



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY**

**Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów**

**mgr inż. Agnieszka Dziendziel**

**WIELOTOROWE, WIELONAPIĘCIOWE  
ELEKTROENERGETYCZNE LINIE NAPOWIETRZNE  
WYSOKICH I NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ**

**MULTI-CIRCUIT, MULTI-VOLTAGE HVAC TRANSMISSION  
OVERHEAD LINES**

**PRACA DOKTORSKA**

**Promotor: dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. PŚ**

Gliwice, marzec 2022 r.

*Pragnę wyrazić wdzięczność Panu*

***Dr hab. inż. Henrykowi Kocotowi, Prof. PŚ***

*za życzliwą pomoc oraz wsparcie podczas  
realizacji niniejszej pracy doktorskiej*

## Spis treści

Wykaz najważniejszych oznaczeń .....	5
<b>1 WPROWADZENIE .....</b>	<b>6</b>
<b>2 CHARAKTERYSTYKA WWLN.....</b>	<b>14</b>
<b>3 MODELE WWLN I ICH PARAMETRY .....</b>	<b>22</b>
3.1 Parametry wzdłużne .....	23
3.1.1 Model impedancyjny i admitancyjny dla wielkości fazowych .....	27
3.1.2 Model impedancyjny i admitancyjny dla składowych symetrycznych .....	32
3.1.3 Przypadek szczególny – symetryczna WWLN .....	33
3.2 Parametry poprzeczne .....	38
3.2.1 Model parametrów poprzecznych dla wielkości fazowych.....	39
3.2.2 Model parametrów poprzecznych dla składowych symetrycznych .....	41
3.2.3 Konduktancja poprzeczna WWLN.....	42
3.2.4 Przypadek szczególny – symetryczna WWLN .....	43
3.3 Rozkład pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN .....	45
3.3.1 Rozkład natężenia pola elektrycznego .....	46
3.3.2 Rozkład natężenia pola magnetycznego.....	50
<b>4 PRACA WWLN JAKO ELEMENTU SYSTEMU PRZESYŁOWEGO .....</b>	<b>52</b>
4.1 Analiza rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN.....	53
4.1.1 Rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji odległości od osi słupa .....	55
4.1.2 Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w funkcji zastosowanego układu faz WWLN .....	58
4.1.3 Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w funkcji kątów fazowych napięć zasilających .....	61
4.2 Analiza niesymetrii pojemnościowej WWLN .....	61
4.2.1 Wpływ geometrii zawieszenia przewodów .....	63
4.2.2 Wpływ układu przewodów fazowych WWLN .....	66
4.2.3 Wpływ kątów fazowych napięć zasilających .....	68
4.3 Analiza niesymetrii impedancyjnej WWLN.....	69
4.3.1 Wskaźniki asymetrii w funkcji długości linii.....	72
4.3.2 Wskaźniki asymetrii w funkcji układu przewodów fazowych WWLN.....	76
4.3.3 Wskaźniki asymetrii w funkcji kątów fazowych napięć zasilających.....	80
4.4 Analiza zwarciowa.....	81

4.4.1	Prądy zwarcia w funkcji długości WWLN.....	86
4.4.2	Prądy zwarcia w funkcji układu przewodów fazowych WWLN.....	90
<b>5</b>	<b>MOŻLIWOŚCI SYMETRYZACJI .....</b>	<b>93</b>
5.1	Wybór kompromisowego układu przewodów fazowych wynikającego z przeprowadzonych analiz niesymetrii .....	93
5.2	Symetryzacja WWLN .....	96
5.2.1	Wpływ zastosowania przeplotów przewodów fazowych w torze prądowym III przy stałej długości linii .....	98
5.2.2	Wpływ zastosowania przeplotów przewodów fazowych toru prądowego III na możliwość zwiększenia długości linii .....	101
<b>6</b>	<b>PRACA WWLN W SYSTEMIE PRZESYŁOWYM .....</b>	<b>105</b>
6.1	WWLN jako fragmenty tradycyjnych ciągów liniowych.....	105
6.2	WWLN z odejściami w postaci tradycyjnych linii napowietrznych.....	107
6.3	Praca WWLN w rzeczywistym otoczeniu sieciowym.....	109
<b>7</b>	<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>	<b>116</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>122</b>
	<b>ZAŁĄCZNIKI.....</b>	<b>130</b>
8.1	Uproszczenia modelu matematycznego.....	130
8.1.1	Uwzględnienie występowania przewodów wiązkowych.....	130
8.1.2	Uwzględnienie oddziaływania przewodów odgromowych.....	134
8.1.3	Uwzględnienie zróżnicowania poziomów napięć znamionowych torów prądowych WWLN .....	139
8.1.4	Przypadek szczególny – linia symetryczna .....	141
8.2	Geometria analizowanych WWLN .....	145
8.2.1	Parametry geometryczne i materiałowe przyjęte do analiz WWLN .....	145
8.2.2	Uwzględnienie zwisów i długości łańcuchów izolatorów.....	148
8.2.3	Przyjęte oznaczenia układów przewodów fazowych WWLN .....	151
8.2.4	Przyjęte oznaczenia przeplotów .....	152

## Wykaz najważniejszych oznaczeń

WWLN – wielotorowa, wielonapięciowa linia napowietrzna

WN – wysokie napięcie (110 kV)

NN – najwyższe napięcie (220 kV, 400 kV)

KSE – krajowy system elektroenergetyczny

$n$  – liczba torów prądowych rozważanej WWLN

$i, j$  – dwa wybrane tory prądowe WWLN

$g$  – liczba przewodów odgromowych rozważanej WWLN

$m$  – liczba przewodów w wiązce stanowiącej przewód fazowy rozważanej WWLN

$\mathbf{Z}$  – macierz impedancyjna

$\mathbf{Y}$  – macierz admitancyjna

$\underline{Z}$  – element macierzy impedancyjnej

$\underline{Y}$  – element macierzy admitancyjnej

$\mathbf{C}$  – macierz pojemności

$\mathbf{B}$  – macierz susceptancji

$x^{\text{pu}}$  –  $x$  w jednostkach względnych

$x^e$  –  $x$  skorygowane o oddziaływanie przewodów odgromowych

$E_{\text{max}}$  – maksymalne natężenie pola elektrycznego wyznaczone na wysokości 2 m nad powierzchnią ziemi w miejscu największego zwisu przewodów fazowych linii napowietrznej

$\underline{U}_0$  – napięcie kolejności zerowej

$\underline{U}_1$  – napięcie kolejności zgodnej

$\underline{U}_2$  – napięcie kolejności przeciwnej

$\alpha_0$  – wskaźnik niezrównoważenia

$\alpha_2$  – wskaźnik niesymetrii

$\delta I_{\text{zw}\%}$  – procentowy błąd względny wyznaczania prądu zwarcia przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego)

$\delta I_{\text{gał}\%}$  – procentowy błąd względny wyznaczania udziału prądu zwarcia od strony gałęzi badanego toru prądowego III przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego)

# 1 WPROWADZENIE

System elektroenergetyczny tworzą wszystkie jednostki wytwarzające energię elektryczną, odbiorcy oraz sieć przesyłowa i rozdzielcza, pełniąc kolejno funkcję przesyłu i rozdziału energii elektrycznej między tymi podmiotami. W Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE) rolę sieci przesyłowych pełnią sieci najwyższych napięć (NN), zatem sieci o napięciu znamionowym 220 kV i 400 kV, z których zasilane są sieci rozdzielcze 110 kV. Głównymi zadaniami sieci przesyłowej są:

- zapewnienie wyprowadzenia energii elektrycznej z dużych elektrowni,
- dostawa energii elektrycznej do obszarów deficytowych (odbiorczych),
- zapewnienie równowagi współpracy między dużymi jednostkami wytwórczymi,
- dostawa energii elektrycznej do dużych odbiorców (funkcja rozdzielcza),
- wymiana międzynarodowa, w tym sprzedaż energii elektrycznej za granicę.

Podstawowym zadaniem sieci rozdzielczej o napięciu znamionowym 110 kV, sieci średnich i niskich napięć, jest niezawodne dostarczanie energii elektrycznej o odpowiedniej jakości do odbiorców końcowych, co wiąże się z utrzymaniem parametrów jakości dostarczanej energii elektrycznej w odpowiednich granicach.

Sieć przesyłową tworzą linie przesyłowe – głównie są to linie napowietrzne – oraz transformatory sprzęgające sieci 400 kV i 220 kV ze sobą, jak również transformatory NN/110 kV. Struktura tych sieci oraz ich zdolności przesyłowe są silnie skorelowane z rozmieszczeniem i wielkością jednostek wytwórczych, a także z sumarycznym szczytowym zapotrzebowaniem na moc w KSE.

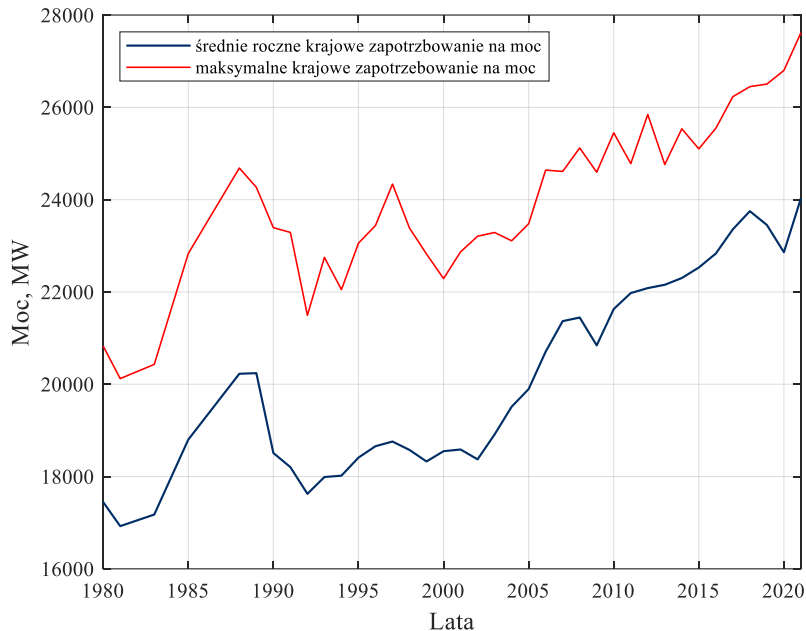
W KSE regularnie rejestruje się nowe rekordy zapotrzebowania na moc. W tabeli 1.1 przedstawiono pięć ostatnich odnotowanych rekordów zapotrzebowania w okresie zimowym i letnim.

**Tab. 1.1 Rekordy zapotrzebowania na moc w KSE [115]**

Okres zimowy		Okres letni	
12 lutego 2021 r.	27 617 MW	15 lipca 2021 r.	24 553 MW
18 stycznia 2021 r.	27 380 MW	9 lipca 2021 r.	24 336 MW
10 grudnia 2020 r.	26 817 MW	26 czerwca 2019 r.	24 144 MW
25 stycznia 2019 r.	26 504 MW	12 czerwca 2019 r.	24 096 MW
28 lutego 2018 r.	26 448 MW	11 czerwca 2019 r.	23 718 MW

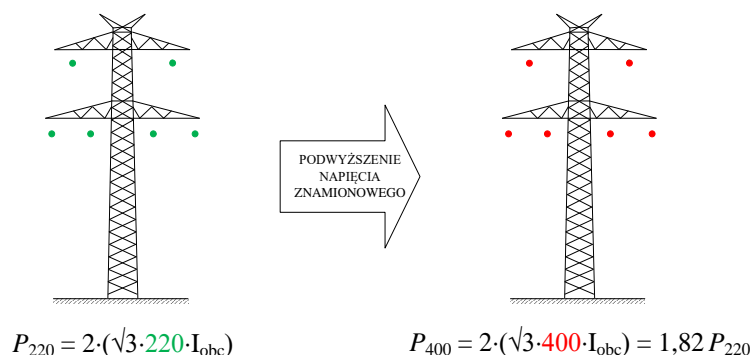
Odpowiedzią na wciąż rosnący poziom zapotrzebowania (rys. 1.1), jest budowa nowych jednostek wytwórczych o coraz większych mocach jednostkowych (dziś są to już jednostki o mocach rzędu 1000 MW) oraz pojawianie się obszarów o dużych nadwyżkach produkcji niestabilnej z dużą liczbą farm wiatrowych i fotowoltaicznych, a także rozwój morskich farm wiatrowych (o mocach rzędu kilku GW). Zapewnienie bezpiecznej pracy systemu elektroenergetycznego w perspektywie wciąż rosnącego zapotrzebowania na moc oraz zmian zachodzących w sektorze wytwórczym wymaga umożliwienia przepływu tej mocy wieloma niezależnymi drogami przy wystarczającej gęstości sieci przesyłowej, z zapewnieniem

odpowiednio dużej przepustowości poszczególnych jej elementów. W tym celu konieczna jest rozbudowa systemu przesyłowego, głównie poprzez realizację nowych połączeń liniowych o zwiększonych zdolnościach przesyłowych. Tematyka niniejszej pracy koncentruje się na tym elemencie układu przesyłowego – liniach napowietrznych.



**Rys. 1.1 Średnie roczne krajowe zapotrzebowanie na moc oraz zapotrzebowanie maksymalne w dobowych szczytach obciążenia dni roboczych w latach 1980 ÷ 2021 [115]**

W kontekście wspomnianych warunków rozwojowych sieci elektroenergetycznej, podejmuje się szereg działań prowadzących do zwiększenia zdolności przesyłowych eksploatowanych linii napowietrznych. Do działań tych należą m.in. modernizacja istniejących linii poprzez podwyższenie napięcia roboczego. W KSE najczęściej prowadzi się prace zmierzające do przebudowy linii 220 kV na napięcie 400 kV [103, 115]. Przy zachowaniu przepływu tego samego prądu obciążenia, zmiana napięcia roboczego linii pozwala na zwiększenie przesyłanej mocy do poziomu 182% (rys. 1.2).



**Rys. 1.2 Ilustracja wpływu podwyższenia napięcia znamionowego linii napowietrznej ( $I_{obc} = \text{const.}$ )**

Uwzględniając dodatkowo obciążalności prądowe linii 220 kV i 400 kV (tab. 1.2), możliwe jest zwiększenie obciążalności mocowej linii napowietrznej ponad 3,5 razy [51]. Przedstawiony efekt podwyższenia napięcia znamionowego linii napowietrznych jest

znaczący, jednak w najbliższej perspektywie czasowej całkowita transformacja sieci 220 kV w sieć 400 kV nie jest możliwa.

