autora, teza rozprawy doktorskiej została udowodniona a cel pracy w pełni zrealizowany.

Przedstawione metody obliczeniowe i ich programowa realizacja jest ciekawym wyzwaniem i będzie obiektem dalszych zainteresowań badawczych autora pracy.

9.3. Najważniejsze osiągnięcia

Do najważniejszych osiągnięć autor zalicza:

- opracowanie metody wyznaczania strat dodatkowych w strefie żłobkowej prętów uzwojenia stojana dla różnych transpozycji przewodów elementarnych,
- opracowanie modelu matematycznego do obliczeń cieplnych z zastosowaniem metody schematów cieplnych, opisującego rozkładu temperatur w prętach uzwojenia stojana dla różnych typów przepływu Roebela,
- opracowanie algorytmu metody obliczeniowej umożliwiającej wyznaczenie rozkładu temperatury w prętach dla różnych transpozycji przewodów elementarnych w strefie żłobkowej i czołowej maszyny, tj. niejednorodnego rozkładu źródeł ciepła w uzwojeniu, oraz temperatury czynnika chłodzącego,
- opracowanie programu komputerowego **Bar** (w którym wykorzystano opracowane modele matematyczne), wykonanie obliczeń wielkości elektromagnetycznych i cieplnych w prętach uzwojenia wybranego modelu turbogeneratorskiego.

LITERATURA

- [1] ASHWORTH D.S.,HAMMOND P., *The calculation of the magnetic field of rotating machines*. Proceedings. IEE, Vol. 108 A, 1961, p. 526–548 .
- [2] BENNINGTON B. J., BRENNER W. C. *Transposed conductor for dynamo-electric machines*. US Patent 3 614 497 (1971)
- [3] BENNINGTON B. J., BRENNER W. C., *Transposition in turbogenerator coil sides short circuited at each end.* IEEE, Transaction on Power Apparatus and Systems Vol. Pas.-89, No. 8, 1970, p. 1915–1921.
- [4] CARPENTER C.J., *The application of the method of images to machine end-winding fields*. Proceedings. IEE,1960 part A, p 487–500.
- [5] DĄBROWSKI M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT Warszawa 1994.
- [6] GURAZDOWSKI D., ZAWILAK J.: *Wpływ przeplotu przewodów elementarnych na strumień skojarzony z prętem turbogeneratorsa*. W: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWr. 2003, 89–100, 12 rys., bibliogr. 6 poz. Summ. (Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 54, Studia i Materiały, ISSN 0084-294X; nr 23)I29/03/I-066.
- [7] GURAZDOWSKI D., ZAWILAK J.: *Indukcja magnetyczna i napięcie indukowane w strefie połączeń czołowych pręta turbogeneratorsa*. W: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWr. 2004, 149–158, 7 rys. 1 tab. bibliogr. 12 poz. Summ. (Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 56, Studia i Materiały, ISSN 1733-0718; nr 24) I29/04/I-089.
- [8] GURAZDOWSKI D., ZAWILAK J.: *Sprężenia magnetyczne przewodów elementarnych dwuwarstwowego uzwojenia stojana turbogeneratorsa*, Konferencja: Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE 2005, 2-5.04.2005, Wisła, s. 7, rys. 7, bibliogr. 11 , Rok opublikowania: 2005
- [9] GURAZDOWSKI D., ZAWILAK J.: *Wpływ przeplotu przewodów elementarnych na rozkład gęstości prądu w pręcie turbogeneratorsa*. W: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych. Wrocław: Oficyna Wydaw. PWr. 2005, 222-234, 6 rys., 3, tab., bibliogr. 13 poz. Summ. (Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 58, Studia i Materiały, ISSN 1733-0718; nr 25) I29/05/I-080.
- [10] GURAZDOWSKI D., ZAWILAK J.: *Rozkład temperatury w pręcie uzwojenia stojana turbogeneratorsa*, Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych. PEMINE. Ustroń, [17-19 maja] 2006. Katowice: BOBRME Komel 2006, 177–183, 8 rys., bibliogr. 9 poz. (Maszyny Elektryczne - Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, Zeszyty Problemowe nr 75/2006).

- [11] GURAZDOWSKI D., ZAWILAK J.: *Wpływ przepłotu przewodów elementarnych na rozkład temperatury uzwojenia stojana turbogeneratorsa*, Proceedings of XLII International Symposium on Electrical Machines SME'2006, [3-6 lipca] Kraków, s. 4, rys. 4, bibliogr. 7 poz.
- [12] HALDEMAN J., *Untersuchung verschiedener Verdrillungsarten in Statorwicklungen großer Synchronmaschinen, deren Wirkung auf Strom- und Temperaturverteilung und Zusatzverluste in verschiedenen Betriebszuständen*. Zürich, 1997.
- [13] HALDEMAN J., *Transposition in Stator Bars of Large Turbogenerators*. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 19, No. 3, page 553-560, (September 2004).
- [14] HERING M., *Termokinyka dla elektryków*, WNT, Warszawa 1980
- [15] ISELI M. A., *Zusatverluste in Statorwicklungen grosser Synchronmaschinen unter Berücksichtigung der Verdrillung und der Stirnraumfelder*. Zürich 1991.
- [16] JEVTIC M., ZELJKOVIC V., DAPIC M., *Thermal Influences on Turbogenerator Dynamic Behaviour*, Proceedings of XLII International Symposium on Electrical Machines SME'2006, [3-6 lipca] Kraków, s. 4, rys. 8, bibliogr. 10 poz., 2006.
- [17] KOTRBA V., *Flow and heat transfer in radial channels of electric machines*. Conference papers of the International Conference on the Evolution and Modern Aspect of Synchronous Machines – Zurich, 1985.
- [18] KROK R., *Wyznaczanie ustalonych i nieustalonych przestrzennych rozkładów temperatury w wirnikach turbogeneratorów dużej mocy z uwzględnieniem czynnika chłodzącego przy różnych systemach chłodzenia uzwojenia wzbudzenia*. Rozprawa doktorska, Gliwice 1998.
- [19] KROK R., Miksiewicz R., *Analiza pola temperatury w uzwojeniu wzbudzenia generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim zabierakowym*. Materiały konferencyjne XXXI Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Maszyny Synchroniczne, Ustroń 1995.
- [20] KRUPA J., *Wykreślna analiza skuteczności kompensacji strat dodatkowych w uzwojeniu twornika maszyny elektrycznej*. ABB Dolmel Ltd, Wrocław 1998.
- [21] KUNZ T., SCHAFFER D., *Technical training on hydro generators*, ALSTOM POWER, Hydro Generator Technology Centre, HGT, Birr 2001 (Switzerland).
- [22] LATEK W., *Turbogeneratory*. WNT, Warszawa 1973.
- [23] LATEK W., *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*. WNT, Warszawa 1979.
- [24] LATEK W., BYTNAR A., ROGULSKI S., *Rozkład temperatury w stojanie turbogeneratora o dużej mocy z chłodzeniem pośrednim (część I)*. Archiwum Elektrotechniki, Nr 4, 1968.
- [25] LAWRENSON P.J., *The magnetic field of the end-windings of turbo-generators*. Proceedings IEE, Vol. 108 A, No.1, 1961, 538–553.

