

Niniejszy egzemplarz pracy nie zawiera załącznika
z 5 programami (ZW1Z, ZW1M, ZW1D, KK11, KK12)

W przypadku zainteresowania tematyką pracy zapraszam
do dyskusji

Piotr Kacejko

Zakład Elektroenergetyki

IPiUEE

51051 wew 21

lub 70

SPIS TREŚCI

	Str.
1. WSTĘP	6
1.1. Perspektywy rozwoju linii wielotorowych	6
1.2. Znaczenie obliczeń zwarciovych w procesie eksploatacji i projektowania systemu elektroenergetycznego	8
1.3. Sformułowanie tezy rozprawy	10
1.4. Zakres rozprawy	11
2. OCENA ODDZIAŁYWAŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH POMIĘDZY TORAMI LINII DWUTOROWYCH	14
2.1. Uwagi ogólne	14
2.2. Uzasadnienie reprezentatywności wybranych parametrów sieci testowej	15
2.3. Wyniki obliczeń wybranych parametrów zwarciovych	16
2.3.1. Cel oraz zakres przeprowadzonych obliczeń	16
2.3.2. Zestawienie wyników obliczeń rozważanych wielkości zwarciovych	18
2.3.3. Wpływ sprzężeń pomiędzy torami linii napowietrznych na zmiany parametrów niektórych rodzajów zabezpieczeń przekazy-kowych	24
3. WYBÓR METODY MODELOWANIA UKŁADU TORÓW NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH	29
3.1. Uwagi ogólne	29
3.2. Impedancje własne i wzajemne obwodów przewodziemia	30
3.3. Macierz impedancyjna gałęziowa układu wielotorowego i jej przekształcenia	32
3.4. 3.3.1. Budowa macierzy impedancyjnej gałęziowej układu wielotorowego	32
3.3.2. Przekształcenia liniowe macierzy impedancyjnej	
3.3.3. Związek macierzy impedancyjnej gałęziowej układu wielotorowego z jego macierzą admittancyjną węzłową	37

	Str.
3.4. Zróżnicowanie modeli układów wielotorowych ze względu na sposób uwzględniania przewodów odgromowych	40
3.4.1. Zmodyfikowane przekształcenie 0,1,2	40
3.4.2. Założenie o bezimpedancyjnym uziemieniu przewodów odgromowych na krańcach linii	41
3.4.3. Założenie o uziemieniu przewodów odgromowych na każdym słupie	42
3.4.4. Obliczanie elementów zredukowanego schematu układu wielotorowego o p-przęsłach	43
3.5. Dokładność obliczania składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przekąźnika odległościowego jako kryterium wyboru modelu układu wielotorowego	49
3.5.1. Rozważania wstępne	
3.5.2. Analiza składowych zerowych napięć i prądów dla zwarcia jednofazowego z ziemią, przy zastosowaniu zredukowanego schematu "dokładnego" linii	51
3.5.3. Wpływ linii przyłączonych do szyn stacji, w której rozpatruje się zwarcie doziemne, na wartość składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przekąźnika	57
3.5.4. Wpływ dodatkowej linii przyłączonej do szyn stacji, w której zainstalowano przekąźnik, na wartość składowej zerowej napięcia	60
3.5.5. Wpływ zmian długości przęseł i rezystancji uziemień słupów na wartość składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przekąźnika	62
3.5.6. Łączenie zredukowanych schematów zastępczych	63
3.6. Podsumowanie rozważań dotyczących modeli układów wielotorowych	65
4. ANALIZA METOD OBLICZENIOWYCH POZWALAJĄCYCH NA UWZGLĘDNIENIE SPRZĘŻEŃ POMIĘDZY TORAMI W OBLICZENIACH ZWARCIOWYCH ORAZ PROPOZYCJE ICH MODYFIKACJI	68

	Str.
4.1. Uwagi ogólne	
4.2. Metody wykorzystujące model admitancyjny węzłowy układu wielotorowego	69
4.2.1. Rozważania wstępne	
4.2.2. Metoda dołączania gałęzi - zależności podstawowe	
4.2.3. Metoda dołączania gałęzi - szczegółowe uwagi o przebiegu procesu obliczeniowego	72
4.2.4. Metoda dołączania węzłów	78
4.2.5. Porównanie metody dołączania gałęzi i dołączania węzłów pod względem efektywności uwzględniania sprzężeń pomiędzy torami	83
4.2.6. Metody bezpośredniej inwersji macierzy admitancyjnej	85
4.3. Uogólniona metoda dołączania gałęzi	89
4.3.1. Zależności podstawowe	89
4.3.2. Praktyczna realizacja programu wykorzystującego uogólnioną metodę dołączania gałęzi	94
4.4. Dalsze modyfikacje metod dołączania gałęzi	98
4.4.1. Zabezpieczenie procesu obliczeniowego przed występowaniem wyrażeń nieoznaczonych	98
4.4.2. Analiza celowości wprowadzania do schematów zastępczych sieci tzw. "węzłów pozornych"	103
4.4.3. Algorytm wprowadzania węzłów pozornych do sieci zawierającej sprzężone ze sobą gałęzie	108
4.5. Podsumowanie przeprowadzonych analiz metod obliczania warunków zwarciovych w sieci zawierających dużą liczbę sprzężonych ze sobą torów	111
5. ZAKOŃCZENIE	113
5.1. Zestawienie osiągnięć rozprawy, które zdaniem autora można uznać za oryginalne	113
5.2. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz i obliczeń	114
6. LITERATURA	116

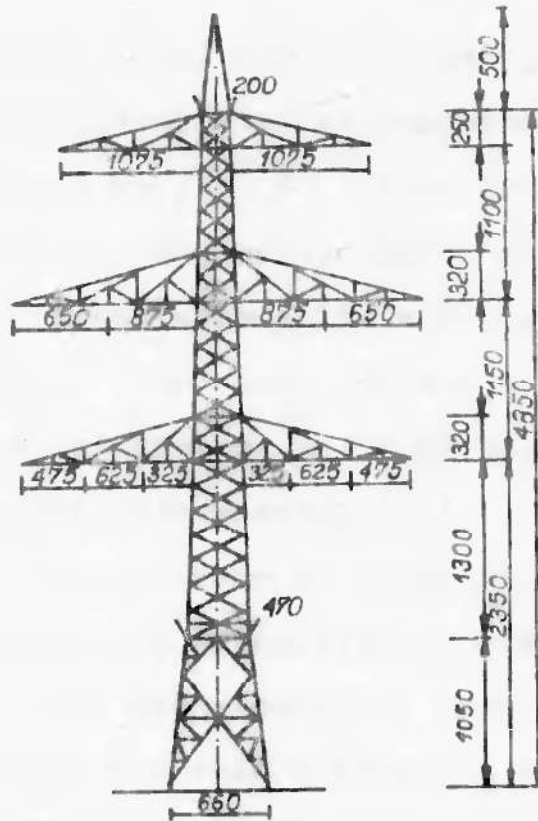
1. WSTĘP

1.1. Perspektywy rozwoju linii wielotorowych

Stale zwiększająca się gęstość zabudowy w regionach wysoko uprzemysłowionych, wzrastające wymagania związane z ochroną środowiska, skłaniają do szukania metod zmniejszenia powierzchni terenów zajętych przez trasy napowietrznych linii elektroenergetycznych. Problematyka wprowadzenia energii elektrycznej do wielkich aglomeracji miejskich jest szeroko dyskutowana na konferencjach CIGRE - [20], [36].

Biorąc pod uwagę fakt, że przejście na przesył i rozdział energii elektrycznej kablami nie jest jeszcze obecnie możliwe zarówno ze względów ekonomicznych jak i technicznych, rozważa się inne możliwości rozwiązania tego zagadnienia. Wysoko uprzemysłowione kraje Europy Zachodniej, a szczególnie RFN wprowadzają od kilkunastu lat - [4], [19], [38], konstrukcje słupowe umożliwiające równoczesne prowadzenie więcej niż dwóch torów napowietrznych linii elektroenergetycznych o jednym bądź dwóch poziomach napięć znamionowych /380 i 110 kV, 380 i 220 kV/ - rys. 1.1. Najnowsze publikacje - [34] przynoszą potwierdzenie dalszego rozwoju wspomnianych linii.

Analizując rozwój sieci elektroenergetycznej w Polsce stwierdzamy, że przyjmowane szczególnie w ostatnim dziesięcioleciu niemożliwe założenie jakoby problem terenów pod budowę linii nie był u nas istotny, straciło obecnie aktualność. Aczkolwiek pod koniec lat sześćdziesiątych w opracowaniach Instytutu Energetyki - [17] sugerowano rozpatrzenie możliwości



Rys. 1.1. Słup linii 4-torowej 380 i 110 kV wg [347].

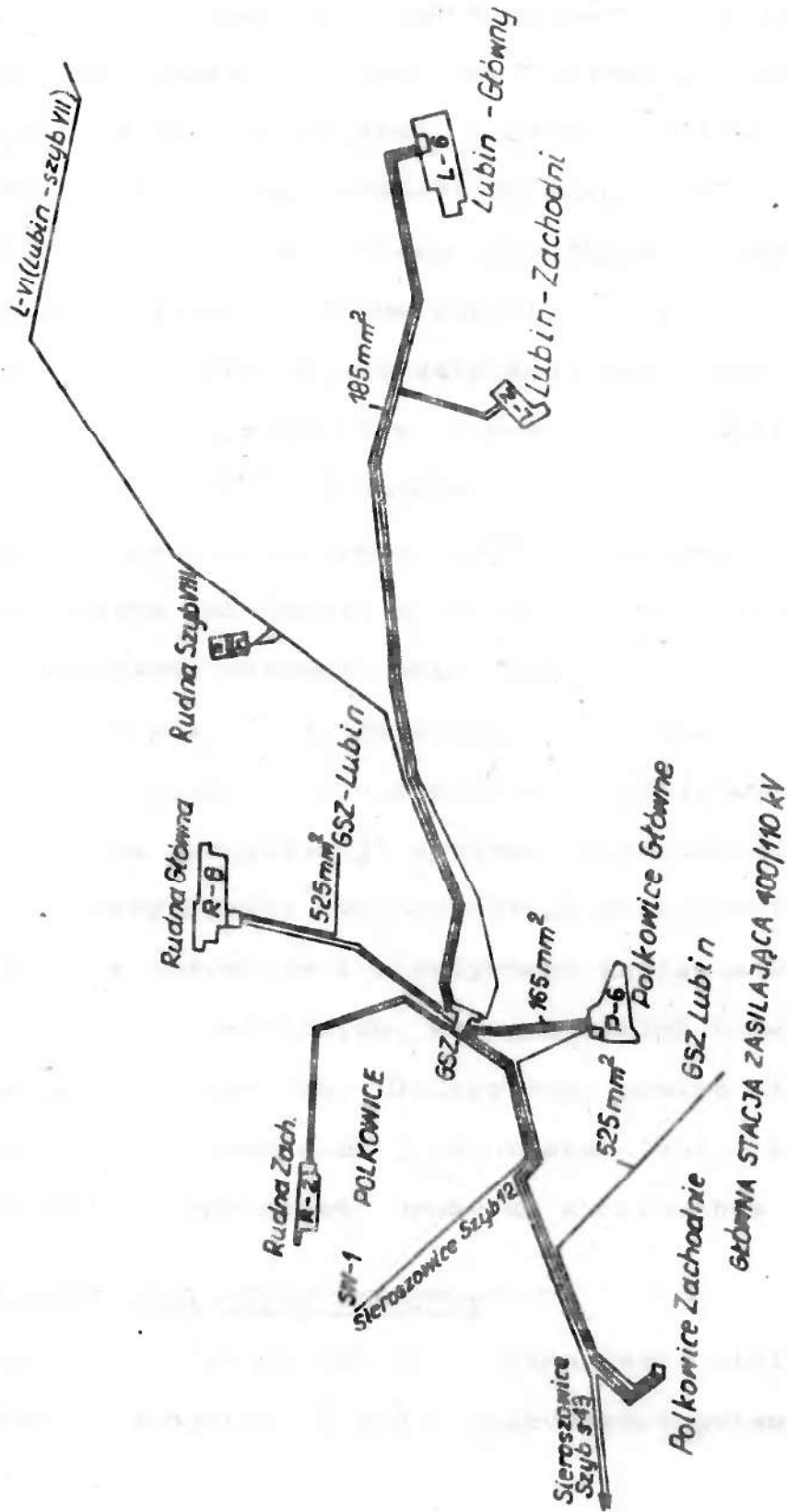
wprowadzenia w Polsce linii wielotorowych, to jednak do tej pory nie dooczekaliśmy się one realizacji. Główne powody to obawy przed trudnościami w prowadzeniu niezawodnej eksploatacji i ograniczenia inwestycyjne. Jedynie Zakłady Badawczo-Projektowe Miedzi "Cuprum" przejawiały zainteresowanie tematem zlecając Politechnice Wrocławskiej przeprowadzenie analizy celowości wprowadzenia takich linii na terenie Kombinatu Górniczo-Hutniczego Miedzi. Powstałe opracowanie - [24], uzasadniało ekonomiczną opłacalność zastosowania linii wielotorowych na terenie Kombinatu. Aktualne prace prognostyczne Instytutu Energetyki - [18], nie przewidują wprowadzenia w kraju linii wielotorowych ($N > 2$), zakładając natomiast wzrost liczby linii dwutorowych. Już obecnie linii takich jest w kraju dość dużo, szczególnie w regionach uprzemysłowionych. Przykładowo, na terenie ZEOPd

na 1709 km odcinków linii 220 kV występuje 892 km odcinków dwutorowych. Dla napięcia 110 kV odpowiednie liczby wynoszą 5703 km i 2443 km (wg. [17]). Inne zagadnienie to wzajemna odległość linii elektroenergetycznych. Aczkolwiek norma PN 75/E-05100 - "Napowietrzne linie elektroenergetyczne - projektowanie i budowa" dopuszcza znaczne zbliżenie linii /odległość ich powinna być większa o 1 m od największej odległości pomiędzy przewodami pojedynczej linii/ to jednak projektanci przyjmują odległości większe od wysokości słupów. Fragment planu terenowego sieci 110 kV na terenie KGHM przedstawiony na rys. 1.2. potwierdza występowanie w praktyce tzw. "korytarzy" linii biegnących obok siebie w bliskiej odległości.

Reasumując powyższe rozważania można stwierdzić, że jedną z tendencji charakteryzujących rozwój dzisiejszego systemu elektroenergetycznego jest wzrost liczby torów linii napowietrznych znajdujących się w bliskiej odległości od siebie, a tym samym podlegających wzajemnym oddziaływaniom elektromagnetycznym.

1.2. Znaczenie obliczeń zwarciowych w procesie eksploatacji i projektowania systemu elektroenergetycznego

Dążenie do zapewnienia maksymalnej pewności pracy systemu elektroenergetycznego, wiąże się z koniecznością przewidywania jego zachowania się w warunkach zakłóceń. Podstawowym źródłem związanych z tym informacji są metody analityczne wykorzystujące modele matematyczne elementów systemu. Znane powszechnie obliczenia prądów zwarciowych prowadzone są od kilkunastu lat przy pomocy maszyn cyfrowych. Odpowiednie służby krajowej energetyki dysponują dobrym oprogramowaniem, dzięki któremu wielkości zwarciowe mogą być liczone kompleksowo dla sieci



Rys. 1.2. Fragment sieci 110 kV na terenie KGHM wg. L247/podziałka 1:50 000/

o bardzo dużych rozmiarach /kilkaset gałęzi i węzłów/ - [14]7, [10]7, [37]7.

Szczególne istotnym elementem wiążącym się z pewnością pracy systemu elektroenergetycznego jest automatyka zabezpieczeniowa. Stawia się jej szereg wymagań, z których najważniejsze to duża szybkość, czułość i wybiórczość działania. Aby warunki te mogły być spełnione, zaistalowane w systemie zabezpieczenia przekąźnikowe muszą mieć dobrane odpowiednio parametry nastawowe. Złożoność współczesnych przekąźników, zmienność warunków ich pracy powoduje, że parametry te muszą być dobierane ze szczególną uwagą. Dlatego też obserwuje się tendencję do powierzenia kontroli nad wartościami nastawień maszynom cyfrowym, które dokonywałyby ich korekt w zależności od obliczanych w sposób możliwie dokładny warunków zwarciowych - [7]7.

Podobne, choć nie tak ostre wymagania stawia obliczeniom zwarciowym problematyka doboru aparatury rozdzielczej. Postępująca komputeryzacja eksploatacji systemu elektroenergetycznego, spodziewana w przyszłości komputeryzacja zabezpieczeń, wymaga zatem istnienia sprawnego i efektywnego zaplecza w postaci programów obliczeń zwarciowych, których wyniki będą ^{pod uwagę}brane przy kierowaniu pracą systemu. Dlatego też, pomimo istnienia takiego oprogramowania, dążenie do jego udoskonalenia, skracania procesu obliczeniowego należy uznać za uzasadnione.

1.3. Sformułowanie tezy rozprawy

Problem, który podjął autor jako temat niniejszej rozprawy wynika ze skojarzenia dwóch zagadnień omówionych w p. 1.1. oraz 1.2. tj.:

- spodziewanego wzrostu liczby sprzężonych ze sobą torów

linii napowietrznych,

- uzasadnionego potrzebami eksploatacyjnymi i projektowymi, dążenia do udoskonalenia oprogramowania obliczeń zwarciovych w systemie elektroenergetycznym.

Zagadnienie konieczności uwzględniania wpływu sprzężeń pomiędzy torami linii napowietrznych przy doborze nastawień zabezpieczeń przekąźnikowych, sygnalizowane w literaturze - [26], [44], było także zauważane przez autora podczas stażu w Zakładach Energetycznych Okręgu Centralnego.

Podjęwane poprzednio przez autora prace [22], [23] oraz obserwacja tendencji wymienionych w p. 1.1 i 1.2, skłoniły do sformułowania przedstawionego poniżej problemu:

- czy stosowane obecnie metody obliczeń zwarciovych i ich oprogramowanie pozwalają na efektywne uwzględnianie w nich znacznej liczby sprzężonych ze sobą torów, w świetle potrzeb płynących z praktyki eksploatacyjnej i projektowej systemu elektroenergetycznego?

Przeprowadzone rozważania, poparte licznymi obliczeniami, dają odpowiedź na to pytanie, która zawarta jest w sformułowanej poniżej tezie rozprawy:

"Wzrost liczby sprzężonych ze sobą torów napowietrznych linii elektroenergetycznych powinien znaleźć odbicie w modyfikacjach metod określania warunków zwarciovych".

1.4. Zakres rozprawy

Podjmując temat dotyczący rozwiązywania obwodów elektrycznych w stanie ustalonym, co z punktu widzenia algebry jest równoznaczne z rozwiązywaniem układów równań liniowych, trudno liczyć przy obecnym poziomie nauki, na znalezienie

nowych teorii czy twierdzeń. Wydaje się, że w zakresie ogólnych zasad rozwiązywania tego typu zagadnień, nie ma już nic istotnego do dodania. Praktyka wskazuje jednak na pewne problemy, które wymagają rozstrzygnięcia, aczkolwiek z ogólnego punktu widzenia mogą się one nie wydawać specjalnie atrakcyjne.

Dlatego też niniejsza praca nie zawiera omówienia jednego zagadnienia czy teorii, ale porusza kilka spraw, wobec których autor na podstawie własnych rozważań mógł zająć stanowisko.

W celu wyraźniejszego potwierdzenia celowości podjęcia sformułowanego wyżej tematu, rozważono sieć zbliżoną do sieci 110 i 220 kV ZE Warszawa-Miasto /zwaną dalej siecią testową/.

Analizując warunki zwarcie bez uwzględniania sprzężeń pomiędzy torami linii dwutorowych i przy ich uwzględnianiu, wykorzystano stosowany w energetyce program ZW1 - [16] 7.

W związku z faktem, że czynnością poprzedzającą właściwe obliczenia zwarcie jest przyjęcie odpowiednich modeli matematycznych elementów systemu, rozważono rzeczywisty układ przewodów wchodzący w skład sprzężonych ze sobą torów /zwany dalej układem wielotorowym/. Przedyskutowano celowość stosowania proponowanego w literaturze modelu w postaci macierzy admitancyjnej węzłowej. Rozpatrzono możliwość zastąpienia modelu dokładnego linii dwutorowej modelem katalogowym. Używany w pracy termin "model dokładny" wiąże się z przyjęciem założenia o uziemieniu przewodów odgromowych linii, na każdym słupie, tak jak ma to miejsce w praktyce. Przyjęcie założenia o bezimpedancyjnym uziemieniu tych przewodów na krańcach linii, przy pominięciu rezystancji uziemień słupów /tak jak to czyni "Energoprojekt" przy podawaniu parametrów linii WN w katalogach/ wiąże się z terminem "model katalogowy".

Przechodząc do właściwych obliczeń zwarciovych przeanalizowano metody stosowane w praktyce krajowej, zwracając uwagę na przebieg procesu obliczeniowego w sieci o dużej liczbie sprzężonych ze sobą torów. Wykazano, że powinny być one zmodyfikowane tak, aby uległ skróceniu czas obliczeń, wyeliminowana została możliwość wystąpienia wyrażeń nieoznaczonych oraz, by uproszczony został proces przygotowania danych. Powyższe postulaty zrealizowano uruchamiając programy ZW1M, ZW1Z, ZW1D, posiadające lepsze od wspomnianego już programu ZW1 możliwości obliczeniowe; dla sieci o dużej liczbie sprzężeń. Oprócz wymienionych powyżej, zrealizowano w ramach niniejszej pracy inne programy.

Z uwagi na ich zakres mogą mieć one również praktyczne zastosowanie. Program KK11 pozwala na obliczenie macierzy impedancyjnej gałęziowej układu wielotorowego na podstawie jego wymiarów geometrycznych i danych o przewodach oraz na określenie macierzy impedancyjnych dla składowej symetrycznej zgodnej i zerowej, przy różnych założeniach dotyczących symetrii.

Program KK12 oblicza parametry zredukowanego układu wielotorowego o p przęsłach i L przewodach odgromowych uziemionych na każdym słupie. Program E410 - [21] pozwala na rozwiązywanie układów równań liniowych i odwracanie macierzy przy wykorzystaniu ich rzadkiej struktury wykorzystując algorytm [43].

Autor pragnie podkreślić, że używając terminu "oddziaływania elektromagnetyczne" ograniczono się w rzeczywistości do rozwiązywania wyłącznie oddziaływań magnetycznych zachodzących pomiędzy torami. Zamiennie z tym terminem stosowano termin "sprzężenia elektromagnetyczne" bądź po prostu "sprzężenia".

2. OCENA ODDZIAŁYWAŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH POMIĘDZY TORAMI LINII DWUTOROWYCH

2.1. Uwagi ogólne

Aby zbadać rzeczywisty wpływ oddziaływań elektromagnetycznych pomiędzy torami napowietrznych linii elektroenergetycznych na wartości prądów i napięć w stanach zwarciovych, należałoby dokonać szeregu trudnych technicznie pomiarów. Otrzymane wyniki charakteryzowałyby jedynie pewien fragment sieci elektroenergetycznej, podczas gdy w innym jej miejscu oddziaływania te mogłyby mieć zupełnie inny wpływ na wartości rozpatrywanych wielkości zwarciovych.

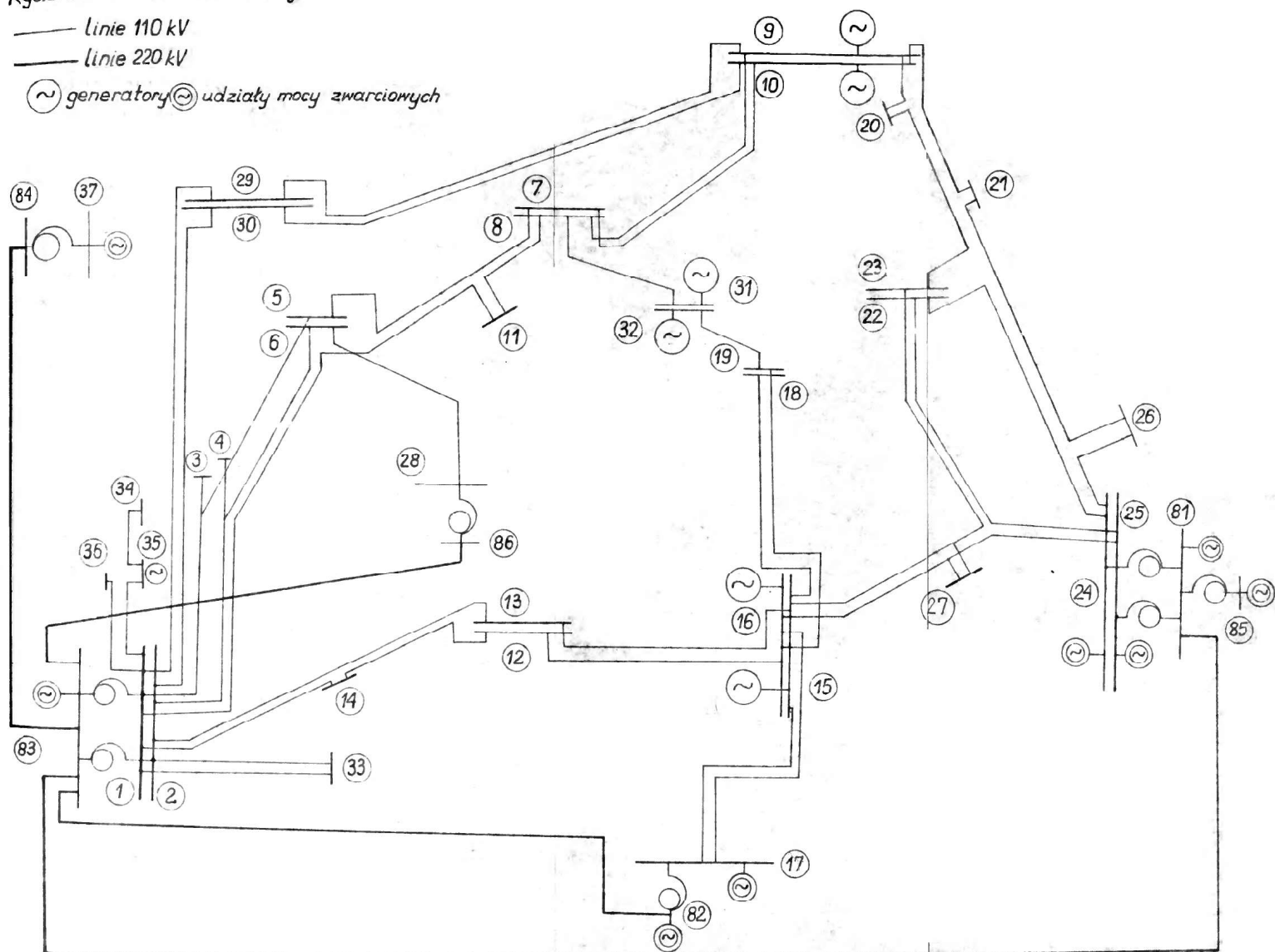
Jest więc oczywiste, że jedynie analiza zwarciova prowadzona dla wielu możliwych konfiguracji sieci rzeczywistych może dać nam pogląd na faktyczne skutki rozważanych oddziaływań. Wprowadzone w PN-74/E-05002 - [31_7] założenia upraszczające, pozwalają na łatwe modelowanie sieci elektroenergetycznych i wykonywanie obliczeń m.in. przy pomocy maszyn cyfrowych. Analizując wpływ sprzężeń elektromagnetycznych pomiędzy torami linii napowietrznych utrzymano w mocy założenia wprowadzone przez normę /liniowość elementów sieci, pomijanie rezystancji, gałęzi poprzecznych, pojemności i prądów obciążenia w chwili poprzedzającej zakłócenie/. Słuszność niektórych spośród wspomnianych założeń przedyskutowano w rozdziale 3.