**Tab. 1.2 Letnia i zimowa obciążalność prądowa i mocowa linii 110 kV, 220 kV i 400 kV zaprojektowanych dla temperatury granicznej roboczej +60°C [17]**

Wielkość	Sezon	Linia 110 kV	Linia 220 kV	Linia 400 kV	Linia 400 kV*
$I_{dd}$ , A	Lato	524	875	1750	2044
	Zima	730	1220	2440	2850
P, MW	Lato	100	330	1210	1415
	Zima	140	465	1690	1975

linia 110 kV wykonana przewodem AFL-6 240 mm<sup>2</sup>; linie 220 kV i 400 kV wykonane przewodami AFL-8 525 mm<sup>2</sup>

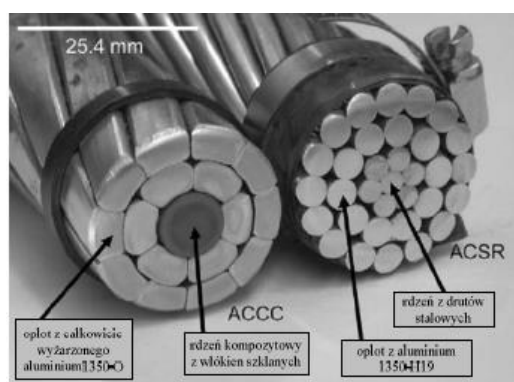
\* linia nowszego typu – przewód fazowy wiązkowy 3×AFL-8 350 mm<sup>2</sup>

Popularną metodą modernizacji, pozwalającą nawet na kilkukrotne zwiększenie obciążalności prądowej, istniejących linii napowietrznych jest ich modernizacja, poprzez wymianę przewodów roboczych na nowsze rozwiązania tj. tak zwane przewody wysokotemperaturowe, znane również pod nazwą niskozwisowe HTLS (ang. *High Temperature Low Sag*) [75]. Przy czym jako obciążalność prądową linii rozumie się taką wartość prądu, dla której przewody robocze nagrzewają się do temperatury granicznej roboczej, na którą linia została zaprojektowana [22]. Ograniczeniem przesyłanej mocy w przypadku linii napowietrznych jest maksymalny zwis przewodu, który determinuje minimalną dopuszczalną odległość przewodów od powierzchni ziemi i obiektów krzyżowanych. Z uwagi na dodatnią rozszerzalność temperaturową materiałów, z których zbudowane są przewody linii napowietrznych, wzrost obciążenia prądowego powoduje wzrost zwisu. Przewody niskozwisowe charakteryzują się bardzo małym współczynnikiem wydłużenia termicznego, przez co nawet przy znacznych prądach obciążenia linii dopuszczalny zwis tych przewodów nie zostaje przekroczony (rys. 1.3b). Dzięki właściwościom materiałowym przewodów o małym zwisie, możliwe jest znaczne zwiększenie obciążalności prądowej linii, a co za tym idzie zwiększenie jej zdolności przesyłowych.

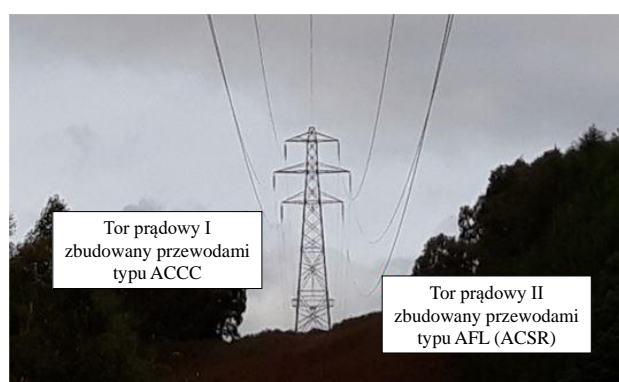
Wymiana klasycznych przewodów AFL na przewody HTLS, jest popularną metodą modernizacji termicznej linii napowietrznych 110 kV i 220 kV. Przykładowo w linii 110 kV, zaprojektowanej do temperatury granicznej roboczej równiej +40°C, zastąpienie przewodu AFL-6 185 mm<sup>2</sup> przewodem ACCS/TW Linnet, spowoduje zwiększenie sezonowej obciążalności prądowej letniej linii z 270 A do 645 A. Zastosowanie w tej samej linii 110 kV przewodu ACCR Linnet, pozwoli na podniesienie letniej obciążalności prądowej linii do wartości 665 A, natomiast instalacja przewodu ACCC/TW Linnet umożliwi przesłanie w okresie letnim prądu roboczego o maksymalnej wartości 985 A. Zawieszenie przewodów ACCS Canary oraz ACCR Curlew w linii 220 kV, będzie skutkowało letnią obciążalnością prądową tej linii na poziomie 1130 A. Dla porównania, ta sama linia 220 kV z przewodem AFL-8 525 mm<sup>2</sup> przy założeniu temperatury granicznej roboczej na poziomie +40°C, posiada sezonową obciążalność prądową letnią równą 515 A. W obu rozpatrywanych powyżej przypadkach, zwisy przewodów HTLS nie będą większe od zwisów przewodów AFL, a więc minimalne odległości przewodów fazowych do ziemi oraz do obiektów będących w przestrzeni pod linią napowietrzną zostaną zachowane [11].



a)

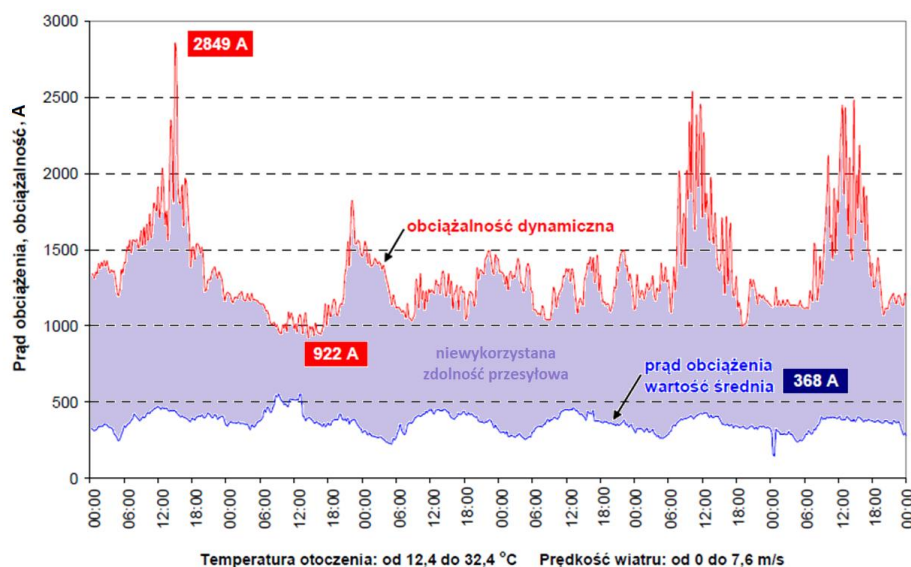


b)



Rys. 1.3 Porównanie tradycyjnego przewodu stalowo-aluminiowego AFL (ACSR) i niskozwisowego ACCC a) budowa [9], b) zwis przy tym samym obciążeniu [113]

Obciążalność prądowa linii zależy od warunków atmosferycznych: temperatury otoczenia, intensywności promieniowania słonecznego, a także prędkości wiatru oraz kąta natarcia wiatru względem przewodu linii napowietrznej. Dlatego jednym z możliwych działań podejmowanych w celu zwiększenia zdolności przesyłowych linii napowietrznych jest prowadzenie monitoringu aktualnych warunków atmosferycznych, które są następnie wykorzystywane do wyznaczenia rzeczywistej obciążalności linii przesyłowych. Analizy te wymagają ciągłego pozyskiwania danych ze stacji meteorologicznych zlokalizowanych w pobliżu linii oraz zaimplementowania odpowiedniego modelu obciążalności prądowej, który umożliwi pełne bieżące wykorzystanie zdolności przesyłowych danej linii. Korzyści wynikające z zastosowania tej metody pokazano na rysunku 1.4. Zgodnie z przebiegami z rysunku 1.4 efekty wyznaczania obciążalności prądowej linii na podstawie warunków atmosferycznych są znaczące. W omawianym przypadku, widać możliwość zwiększenia obciążalności prądowej linii 220 kV o 500 A, jednak warto podkreślić, że występują również okresy, w których ten przyrost jest jeszcze większy.



Rys. 1.4 Dynamiczna obciążalność linii 220 kV z przewodami roboczymi AFL-8 525 mm<sup>2</sup> (na niebisko – wartość średnia prądu obciążenia linii wynikająca z przyjętej dopuszczalnej obciążalności przewodów w sezonie letnim wg Zarządzenia nr 29 MGiE, tj. 515 A) [11]

Obecne metody zwiększania zdolności przesyłowych eksploatowanych linii napowietrznych wysokich napięć są efektywne, lecz w bliskiej perspektywie czasowej mogą okazać się już niewystarczające. Rozwiązania te nie eliminują potrzeby realizacji nowych inwestycji liniowych, które są oczywistym kierunkiem, prowadzącym do zwiększenia zdolności przesyłowych sieci elektroenergetycznej. Krajową sieć przesyłową tworzy obecnie 281 linii o łącznej długości 15 316 km, w tym: 111 linii o napięciu 400 kV o łącznej długości 7 822 km, 169 linii o napięciu 220 kV o łącznej długości 7 380 km, 33 423 km linii napowietrznych o napięciu 110 kV oraz jedna linia o napięciu 750 kV o długości 114 km, a także podmorskie połączenie prądu stałego 450 kV o całkowitej długości 254 km (w tym 127 km po stronie polskiej) [115, 116]<sup>(1)</sup>. Cykliczne plany rozwoju sieci przesyłowej przewidują budowę kolejnych połączeń, co jest odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie na tego typu inwestycje. Operator Systemu Przesyłowego – Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. – zapowiedział, że KSE do 2030 r. zostanie rozbudowany o 3 600 km nowych linii 400 kV. Niestety budowa nowych linii napowietrznych wiąże się z poważnymi ograniczeniami natury administracyjno-prawnej i środowiskowej. Często preferowana trasa planowanej linii napowietrznej jest niemożliwa do realizacji z uwagi na lokalne i regionalne plany zagospodarowania przestrzennego, plany rozwoju poszczególnych gmin, a także ze względu na szczegółowe uwarunkowania środowiskowe, krajobrazowe, również te objęte szczególną ochroną [32, 43, 95, 102]. Dodatkowe utrudnienia pojawiają się także od strony społecznej, objawiając się powszechnym brakiem akceptacji dla budowy nowych linii napowietrznych, co w głównej mierze wynika z obaw przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego.

Istnieje zatem potrzeba znalezienia dodatkowego rozwiązania zapewniającego bezpieczny i sprawny przesył energii elektrycznej. Tym rozwiązaniem mogą okazać się wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne (WWLN). WWLN to wielotorowa linia napowietrzna wysokiego lub najwyższego napięcia, w której przynajmniej dwa tory prądowe, prowadzone na wspólnej konstrukcji wsporczej, mają różne napięcia znamionowe.

## Geneza pracy

Upowszechnianie się WWLN jest obserwowane w sieciach zagranicznych i krajowych [12, 27, 35, 50]. W polskich sieciach elektroenergetycznych pracuje obecnie osiem WWLN. Plan rozwoju sieci przesyłowej na lata 2021-2030 przewiduje budowę kolejnej linii tego typu [103]. W odpowiedzi na rosnący udział WWLN w strukturach krajowej sieci przesyłowej i rozdzielczej, zaistniała potrzeba poprawnego odwzorowania tego obiektu za pomocą odpowiednich modeli matematycznych. Wraz z pojawianiem się nowego typu elementu w systemie, konieczne jest opracowanie dla niego modelu matematycznego. Do tej pory stosowane są uproszczone modele matematyczne tych linii, zakładające ich symetryzację elektryczną i możliwość opisu przez podanie parametrów dla składowych symetrycznych. Z uwagi na zaistniałe potrzeby eksploatacyjne i analityczne, powstają nowe inicjatywy projektowe, których celem jest zapewnienie odpowiednich parametrów bezpieczeństwa oraz jakości energii elektrycznej, a także poprawnego odwzorowania zjawisk wynikających z obecności WWLN w badanych układach sieciowych.

Literatura krajowa i zagraniczna omawia wybrane aspekty związane z pracą WWLN, przy czym zdecydowana większość prac odnosi się do badań związanych z oddziaływaniem

---

<sup>1</sup> dane na koniec 2020 r.

pola elektromagnetycznego w ich otoczeniu [30, 31, 38, 40, 41, 59, 63, 79, 86, 91, 94, 98, 102, 109], gdzie m.in. przedstawia się metody zapewnienia możliwie najniższych wartości natężenia pola elektromagnetycznego, które osiąga się poprzez zastosowanie nowoczesnych konstrukcji słupów, odpowiedniej konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych. Prowadzi się również analizy wpływu natężenia pola elektrycznego oddziałującego na człowieka znajdującego się na konstrukcji wsporczej w celu wykonania prac eksploatacyjno-naprawczych. W efekcie, zidentyfikowano większe oddziaływanie w przypadku pracy przy torze prądowym o niższym napięciu znamionowym, z uwagi na dodatkowe oddziaływanie pola elektrycznego pochodzącego od torów o napięciach wyższych, przy czym zaznacza się, że ryzyko operacyjne jest nieznaczne w każdej lokalizacji człowieka na słupie [91]. Zagadnienia związane z modelowaniem i wyznaczaniem parametrów elektrycznych linii napowietrznych zostały szeroko opisane m.in. w [1÷6, 14, 15, 22, 23, 26, 33, 42, 54, 56, 61, 62, 68, 71, 82, 100, 108]. W kwestii modelowania WWLN obecnie najczęstszą praktyką jest korzystanie z programów symulacyjnych do badań stanów przejściowych [4, 64]. W dostępnej literaturze nie opisano w sposób bezpośredni algorytmu wyznaczania parametrów elektrycznych WWLN na potrzeby badań stanów ustalonych. Szereg publikacji porusza temat stanów przejściowych występujących w liniach wielotorowych, również wielonapięciowych, na skutek m.in. oddziaływań sąsiadujących torów prądowych, zjawisk ferorezonansu, aspektów związanych z napięciem powrotnym wyłącznika, pracą uziemników, działaniem elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (m.in. zabezpieczenia odległościowego i ziemnozwarciowego oraz występowania zakłóceń międzysystemowych) [12, 13, 24, 28, 52, 65, 83, 93]. Zauważono, że tory prądowe o niższych napięciach znamionowych pozytywnie wpływają na ochronę torów o napięciach wyższych w przypadku wystąpienia przeskoków odwrotnych [45, 46, 57]. Prace naukowe podejmujące tematykę WWLN w stanach pracy normalnej ograniczają się do analizy jednego typu zjawiska, skupiając się na wybranych konstrukcjach WWLN. Literatura podejmuje tematykę napięcia niezrównoważenia i sposobów jego redukcji, a także kwestii zapewnienia bezpieczeństwa pracy podczas czynności konserwatorskich linii napowietrznych [24, 44, 53, 55, 66, 85, 87]. Prowadzi się również analizy asymetrii napięć i prądów w systemie wprowadzanych przez linie wielotorowe [69, 76, 89, 90], a w liniach wielonapięciowych zauważa się znaczny wpływ wzajemnego oddziaływania torów prądowych szczególnie uwidaczniający się w torach o niższych napięciach roboczych [58, 77]. Wpływ różnorodności konstrukcji WWLN i jej wpływu na pracę sieci nie została do tej pory opisana w szerszej perspektywie.