- [26] MACDONALD D., *Losses in Roebel Bars: Effect of slot portion on circulating currents*. Proceedings IEE, Vol 117, No.1, 111–118 (1970).
- [27] MACDONALD D., *Circulating-current loss within Roebel-bar stator winding in hydroelectric alternators*. Proceedings IEE, Vol 118, No.5, 689–697 (1971).
- [28] MACDONALD D., LOCKE D. H., *Losses in Roebel bars: reactance of slot portion to circulating currents between the conductor stacks*. Proceedings IEE, Vol 117, No.6, 1151–1152 (1970).
- [29] NEIDHOFER G., *Innenkühlung von Roebelstaben und Massnahmen zur Verminderung der Zusatzverluste*, Nach einem Gastvortrag am Institut für Höhere Elektrotechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich, gehalten am 22 Januar 1968.
- [30] PEŁCZEWSKI W., *Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych*,. PWT, Warszawa 1956.
- [31] PRZYBYSZ J., *Turbogeneratory eksploatacja i diagnostyka*,. WNT, Warszawa 1991.
- [32] PRZYBYSZ J., *Obciążalność turbogeneratorów chłodzonych wodorem*. Przegląd elektrotechniczny, zeszyt 2, 1975.
- [33] REECE. A.B.J., PRAMANIK A., *Calculation of the end-region field of a.c. machines*. Proceedings. IEE, 1965, 1355–1368.
- [34] RINGLAND W. L., *540-Degree Stator Coil Transposition*, (1957).
- [35] RUT R., *Analiza nieustalonych termicznych stanów uzwojeń silników indukcyjnych dużej mocy w trudnych warunkach rozruchowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej (Rzeszów 2001).
- [36] RUOPING Y. SHUFANG L., LONGNIAN L., *A new method to determine the 3-D field and transposition way of large generator*. IEEE 1998, 9–12.
- [37] RÓŻYCKI A., *Laboratorium Badań Ciepłno-wentylacyjnych maszyn elektrycznych i transformatorów*,. Skrypt Politechniki Śląskiej (Gliwice 1986).
- [38] SCHUISKY W. *Berechnung elektrischer Maschinen*, Wien Springer-Verlag 1960.
- [39] SIKORA R., *Teoria pola elektromagnetycznego*. WNT, Warszawa 1997 –wydanie trzecie zmienione.
- [40] SZARGUT J., *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, WNT, Warszawa 1992.
- [41] STOLL R. L., HAMMOND P., *Calculation of the magnetic field of rotating machines – Part 4. Approximate determination of the field and the losses associated with eddy currents in conducting surfaces*. Proceedings IEE, Vol 112, No.11, 2083–2094 (1965).
- [42] ŚLIWIŃSKI T., GŁOWACKI A., *Parametry rozruchowe silników indukcyjnych*. PWN, Warszawa 1982.

- [43] TRAXLER-SAMEK G., *Zusatzverluste im Stirnraum von Hydrogeneratoren mit Roebelstabwicklung*. Technischen Universitat Wien, Mai 2003.
- [44] TUROWSKI J., *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*. WNT, Warszawa 1982.
- [45] TUROWSKI J., *Elektrodynamika techniczna*, Wyd. 2, WNT, Warszawa 1993.
- [46] VOLDEK A.I., *Procedure for analysing the magnetic fields of the end-windings of electrical machines*. Leningrad Polytechnical Insitute 1962.
- [47] VOGELE H., *Measures for reducing circulating –current losses in the armature windings of turbogenerators*. Brown Boveri Rev. 1-70, 32–40, 1970.
- [48] WILLYOUNG D.M., *Balanced transposition for stranded conductors with asymmetrically disposed strand ends*. US Patent 3 118 015 (1964).
- [49] WIŚNIEWSKI S., *Wymiana Ciepła*, wyd. 2, PWN, Warszawa 1988.

Opis programów do obliczeń cieplnych:

- [50] H. BONNING C. *GM074 – Program description, Heating of indirectly Cooled Stator windings*, (1979), ALSTOM POWER.
- [51] PROGRAM REPORT HT510 – FUNDAMENTALS , *Standard flow network for indirectly cooled turbogenerators* , ALSTOM POWER (Switzerland) 2002.

Raport testów ruchowych :

- [52] *Raport wyników pomiarów z prób ruchowych turbogeneratora typu TOP-GAS 450 MVA*, ALSTOM POWER, sierpień 2002.

Literatura dotycząca języka programowania fortran:

- [53] LAHEY/FUJITSU FORTRAN 95, *Language reference – revision G*.
- [54] LAHEY/FUJITSU FORTRAN 95, *User Guide – revision D*.
- [55] LAHEY/WINTERACTER STARTER KIT, *For user interface and graphics – revision G*.
- [56] WINTERACTER 4.0, *Subroutine Reference*, Interactive Software Service Ltd. 2001.
- [57] WINTERACTER 4.0, *User Guide*, Interactive Software Service Ltd. 2001.
- [58] BAŃKOWSKI J., FIAŁKOWSKI K., *Programowanie w języku FORTRAN*, wyd. 3, PWN, Warszawa 1973.
- [59] KOTT R., *Fortran 77*, WNT Warszawa 1989.
- [60] METCALF M., REID J., *Fortran 90/95 Explained*. OXFORD University Press, second edition 1999.

ZAŁĄCZNIK

do pracy

**ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATUR W UZWOJENIU STOJANA
TURBOGENERATORA Z TRANSPOZYCJĄ ROEBELA
O POŚREDNIM WODOROWYM SYSTEMIE CHŁODZENIA**

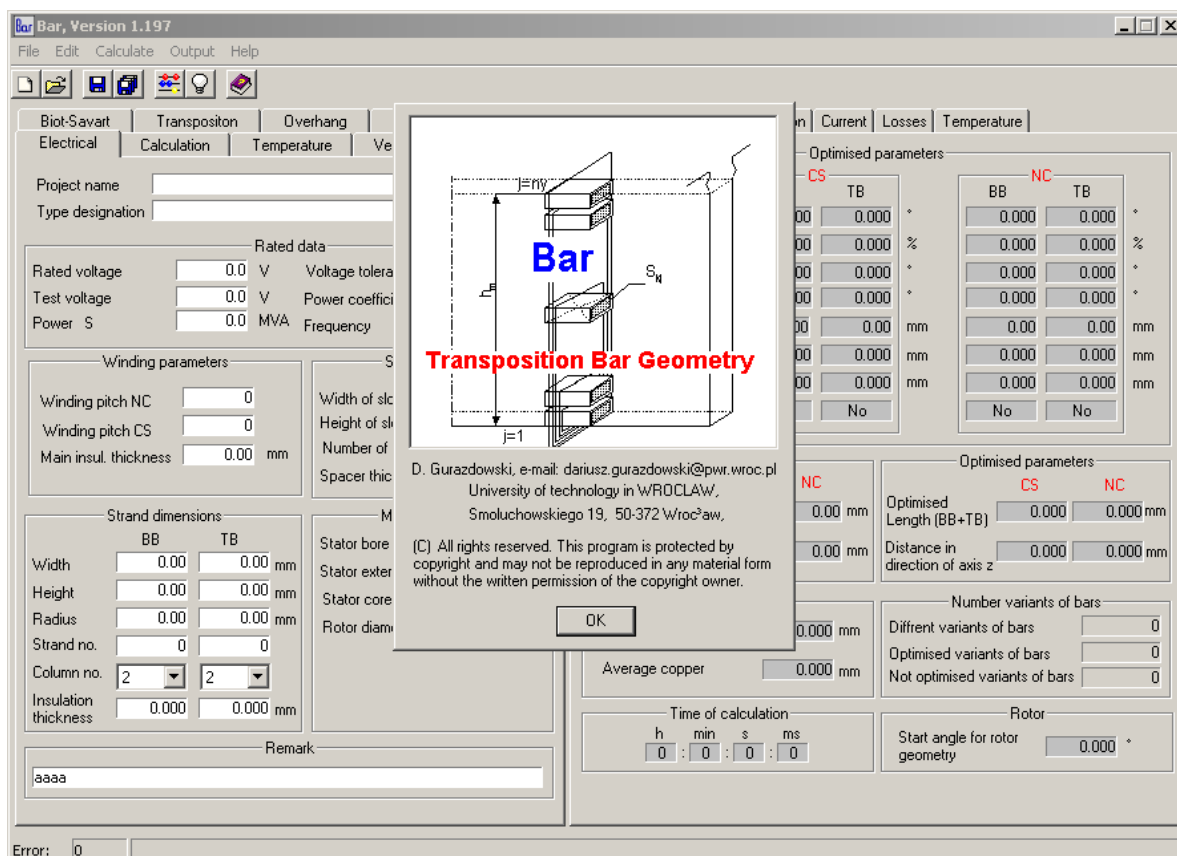
PROGRAM OBLICZENIOWY BAR

Z.1. PROGRAM BAR

Program Bar jest opracowanym autorskim wykonanym w ramach rozprawy doktorskiej. Opracowany został w języku Fortran 95 [53÷60]. Nazwa programu Bar pochodzi od słowa określającego w języku angielskim pręt uzwojenia stojana turbogeneratorsa.

Ekran startowy przedstawiono na rysunku Z.1.1. Za pomocą programu Bar wyznaczono geometrie strefy czołowej turbogeneratorsa, następnie w zależności od zadanej transpozycji przewodów elementarnych, rozkład:

- gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana,
- strat dodatkowych wzdłuż długości i wysokości pręta warstwy górnej i dolnej strefy żłobkowej uzwojenia stojana,
- temperatury wzdłuż długości i wysokości pręta warstwy górnej i dolnej strefy żłobkowej uzwojenia stojana.