W celu uzyskania możliwości porównywania wyników wszystkich obliczeń przeprowadzanych w niniejszej pracy, skoncentrowano uwagę na tzw. sieci testowej - rys. 2.1. Pod względem topologii i wartości reaktancji elementów jest ona podobna do sieci 110 i 220 kV na terenie Warszawy. Poniżej dokonano porównania jej

Rys.2.1. Schemat sieci testowej

— linie 110 kV
— linie 220 kV

⊗ generatory ⊙ udziały mocy zwarciowych



parametrów topologicznych z parametrami innych sieci krajowych

2.2. Uzasadnienie reprezentatywności wybranych parametrów sieci testowej

Sieć testowa liczy zgodnie z rys. 2.1. $n = 51$ węzłów, $B = 116$ gałęzi. Przyjmując, że z danym węzłem może łączyć się tylko jeden element udziałowy /generator, system elektroenergetyczny, reaktancja zerowa transformatora $\Delta / \text{tr} /$ liczba gałęzi zmniejsza się do $B' = 97$. Stosunek liczby gałęzi do liczby węzłów, oznaczony jako k_t , wynosi dla tej sieci 1.90. Dla systemu elektroenergetycznego PRL /220, 400 kV/ - wg [15] powyższe parametry wynoszą odpowiednio:

$$n = 278 \quad B = 569 \quad B' = 444 \quad k_t = 1.60$$

Dla sieci ZEOPu:

$$n = 215 \quad B = 390 \quad B' = 362 \quad k_t = 1.68$$

Wprowadzenie do sieci testowej tzw. węzłów pozornych /rys. 2.2/ powoduje, że linia o danym numerze może być sprzężona z co najwyżej jedną linią /dyskusję konieczności wprowadzania tych węzłów zawiera rozdział 4/ i pociąga za sobą kolejną zmianę parametrów topologicznych sieci testowej:

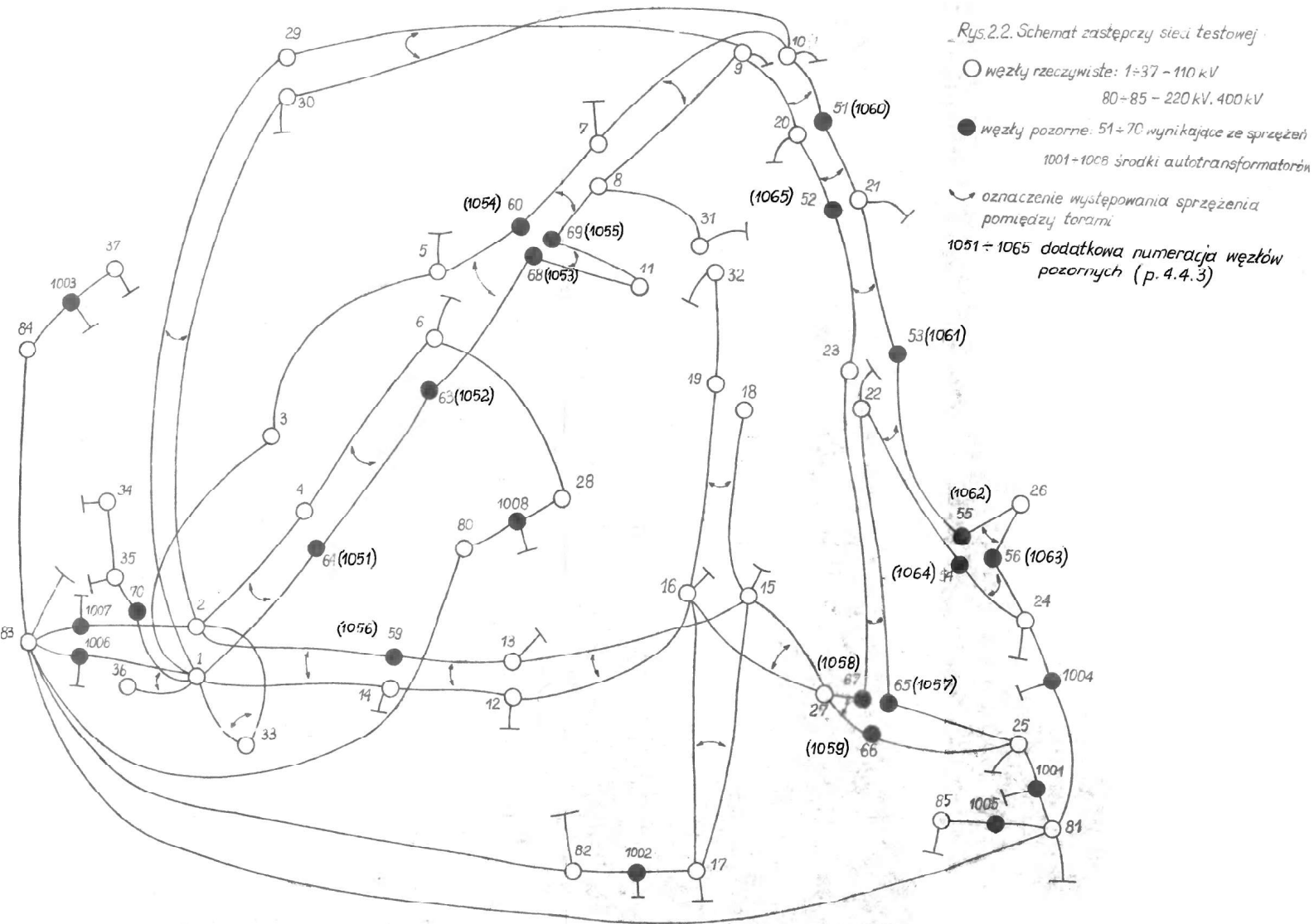
$$n_0 = 67 \quad B_0 = 113 \quad k_t = 1.69$$

Porównanie wartości parametrów k_t rozpatrywanych sieci, świadczy o tym, że liczba gałęzi przypadająca na jeden węzeł jest dla nich podobna. Wiadomo równocześnie - [5], [8], że wielkość k_t ma decydujące znaczenie przy wyborze metody obliczania danej sieci.

Większość linii sieci testowej są to linie dwutorowe. Po wprowadzeniu węzłów pozornych liczy ona 25 odcinków sprzężonych.



Inf.



Wartości mocy zwarciovych na napięciu 220 i 110 kV, długości poszczególnych odcinków linii, dane znamionowe transformatorów i generatorów są zbliżone do rzeczywistych, występujących w sieci ZE Warszawa Miasto. Większość stacji pracuje z otwartym łącznikiem sekcyjnym /rys. 2.1/ co powoduje, że znaczna liczba torów "odozuwa" zwarcie w torze sąsiednim jedynie na skutek oddziaływań elektromagnetycznych.

Reasumując można stwierdzić, że:

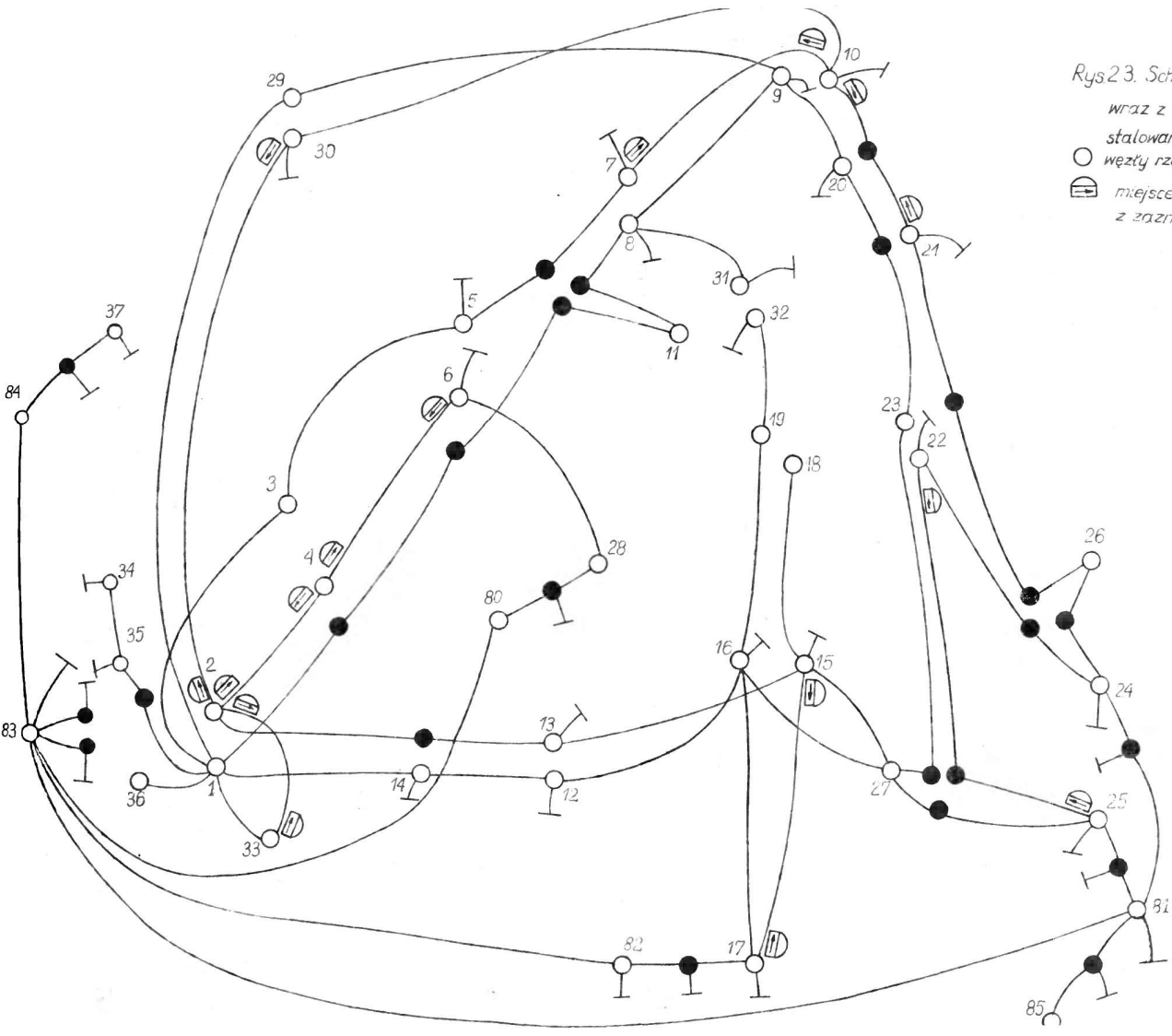
- a/ pod względem topologii i wartości reaktancji sieć testowa nie odbiega od rzeczywistych sieci krajowych,
- b/ w sieci testowej nie uczyniono żadnych specjalnych założeń powodujących w sztuczny, niespotykany w praktyce sposób, zwiększenie oddziaływań pomiędzy torami sprzężonymi,
- c/ uzyskane wyniki obliczeń wielkości zwarciovych mogą być reprezentatywne dla sieci 110 kV dużych aglomeracji miejskich, a także, w sensie jakościowym, dla innych sieci krajowych zawierających linie dwutorowe.

2.3. Wyniki obliczeń wybranych parametrów zwarciovych

2.3.1. Cel oraz zakres przeprowadzonych obliczeń

Obliczenia zwarciove prowadzone dla dużych sieci elektroenergetycznych przy pomocy maszyn cyfrowych mają na celu otrzymanie danych potrzebnych dla doboru aparatury pierwotnej, kontroli skuteczności uziemienia punktu zerowego transformatorów i doboru nastawień zabezpieczeń przekaźnikowych. W niniejszej pracy, z uwagi na fakt, że oddziaływanie pomiędzy torami linii dwutorowych mają miejsce jedynie podczas przepływu przez nie składowej zerowej prądu /a więc dla zwarć doziemnych/ nie rozwa-

Rys.23. Schemat zastępczy sieci testowej
 wraz z zaznaczonymi miejscami zain-
 stalowania rozpatrywanych przełącznika
 ○ węzły rzeczywiste ● węzły pozorne
 ⊞ miejsce zainstalowania przełącznika
 z zaznaczonym kierunkiem działania



żane pierwszego spośród wymienionych zagadnień.

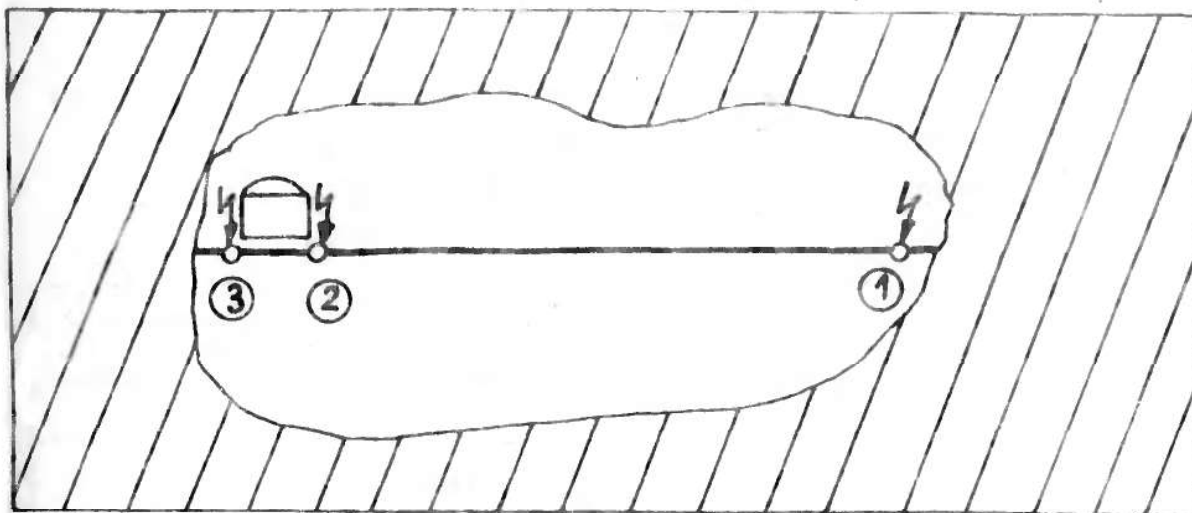
Dla sieci testowej przeprowadzono analizę wielkości zwarciovych związanych z nastawieniami 16 przełączników, których usytuowanie przedstawia rys. 2.3. Dla każdego punktu zainstalowania przełącznika określono następujące parametry:

- składową zerową prądu zwarcia jednofazowego z ziemią na końcu linii zabezpieczanej - punkt ① /rys. 2.4/,
- składową zerową prądu i prąd wyrównawczy faz "zdrowych" dla zwarcia jednofazowego przed przełącznikiem - punkt ② /rys. 2.4/,
- składową zerową prądu i prąd wyrównawczy faz "zdrowych" dla zwarcia jednofazowego za przełącznikiem punkt ③ /rys. 2.4/.

Przy wyborze powyższych wielkości brano pod uwagę fakt, że ich znajomość jest konieczna przy określaniu nastawień przełączników pracujących w sieciach krajowych m.in. przełączników odległościowych L3, RTX-34, RTX-35. Dokonano również oszacowania reaktancji widzianej przez zabezpieczenie odległościowe, dla zwarcia jednofazowego w punkcie ①. Aczkolwiek, na krótkich odcinkach sieciowych (szczególnie linii 220 kV) wprowadzane są obecnie zabezpieczenia porównawczofazowe, to jednak najszerszej rozważane w pracy zabezpieczenia odległościowe stanowiąc będą przez długi jeszcze okres czasu, najbardziej rozpowszechniony rodzaj zabezpieczeń sieci WN.

Tablice zamieszczone w p. 2.3.2. zawierają wyniki obliczeń wykonanych przy pomocy stosowanego w energetyce zawodowej i biurach projektowych programu ZW1 - [16]. Wykorzystany w programie algorytm bazuje na założeniach normy PN-74/E-05002.

Obliczenia wykonano przyjmując, że reaktancja wzajemna pomiędzy torami, dla wszystkich rozpatrywanych odcinków dwutorowych



Rys. 2.4. Fragment systemu elektroenergetycznego, z wyodrębnioną linią zabezpieczoną i z oznaczonymi punktami, dla których określano wielkości zwarciove.

jest równa połowie reaktancji dla składowej zerowej $X_M = \frac{1}{2} X_0$.
Słuszność tego założenia przedyskutowano w rozdziale 3.

2.3.2. Zestawienie wyników obliczeń rozważanych wielkości zwarciowych

Wartości omówionych w p. 2.3.1. wielkości zwarciowych, obliczone dla 16 miejsc zainstalowania przekaźników w sieci testowej /rys. 2.3/ zestawiono w tablicach zamieszczonych poniżej.

Tablica 2.1. Zestawienie wartości prądów $3I_0$ dla zwarć jedno-
fazowych z ziemią na końcach linii zabezpiecza-
nych przez przekładniki zainstalowane w wybranych
punktach sieci testowej.

Oznaczenie przełaź- nika	$3I_0$		$\Delta = \frac{B - A}{A} \cdot 100\%$
	A - bez sprzę- żenia [A]	B - ze sprzę- żeniem [A]	
4 → 6	8101	8603	6.2%
6 → 4	5762	5487	-4.8%
2 → 4	11622	12084	4.0%
4 → 2	2832	2554	-9.8%
30 → 2	1394	1386	-0,5%
2 → 30	3541	3641	-2.8%
17 → 15	3700	4168	12.6%
15 → 17	3700	4108	-26.0%
10 → 21	7429	8389	12.9%
21 → 10	2938	3197	8.8%
7 → 10	4286	4537	5.8%
10 → 7	6577	6838	3.8%
2 → 33	9668	8488	-12,2%
33 → 2	2950	4563	54.7%
25 → 22	3385	3954	16.8%
22 → 25	1774	1293	-27.1%

- A. Obliczone przy założeniu braku sprzężenia pomiędzy torami.
 B. Obliczone przy uwzględnianiu sprzężenia, zgodnie z p. 2.3.1.
 Oznaczenie miejsca zainstalowania przełącznika: X → Y
 X - węzeł tuż za przełącznikiem,
 Y - węzeł krańcowy linii zabezpieczanej.

Tablica 2.2. Zestawienie wartości prądów $3I_0$ i prądów wyrównawczych I_w dla zwarć jednofazowych z ziemią przed przekąźnikami zainstalowanymi w wybranych punktach sieci testowej /oznaczenia jak w tabl. 2.1/.

Oznaczenie prze- kaźnika	$3I_0$		$\Delta = \frac{B-A}{A} \cdot 100$	I_w		$\Delta = \frac{B-A}{A} \cdot 100$
	A - /A/	B - /A/		A - /A/	B - /A/	
4→6	11622	12084	4.0%	-729	-622	-14.7%
6→4	5566	5362	-3.7%	494	406	-17.8%
4→2	5762	5487	-4.8%	729	622	-14.7%
2→4	23621	24212	2.5%	66	172	16.0%
30→2	8725	7660	-12.2%	573	545	-4.9%
2→30	25059	25380	1.3%	714	731	2.4%
17→15	14405	16543	14.8%	1030	1202	16.7%
15→17	16312	18457	13.1%	22	18	18%
10→21	15820	16051	1.5%	82	88	7.3%
21→10	5208	4618	-11.3%	588	1071	82%
7→10	9261	9252	-0.1%	418	369	-11.7%
10→7	14597	14773	1.2%	418	647	54.8%
2→33	21500	22203	3.3%	1653	1146	-30.1%
33→2	9561	8460	-12.5%	-432	-384	-12.2%
25→22	16953	16933	0.0%	264	403	52.7%
22→25	5614	5712	1.7%	535	469	-14.0%

Tablica 2.3. Zestawienie wartości prądów $3I_0$ i prądów wyrównawczych I_w dla zwarć jednofazowych z ziemią za przekąźnikami zainstalowanymi w wybranych punktach sieci testowej /oznaczenia jak w tabl. 2.1/.

Oznaczenia prze- kaźnika	$3I_0$			I_w		
	A -/A/	B /A/	$\Delta = \frac{B-A}{100 A}$	A - /A/	B /A/	$\Delta = \frac{B-A}{100 A}$
4 → 6	5762	5487	-4.8%	729	622	-14.7%
6 → 4	8101	8603	6.2%	-494	-406	-17.8%
4 → 2	11622	12084	4.0%	-729	-622	-14.7%
2 → 4	2232	2554	-13.9%	- 66	-172	160%
30 → 2	3541	3641	2.8%	-573	-545	- 4.9%
2 → 30	1394	1386	-0,5%	-714	-731	2.4%
17 → 15	2713	2008	26%	-1030	-1202	16.7%
15 → 17	3700	4168	12.6%	- 22	-18	18%
10 → 21	3085	3112	0.9%	- 82	-88	7.3%
21 → 10	7429	8389	12.9%	-588	-1071	82%
7 → 10	6577	6838	4.2%	-418	- 369	-11.7%
10 → 7	4286	4537	5.8%	-418	- 647	54.8%
2 → 33	2950	4563	54.7%	-1653	-1146	-30.1%
33 → 2	9671	8460	-12.5%	432	384	-12.2%
25 → 22	1774	1293	-27.1%	-264	-403	52.7%
22 → 25	3385	3954	16.8%	-535	-469	-14.0%

Tablica 2.4. Zestawienie reaktancji widzianych przez przełączniki zainstalowane w wybranych punktach sieci testowej, dla zwarć jednofazowych na końcu zabezpieczonych przez nie linii*/oznaczenia jak w tabl. 2.1/

Oznaczenie przełącznika	$X_p / \Omega /$ bez uwzględnienia sprzężeń - A	$X_p / \Omega /$ przy uwzględnieniu sprzężeń - B	$\Delta = \frac{B-A}{A} \cdot 100$
4 → 6	1.05	0.99	-5.7%
6 → 4	1.05	1.15	9.5%
2 → 4	1.64	1.61	-1.9%
4 → 2	1.64	1.74	6.2%
30 → 2	7.07	6.98	-1.2%
2 → 30	7.07	6.97	-1.5%
17 → 15	6.18	5.40	-13%
15 → 17	6.18	7.59	22.8%
10 → 21	2.10	1.94	-7.5%
21 → 10	2.10	2.13	-1.6%
7 → 10	2.21	2.08	-5.9%
10 → 7	2.21	2.15	-3.5%
2 → 33	2.41	3.11	28.7%
33 → 2	2.41	1.90	-21.7%
25 → 22	7.18	6.41	-10.7%
22 → 25	7.18	9.90	37.9%

*/ zakładano, że

$$X_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{U_p}{I_{1F} + 3k_k I_o}$$

k_k - współczynnik kompensacji prądowej /por. p. 2.3.3/

$$U_p = U_1 + U_2 + U_o$$

I_{1F} , I_o - obliczone przy pomocy programu ZW1 - [16]

Tablica 2.5. Zestawienie reaktacji własnych dla składowej zerowej wybranych węzłów sieci testowej /oznaczenia jak w tabl. 2.1/.

Numer węzła	2	4	6	7	10	15	17	21	22	25	33
$X_0 [\Omega]$ - A	1.849	3.758	4.180	5.151	3.731	4.851	3.975	6.8740	10.003	3.882	4.124
$X_0 [\Omega]$ - B	1.756	3.635	3.979	4.961	3.485	3.880	4.345	6.3840	8.368	4.148	5.656
$\Delta = \frac{B - A}{A} \cdot 100$	-5%	-3.2%	-4.8%	-3.7%	-6.6%	-20%	9.3%	-7.7%	-16.3%	6.8%	37%

Trudno jest w tym miejscu podjąć się oceny, czy zmiany wartości wielkości zwarciowych zestawionych w tabl. 2.1 + 2.5 mają znaczenie istotne, czy też nie. Pewne naświetlenie tego problemu zawiera p. 2.3.3. Wydaje się, że najistotniejszym spostrzeżeniem wynikającym z analizy zamieszczonych wyników jest ogromna różnorodność tych zmian, zarówno co do wartości jak i kierunku. Intencją autora niniejszej pracy nie było oczywiście wyłącznie wykonanie obliczeń, przy wykorzystaniu znanego oprogramowania, lecz wykazanie właśnie tej różnorodności konsekwencji wynikających z uwzględniania sprzężeń. Zamieszczone poniżej rozważania, stanowią ocenę istotności zauważonych zmian, z punktu widzenia zabezpieczeń elektroenergetycznych.

2.3.3. Wpływ sprzężeń pomiędzy torami linii napowietrznych na zmiany parametrów niektórych rodzajów zabezpieczeń przekąźnikowych

Prowadząc niniejsze rozważania z punktu widzenia obliczeń systemowych, nie analizowano rzeczywistych nastawień zabezpieczeń, gdyż wymagałoby to wprowadzenia wielu dodatkowych założeń. Skoncentrowano się wyłącznie na wskazaniu tych parametrów nastawczych przekąźników, które przy uwzględnianiu sprzężeń pomiędzy torami powinny być zmienione.

- Współczynnik kompensacji prądowej (parametr przekąźników odległościowych) -

Dla zwarć doziemnych, do przekąźników tych doprowadzany jest prąd będący kombinacją liniową prądu fazowego linii doziemnej i jego składowej zerowej. Umożliwia to prawidłowy pomiar reaktancji linii zabezpieczanej. Bez uwzględniania sprzężeń, k_k oblicza się jako:

$$k_k = \frac{X_0 - X_1}{3 X_1} \quad /2.1/$$

gdzie:

X_1 , X_0 są to reaktancje linii odpowiednio dla składowej zgodnej i zerowej.

Nastawianie współczynnika k_k obliczonego w ten sposób prowadzi w sieciach ze sprzężeniami do błędów pomiaru reaktancji

/tabl. 2.4/. W celu skorygowania tego błędu należy określać

k_k jako:

$$k_k = \frac{U_P}{3 I_0 X_1} - \frac{I_{1F}}{3 I_0} \quad /2.2/$$

gdzie: U_P - napięcie mierzone przez przekaźnik obliczone dla zwarcia jednofazowego na końcu linii zabezpieczonej.

Dla przekaźnika 17_→15 /rys. 2.3/ należałoby np. zmienić nastawienie k_k z 0.8 do 0.56. Błędy pomiaru reaktancji nawet rzędu 5 - 10% mogą prowadzić do nieselektywnej pracy zabezpieczeń /skracanie stref/ i opóźnień w ich działaniu /wydłużanie stref/. Jeśli uwzględnimy ponadto zmiany konfiguracji sieci mające często miejsce w praktyce, wtedy oczywista staje się konieczność określania k_k na podstawie skomputeryzowanych obliczeń zwarciovych.

Impedancja rozruchowa /przekaźniki odległościowe typu L3/

Zgodnie z zaleceniami podanymi przez wytwórcę tego przekaźnika /firma BBC/ impedancję rozruchową określa się na podstawie wzoru:

$$Z_r = \frac{0.85 U_n}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot (I_{rm} + I_w)} \quad /2.3/$$

gdzie: I_{rm} - maksymalny prąd roboczy

I_w - maksymalny prąd wyrównawczy

Dla linii 110 kV /przewody robocze AFL 240 mm²/ wartości prądów roboczych nie przekraczają 650 A. Na podstawie tablic 2.2 i 2.3 stwierdzamy, że prądy wyrównawcze mogą osiągać wartości podobne i większe. Dlatego też nieuwzględnienie zmiany wartości prądów wyrównawczych wywołanej sprzężeniami, pociąga za sobą błędne nastawienie impedancji rozruchowej. Szczególnie w przypadku, gdy nastawienie to będzie mniejsze od wymaganego, zabezpieczenie mylnie "zinterpretuje" prąd faz zdrowych jako prąd zwarciaowy.

Dopuszczalne nastawienie trzeciej strefy przekaźnika odległościowego RTX-35

Ze względu na zapewnienie prawidłowego działania przy zwarciaach za przekaźnikiem oraz celem zapewnienia wybiórczego działania rezerwowego, reaktancja trzeciej strefy tego przekaźnika powinna spełniać nierówność:

$$k_{cz} X_1 \leq X_3 \leq \frac{U_N}{C_1 I_{rm} + C_2 I_{zs}} \quad /2.4/$$

gdzie: X_1 - reaktancja linii,

X_3 - reaktancja III strefy zabezpieczenia,

I_{rm} - maksymalny prąd obciążenia

$I_{zs} = 3 k_k I_o + I_w / I_o$ - składowa zerowa prądu zwarcia, I_w

- prąd wyrównawczy - dla zwarcia za przekaźnikiem - tabl.

2.3/,

C_1, C_2 - stałe konstrukcyjne

Ponieważ w sieci testowej linie są stosunkowo krótkie /do kilkunastu kilometrów/, zaś prądy zwarciaowe dla zwarć za przekaźnika-

ni stosunkowo małe, nie wystąpią tu kłopoty ze spełnieniem warunku /2.4/. W innych sieciach zasygnalizowane trudności mogą jednak wystąpić.

- Dopuszczalne nastawienie trzeciej strefy przekaźnika odległościowego RTX 34

Dla tego typu przekaźnika, w wyniku istnienia pewnych różnic w budowie w stosunku do RTX 35, należy zapewnić spełnienie warunku podobnego do /2.4/ także w przypadku zwarcia przed przekaźnikiem /tabl. 2.2/. Wartości $3I_0$ są tu znacznie większe i mogą wystąpić kłopoty ze spełnieniem wspomnianego warunku.

- Zabezpieczenie nadprądowe

Dla wspomnianych zabezpieczeń oraz dla prądowych ozionów rozruchowych zabezpieczeń innych rodzajów, zachodzi konieczność takiego dobrania wartości rozruchowych, aby zapewnić działanie z odpowiednim współczynnikiem ozułości. Z tabl. 2.1 wynika, że w niektórych przypadkach składowe zerowe prądu zwarcia z ziemią ulegają zmniejszeniu, na skutek występowania sprzężeń pomiędzy torami. Powoduje to zmniejszenie współczynnika ozułości /np. dla przekaźnika 15-17 z 1.5 do 1.2/, a w konsekwencji niebezpieczeństwo nieselektywnego działania zabezpieczeń.

Na podstawie powyższych rozważań możemy stwierdzić, że dla niektórych rodzajów zabezpieczeń wpływ sprzężeń powoduje bezwzględną konieczność zmiany parametrów nastawczych /współczynnik k_K , prąd rozruchowy/, a dla innych, konieczność taka zachodzi, przy dodatkowych niesprzyjających okolicznościach

/duże wartości prądów obciążenia, konfiguracja sieci itp./.

Analizując zagadnienie w sensie ilościowym, w świetle przeprowadzonych obliczeń, zauważyć można, że największe konsekwencje mają błędy pomiaru reaktancji przez zabezpieczenia odległościowe. Dlatego też będą one przedmiotem dalszych rozważań. W obliczeniach nie poruszane problemu pomiaru reaktancji dla zwarć w II strefie. Problemy te występują bowiem, na skutek występowania tzw. podparć, również dla sieci bez sprzężeń. Nie należy także patrzeć z lekceważeniem na niewielkie /kilkuprocentowe/ różnice wartości wielkości zwarciovych zamieszczonych w tabl. 2.1. - 2.4. Występuje bowiem szereg innych czynników /błędy przekładników, błędy konstrukcyjne przekładników/, które mogą te różnice i ich skutki powiększać.

Podsumowując wyniki rozważań tego rozdziału, stwierdzić należy, że wykazały one znaczną różnorodność kierunków, wartości i skutków zmian wywołanych uwzględnianiem w obliczeniach zwarciovych sprzężeń pomiędzy torami linii napowietrznych. Biorąc pod uwagę, zgodnie z rozdz. 1, przewidywany w naszym systemie elektroenergetycznym wzrost liczby sprzężonych ze sobą torów, należy uznać podjęcie problematyki doskonalenia metod obliczania warunków zwarciovych za uzasadnione.