### **Cel, teza i zakres pracy**

Głównym celem pracy jest:

- a) przeprowadzenie analiz korzyści związanych ze stosowaniem WWLN,
- b) opracowanie modelu matematycznego WWLN dla parametrów wzdłużnych i poprzecznych (dla wielkości fazowych oraz dla składowych symetrycznych),
- c) wskazanie i analiza zagrożeń dla pracy systemu po wprowadzeniu niesymetrycznej impedancyjnie WWLN, ze szczególnym uwzględnieniem toru o najniższym napięciu znamionowym,
- d) wskazanie akceptowalnych zakresów długości linii oraz stosowanych modeli WWLN ze względu na wprowadzaną niesymetrię.

Realizacja tego celu pozwala postawić tezę mówiącą, że:

**Wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne w wielu sytuacjach mogą tworzyć korzystne technicznie i akceptowalne społecznie rozwiązanie koniecznej rozbudowy sieci elektroenergetycznej. Z punktu widzenia pracy systemu elektroenergetycznego, linie te – ze względu na swoją konstrukcję – wprowadzają niesymetrię napięć i prądów, głównie w torze o najniższym napięciu znamionowym, jednak niesymetria ta może zostać skutecznie zminimalizowana przez odpowiedni dobór układu faz na konstrukcji wsporczej lub pojedyncze przeploty przewodów roboczych.**

W celu udowodnienia postawionej tezy, w ramach niniejszej pracy:

- a) przeprowadzono przegląd literatury w zakresie korzyści i zagrożeń związanych ze stosowaniem WWLN,
- b) wykorzystano opracowany model matematyczny do wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN,
- c) stosując opracowany model matematyczny, przeprowadzono analizy pracy WWLN w systemie elektroenergetycznym dla stanów ustalonych i quasi-ustalonych, w tym:
  - i. dokonano porównania wyników obliczeń rozptyłów mocy i napięć węzłowych przy zastosowaniu różnych modeli WWLN,
  - ii. dokonano porównania wyników obliczeń prądów zwarciovych w zależności od zastosowanego modelu WWLN,oceniając wpływ niesymetrii geometrycznej WWLN na wartości wybranych parametrów jakościowych charakteryzujących poprawną pracę sieci przesyłowo-rozdzielczej oraz wartości prądów zwarciovych,
- d) wskazano możliwości i potrzeby symetryzacji WWLN w zależności od jej parametrów.

## Zakres pracy

W pierwszym rozdziale pracy przeprowadzono przegląd literatury w zakresie podejmowanych działań w celu zwiększania zdolności przesyłowej sieci elektroenergetycznej w odpowiedzi na nieustający wzrost zapotrzebowania na moc i energię elektryczną. Wskazano budowę WWLN jako jedno z działań operatorów skutkujące dynamicznym rozwojem sieci przesyłowo-rozdzielczej. Dokonano również przeglądu publikacji, których tematyka skupia się wokół analiz związanych z pracą WWLN.

W rozdziale drugim scharakteryzowano WWLN, wskazując i omawiając ich główne zalety oraz wyzwania związane z ich pracą w systemie elektroenergetycznym. Przedstawiono różne rodzaje konstrukcji wsporczych na przykładzie rzeczywistych WWLN występujących w Europie, także w Polsce.

Rozdział trzeci omawia proces tworzenia modelu matematycznego WWLN w postaci macierzy admitancyjnych dla parametrów wzdłużnych i poprzecznych dla wielkości fazowych oraz składowych symetrycznych. Model przeznaczony jest do odwzorowania WWLN w stanach pracy normalnej (stany ustalone) oraz stanach zakłóceń do wyznaczenia początkowych prądów zwarcia (stany quasi-ustalone). Utworzony model WWLN ( $n$ -torowej, wielonapięciowej linii napowietrznej) jest uniwersalny i uwzględnia takie elementy jak oddziaływanie przewodów odgromowych, występowanie przewodów wiązkowych oraz

zróznicowanie poziomów napięć znamionowych torów prądowych WWLN. Dodatkowo omówiono algorytm uproszczenia modelu matematycznego WWLN, czego efektem jest model symetryczny WWLN. Rozwinięcie poszczególnych etapów tworzenia modelu matematycznego WWLN zawarto w załączniku.

Rozdział czwarty zawiera analizy natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN oraz napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci o najniższym napięciu znamionowym (napięcie kolejności zerowej  $U_0$ ). Analizy te wykonano dla WWLN pracującej w odosobnieniu, tj. zasilanej z jednej strony i obciążonej impedancyjnie z drugiej. Przeprowadzono obliczenia i analizy, które wskazują, że tor prądowy o najniższym napięciu znamionowym jest najbardziej narażony na skutki asymetrii geometrycznej WWLN, która objawia się poprzez wprowadzane niesymetrie impedancyjne i pojemnościowe. Przeprowadzono analizę jakości napięcia poprzez wyznaczenie wybranych wskaźników jakościowych w postaci wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii występujących w torze prądowym o najniższym napięciu. Dokonano analizy zwarciowej, w której symulowano wystąpienie zwarcia w torze o najniższym napięciu znamionowym, badając błędy przy wyznaczaniu prądów zwarcia w miejscu jego wystąpienia oraz udziałów gałęziowych prądów zwarciowych od strony toru objętego zwarcie, badając wpływ zastosowanego modelu matematycznego (dokładnego – wyznaczonego w rozdziale 3 i uproszczonego-symetrycznego) na dokładność odwzorowania prądów zwarciowych w badanych węzłach. Szczegółowe wyniki analiz zostały opisane dla pięciu wybranych WWLN charakteryzujących się różnym stopniem niesymetrii geometrycznej oraz konfiguracją poszczególnych torów tych linii o różnych napięciach znamionowych. W ramach każdego z wymienionych etapów przeanalizowano szereg scenariuszy, które uwzględniały zmianę m.in. długości WWLN, układu przewodów fazowych, kąty fazowe napięć zasilających WWLN (wynikające z warunków ruchowych linii napowietrznych). Celem prowadzonych analiz było przedstawienie zjawisk występujących w WWLN i ich bezpośredniego otoczenia sieciowego na skutek wprowadzanych niesymetrii.

W rozdziale piątym skupiono się na poprawie warunków pracy WWLN. Poszukiwano kompromisowej konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych analizowanych WWLN, która zapewniałaby zadowalające rezultaty, biorąc pod uwagę wszystkie założone wielkości kryterialne wynikające z analiz prowadzonych w rozdziale 4. Przeanalizowano również możliwość zastosowania częściowej symetryzacji WWLN. Jednym z celów prowadzonych badań było określenie możliwości zwiększenia maksymalnej długości WWLN, dla której nie zostają przekroczone dopuszczalne poziomy wielkości kryterialnych.

W rozdziale szóstym przeprowadzono analizy współpracy wybranych WWLN z niesymetrycznym otoczeniem sieciowym, określając wpływ niesymetrii WWLN na pracę najbliższego otoczenia sieciowego, skupiając się na wybranych parametrach jakości energii elektrycznej. Wykorzystując przeplot przewodów fazowych WWLN oraz zmianę sposobu zasilania poszczególnych jej odcinków uzyskano poprawę wskaźników asymetrii.

Wszystkie przedstawione w pracy analizy i obliczenia, w tym implementacja modelu matematycznego WWLN ( $n$ -torowej wielonapięciowej linii napowietrznej), zostały zrealizowane z wykorzystaniem programu komputerowego MATLAB R2020a (numer licencji: 40876907). Obliczenia analityczne zrealizowano z wykorzystaniem autorskich skryptów, następnie wyniki przeprowadzonych obliczeń zweryfikowano za pomocą dostępnego komercyjnie oprogramowania, np. Power Factory.

## 2 CHARAKTERYSTYKA WWLN

Stosowanie WWLN niesie za sobą wiele korzyści i wyzwań. Do głównych zalet, którymi charakteryzują się WWLN należą:

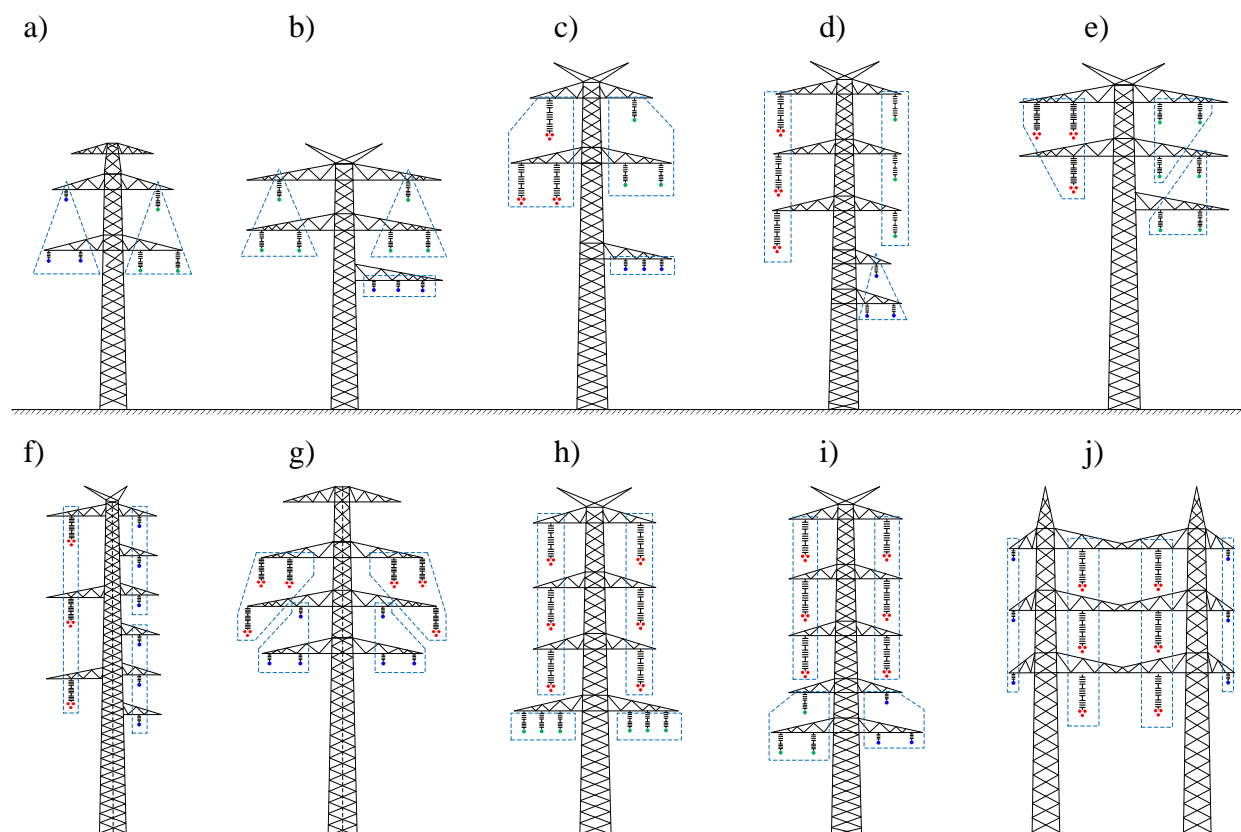
- ✓ intensyfikacja wykorzystania terenu zajmowanego przez linie napowietrzne,
- ✓ zmniejszenie oddziaływania elementów sieci przesyłowo-rozdzielczej na krajobraz i środowisko naturalne poprzez:
  - ✓ możliwość redukcji maksymalnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii napowietrznych,
  - ✓ zmniejszenie liczby konstrukcji wsporczych,
  - ✓ redukcję wycinki lasów,
- ✓ ułatwienie prowadzenia ciągów liniowych na terenach trudnych do zagospodarowania (tereny silnie zurbanizowane z dużą gęstością zabudowy, leśne, górzyste),
- ✓ usprawnienie rozbudowy sieci przesyłowo-rozdzielczej, dynamiczny rozwój tej sieci.

Do wyzwań i zagrożeń, które niosą ze sobą konstrukcje wielotorowe, wielonapięciowe należą:

- \* konieczność stosowania dedykowanych konstrukcji wsporczych,
- \* zagrożenie wystąpienia zakłóceń międzysystemowych, w tym komplikacja algorytmów działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej,
- \* utrudniona eksploatacja, w tym realizacja prac pod napięciem,
- \* niesymetria geometryczna rzutująca na pracę linii napowietrznej i jej otoczenia sieciowego – oddziaływanie torów prądowych o różnych napięciach znamionowych,
- \* złożone modele matematyczne opisujące WWLN.