Rys. Z.1.1 Ekran startowy programu Bar

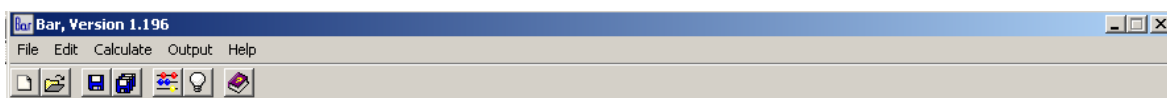
Program Bar można podzielić na trzy obszary: menu programu, zakładki z danymi wejściowymi, zakładki z danymi wyjściowymi.

Z.1.1. Menu programu

Menu główne programu składa się z pięciu elementów (rys. Z.1.2):

- File,
- Edit,
- Calculate,
- Output,
- Help.

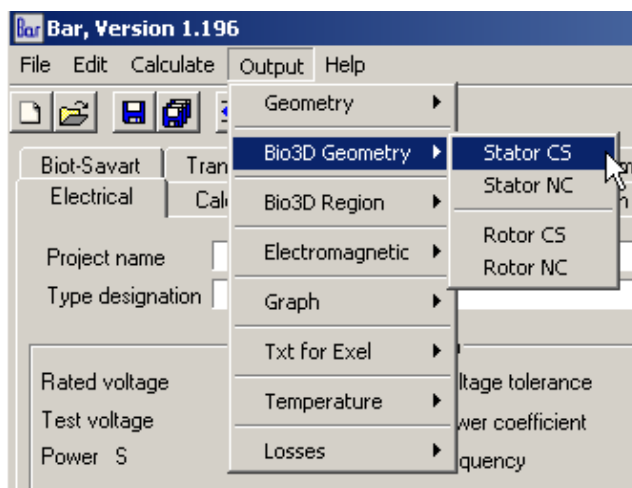
Zadaniem menu jest ułatwienie pracy z programem, umożliwiając między innymi importowanie, eksportowanie i zapisywanie danych do pliku



Rys. Z. 1.2 Menu główne programu Bar

Menu *File* pozwala na zapisywanie i wczytywanie z pliku o dowolnej nazwie z rozszerzeniem *Bar* parametrów wejściowych do obliczeń geometrycznych, elektromagnetycznych i termicznych. Usuwanie istniejących danych i start nowego projektu realizowane jest w menu *Edit* za pomocą funkcji *Clear data*.

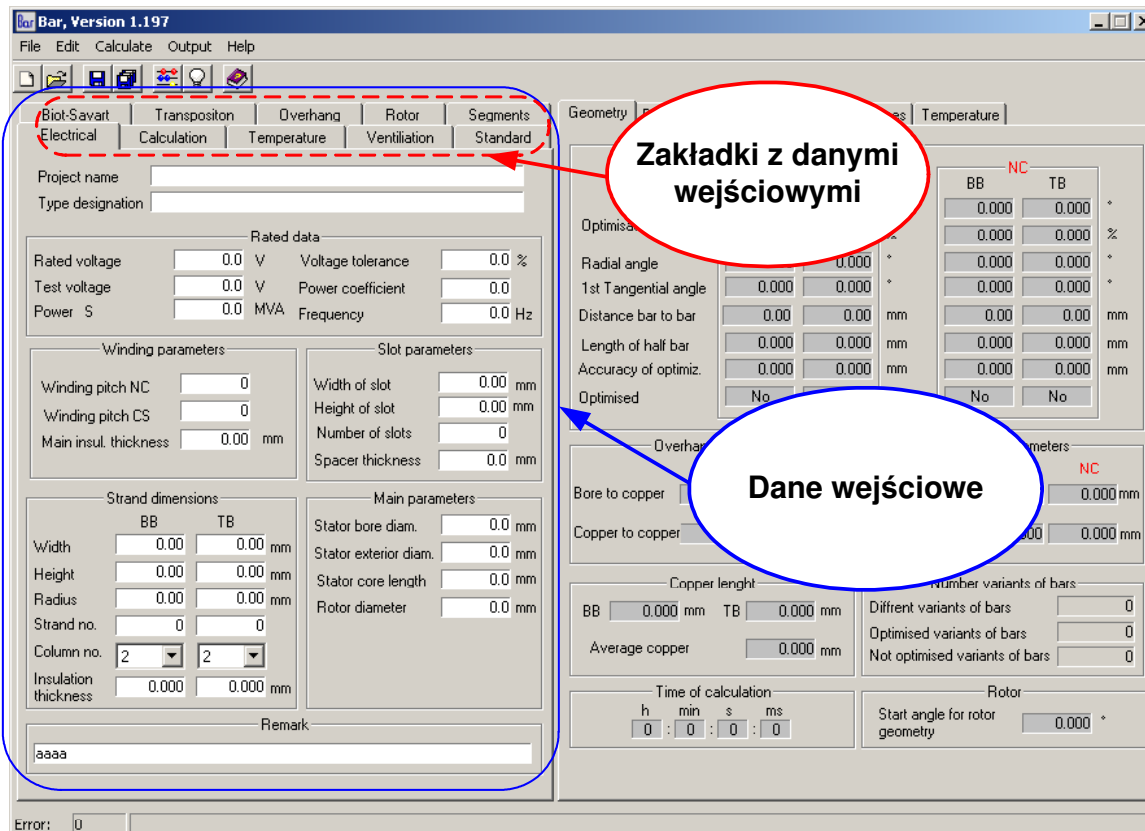
Start procesu obliczeniowego użytkownik rozpoczyna w momencie wybrania przycisku *enter* lub funkcji *Refresh calculation* w menu *Calculate*. Najważniejsze zdanie w menu głównym spełnia opcja *Output* (rys. Z.1.3). Zawiera funkcje umożliwiające eksportowanie wyników obliczeń geometrycznych, elektromagnetycznych i termicznych.



Rys. Z. 1.3 Menu Output

Z.1.2. Dane wejściowe

Dane wejściowe do obliczeń geometrii uzwojenia, rozkładu gęstości prądu, strat i temperatury przedstawiono w dziesięciu zakładkach umiejscowionych po lewej stronie programu (rys. Z.1.4).



Rys. Z. 1.4 Dane wejściowe do programu

Nazwy poszczególnych zakładek określają „tematykę” znajdujących się w nich parametrów. Na rysunku Z.1.5 przedstawiono widok ekranu programu Bar dla następujących zakładek:

- Electrical,
- Calculation,
- Temperature,
- Ventilation,
- Standard,
- Biot-Savart,
- Transposition,
- Overhang,
- Rotor,
- Segments.

a)

Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments
Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard

Project name

Type designation

Rated data

Rated voltage V Voltage tolerance %
 Test voltage V Power coefficient
 Power S MVA Frequency Hz

Winding parameters

Winding pitch NC
 Winding pitch CS
 Main insul. thickness mm

Slot parameters

Width of slot mm
 Height of slot mm
 Number of slots
 Spacer thickness mm

Strand dimensions

	BB	TB
Width	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Height	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Radius	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Strand no.	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Column no.	<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="2"/>
Insulation thickness	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

Main parameters

Stator bore diam. mm
 Stator exterior diam. mm
 Stator core length mm
 Rotor diameter mm

Remark

b)

Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments
Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard

Angle of cones region

	CS		NC	
	BB	TB	BB	TB
Radial angle	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Step	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Start value	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
End value	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

Optimisation angle

	CS	NC
Opt. angle	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Step	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Start value	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
End value	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

Distance from copper to copper

	CS	NC
Distance	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Step	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
Start value	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>
End value	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>

Same for CS and NC

Distance from bar to bar in one layer

Distance mm Tolerance mm

Electromagnetic calculation

Overhang part

BB TB

External flux influence

Stator Rotor
 Stator and Rotor None

Type of calculation

c)

Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments
Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard

No. of temp. section for straight seg.

	BB	TB
Seg. after 1 transposition	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>
Seg. after 2 transposition	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>

Start copper temp.

Start copper temp. K

Relative temp.