3. WYBÓR METODY MODELOWANIA UKŁADU TORÓW NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

3.1. Uwagi ogólne

W przeprowadzonych w rozdziale 2 obliczeniach, przyjmowane dla wszystkich linii dwuterowych reakcyjność wzajemną torów dla składowej zerowej spełniająca warunek $X_M = 0.5 X_0$. Niniejszy rozdział poświęcony jest rozważaniom, które mają na celu zweryfikowanie poprawności takiego podejścia do zagadnienia modelowania sprzężeń wzajemnych w obliczeniach zwarciovych. Dążąc do spójności przedstawionych wywodów przytoczone, oprócz wyników własnych rozważań niektóre, znane z literatury pojęcia. Zagadnienie tworzenia modeli matematycznych linii elektroenergetycznych w stanach ustalonych i quasi-stacjonarnych przedstawione jest obszernie w pracy [3_7]. Wspomniana praca zawiera szczegółową dyskusję wszystkich założeń wykorzystanych także w mniejszych rozważaniach /liniowość, symetria linii względem krańców, nieuwzględnianie falowości przebiegów/.

Dzięki przekształceniu liniowemu zwanemu "przerzucenie ziemi do obwodów fazowych" - [3_7], uzyskano dla wszystkich linii systemu jednakowy węzeł odniesienia i uzyskano możliwość traktowania ich jako 2./N + L/ brzońki /N - łączna liczba przewodów roboczych, L - łączna liczba przewodów odgromowych, oznaczamy $M = N + L/$.

Z punktu widzenia obliczeń zwarciovych, najistotniejszym problemem modelowania układu torów linii napowietrznych jest rozstrzygnięcie, w jakim zakresie musi być w nim uwzględnione oddziaływanie przewodów odgromowych. Dlatego też znaczną część rozważań poświęcono temu zagadnieniu. Autor pragnie raz jeszcze

oze podkreślić, że pojęcie modelu jest tu rozumiane w aspekcie obliczeń wartości wielkości zwarciovych i nawet modele określane w pracy jako "dokładne", zawierają typowe dla tej kategorii obliczeń uproszczenia m.in. zaniedbywanie pojemności, upływności, ulotu.

3.2. Impedancje własne i wzajemne obwodów przewód-ziemia

Symetryczna macierz impedancyjna gałęziowa opisująca 2M brannik odwzorowujący rozważany układ linii, składa się z M elementów diagonalnych będących impedancjami własnymi obwodów przewód-ziemia oraz z $(M-1)/M$ elementów pozadiagonalnych będących impedancjami wzajemnymi obwodów przewód-ziemia. Zagadnienie obliczania tych impedancji jest szeroko przedstawione w literaturze np - [3], [29], [30].

Na podstawie [29] impedancja własna wyraża się wzorem:

$$Z_{kk} = Z_{ik} + \frac{\omega \mu_0 l}{\pi} \left[Q(2h'_k, 0) + j \frac{1}{2} \ln \frac{2h_k}{r_k} \right] \quad /3.1/$$

gdzie: Z_{ik} - impedancja wewnętrzna przewodu,

h_k - wysokość zawieszenia przewodu nad powierzchnią ziemi,

$|k|$ - stała, równa $\sqrt{\omega \mu_0 \gamma}$

$h'_k = h_k \cdot k$ - wielkość bezwymiarowa,

γ - konduktywność gruntu,

l - długość rozpatrywanego odcinka przewodu,

r_k - promień przewodu,

$$Q(p, q) = \int_0^{\infty} e^{-pu} \left(\sqrt{u^2 + j} - u \right) \cos(uq) du$$

/wartości tej funkcji są stabilizowane/.

W przypadku, gdy spełniony jest warunek

$$2 |k| h_k \leq 0.05 \quad /3.2/$$

stosuje się wzór uproszczony:

$$Z_{kk} = R_k + \frac{w \mu_0 l}{8} + j \frac{w \mu_0 l}{2 \pi} \ln \frac{D}{r_{ok}} \quad /3.3/$$

gdzie: R_k - rezystancja wewnętrzna przewodu

r_{ok} - promień zastępczy przewodu /wartości r_{ok}/r_k w zależności od budowy przewodu podaje m.in. [30_7/

$$D = 1.85 : |k|$$

W zakresie zmienności konduktywności gruntu $/10^{-2} \div 10^{-3} \text{ S/m/}$ wysokości zawieszenia przewodów spełniające warunek 3.2 wynoszą odpowiednio 12.5 - 42 m. W tym przedziale zawierają się wartości praktycznie spotykane w napowietrznych liniach elektroenergetycznych WN. Na podstawie [29_7] impedancja wzajemna dwóch obwodów przewod-ziemia wyraża się wzorem:

$$Z_{km} = \frac{w u_0 l}{\pi} \left[Q(h'_k + h'_m, a'_{km}) + j \frac{1}{2} \ln \sqrt{\frac{(h_k + h_m)^2 + a_{km}^2}{(h_k - h_m)^2 + a_{km}^2}} \right] \quad /3.4/$$

gdzie:

h_k, h_m - wysokości zawieszenia przewodów

a_{km} - odległość pomiędzy rzutami tych przewodów na powierzchnię ziemi,

h'_k, h'_m, a'_{km} - wielkości bezwymiarowe, wynikające z pomnożenia odpowiednich wielkości przez k .

W przypadku, gdy spełniony jest warunek

$$|k| \cdot D_{km} \leq 0.05 \quad /3.5/$$

gdzie:

$$D_{km} = \sqrt{(h_k - h_m)^2 + a_{km}^2}$$

stosuje się wzór uproszczony:

$$Z_{km} = \frac{w \mu_0 l}{2\pi} \left(\frac{\pi}{4} + j \ln \frac{D}{D_{km}} \right) \quad /3.6/$$

W zakresie zmienności konduktywności gruntu $/10^{-2} \div 10^{-3}$ S/m/ odległości spełniające warunek /3.5/ wynoszą odpowiednio 25-86 m. Choć przekonano się, czy stosowanie wzorów uproszczonych dla odległości nie spełniających tego warunku, a występujących w praktyce w tzw. "korytarzach linii", pociąga za sobą duże błędy, przeprowadzono obliczenia, których wyniki przedstawia tablica 3.1.

Analiza wyników obliczeń przedstawionych w powyższej tabelicy pozwala na stwierdzenie, że w zakresie rozważanych odległości pomiędzy obwodami ziemnopowrotnymi zastosowanie wzorów uproszczonych /3.3/ i /3.6/ nie prowadzi do istotnych błędów /z punktu widzenia obliczeń sieciowych/.

3.3. Macierz impedancyjna gałęziowa układu wielotorowego i jej przekształcenia

3.3.1. Budowa macierzy impedancyjnej gałęziowej układu wielotorowego

Napięcia i prądy układu wielotorowego powiązane są ze sobą zależnością liniową

$$U = Z I \quad /3.7/$$

gdzie: Z jest macierzą impedancyjną gałęziową o postaci:

Tablica 3-1. Zestawienie wartości impedancji wzajemnych dwóch obwodów przewod-ziemia, obliczonych przy pomocy wzoru dokładnego i przybliżonego, dla różnych odległości pomiędzy przewodami
 $h_k = h_m, w = 100 \text{ m}$

D_{km} m	konduktywność gruntu 10^{-2} [S/m]		D_{km} m	konduktywność gruntu 10^{-3} [S/m]	
	wg wzoru dokładnego	wg wzoru przybliżonego		wg wzoru dokładnego	wg wzoru przybliżonego
25	$0.047 + j0.230$	$0.05 + j0.227$	25	$0.049 + j0.303$	$0.05 + j0.302$
	$\Delta_R = +6.4$ $\Delta_X = -1.3$				$\Delta_R = 2$ $\Delta_X = -0.3$
50	$0.047 + j0.186$	$0.05 + j0.183$	50	$0.049 + j0.262$	$0.05 + j0.259$
	$\Delta_R = +6.4$ $\Delta_X = -1.5$				$\Delta_R = 2$ $\Delta_X = -1.1$
100	$0.047 + j0.142$	$0.05 + j0.140$	100	$0.49 + j0.216$	$0.05 + j0.215$
	$\Delta_R = 6.4$ $\Delta_X = -1.4$				$\Delta_R = 2$ $\Delta_X = -0.5$
150	$0.046 + j0.117$	$0.05 + j0.114$	150	$0.049 + j0.191$	$0.05 + j0.190$
	$\Delta_R = 8.7$ $\Delta_X = -2.6$				$\Delta_R = 2$ $\Delta_X = -0.5$

$$\begin{bmatrix} Z_{1a1a} & Z_{1a1b} & Z_{1a1c} \\ Z_{1b1a} & Z_{1b1b} & Z_{1b1c} \\ Z_{1c1a} & Z_{1c1b} & Z_{1c1c} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} Z_{1aN_a} & Z_{1eN_b} & Z_{1aN_c} \\ Z_{1bN_a} & Z_{1bN_b} & Z_{1bN_c} \\ Z_{1cN_a} & Z_{1cN_b} & Z_{1cN_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{1a1p} & \dots & Z_{1aLp} \\ Z_{1b1p} & \dots & Z_{1bLp} \\ Z_{1c1p} & \dots & Z_{1cLp} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{Na1p} & \dots & Z_{NaLp} \\ Z_{Nb1p} & \dots & Z_{NbLp} \\ Z_{Nc1p} & \dots & Z_{NcLp} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{1p1p} & \dots & Z_{1pLp} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{Lp1p} & \dots & Z_{LpLp} \end{bmatrix} \quad /3.8/$$

Oznaczenia:

N - liczba torów

L - liczba przewodów odgromowych

Z_{kalb} - impedancja wzajemna pomiędzy przewodem fazy (a) k-tego toru, a przewodem fazy (b) l-tego toru, określona przy pomocy wzoru /3.6/

Z_{kaka} - impedancja własna fazy (a) k-tego toru, określona przy pomocy wzoru /3.3/

Macierz /3.8/ możemy również przedstawić w postaci:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{rr} & Z_{pr}^t \\ Z_{pr} & Z_{pp} \end{bmatrix} \quad /3.9/$$

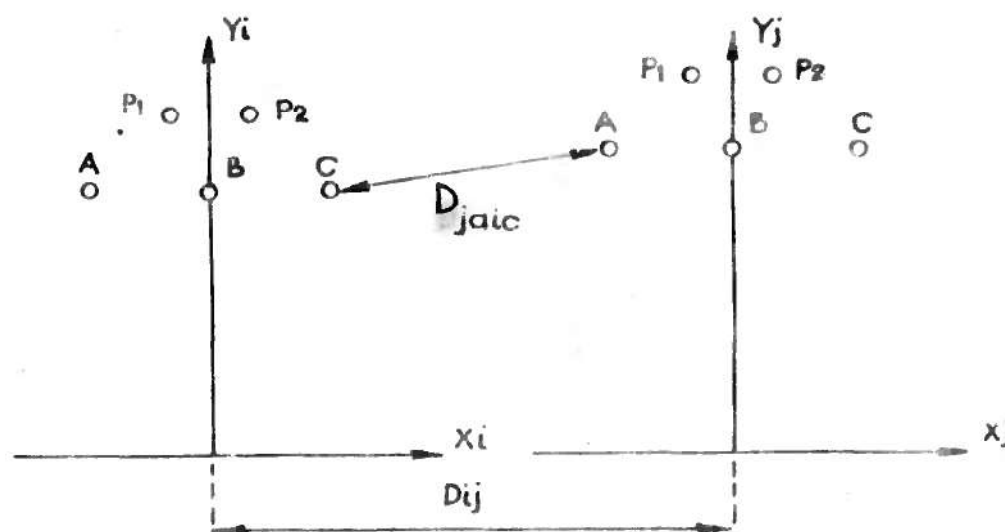
gdzie poszczególne podmacierze opisują:

Z_{rr} oddziaływania pomiędzy przewodami roboczymi

Z_{pp} oddziaływania pomiędzy przewodami odgromowymi

Z_{pr} oddziaływania pomiędzy przewodami odgromowymi i roboczymi

Z punktu widzenia obliczeń sieciowych sformowanie macierzy $[Z]$ polega na określeniu odległości pomiędzy punktami na płaszczyźnie /rys. 3.1/ i zastosowaniu wzorów /3.3/ i /3.6/.



Rys. 3.1. Określanie odległości pomiędzy przewodami należącymi do różnych torów na podstawie współrzędnych w torach, odległości pomiędzy torami

$$D_{jaic} = \sqrt{/X_{ja} + D_{ij} - X_{ic}/^2 + /Y_{ja} - Y_{ic}/^2}$$

Sformułowanie macierzy Z na podstawie danych o układzie przestrzennym przewodów i parametrów materiałowych jest jednym z zadań wykonywanych przez program KK11.

3.3.2. Przekształcenia liniowe macierzy impedancyjnej

Podmacierz Z_{pp} macierzy Z , opisująca układ wielotorowy, nie jest w ogólnym przypadku macierzą, dla której można dobrać uniwersalne przekształcenia diagonalizujące. Dokonująco założenia dotyczących symetrii wewnętrznej każdego toru i symetrii

torów względem siebie, można w pewnych szczególnych przypadkach /np. dla linii dwutorowej/ znaleźć w grupie przekształceń wprowadzających składowe grupowe tzw. $n-(\alpha, \beta, 0)$ bądź $n-(1, 2, 0)$, przekształcenia diagonalizujące wspomnianą macierz - [22], [41], [42]. Mając na uwadze fakt, że przyjęty do dalszych rozważań model układu wielotorowego musi odpowiadać modelom pozostałych elementów systemu elektroenergetycznego /układów ^{linii} liczbę torów nie równej N , transformatorów, generatorów/, zastosowano najpopularniejsze w analizie sieciowej przekształcenie $(0, 1, 2)$ wprowadzające zamiast prądów i napięć, ich składowe symetryczne: zerową, zgodną i przeciwną - [9], [32]. Macierze impedancyjne gałęziowe dla składowej zgodnej i przeciwniej $Z_{g1} = Z_{g2}$ są macierzami diagonalnymi, zaś macierz impedancyjna dla składowej zerowej Z_{g0} jest macierzą pełną i ona stanowi przedmiot dalszych rozważań zawartych w niniejszej pracy. Wszelkie konsekwencje wielotorowości i związanych z nią oddziaływań elektromagnetycznych pomiędzy torami odnosić się więc będą do schematu zastępczego dla składowej zerowej. Przyjęcie założeń dotyczących symetrii wewnętrznej i wzajemnej torów układu wielotorowego, która byłaby konsekwencją stosowania odpowiednich przepleceń, prowadzi w przypadku linii w ogóle nie przeplecionych do niewielkich błędów w określeniu Z_{g1} . Dla poparcia tego stwierdzenia przedstawiono poniżej macierze impedancyjne dla składowej zgodnej linii dwutorowej i czterotorowej, obliczone przy pomocy wspomnianego programu KK11.

Linia dwutorowa:

$$\begin{bmatrix} 0.1245 + j0.3946 & , & 0.0003 + j0.0148 \\ 0.0003 + j0.0148 & , & 0.1245 + j0.3946 \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

Macierz C jest to tzw. macierz łącząca prądowa.

Zależność łącząca napięcia gałęziowe z napięciami węzłowymi

ma postać:

$$\begin{bmatrix} U_{g1} \\ U_{g2} \\ \circ \\ \circ \\ U_{gN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & -1 \\ & 1 & & & -1 \\ & & \circ & & \\ & & & \circ & \\ & & & & \circ \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{W1} \\ U_{W2} \\ \circ \\ \circ \\ U_{W2N} \end{bmatrix} \quad /3.10a/$$

Macierz łącząca napięciowa jest transpozycją macierzy łączącej prądowej.

$$U_g = C^t U_w \quad /3.10b/$$

Na podstawie /3.9b/, /3.10b/ /3.7/ otrzymujemy:

$$I_w = C Z_g^{-1} C^t U_w \quad /3.11/$$

macierz admittancyjna węzłowa ma postać:

$$Y_w = C Z_g^{-1} C^t = \begin{bmatrix} Z_g^{-1} & -Z_g^{-1} \\ -Z_g^{-1} & Z_g^{-1} \end{bmatrix} \quad /3.12/$$

gdzie:

Z_g jest macierzą impedancyjną gałęziową układu wielotorowego dla składowej zerowej.

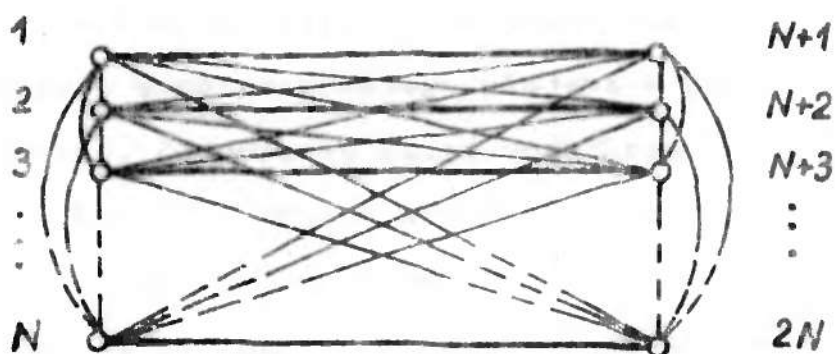
Na podstawie własności macierzy zauważamy, że jest ona macierzą osobliwą. W oparciu o znane z literatury własności macierzy admittancyjnych stwierdzamy, że odpowiada jej schemat zastępczy w postaci wieloboku zupełnego o $2N$ wierzchołkach.

Impedancje elementów tworzących powyższy schemat określamy jako

$$Z_{ij} = 1/Y_{ij}$$

$$i = 1 \dots 2N, \quad j = 1 \dots 2N, \quad i \neq j$$

/3.13/



Rys. 3.2. Graf schematu zastępczego odpowiadającego macierzy admitancyjnej węzłowej $[Y_w]$ układu wielotorowego dla składowej zerowej.

Tak więc uwzględnienie modelu układu wielotorowego w schemacie zastępczym sieci elektroenergetycznej/dla składowej zerowej/, łączy z sobą konieczność dodatkowego uwzględnienia w nim, w porównaniu z układem, gdzie nie występują sprzężenia, znacznej liczby gałęzi. Jest ona określona wzorem:

$$B_d = \frac{1}{2} \cdot 2N \cdot (2N - 1) - N = 2N(N - 1) \quad /3.14/$$

który jest oczywisty, jeśli zauważy się, że w wieloboku pełnym każdy wierzchołek połączony jest ze wszystkimi pozostałymi wierzchołkami.

Sporządzony w ten sposób model matematyczny i schemat zastępczy układu wielotorowego wykorzystywany jest w wielu problemach systemowych. Używa się go we wszystkich stosowanych w kraju programach obliczeń zwarciowych - [10], [16], [37], w programach określających nastawienia zabezpieczeń przekątnikowych - [25], w obliczeniach napięć indukowanych w kablach sterowniczych w pobliżu wielkich elektrowni - [11].

Bezdiskusyjną jego zaletą jest to, że umożliwia on "automatyzm" w podejściu do zagadnienia sprzężeń elektromagnetycznych w analizach systemowych. Z drugiej jednak strony występowanie znacz-

nej liczby dodatkowych gałęzi może powodować wydłużenie czasu obliczeń, wzrost zapotrzebowanego miejsca w pamięci operacyjnej maszyny cyfrowej. Pojedyncza gałąź dodatkowa nie posiada fizycznego odpowiednika, stąd mogące wystąpić trudności w fizycznej interpretacji analizowanych zjawisk. W dalszych rozważaniach /p. 3.4# i p. 4.3.1/ autor proponuje odejście w niektórych przypadkach od omawianego modelu, wykazując, że wpływa to na uproszczenie procesu obliczeniowego.

3.4. Zróżnicowanie modeli układów wieloterowych ze względu na sposób uwzględniania przewodów odgromowych

3.4.1. Zmodyfikowane przekształcenie 0,1,2

Przekształcenie 0,1,2 /por. p. 3.3.2/ można zmodyfikować tak, aby podlegała mu cała macierz Z , a nie tylko jej podmacierz Z_{rr} . Szczegółowy opis tego przekształcenia zawiera [25_7]. Nie zmienia ono napięć na przewodach odgromowych, zaś prądy płynące nimi zmniejsza 3 razy. Macierz impedancyjna gałęziowa układu wieloterowego dla składowej zerowej przyjmuje postać:

$$Z_{gm} = \begin{bmatrix} Z_g & Z_{pg}^t \\ Z_{pg} & Z_p \end{bmatrix} \quad /3.15/$$

gdzie poszczególne macierze opisują:

- Z_g przewody robocze i oddziaływania między nimi, zgodnie z zasadami tworzenia impedancji dla składowej zerowej,
- Z_p przewody odgromowe i oddziaływania między nimi /wartości rzeczywiste $\times 3$ /,
- Z_{pg} oddziaływania między przewodami odgromowymi i roboczymi

/wartości rzeczywiste x3/.

3.4.2. Założenie o bezimpedancyjnym uziemieniu przewodów odgromowych na krańcach linii

Podawane w katalogach opracowywanych przez Energoprojekt dane znamionowe linii jedno i dwutorowych obliczane są przy takim właśnie założeniu. Wykorzystując je możemy wyeliminować impedancje związane z przewodami odgromowymi z macierzy Z_{gn} , otrzymując:

$$Z_{gk} = Z_g - Z_{pg}^t Z_p^{-1} Z_{pg} \quad /3.16/$$

Rozważając linię dwutorową o przewodach roboczych AFL6 240 mm² i odgromowych AFL1.7 70 mm², przyjmując na podstawie analizy sylwetek typowych linii 110 kV średnie odległości:

- pomiędzy przewodami toru 5 m,
- pomiędzy torami 6 m,
- pomiędzy przewodami roboczymi i odgromowymi 6÷7 m,
- pomiędzy przewodami odgromowymi 2 m,

stwierdzamy, na podstawie obliczeń wg. /3.16/, że stosunek reaktancji wzajemnej torów do reaktancji własnej /dla składowej zerowej/, w zależności od rezystywności gruntu, wynosi:

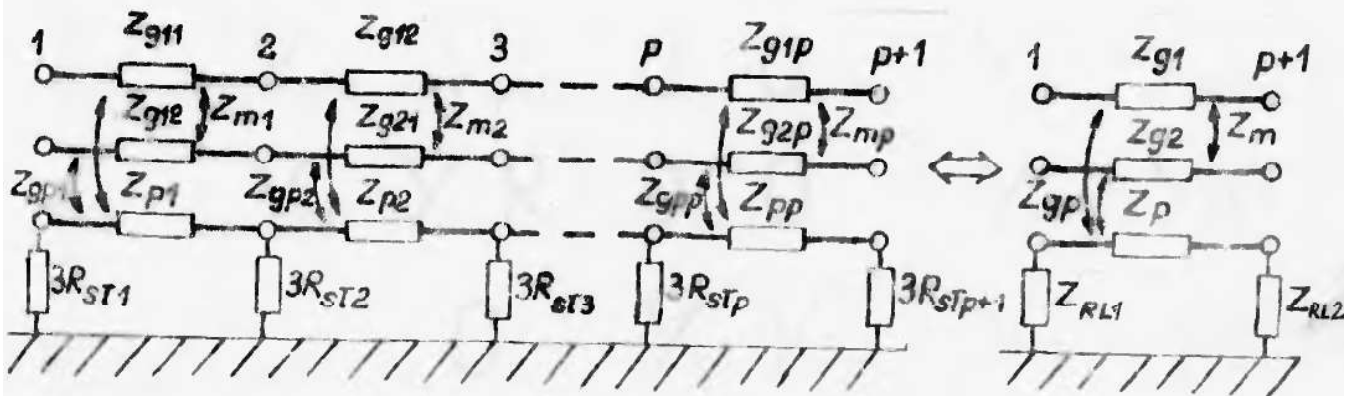
0.57 ÷ 0,64 /1 przewód odgromowy/

0.5 ÷ 0,54 /2 przewody odgromowe/.

Przyjęcie wartości 0,5 w obliczeniach rozdziału 2 zaniżało zatem nieco wartość reaktancji wzajemnej X_M .

3.4.3. Założenie o uziemieniu przewodów odgromowych na każdym słupie

Opis układu N torów z L przewodami odgromowymi w postaci macierzy Z_{gm} odpowiada praktycznie pojedynczemu przęsłu. Przy założeniu, że rozważamy p przęsło linii dwutorowej z jednym przewodem odgromowym uziemionym na każdym słupie, możemy przedstawić schemat zastępczy tej linii dla składowej zerowej, zgodnie z rys. 3.3.



Rys. 3.3. Schemat układu p przęseł linii dwutorowej z przewodem odgromowym uziemionym na każdym słupie i jego schemat zredukowany.

Parametry Z_{g1i} , Z_{g2i} , Z_{mi} , Z_{gpi} mają interpretację fizyczną zgodną z p. 3.3.1. Parametry Z_{g1} , Z_{g2} , Z_m , Z_{gp} , Z_{RL1} , Z_{RL2} opisują schemat zredukowany. W sensie formalnym odpowiadają one parametrom pojedynczego przęsła, ale nie można nadawać im znaczenia fizycznego.

Powyższy model jest znacznie bardziej zbliżony do rzeczywistej budowy linii niż model z p. 3.4.2. Dlatego też, pamiętając o uwagach z p. 3.1 nazwane go w dalszych rozważaniach dokładnym.

3.4.4. Obliczanie elementów zredukowanego schematu układu wielotorowego o p przesłach

Obliczenie odwrotności macierzy Z_{gm}

$$Y_{gm} = \begin{bmatrix} Y_g & Y_{pg}^t \\ Y_{pg} & Y_p \end{bmatrix} \quad /3.17/$$

oraz wykorzystanie własności modelu admitancyjnego /p. 3.3.3/ pozwala na określenie macierzy admitancyjnej węzłowej 2 kolejnych przesł

$$Y_w = \left[\begin{array}{cc|cc|cc} Y_{g1} & Y_{pg1}^t & 0 & 0 & -Y_{g1} & -Y_{pg1}^t \\ Y_{pg1} & (Y_{p1}^t R_1^{-1}) & 0 & 0 & -Y_{pg1} & -Y_{p1} \\ \hline 0 & 0 & Y_{g2} & Y_{pg2}^t & -Y_{g2} & -Y_{pg2}^t \\ 0 & 0 & Y_{pg2} & (Y_{p2}^t R_3^{-1}) & -Y_{pg2} & -Y_{p2} \\ \hline Y_{g1} & Y_{pg1} & Y_{g2} & Y_{pg2} & (Y_{g1}^t Y_{g2}) & (Y_{pg1}^t Y_{pg2}^t) \\ Y_{pg1} & Y_{p1} & Y_{pg2} & Y_{p2} & (Y_{pg1}^t Y_{pg2}^t) & (R_2^{-1} Y_{p1}^t Y_{p2}) \end{array} \right]$$

$$= \begin{bmatrix} Y_0 & Y^t \\ Y & Y_D \end{bmatrix} \quad /3.18/$$

gdzie:

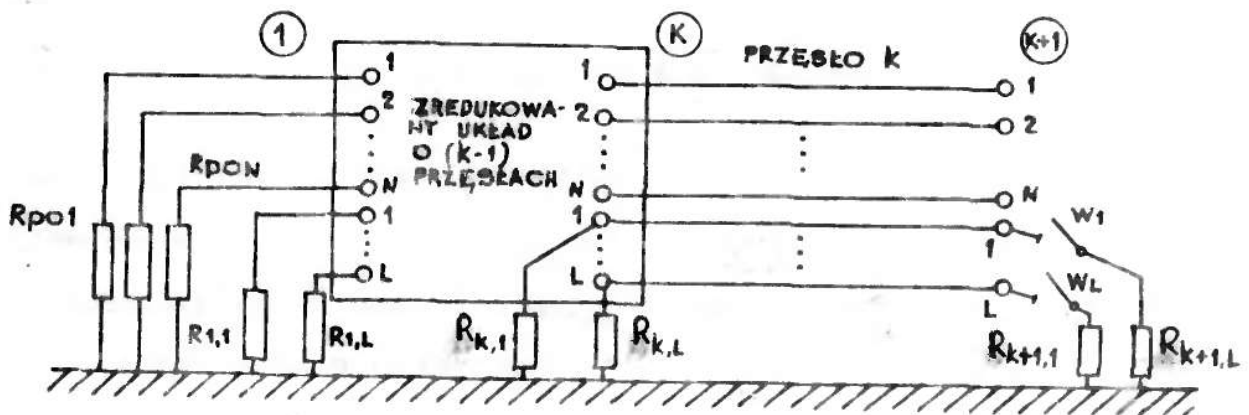
$[R_1] = \text{diag} [R_{11} \dots R_{1L}]$ - uziemienia L słupów początku

pierwszego przesła, analogicznie $[R_2]$ i $[R_3]$.

Istota podanej w [25] metody polega na eliminacji węzłów wewnętrznych układu poprzez zastosowanie przekształcenia:

$$Y_{WR} = Y_0 - Y^t Y_D^{-1} Y \quad /3.19/$$

Rozważając układ o p przęślach, po wykonaniu $p-1$ takich operacji otrzymujemy macierz admittancyjną, na podstawie której możemy określić elementy schematu zastępczego. Mając na uwadze dążenie do uproszczenia algorytmów związanych z obliczeniami zwarcłowymi, poniżej przedstawiono inne podejście do rozpatrywanego zagadnienia. Proponuje się prowadzenie obliczeń na zredukowanej macierzy impedancyjnej węzłowej układu k przęślowego $/k = 1 \dots p/$. Aby macierz ta była określona $/$ jak wiadomo z p. 3.3.3 macierz admittancyjna węzłowa układu jest macierzą osobliwą $/$, wprowadza się na początku pierwszego przęśła uzziemienie pomocnicze wszystkich torów, o dowolnej, skończonej wartości, dane w postaci wektora $[R_{po}] = [R_{po1} \dots R_{poN}]$ - rys. 3.4.



Rys. 3.4. Schemat zredukowanego układu o $/k-1/$ przęśłach wraz z dołączonym przęśłem k -tym.