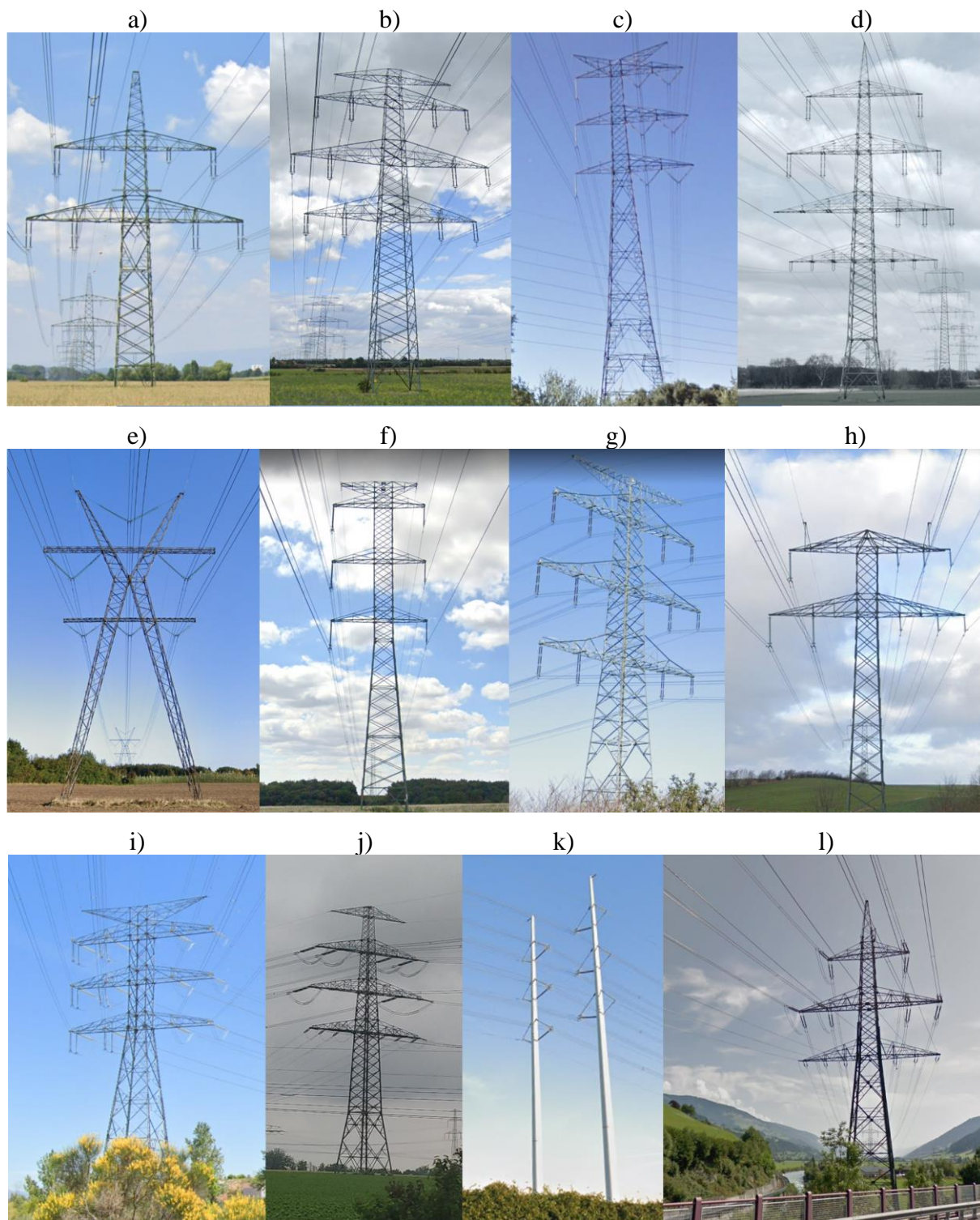
Rozwiązania konstrukcyjne WWLN są bardzo różne (rys. 2.1). Doświadczenia praktyczne wynikające z budowy linii napowietrznych o kilku poziomach napięciowych pokazują, że dominującym rozwiązaniem jest umieszczenie torów o najwyższej wartości napięcia (400 kV) na najwyższych poprzecznikach, natomiast przewody będące torami linii o niższych napięciach (220 kV, 110 kV) są zawieszane na niższych poprzecznikach. Rozwiązanie takie wynika z minimalizacji ryzyka uszkodzenia linii 400 kV wskutek zerwania przewodu linii 110 kV. Przyjmuje się zapewnienie większej niezawodności sieci 400 kV, stąd zawieszenie tego toru na wyższych poprzecznikach powoduje, że zerwanie przewodu w torze 110 kV nie spowoduje ryzyka zwarcia pomiędzy tymi dwoma poziomami napięciowymi. Dodatkowym aspektem przemawiającym za umiejscowieniem torów najwyższych napięć na najwyższych poprzecznikach, jest zjawisko wzajemnej kompensacji składowej elektrycznej natężenia pola elektromagnetycznego pod linią napowietrzną, zachodzące wskutek obecności torów o innych poziomach napięcia. Takie ułożenie pozwala na zapewnienie szerokości pasa technologicznego na poziomie 44 metrów, podczas gdy w dwutorowej linii 400 kV szerokość wymaganego pasa technologicznego to 70 metrów. Na określenie szerokości pasa technologicznego wpływa również odpowiednie wymiarowanie wewnętrzne wykorzystywanych konstrukcji wsporczych. Wymagania dotyczące wewnętrznych odstępów izolacyjnych są realizowane poprzez odpowiedni wybór sylwetki i gabarytów słupa oraz

długości łańcuchów izolatorów. Zachowanie wymaganych odległości między przewodami a trzonem słupa, osiąga się poprzez odpowiedni wysięg poprzecznika. Wewnętrzne odstępy izolacyjne zależą w dużej mierze od poziomu napięcia znamionowego oraz warunków terenowych przez które jest prowadzona linia napowietrzna. Doświadczenia praktyczne pokazują, że wykorzystywane w liniach wielotorowych, wielonapięciowych słupy stalowe są zbudowane jako symetryczne, o jednakowych długościach poprzeczników po obu stronach słupa. Ponadto można zauważyć, że w liniach obejmujących trzy poziomy napięciowe (400 kV, 220 kV i 110 kV) wymiary geometryczne odstępów izolacyjnych dla toru 110 kV są zazwyczaj takie same jak dla toru 220 kV. Rozwiązanie takie w nieznacznym stopniu wpływa na wymagane nakłady inwestycyjne do budowy linii, jednak w przyszłości, wskutek działań w zakresie rozwoju sieci przesyłowej, w łatwy sposób pozwoli na wykorzystanie istniejącego toru 110 kV do pracy na napięciu 220 kV. Podwyższenie napięcia znamionowego toru 110 kV w rozpatrywanym przypadku będzie możliwe po wymianie przewodu roboczego, wynikającej ze zjawiska ulotu, jak również po wymianie elementów izolacyjnych na osprzęt dedykowany liniom 220 kV. Dodatkowe aspekty związane z konstrukcją WWLN opisano w załączniku 8.2.



Rys. 2.1 Przykładowe układy torów prądowych na konstrukcjach wsporczych WWLN

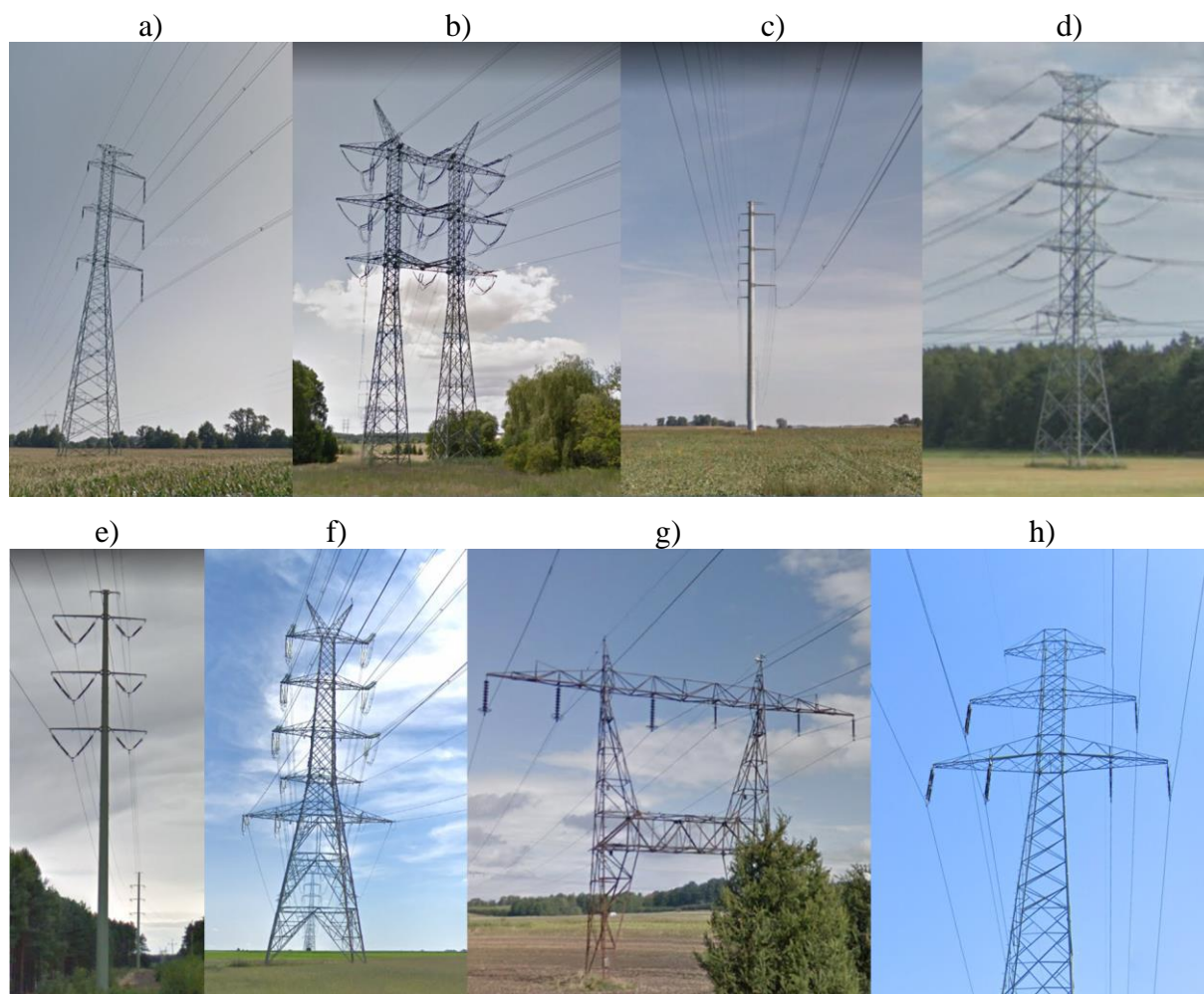
Rozwiązanie w postaci wielotorowych, wielonapięciowych linii przesyłowych znalazło uznanie w wielu krajach na świecie, w tym w Polsce, przez co obserwuje się znaczący wzrost udziału tych linii w strukturach sieci przesyłowo-rozdzielczych. Rysunek 2.2 przedstawia przykładowe WWLN w Europie, a rysunek 2.3 WWLN pracujące w KSE.



**Rys. 2.2 Przykłady rzeczywistych WWLN w Europie [111]**

**a) trójtorowa 2×380+110 kV (Austria), b) czterotorowa 2×220+2×110 kV (Austria), c) trójtorowa 400+2×220 kV (Hiszpania), d) pięcitorowa 2×400+220+110 kV (Niemcy) [112], e) dwutorowa 400+150 kV (Szwajcaria), f) dwutorowa 400+220 kV (Czechy), g) czterotorowa 3×400+220 kV (Czechy), h) trójtorowa 400+2×150 kV (Szwajcaria), i) czterotorowa 2×400+2×220 kV (Hiszpania), j) czterotorowa 2×380+2×110 kV (Niemcy), k) czterotorowa 2×380+2×150 kV (Holandia), l) czterotorowa 2×380+2×110 kV (Austria)**





**Rys. 2.3 Przykłady rzeczywistych WWLN w Polsce [111, 115]**  
**a) dwutorowa 400+110 kV, b) trójtorowa 2×400+220 kV, c) trójtorowa 400+2×110 kV,**  
**d) trójtorowa 2×400+220 kV, e) dwutorowa 220+110 kV, f) czterotorowa 2×400+220+110 kV,**  
**g) dwutorowa 220+110 kV (tor 220 kV nieczynny), h) dwutorowa 220+110 kV**

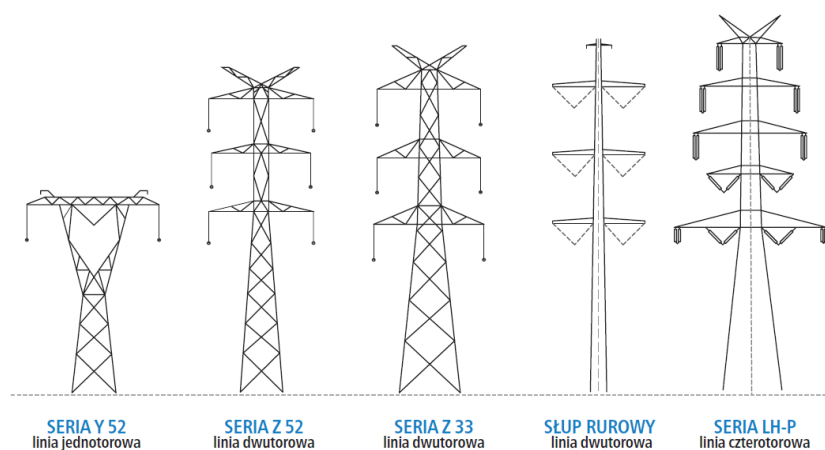
Przedstawione przykłady konstrukcji WWLN w Europie, w tym w Polsce, charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem stopnia niesymetrii geometrycznej. Spotyka się warianty wszystkich sposobów prowadzenia torów prądowych, tj. połączenia układów płaskich i trójkątnych (rys. 2.2d,e,h,j,l), układów pionowych (rys. 2.2c,f,g,k, rys. 2.3a,c,e), itp. Często spotyka się rozwiązania, w których przewody fazowe należące do torów prądowych o różnych napięciach znamionowych są prowadzone na wspólnym poprzeczniku (rys. 2.2a,b,g). Zachowanie odstępów izolacyjnych jest tu istotną kwestią.

W Polsce WWLN nie stanowią na razie istotnego udziału w sieciach przesyłowej i rozdzielczej jednak zalety jakimi się cechują sprawia, że planuje się ich dalszy rozwój, o czym świadczą plany rozwojowe sieci przesyłowej na nadchodzące lata [103]. Na świecie stosunek liczby WWLN w odniesieniu do wszystkich linii napowietrznych jest znacznie większy. Przykładowo w Danii prawie 40% linii przesyłowych 400 kV jest konstrukcji wielonapięciowej. Generalnie spotyka się odcinki WWLN o niewielkich (poniżej 10 km) oraz średnich długościach (od 10 km do 100 km). W niektórych krajach występują również WWLN przekraczające 100 km (Dania, Francja, Szwajcaria, Niemcy).

Dobrze zaprojektowana konstrukcja wsporcza WWLN znacząco nie przewyższa gabarytowo linii tradycyjnych (rys. 2.4, rys. 2.5), natomiast efekt jaki daje prowadzenie wielu torów prądowych na wspólnej konstrukcji wsporczej jest znaczący (tab. 2.1, rys. 2.6).



Rys. 2.4 Porównanie gabarytów WWLN  $2 \times 380 + 2 \times 110$  kV i klasycznej linii dwutorowej  $2 \times 220$  kV (Dalfsen, Holandia)



Rys. 2.5 Sylwetki typowych słupów przelotowych 400 kV oraz sylwetka prototypowego słupa czterotorowego  $2 \times 400 + 2 \times 220$  kV [109]

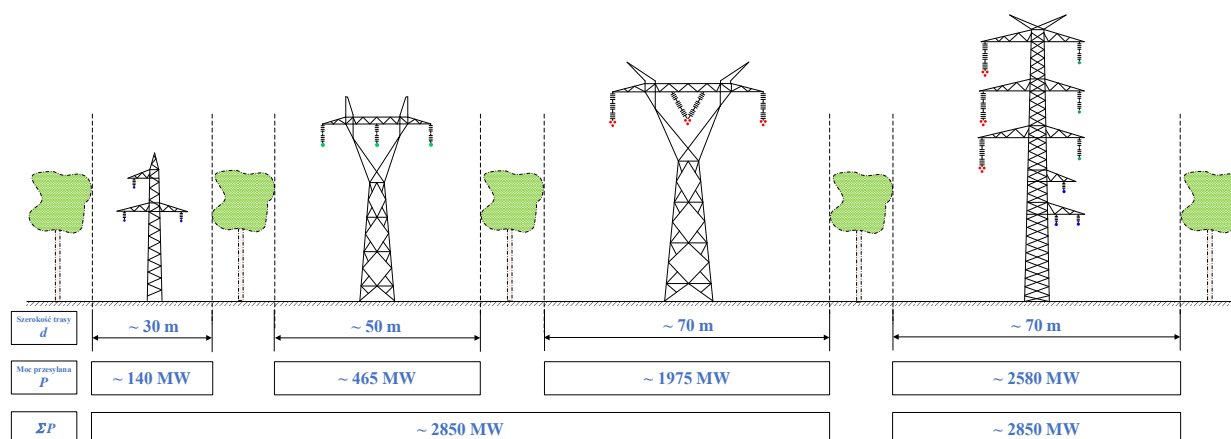
Szerokość trasy potrzebna do prowadzenia linii napowietrznej jest kompromisem między aspektami technicznymi gwarantującymi poprawną pracę sieci, uwarunkowaniami terenowymi, gabarytami konstrukcji wsporczej linii przesyłowej oraz bezpieczeństwem innych urządzeń i organizmów żywych znajdujących się w jej otoczeniu [32, 95]. Podwyższanie napięć przesyłowych z równoczesnym prowadzeniem linii na wspólnej konstrukcji pozwala znacznie ograniczyć łączną szerokość pasa linii. Przykładowo jedna dwutorowa linia o napięciu 400 kV jest w stanie przesłać tyle mocy, co cztery jednotorowe linie 220 kV lub piętnaście jednotorowych linii 110 kV, przy czym teren zajmowany przez linię dwutorową 400 kV wynosi około 70 metrów, i odpowiednio linie o napięciu 220 kV zajmują 200 m, linie o napięciu 110 kV około 450 m [109]. Na rysunku 2.6 przedstawiono sytuację prowadzenia trzech linii jednotorowych, jednonapięciowych na niezależnych trasach oraz linii trójtorowej, trójnapięciowej. Oszacowano moce przesyłane rozważanymi liniami  $P$  oraz oznaczono szerokości pasów ochronnych tych linii  $d$ . W tabeli 2.1 przedstawiono różne scenariusze przesyłu mocy dla poszczególnych rozwiązań liniowych.