Relative temp. C

Control of iteration

No. first iteration
 Break first iteration
 No. second iteration
 Break second
 Convergence coefficient
 Level of strands
 Collect strands current for losses calculation

Heat conductivity

Main insulation W/m²K
 Strand insulation W/m²K
 Copper W/m²K
 Wege W/m²K
 Spacer W/m²K
 Bottom insertion W/m²K
 Lamination trans. W/m²K
 Lamination axial W/m²K

Losses

Stator yoke KW
 Stator teeth KW
 Eddy current losses of bar

Induction

Air gap induction T
 Stacking factor
 Radial field losses of bar

Thickness

Wege mm
 Spacer mm
 Bottom insertion mm

d)

Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments
Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7
WSP [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
WVD [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
QAG [m3/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
QVD [m3/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
QJ [m3/s]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TAG [°C]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TJ [°C]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TVD [°C]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

WSP - Width of stator packets WVD - Width of ventilation
 QAG - Gas flow supplied from air gap QVD - Gas flow throughout vent. ducts
 QJ - Gas flow exhausted at the yoke surface
 TAG - Temp. the gas flows supplied from the air gap
 TJ - Temp. of the gas flows supplied from the yoke through ducts

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Alfa1 [W/(m ² *K)]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Alfa2 [W/(m ² *K)]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Alfa3 [W/(m ² *K)]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Alfa1 - Heat transmission for teeth facing and wedge surface
 Alfa2 - Heat transmission in radial ventilation ducts
 Alfa3 - Heat transmission for yoke

Ventilation model

Number of columns for tables

e)

Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard
Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments
Radius		Thickness of insertion		
To conus region	<input type="text" value="0.0"/> mm	Slot part	<input type="text" value="0.00"/> mm	
To tangential bending	<input type="text" value="0.0"/> mm	Overhang	<input type="text" value="0.0"/> mm	
Thickness of inner corona protection		Thickness of slot corona protection		
Bright side	<input type="text" value="0.0"/> mm	Bright side	<input type="text" value="0.00"/> mm	
Narrow side	<input type="text" value="0.0"/> mm	Narrow side	<input type="text" value="0.00"/> mm	
Maximum bending angle		Thickness of round packing		
Radial	<input type="text" value="0.0"/> °	Bright side	<input type="text" value="0.00"/> mm	
Tangential	<input type="text" value="0.0"/> °	Narrow side	<input type="text" value="0.00"/> mm	
Thickness		Reduction element		
Overhang corona prot.	<input type="text" value="0.0"/> mm	Strand reduction	<input type="text" value="0.0"/> mm	
Slot bottom insertion	<input type="text" value="0.0"/> mm	Main insul. reduction	<input type="text" value="0.0"/> mm	
		Insulation red. factor	<input type="text" value="0.0"/>	
Stator bars drawing		Optional input		
Drawing of stator bars	<input type="checkbox"/>	Length after last rad. bending	<input type="text" value="0"/> mm	
Points number	<input type="text" value="0"/>			

f)

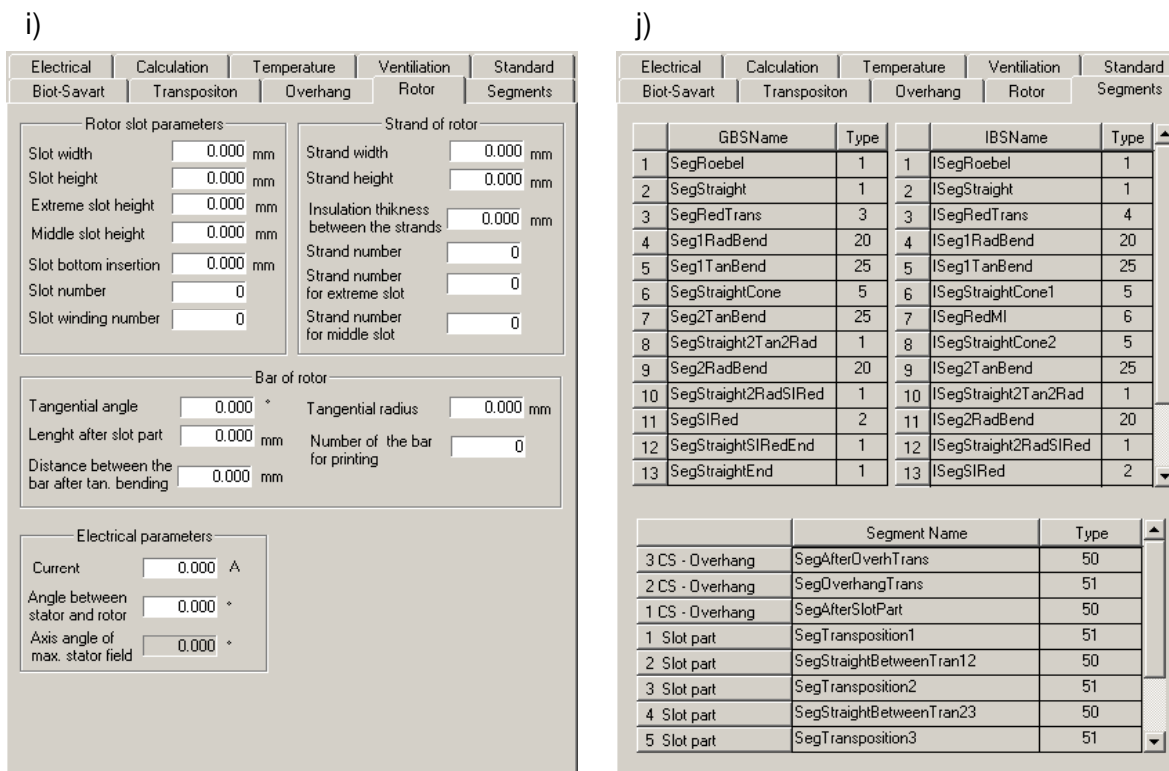
Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard																																																																						
Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments																																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>GBSName</th> <th>Type</th> <th>RPo.</th> <th>GPo.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>No used</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>SegStraight</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>SegRadTrans</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>Seg1RadBend</td><td>20</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>5</td><td>Seg1TanBend</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>6</td><td>SegStraightCone</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>7</td><td>Seg2TanBend</td><td>25</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>No used</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>Seg2RadBend</td><td>20</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>No used</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>11</td><td>SegSIRed</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>SegStraightSIRedEnd</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>SegStraightEnd</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>						GBSName	Type	RPo.	GPo.	1	No used	0	0	0	2	SegStraight	1	0	0	3	SegRadTrans	3	0	0	4	Seg1RadBend	20	0	0	5	Seg1TanBend	25	0	0	6	SegStraightCone	5	0	0	7	Seg2TanBend	25	0	0	8	No used	0	0	0	9	Seg2RadBend	20	0	0	10	No used	0	0	0	11	SegSIRed	2	0	0	12	SegStraightSIRedEnd	1	0	0	13	SegStraightEnd	1	0	0
	GBSName	Type	RPo.	GPo.																																																																						
1	No used	0	0	0																																																																						
2	SegStraight	1	0	0																																																																						
3	SegRadTrans	3	0	0																																																																						
4	Seg1RadBend	20	0	0																																																																						
5	Seg1TanBend	25	0	0																																																																						
6	SegStraightCone	5	0	0																																																																						
7	Seg2TanBend	25	0	0																																																																						
8	No used	0	0	0																																																																						
9	Seg2RadBend	20	0	0																																																																						
10	No used	0	0	0																																																																						
11	SegSIRed	2	0	0																																																																						
12	SegStraightSIRedEnd	1	0	0																																																																						
13	SegStraightEnd	1	0	0																																																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Rotor segment name</th> <th>Type</th> <th>GRPo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>RotorSegSlotPart</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>RotorSegOverPart</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>RotorSegTanBend</td><td>25</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>RotorSegRadBend</td><td>20</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>						Rotor segment name	Type	GRPo	1	RotorSegSlotPart	1	0	2	RotorSegOverPart	1	0	3	RotorSegTanBend	25	0	4	RotorSegRadBend	20	0																																																		
	Rotor segment name	Type	GRPo																																																																							
1	RotorSegSlotPart	1	0																																																																							
2	RotorSegOverPart	1	0																																																																							
3	RotorSegTanBend	25	0																																																																							
4	RotorSegRadBend	20	0																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Test region</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>No. point</td><td><input type="text" value="0"/></td></tr> <tr><td>Length</td><td><input type="text" value="0.000"/> mm</td></tr> <tr><td>Radius</td><td><input type="text" value="0.000"/> mm</td></tr> <tr><td>Test region</td><td><input type="checkbox"/></td></tr> </tbody> </table>						Test region	No. point	<input type="text" value="0"/>	Length	<input type="text" value="0.000"/> mm	Radius	<input type="text" value="0.000"/> mm	Test region	<input type="checkbox"/>																																																												
	Test region																																																																									
No. point	<input type="text" value="0"/>																																																																									
Length	<input type="text" value="0.000"/> mm																																																																									
Radius	<input type="text" value="0.000"/> mm																																																																									
Test region	<input type="checkbox"/>																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Rotor parameter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Number of the rotor position to simulate rotor rotation</td><td><input type="text" value="0"/></td></tr> </tbody> </table>						Rotor parameter	Number of the rotor position to simulate rotor rotation	<input type="text" value="0"/>																																																																		
	Rotor parameter																																																																									
Number of the rotor position to simulate rotor rotation	<input type="text" value="0"/>																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Biot-Savart</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input checked="" type="radio"/> Exact algorithm</td></tr> <tr><td><input type="radio"/> Simplified algorithm</td></tr> </tbody> </table>						Biot-Savart	<input checked="" type="radio"/> Exact algorithm	<input type="radio"/> Simplified algorithm																																																																		
	Biot-Savart																																																																									
<input checked="" type="radio"/> Exact algorithm																																																																										
<input type="radio"/> Simplified algorithm																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Images method</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Magnetic relative permeability</td><td><input type="text" value="0.000"/></td></tr> <tr><td>Air gap cond. radius</td><td><input type="text" value="0.000"/> mm</td></tr> </tbody> </table>						Images method	Magnetic relative permeability	<input type="text" value="0.000"/>	Air gap cond. radius	<input type="text" value="0.000"/> mm																																																																
	Images method																																																																									
Magnetic relative permeability	<input type="text" value="0.000"/>																																																																									
Air gap cond. radius	<input type="text" value="0.000"/> mm																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Bar region</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input checked="" type="radio"/> Exact region flux</td></tr> <tr><td><input type="radio"/> Interpolate region flux</td></tr> </tbody> </table>						Bar region	<input checked="" type="radio"/> Exact region flux	<input type="radio"/> Interpolate region flux																																																																		
	Bar region																																																																									
<input checked="" type="radio"/> Exact region flux																																																																										
<input type="radio"/> Interpolate region flux																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Air gap conductor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> Stator</td></tr> <tr><td><input checked="" type="checkbox"/> Rotor</td></tr> </tbody> </table>						Air gap conductor	<input checked="" type="checkbox"/> Stator	<input checked="" type="checkbox"/> Rotor																																																																		
	Air gap conductor																																																																									
<input checked="" type="checkbox"/> Stator																																																																										
<input checked="" type="checkbox"/> Rotor																																																																										