Macierz impedancyjna węzłowa układu /k-1/ przęsłowego ma postać

$$Z_{k-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{k1}^t \\ Z_{k1} & Z_{kk} \end{bmatrix} \quad /3.20/$$

gdzie:

$[Z_{11}]$ zawiera impedancje własne i wzajemne węzłów grupy (1)

$[Z_{kk}]$ " " " " " " " (k)

$[Z_{k1}]$ " " wzajemne węzłów grup (1) i (k)

Wykorzystując własności macierzy tego typu, zauważyć można, że dołączenie do /N+L/ węzłów grupy (k) takiej samej ilości gałęzi sprzężonych k-tego przęsła, powoduje łatwe do przewidzenia zmiany w tej macierzy:

$$Z_k = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{k1}^t & Z_{k1}^t \\ Z_{k1} & Z_{kk} & Z_{kk} \\ Z_{k1} & Z_{kk} & Z_{kk} + Z_{gm} \end{bmatrix} \quad /3.21/$$

Dołączenie do schematu rezystancji uziemiających przewody odgromowe na końcu k-tego przęsła /zamknięcie łączników $W_1 \dots W_L$ / uwzględnia się w macierzy Z_k poprzez L-krotne powtórzenie na jej elementach operacji:

$$Z'_{ij} = Z_{ij} - \frac{Z_{mi} Z_{mj}}{Z_{mm} + R_{k m}} \quad /m = 1 \dots L/ \quad /3.22/$$

Eliminacja impedancji własnych i wzajemnych węzłów grupy k następuje zgodnie z własnościami macierzy impedancyjnych tj.

poprzez ich wykreślenie. Przeliczenia wg. /3.22/ organizuje się tak, aby elementy, które mają być skreślone, im nie podlegały. Po zakończeniu przedstawionych operacji dla p przeseł oblicza się odwrotność macierzy $[Z_p]$ i eliminuje uzziemienia pomocnicze węzłów grupy (1)

$$Y_p = Z_p^{-1} - \text{diag} \left[R_{po1}^{-1}, R_{po2}^{-1}, \dots, R_{poN}^{-1}, 0, \dots, 0 \right] \quad /3.23/$$

Otrzymując tak jak w uprzednie opisanej metodzie zredukowaną macierz admitancyjną węzłową, można określić poszukiwane parametry zredukowanego schematu zastępczego.

W celu porównania efektywności przedstawionych metod, poniżej dokonano zestawienia liczby mnożeń koniecznych do wykonania,

dla otrzymania zredukowanej macierzy admitancyjnej układu p przesełowego. Liczbę mnożeń koniecznych do odwrócenia macierzy stopnia k przyjęto zgodnie z [33] jako k^3 .

- metoda admitancyjna - [25]

$$M_n = 7/p - 1/L + N^3$$

- metoda impedancyjna /realizowana przy pomocy programu KK12/

$$M_n = 8/L + N^3 + p/2L + N^2$$

Tablica 3.2. Zestawienie liczby mnożeń koniecznych do wykonania w celu określenia zredukowanej macierzy admitancyjnej układu p - przesełowego, w zależności od liczby torów i przewodów odgromowych.

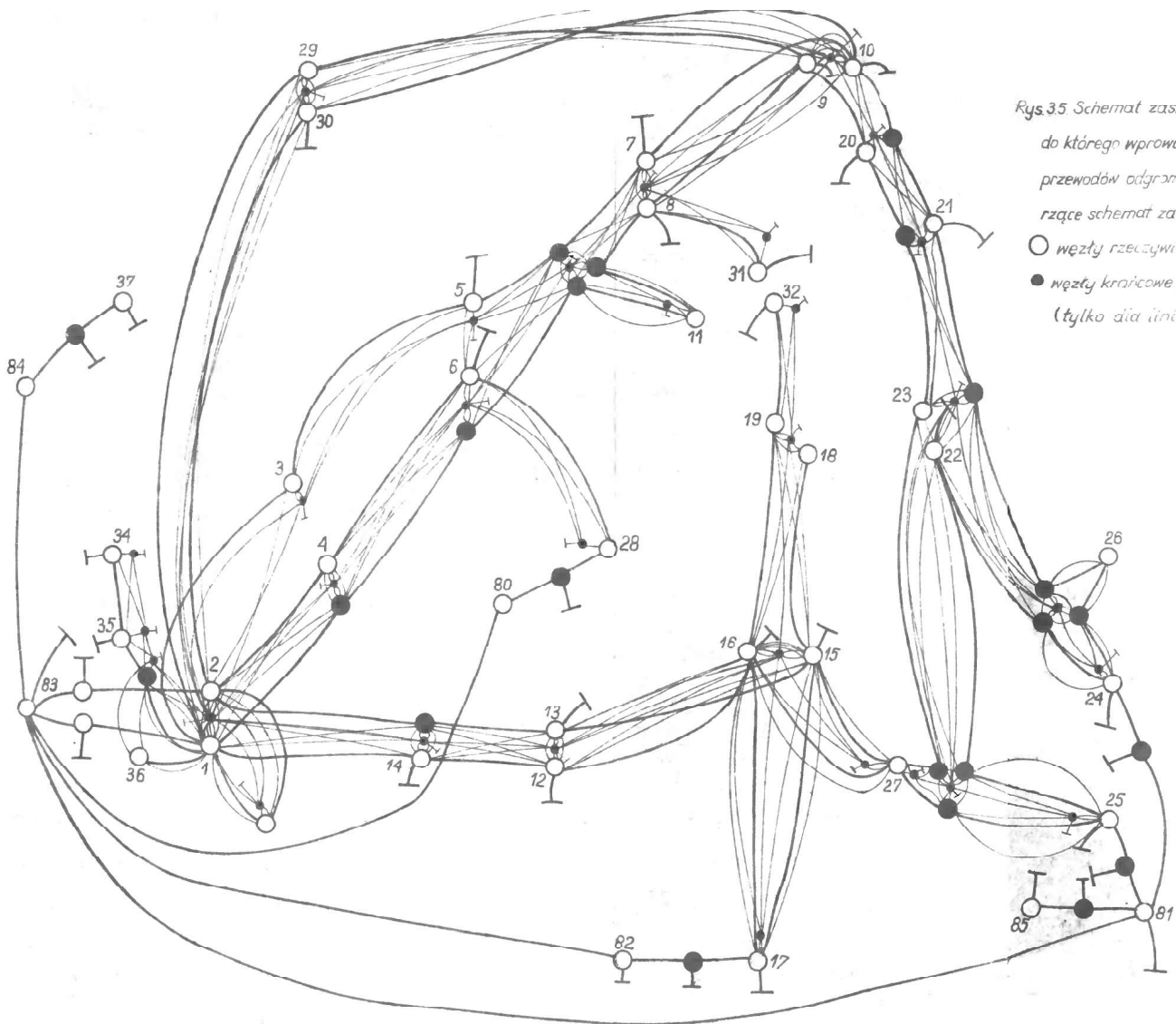
Układ	Liczba przeseł	Metoda	
		admitancyjna	impedancyjna
N = 1	p = 10	504	154
L = 1	p = 50	2744	514
N = 2	p = 10	1701	376
L = 1	p = 50	9261	1016

N = 2	p = 10	4221	872
L = 2	p = 50	21952	2312
N = 4	p = 10	7875	1360
L = 1	p = 50	42875	2800
N = 4	p = 10	13608	2368
L = 2	p = 50	74088	4928

N - liczba torów

L - liczba przewodów odgromowych.

Z tablicy 3.2 widać, że szczególnie dla dłuższych odcinków linii i dużej liczby torów, proponowana metoda jest o wiele bardziej efektywna od metody admitancyjnej. Znajdują tu potwierdzenie uwagi autora z p. 3.3.3, zgodnie z którymi stosowanie modelu admitancyjnego nie zawsze łączy się z efektywnością obliczeń.



Rys. 3.5 Schemat zastępczy sieci testowej do którego wprowadzono węzły krańcowe przewodów odgromowych oraz gałęzie tworzące schemat zastępczy wielobokowy

- węzły rzeczywiste ● węzły pozorne
- węzły krańcowe przewodów odgromowych (tylko dla linii 110 kV)

3.5. Dokładność obliczania składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przekaźnika odległościowego jako kryterium wyberu modelu układu wielotorowego

3.5.1. Rozważania wstępne

Nie ulega wątpliwości, że model omawiany w p. 3.4.3 i 3.4.4 jako bliższy rzeczywistości, zastosowany w obliczeniach zwarciovych wpłynąłby na zwiększenie ich dokładności. Aby go wprowadzić należałoby jednak:

- wykonywać obliczenia na liczbach zespolonych /większość krajowych programów uwzględnia tylko reaktancje/,
- rozbudować znacznie schematy zastępcze systemu, na skutek wprowadzenia dodatkowych gałęzi wchodzących w skład wielobokowych schematów zastępczych układów dwutorowych /linia jednotorowa z przewodem odgromowym/ i trzytorowych /linia dwutorowa z przewodem odgromowym/. Widoczna na rys. 3.5 sieć testowa składa się ^{na} skutek tego aż z 472 gałęzi /przy 132 wchodzących w skład sieci z rys. 2.2/.

Realizacja obliczeń przy użyciu takich modeli ^{pociąga} za sobą szereg trudności związanych ze wzrostem czasu obliczeń, pojemnością pamięci m.o i sposobem przygotowania danych /por. rozdz. 4/. Autorzy niektórych prac - [44] sugerują poza tym, że wprowadzenie takiego modelu nie zmieni specjalnie wartości prądów zwarciovych płynących w sieci w stosunku do obliczanych przy pomocy modeli katalogowych. Inni autorzy zwracają szczególną uwagę na związek modelu "dokładnego" z doborem tzw. współczynnika kompensacji prądowej tj. jednego z nastawianych parametrów przekaźnika odległościowego. Autor uznał za konieczne bliższe zbadanie tego problemu z uwagi na jego powiązanie z rozpatrywanymi zagadnieniami modeli linii.

Impedancja "widziana" przez zabezpieczenie odległościowe przy zwarciu jednofazowym z ziemią, określona jest wzorem:

$$Z_p = \frac{U}{I_p} = \frac{U_1 + U_2 + U_0}{I_{1F} + 3k_k I_0} \quad /3.23/$$

gdzie: U_1, U_2, U_0 napięcia w miejscu zwarcia dla poszczególnych składowych,

I_{1F} - prąd zwarcia doziemnego płynący zabezpieczoną linią,

I_0 - składowa zerowa tego prądu,

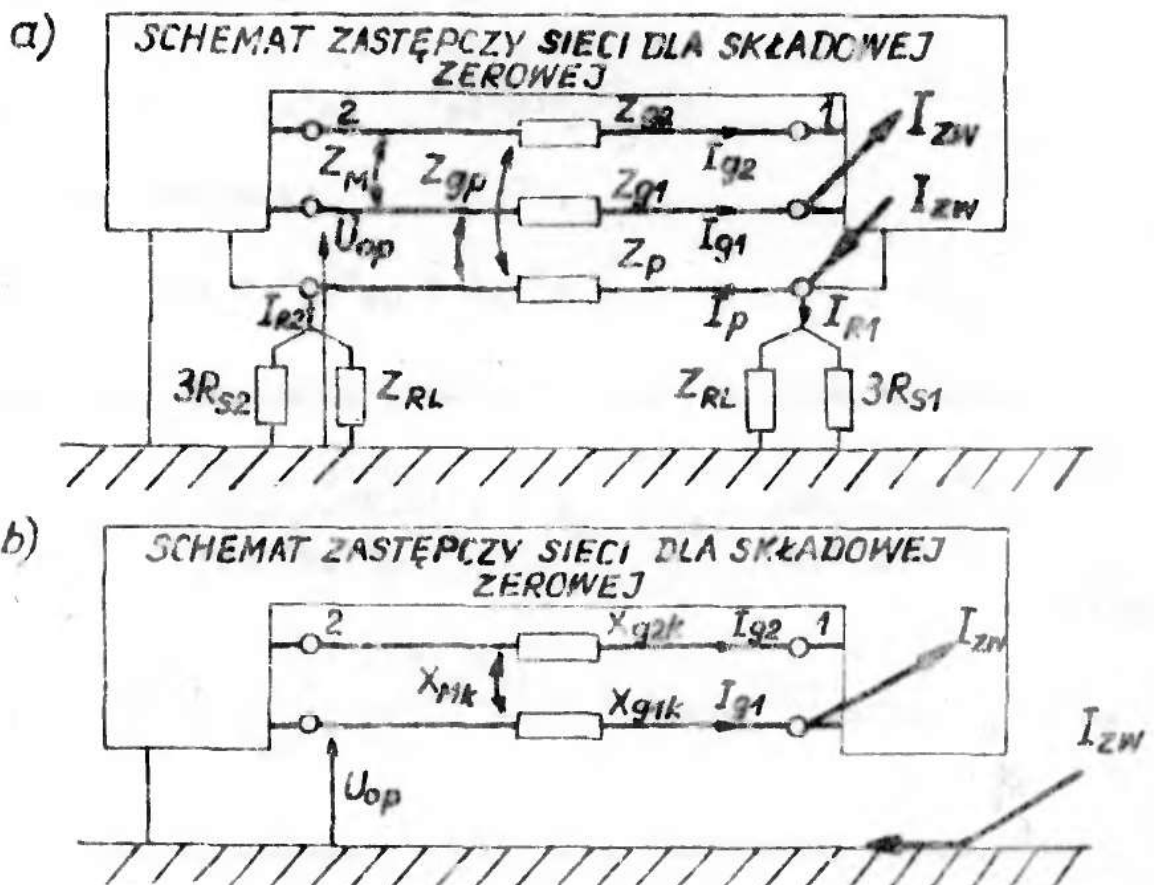
k_k - współczynnik kompensacji prądowej,

Ponieważ napięcia U_1, U_2 nie zależą od wyboru modelu, szczególnego zbadania wymaga obliczanie napięcia U_0 będącego kombinacją liniową prądu w linii zabezpieczanej, liniach sprzężonych i przewodach odgromowych. Dlatego też, autor proponuje przyjęcie dokładności obliczenia tej wielkości jako kryterium określającego przydatność omówionych powyżej modeli do obliczania wielkości zwarciovych, a w szczególności, zgodnie z wynikami obliczeń z rozdziału 2, reaktancji widzianej przez zabezpieczenie odległościowe. Celem przedstawionych poniżej rozważań jest zatem próba rozstrzygnięcia następującej kwestii:

- jaki model układu wielotorowego powinien być stosowany ^(w prowadzonej) przy pomocy maszyny cyfrowej analizie zwarciowej sieci elektroenergetycznej, mającej na celu poprawny dobór nastawień zabezpieczeń przekąźnikowych, przy równoczesnym zachowaniu względnej prostoty tej analizy?

3.5.2. Analiza składowych zerowych napięć i prądów dla zwarcia jednofazowego z ziemią, przy zastosowaniu zredukowanego schematu "dokładnego" linii

Rys. 3.6. przedstawia zredukowany schemat zastępczy linii dwutorowej z jednym przewodem odgromowym /por. rys. 3.3/ oraz fragment schematu zastępczego sieci, w której rozpatrujemy zwarcie jednofazowe z ziemią. Dla uproszczenia rysunku pominięto na nim schematy sieci zastępczych dla składowej symetrycznej przeciwnej i zgodnej, jak również pozostałe elementy schematu dla składowej zerowej.



Rys. 3.6. Fragment schematu sieci elektroenergetycznej dla zwarcia jednofazowego z ziemią na końcu rozważanej sieci elektroenergetycznej

a/ z zastosowaniem schematu zredukowanego linii p - przęsłowej /opisujące go parametry Z_{g1} , Z_{g2} , Z_p , Z_m , Z_{gp} , Z_{RL} oblicza się zgodnie z 3.4.4. przy pomocy programu KK12/, R_{S1} R_{S2} rezystancje uziemień stacji krańcowych.

b/ z zastosowaniem schematu "tradycyjnego" opisanego przy pomocy parametrów katalogowych, przy obciążeniu których uwzględniono obecność przewodu odgromowego.

oznaczając:

$$Z_{R1} = \frac{3 \cdot R_{S1} \cdot Z_{RL}}{3 \cdot R_{S1} + Z_{RL}}, \quad Z_{R2} = \frac{3 \cdot R_{S2} \cdot Z_{RL}}{3 \cdot R_{S2} + Z_{RL}}$$

i wprowadzając założenia upraszczające:

$$I_o = I_{R2} \quad /3.24/$$

oraz

$$I_{zw} = I_{R1} + I_p \quad /3.25/$$

możemy określić napięcie U_{po} jako:

$$U_{po} = I_{\epsilon 1} Z_{\epsilon 1} - I_p Z_{\epsilon p} + I_{\epsilon 2} Z_M + I_{R1} Z_{R1} \quad /3.26/$$

Wykorzystując równanie:

$$I_{R1} Z_{R1} = I_p Z_p - I_{\epsilon 1} Z_{\epsilon p} + I_{\epsilon 2} Z_M \quad /3.27/$$

otrzymujemy, po wykonaniu prostych operacji porządkujących:

$$U_{po} = I_{\epsilon 1} / Z_{\epsilon 1} - \frac{Z_{\epsilon p}^2 + Z_{\epsilon p} Z_{R1}}{Z_{R1} + Z_{R2} + Z_p} / + I_{\epsilon 2} / Z_M - \frac{Z_{\epsilon p}^2 + Z_{\epsilon p} Z_{R1}}{Z_{R1} + Z_{R2} + Z_p} / +$$

$$+ I_{zw} \frac{Z_{R1} / Z_{R2} + Z_p / - Z_{\epsilon p} Z_{R1}}{Z_{R1} + Z_{R2} + Z_p} = I_{\epsilon 1} Z_{\epsilon 1 p} + I_{\epsilon 2} Z_{Mp} + I_{zw} Z_p \quad /3.28$$

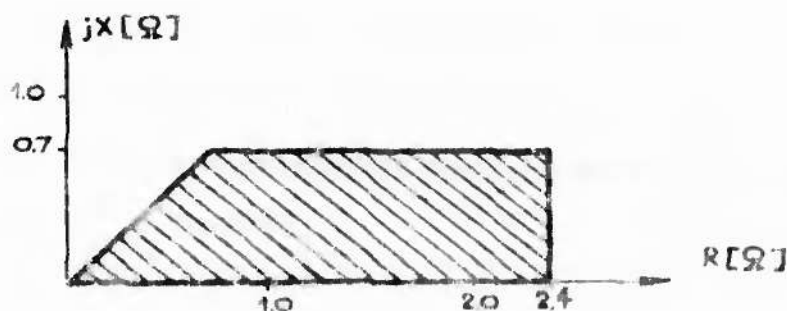
Ponieważ postać wyrażenia /3.28/ jest identyczna z postacią wyrażenia na U_{po} , które otrzymalibyśmy zakładając zwarcie jedno fazowe przez impedancję Z_{zp} i wykorzystując parametry katalogowe, w których impedancje przewodu odgromowego nie występują w sposób jawny, wprowadza się impedancje modelowe $Z_{\epsilon 1 p}$, Z_{Mp} ,

Z_{zp} , nie mające fizycznego znaczenia i wynikające ze sposobu zgrupowania składników tego wyrażenia. W dalszym ciągu rozważań zajęto się częściami urojonymi wprowadzonych impedancji modelowych tj.

$$X_{G1P} = I_m / Z_{G1P}, \quad X_{Mp} = I_m / Z_{Mp}, \quad X_{zp} = I_m / Z_{zp}$$

Rezystancyjne przesunięcie charakterystyk członów pomiarowych przekładników odległościowych dość skutecznie eliminuje błąd wynikający z występowania dodatkowych rezystancji w pętli zwarciowej. Błąd pomiaru reaktancji, nieskorygowany odpowiednim doбором nastawień współczynnika kompensacji prądowej może mieć natomiast istotny wpływ na selektywność i szybkość zadziałania tych zabezpieczeń. Te fakty zadecydowały właśnie o ograniczeniu dalszych rozważań do reaktancji modelowych.

Do obliczeń przykładowych wybrano linię dwutorową na słupach M52 z przewodami roboczymi AFLB 525 mm² i odgromowymi AFL1.7 70 mm². Po dokonaniu agregacji 2 przewodów odgromowych w jeden, określano przy pomocy programu KK12 omówione w p. 3.4.3 parametry zredukowanego schematu zastępczego dla składowej zerowej przy różnych liczbach pręseł /rozpiętość pręseła $a = 400$ m/. Wartości reaktancji modelowych obliczono wg wzoru /3.28/ dla 48 różnych par wartości parametrów Z_{R1} , Z_{R2} wybranych z przedstawionego na rys. 3.7 obszaru płaszczyzny zespolonej.



Rys. 3.7. Obszar na płaszczyźnie zespolonej, z którego wybrano 48 różnych wartości parametrów Z_{R1} , Z_{R2}

Do wyboru takiego obszaru upoważnia nas analiza wartości wyrażenia /3.29/ zestawionych w tabl. 3.3.

$$Z_R = \frac{Z_{RL} \cdot 3 \cdot R_g}{3R_g + Z_{RL}} \quad /3.29/$$

Tablica 3.3. Zestawienie wartości impedancji Z_R dla różnych długości linii i wartości rezystancji uziemienia stacji.

Długość linii [km]	Parametr poprzeczny zredukowanego schematu zastępczego $Z_{RL} [\Omega]$	Rezyst. uziemien. stacji $R_g [\Omega]$	
		1.0	0.67
1.6	12.03 + j0.30	2.40 + j0.01	1.72 + j0.01
5.6	4.30 + j1.46	1.81 + j0.24	1.40 + j0.14
9.6	3.29 + j2.38	1.74 + j 0.47	1.37 + j0.28
17.6	3.43 + j2.86	1.83 + j0.52	1.43 + j0.30

Wybór 48 wartości parametrów Z_{R1} , Z_{R2} z zaznaczonego na rys.3.7 obszaru jest zatem uzasadniony. Punkty odpowiadające tym impedancjom leżą bowiem na płaszczyźnie zespolonej w pobliżu punktów odpowiadających prawdopodobnym wartościom rezystancji uziemień stacji.

Tablica 3.4 przedstawia skrajne wartości reaktancji modelowych X_{g1p} i X_{Mp} /spośród 48 obliczonych/. Przedstawia ona również wartości tych reaktancji obliczone dla prawdopodobnego uziemienia stacji $R_g = 0.67 \Omega$.

Tablica 3.4. Zestawienie wartości reaktancji modelowych X_{g1p} i X_{Mp} oraz porównanie ich z reaktancjami katalogowymi linii dla składowej zerowej. Dla danej długości pozycje 1,2 odnoszą się do wartości skrajnych spośród 48 rozważanych par Z_{R1} , Z_{R2} . Pozycja 3 odnosi się do przypadku $R_s = 0.67 \Omega$

Długość linii km	Z_{R1} Ω	Z_{R2} Ω	Reaktancja własna na modelowa X_{g1p}	Reaktancja własna na katalogowa X_{g1k}	$\Delta = \frac{X_{g1k} - X_{g1p}}{X_{g1p}} \cdot 100$	Reaktancja własna delowa torów X_{Mp}	Reaktancja własna katalogowa X_{Mk}	$\Delta = \frac{X_{Mk} - X_{Mp}}{X_{Mp}} \cdot 100$
	Ω	Ω	Ω	Ω	%	Ω	Ω	%
1.6	0.5 + j0.1	0.5 + j0.1	1.680	1.683	0.2%	0.743	0.747	0.5%
1.6	0.5 + j0.1	2.3 + j0.7	1.938	1.683	-13,2%	1.001	0.747	-25.8%
1.6	1.72 + j0.0	1.72 + j0.0	1.690	1.683	-0,4%	0.752	0.747	-0.7%
5.6	2.0 + j0.1	2.0 + j0.1	5.796	5.891	1,6%	2.514	2.610	3.8%
5.6	0.5 + j0.1	2.3 + j0.7	6.080	5.891	-3,1%	2.798	2.610	-6.7%
5.6	1.40 + j0.14	1.40 + j0.14	5.806	5.891	1,5%	2.524	2.610	3.4%
9.6	2.0 + j0.1	2.0 + j0.1	10.047	10.100	0.5%	4.422	4.474	1.2%
9.6	0.5 + j0.1	2.3 + j0.7	10.233	10.100	-1,3%	4.607	4.474	-2.9%
9.6	1.37 + j0.28	1.37 + j0.28	10.083	10.100	0.2%	4.457	4.474	0,4%

c.d. Tablicy 3.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17.6	2.0 + j0.1	2.0 + j0.1	18.486	18.515	0,2%	8.172	8.202	0,4%
17.6	0.5 + j0.1	2.3 + j0.7	18.646	18.515	-0,7%	8.332	8.202	-1.6%
17.6	1.43+j0.3	1.43+ j0.30	18.512	18.515	0,0%	8.198	8.202	0.0%

Analizując zawarte w tabl. 3.4 wartości reaktancji modelowych i porównując je z wartościami reaktancji katalogowych linii stwierdzamy, że szczególnie dla typowych wartości rezystancji uziemień linii, różnią się one od siebie nieznacznie, nawet dla b. krótkich odcinków.

Tablica 3.5. zawiera maksymalne, minimalne oraz obliczone dla $R_g = 0.67 \Omega$ wartości modelowej reaktancji przejścia X_{zp} . Widzimy, że dla krótkich odcinków są one znacznie mniejsze niż dla odcinków długich. Dla typowej wartości rezystancji uziemienia stacji $/R_g = 0.67 \Omega /$ wartości te są znikome w porównaniu z reaktancjami linii.

3.5.3. Wpływ linii przyłączonych do szyn stacji, w której rozpatruje się zwarcie doziemne, na wartość składową zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przełącznika

Rozpatrywanie wpływu wspomnianych linii jest równocześnie dyskusją słuszności założenia /3.25/. Zakładamy, że do stacji (1) /rys. 3.6/ przyłączona jest jeszcze jedna linia o następujących parametrach schematu zredukowanego: Z_{pd} , Z_{g1d} , Z_{gpd} , Z_{RLd} , Z_{R2d} . Sens powyższych parametrów jest taki sam jak dla linii podstawowej. Założenie /3.25/ przyjmuje postać:

$$I_{zw} = I_{R1} + I_p + I_{do} \quad /3.29/$$

W wyniku prostych przekształceń równania wynikającego z II prawa Kirchhoffa otrzymujemy następujące wyrażenie określające składową zerową napięcia w miejscu zainstalowania przełącznika:

Tablica 3.5. Zestawienie maksymalnych, minimalnych oraz obliczonych dla $R_s = 0.67 \Omega$ wartości modelowej reaktancji przejścia X_{zp}

Długość linii	Parametry poprzeczne		Modelowa reakt. przejścia $X_{zp} - \min$	Parametry poprzeczne		Modelowa reakt. przejścia $X_{zp} \max$	Parametry poprzeczne		Modelowa reakt. przejścia X_{zp} dla $R_s = 0.67 \Omega$
	Z_{R1}	Z_{R2}		czne Z_{R1}	Z_{R2}		czne Z_{R1}	Z_{R2}	
km	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
1.6	$0.5+j0.1$	$2.3+j0.7$	0.009	$0.8+j0.6$	$0.8+j0.6$	0.292	$1.72+j0.0$	$1.72+j0.0$	0.044
5.6	$0.5+j0.1$	$2.3+j0.7$	0.017	$2.0+j0.6$	$2.0+j0.6$	0.310	$1.40+j0.4$	$1.40+j0.14$	0.082
9.6	$0.5+j0.1$	$2.3+j0.7$	0.057	$2.0+j0.6$	$2.0+j0.6$	0.341	$1.37+j0.28$	$1.37+j0.28$	0.183
17.6	$0.5+j0.1$	$2.3+j0.7$	0.062	$2.0+j0.6$	$2.0+j0.6$	0.339	$1.43+j.030$	$1.43+j0.30$	0.181

$$\begin{aligned}
 U_{pc} &= I_{g1} \left(z_{g1} - \frac{z_{gp}^2 + z_{gp} z'_{R1}}{z'_{R1} + z_{R2} + z_p} \right) + I_{g2} \left(z_M - \frac{z_{gp}^2 + z_{gp} z'_{R1}}{z'_{R1} + z_{R2} + z_p} \right) + \\
 &+ \left(I_{zw} - \frac{z_{gpd}}{z_{pd} + z_{R2d}} I_d \right) \cdot \frac{z_{R1} z_{R2} + z_o - z_{gpd} z_{R1}}{z'_{R1} + z_{R2} + z_p} = \\
 &= I_{g1} z_{g1p} + I_{g2} z_{Mp} + \left(I_{zw} - \frac{z_{gpd}}{z_{pd} + z_{R2d}} I_d \right) \cdot z'_{zp} \quad /3.30/
 \end{aligned}$$

Postać wyrażenia /3.30/ odpowiada postaci wyrażenia /3.28/.

I_d oznacza składową zerową prądu płynącego w rozpatrywanej dodatkowej linii. Analizując wyrażenie /3.30/ w porównaniu z /3.28/ stwierdzamy, że wartości impedancji modelowych z_{g1p} , z_{Mp} , z_{zp} ulegają zmianie. Ponieważ jednak:

$$\frac{1}{z'_{R1}} = \frac{1}{z_{RL}} + \frac{1}{z_{RLd}} + \frac{1}{3R_{s1}} + \frac{1}{z_{pd} + z_{R2d}} \quad /3.31/$$

widać, że decydujący wpływ na wartość z'_{R1} ma rezystancja uzziemienia stacji R_{s1} , a zmiany spowodowane przez uwzględnienie z_{RLd} , z_{pd} , z_{R2d} są przy praktycznie spotykanych wartościach R_{s1} , nieznaczne.