**Tab. 2.1 Porównanie scenariuszy przesyłu mocy  $\Sigma P = 3100$  MW jednotorowymi, jednonapięciowymi liniami napowietrznymi i WWLN**

Scenariusz przesyłu mocy $\Sigma P$	$\Sigma d$ , m	$\Sigma P/\Sigma d$ , MW/m	$\Sigma P/\Sigma d$ , -
Linie jednotorowe, jednonapięciowe na niezależnych trasach (rys. 2.6)	150	17,20	1,00
Linie 220 i 110 kV na trasach równoległych	130	19,85	1,15
Linie 400 i 110 kV na trasach równoległych	125	20,64	1,20
Linie 400 i 220 kV na trasach równoległych	120	21,50	1,25
Linie 400, 220 i 110 kV na trasach równoległych	100	25,80	1,50
Linia trójtorowa, trójnapięciowa 400+220+110 kV	70	36,86	2,14

Z uwagi na konieczność zapewnienia sporego obszaru do prowadzenia linii napowietrznych, przyjętą praktyką jest prowadzenie linii na trasach równoległych, często w pasie technologicznym innej linii przesyłowej [32]. Dzięki takiemu zabiegowi możliwa jest redukcja sumarycznej szerokości pasa ochronnego  $\Sigma d$ , gdzie najlepszy efekt, dla analizowanego przypadku, uzyskuje się przy prowadzeniu linii jednotorowych 400 i 220 kV na trasach równoległych. Prowadzenie wszystkich trzech linii w takiej konfiguracji pozwala na ograniczenie niezbędnego terenu o 50 metrów. Dalsza redukcja szerokości pasa technologicznego prowadzi do zastosowania wspólnej konstrukcji wsporczej. Ostatecznie, w analizowanym przypadku, zastosowanie WWLN pozwala zredukować szerokość terenu przeznaczanego na prowadzenie linii napowietrznej ponad dwukrotnie. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie WWLN zwiększyło stosunek przesyłanej mocy do sumarycznej szerokości trasy również ponad dwukrotnie ( $\Sigma P/\Sigma d = 2,14$ ), intensyfikując wykorzystanie terenu zajmowanego przez elementy sieci przesyłowo-rozdzielczej.

WWLN pozwala na ograniczenie negatywnego oddziaływania linii napowietrznych na środowisko w aspekcie ograniczenia obszaru zajmowanego przez inwestycję elektroenergetyczną [43], a co za tym idzie minimalizacji wystąpienia sytuacji, w których następuje nagromadzenie ciągów linii napowietrznych występujących w bliskim sąsiedztwie obszarów gęsto zaludnionych czy przechodzących przez tereny leśne.



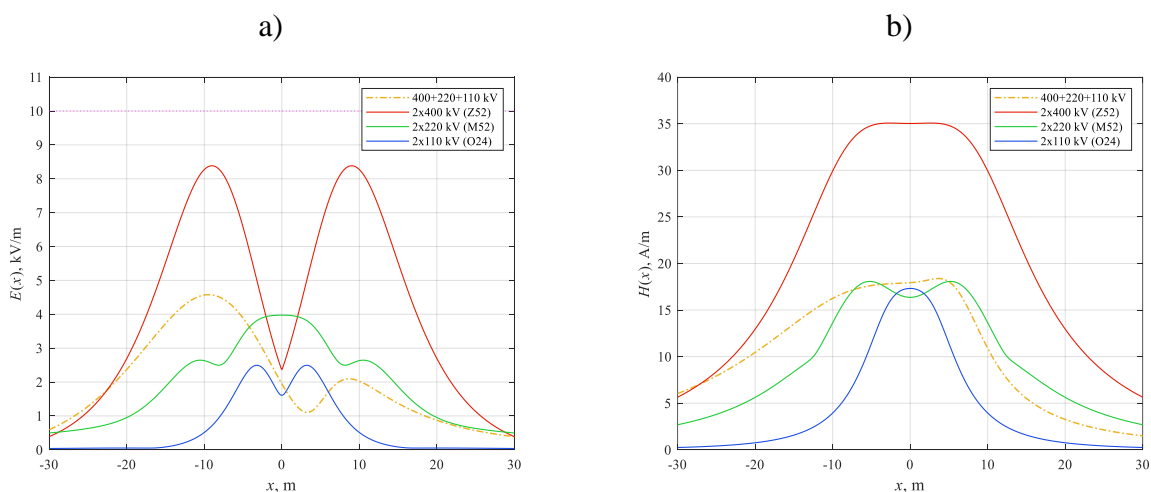
**Rys. 2.6 Ilustracja intensyfikacji wykorzystania terenu zajmowanego przez linie napowietrzne poprzez zastosowanie konstrukcji wielonapięciowej**

Warto zaznaczyć, że wykorzystanie konstrukcji wielotorowej, wielonapięciowej umożliwia zapewnienie ciągłości dostaw energii, gdy istnieje potrzeba prowadzenia linii przesyłowej na terenach szczególnie trudnych do prowadzenia tego typu połączeń, takich jak tereny góryste (rys. 2.2l). Warto dodać, że zastosowanie słupów pełnościennych w jeszcze większym stopniu pozwala na zmniejszenie gabarytów konstrukcji wsporczej linii napowietrznej, a co za tym idzie szerokości pasa ochronnego [78, 80]. Tego typu konstrukcje można spotkać np. w Holandii (rys. 2.2k) i Polsce (rys. 2.3c,e). Wciąż pojawiają się nowe rozwiązania konstrukcyjne słupów pełnościennych [41]. W Wielkiej Brytanii w 2021 roku powstała linia konstrukcji typu T-Pylon (rys. 2.7) [114].



Rys. 2.7 Konstrukcja typu T-Pylon projektowana na napięcie znamionowe 275 kV i 400 kV

Obecne problemy pojawiające się w procesie rozbudowy infrastruktury sieciowej w głównej mierze wynikają z braku akceptacji społecznej podyktowanej obawami przed oddziaływaniem elektromagnetycznym napowietrznych linii przesyłowych wysokiego i najwyższego napięcia [102, 109]. Ze względu na fakt, że konstrukcja WWLN charakteryzuje się zwiększoną liczbą przewodów oraz niekiedy gabarytami przewyższającymi tradycyjne linie napowietrzne jednotorowe lub dwutorowe, niepokój społeczny związany z budową takich linii jest jeszcze większy. Liczne badania [29, 70, 109] wykazały, że obawy te są nieuzasadnione.



Rys. 2.8 Natężenie pola a) elektrycznego, b) magnetycznego w otoczeniu tradycyjnych dwutorowych, jednonapięciowych linii napowietrznych oraz linii trójtorowej, trójnapięciowej z rys. 2.6<sup>(2)</sup>

<sup>2</sup> Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w miejscu największego zwisu przewodów na wysokości dwóch metrów nad ziemią. Linie obciążono prądami dopuszczalnymi długotrwale zgodnie z tab. 1.2.

Na rysunku 2.8 przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego trójtorowej, trójnapięciowej linii napowietrznej pokazanej na rysunku 2.6, na tle analogicznych rozkładów dla tradycyjnych linii dwutorowych, jednonapięciowych. Należy zauważyć, że przy zastosowaniu WWLN<sup>(3)</sup> możliwe jest osiągnięcie mniejszej maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego  $E$  niż dla tradycyjnej linii 400 kV. W obszarze w którym tor prądowy 220 kV jest prowadzony nad torem 110 kV natężenie pola  $E$  jest również mniejsze niż w przypadku linii 220 kV i 110 kV, a maksymalne natężenie pola magnetycznego linii trójnapięciowej jest na poziomie  $H_{\max}$  tych linii. WWLN nie wpływają na pogorszenie się warunków oddziaływania pola elektromagnetycznego pochodzącego od linii napowietrznych na środowisko naturalne.

Prowadzenie kilku torów prądowych o różnych napięciach znamionowych na wspólnej konstrukcji wsporczej, wiąże się z występowaniem wzajemnych oddziaływań tych torów prądowych na siebie. Oddziaływania te, z uwagi na niesymetrię geometryczną linii napowietrznych, są przyczyną wielu zagrożeń występujących w normalnych stanach pracy sieci przesyłowej. Wspomniane zagrożenia wynikają zatem z wprowadzanej przez WWLN niesymetrii impedancyjnej i pojemnościowej. Szczegółowe analizy wybranych wyzwań związanych z upowszechnianiem się WWLN w strukturach sieci przesyłowej oraz sposobów ograniczenia ich wpływu na poprawną pracę tej sieci są jednym z głównych celów niniejszej pracy, stąd zostaną omówione szerzej w dalszej jej części. Odniesiono się do następujących aspektów pracy WWLN i ich potencjalnych zagrożeń wpływających na najbliższe otoczenie sieciowe, poprzez:

- wskazanie sposobu odwzorowania WWLN w strukturze sieci przesyłowej w postaci modeli admitancyjnych dla parametrów wzdłużnych i poprzecznych uwzględniających zróżnicowaną budowę poszczególnych torów prądowych i ich napięć roboczych,
- szerszą analizę generowanych przez WWLN natężeń pola elektrycznego i magnetycznego,
- wyznaczenie napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci o najniższym napięciu znamionowym (napięcie zerowe  $U_0$ ) z uwagi na wprowadzaną przez WWLN niesymetrię pojemnościową,
- wyznaczenie wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii w szczególności w torach o najniższym napięciu znamionowym wynikających z niesymetrii impedancyjnej WWLN, oraz
- ocenę wpływu rodzaju zastosowanego modelu do opisu WWLN poprzez wyznaczenie procentowych błędów względnych prądów zwarcia w torze o najniższym napięciu znamionowym.

---

<sup>3</sup> przy odpowiednim ułożeniu przewodów fazowych w torach prądowych WWLN

### 3 MODELE WWLN I ICH PARAMETRY

Rozwój WWLN w strukturach systemów elektroenergetycznych niesie za sobą konieczność ich odpowiedniego opisu w postaci modelu matematycznego. W rozdziale tym omówiono proces tworzenia modelu matematycznego  $n$ -torowej wielonapięciowej linii napowietrznej dla stanów ustalonych, stosowanego do obliczeń rozptylowych oraz wyznaczania wartości początkowego prądu zwarcia i jego udziałów. Przez pojęcie model matematyczny rozumie się macierze admitancyjne parametrów wzdłużnych i poprzecznych WWLN dla wielkości fazowych oraz składowych symetrycznych. W rozdziale omówiono również algorytm wyznaczania natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN.

Zakłada się, że [2]:

- w rozważanym układzie sieciowym, w którym pracuje WWLN, częstotliwość jest równa częstotliwości znamionowej sieci  $f = 50$  Hz, a układ ten jest traktowany jako obwód elektryczny złożony z elementów pasywnych, statycznych, wówczas, w układzie sieciowym występują jedynie przebiegi ustalone (quasi-stacjonarne) o częstotliwości składowej podstawowej;
- sieć, jak i każdy z jej elementów, jest wielobramnikiem opisanym poprzez macierz admitancyjną;
- sieć, jak i każdy z jej elementów, jest elementem liniowym, co przekłada się na relację między prądami węzłowymi i napięciami węzłowymi opisaną zależnością (3.1):

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU}, \quad (3.1)$$

wskazującą, że prądy węzłowe są kombinacją liniową napięć węzłowych:

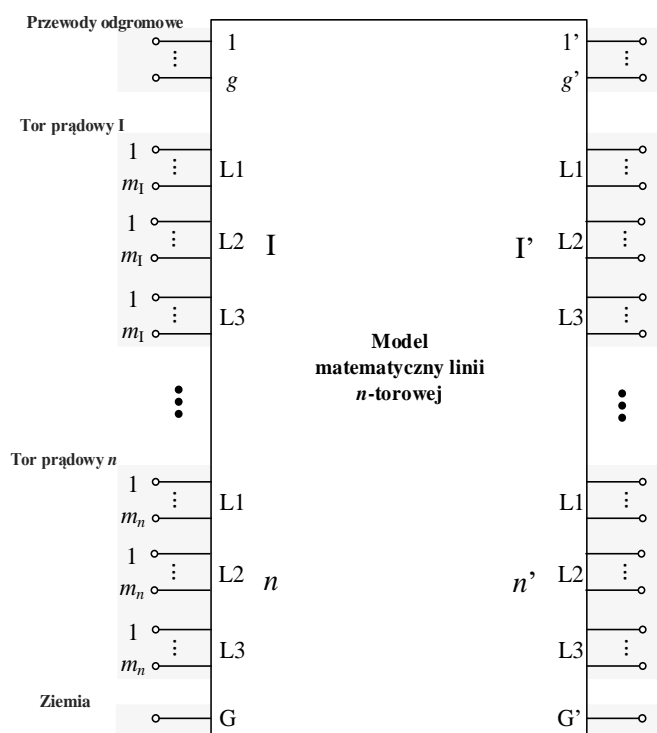
$$\underline{I}_j = \sum_{i=1}^W \underline{Y}_{ji} \underline{U}_i \quad \wedge \quad j \in W, \quad (3.2)$$

gdzie:  $W$  – liczba węzłów sieci / elementu,  $\mathbf{Y} = [\underline{Y}_{ji}]$ ,  $i, j \in W$  – macierz admitancyjna węzłowa sieci / elementu;

- WWLN jest symetryczna względem swoich krańców,
- przewody WWLN tworzą wraz z ziemią obwody ziemnopowrotne,
- pojemności skupione na krańcach WWLN rozważa się odrębnie,
- pomija się upływności WWLN.