g)

Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard
Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments
Number of slot transp. section		Segments length of slot part		
BB	TB	BB	TB	
1 Transp.	<input type="text" value="0"/> <input type="checkbox"/>	1 Transp.	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> mm	
2 Transp.	<input type="text" value="0"/> <input type="checkbox"/>	2 Transp.	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> mm	
3 Transp.	<input type="text" value="0"/> <input type="checkbox"/>	3 Transp.	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> mm	
		After 1 tra.	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> mm	
		After 2 tra.	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> mm	
Overhang part				
Set Overh.				
CS		NC		
<input type="checkbox"/> BB	<input type="checkbox"/> TB	<input type="checkbox"/> BB	<input type="checkbox"/> TB	
No. of the transposition section	<input type="text" value="0"/>			
Length between slot and evolvant	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Length of transp.	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	mm
After transp.	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Completed length	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	mm
Transp. type for 4 columns	<input type="text" value="Doubled"/>	<input type="text" value="Doubled"/>	<input type="text" value="Doubled"/>	<input type="text" value="Doubled"/>
Slot transp. type for 4 columns		Temperature		
BB	TB	BB	TB	
1 Transp.	<input type="text" value="Doubled"/>	Slot part	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> °C	
2 Transp.	<input type="text" value="Crossed"/>	Overhang	<input type="text" value="0.000"/> <input type="text" value="0.000"/> °C	
3 Transp.	<input type="text" value="Doubled"/>	Bar end		
		<input checked="" type="checkbox"/> 4 Col. connect together TB		
		<input checked="" type="checkbox"/> 4 Col. connect together BB		

h)

Electrical	Calculation	Temperature	Ventilation	Standard									
Biot-Savart	Transposition	Overhang	Rotor	Segments									
Straigh length outside stator core		Brazing lug											
Bottom Bar CS	<input type="text" value="0.0"/> mm	Length	<input type="text" value="0.0"/> mm										
Top Bar CS	<input type="text" value="0.0"/> mm	Calculated slot											
Bottom Bar NC	<input type="text" value="0.0"/> mm	<input type="text" value="1"/>											
Top Bar NC	<input type="text" value="0.0"/> mm	Insulation cap											
Angle of 1. tangential bending		Length of ins. bar for insulation cap											
Top Bar	<input type="text" value="0.0"/> °	<input type="text" value="0.0"/> mm											
Bottom Bar	<input type="text" value="0.0"/> °												
Winding diagram data (view from CS)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
BB	U	U	U	U	-W	-W	-W	-W	-W	-W	-W	-W	-W
TB	U	U	U	U	U	U	U	U	U	-W	-W	-W	-W
<input type="button" value="Switch Rotor Direction"/> <input type="button" value="Switch Current Direction"/> <input type="button" value="RefreshTable"/>													
Terminals													
Circuit 1	U	V	W										
Start 1	1 TB	19 TB	37 TB										
End 1	31 BB	49 BB	13 BB										
Circuit 2													
Start 2	4 BB	22 BB	40 BB										
End 2	28 TB	46 TB	10 TB										



Rys. Z. 1.5 Widok ekranu dla zakładki z danymi wejściowymi do programu Bar:
 a) zakładka Electrical, b) zakładka Calculation, c) zakładka Temperature,
 d) zakładka Ventilation, e) zakładka Standard, f) zakładka Biot-Savart,
 g) zakładka Transposition, h) zakładka Overhang, i) zakładka Rotor,
 j) zakładka Segments

Podstawowe dane elektryczne obliczanego turbogenerators znajdują się w zakładce *Electrical* (rys. Z.1.5a) i są podzielone na 5 grup:

- Rated data,
- Winding parameters,
- Slot parameters,
- Strand dimensions,
- Main parameters.

Grupa *Rated data* zawiera główne parametry elektryczne maszyny, tj. moc znamionową, napięcie, współczynnik mocy, częstotliwość, itp..... Grupa *Slot parameters* zawiera wymiary geometryczne żłobka dla uzwojenia stojana. Grupa *Strand dimensions* opisuje dane związane z przewodami elementarnymi warstwy górnej i dolnej prętów. Istnieje możliwość modelowania różnej liczby kolumn i wymiarów przewodów elementarnych pręta warstwy górnej i dolnej. Program domyślnie przyjmuje uzwojenie rodzaju pętlicowego.

Zakładka pt. *Calculation* (rys. Z.1.5b) przedstawia podstawowe dane do optymalizacji geometrii strefy czołowej uzwojenia stojana i do sterowania obliczeniami elektromagnetycznymi i termicznymi. Optymalizacja polega na zdefiniowaniu przedziału (wartość początkowa i końcowa) spośród, którego program dobiera optymalną wartość parametru, aby uzyskać najkrótszą długość pręta w strefie czołowej maszyny.

Optymalizacja przeprowadzana jest osobno dla pręta warstwy górnej i dolnej po stronie CS i NC (CS - strona nienapędowa, NC- strona napędowa). W zależności od ustawień można przeprowadzić optymalizację geometrii pręta, ze względu na następujące parametry:

- Angle of conus region (kąt gięcia radialnego),
- Optimisation angle (kąt styku pręta górnego z dolnym),
- Distance form copper to copper (odległość między prętem dolnym i górnym w obszarze skuwki).

Sterowanie przebiegiem obliczeń odbywa się za pomocą trzech przycisków określających rodzaj wykonywanych obliczeń:

- Geometry calculation (obliczenia geometryczne),
- Electromagnetic claulation (obliczenia elektromagnetyczne),
- Temperature calulation (obliczenia rozkładu temperatury).

Obliczenia elektromagnetyczne wykonywane są osobno dla pręta warstwy górnej i dolnej. Użytkownik dokonuje wyboru czy w trakcie obliczeń program uwzględni część czołową uzwojenia, oddziaływanie indukcji własnej, obcej lub obu.