Zakładając, że rozważana linia dwutorowa ma długość 5,6 km, zaś do szyn stacji (1) jest dołączona linia tego samego typu, o długości 9,6 km, otrzymujemy przyjmując $R_{s1} = 10 \Omega$, $R_s = 0,67 \Omega$, $a = 400$ m następujące wartości reaktancji modelowych:

$$x'_{g1p} = 5,870 \Omega \quad /poprzednio \quad x_{g1p} = 5,819 \Omega, \quad \text{wartość katalogowa } x_{gk} = 5,891 \Omega /,$$

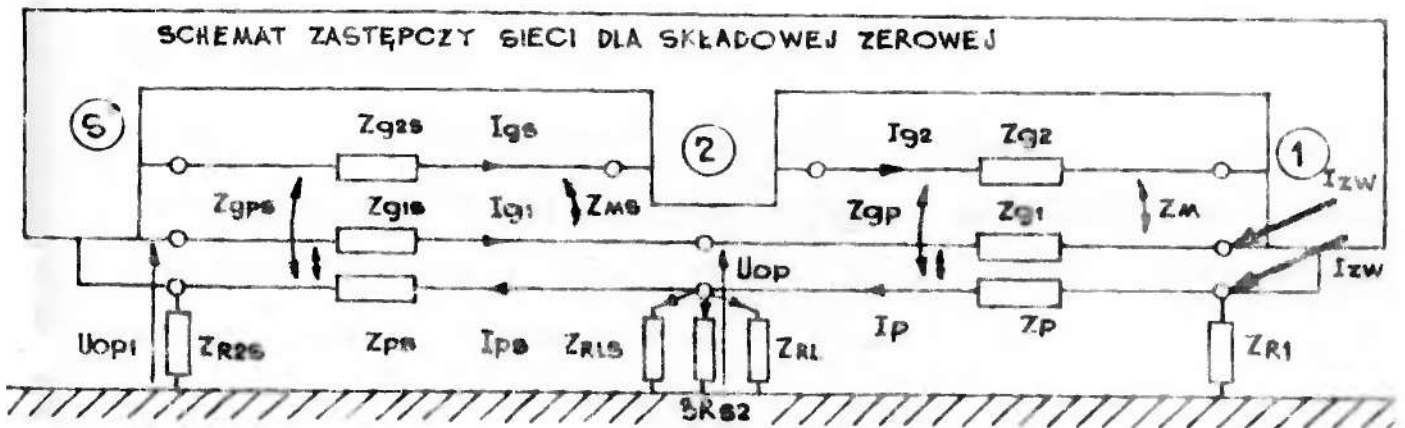
$$x'_{Mp} = 2,589 \Omega \quad /poprzednio \quad x_{Mp} = 2,537 \Omega, \quad \text{wartość katalogowa}$$

$$x_{Mk} = 2,610 \Omega /.$$

Wyniki te potwierdzają zamieszczony powyżej stwierdzenie, że dołączenie dodatkowej linii do szyn stacji, w której rozpatrujemy zwarcie, nie spowoduje specjalnych zmian wartości reaktancji modelowych. W rozpatrywanym przypadku zbliżyły się one jeszcze bardziej do wartości reaktancji katalogowych.

3.5.4. Wpływ dodatkowej linii przyłączonej do szyn stacji, w której zainstalowane przełącznik, na wartość składowej zerowej napięcia

Rozpatrywanie wpływu linii przyłączonej do szyn stacji, w której znajduje się analizowany przełącznik, na wartość składowej zerowej napięcia, jest równocześnie dyskusją słuszności założenia /3.24/. Rozszerzając schemat zastępczy układu z rys. 3.6 otrzymujemy schemat uwzględniający tę linię - rys. 3.8.



Rys. 3.8. Fragment schematu zastępczego sieci el-en dla zwarcia doziemnego w stacji ①. Poszczególne impedancje zaznaczone na rysunku wchodzi w skład zredukowanych schematów zastępczych linii rozpatrywanej ② - ① i linii przyłączonej za nią ⑤ - ②.

Stosując zamiast równania /3.24/ równanie:

$$I_p = I_{R2} + I_{ps} \quad /3.30/$$

i utrzymując w mocy pozostałe założenia, otrzymujemy:

$$U_{op} = I_{g1} / Z_{g1} - \frac{Z_{gp} \cdot Z'_{gp} + Z_{R1} \cdot Z'_{gp}}{Z_{R1} + Z_p + Z'_{R2}} / + I_{g2} / Z_M \frac{Z_{gp}^2 + Z_{R1} \cdot Z_{gp}}{Z_{R1} + Z_p + Z'_{R2}} /$$

$$+ I_{zw} \frac{Z_{R1} / Z_p + Z'_{R2} / - Z_{R1} \cdot Z_{gp}}{Z_{R1} + Z_p + Z'_{R2}} - I_{gs} \frac{Z_{gp} \cdot Z'_{gps} + Z_{R1} \cdot Z'_{gps}}{Z_{R1} + Z_p + Z'_{R2}} =$$

$$= I_{g1} Z'_{gp} + I_{g2} Z'_{Mp} + I_{zw} Z_{zp} - I_{gs} Z_{zsp} \quad /3.31/$$

gdzie:

$$Z'_{R2} = \frac{Z_{R2} / Z_{ps} + Z_{R2s} /}{Z_{R2} + Z_{ps} + Z_{R2s}} ; \quad Z'_{gps} = \frac{Z_{gps} \cdot Z_{R2}}{Z_{R2} + Z_{ps} + Z_{R2s}} ;$$

$$Z'_{gp} = Z_{gp} + Z'_{gps}$$

Zakładając, że dołączona "za plecami" przekaźnika linia jest tego samego typu co linia rozpatrywana i ma identyczną długość /5.6 km/, otrzymujemy $R_{g1} = 10 \Omega$ i $R_g = 0.67 \Omega$ / następujące wartości analizowanych reaktancji modelowych:

$$X'_{g1p} = 5.836 \Omega \text{ /poprzednio } X_{g1p} = 5.819 \Omega, \text{ wartość katalogowa}$$

$$X_{gk} = 5.891 \Omega /,$$

$$X'_{Mp} = 2.608 \Omega \text{ /poprzednio } X_{Mp} = 2.537 \Omega, \text{ wartość katalogowa}$$

$$X_{Mk} = 2.610 \Omega /.$$

Na podstawie tych wyników stwierdzić można, że uwzględnianie linii przyłączonej za miejscem zainstalowania przekaźnika, nie

zmienia wartości reaktancji modelowych linii zabezpieczanej. W rozpatrywanym przypadku, podobnie jak w p. 3.5.3 zbliżyły się one jeszcze bardziej do wartości reaktancji katalogowych.

3.5.5. Wpływ zmian długości przęseł i rezystancji uziemień słupów na wartość składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przekąźnika

Przyjmowana w dotychczasowych obliczeniach rozpiętość przęseła rozpatrywanej linii $a = 400 \text{ m}$ ulega w praktyce skróceniu z uwagi na układ terenu i stosowanie obostrzeń. Ma to miejsce szczególnie na podejściach przystacyjnych. Przyjmowana w obliczeniach rezystancja uziemienia słupa $R_{s1} = 10 \Omega$ jest rezystancją o największej dopuszczalnej wartości. Praktycznie spotykane wartości tej rezystancji mogą być nawet $3/4$ razy mniejsze, w szczególności na podejściach przystacyjnych.

W celu sprawdzenia, czy wspomniane powyżej warunki mają istotny wpływ na wartości reaktancji modelowych X_{g1p} , X_{Mp} dokonano ich obliczenia dla linii o długości 5.6 km, zakładając, że $a = 233.3 \text{ m}$, $R_{s1} = 3.33 \Omega$, rezystancja uziemienia stacji $R_s = 0.67 \Omega$. Otrzymano następujące wyniki:

$$X_{g1p} = 5.825 \Omega / \text{poprzednio } X_{g1p} = 5.819 \Omega, \text{ wartość katalog.}$$

$$X_{gk} = 5.891 \Omega /,$$

$$X_{Mp} = 2.588 \Omega / \text{poprzednio } X_{Mp} = 2.537 \Omega, \text{ wartość katalog.}$$

$$X_{Mk} = 2.610 \Omega /.$$

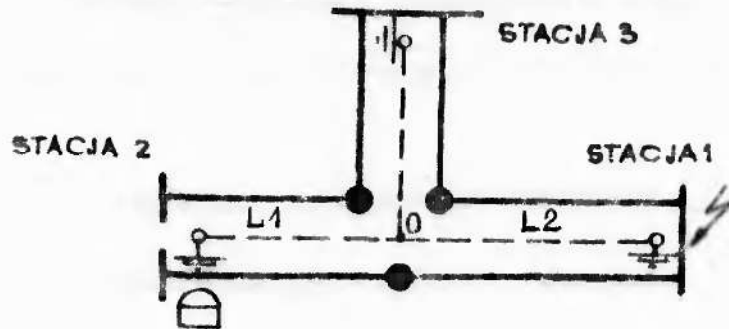
Modelowa reaktancja przejścia:

$$X_{zp} = 0.174 \Omega / \text{poprzednio } X_{zp} = 0.082 \Omega /.$$

Porównując powyższe wartości z wartościami reaktancji przedstawionymi w tabl. 3.4 stwierdzamy, że zmniejszenie długości przęseł i rezystancji uziemień słupów wpływa na zbliżenie wartości reaktancji modelowych do reaktancji katalogowych. Zwiększeniu ulega natomiast modelowa reaktancja przejścia.

3.5.6. Łączenie zredukowanych schematów zastępczych

W praktycznie spotykanych układach sieci często zdarzają się przypadki, gdy tory linii dwutorowej nie przebiegają obok siebie na całej swojej długości /np. rys. 3.9/.



Rys. 3.9. Przykładowy schemat sieci elektroenergetycznej z rozgałęzionym układem linii dwutorowych /linią przerywaną oznaczono przewód odgromowy/.

Na rys. 3.9 mamy właściwie do czynienia z trzema odcinkami dwutorowymi: (2) - (0), (0) - (1), (0) - (3). Pomijając wpływ odcinka przewodu odgromowego (0) - (3) możemy do szczegółowej analizy tego przypadku wykorzystać rys. 3.6, zakładając, że $R_{S2} \rightarrow \infty$. Używając tych samych oznaczeń możemy określić napięcie

U_{op1} :

$$U_{op1} = \frac{1}{Z_{E1s}} + Z_{E1} - \frac{Z_{EPs}^2}{Z_{R2} + Z_{ps} + Z_{R2s}} - \frac{Z'_{EP}{}^2 + Z'_{EP} Z_{R1}}{Z_{R2} + Z_p + Z_{R1}} / I_{E1}$$

$$\pm \frac{1}{Z_{Ms}} - \frac{Z_{EPs}^2}{Z_{R2} + Z_{ps} + Z_{R2s}} - \frac{Z'_{EP} \cdot Z'_{EPs} + Z_{R1} \cdot Z_{EP}}{Z_{R2} + Z_p + Z_{R1}} / I_{Es} +$$

$$\pm \frac{1}{Z_M} - \frac{Z_{EP} \cdot Z'_{EP} + Z_{EP} \cdot Z_{R1}}{Z_{R2} + Z_p + Z_{R1}} / I_{E2} + \frac{Z_{R1} \cdot /Z_0 + Z_{R2} / - Z_{R1} Z_{EP}}{Z_{R1} + Z_p + Z'_{R2}} I_{zw}$$

$$= Z'_{E1p} I_{E1} \pm Z_{Msp} I_{Es} \pm Z_{Mp} I_{E2} + Z'_{zp} I_{zw} \quad /3.32/$$

Znaczenie poszczególnych impedancji jest takie same jak w p. 3.5.4. Przykładowe obliczenia wykonano zakładając, że rezystancje uzemień stacji ① i ② wynoszą $R_g = 0.67 \Omega$. W przypadku, gdy odcinki mają po 5.6 km / $a = 400$ m, $R_{s1} = 10 \Omega$ ^{otrzymano,} istotniejsze niż poprzednie rozbieżności pomiędzy reaktancjami wzajemnymi modelowymi, a reaktancjami wzajemnymi katalogowymi:

$$X_{Msp} = 2.800 \Omega \text{ /względna procentowa różnica } \Delta = -7,0\% /$$

$$X_{Mp} = 2.399 \Omega \text{ /względna procentowa różnica } \Delta = 8.5\% /$$

Te istotne różnice /w porównaniu z wynikami poprzednimi/ mają łatwe wytłumaczenie fizyczne. Na odcinku L2 na zmniejszenie reaktancji wzajemnej widzianej przez przekaźnik zainstalowany w stacji ② wpływa większe niż w przypadku linii nierozgałęzzonej oddziaływanie przewodu odgromowego wywołane obecnością odcinka L1. Z kolei na odcinku L1 oddziaływanie to jest mniejsze, gdyż największe prądy płyną przewodami odgromowymi w pobliżu stacji ①. Reaktancja modelowa własna linii niewiele różni się od reaktancji katalogowej: $X_{g1p} = 11.764 \Omega / \Delta = 0.2\%$ Wprowadzenie do punktu 0 dodatkowej rezystancji uzemiającej / $R_d = 2 \Omega$ / zmniejsza wspomniane rozbieżności /np. dla $X_{Mp} \Delta = -6.3\%$. Wydłużenie odcinka L1 nie powoduje również wzrostu rozbieżności /np. dla $X_{Mp} \Delta = 7.8\%$. Wydłużenie obydwu odcinków do 9.6 km powoduje znaczne zbliżenie się wartości reaktancji wzajemnych modelowych do wartości reaktancji katalogowych /dla $X_{Mp} \Delta = 1.5\%$.

3.6. PODSUMOWANIE ROZWAŻAŃ DOTYCZACYCH MODELI UKŁADÓW WIELOTOROWYCH

Przeprowadzone rozważania i obliczenia upoważniają do przedstawienia następujących wniosków:

1. Na podstawie znajomości geometrii układu wielotorowego i rezystywności gruntu można, wykorzystując przybliżone wzory na impedancje obwodów ziemnopowrotnych, utworzyć jego model matematyczny w postaci macierzy admitancyjnej węzłowej i odpowiadającej mu schemat zastępczy w postaci wieloboku zupełnego.
2. Aczkolwiek powyższy model ma wiele zalet, to jednak stosowanie go pociąga za sobą rozbudowę schematów zastępczych sieci dla składowej zerowej. Autor wykazał, że istnieją przypadki, w których można zrezygnować z korzystania z tego modelu, skracając proces obliczeniowy.
3. Mając na uwadze konieczność oszacowania składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania przekaźnika odległościowego, w celu dobrania poprawnej wartości współczynnika kompensacji prądowej, za podstawowy element różnicujący możliwe do stosowania modele układów wielotorowych przyjęć należy sposób uwzględniania uziemień przewodów odgromowych.
4. Wykazano, że przy założeniu bezimpedancyjnego uzziemienia przewodów odgromowych, przyjęte w rozdziale 2 założenie: $X_m = 0.5 X_0$ jest praktycznie uzasadnione.
5. Przedstawiona przez autora w p. 3.4.4. metoda impedancyjna obliczania elementów zredukowanego schematu zastępczego układu p-przęsłowego jest metodą efektywniejszą od przedstawionej w literaturze metody admitancyjnej.

6. Z czysto teoretycznego punktu widzenia, nie ma przeszkód, aby zredukowane schematy zastępcze układów wielotorowych wprowadzać do bazy danych eksploatowanych programów obliczeń zwarciovych. Wpłynęłoby to jednak na znaczne wydłużenie czasu obliczeń, zmniejszenie parametrów maksymalnych programów i skomplikowałoby system przygotowania danych.
7. Wychodząc z założenia, że obliczenia wartości prądów zwarciovych w minimalnym stopniu zależą od sposobu uwzględniania uziemień przewodów odgromowych, autor przedstawił prostą metodę analizy napięcia w miejscu zainstalowania przełącznika wprowadzającą tzw. impedancje modelowe - własno, wzajemne i przejścia.
8. Autor wykazał, że dla różnych długości typowej linii dwutorowej, przy różnych dodatkowych założeniach wynikających z praktycznych warunków pracy tej linii, części urojone wspomnianych parametrów /reaktancje modelowe/ są b. zbliżone do wartości reaktancji katalogowych.
9. Stosunkowo największe rozbieżności między reaktancjami modelowymi i katalogowymi występują w przypadku łączenia krótkich odcinków badanej linii, gdy miejsce ich połączenia bądź rozgałęzienia leży między przełącznikiem i miejscem zwarcia.
10. W zależności od wymaganej dokładności obliczeń, składową zerową napięcia w miejscu zainstalowania przełącznika, można zatem określić następująco:
 - a/ stosując metodę impedancji modelowych, wykorzystując prądy zwarciove otrzymane jako wynik obliczeń przy zastosowaniu modeli katalogowych,

b/ stosując modele katalogowe uzupełnione modelową reaktancją przejścia,

c/ stosując wyłącznie modele katalogowe.

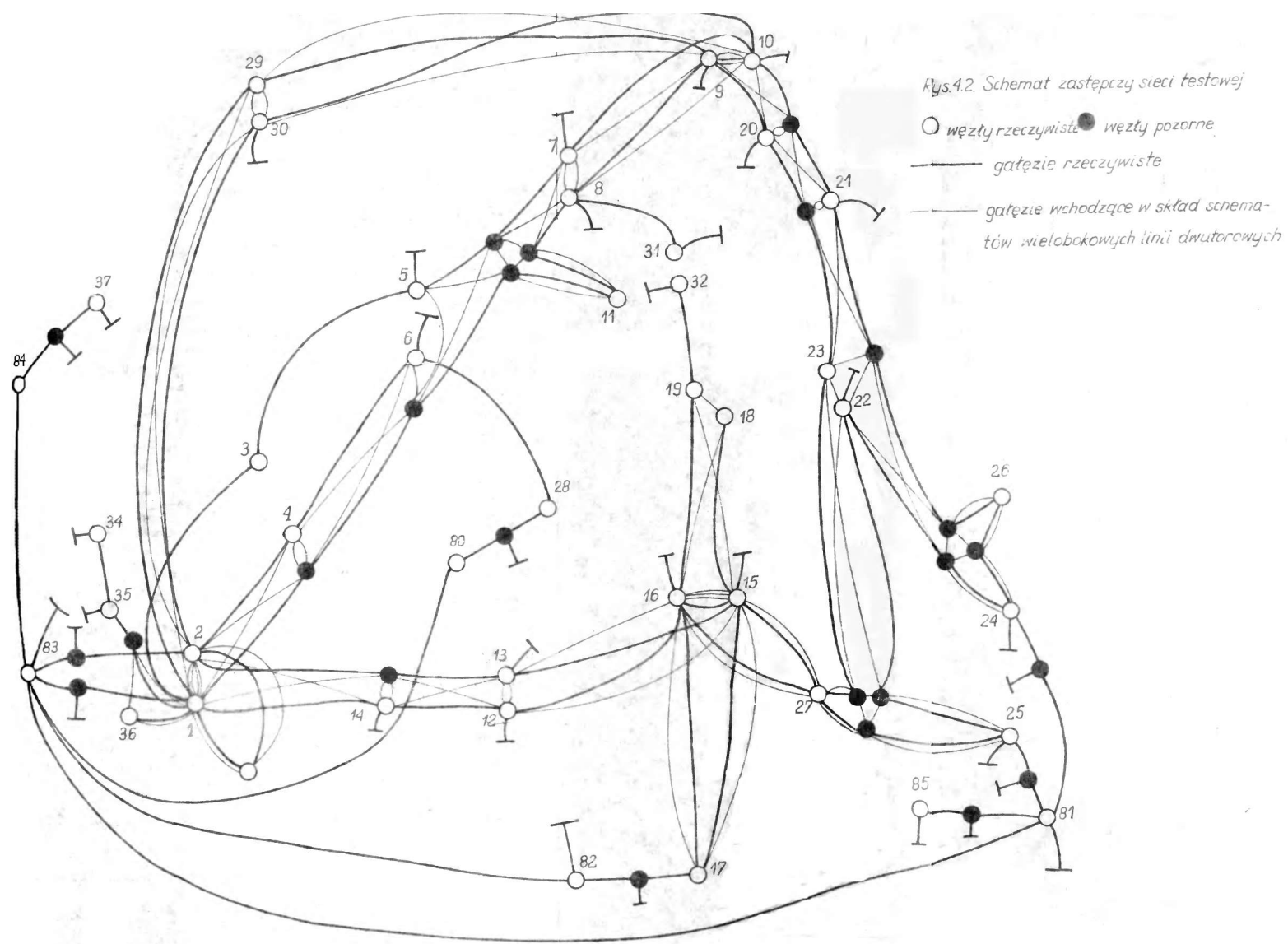
Wydaje się, że dla linii o długości powyżej 10 km dokładność przypadku c jest wystarczająca.

4. ANALIZA METOD OBLICZENIOWYCH POZWALAJACYCH NA UWZGLĘDNIANIE SPRZEŻEŃ POMIĘDZY TORAMI W OBLICZENIACH ZWARCIOWYCH ORAZ PROPOZYCJE ICH MODYFIKACJI

4.1. Uwagi ogólne

Zgodnie z wnioskami wynikającymi z rozdziału 3, nie wydaje się konieczne uwzględnianie w obliczeniach zwarcio-
wych zredukowanych schematów zastępczych układów wielotoro-
wych, w których przewody odgromowe występują w sposób "jaw-
ny". Mimo to, rozważając wyłącznie modele katalogowe takich
układów tj. modele, w których wartości impedancji zastępczych
przewodów odgromowych nie występują w "jawnej" postaci, mo-
żemy spodziewać się również istotnych komplikacji procesu
obliczeniowego.

W tym miejscu należałoby sprecyzować pojęcie obliczeń zwar-
ciowych. Wszystkie spośród interesujących nas wielkości
zwarcioowych omówionych w rozdziale 2, obliczone są na pod-
stawie znajomości elementów macierzy impedancyjnej węzłowej
analizowanej sieci elektroenergetycznej. Dlatego też, mów-
iąc o metodach obliczeniowych mamy przede wszystkim na
myśli metody pozwalające na określenie tych macierzy,
w szczególności zaś macierzy dla składowej zerowej, której
budowa komplikuje się na skutek uwzględniania sprzężeń
pomiędzy torami linii napowietrznych. Porównując efektyw-
ność poszczególnych metod, autor miał na uwadze nie tylko
czas obliczeń, ale również ich aspekty praktyczne - prostotę
i łatwość przygotowania danych oraz powiązanie z funkcyj-
nym w energetyce oprogramowaniem.

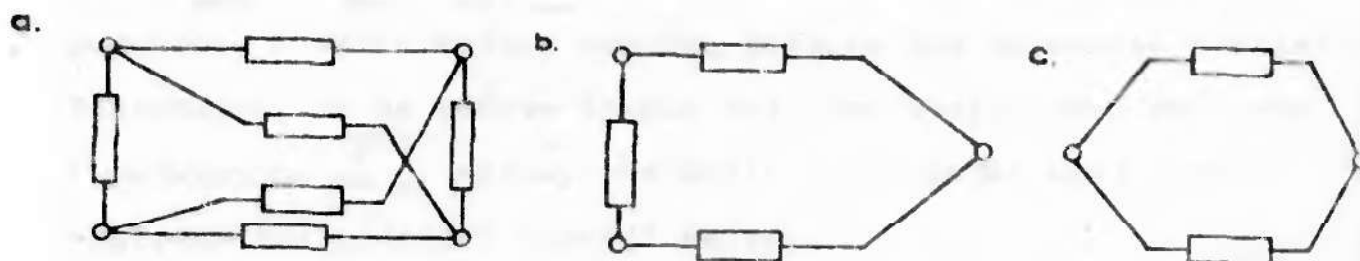


Rys.4.2. Schemat zastępczy sieci testowej
 ○ węzły rzeczywiste ● węzły pozorne
 — gałęzie rzeczywiste
 - - - gałęzie wchodzące w skład schematów wielobokowych linii dwutorowych

4.2. Metody wykorzystujące model admitancyjny węzłowy układu wielotorowego

4.2.1. Rozważania wstępne

Zgodnie z p. 3.3.3. admitancyjnemu modelowi matematycznemu układu wielotorowego odpowiada schemat zastępczy w postaci wieloboku zupełnego, przy czym liczba jego wierzchołków jest równa podwojonej liczbie torów. W przypadku 2 torów schemat taki ma postać przedstawioną na rys. 4.1. Podlega on modyfikacjom w zależności od sposobu połączeń końców.



Rys. 4.1. Schemat zastępczy dla składowej zerowej układu dwóch torów
a/ schemat podstawowy,
b, c/ schematy odpowiadające połączeniom końców torów.

W rozważaniach zawartych w rozdz. 3, w kilku miejscach wspomniano o komplikacjach wynikających ze wprowadzenia do schematu sieci dodatkowych gałęzi odwzorowujących sprzężenia. Rys. 4.2 przedstawia znaną z poprzednich rozważań sieć testową liczącą pierwotnie 132 gałęzie, zaś po wprowadzeniu gałęzi dodatkowych /zaznaczono cienką linią/ 223 gałęzie, co jest jednak istotnym ich zmniejszeniem w porównaniu z rys. 3.5.

Wszystkie stosowane w kraju programy obliczeń zwarciowych używają tego właśnie sposobu modelowania sprzężeń pomiędzy torami. Dlatego też, omawiając różne metody obliczania macierzy impedancyjnej, szczególną uwagę zwrócono na konsekwencje związane z takim podejściem do rozpatrywanego problemu.

4.2.2. Metoda dołączania gałęzi - zależności podstawowe

Powyższa metoda, nosząca również nazwę "metody El-Abiada" jest przedstawiona szeroko w literaturze zagranicznej i krajowej - [12], [16], [3]. Polega ona na dokonywaniu w macierzy impedancyjnej Z , modyfikacji przeprowadzonych każdorazowo po rozpatrzeniu kolejnej gałęzi danej sieci n-węzłowej.

Stopień macierzy, w trakcie uwzględniania wszystkich gałęzi 1...b...B zmienia się od 1 do n. Sposób modyfikacji macierzy Z zależy od usytuowania rozpatrywanej gałęzi w stosunku do podsieci, w skład której wchodzi gałęzie już poddawane analizie.

Zakładając, że na pewnym etapie obliczeń dysponujemy macierzą impedancyjną Z_k^b możemy rozróżnić 3 przypadki usytuowania względem tej podsieci "nowej" gałęzi:

- rozpatrywana "nowa" gałąź o impedancji Z_g łączy "nowy" węzeł z węzłem odniesienia /tzw. gałąź udziałowa/

$$Z_{k+1}^{b+1} = \begin{bmatrix} Z_k^b & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 \dots 0 & Z_g \end{bmatrix} \quad /4.1/$$

- rozpatrywana "nowa" gałąź o impedancji Z_g łączy węzeł "stary" /o numerze j, $j \leq k$ / z węzłem "nowym" /tzw. gałąź promieniowa/

$$Z_{k+1}^{b+1} = \begin{bmatrix} Z & Z_{1j} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{j1} \dots Z_{jk} & Z_{jj} + Z_g \end{bmatrix} \quad /4.2/$$

- rozpatrywana "nowa" gałąź o impedancji Z_g łączy ze sobą dwa "stare" węzły i oraz j /i, $j \leq k$, tzw. gałąź oczkowa/

$$Z_k^{b+1} = Z_k^b - \frac{1}{Z_g + Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij}} \begin{bmatrix} Z_{1i} - Z_{1j} \\ \vdots \\ Z_{ki} - Z_{kj} \end{bmatrix} [(Z_{ii} - Z_{ij}) \dots (Z_{ki} - Z_{kj})] \quad /4.3/$$

Bilans działań, które należy wykonać w przypadkach drugim i trzecim przedstawia ^(się) następująco:

- przyłączenie gałęzi promieniowej

dodawania: 1

mnożenia/dzielenia: 0

- przyłączenie gałęzi oozkowej

dodawania /odejmowania: $k^2 + k + 3$

mnożenia/dzielenia: $k^2 + k + 1$

Powyższy bilans określono przyjmując założenie, że operujemy pełnymi macierzami impedancyjnymi.

Rozpatrując w świetle powyższych rozważań zagadnienie uwzględnienia sprzężeń międzygałęziowych w budowie macierzy impedancyjnej dla składowej zerowej stwierdzamy, że w wyniku zastosowania schematów gałęziowych /rys. 4.1./ nie powinno być jakościowych różnic w przebiegu obliczeń, dla układów ze sprzężeniami czy też bez. Różnice polegają na konieczności wykonania dodatkowych obliczeń związanych z uwzględnieniem:

a/ 4 dodatkowych gałęzi oozkowych dla schematu z rys. 4.1a

/nie można a priori powiedzieć, które z 6 widocznych na rys. 4.1.a gałęzi będą wspomnianymi gałęziami dodatkowymi/,

b/ 1 dodatkowej gałęzi oozkowej dla schematu z rys. 4.1.b.

Bilans dodatkowych działań związanych z uwzględnieniem w obliczeniach dodatkowych gałęzi przedstawia się następująco

- dla przypadku z rys. 4.1a

dodawania/odejmowania $4/k^2 + k + 3/$

mnożenia/dzielenia $4/k^2 + k + 1/$

- dla przypadku z rys. 4.1b

dodawania/odejmowania $k^2 + k + 3$

/4.4/

mnożenia/dzielenia $k^2 + k + 1$

k oznacza liczbę węzłów włączonych już do analizowanej sieci wraz z węzłami wchodzącymi w skład schematów gałęziowych z rys. 4.1a,b.

4.2.3. Metoda dołączania gałęzi - szczególne uwagi o przebiegu procesu obliczeniowego

Rzeczywisty proces obliczeniowy, aczkolwiek oparty na zasadach przedstawionych w p. 4.2.1. jest bardziej skomplikowany. Poniżej zasygnalizowano kilka problemów, które mają istotny wpływ na czas trwania obliczeń.