Rozpatruje się  $n$ -torową trójfazową linię napowietzną o  $g$  przewodach odgromowych, zbudowaną z  $3n$  przewodów fazowych w postaci  $m$ -przewodowych wiązek. Rozważana linia napowietrzna jest linią wielonapięciową, tj. przynajmniej dwa tory prądowe tej linii mają różne napięcia znamionowe  $U_{ni} \neq U_{nj}$ , gdzie  $i, j$  – wybrane tory prądowe linii  $n$ -torowej  $i, j = \{I, II, \dots, n\}$ . WWLN traktuje się jak wielobramnik o liczbie zacisków zewnętrznych równych liczbie węzłów zewnętrznych linii. WWLN pozbawioną pojemności i upływności, według przyjętych założeń, przedstawia się obwodem o liczbie węzłów  $W$  i przedstawionym na rysunku 3.1:

$$W = 2 \cdot \left( 1 + 3 \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n m_i + g \right). \quad (3.3)$$



Rys. 3.1 Schemat blokowy  $n$ -torowej linii napowietrznej o  $g$  przewodach odgromowych oraz przewodach fazowych zbudowanych z  $m$ -przewodowych wiązek

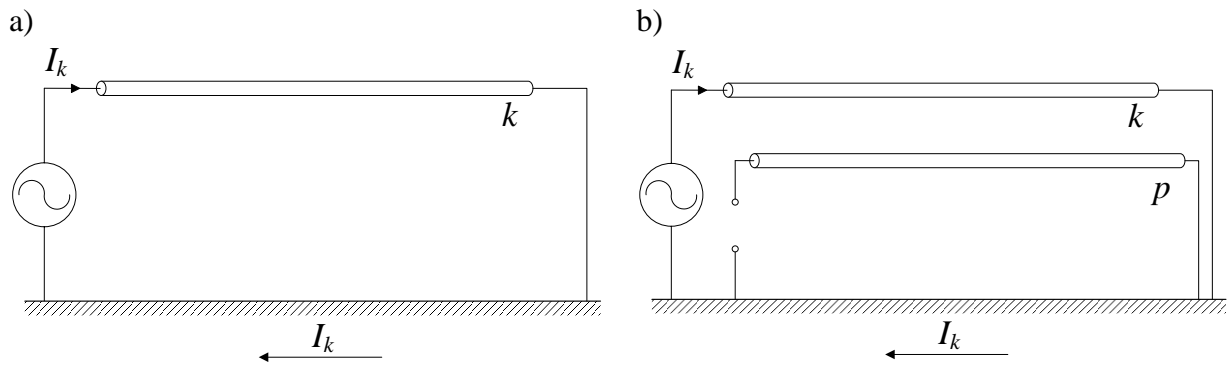
W obliczeniach napięć i prądów węzłowych nie uwzględnia się węzła o potencjale zerowym, którym jest ziemia. Z tego względu prowadzi się do utworzenia wspólnego potencjału odniesienia napięć poprzez eliminację ziemi. Dzięki liniowości układu sieciowego oraz przyjmując za węzeł odniesienia węzeł G (rys. 3.1) doprowadza się do przeniesienia impedancji ziemi do przewodów fazowych linii według algorytmu opisanego w [2]. W efekcie model matematyczny linii  $n$ -torowej jest opisany za pomocą macierzy admitancyjnej  $\mathbf{Y}$  o wymiarze  $W' \times W'$  współczynników kombinacji liniowej według (3.4):

$$W' = 2 \cdot \left( 3 \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n m_i + g \right). \quad (3.4)$$

Elementy macierzy admitancyjnej węzłowej są zdefiniowane następująco: element  $Y_{ii}$  na przekątnej głównej (admitancja własna węzła  $i$ ) jest równa sumie admitancji wszystkich gałęzi zbiegających się w węzle  $i$ , natomiast element  $Y_{ij}$ ,  $j \neq i$  poza przekątną główną (admitancja wzajemna węzłów  $i$  oraz  $j$ ) jest równy admitancji gałęzi łączącej węzły  $i$  oraz  $j$ , wziętej ze znakiem przeciwnym [2, 4, 6, 22].

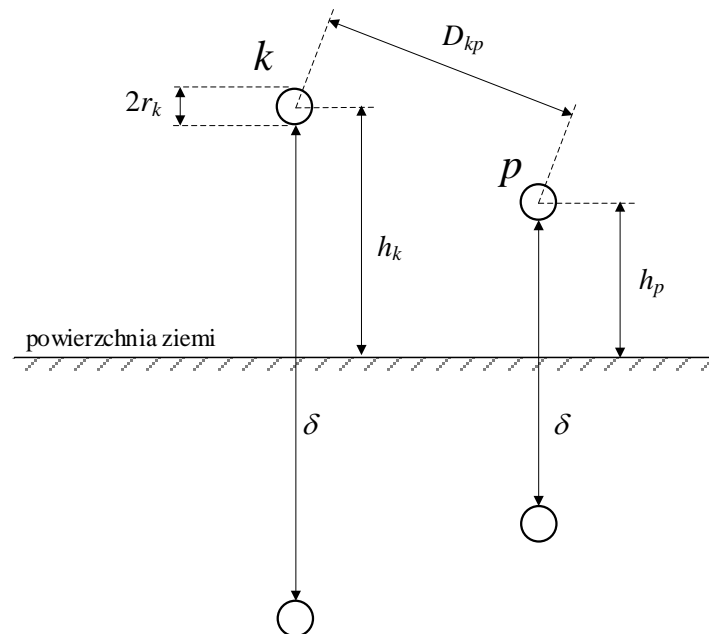
### 3.1 Parametry wzdlużne

Aparatem wykorzystywanym do opisu parametrów wzdlużnych elektroenergetycznych linii napowietrznych jest teoria obwodów ziemnopowrotnych. Obwodem ziemnopowrotnym lub pętlą ziemnopowrotną, w odniesieniu do linii napowietrznych, nazywa się przewód napowietrzny połączony z ziemią na jednym końcu i zasilony źródłem napięcia, którego jeden zacisk jest uziemiony (rys. 3.2a) [10].



Rys. 3.2 Obwód ziemnopowrotny a) jeden przewód napowietrzny, b) dwa przewody napowietrzne

W teorii obwodów ziemnopowrotnych, ziemia jest traktowana jako jednolita (homogeniczna) przewodząca półprzestrzeń o rezystywności  $\rho$ . Ziemię zastępuje się ekwiwalentnymi przewodami powrotnymi co przedstawia rysunek rys. 3.3 [22].



Rys. 3.3 Linia dwuprzewodowa z ziemią zastąpioną przez ekwiwalentne przewody powrotne

Układy obwodów ziemnopowrotnych charakteryzują impedancje własne i wzajemne. Impedancja własna obwodu ziemnopowrotnego składa się z dwóch głównych składników – impedancji własnej wewnętrznej przewodu, związanej z polem elektromagnetycznym we wnętrzu tego przewodu, tj. strumieniem mocy zespolonej wnikażącej do wnętrza przewodu przez jego powierzchnię zewnętrzną (zgodnie z twierdzeniem Poyntinga) oraz impedancji własnej zewnętrznej przewodu, która wynika z indukowanej w danym przewodzie siły elektromotorycznej wzbudzonej przez zewnętrzny strumień magnetyczny na skutek przepływu prądu w tym przewodzie. Impedancja wzajemna wynika z indukowanej w otwartym przewodzie  $p$  siły elektromotorycznej wzbudzonej przez strumień magnetyczny przenikający ten przewód, którego źródłem jest prąd płynący w przewodzie  $k$  (rys. 3.2b) [10].



Analizy Carsona i Pollaczka opublikowane w 1926 r. definiują zależności na jednostkowe impedancje własne (3.5) i wzajemne (3.6) obwodów ziemnopowrotnych dla częstotliwości sieciowej 50 Hz [25, 73]:

$$\underline{Z}_{kk} \approx R'_k + 0,049 + j0,145 \log \frac{\delta}{GMR}, \quad (3.5)$$

$$\underline{Z}_{kp} \approx 0,049 + j0,145 \frac{\delta}{D_{kp}}, \quad (3.6)$$

gdzie:

$R'_k$  – rezystancja jednostkowa przewodu napowietrznego w temperaturze  $t_1 = +20^\circ\text{C}$ , w  $\Omega/\text{km}$ ,

$$R'_k = \frac{1000}{\gamma \cdot s}, \quad (3.7)$$

przy czym jeżeli wyznacza się rezystancję przewodu w temperaturze  $t_2 \neq t_1 = +20^\circ\text{C}$ , należy korzystać ze wzoru (3.8):

$$R'_{t_2} = R'_k \cdot [1 + \alpha \cdot (t_2 - t_1)], \quad (3.8)$$

$\alpha$  – współczynnik temperaturowy rezystancji równy w przybliżeniu 0,004 1/K [22],

$s$  – przekrój poprzeczny oplotu przewodzącego, w  $\text{mm}^2$ ,

$\gamma$  – konduktywność materiału przewodzącego, w MS/m,

$\delta$  – wielkość interpretowana jako odległość rozważanego przewodu napowietrznego od fikcyjnego przewodu znajdującego się w ziemi (rys. 3.3), w m; wyznaczana zgodnie z zależnością (3.9):

$$\delta = 93,1 \sqrt{\rho}, \quad (3.9),$$

$\rho$  – średnia rezystywność drogi powrotnej prądu, w  $\Omega \cdot \text{m}$ ; przyjmowana w zależności od rodzaju gleby według tabeli 3.1,

**Tab. 3.1** Typowe wartości średniej rezystancji drogi powrotnej  $\rho$  w zależności od rodzaju gleby oraz odpowiadające im odległości  $\delta$  [22]

Droga powrotna prądu	$\rho$ , $\Omega \cdot \text{m}$	$\delta$ , m
Woda morską	0,01 ÷ 1,0	9,3 ÷ 93
Grunt bagnisty	10 ÷ 100	294 ÷ 931
Wilgotna ziemia	100	931
Sucha ziemia	1000	2944

$D_{kp}$  – odległość między rozważaną parą przewodów  $k$  oraz  $p$ , w m,

$GMR$  – geometryczny promień zastępczy przewodu (ang. *geometric mean radius*), w m; w przypadku pojedynczego, jednolitego przewodu, niebędącego linką,  $GMR$  wyznacza się jako:

$$GMR = r_k \cdot e^{-1/4} = 0,7788 \cdot r_k, \quad (3.10)$$

lub jeżeli przewód jest wykonany z materiału magnetycznego:

$$GMR = r_k \cdot e^{-\mu_r/4}, \quad (3.11)$$

gdzie  $r_k$  – promień przewodu,  $\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna materiału, z którego wykonany jest przewód [4, 92].

Przewody linii napowietrznych są wykonane najczęściej w postaci linek skręconych z drutów ułożonych na przemian w lewoskrętnych i prawoskrętnych warstwach oplotowych (rys. 3.4) [22], jak np. AL – przewód aluminiowy, AFL – przewód stalowo-aluminiowy.



Rys. 3.4 Budowa przykładowego przewodu stalowo-aluminiowego AFL

Dla takiej budowy przewodu wielkość  $GMR$  jest wyznaczana na podstawie geometrii warstw aluminiowych za pomocą zależności (3.12) [18]:

$$GMR = \sqrt[w^2]{\prod_{k=1}^w \prod_{p=1}^w d_{kp}}, \quad (3.12)$$

gdzie  $d_{kp}$  – odległość między środkiem symetrii drutów aluminiowych  $i$  oraz  $j$ ,  $w$  – liczba warstw aluminiowych tworzących linkę.

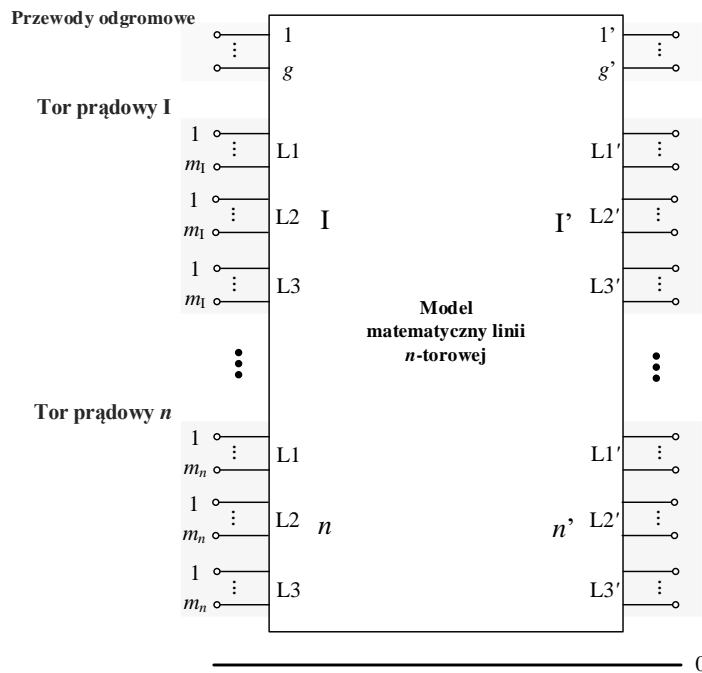
Dla najczęściej spotykanych rozwiązań przewodów przyjmuje się  $GMR$  zgodnie z tabelą 3.2.

Tab. 3.2 Przeciętne wartości  $GMR$  dla typowych przewodów linii napowietrznych [6]

Rodzaj przewodu	$GMR$
linki stalowo-aluminiowe o kilku warstwach aluminiowych (AFL-6, AFL-8)	$(0,80 \div 0,82)r_k$
przewody z jedną warstwą drutów aluminiowych (AFL-1,7)	$(0,35 \div 0,70)r_k$
linki wielodrutowe z materiałów niemagnetycznych bez rdzenia stalowego (AL, L)	$(0,72 \div 0,77)r_k$
przewody jednodrutowe wykonane z materiałów niemagnetycznych	$0,78r_k$

## 3.1.1 Model impedancyjny i admitancyjny dla wielkości fazowych

Zgodnie z przyjętą metodyką,  $n$ -torową linię napowietrzną przedstawia się jako układ obwodów ziemnopowrotnych. Obwód ziemnopowrotny tworzy każdy z  $N$  przewodów napowietrznych linii, w tym każdy przewód składowy wiązki  $m$ -przewodowej oraz każdy z  $g$  przewodów odgromowych. W efekcie otrzymuje się schemat blokowy linii będący obwodem  $W'$ -węzłowym, zgodnie z (3.4).