Parametry wejściowe do obliczeń rozkładu temperatury przedstawiono w zakładce *Temperature* (Z.1.5c). Użytkownik może określać różną wartość współczynników przewodzenia ciepła (*Heta conductivity*) w zależności od zastosowanego materiału. Przewidziano okienka do wprowadzania strat w jarzmie, zębie, wartości indukcji w szczelinie powietrznej, temperatury odniesienia i temperatury początkowej dla pierwszego kroku iteracyjnego obliczeń cieplnych. Parametry sterujące procesem iteracji umieszczono w grupie o nazwie *Control iteration*. Natomiast parametry niezbędne do budowy modelu termicznego zawarto w zakładce *Ventilation*. Pierwsza tabela przedstawia szerokość poszczególnych zębów i kanałów wentylacyjnych strefy żłobkowej maszyny. Istnieje możliwość wprowadzania średniej wartości temperatury czynnika chłodzącego w każdym kanale wentylacyjnym, szczelinie powietrznej i jarzmie. Druga tabela zawiera wartości współczynników przejmowania ciepła dla czynnika chłodzącego w poszczególnych kanałach wentylacyjnych, szczelinie powietrznej i jarzmie.

Liczba kolumn w obydwu tabelach odpowiada liczbie sekcji w modelu cieplnym. Kolejna zakładka *Standard* (rys. Z.1.5e) zawiera podstawowe dane związane z obliczeniami geometrii pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana.

Oddziaływanie strefy czołowej na rozkład gęstości prądu obliczono metodą Biota – Savarta – Laplace’a i odbić zwierciadlanych. Parametry wejściowe umożliwiające zastosowanie tych metod przedstawiono w zakładce *Biot-Savart*. Za pomocą zawartych tabel określono siatkę punktów w obszarze obliczanego pręta strefy czołowej turbogeneratorsa. Dla każdego punktu siatki obliczany jest przestrzenny wektor indukcji magnetycznej.

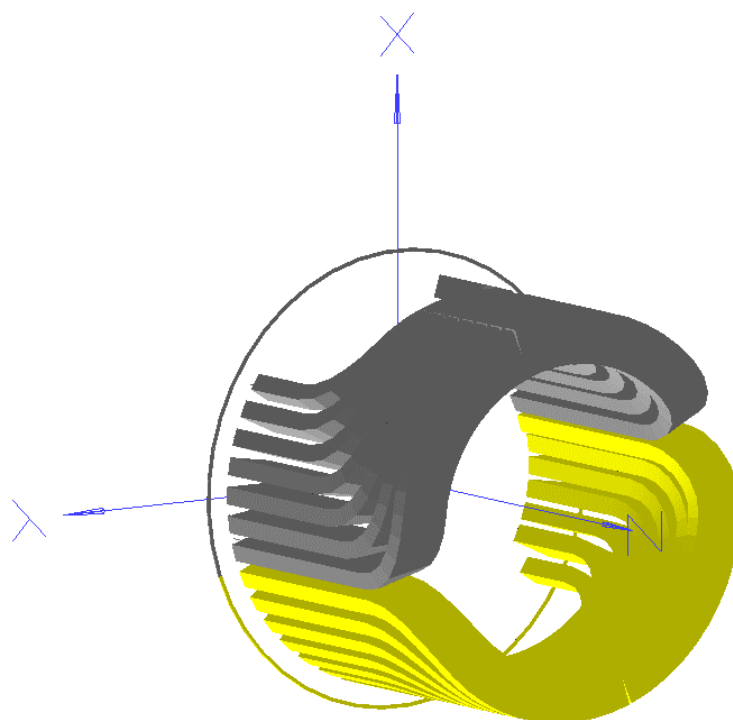
Przeplot Roebela pręta warstwy górnej i dolnej w strefie żłobkowej i czołowej uzwojenia stojana turbogeneratorsa zdefiniowano w zakładce *Transposition*. Program umożliwia zamodelowanie dowolnej transpozycji o dwóch lub czterech kolumnach przewodów elementarnych w pręcie górnym i dolnym. W strefie żłobkowej przewidziano trzy segmenty modelujące przeploty o różnym kącie i podziałce transpozycji. W strefie czołowej transpozycja może zostać wykonana tylko na ewolwentowej części pręta. Usytuowanie przeplotów przewodów elementarnych pręta przedstawiono na rysunku Z.1.9c w zakładce z danymi wyjściowymi.

Rozkład faz uzwojenia stojana oraz kierunek przepływu prądu zdefiniowano w zakładce *Overhang* (rys. Z.1.5h). Przedstawiony rozkład dotyczy turbogeneratorsa o 54 żłobkach.

W związku z tym dla dwóch gałęzi równoległych, przewidziano 9 żłobków na biegun i fazę. Za pomocą przycisków *Switch Rotor Direction*, *Switch Current Direction* istnieje możliwość zmiany wirowania wirnika (zmiana rozkładu faz) i kierunku przepływu prądu.

W zakładce umieszczono okienka do określania długości części prostej pręta wystającej z rdzenia maszyny (*Straigth length outside stator core*). Za pomocą programu Bar można wykonać obliczenia elektromagnetyczne pręta górnego lub dolnego ułożonego w dowolnym żłobku. Numer żłobka użytkownik określa w polu *Calulated slot*.

W zakładce *Rotor* (rys. Z.1.5i) przedstawiono dane niezbędne do wyznaczenia geometrii uzwojenia wirnika w strefie czołowej maszyny i obliczenia jego wpływu na pole magnetyczne w tej strefie. Na rysunku Z.1.6 przedstawiono geometrie uzwojenia wirnika w strefie czołowej po stronie nienapędowej (CS) maszyny.



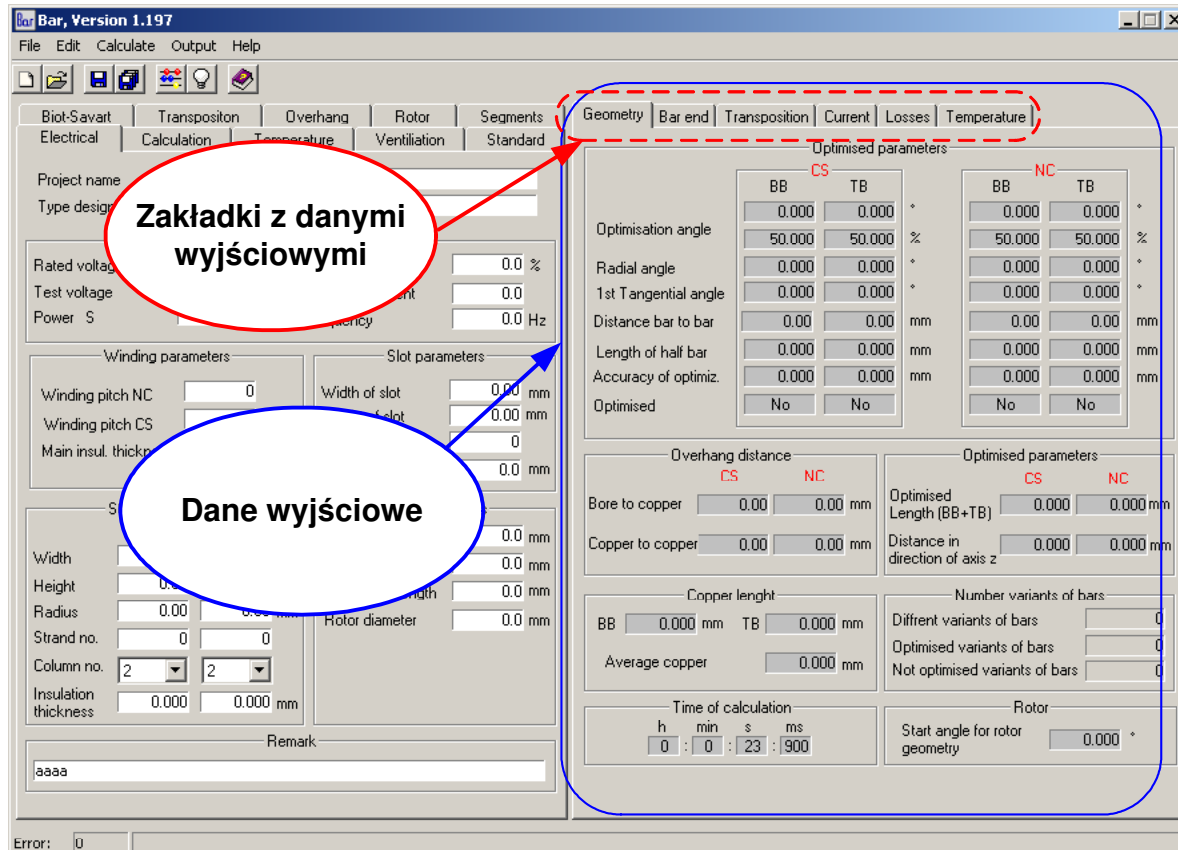
Rys. Z. 1.6 Uzwojenie wirnika w strefie czołowej turbogenerators (strona nienapędowa)

Zakładka *Segments* (Z.1.5j) składa się z tabel zawierających nazwy i typy segmentów użytych do budowy geometrii pręta warstwy górnej i dolnej uzwojenia stojana. Pierwsza tabela opisuje segmenty pręta nieizolowanego, tzw. pręta zielonego (13 segmentów), druga pręta izolowanego (16 segmentów), trzecia segmenty transpozycji przewodów elementarnych.