Zbiór gałęzi systemu, utworzony z par liczb będących numerami końców tych gałęzi oraz tzw. katalog reaktancji, liczące dla rzeczywistych sieci więcej niż tysiąc elementów, są uporządkowane wg zasad narzuconych organizacją ewidencjonowania danych w energetyce /system Normal/. Aby była możliwa realizacja rozważanego algorytmu, zbiór gałęzi musi być przegrupowany tak, aby dla każdej kolejnej rozpatrywanej gałęzi, przynajmniej jeden z numerów jej węzłów krańcowych należał do zbioru utworzonego z numerów węzłów podsieci już przeanalizowanej oraz elementu 0. Matematyczna postać tego warunku jest następująca:

$$\bigwedge_{\substack{l \in \{B\} \\ \wedge l > b}} : (p_l \in \{A_k\} \vee q_l \in \{A_k\}) \quad /4.5/$$

gdzie:

- $\{B\}$ - zbiór gałęzi sieci
- $\{A_k\}$ - zbiór numerów węzłów podsieci o k węzłach i b gałęziach, dla której znana jest już macierz impedancyjna Z_k^b

p_l, q_l - numery węzłów krańcowych gałęzi l -tej.

\bigwedge - symbol matematyczny tzw. kwantyfikator ogólny /czytamy: dla każdego .../.

Uporządkowanie zbioru $\{B\}$ osiąga się przy pomocy specjalnego algorytmu, omówionego szczegółowo w [23]. Warunek sformułowany powyżej pozwala na dokonywanie tego na wiele sposobów. Możliwe jest znalezienie uporządkowania optymalnego ze względu na liczbę operacji arytmetycznych potrzebnych do sformowania macierzy Z . Ogólne zasady optymalizujące uporządkowanie gałęzi przedstawia praca [5]. Wydaje się jednak, że proces realizujący optymalizację zająłby więcej czasu niż same obliczenia elementów macierzy impedancyjnej.

Ponieważ nie jest ani możliwe, ani konieczne obliczanie i przechowywanie w pamięci operacyjnej maszyny cyfrowej pełnej macierzy impedancyjnej dużej sieci elektroenergetycznej, stosuje się szereg posunięć mających również wpływ na czas trwania obliczeń:

- oblicza się tylko elementy diagonalne i połowę elementów pozadiagonalnych tej macierzy,
- dokonuje się podziału sieci na obszary, dla których oblicza się ekwiwalentne układy zastępcze redukując wszystkie węzły wewnętrzne, zaś macierz impedancyjną oblicza się kolejno tylko dla jednego z tych obszarów /program ZFBF - [15] /.
- oprócz elementów diagonalnych oblicza się tylko te elementy macierzy impedancyjnej, które odpowiadają rzeczywistemu połączeniu węzłów między sobą, bądź te, które są konieczne do określania wielkości związanych z nastawieniami zabezpieczeń przekąźnikowych /"rodzina" programów ZW - [7], [14], [16].

- stosuje się macierze robocze prostokątne, w których liczba kolumn zwiększa się w trakcie obliczeń od 1 do n, zaś liczba wierszy zmienia się w zależności od liczby węzłów należących do tzw. zbioru węzłów aktualnie rozpatrywanych - $\{Z_A\}$. Zbiór ten jest podzbiorem zbioru $\{A_k\}$. Dany węzeł o numerze m wchodzący w skład przeanalizowanej już podsięci, należy do $\{Z_A\}$ jeśli wśród numerów węzłów krańcowych gałęzi jeszcze nie rozpatrywanych, istnieje przynajmniej jeden węzeł o tym samym numerze. Matematyczna postać tego warunku jest następująca:

$$(m \in \{Z_A\}) \Leftrightarrow (m \in \{A_k\} \wedge \bigvee_{l=b+1 \dots B} (p_l = m \vee q_l = m)) \quad /4.6/$$

Jeżeli dany węzeł w trakcie obliczeń przestaje spełniać warunek /4.6/ niektóre elementy odpowiadającego mu wiersza zostają przepisane do innej macierzy roboczej, zaś z macierzy impedancyjnej cały wiersz zostaje wykreślony. Uzyskane w ten sposób miejsce w pamięci operacyjnej może wykorzystywane jest do przechowywania wierszy odpowiadających nowym elementom zbioru $\{Z_A\}$ /"rodzina" programów ZW - [7], [14], [16].

Wymieniając powyższe problemy autor miał na celu pokazanie, że praktycznie stosowane programy obliczeń zwarciowych są znacznie bardziej skomplikowane niżby wskazywał na to omówiony algorytm dołączania gałęzi. Rozważając w dalszej części pracy możliwość skrócenia czasu trwania obliczeń, zajmowano się zatem nie tylko samymi algorytmami, ale również ich praktyczną realizacją. Uwidocznił się również fakt, że niemożliwe jest określenie liczby działań związanych z przeprowadzanymi obliczeniami, gdyż zależy ona od niemożliwych do uogólnienia czynników

takich jak struktura sieci, czy też kolejność zestawienia jej gałęzi przy przygotowywaniu danych wejściowych.

W związku z powyższym dokonano analizy wzrostu czasu obliczeń wykonywanych przy pomocy programu ZW1 - [16]. Dla sieci testowej otrzymano następujące wyniki:

Tabl. 4.1. Zestawienie czasów trwania obliczeń zwarciovych, wykonanych dla sieci testowej przy pomocy programu ZW1 /emo. Odra 1325/

Liczba odcinków dwutorowych, w których występuje sprzężenie	0	10	25
Czas obliczeń tablicy spływów prądów zwarcia - /s/	203	360	900

Dla sieci ZEOPn otrzymano wyniki:

Tabl. 4.2. Zestawienie czasów trwania obliczeń zwarciovych, wykonanych dla sieci ZEOPn przy pomocy programu ZW1 /emo. Odra 1305/

Liczba odcinków dwutorowych, w których występuje sprzężenie	0	7	14
Czas obliczeń tablicy prądów zwarcia - /s/	530	650	760

Powyższe wyniki potwierdzają sygnalizowane w p. 4.2.1. obawy, że wprowadzenie znacznej liczby torów sprzężonych w istotny sposób wydłuża czas obliczeń.

Kolejnym problemem, który został zauważony w ramach przeprowadzonej w niniejszej pracy analizy programów "rodziny" ZW, jest możliwość występowania podczas ich realizacji wyrażeń nieoznaczonych /dzielenie przez zero/.

Rozważając postać wyrażenia /4.3/ stwierdzamy, że występujący w nim mianownik:

$$Z_g + Z_{ii} + Z_{jj} - Z_{ij}$$

może przyjąć wartość 0, w przypadku sieci zawierającej gałąź o ujemnej reaktancji. Gałęzie takie występują m.in. w sieciach, w których zastosowano dla linii dwutorowych modele wielobokowe. Praktyczna możliwość występowania takiego przypadku została przez autora wykryta przy obliczeniach sieci testowej, zakłócając w istotny sposób proces obliczeniowy. Dokładniejszą analizę tego zagadnienia zawiera punkt 4.4.1.

Autor poświęcił również nieco uwagi dokładności obliczeń zwarciovych prowadzonych dla sieci zawierających sprzężone ze sobą tory. Warunkiem koniecznym poprawności obliczeń zwarciovych jest zgodność wartości prądów płynących przez poszczególne gałęzie i prądu w miejscu zwarcia, z I prawem Kirchoffa. Rozważając składową zerową prądu zwarcia jednofazowego z ziemią powinno zachodzić:

$$\sum I_{ogz} = I_{oz}$$

Analizując otrzymane w rozdz. 2 wyniki obliczeń prowadzonych bez uwzględnienia sprzężeń, stwierdzono rozbieżności wynoszące ok. 0.07%, natomiast przy uwzględnianiu sprzężeń ok. 0,5 - 1%. Źródłem tak istotnego wzrostu błędów należy szukać, podobnie jak w poprzednim przypadku, we własnościach modeli wielobokowych linii dwutorowych.

Rozważmy, na pewnym etapie obliczeń, macierz admitancyjną węzłową Y_k^b podsieci utworzonej z b gałęzi i k węzłów. Załóżmy, że do tej podsieci włączamy gałąź wchodzącą w skład modelu wielobokowego mającą ujemną reaktancję /ujemne reaktancje mają tzw. gałę-

zie krzyżowe takich modeli np. gałąź 1 - $/N+1/$ na rys. 3.2/ o stosunkowo dużym module. Ponieważ moduł admitancji takiej gałęzi ma z kolei małą wartość, w macierzy admitancyjnej o $/b+1/$ gałęziach i k węzłach zajdą niewielkie zmiany. Tymczasem analizując postać wyrażenia $/4.3/$ oraz biorąc pod uwagę zasygnalizowaną poprzednio możliwość wystąpienia w jego mianowniku małych liczb, wartości elementów macierzy impedancyjnej mogą ulec znacznym zmianom, zwiększając swoje wartości bezwzględne $/w$ krańcowym przypadku rosną one do nieskończoności/. Włączenie kolejnych gałęzi tworzących model wielobokowy spowoduje dalsze zmiany wartości elementów macierzy impedancyjnej, które w rezultacie staną się tego samego rzędu, co przed przyłączeniem pierwszej gałęzi. Możemy zatem stwierdzić że na skutek występowania gałęzi o ujemnych reaktancjach, macierz impedancyjna jest w trakcie procesu obliczeniowego macierzą niestabilną. Sytuacja taka sprzyja powstawaniu i kumulowaniu się błędów. Zgodnie z nomenklaturą stosowaną w algebrze - $[28_7]$, ma tu miejsce słabe uwarunkowanie macierzy admitancyjnej podsieci zawierającej fragmenty modeli wielobokowych, aczkolwiek macierz admitancyjna całej sieci jest dobrze uwarunkowana. Przedstawione powyżej fakty, stanowią kolejne potwierdzenie stanowiska autora wobec modeli wielobokowych układów wielotorowych $/por. p. 3.3.3/$.

4.2.4. Metoda dołączania węzłów

Metoda dołączania węzłów jest to zaadaptowana do obliczeń sieci elektrycznych algebraiczna metoda odwracania macierzy przez rozszerzanie [13]. Macierzą odwracaną jest tu macierz admitancyjna węzłowa \mathbf{Y} analizowanej sieci.

Wspomniana pozycja - [13] zawiera wyprowadzenie podstawowych wzorów wyłącznie drogą rozważań matematycznych. W pracy [5] dokonano adaptacji omawianej metody do obliczeń zwarciowych. Nie zaproponowano tam jednak przejrzystej interpretacji systemowej, podobnej do tej, jaką ma metoda dołączania gałęzi.

Uważając za konieczne wypełnienie tej luki, autor przedstawił poniżej interpretację metody dołączania węzłów, przyjmując za podstawę znane z teorii obwodów własności macierzy admitancyjnych liniowych sieci pasywnych.

W analizowanej sieci n -węzłowej wyodrębniono grupę $s=m-1$ węzłów. Konsekwencją tego jest podział macierzy admitancyjnej na cztery podmacierze :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_S \\ \mathbf{I}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SW} \\ \mathbf{Y}_{SW}^t & \mathbf{Y}_{WW} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_S \\ \mathbf{U}_W \end{bmatrix} \quad /4.7/$$

gdzie: $w=n-s$

Przy założeniu, że wszystkie węzły od $s+1$ do n są boziopodancyjnie połączone z ziemią, na podstawie równania /4.7/ możemy zapisać:

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{Y}_{SS} \mathbf{U}_S \quad /4.8/$$

W rozważanej metodzie przyjmuje się, że na kolejnym etapie obliczeń dysponujemy macierzą odwrotną do \mathbf{Y}_{SS}

$$\mathbf{Z}_{SS} = \mathbf{Y}_{SS}^{-1}$$

Tzw. operacji rozszerzenia tej macierzy odpowiada likwidacja uziemienia węzła o numerze m . Równanie /4.7/ przyjmuje postać:

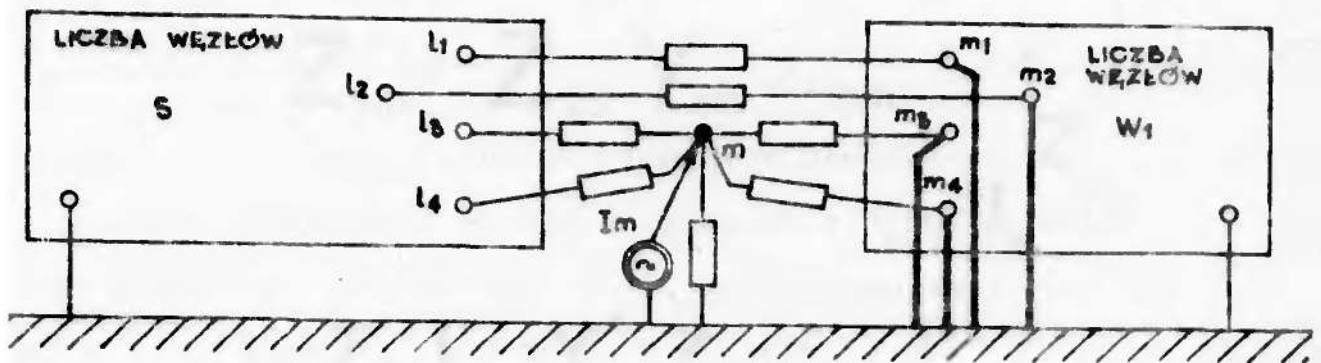
$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_m \\ I_{w1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ss} & Y_{sm} & Y_{sw1} \\ Y_{sm}^t & Y_{mm} & Y_{mw1} \\ Y_{sw1}^t & Y_{mw1}^t & Y_{w1w1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad /4.9/$$

gdzie; $w1=w-1$

Problem polega na obliczeniu odwrotności macierzy

$$\begin{bmatrix} Y_{ss} & Y_{sm} \\ Y_{sm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Z'_{ss} & Z_{sm} \\ Z_{sm}^t & Z_{mm} \end{bmatrix} \quad /4.10/$$

Ilustracją powyższych rozważań jest rys. 4.3



Rys. 4.3. Sieć opisana równaniem 4.9

Dla przykładowo zaznaczonych węzłów $/l_1, l_2, l_3, l_4/ < m$, $/m_1, m_2, m_3, m_4/ > m$, $s + w_1 + 1 = n$

Zakładając, że jedynym niezerowym prądem źródłowym występującym w rozważanej sieci jest prąd I_m , możemy na podstawie równania /4.9/ napisać :

$$0 = Y_{ss} U_s + Y_{sm} U_m \quad /4.11/$$

$$I_m = Y_{sm}^t U_s + Y_{mm} U_m$$

Korzystając z pierwszego równania otrzymujemy ostatecznie :

$$I_m = (Y_{mm} - Y_{sm}^t Y_{ss}^{-1} Y_{sm}) U_m \quad /4.12/$$

Na podstawie /4.12/ i znajomości Y_{ss}^{-1} możemy określić wyraz Z_{mm} poszukiwanej macierzy /4.10/

$$Z_{mm} = (Y_{mm} - Y_{sm}^t Z_{ss} Y_{sm})^{-1} \quad /4.13/$$

Utrzymując w mocy założenie, że $I_s = 0$ na podstawie /4.9/ /4.10/ możemy zapisać:

$$U_s = Z_{sm} \cdot I_m \quad /4.14/$$

wykorzystując możliwość wyznaczenia U_s z /4.11/ mamy:

$$Z_{sm} I_m = -Y_{ss}^{-1} Y_{sm} U_m \quad /4.15/$$

$$Z_{sm} = -Z_{ss} \cdot Y_{sm} \cdot Z_{mm}$$

W celu określenia wartości elementów podmacierzy Z'_{ss} zmieniono założenia dotyczące prądów źródłowych: $I_m = 0$, $I_s \neq 0$.

Na podstawie /4.9/ /4.10/ i /4.15/ otrzymujemy:

$$U_m = Z_{sm}^t I_s = -Y_{sm}^t \cdot Z_{ss} \cdot Z_{mm} \cdot I_s \quad /4.16/$$

$$I_s = Y_{ss} U_s + Y_{sm} \cdot U_m$$

Przekształcając drugie równanie ze względu na U_s i wykorzystując równanie pierwsze wyznacza się bezpośredni związek napięć U_s i prądów I_s :

$$U_s = (Z_{ss} + Z_{ss} Y_{sm} Y_{sm}^t Z_{ss} Z_{mm}) I_s$$

czyli:

$$Z'_{ss} = Z_{ss} + Z_{ss} Y_{sm} Y_{sm}^t Z_{ss} Z_{mm} \quad /4.17/$$

Stosując wyrażenia /4.13/ /4.15/ /4.17/ możemy zatem określić wszystkie wartości elementów macierzy /4.10/. Przeprowadzając

Kolejno likwidując doziomlon wszystkich węzłów określić można poszukiwaną macierz $Z = Y^{-1}$.

Wyznaczając liczbę działań, które należy wykonać w celu obliczenia wartości elementów macierzy /4.10/ zakładamy, że do sieci składającej się z $s = m-1$ węzłów dołączamy "nowy" węzeł m , powiązany z tą siecią przy pomocy p gałęzi. Dla uproszczenia obliczeń wprowadza się wektory:

$$\beta = Z_{ss} Y_{sm} ; \quad \beta^t = Y_{sm}^t Z_{ss} \quad /4.18/$$

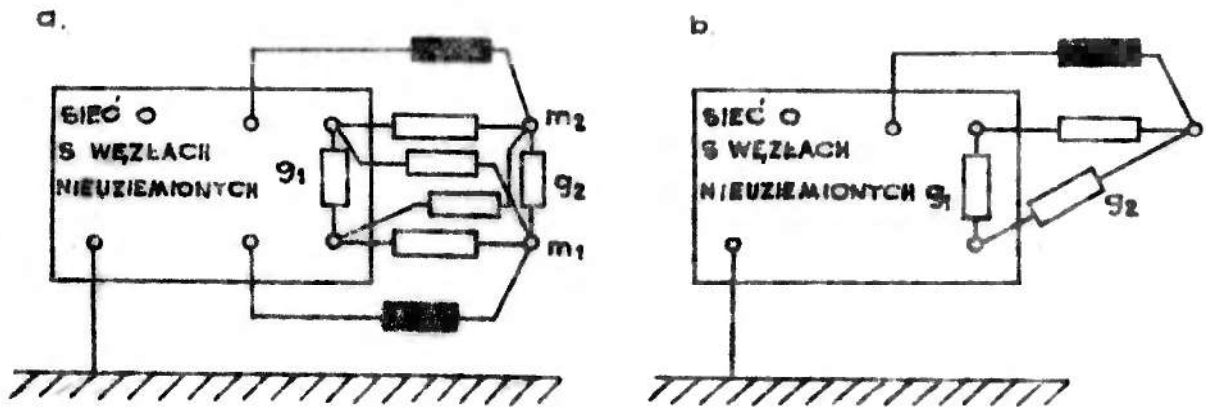
Wykonując powyższe mnożenie należy pamiętać, że zgodnie z definicją macierzy admittancyjnej węzłowej wektor Y_{sm} posiada tylko p elementów niezerowych. Dlatego, przyjmując taki sposób oprogramowania metody, który wyklucza mnożenie przez 0, liczba działań potrzebnych do obliczenia wektora β wynosi:

$$\begin{aligned} \text{dodawania:} & \quad /p-1/ \cdot s \\ \text{mnożenia:} & \quad p \cdot s \end{aligned}$$

Analizując wzory /4.13/ /4.15/ /4.17/ określamy całkowitą liczbę działań koniecznych do wykonania przy operacji dołączania węzła m :

$$\begin{aligned} \text{dodawania} & \quad p /s+1/ - 2s+2s^2 \\ \text{mnożenia/dzielenia} & \quad p /s+1/ + s^2+3s+1 \end{aligned}$$

Rozważając schemat zastępczy sieci elektroenergetycznej, w którym występuje sprzężenie pomiędzy torami, odwzorowane je przy pomocy modelu admittancyjnego. Założono dwa charakterystyczne przypadki usytuowania tworzących go gałęzi względem sieci o $s = m-1$ nieuziemionych węzłach - rys. 4.4



Rys. 4.4. Charakterystyczne przypadki usytuowania gałęzi sprzężonych względem sieci o s węzłach nieuziemionych. Jedna z gałęzi należy do tej sieci, zaś druga:
 a/ leży pomiędzy węzłami m_1, m_2 $/m_1, m_2/ > s$
 b/ leży pomiędzy węzłem o numerze s, a węzłem o numerze m $/m > s/$.

Analiza powyższych rysunków pozwala na stwierdzenie, że w przypadku a/ konieczne jest dodatkowo uwzględnienie dwóch gałęzi przy włączaniu węzła m_1 i dwóch przy włączaniu węzła m_2 . Wiąże się to z dodatkowymi działaniami:

dodawania/odejmowania	$4m+2$	$/4.19/$
mnożenia/dzielenia	$4m+2$	

Natomiast w przypadku b/ konieczne jest dodatkowo uwzględnienie jednej gałęzi.

Liczbę dodatkowych działań określamy jako:

dodawania/odejmowania	m	$/4.20/$
mnożenia/dzielenia	m	

Pomiędzy metodami dołączania węzłów i dołączania gałęzi istnieją pewne formalne podobieństwa. Praktyczna realizacja algorytmu dołączania węzłów zawiera szereg problemów podobnych do tych, które omówiono w p. 4.2.3. tj. uporządkowanie, operowanie częścią macierzy impedancyjnej, tworzenie zbioru węzłów aktualnie rozpatrywanych itp.

Mozliwe jest także wystąpienie wyrażeń nieoznaczonych.

4.2.5. Porównanie metod dołączania gałęzi i dołączania węzłów pod względem efektywności uwzględniania sprzężeń pomiędzy torami

Wstępne porównanie, dokonane na podstawie wyrażeń /4.4/ i /4.20/ wypada zdecydowanie na korzyść metody dołączania węzłów. Przeprowadzając dokładniejsze rozważania, nie można rozpatrywać zagadnienia uwzględniania sprzężeń w oderwaniu od całego procesu obliczania macierzy impedancyjnej. Jeżeli bowiem nawet uwzględnienie sprzężenia dla sieci m - węzłowej wymaga znacznie mniej obliczeń przy zastosowaniu metody dołączania węzłów, to przecież obliczenia poprzedzające tę operację mogą się okazać dla niej znacznie mniej efektywne. Powno naświetlenie tego problemu zawiera praca [5]. Na podstawie rozważań teoretycznych i obliczeń praktycznych podano tam liczbę 1.7 jako graniczną wartość stosunku liczby gałęzi $/B/$ do liczby węzłów $/n/$, powyżej którego metoda dołączania węzłów wymaga przeprowadzenia mniejszej ilości operacji arytmetycznych niż metoda dołączania gałęzi.

W rozdziale 2 przedstawiono przykłady sieci krajowych, dla których współczynnik $k = B/n$ przyjmuje wartości $1.6 \div 1.9$. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że krokiem poprzedzającym wprowadzenie modeli admitancyjnych do sieci ze sprzężeniami, jest wprowadzenie tzw. węzłów pozornych /rys. 2.2 - dokładniejsze omówienie p. 4.4/. Ponieważ wraz z wprowadzeniem $a = k_D \cdot n$ dodatkowych węzłów przybywa identyczna liczba gałęzi, otrzymuje się :

$$k' = \frac{B + a}{n + a} = 1 + \frac{B - n}{n + a} \quad /4.21/$$

Z kolei należy uwzględnić dodatkowo gałęzie wchodzące w skład schematów wielobokowych odwzorowujących sprzężenia. Przyjmując w przybliżeniu, że ich liczba zawiera się w przedziale $[a, 2a]$ otrzymujemy :

$$k' = 1 + \frac{B+B_{sd} - n}{n + a} = 1 + \frac{k+k_{sd} - 1}{1+k_d} \quad /4.22/$$

gdzie: k_d - współczynnik określający liczbę dodatkowych węzłów pozornych i związanych z nimi gałęzi

k_{sd} - współczynnik określający liczbę dodatkowych gałęzi wynikających z zastosowania schematów wielobokowych do odwzorowania sprzężeń

Wartości współczynnika k' określone dla różnych wartości współczynników k , k_s , k_{sd} przedstawiono poniżej.

Tablica 4.3

Wartości stosunku liczby gałęzi do liczby węzłów przy uwzględnieniu sprzężeń, dla różnych wartości współczynników k , k_s , k_d .

Dodatkowo gałęzie i węzły	$k_d = 0.05$		$k_d = 0.1$		$k_d = 0.2$		$k_d = 0.3$	
	$k_{sd} = 0.05$	$k_{sd} = 0.1$	$k_{sd} = 0.1$	$k_{sd} = 0.2$	$k_{sd} = 0.2$	$k_{sd} = 0.4$	$k_{sd} = 0.3$	$k_{sd} = 0.6$
Sieć pierwotna								
$k = \frac{B}{n}$	1.62	1.66	1.64	1.73	1.67	1.83	1.69	1.92
$k = \frac{B}{n}$	1.81	1.86	1.82	1.91	1.83	2.0	1.85	2.08

Mozemy zatem stwierdzić, że :

- dla typowych krajowych sieci elektroenergetycznych, w których występują sprzężone ze sobą tory, dokonanie wyboru pomiędzy metodą dołączania gałęzi i dołączania węzłów, winno być poprzedzone określeniem wartości wyrażenia /4.22/

- biorąc pod uwagę tendencje w budowie sieci elektroenergetycznych, postępujący wzrost stosunku liczby gałęzi do liczby węzłów, za bardziej przyszłościową należy uznać metodę dołączania węzłów
- bez względu na rodzaj stosowanej metody, opracowanie praktycznie stosowanego oprogramowania, wiąże się z rozwiązaniem całego szeregu problemów mających istotny wpływ na czas trwania obliczeń oraz ich dokładność i pewność.

4.2.6. Metody bezpośredniej inwersji macierzy admitancyjnej

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod rozwiązywania układów równań liniowych jest metoda dekompozycji trójkątnej. Przyjmując, że macierzą współczynników przy niewiadomych jest macierz admitancyjna węzłowa, otrzymujemy :

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU} \quad /4.23/$$

Podstawiając w miejsce wektora \mathbf{I} wektor $[0 \dots 1 \dots 0]^t$ /1 na pozycji k/ otrzymujemy po rozwiązaniu powyższego równania :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} Z_{1k} & Z_{2k} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{nk} \end{bmatrix} .$$

tj. wektor impedancji wzajemnych węzłów i-k oraz impedancję własną węzła k. Zmieniając kolejno położenie elementu niezerowego możemy otrzymać pełną macierz impedancyjną węzłową :

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1}$$

Metoda dekompozycji trójkątnej jest szeroko przedstawiona w literaturze np. [28], [33]. Jej zalety ujawniają się szczególnie przy umiejętnym wykorzystaniu niewielkiego stopnia wypełnienia /tj. stosunku liczby elementów niezerowych do liczby wszystkich elementów/ macierzy \mathbf{Y} . Dla rozpatrywanych sieci wynosi on odpowiednio :

- sieć testowa /rys. 2.2/ 4.9%; sieć testowa bez węzłów pozornych /rys. 2.1/ 6.3%
- system elektroenergetyczny PRL /220 i 400 kV/ 1.2%
- sieć ZEOPn 1.6%

Macierze tego typu /nawet do 30% wypełnienia/ noszą nazwę macierzy rzadkich. Wspomniana metoda była wielokrotnie doskonalona - [39]. Jednym z najbardziej efektywnych algorytmów, w którym została ona wykorzystana jest algorytm Zollenkopfa - [43], gdzie stosuje się jej odmianę tzw. bifaktoryzację.

Bifaktoryzacja polega na określeniu rozwiązania równania /4.23/ po dokonaniu rozkładu macierzy Y :

$$U = R^1 R^2 \dots R^{n-1} L^n L^{n-1} \dots L^1 \cdot I \quad /4.24/$$

Czynniki R^i, L^i dzięki swojej strukturze mogą być zapisane w miejscu zajmowanym poprzednio przez wiersze i kolumny macierzy Y , dzięki czemu oporuje się cały czas macierzą kwadratową / $n \times n$ /. Można zatem wyodrębnić dwa charakterystyczne etapy omawianej metody:

- rozkład macierzy Y na czynniki R^i i L^i
- wykonanie mnożenia określonego równaniem /4.24/

Pierwszy etap winien być przeprowadzony w sposób optymalny tzn. taki, aby suma pozadiagonalnych elementów niezerowych wszystkich czynników R^i, L^i osiągnęła minimalny przyrost w stosunku do ilości pozadiagonalnych elementów niezerowych macierzy Y .

Zwiększanie się liczby elementów niezerowych w trakcie procesu obliczeniowego, uniemożliwia określenie liczby działań koniecznych do wykonania. Możemy jedynie zapisać nierówności:

- liczba mnożeń i dodawań :

$$I_{\text{m}} \geq (n-1) \sum_{i=1}^{n-1} I_i^0 - \sum_{j=1}^{n-1} \left(\sum_{i=1}^j I_i^0 \right) + \frac{1}{2} (n-1) \cdot n$$

- liczba dzielen :

$$l_{dz} \geq n + \sum_{i=1}^{n-1} l_i^0$$

gdzie l_i^0 oznacza liczbę elementów niezerowych macierzy Y w kolumnie i , w wierszach o wskaźniku większym od i .

Przedstawiony algorytm jest wykorzystywany w programach obliczeń zwarciowych opracowanych w IASE- [37] i ZEPd-[10].

W kontekście rozważań prowadzonych nad uwzględnianiem w obliczeniach sprzężeń pomiędzy torami zauważamy, że po wprowadzeniu do schematu sieci dla składowej zerowej dodatkowych gałęzi wynikających z zastosowania schematu wielobokowego, zwiększa się stopień wypełnienia macierzy Y . Wykorzystując opracowany wraz z pracownikami Ośrodka Obliczeniowego Politechniki Łubelskiej program rozwiązywania układów równań liniowych o rzadkiej strukturze macierzy współczynników - [21], autor zbadał to zagadnienie dla sieci testowej.

Wyniki obliczeń przedstawia tabl. 4.4.