Rys. 3.5 Schemat blokowy WWLN

Podstawowa zależność między prądami i napięciami węzłowymi WWLN (rys. 3.5) dana jest zależnością (3.13):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{U}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{Z}_{EL}^T \\ \mathbf{Z}_{EL} & \mathbf{Z}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I}_E \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

gdzie:

$\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{I}$  – macierze kolumnowe napięć i prądów węzłowych związane z przewodami roboczymi (fazowymi) WWLN,

$\mathbf{U}_E$ ,  $\mathbf{I}_E$  – macierze kolumnowe napięć i prądów węzłowych związane z przewodami odgromowymi,

$\mathbf{Z}$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów roboczych (fazowych) WWLN,

$\mathbf{Z}_E$ ,  $\mathbf{Z}_{EL}$  – macierze impedancji własnych i wzajemnych związane z przewodami odgromowymi.

Napięcia i prądy węzłowe skojarzone z przewodami roboczymi WWLN bez przewodów odgromowych opisane są relacją (3.14):

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{I}, \quad (3.14)$$

stąd:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_I \\ \mathbf{U}_{I'} \\ \vdots \\ \mathbf{U}_n \\ \mathbf{U}_{n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{I,I} & \mathbf{Z}_{I,I'} & \cdots & \mathbf{Z}_{I,n} & \mathbf{Z}_{I,n'} \\ \mathbf{Z}_{I',I} & \mathbf{Z}_{I',I'} & \cdots & \mathbf{Z}_{I',n} & \mathbf{Z}_{I',n'} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{n,I} & \mathbf{Z}_{n,I'} & \cdots & \mathbf{Z}_{n,n} & \mathbf{Z}_{n,n'} \\ \mathbf{Z}_{n',I} & \mathbf{Z}_{n',I'} & \cdots & \mathbf{Z}_{n',n} & \mathbf{Z}_{n',n'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_I \\ \mathbf{I}_{I'} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_n \\ \mathbf{I}_{n'} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

gdzie:

$\mathbf{U}_i$  – macierz kolumnowa napięć węzłowych przewodów fazowych, zbudowanych z  $m_i$ -przewodowych wiązek,  $i$ -tego toru prądowego WWLN,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ ,

$$\mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1_{i1}} & \cdots & \underline{U}_{L1_{im_i}} & \underline{U}_{L2_{i1}} & \cdots & \underline{U}_{L2_{im_i}} & \underline{U}_{L3_{i1}} & \cdots & \underline{U}_{L3_{im_i}} \end{bmatrix}^T, \quad (3.16)$$

1...3 $m_i$

$\mathbf{I}_i$  – macierz kolumnowa prądów węzłowych przewodów fazowych, zbudowanych z  $m_i$ -przewodowych wiązek,  $i$ -tego toru prądowego WWLN,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ ,

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1_{i1}} & \cdots & \underline{I}_{L1_{im_i}} & \underline{I}_{L2_{i1}} & \cdots & \underline{I}_{L2_{im_i}} & \underline{I}_{L3_{i1}} & \cdots & \underline{I}_{L3_{im_i}} \end{bmatrix}^T, \quad (3.17)$$

1...3 $m_i$

$\mathbf{Z}_{i,i}$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów fazowych  $i$ -tego toru prądowego WWLN,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ ,

$$\mathbf{Z}_{i,i} = \begin{matrix} & \begin{matrix} L1 & L2 & L3 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{WL1_i}^w & \mathbf{Z}_{ML1_iL2_i}^w & \mathbf{Z}_{ML1_iL3_i}^w \\ \mathbf{Z}_{ML2_iL1_i}^w & \mathbf{Z}_{WL2_i}^w & \mathbf{Z}_{ML2_iL3_i}^w \\ \mathbf{Z}_{ML3_iL1_i}^w & \mathbf{Z}_{ML3_iL2_i}^w & \mathbf{Z}_{WL3_i}^w \end{bmatrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ L3 \end{matrix} \end{matrix}, \quad (3.18)$$

gdzie:

$\mathbf{Z}_{wL_i}^w$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych skojarzonych z  $L$ -tym przewodem fazowym  $i$ -tego toru prądowego WWLN zbudowanego z  $m_i$ -przewodowej wiązki,  $L \in \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ ,

$$\mathbf{Z}_{wi}^w = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{wL_{i1}} & \underline{Z}_{M(L_{i1}-L_{i2})} & \cdots & \underline{Z}_{M(L_{i1}-L_{im_i})} \\ \underline{Z}_{M(L_{i2}-L_{i1})} & \underline{Z}_{wL_{i2}} & \cdots & \underline{Z}_{M(L_{i2}-L_{im_i})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{M(L_{im_i}-L_{i1})} & \underline{Z}_{M(L_{im_i}-L_{i2})} & \cdots & \underline{Z}_{wL_{im_i}} \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m_i \end{matrix}, \quad (3.19)$$

1      2      ...       $m_i$

$m_i$  – liczba przewodów w wiązce zastosowanego w  $i$ -tym torze WWLN,

$\underline{Z}_{wL_{ix}}$  – impedancja własna  $x$ -owego ( $x \in \{1, \dots, m_i\}$ ) przewodu  $m_i$ -przewodowej wiązki  $L$ -tego przewodu fazowego należącego do  $i$ -tego toru prądowego WWLN, liczona według (3.5),

$\underline{Z}_{M(L_x-L_y)}$  – impedancja wzajemna skojarzona z kolejnymi  $x, y \in \{1, \dots, m_i\}$  przewodami  $m_i$ -przewodowej wiązki  $L$ -tego przewodu fazowego należącego do  $i$ -tego toru prądowego WWLN, liczona według (3.6); dodatkowo  $\underline{Z}_{M(L_x-L_y)} = \underline{Z}_{M(L_y-L_x)}$ ,

$\mathbf{Z}_{M(L-K)}^w$  – macierz impedancji wzajemnych związanych z oddziaływaniem na siebie  $L$ -tego i  $K$ -tego przewodu fazowego należących do tego samego  $i$ -tego toru WWLN,  $L, K \in \{L1, L2, L3\} \wedge K \neq L$ ,

$$\mathbf{Z}_{MLK_i}^w = \begin{bmatrix} K_{i1} & \cdots & K_{im_i} \\ \underline{Z}_{M(L_{i1}-K_{i1})} & \cdots & \underline{Z}_{M(L_{i1}-K_{im_i})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{M(L_{im_i}-K_{i1})} & \cdots & \underline{Z}_{M(L_{im_i}-K_{im_i})} \end{bmatrix} \begin{matrix} L_{i1} \\ \vdots \\ L_{im_i} \end{matrix}, \quad (3.20)$$

$\underline{Z}_{M(L_x-K_{iy})}$  – impedancja wzajemna skojarzona z kolejnymi  $x, y \in \{1, \dots, m_i\}$  przewodami  $m_i$ -przewodowej wiązki  $L$ -tego i  $K$ -tego przewodu fazowego należącego to  $i$ -tego toru prądowego WWLN, liczona według (3.6); dodatkowo  $\mathbf{Z}_{MLK_i}^w = \mathbf{Z}_{MK_iL_i}^{wT}$  oraz  $\underline{Z}_{M(K_{ix}-L_{iy})} = \underline{Z}_{M(L_{iy}-K_{ix})}$ ,

$\mathbf{Z}_{i,j}$  – macierz impedancji wzajemnych przewodów fazowych należących do dwóch różnych torów prądowych  $i, j$  WWLN,  $i, j \in \{I, II, III, \dots, n\} \wedge j \neq i$ ,

$$\mathbf{Z}_{i,j} = \begin{bmatrix} L1_i & L2_i & L3_i \\ \mathbf{Z}_{mL1_iL1_j}^w & \mathbf{Z}_{mL1_iL2_j}^w & \mathbf{Z}_{mL1_iL3_j}^w \\ \mathbf{Z}_{mL2_iL1_j}^w & \mathbf{Z}_{mL2_iL2_j}^w & \mathbf{Z}_{mL2_iL3_j}^w \\ \mathbf{Z}_{mL3_iL1_j}^w & \mathbf{Z}_{mL3_iL2_j}^w & \mathbf{Z}_{mL3_iL3_j}^w \end{bmatrix} \begin{matrix} L1_j \\ L2_j \\ L3_j \end{matrix}, \quad (3.21)$$

$\mathbf{Z}_{mL,K_j}^w$  – macierz impedancji wzajemnych skojarzonych z  $L$ -tym i  $K$ -tym przewodem fazowym  $L, K \in \{L1, L2, L3\}$  należących do dwóch różnych torów prądowych  $i, j$  WWLN,  $i, j \in \{I, II, III, \dots, n\} \wedge j \neq i$ ,

$$\mathbf{Z}_{mL_iK_j}^w = \begin{bmatrix} K_{j1} & \cdots & K_{jm_j} \\ \underline{Z}_{m(L_{i1}-K_{j1})} & \cdots & \underline{Z}_{m(L_{im_i}-K_{j1})} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{m(L_{i1}-K_{jm_j})} & \cdots & \underline{Z}_{m(L_{im_i}-K_{jm_j})} \end{bmatrix} \begin{matrix} L_{i1} \\ \vdots \\ L_{im_i} \end{matrix}, \quad (3.22)$$

$m_j$  – liczba przewodów w wiązce zastosowanej w  $j$ -tym torze prądowym WWLN,

$\underline{Z}_{m(L_x-K_{jy})}$  – impedancja wzajemna skojarzona z kolejnymi  $x \in \{1, \dots, m_i\}$ ,  $y \in \{1, \dots, m_j\}$  przewodami  $m_i$ -,  $m_j$ -przewodowych wiązek  $L$ -tego i  $K$ -tego przewodu fazowego należących do

dwóch różnych torów prądowych  $i, j$  WWLN,  $i, j \in \{I, II, III, \dots, n\}$  oraz  $j \neq i$ , liczona według (3.6); dodatkowo  $\underline{Z}_{m(K_{jy}-L_{ix})} = \underline{Z}_{m(L_{ix}-K_{jy})}$ .

Z uwagi na przyjęte założenie dotyczące symetrii WWLN względem swoich krańców poszczególne macierze  $\mathbf{Z}_{i,i}$  i  $\mathbf{Z}_{i,j}$  spełniają zależności (3.23)÷(3.24):

$$\mathbf{Z}_{i,j} = \mathbf{Z}_{i',j'}, \quad (3.23)$$

$$\mathbf{Z}_{i',j} = \mathbf{Z}_{i,j} = -\mathbf{Z}_{i,j}, \quad (3.24)$$

gdzie:  $i, j$  – dowolne tory prądowe WWLN,  $i, j \in \{I, II, III, \dots, n\}$ .

Odwołując się do zależności (3.13), każdy z  $g$  przewodów odgromowych charakteryzują impedancje własne oraz impedancje wzajemne reprezentujące oddziaływanie między przewodami odgromowymi (podmacierz  $\mathbf{Z}_E$ ). Dodatkowo, każdy z  $g$  przewodów odgromowych oddziałuje na każdy przewód roboczy WWLN, tj. na każdy przewód fazowy zbudowany z  $m$ -przewodowych wiązek. Impedancje wzajemne odpowiadające temu oddziaływaniu zawarte są w podmacierzach  $\mathbf{Z}_{EL}, \mathbf{Z}_{EL}^T$ .

Z uwagi na znaczną liczbę równań opisujących WWLN prowadzi się do ich ograniczenia poprzez agregację  $m$ -przewodowej wiązki w przewód zastępczy oraz włączenie impedancji przewodów odgromowych do impedancji przewodów fazowych. Dodatkowo koniecznym jest przeliczenie elementów macierzy opisujących WWLN na wielkości niemianowane, ponieważ rozważana linia jest wielonapięciowa. Metoda prowadząca do ograniczenia liczby równań opisujących WWLN, a w efekcie skutkująca uproszczeniem modelu matematycznego, została omówiona szerzej w załączniku 8.

Ostatecznie otrzymuje się macierz impedancyjną WWLN o wymiarze  $W'' \times W''$  według (8.26), o postaci (3.25)÷(3.27):

$$\mathbf{Z}^{pu} = \begin{matrix} & \begin{matrix} I & I' & \dots & n & n' \end{matrix} \\ \begin{matrix} \mathbf{Z}_{I,I}^{pu} & -\mathbf{Z}_{I,I}^{pu} & \dots & \mathbf{Z}_{n,I}^{pu T} & -\mathbf{Z}_{n,I}^{pu T} \\ -\mathbf{Z}_{I,I}^{pu} & \mathbf{Z}_{I,I}^{pu} & \dots & -\mathbf{Z}_{n,I}^{pu T} & \mathbf{Z}_{n,I}^{pu T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{n,I}^{pu} & -\mathbf{Z}_{n,I}^{pu} & \dots & \mathbf{Z}_{n,n}^{pu} & -\mathbf{Z}_{n,n}^{pu} \\ -\mathbf{Z}_{n,I}^{pu} & \mathbf{Z}_{n,I}^{pu} & \dots & -\mathbf{Z}_{n,n}^{pu} & \mathbf{Z}_{n,n}^{pu} \end{matrix} & \begin{matrix} I \\ I' \\ \vdots \\ n \\ n' \end{matrix} \end{matrix}, \quad (3.25)$$

oraz:

$$\mathbf{Z}_{ii}^{pu} = \begin{matrix} & \begin{matrix} L1_i & L2_i & L3_i \end{matrix} \\ \begin{matrix} \underline{Z}_{WzL1_i}^{e,pu} & \underline{Z}_{M(L2_i-L1_i)}^{e,pu} & \underline{Z}_{M(L3_i-L1_i)}^{e,pu} \\ \underline{Z}_{M(L2_i-L1_i)}^{e,pu} & \underline{Z}_{WzL2_i}^{e,pu} & \underline{Z}_{M(L3_i-L2_i)}^{e,pu} \\ \underline{Z}_{M(L3_i-L1_i)}^{e,pu} & \underline{Z}_{M(L3_i-L2_i)}^{e,pu} & \underline{Z}_{WzL3_i}^{e,pu} \end{matrix} & \begin{matrix} L1_i \\ L2_i \\ L3_i \end{matrix} \end{matrix}, \quad (3.26)$$

$$\mathbf{Z}_{ij}^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{m(L1-L1_j)}^{\text{e,pu}} & \underline{Z}_{m(L2-L1_j)}^{\text{e,pu}} & \underline{Z}_{m(L3-L1_j)}^{\text{e,pu}} \\ \underline{Z}_{m(L2-L1_j)}^{\text{e,pu}} & \underline{Z}_{m(L2-L2_j)}^{\text{e,pu}} & \underline{Z}_{m(L3-L2_j)}^{\text{e,pu}} \\ \underline{Z}_{m(L3-L1_j)}^{\text{e,pu}} & \underline{Z}_{m(L3-L2_j)}^{\text{e,pu}} & \underline{Z}_{m(L3-L3_j)}^{\text{e,pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} L1_j \\ L2_j \\ L3_j \end{matrix}, \quad (3.27)$$

gdzie:

- macierz impedancyjna  $\mathbf{Z}^{\text{pu}}$  jest pełna i symetryczna,
- indeks górny „e” oznacza, że uwzględniono wpływ występowania przewodów odgromowych na wartości elementów macierzy  $\mathbf{Z}$  poprzez ujęcie tego oddziaływania w postaci dodatkowego składnika, tj. impedancji „poprawki”  $-\underline{Z}_e$  zgodnie z metodą opisaną w załączniku 8, stąd:

$$\underline{Z}_{WzL_i}^e = \underline{Z}_{WzL_i} - \underline{Z}_{eL_i} \quad \text{dla } i \in \{\text{I, II, ..., } n\}, L \in \{L1, L2, L3\},$$

$$\underline{Z}_{M(K_i-L_i)}^e = \underline{Z}_{M(K_i-L_i)} - \underline{Z}_{e(K_i-L_i)} \quad \text{dla } i \in \{\text{I, II, ..., } n\}, L, K \in \{L1, L2, L3\} \wedge K \neq L,$$

$$\underline{Z}_{m(K_i-L_j)}^e = \underline{Z}_{m(K_i-L_j)} - \underline{Z}_{e(K_i-L_j)} \quad \text{dla } i, j \in \{\text{I, II, ..., } n\} \wedge j \neq i, L, K \in \{L1, L2, L3\},$$

z uwagi na niesymetrię fazową układu każda z impedancji  $\underline{Z}_e$  może przyjmować inną wartość,

- indeks górny „pu” oznacza, że wartości elementów macierzy są podane w jednostkach względnych (ang. *per unit*),
- indeks dolny „z” oznacza, że w wartościach impedancji własnej przewodów fazowych (3.26) uwzględniono wzajemne oddziaływanie poszczególnych przewodów  $m$ -przewodowej wiązki, zgodnie z odpowiednim przekształceniem (zał. 8).