W tej tabeli przedstawiono 11 segmentów podzielonych na trzy grupy. W programie wykorzystano te segmenty do modelowania transpozycji przewodów elementarnych w danej części uzwojenia stojana turbogenerators.

Z.1.3. Dane wyjściowe

Dane wyjściowe z obliczeń geometrycznych, elektromagnetycznych przedstawiono na sześciu zakładkach, umiejscowionych po prawe stronie programu (rys. Z.1.7). Nazwy poszczególnych zakładek odpowiadają tematyce zawartych w nich parametrów.



Rys. Z. 1.7 Dane wyjściowe programu

Na rysunku Z.1.8 przedstawiono widok ekranu programu Bar dla następujących zakładek:

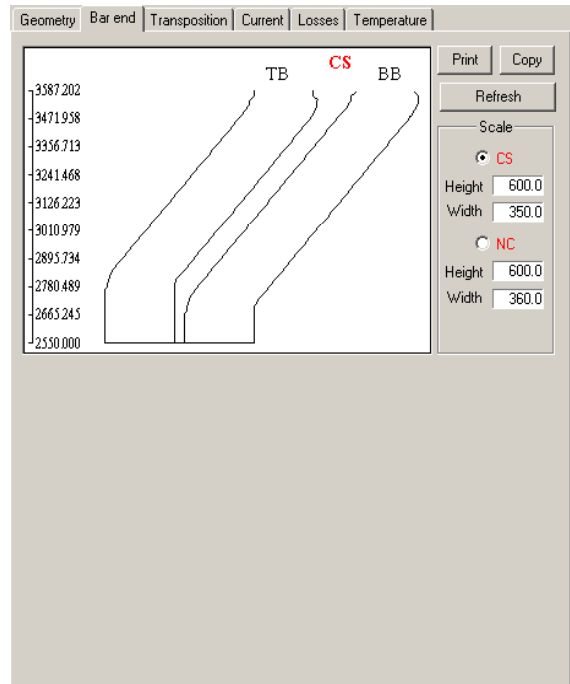
- Geometry,
- Temperature,
- Bar end,
- Transposition,
- Current,
- Losses.

Program Bar

a)

Geometry	Bar end	Transposition	Current	Losses	Temperature
Optimised parameters					
CS					
	BB	TB	*		
Optimisation angle	0.000	0.000	%		
	50.000	50.000	%		
Radial angle	0.000	0.000	*		
1st Tangential angle	0.000	0.000	*		
Distance bar to bar	0.00	0.00	mm		
Length of half bar	0.000	0.000	mm		
Accuracy of optimiz.	0.000	0.000	mm		
Optimised	No	No			
NC					
	BB	TB	*		
	0.000	0.000	%		
	50.000	50.000	%		
	0.000	0.000	*		
	0.000	0.000	*		
	0.00	0.00	mm		
	0.000	0.000	mm		
	0.000	0.000	mm		
	No	No			
Overhang distance					
CS					
Bore to copper	0.00	0.00	mm		
Copper to copper	0.00	0.00	mm		
NC					
Optimised parameters					
Optimised Length (BB+TB)	0.000	0.000	mm		
Distance in direction of axis z	0.000	0.000	mm		
Copper length					
BB	0.000	mm			
TB	0.000	mm			
Average copper	0.000	mm			
Number variants of bars					
Different variants of bars	0				
Optimised variants of bars	0				
Not optimised variants of bars	0				
Time of calculation					
h	0	min	0	s	0
				ms	90
Rotor					
Start angle for rotor geometry	0.000				

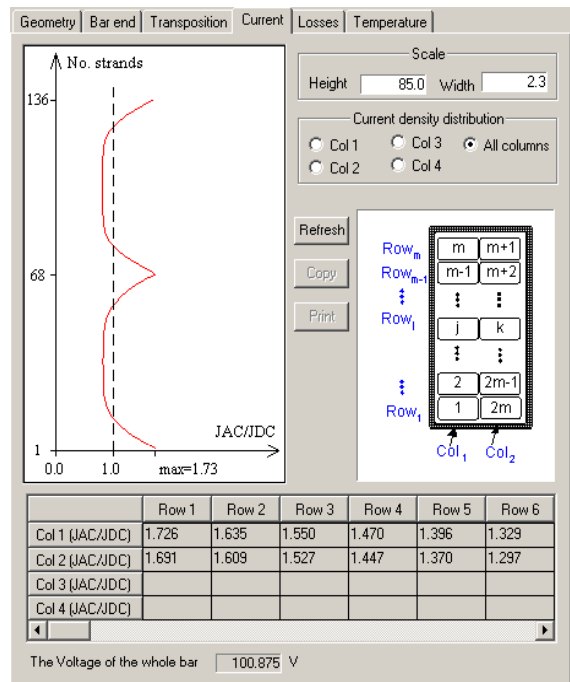
b)

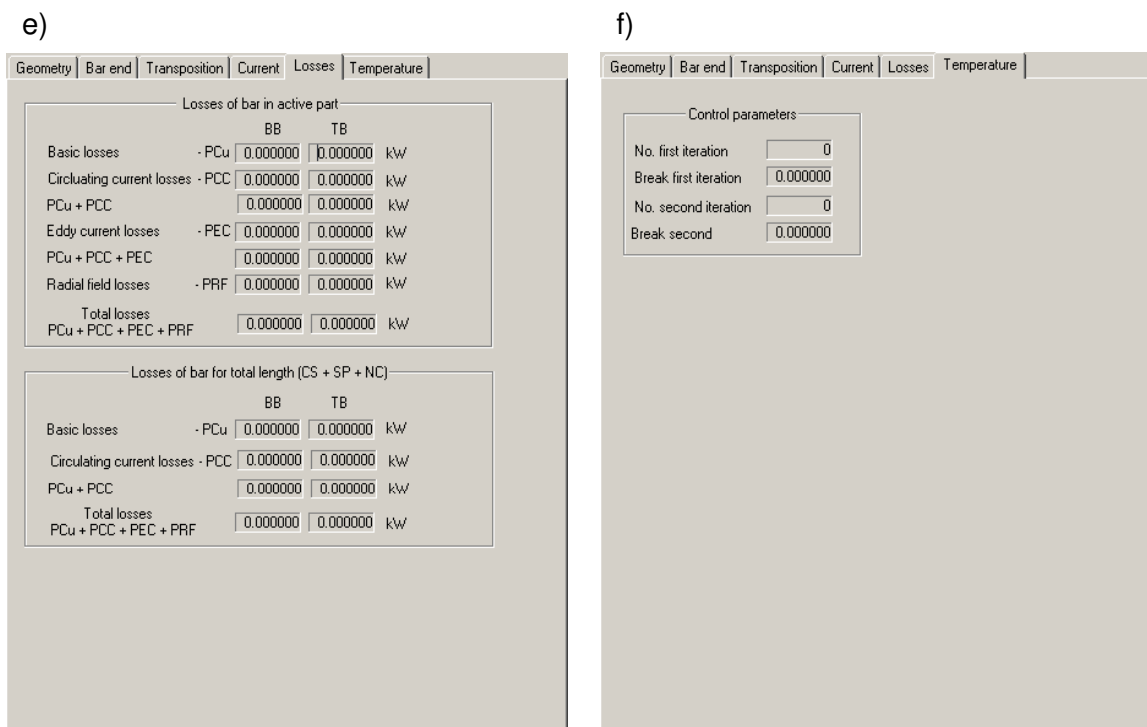


c)