Tablica 4.4

Zestawienie wartości charakterystycznych parametrów związanych z procesem obliczania macierzy impedancyjnej sieci testowej, przy pomocy programu E410- [21], wg metody bifaktoryzacji.

Parametr	Symbol	Wartość	
		Sieć testowa bez sprzężeń	Sieć testowa ze sprzężeniami
liczba węzłów	n	67	67
liczba gałęzi	b	113	171
połowa niezerowych elementów pozadiagonalnych macierzy admittancyjnej przed rozkładem trójkatnym	m	77	135

1	2	3	4
połowa niezerowych elementów pozadiagonalnych macierzy admittancyjnej po rozkładzie trójkątnym	m_r	128	213
Stosunek $\frac{m_r}{m}$	k_r	166	158
Czas rozkładu trójkątnego	t_r [s]	22	37
Czas rozwiązania dla jednego węzła /jeden wiersz macierzy impedancyjnej/	t_n [s]	3	4

Analiza powyższych wyników pozwala na stwierdzenie, że dla sieci testowej rozpatrywana metoda zachowuje swoje zdolności optymalizujące obliczenia. Przejawia się to na utrzymaniu na niezmiennym poziomie, a nawet nieznacznym zmniejszeniu się wartości parametru k_r . Tym nie mniej wzrost czasu obliczeń wywołany wzrostem liczby gałęzi jest znaczący. Dla sieci o znacznej liczbie sprzężonych ze sobą torów, autorzy amerykańscy - [40] przewidują znaczne ograniczenie możliwości wykorzystania rzadkiej struktury macierzy admittancyjnej. Również fakt, że po wprowadzeniu modeli wielobokowych do schematu sieci zerowej macierz ta przestaje być macierzą diagonalnie dominującą, daje ujemne skutki w postaci wzrostu błędów obliczeniowych.

4.3. Uogólniona metoda dołączania gałęzi

4.3.1. Zależności podstawowe

Poszukując innych, bardziej efektywnych metod uwzględniania sprzężeń pomiędzy torami linii elektroenergetycznych w obliczeniach zwarciovych, w niniejszej pracy podjęto próbę uogólnienia metody dołączania gałęzi. O możliwość takiego uogólnienia wspomina literatura zagraniczna - [35]. Zgodnie z p. 4.2.2 na pewnym etapie obliczeń macierzy impedancyjnej analizowanej sieci, do jej podsieci o k węzłach i b gałęziach zostaje dołączona gałąź $b+1$. Niniejsze uogólnienie polega na tym, że zakłada się możliwość istnienia sprzężenia tej gałęzi z gałęzią należącą do podsieci b - węzłowej. Prądy i napięcia tych gałęzi związane są ze sobą zależnością:

$$\begin{bmatrix} U_{pq} \\ U_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{pq} & Z_M \\ Z_M & Z_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pq} \\ I_{ij} \end{bmatrix} \quad /4.26/$$

gdzie:

p, q węzły gałęzi $b+1$ /przyjęto, że $p \leq k, q \leq k/$

i, j węzły gałęzi sprzężonej z gałęzią $b+1$

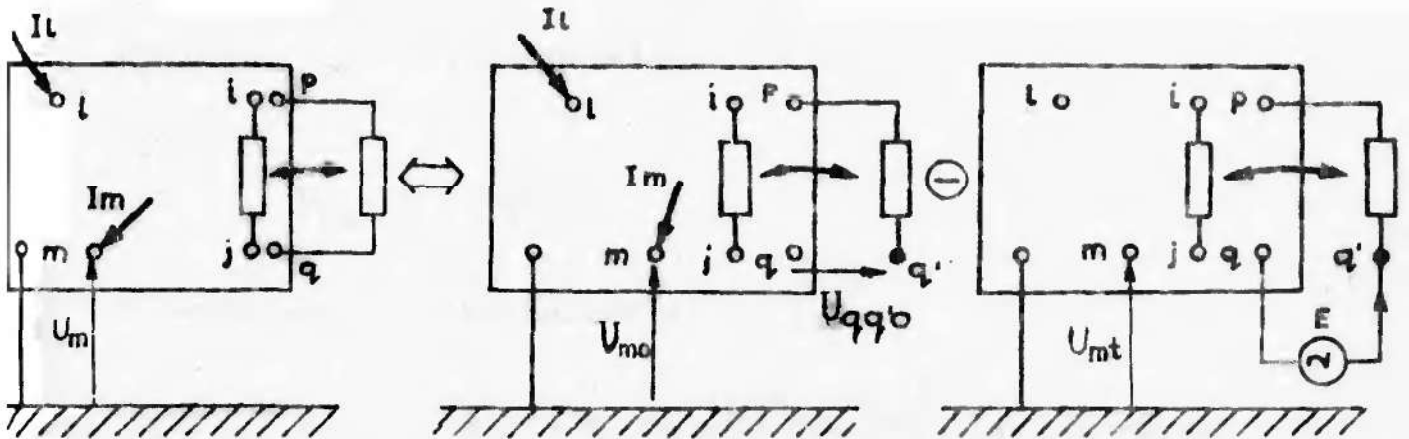
Z_{pq}, Z_{ij}, Z_M elementy macierzy impedancyjnej gałęziowej
/por p. 3.3/

Celem rozwiązań jest określenie zmian wartości impedancji własnych i wzajemnych węzłów podsieci k węzłowej, wywołanych włączeniem gałęzi $b+1$. Rozwiązanie zagadnienia otrzymujemy stosując zasadę superpozycji, a dokładniej twierdzenie Thevenina.

Dla ustalenia uwagi wybieramy w sieci k węzłowej dwa dowolne węzły $/1, m/ \leq k$. W celu znalezienia zależności między prądami

i napięciami w tych węzłach rozpatrujemy, zgodnie z twierdzeniem Thevenina dwa stany pracy sieci:

- gałąź "nowa" jest przzerwana tuż przy węźle q /stan jałowy - wszystkie napięcia z indeksem $o/$,
- prądy węzłowe sieci są równe 0, zaś w miejscu przzerwania gałęzi "nowej" włączona jest siła elektromotoryczna o wartości wynikającej z napięcia stanu jałowego /wszystkie napięcia z indeksem $t/$. Ilustracją powyższych rozważań jest rys. 4.5, gdzie zastosowanie zasady superpozycji pokazano w sposób obrazowy, używając znaków działań.



Rys. 4.5. Dołączenie do sieci k węzłowej "nowej" gałęzi $p-q$ sprzężonej z gałęzią "starą" $i-j$ - ilustracja zastosowania twierdzenia Thevenina.

Wprowadzony na rys. 4.5 węzeł q' jest węzłem pomocniczym. Pomędzy zaznaczonymi na tym rysunku prądami i napięciami zachodzą następujące zależności:

$$U_m = U_{mo} - U_{mt}$$

$$U_{mt} = Z_{/qq'}/m I_{q'p} \quad /4.27/$$

$$U_{mo} = Z_{m1} I_1$$

$$E = U_{qq'o} = Z_{/qq'}/I_{q'p}$$

Wyznaczenie $Z_{/qq'}/m$ odbywa się przy założeniu, że wszystkie prądy węzłowe oprócz I_m są równe 0 /również $I_1/$. Przypadek taki nie jest uwidoczniiony na rys. 4.5. Zachodzi zależność:

$$U_p - U_q = U_{pq'} + U_{qq'o} \quad /4.28/$$

Ponieważ $I_{pq'} = 0$, na podstawie /4.26/ :

$$U_{pq'} = - \frac{Y_M U_{ij}}{Y_{pq}}$$

Po wykonaniu przekształceń :

$$U_{q'qo} = \left[Z_{pm} - Z_{qm} + \frac{Y_M (Z_{im} - Z_{jm})}{Y_{pq}} \right] \cdot I_m \quad /4.29/$$

Równanie /4.29/ określa związek pomiędzy napięciem $U_{q'q'o}$, a prądem I_m , przy zastrzeżeniu, że wszystkie pozostałe prądy są równe 0. Możemy zatem traktować wyrażenie w nawiasach jak impedancję wzajemną pomiędzy parą węzłów qq' i węzłem m . Zgodnie z zasadą wzajemności, gdy będziemy szukać związku pomiędzy napięciem węzła m i prądem płynącym od węzła q do q' , możemy wykorzystać tę samą impedancję wzajemną. Mamy zatem:

$$U_{mt} = \left[Z_{pm} - Z_{qm} + \frac{Y_M (z_{im} - z_{jm})}{Y_{pq}} \right] I_{q'p} \quad /4.30/$$

$$Z_{/qq'/m} = Z_{pm} - Z_{qm} + \frac{Y_M (z_{im} - z_{jm})}{Y_{pq}}$$

Podstawiając za m numery wszystkich węzłów sieci otrzymujemy wektor ich impedancji wzajemnych z parą /qq'/.

Impedancja $Z_{/qq'//qq'}$ jest impedancją wejściową sieci od strony węzłów q'q, przy czym wszystkie prądy węzłowe są równe 0.

Zachodzi zależność :

$$U_p - U_q = U_{pq'} + E \quad /4.31/$$

na podstawie znajomości $Z_{/qq'/m}$, przyjmując $m = p, q, i, j$ oraz biorąc pod uwagę /4.26/ otrzymuje się :

$$\begin{aligned} E &= (Z_{/qq'/p} - Z_{/qq'/q}) \cdot I_{q'p} - U_{pq'} = \\ &= \left[Z_{/qq'/p} - Z_{/qq'/q} + \frac{1+Y_M (Z_{/qq'/i} - Z_{/qq'/j})}{Y_{pq}} \right] \cdot I_{q'p} \end{aligned}$$

ostatecznie więc :

$$Z_{/qq'//qq'} = \frac{E}{I_{q'p}} = Z_{/qq'/p} - Z_{/qq'/q} + \frac{1+Y_M (Z_{/qq'/i} - Z_{/qq'/j})}{Y_{pq}} \quad /4.32/$$

Ujmując wyniki powyższych rozważań w postaci macierzowej otrzymuje się :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_m \\ U_k \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1m} & \dots & Z_{1k} & -Z_{1/qq'} \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mm} & \dots & Z_{mk} & -Z_{m/qq'} \\ Z_{k1} & \dots & Z_{km} & \dots & Z_{kk} & -Z_{k/qq'} \\ -Z_{/qq'/1} & \dots & -Z_{/qq'/m} & \dots & -Z_{/qq'/k} & Z_{/qq'//qq'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_m \\ I_k \\ I_{q'p} \end{bmatrix} \quad /4.33/$$

Eliminując prąd $I_{q'p}$ mamy :

$$\underline{Z}_k^{b+1} = \underline{Z}_k^b - \frac{1}{Z_{(qq')(qq')}} \begin{bmatrix} Z_{1(qq')} \\ \vdots \\ Z_{k(qq')} \end{bmatrix} [Z_{(qq')1} \cdots Z_{(qq')k}] \quad /4.34/$$

Wyrażenie /4.34/ wraz z /4.32/ i /4.30/ stanowi rozwiązanie postawionego na początku problemu. Rozumując w podobny sposób można rozważyć przypadek, gdy tylko węzeł $p \leq k$ zaś $q > k$ /jest węzłem "nowym"/

$$\underline{Z}_{k+1}^{b+1} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_k^b & \begin{matrix} Z_{1q} \\ \vdots \\ Z_{kq} \end{matrix} \\ \hline Z_{q1} \cdots Z_{qk} & Z_{qq} \end{bmatrix} \quad /4.35/$$

gdzie: $Z_{kq} = Z_{qk} = \frac{Y_M(Z_{ik} - Z_{jk})}{Y_{pq}} + Z_{kp}$

$$Z_{qq} = \frac{1 + Y_M(Z_{ik} - Z_{jk})}{Y_{pq}} + Z_{pp}$$

Podstawiając do wyrażeni /4.33/ i /4.34/ $Y_M = 0$ oraz $Y_{pq} = 1/Z_{pq}$ otrzymamy wyrażenia o postaci takiej samej jak /4.2/ i /4.3/, co świadczy o ogólnym charakterze przeprowadzonych rozważań. Bilans dodatkowych działań wynikających z istnienia sprzężeń, w porównaniu z bilansem z p. 4.2.1 przedstawia się następująco:

- przyłączenie gałęzi promieniowej sprzężonej

dodawania/odejmowania	$2k+2$	
mnożenia/dzielenia	$k+3$	/4.35/

- przyłączenie gałęzi oczkowej sprzężonej

dodawania/odejmowania	$2k+2$
mnożenia/dzielenia	$k+2$

Powyższe wyniki w porównaniu z bilansem dodatkowych działań przedstawionym w p. 4.2.1 świadczą o znacznej efektywności uogólnionej metody dołączania gałęzi. Ponieważ jednak, jak stwierdzono poprzednio, ostateczną przydatność rozważanego algorytmu można ocenić dopiero po jego praktycznym wdrożeniu, podjęto próbę stworzenia programu obliczeń zwarciovych wg tej metody.

4.3.2. Praktyczna realizacja programu wykorzystującego uogólnioną metodę dołączania gałęzi

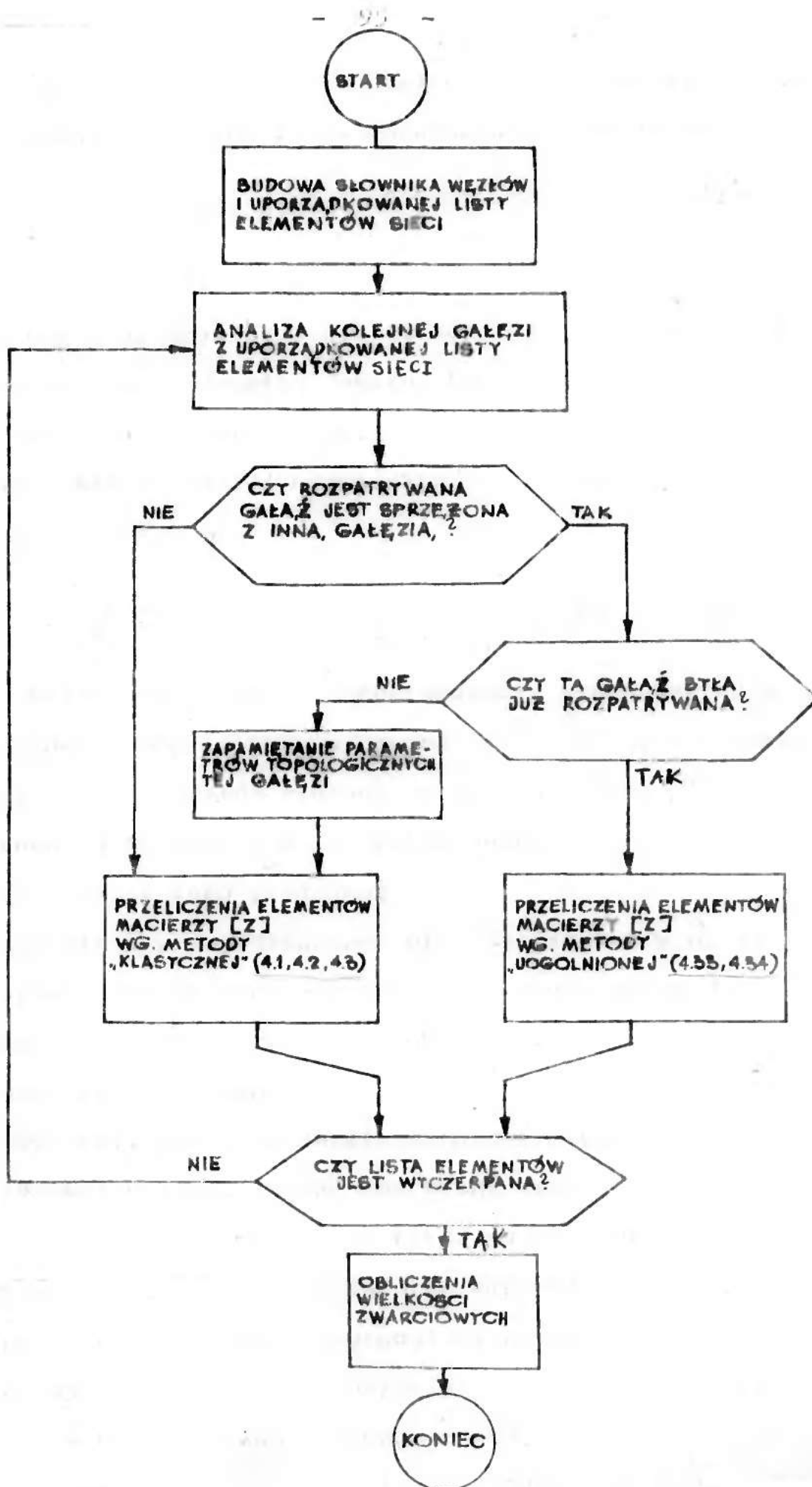
Praktyczna realizacja programu wykorzystującego uogólnioną metodę dołączania gałęzi jest w rzeczywistości bardziej skomplikowana niż wynika to ze schematu blokowego przedstawionego na rysunku 4.6. Wiąże się to z koniecznością dostosowania niniejszej metody do przebiegu procesu obliczeniowego mającego miejsce w programach "rodziny" ZW, które posłużyły za podstawę utworzenia nowego programu ZW1M.

Przed przeprowadzeniem właściwych operacji dołączania gałęzi sieci, należało dokonać ich symulacji pozwalającej na odpowiednie uporządkowanie par sprzężonych ze sobą elementów.

Wymieniony w p. 4.2.3 warunek /4.6/ przynależności do zbioru węzłów aktualnie rozpatrywanych $\{Z_A\}$ należało rozszerzyć do postaci:

$$\left(m \in \{Z_A\} \right) \Leftrightarrow \left(m \in \{A_k\} \wedge \left(\bigvee_{i=b+1}^B : \left(p_{i=m} \vee q_{i=m} \right) \right) \right) \vee \left(m \in \{A_k\} \wedge m \in \{T_z\} \right) \quad /4.36/$$

$\{T_z\}$ jest tzw. zbiorem węzłów zatrzymanych tj. takich, które są końcami gałęzi sprzężonych przyłączanych jako "pierwsze" w danej parze, dla których gałęzie "drugie" nie zostały jeszcze przyłączone.



Rys. 4.9. Uproszczony schemat blokowy programu SWM.

W celu określenia związku pomiędzy odpowiednimi końcami sprzężonych ze sobą torów wprowadza się oznaczenie:

$$\begin{aligned} p_I & R p_{II} \\ q_I & R q_{II} \end{aligned} \quad /4.37/$$

gdzie p_I , q_I oraz p_{II} , q_{II} są węzłami końcowymi odpowiednio pierwszej bądź drugiej /według kolejności dołączania do sieci/ gałęzi układu dwutorowego.

Wykorzystując /4.37/ można określić warunek przynależności węzła do zbioru $\{T_z\}$:

$$\left(m \in \{T_z\} \right) \Leftrightarrow \left(m \in \{A_k\} \wedge \bigvee_{l=b+1 \dots B} : \left(p_I R m \vee q_I R m \right) \right) \quad /4.38/$$

Na skutek konieczności oprogramowania wymienionych powyżej zależności, opracowany w ramach niniejszej pracy program ZWIM jest nieco bardziej złożony od programu ZW1- [16]. Jednakże rozbudowa ta jest w pełni rekompensowana przez wymienione poniżej zalety tego programu:

- zgodnie z przewidywaniami przedstawionymi w p. 4.3.1 zmniejszenie liczby koniecznych do wykonania operacji arytmetycznych znacznie skraca czas obliczeń. Dla sieci testowej bez sprzężeń obliczanie tablicy splotów prądów zwarcia trwa 200 sek., zaś przy uwzględnieniu sprzężeń 284 sek. /wzrost o 42%/. Biorąc pod uwagę wzrost czasu obliczeń przy uwzględnianiu sprzężeń i wykorzystaniu programu ZW1, wynoszący aż 375%, ta zaleta programu ZWIM staje się wyraźna.
- analizując przebieg operacji włączania gałęzi oczkowej stwierdzamy, że dla sieci rzeczywistych nie jest możliwe wystąpienie w niej wyrażeń nieoznaczonych. Mianownik wyrażenia /4.34/ nie może przyjąć wartości zero, gdyż jego fizyczny odpowiednik

/Impedancja wejściowa sieci od strony węzłów $q-q'$ / nie osiągnie nigdy tej wartości, jeśli jej elementy będą odpowiadały elementom rzeczywistej sieci elektroenergetycznej.

- również w oparciu o analizę wspomnianego wyrażenia stwierdzamy, że proces obliczania macierzy impedancyjnej dla składowej zerowej jest dla tej metody procesem stabilnym, to znaczy takim, że gałęziom o dużych reaktancjach /czyli małych admittancjach/ odpowiadają małe zmiany wartości elementów obliczanej macierzy. W konsekwencji błędy w bilansowaniu się prądów wg. I prawa Kirchhoffa są takie same jak dla sieci bez sprzężeń /nie przekraczają 0,07%/.

- każdy stosowany w praktyce program obliczania wielkości zwarciowych powinien posiadać możliwość uwzględnienia w obliczeniach zmian w strukturze analizowanej sieci. Gdyby dla odwzorowania sprzężenia pomiędzy gałęziami $/p,q/$ oraz $/i,j/$ użyto modelu sześciobokowego, wyłączenie w sieci rzeczywistej linii p,q musiałoby się wiązać z dokonaniem wyłączeń wszystkich 6 gałęzi, tworzących ten model, a następnie z włączeniem pomiędzy węzły $/i,j/$ gałęzi o impedancji Z_{i-j} . Oporowanie

modelem fizycznym układu sprzężonych ze sobą torów, które ma miejsce w uogólnionej metodzie dołączania gałęzi pozwala na dokonanie tej operacji w bardzo prosty sposób, polegający na włączeniu równoległo z gałęzią Z_{p-q} gałęzi $/-Z_{p-q}/$.

W związku z powyższym :

$$I_{pq} = 0$$

$$U_{ij} = Z_{i-j} I_{ij} + Z_M I'_{pq} - Z_M I''_{pq} = Z_{i-j} I_{ij}$$

gdzie $/I'_{pq} = I''_{pq}/$ są prądami płynącymi odpowiednio przez gałęzie o impedancjach Z_{p-q} oraz $-Z_{p-q}$. Powyższe równania odpowiadają oczywiście stanowi, w którym pomiędzy węzłami $p-q$ istnieje przerwa.

Uogólniona metoda dołączania gałęzi ma jednakże pewne wady. Ujawniają się one, gdy rozpatruje się układy o liczbie torów większej niż 2. Nie można w takim przypadku zastosować jednego modelu tak jak dla zwykłej metody dołączania gałęzi /np. model wielobokowy dla układu 4 torów liczący 28 gałęzi/. Wykorzystując uogólnioną metodę dołączania gałęzi należy w takim przypadku przygotować aż trzy modele /układów 2,3,4 torów/ i kolejno je wykorzystywać. Uwzględnienie takich operacji wpłynęłoby na konieczność istotnej rozbudowy programu.

Podsumowując rozważania dotyczące teoretycznych i praktycznych aspektów przedstawionej w niniejszej pracy uogólnionej metody dołączania gałęzi, stwierdzić można, że dzięki "fizycznemu" podejściu do zagadnienia modelowania linii sprzężonych, jest ona bardziej efektywna od stosowanych dotychczas metod obliczeń warunków zwarciovych, o ile rozważa się sieci o dużej liczbie takich linii.

4.4. Dalsze modyfikacje metod dołączania gałęzi

4.4.1. Zabezpieczenie procesu obliczeniowego przed możliwością występowania wyrażeń nieoznaczonych

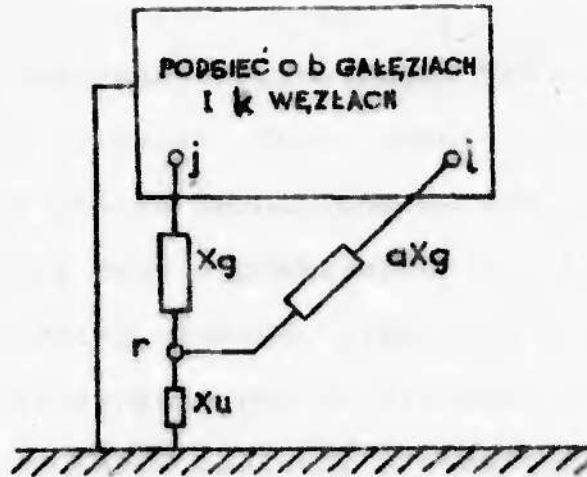
Azkołwiek najwięcej wad spośród przedstawionych metod ma metoda dołączania gałęzi, to jest ona w praktyce najbardziej rozpowszechniona. Wynika to z jej prostoty, łatwości przygotowania danych, dużej szybkości obliczeń / w przypadku sieci o małej liczbie sprzężonych ze sobą linii/ oraz z walorów użytkowych programów, w których jest ona wykorzystywana. Ujawnione w wyniku niniejszych rozważań jej wady uwidoczniające się wzrostem czasu obliczeń i zmniejszeniem ich dokładności, w przypadku analizy sieci o dużej liczbie sprzężonych

zo sobą torów, nie są oczywiście aż tak istotne, aby negować cały szereg tych zalet. Wydaje się jednak, że możliwość wystąpienia w procesie obliczeniowym wyrażeń nieoznaczonych nie może mieć miejsca w wykorzystywanym w praktyce oprogramowaniu. Dlatego też poniżej przedyskutowano propozycję zabezpieczenia procesu obliczeniowego przed wystąpieniem takiej ewentualności. Jak wspomniano w p. 4.2.3 niebezpieczeństwo wystąpienia wyrażeń nieoznaczonych zachodzi podczas operacji dołączania do podsieci o b gałęziach i k węzłach kolejnej gałęzi oozkowej. Bezpośrednio przyczynia się do tego fakt, że niektóre gałęzie wchodzące w skład schematów wielobokowych odwzorowujących układy torów sprzężonych mają ujemne reaktancje. Poniżej rozpatrzono rozważaną już w p. 4.2.2 podsieć z wyróżnionymi węzłami i oraz j. Zależności pomiędzy nimi opisuje macierz impedancyjna węzłowa /dokładnie biorąc jest to macierz reaktancyjna, ponieważ nie uwzględniamy przy jej obliczaniu rezystancji elementów systemu/ :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{jj} & X_{ji} \\ X_{ij} & X_{ii} \end{bmatrix} \quad /4.38a/$$

Dołączenie gałęzi o reaktancji X_g /rys. 5.1/ $/X_g > 0/$ do węzła j oraz utworzenie nowego węzła r powoduje zwiększenie wymiaru tej macierzy:

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} X_{jj} & X_{ji} & X_{jj} \\ X_{ij} & X_{ii} & X_{ij} \\ X_{jj} & X_{ji} & X_{jj} + X_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{jj} & X_{ji} & X_{rj} \\ X_{ij} & X_{ii} & X_{ri} \\ X_{rj} & X_{ri} & X_{rr} \end{bmatrix} \quad /4.38$$



Rys. 4.7. Podsieć o k węzłach i b gałęziach z wyróżnionymi węzłami j oraz i. Reaktancja $aX_g < 0$, reaktancja $X_u \ll X_g$ jest reaktancją uziemiającą

Próba włączenia pomiędzy węzły r oraz i, gałęzi o reaktancji $a \cdot X_g$ zakończy się niepowodzeniem /wystąpienie dzielenia przez 0/ jeżeli spełnione będzie równanie /por 4.3.2/:

$$X_{rr} + X_{ii} - 2X_{ir} + a \cdot X_g = 0$$

po przekształceniach, przy uwzględnieniu /4.38b/

$$X_{jj} + X_{ii} - 2X_{ij} + \frac{1}{a+1} X_g = 0 \quad /4.39/$$

Dla sieci, w których wszystkie reaktancje są dodatnie, na podstawie analizy wzorów /4.1/, /4.2/, /4.3/ stwierdzamy, że

$$(i, j) \in \{A_k\} : (X_{jj} > X_{ij}) \wedge (X_{ii} > X_{ij})$$

więc równanie /4.39/ nie ma rozwiązań dla $a \geq -1$.

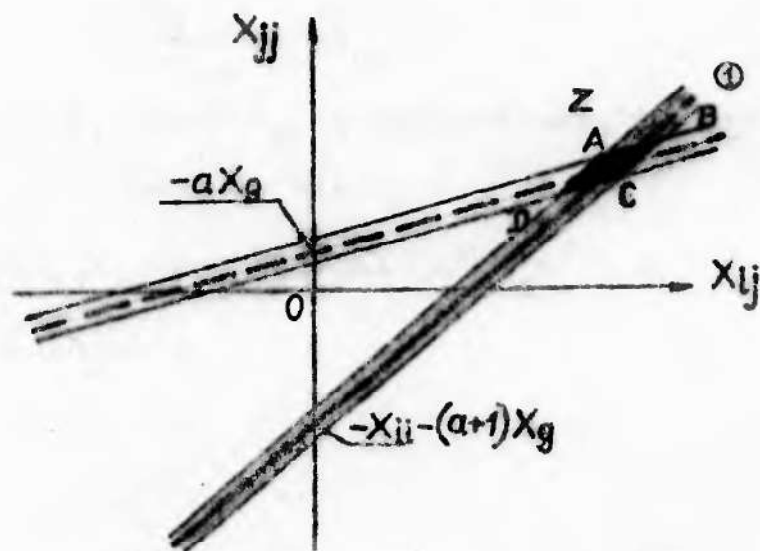
Na podstawie rozważań dotyczących modeli wielobokowych

/p. 3.3.3/ wiadomo jednak, że istnieje możliwość $a < -1$,

w schematach zastępczych sieci zawierających układy wielotorowe

W równaniu /4.39/ występują trzy zmienne X_{ii} , X_{jj} , X_{ij} . Aby uniknąć prowadzenia rozważań w przestrzeni trójwymiarowej potraktowano X_{ii} jako parametr. Zbiór punktów spełniających równanie /4.39/ tworzy prostą^① zaznaczoną na rys. 4.8.

Pojęcie nieoznaczoności jest w praktycznej realizacji algorytmu dołączania gałęzi bardziej złożone. Większość programów stosowanych do obliczeń sieciowych operuje liczbami całkowitymi, w celu zwiększenia rozmiarów macierzy mieszczących się w pamięci operacyjnej emc i skrócenia czasu obliczeń. Używane liczby całkowite nie mogą jednakże pochodzić spoza przedziału $\langle -8388607; +8388607 \rangle$. Dlatego faktycznym zbiorem punktów, dla których następuje zakłócenie procesu obliczeniowego jest pas /Rys. 4.8./. Podczas przeprowadzania w ramach niniejszej pracy analiz programów "rodziny" ZW stwierdzono, że powyższe rozważania znajdują praktyczne potwierdzenie /np. dla sieci testowej/. Dlatego też autor podjął próbę wprowadzenia numerycznego zabezpieczenia procesu obliczeniowego przed możliwością wystąpienia nieoznaczoności.



Rys. 4.8. Płaszczyzna $X_{ij}OX_{jj}$ z zaznaczonymi zbiorami punktów dla których możliwe jest wystąpienie nieoznaczoności w procesie obliczeniowym;

pas na płaszczyźnie /przed zastosowaniem zabezpieczenia numerycznego/,

czworokąt ABCD /po zastosowaniu zabezpieczenia numerycznego/.

Polega ono na połączeniu z ziemią węzła r w przypadku stwierdzenia, że X_{ii} , X_{jj} , X_{ij} , X_g , a spełniają równanie /4.39/. Przyjmując, że wartość reaktancji uziemiającej X_u jest ok. 1000 razy mniejsza od wartości elementów macierzy /4.38/, można określić ich wartości po wykonaniu operacji doziemienia:

$$X'' = \begin{bmatrix} X_{jj} - \frac{X_{jj}^2}{X_{jj} + X_g} & ; & X_{ji} - \frac{X_{jj} \cdot X_{ij}}{X_{jj} + X_g} & ; & 0 \\ X_{ij} - \frac{X_{jj} \cdot X_{ij}}{X_{jj} + X_g} & ; & X_{ii} - \frac{X_{ij}^2}{X_{jj} + X_g} & ; & 0 \\ 0 & & 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad /4.40/$$

Po dokonaniu tej operacji podejmuje się powtórnie próbę włączenia gałęzi o reaktancji $a \cdot X_g$ pomiędzy węzły /r, i/. W celu zbadania wykonalności tej operacji należy rozpatrzyć równanie:

$$X_{jj} - \frac{X_{ij}^2}{X_{ii} + X_g} + aX_g = 0 \quad /4.41/$$

Przyjmując, że X_{ii} oraz X_g są parametrami, biorąc pod uwagę równanie /4.39/ otrzymuje się:

$$X_{jj}^2 + X_{ij}^2 - 2X_{ij}X_{jj} - 2aX_gX_{ij} + 2aX_{jj}X_g + X_g^2a^2 = 0 \quad /4.42/$$

Po przekształceniach:

$$X_{jj} = X_{ij} - aX_g$$

Jedynym punktem spełniającym równanie /4.41/ i /4.42/ jest uwidoczniiony na rys. 4.8 punkt Z. Porównując współczynniki kierunkowe zaznaczonych na tym rysunku prostych, stwierdzamy, że nawet doziemienie węzła r nie stanowi zupełnego zabezpieczenia przed wystąpieniem nieoznaczoności przy dołączeniu gałęzi /r,i/. Jednakże, praktycznie rzecz biorąc, operacja taka, znacznie ogranicza zbiór punktów "zagrożonych" redukując go od pasa pomiędzy prostymi do otoczenia punktu Z. Istnieją oczywiście sposoby dalszego eliminowania możliwości wystąpienia wyrażeń nieoznaczonych, ale wiąże się to z rozbudowywaniem programu. W ramach niniejszej pracy na bazie stosowanego w praktyce programu ZW1 uruchomiono program ZW1Z w którym wprowadzono omawiane zabezpieczenie numeryczne. Realizacja tego zadania wymagała opracowania dodatkowych operacji mających na celu "zatrzymanie" węzła doziemionego przez reaktancję X_u w zbiorze węzłów aktualnie rozpatrywanych / $\{Z_A\}$ /por p. 4.2.3/, aż do końca procesu obliczania macierzy reaktancyjnych. Następnie konieczne było przeprowadzenie automatycznej likwidacji doziemienia przez włączenie równoległe z gałęzią o reaktancji X_u gałęzi o reaktancji $/-X_u/$. Powoduje to pewien wzrost czasu obliczeń, którego rekompensatę stanowi ich poprawność i uniknięcie niebezpieczeństwa wystąpienia wyrażeń nieoznaczonych.

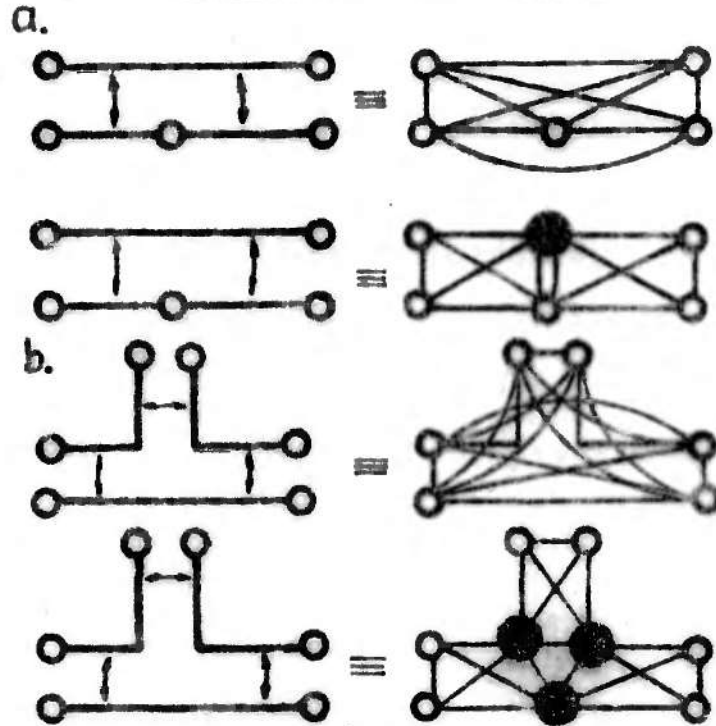
4.4.2. Analiza celowości wprowadzania do schematów zastępczych sieci tzw. "węzłów pozornych"

W tekście niniejszej pracy kilkakrotnie używano terminu "węzły pozorne". Ogólnie biorąc terminu takiego używa się, jeżeli do schematu zastępczego sieci wprowadza się węzeł nie mający w rzeczywistej sieci odpowiednika w postaci szyn stacji elektroenergetycznej, bądź punktu rozgałęzienia w rozdzielni bezszynowej.

W przeprowadzonych rozważaniach wzięły także wprowadzanie w celu wyodrębnienia szóstobokowych modeli odcinków linii dwutorowych. Mówiąc bardziej precyzyjnie, dokonywano takiego podziału sieci, aby dla danego elementu istniał co najwyżej jeden element z nim sprzężony. Analiza sieci testowej /rys. 2.1, 2.2/ wskazuje na to, że w praktyce jedna linia /np. linia 2-11/ może być sprzężona równocześnie z kilkoma liniami /linie: 2-4, 4-6, 5-7, 8-11/, przy czym liczba sprzężonych ze sobą torów nie przekracza w warunkach krajowych liczby 2. Macierz impedancyjna gałęziowa takiego układu torów tym różni się od macierzy impedancyjnej układu wielotorowego, który rozumiemy jako układ N sprzężonych ze sobą torów na zasadzie "każdy z każdym", że mogą wystąpić w niej elementy zerowe. Omawiane układy nazwano w niniejszej pracy układami dwutorowymi wielokrotnie sprzężonymi, przy czym jako krotność sprzężenia przyjmuje się maksymalną liczbę odcinków linii, z którymi jest sprzężony dany odcinek. W przedstawionym powyżej przypadku wynosi ona 4. Przykłady najprostszych układów dwutorowych dwukrotnie sprzężonych ukazują rys. 4.8. Struktura macierzy impedancyjnych gałęziowych tych układów widoczna jest poniżej:

$$\begin{array}{ccc} A & C_1 & C_2 \\ C_1 & B_1 & 0 \\ C_2 & 0 & B_2 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} A & C_1 & C_2 \\ C_1 & B_1 & C_3 \\ C_2 & C_3 & B_2 \end{array}$$

Dla przypadku b. nie różni się ona od struktury macierzy dla przypadku "klasycznego" układu 3-torowego.



Rys. 4.8. Najprostsze układy dwutorowe 2-krotnie sprzężone i ich schemata zastępcze otrzymane bez wprowadzania węzłów pozornych bądź przy ich wykorzystaniu.

Dokonanie inwersji macierzy impedancyjnej gałęziowej, a następnie stworzenie modeli wielobokowych /tu: dla 3 torów - model 15-bokowy, zgodnie z 3.3.3/ spowoduje zniknięcie wszelkich różnic także dla układu a.

Widzimy zatem, że pomimo niewystępowania w sieciach krajowych linii o liczbie torów przekraczającej 2 /z wyjątkiem krótkich odcinków przy elektrowniach/, w schematach zastępczych mogą wystąpić modele wielobokowe odpowiadające takim liniom. Zachodzi zatem pytanie, czy wprowadzanie węzłów pozornych jest niezbędne, skoro można układy dwutorowe wielokrotnie sprzężone modelować przy pomocy modeli wielobokowych? Z przeprowadzonej analizy wynika, że wprowadzanie węzłów pozornych daje szereg korzyści i warto je stosować z kilku przyczyn.

Pierwsza przyczyna ma charakter dość prozaiczny. Wynika ona z faktu wystąpienia utrudnień w tworzeniu modeli wielobokowych.

Nie chodzi tu o samą inwersję macierzy stopnia 3, 45..., ale o operowanie modelem 15, 28, 45-bokowym wymagającym rozbudowy segmentów sterujących w programach. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że im więcej gałęzi o rozkładach różnych znaków, tym bardziej niestabilny proces obliczeniowy /por 4.4.1/.

Druga przyczyna wynika z przeprowadzonej kalkulacji liczby działań koniecznych do wykonania. Rozważmy układ N linii dwutorowych sprzężonych ze sobą wielokrotnie, który ma być dołączony do sieci zastępczej o k węzłach i b gałęziach. Załóżmy, że wprowadzenie P węzłów pozornych powoduje, że spełniony jest warunek omówiony na wstępie tzn, że jeden odcinek sprzężony jest tylko z jednym odcinkiem. Ponieważ wprowadzeniu P węzłów pozornych towarzyszy utworzenie P nowych gałęzi, ostateczna liczba sprzężonych ze sobą torów wynosi:

$$L_{ts} = \frac{N + P}{2}$$

Zastosowanie modeli wielobokowych /6-bokowych/ pociąga za sobą konieczność łącznego wprowadzenia następującej liczby gałęzi:

$$G_{ts} = L_{ts} \cdot 6 = 3 /N+P/$$

Gdyby węzłów pozornych nie wprowadzano, zastosowanie modelu 2N-bokowego wymagałoby zastosowania G_t gałęzi, przy czym:

$$G_t = 2N /N-1/$$

Porównując wartości G_{ts} i G_t dla układów najprostszycych /rys. 48/ stwierdzamy, że :

$N = 3$	$P = 1$	$G_{ts} = 12$	$G_t = 15$
$N = 3$	$P = 3$	$G_{ts} = 18$	$G_t = 15$

Na rys. 2.2 /schemat sieci testowej/ można również zauważyć układy dla których :

$$N = 5 \quad P = 5 \quad G_{ts} = 30 \quad G_t = 45$$

$$N = 5 \quad P = 6 \quad G_{ts} = 33 \quad G_t = 45$$

Zauważając, że tylko w jednym przypadku $G_t < G_{ts}$, należy pamiętać, że nawet dla tego przypadku przy zastosowaniu węzłów pozornych, dzięki możliwości zastosowania trzech tzw. promieniowych wiązań gałęzi, liczba gałęzi przeznaczonych do tzw. wiązań typu oozkowego /por p. 4.2.2/, jest taka sama jak w układzie, gdzie węzłów tych nie stosowano. Korzyści wynikające z wprowadzania węzłów pozornych nie polegają jednak tylko na występowaniu mniejszej liczby gałęzi. Biorąc pod uwagę proces stopniowej eliminacji węzłów uzależniony od zawartości zbioru węzłów aktualnie rozpatrywanych $\{Z_A\}$ /por p.4.2.3/ stwierdzamy, że na skutek podziału układu wielokrotnie sprzężonego na pary odcinków sprzężonych nie ma potrzeby zatrzymywania w tym zbiorze równocześnie wszystkich węzłów będących krańcami N-torów. Trzecia przyczyna, dla której stosowanie węzłów pozornych jest korzystne, wynika z łatwości operowania uogólnioną metodą dołączania gałęzi /por. p.4.3.2/.

Jednakże z drugiej strony, wprowadzanie węzłów pozornych jest kłopotliwe dla przygotowujących dane do obliczeń. Należy nadawać im specjalne nazwy różniące się od literowo-cyfrowych kodów stosowanych dla węzłów rzeczywistych. Zdaniem autora, istnieją obawy, że problemy związane z wprowadzaniem węzłów pozornych mogą być jedną z obiektywnych przyczyn ograniczonego uwzględniania sprzężeń w obliczeniach zwarceniowych. Dlatego też, w ramach niniejszej pracy autor zaproponował algorytm samoczynnego wprowadzania węzłów pozornych do sieci zawierających układy sprzężone wielokrotnie.

4.4.3. Algorytm wprowadzania węzłów pozornych do sieci zawierającej sprzężone ze sobą gałęzie

Z uwagi na praktyczne aspekty operacji dołączania węzłów pozornych, zasadę działania tego algorytmu omówiono na przykładzie. Poniżej przedstawiono fragment opisu topologii sieci testowej /rys. 2.2/ bez wykorzystywania węzłów pozornych oraz reaktancje tych elementów dla składowej zerowej, w jednostkach względnych:

N	P	Q	$X_o/j.w/$
173	1	11	11.70
174	2	4	3.70
176	4	6	2.38
182	5	7	4.90
184	8	11	2.40

/4.43/

gdzie:

N numer linii

P, Q węzły krańcowo linii /wg. rys. 2.2/

Wyszczególnione linie wchodzi w skład układu dwutorowego 4-krotnie sprzężonego opisanego poniżej:

N	... W_j X_{Mj} ...
173	174 176 182 184	1.85 1.19 2.03 0.73 /4.44/
174	173	1.85
176	173	1.19
182	173 - 184	2.03 0.42
184	-182 173	0.42 0.73

gdzie:

W_j - numery linii sprzężonych z linią o numerze N

X_{Mj} - wartości reaktancji wzajemnych odpowiadające tym sprzężeniom.

Znak "-" wynika z faktu, że kierunki $P \rightarrow Q$ określone w /4.43/ są dla danej pary linii sprzężonych kierunkami przeciwnymi. Zagadnienie tworzenia węzłów pozornych jest w istocie zagadnieniem związanym z syntezą nowych fragmentów sieci elektroenergetycznej. Najistotniejszym elementem opisywanego algorytmu jest "wygenerowanie" nowych odcinków linii, których końcami /bądź jednym końcem/ są nowo wprowadzane węzły pozorne.

Węzły te są tworzone jako wartości wyrażeń:

$$P_p = L_1 \cdot P + L_2 \cdot /1050 + B_p/ - L_5$$

$$Q_p = L_3 \cdot Q + L_4 \cdot /1050 + B_p/$$

/4.45/

gdzie:

P, Q są to węzły krańcowe rozpatrywanej linii N /por 4.44/
 B_p wskaźnik porządkowy węzłów pozornych /numeracja tych węzłów dla odróżnienia od węzłów rzeczywistych rozpoczyna się od 1051/
 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 przyjmują wartości 0 bądź 1 tworząc różno kombinacje w zależności od liczby linii sprzężonych z linią daną i wzajemnego ich usytuowania.

Ostatecznej orientacji $P \rightarrow Q$ nowo utworzonego odcinka dokonuje się zgodnie ze znakami w /4.44/. Przyjmują one numery od 251 w górę. Uwzględniając te odcinki zamiast /4.43/ otrzymuje się:

N	P	Q	X_0
251	1	1051	3.70
252	1051	1052	2.38
253	1052	1053	4.06
254	1053	11	1.56
174	2	4	3.70
176	4	6	2.40
255	5	1054	4.06
256	7	1054	0.84
257	8	1055	0.84
258	1055	11	1.56

/4.46/

Kończącą operacją wykonywaną przez program tworzenia węzłów pozornych jest zestawienie sprzężonych ze sobą par odcinków linii. Zastosowano najprostszą formę identyfikacji takich odcinków /tzw. wartościową/ opierającą się na założeniu, że obydwa sprzężone ze sobą tory są identyczne.

Poniżej przedstawiono wyniki takiej identyfikacji zamieszczając obok wartości reaktancji wzajemnych, w jednostkach względnych.

173	254	1.85	
252	176	1.19	
253	255	2.03	/4.45/
254	258	0.78	
257	256	0.42	

Wszystkie omówione powyżej operacje poprzedzające właściwe obliczenia zwarciowe realizowane są przez program ZW10.

4.5. Podsumowanie przeprowadzonych analiz metod obliczania warunków zwarciovych w sieciach zawierających dużą liczbę sprzężonych ze sobą torów

Przeprowadzone w tym rozdziale rozważania dotyczące oceny metod określania warunków zwarciovych w sieciach zawierających znaczną liczbę sprzężonych ze sobą torów, potwierdzają postawioną na wstępie tezę rozprawy, wskazując na powody, dla których modyfikacje tych metod są konieczne oraz przedstawiając propozycje takich modyfikacji.

Upoważniają one także do sformułowania następujących wniosków szczegółowych:

- w przypadku stosowania do odwzorowania sprzężeń modeli wielobokowych, należy liczyć się z komplikacjami procesu obliczeniowego, nawet gdy wykorzystuje się parametry katalogowe, o wiele mniej skomplikowane od omówionych w rozdz. 3 parametrów dokładnych.
- wspomniane komplikacje, takie jak wydłużenie czasu obliczeń, niestabilność procesu obliczeniowego, utrudnienia związane z przygotowaniem danych, w różnym zakresie pojawiają się dla wszystkich metod. Najbardziej dostrzegalne są one dla metody dołączania gałęzi, która jest najbardziej rozpowszechniona z powodu wielu innych zalet.
- programy pracujące dla potrzeb obliczania nastawień zabezpieczeń przekaźnikowych powinny zostać uzupełnione wg propozycji zawartych w p. 4.4.1 w tzw. zabezpieczeniu numeryczno przed występowaniem wyrażeń nieoznaczonych.
- w miarę możliwości programy te powinny zostać zmodyfikowane poprzez wprowadzenie udowodnionej i oprogramowanej w ramach niniejszej pracy uogólnionej metody dołączania gałęzi.

- dla wygody użytkowników programów obliczania warunków zwarciowych, powinien być w nich także wykorzystany algorytm wprowadzania węzłów pozornych, których obecność znacznie upraszcza proces obliczeniowy.

5. ZAKOŃCZENIE

5.1. Zestawienie osiągnięć rozprawy, które zdaniem autora można uznać za oryginalne

Tak jak wspomniano na wstępie, temat niniejszej rozprawy związany jest ze szczegółowymi aspektami znanych zagadnień analizy obwodów liniowych w stanie ustalonym. Dlatego też poniżej dokonano zestawienia tych elementów przeprowadzonych rozważań, które zdaniem autora stanowią pewno wzbogacenie teoretyczne dziedziny zajmującej się obliczeniami systemowymi.

- opracowanie metody impedancyjnej otrzymywania parametrów zredukowanego schematu zastępczego $p - p$ - przęsłowego układu o N torach i L przewodach odgromowych uziemionych na każdym słupie /p. 3.4.3/.
- wprowadzenie do analizy ^{składowej zerowej} napięcia w miejscu zainstalowania przekątnika tzw. parametrów modelowych linii oraz zbadanie ich związku z parametrami katalogowymi /p. 3.5.2/.
- nadanie prostej interpretacji sieciowej metodzie budowy macierzy impedancyjnej poprzez tzw. dołączanie węzłów oraz wyprowadzenie związanych z nią wzorów przy wykorzystaniu podstawowych twierdzeń teorii obwodów /p. 4.2.4/.
- wyprowadzenie wzorów stanowiących uogólnienie metody budowy macierzy impedancyjnej poprzez tzw. dołączanie gałęzi /p.4.3/
- zbadanie możliwości wystąpienia wyrażeń nieoznaczonych w metodzie dołączania gałęzi i przedstawienie zabezpieczenia procesu obliczeniowego przed występowaniem takich wyrażeń /p. 4.4.1/

Powyższe elementy rozprawy, przegląd związanej z omawianymi zagadnieniami literatury oraz obliczenia wykonane przy pomocy opracowanych w ramach pracy programów KK11, KK12, E410, ZW1M, ZW1Z, ZW1D pozwoliły na przedstawienie szeregu praktycznych wniosków.

5.2. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz i obliczeń

W rozdziałach 2, 3 i 4 zamieszczono szereg szczegółowych wniosków związanych z modelowaniem i uwzględnianiem w obliczeniach zwarciowych sprzężonych ze sobą torów. Poniżej zestawiono te, które wydają się najistotniejsze:

- w rozległej sieci elektroenergetycznej WN, w której występuje duża liczba sprzężonych ze sobą torów linii napowietrznych, uwzględnienie wpływu sprzężeń na warunki zwarciowe wymaga przeprowadzenia dokładnych analiz przy pomocy odpowiednio oprogramowanych maszyn cyfrowych.
- dążąc do prostoty prowadzonych obliczeń, przy równoczesnym zachowaniu ich dokładności, można wykorzystywać w nich parametry katalogowe linii dwutorowych tzn. takie, które określono zakładając bezimpedancyjne uziomienie przewodów odgromowych. Dla bardzo krótkich odcinków linii, w celu zwiększenia dokładności obliczeń można stosować tzw. parametry modelowe.
- stosowany w praktyce dla składowej zerowej model odwzorowujący N sprzężonych ze sobą torów w postaci $N(2N-1)$ boku zupełnego posiada istotnie dla przebiegu obliczeń wady omówione w ramach niniejszej pracy.
- wszystkie stosowane w praktyce metody obliczania warunków zwarciowych w sieciach elektroenergetycznych, a w szczególności najbardziej rozpowszechniona metoda dołączania gałęzi, w przypadku sieci o dużej liczbie sprzężonych ze sobą torów wykazują szereg wad: wydłużenie czasu obliczeń, niestabilność procesu obliczeniowego /w krańcowym przypadku występo-

wanie wyrażeń nieoznaczonych/, wzrost błędów obliczeniowych, utrudnienia w przygotowaniu danych.

- udowodniona w ramach niniejszej pracy uogólniona metoda dołączania gałęzi oraz proponowane modyfikacje klasycznej metody dołączania gałęzi, skutecznie eliminują wymienione powyżej trudności w dokładnym uwzględnieniu wpływu sprzężeń pomiędzy torami na warunki zwarcia.

6. LITERATURA

1. Analiza awaryjności w ZEOPd za rok 1979, Katowice 1980.
2. Barber P.B.: Transmission lines in the environment of England and Wales. CIGRE, ref 22-01, 1974.
3. Bernas S., Ciok Z.: Modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego, WNT, Warszawa 1977.
4. Bhatt N.B., Venkanta S., Guyker W.: Six phase /multi phase/ power transmission systems: fault analysis. IEEE Transactions PAS Vol-96, No 3, May-June 1977.
5. Bienkowski J.: Optymalizacja obliczeń prądów zwarcia w dużych systemach elektroenergetycznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 1975.
6. Brameller A., Gas M.I., Padney R.S: General Fault Analysis using phase frame of reference. Proceedings of IEE, Vol-121, No 5, May 1974.
7. Bulik J., Filipek Z., Lankauf A.: Program obliczania nastawień zabezpieczeń przekątnikowych typu I3 i RTX dla sieci 110 i 400 kV - karta programowa. Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa 1977.
8. Cholewicki T.: Elektrotechnika teoretyczna t. I, WNT, Warszawa 1972.
9. Clarke E.: Circuit analysis of A-C Power Systems. Vol I N.Y. Wiley 1956.
10. Domagała E. i inni: System obliczeń i analiz sieciowych w okręgowych dyspozycjach mocy. Energetyka 1977/12.
11. Dołowy M.: Wyznaczenie napięć na izolacji kabli sterowniczych w dużych elektrowniach dla zwarć doziemnych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 1976.
12. El-Abiad C.H.: Digital Calculations of Line to Ground Short Circuit by Matrix Method. Trans. AIEE cz. III. PAS Vol. 79, 1960.
13. Faddiejewa W.N.: Metody numeryczne algebry liniowej. PWN, Warszawa 1955.

14. Filipek Z.: Metoda stopniowej eliminacji węzłów przy obliczaniu zwarć w systemach elektroenergetycznych. Energetyka 1975/5.
15. Filipek Z. i inni: Warunki zwarciowe w sieci 400 i 220 kV w 1980 r. obliczone dla potrzeb zabezpieczeń przekątnikowych. Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa 1974.
16. Filipek Z., Lankauf A., Węglińska E.: Program obliczania warunków zwarciowych dla potrzeb zabezpieczeń przekątnikowych - karta programowa. Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa 1975.
17. Instytut Energetyki - praca zbiorowa: Koncepcja rozwoju polskiego systemu elektroenergetycznego do 1990 r. Instytut Energetyki 1968.
18. Instytut Energetyki - praca zbiorowa: Koncepcja rozwoju polskiego systemu elektroenergetycznego do 2000 r. Instytut Energetyki 1980.
19. Janson J.: Erste deutsche 380 kV - Freileitungen 10 Jahre in Betrieb, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 1967, t. 11, nr 10.
20. Jasicki Z.: Linie przesyłowe na CIGRE, Przegląd Elektrotechniczny 1975, z. 4.
21. Kacejko P., Kujan D.: Program rozwiązywania układów równań liniowych o rzadkiej strukturze macierzy współczynników - dokumentacja ośrodka obliczeniowego Politechniki Lubelskiej 1981.
22. Kacejko P., Zieliński J.S.: Some problems of analysis of asymmetries in multi-circuit and multi-phase power lines with an application of the linear transformation. Archiwum Elektrotechniki, zeszyt IV, 1980.
23. Kacejko P.: Wybrane aspekty metod obliczania zwarć w sieciach elektroenergetycznych przy pomocy maszyn cyfrowych. Praca dyplomowa, Politechnika Lubelska 1979.
24. Kinsner K., Tłuczkiwicz T., Wnukowski J.: Analiza możliwości wielotorowego wyprowadzenia energii elektrycznej. Raport Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej Nr 390, 1977.

25. Kobosko S.: Analiza wpływu przewodów odgromowych na pomiar impedancji przez zabezpieczenie odległościowe linii wysokich napięć. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 1975.
26. Kobosko S.: Wybrane problemy doboru nastawień zabezpieczeń odległościowych w liniach dwutorowych najwyższych napięć. I Konferencja "Optymalizacja projektowania i eksploatacji systemów i urządzeń elektroenergetycznych" Warszawa 1980.
27. Klimpel A., Mesjasz A.: "Instrukcja eksploatacji przekaźników odległościowych typu RTX-35". Opracowanie Instytutu Energetyki, Warszawa 1977.
28. Kowalczyk B.: Macierze i ich zastosowania, WNT, Warszawa 1976
29. Krakowski M.: Obwody ziemnopowrotne, WNT, Warszawa 1979.
30. Nowacki P.: Linie dalekosiężne, WNT, Warszawa 1953.
31. Polska Norma PN-74/E-5002: Dobór aparatów wysokonapięciowych w zależności od warunków zwarciovych.
32. Przyłuski A.: Przekształcenia liniowe symetrycznych obwodów trójfazowych eliminujące oporności wzajemne. Archiwum Elektryki, 1956 z. 3.
33. Ralston A.: Wstęp do analizy numerycznej. PWN, Warszawa 1975
34. Reisman H.: Rozwój systemu sieci dla napięć 380/110 kV w RFN. Sympozjum pt. "Rozwój elektryki w RFN", Warszawa 1980.
35. Reitan D.K., Kruempel K.C.: Modification of the bus impedance matrix for system changes involving mutual couplings, Proceedings of IEEE, August 1969.
36. Rzanisak M.: Wybrane zagadnienia zasilania energią elektryczną wielkich miast za granicą. Energetyka 1976/6.
37. Soberka Z., Bułat T.: Algorytm szybkiego wyznaczania prądów i mocy zwarciovych. Energetyka 1977/12.
38. Stewart J.R., Wilson D.D.: High Phase Order Transmission. IEEE Transaction PAS, Vol-97, No 6, Nov/Dec 1978.
39. Tinney W.F., Walker J.W.: Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization, Proceedings of the IEEE Vol-55, November 1967, No 10.

40. Undrik J.M., Kostyniak T.E.: Advanced Power System Fault Analysis Method. IEEE Transaction PAs, Vol-94, Nov-Dec 1975, No 6.
41. Zieliński J.S.: Analiza asymetrii w dwutorowych liniach trójfazowych przy pomocy składowych symetrycznych dwu-trójfazowych. Zeszyty Nauk. Politechniki Łódzkiej, Nr 72, Elektryka z. 17, 1965.
42. Zieliński J.S.: Mathematical modelling of Asymmetries in multi-phase and multi-circuit Power Lines. Bull. Pol. Sci. Tech. 1980.
43. Zollenkopf K: Bifactorisation basic computational algorithm and programming technique. Conference on large sets of sparse linear equations, Oxford 1970.
44. Żydanowicz J: Zagadnienia wybrane z techniki zabezpieczeń przekaźnikowych. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1975.