Geometry	Bar end	Transposition	Current	Losses	Temperature
Transposition angle					
	BB	TB	*		
1 Transposition	0.000	0.000	*		
2 Transposition	0.000	0.000	*		
3 Transposition	0.000	0.000	*		
Transposition section length					
	BB	TB	*		
1 Transposition	0.000	0.000	mm		
2 Transposition	0.000	0.000	mm		
3 Transposition	0.000	0.000	mm		
Overhang					
CS					
	BB	TB	*		
Transposition angle	0.000	0.000	*		
Length of transposition section	0.000	0.000	mm		
Length from evolvant to slot part	0.000	0.000	mm		
Length of evolvant	0.000	0.000	mm		
Length after evolvant	0.000	0.000	mm		
Complete length	0.000	0.000	mm		
NC					
	BB	TB	*		
Transposition angle	0.000	0.000	*		
Length of transposition section	0.000	0.000	mm		
Length from evolvant to slot part	0.000	0.000	mm		
Length of evolvant	0.000	0.000	mm		
Length after evolvant	0.000	0.000	mm		
Complete length	0.000	0.000	mm		
Coefficient for circulating current losses					
BB	0.000	TB	0.000		
Coefficient for eddy current losses					
BB	0.000	TB	0.000		
Faze and current of bar					
	Re	Im	Faze		
BB I =	0.000	+ 0.000	A		
TB I =	0.000	+ 0.000	A		
Overhang CS Slot Part Overhang					

d)



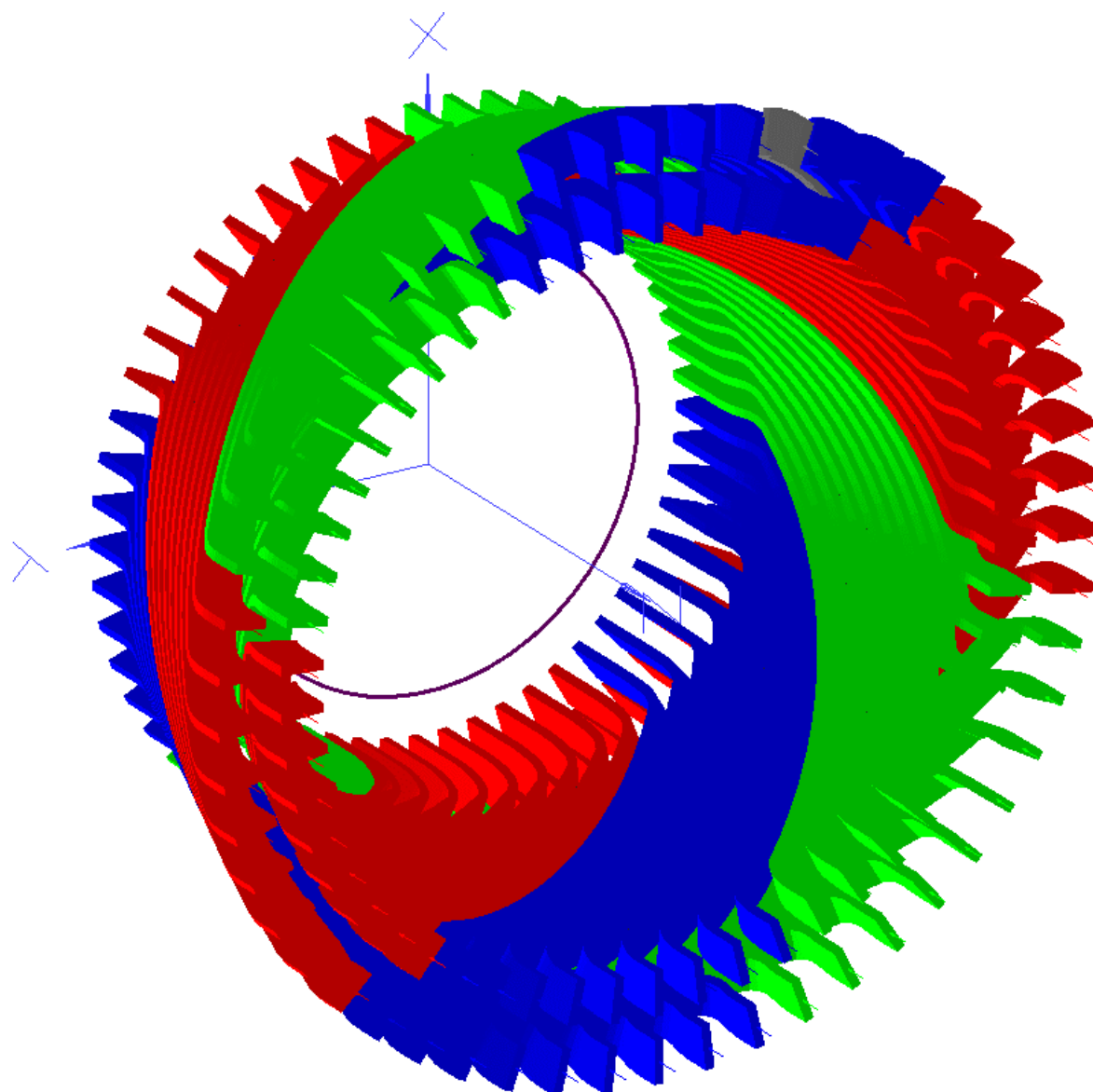


Rys. Z. 1.8 Widok ekranu dla zakładki z danymi wyjściowymi programu Bar: a) zakładka Geometry, b) zakładka Bar end, c) zakładka Transposition, d) zakładka Current, e) zakładka Losses, f) zakładka Temperature

Dane uzyskane z obliczeń geometrycznych przedstawiono w zakładce *Geometry* (rys. Z.1.8a). Parametrem określającym poprawność obliczeń jest jedna z danych o nazwie *Optimised*, która informuje, czy pręty warstwy górnej i dolnej „zbiegają” się na końcu strefy czołowej. Wiadomość „Yes” oznacza, że obliczenia zakończyły się prawidłowo, pręty obu warstw można połączyć za pomocą skuwki, natomiast „No” komunikuje o braku zbieżności prętów na końcu uzwojenia.

Widok kształtu pręta górnego i dolnego w strefie czołowej turbogeneratorsa po wykonaniu obliczeń przedstawiono w zakładce *Bar End* (rzut 3D na płaszczyznę 2D, rys. Z.1.8b). Jest to tzw. "rysunek aktywny", pokazujący rzeczywisty obliczony kształt pręta strefy czołowej uzwojenia. Przykładowy model 3D wykonany w programie Bio3D przedstawiono na rysunku Z.1.9. Wyniki obliczeń z programu Bar w postaci pliku tekstowego zaimportowano do programu Bio3D, który automatycznie rysuje kształt uzwojenia strefy czołowej turbogeneratorsa. Wyniki obliczeń elektromagnetycznych tj. rozkład gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta zaprezentowano w zakładce *Current* (Z.1.8c). Przedstawiony rozkład wykonano dla 136 przewodów elementarnych ułożonych w dwóch kolumnach. Oś odciętych opisuje rozkład gęstości prądu – stosunek J_{ac} / J_{dc} , natomiast oś rzędnych liczbę przewodów elementarnych w pręcie. Przedział 1÷68 odnosi się do lewej kolumny przewodów elementarnych, natomiast przedział 69÷136 do prawej. Dokładną wartość gęstości prądu w każdym przewodzie elementarnym zawarto w tabeli poniżej wykresu.

W zakładce *Transposition* (rys. Z.1.8d) program wyświetla dane przepływu Roebela (podziałka i kąt transpozycji) zadanego dla strefy żłobkowej i czołowej maszyny. Przedstawiono, również wartości współczynnika strat: od prądów cyrkulacyjnych, od prądów wirowych wywołanych strumieniem rozproszenia prostopadłym do boku pręta. Użytkownik otrzymuje informacje o fazie i wartości prądu obliczanego pręta. Straty całkowite w strefie żłobkowej i czołowej wyświetlono w zakładce *Losses* (rys. Z.1.8e).



Rys. Z. 1.9 Uzwojenie stojana w strefie czołowej turbogenerators