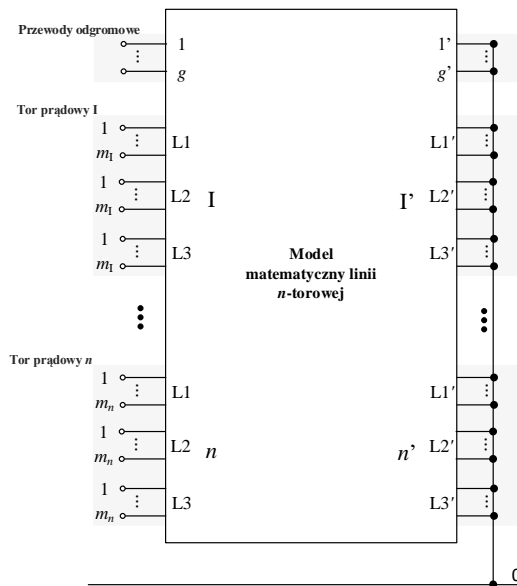
Macierz impedancyjna WWLN jest macierzą osobliwą [16]. W celu uzyskania poszukiwanej macierzy admitancyjnej WWLN jeden z krańców linii połączono z potencjałem odniesienia (rys. 3.6).

Wówczas zależność (3.25) przekształcała się do postaci (3.28):

$$\mathbf{Z}^{\text{pu}} = \begin{matrix} & \text{I} & \cdots & n \\ \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\text{I.I}}^{\text{pu}} & \cdots & \mathbf{Z}_{\text{n.I}}^{\text{pu T}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{\text{n.I}}^{\text{pu}} & \cdots & \mathbf{Z}_{\text{n.n}}^{\text{pu}} \end{bmatrix} & \text{I} \\ & & & \vdots \\ & & & n \end{matrix} \quad (3.28)$$

W tym przypadku, wyznaczenie szukanej macierzy admitancyjnej WWLN dla wielkości fazowych, będącej odwrotnością macierzy impedancyjnej  $\mathbf{Z}$ , sprowadza się do przekształcenia opisanego zależnością (3.29):

$$\mathbf{Y}^{\text{pu}} = \left( \mathbf{Z}^{\text{pu}} \right)^{-1}. \quad (3.29)$$



Rys. 3.6 Schemat blokowy WWLN do wyznaczania wyrazów macierzy admitancyjnej Y

### 3.1.2 Model impedancyjny i admitancyjny dla składowych symetrycznych

Mając macierze impedancyjną  $Z^{pu}$  (3.25) i admitancyjną  $Y^{pu}$  (3.29) WWLN dla wielkości fazowych, zbudowane z macierzy elementów trójfazowych, prowadzi się do uzyskania modelu WWLN dla składowych symetrycznych.

Dla wszystkich trójfazowych prądów i napięć węzłowych  $I^{pu}$ ,  $U^{pu}$  przeprowadza się przekształcenie zgodnie z zależnością :

$$s^{-1}U^{pu} = s^{-1}Z^{pu}ss^{-1}I^{pu} \quad \text{lub} \quad s^{-1}I^{pu} = s^{-1}Y^{pu}ss^{-1}U^{pu}, \quad (3.30)$$

stąd:

$$U_S^{pu} = Z_S^{pu} I_S^{pu} \quad \text{lub} \quad I_S^{pu} = Y_S^{pu} U_S^{pu}, \quad (3.31)$$

zatem:

$$Z_S^{pu} = s^{-1}Z^{pu}s \quad \text{oraz} \quad Y_S^{pu} = s^{-1}Y^{pu}s, \quad (3.32)$$

gdzie:

$U_S^{pu}, I_S^{pu}$  – kolejno macierze kolumnowe napięć i prądów składowych symetrycznych w jednostkach względnych,

$Z_S^{pu}, Y_S^{pu}$  – kolejno macierze impedancyjna i admitancyjna WWLN składowych symetrycznych w jednostkach względnych,

$s$  – macierz przekształcenia, według (3.33):

$$s = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 2n \\ \mathbf{S} & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ 2n \end{matrix}, \quad (3.33)$$



oraz:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}, \quad (3.34)$$

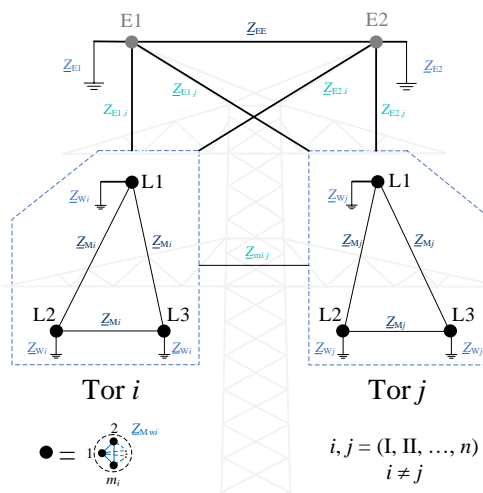
przy czym  $\alpha = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$  i  $\alpha^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $\alpha$  – współczynnik obrotu.

Przekształcenie (3.32) w przypadku braku symetrii linii nie prowadzi do diagonalizacji macierzy  $\mathbf{Z}_S^{\text{pu}}$  i  $\mathbf{Y}_S^{\text{pu}}$  (w przeciwieństwie do linii symetrycznej – 3.1.3) [16]. Każda składowa symetryczna prądu zależy od każdej składowej symetrycznej napięcia. Przykładowo:

$$\mathbf{I}_0^{\text{pu}} = \mathbf{Y}_{00}^{\text{pu}} \mathbf{U}_0^{\text{pu}} + \mathbf{Y}_{01}^{\text{pu}} \mathbf{U}_1^{\text{pu}} + \mathbf{Y}_{02}^{\text{pu}} \mathbf{U}_2^{\text{pu}}. \quad (3.35)$$

### 3.1.3 Przypadek szczególny – symetryczna WWLN

W przypadku WWLN, w której zastosowano transpozycję przewodów fazowych możliwe jest uzyskanie pełnej symetrii fazowej. Wybrane impedancje symetrycznej WWLN przedstawiono na rysunku 3.7.



Rys. 3.7 Wybrane impedancje symetrycznej WWLN

Przyjmując, że model matematyczny WWLN został ograniczony poprzez zastosowanie agregacji  $m$ -przewodowych wiązek w przewody zastępcze oraz impedancje ujmujące oddziaływanie przewodów odgromowych zostały ujęte jako poprawki impedancji przewodów fazowych, wówczas poszczególne podmacierze modelu impedancyjnego przyjmują postać:

$$\mathbf{Z}_{i,i}^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Wz_i}^{e,\text{pu}} & \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} & \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} \\ \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} & \underline{Z}_{Wz_i}^{e,\text{pu}} & \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} \\ \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} & \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} & \underline{Z}_{Wz_i}^{e,\text{pu}} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{L1}_i \\ \text{L2}_i \\ \text{L3}_i \end{matrix} = \underline{Z}_{Wz_i}^{e,\text{pu}} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \underline{Z}_{M_i}^{e,\text{pu}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.36)$$



$$\mathbf{Z}_2^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{2 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & & \\ & \ddots & \\ & & \underline{Z}_{2 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \vdots \\ n \end{matrix}, \quad (3.40)$$

przy czym  $\mathbf{Z}_2^{\text{pu}} = \mathbf{Z}_1^{\text{pu}}$ , oraz:

$$\mathbf{Z}_0^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{0 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & \cdots & \underline{Z}_{0 \text{ I.II}}^{\text{pu}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{0 \text{ II.I}}^{\text{pu}} & \cdots & \underline{Z}_{0 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \vdots \\ n \end{matrix}, \quad (3.41)$$

gdzie:  $\underline{Z}_{0 \text{ j.i}}^{\text{pu}} = \underline{Z}_{0 \text{ i.j}}^{\text{pu}}$ ,  $j \neq i$ .

W załączniku 8 zawarto szczegóły powyższych rozważań.

Ostatecznym krokiem wyznaczania modelu matematycznego WWLN dla składowych symetrycznych jest wyznaczenie wartości elementów macierzy admitancyjnej  $\mathbf{Y}$  według zależności (3.32) oraz powrót do pełnego opisu linii, w postaci przedstawionej za pomocą zależności (3.42)÷(3.44):

$$\mathbf{Y}_1^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{1 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & & & \\ -\underline{Y}_{1 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{1 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \underline{Y}_{1 \text{ n.n}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{1 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \\ & & & -\underline{Y}_{1 \text{ n.n}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{1 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \text{I}' \\ \vdots \\ n \\ n' \end{matrix}, \quad (3.42)$$

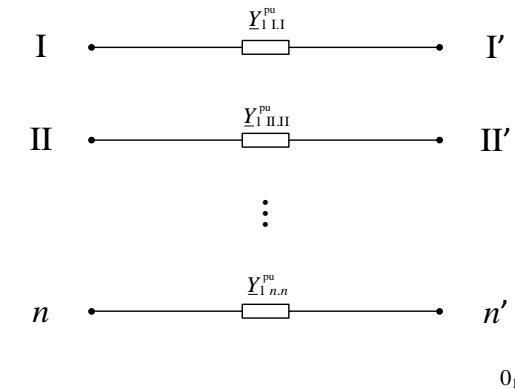
$$\mathbf{Y}_2^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{2 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{2 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & & & \\ -\underline{Y}_{2 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{2 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \underline{Y}_{2 \text{ n.n}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{2 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \\ & & & -\underline{Y}_{2 \text{ n.n}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{2 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \text{I}' \\ \vdots \\ n \\ n' \end{matrix}, \quad (3.43)$$

$$\mathbf{Y}_0^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{0 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{0 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & \cdots & \underline{Y}_{0 \text{ I.n}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{0 \text{ I.n}}^{\text{pu}} \\ -\underline{Y}_{0 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{0 \text{ I.I}}^{\text{pu}} & \cdots & -\underline{Y}_{0 \text{ I.n}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{0 \text{ I.n}}^{\text{pu}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \underline{Y}_{0 \text{ n.I}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{0 \text{ n.I}}^{\text{pu}} & \cdots & \underline{Y}_{0 \text{ n.n}}^{\text{pu}} & -\underline{Y}_{0 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \\ -\underline{Y}_{0 \text{ n.I}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{0 \text{ n.I}}^{\text{pu}} & \cdots & -\underline{Y}_{0 \text{ n.n}}^{\text{pu}} & \underline{Y}_{0 \text{ n.n}}^{\text{pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \text{I}' \\ \vdots \\ n \\ n' \end{matrix}, \quad (3.44)$$

gdzie:  $\underline{Y}_{0 \text{ j.i}}^{\text{pu}} = \underline{Y}_{0 \text{ i.j}}^{\text{pu}}$ ,  $j \neq i$ .

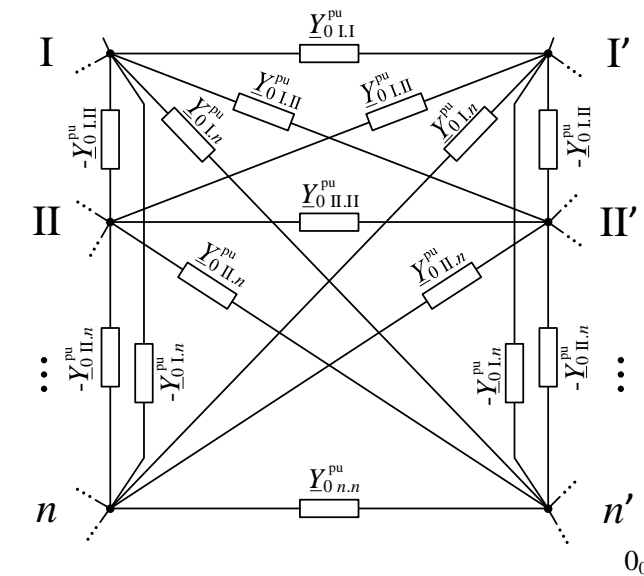
W wyniku przyjętego założenia o symetrii linii, uzyskanej dzięki zastosowaniu przepleceń przewodów fazowych, przepływ prądów kolejności zgodnej oraz przeciwnej nie wprowadza oddziaływań między torami linii, a zatem model admitancyjny, jak

i odpowiadające mu schematy zastępcze zgodny i przeciwny, odpowiadają modelom niezależnych torów. Schemat zastępczy symetrycznej WWLN przedstawiono na rysunku 3.8.



Rys. 3.8 Schemat zastępczy zgodny i przeciwny WWLN

Schemat zastępczy zerowy WWLN przedstawia rysunek 3.9. Pełny schemat zastępczy  $n$ -torowej linii napowietrznej składa się z  $n(2n-1)$  gałęzi, gdzie z każdego węzła wychodzi  $2n-1$  gałęzi.



Rys. 3.9 Schemat zastępczy zerowy WWLN

Zależności (3.45) i (3.46) są kolejno modelami zerowymi WWLN o dwóch i trzech torach prądowych.

$$\mathbf{Y}_0^{pu} \stackrel{n=2}{=} \frac{1}{\underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} \underline{Z}_{0 \text{ II, II}}^{pu} - (\underline{Z}_{0 \text{ I, II}}^{pu})^2} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{0 \text{ II, II}}^{pu} & -\underline{Z}_{0 \text{ II, II}}^{pu} & \underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} & -\underline{Z}_{0 \text{ II, I}}^{pu} \\ -\underline{Z}_{0 \text{ II, II}}^{pu} & \underline{Z}_{0 \text{ II, II}}^{pu} & -\underline{Z}_{0 \text{ I, II}}^{pu} & \underline{Z}_{0 \text{ I, II}}^{pu} \\ \underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} & -\underline{Z}_{0 \text{ II, I}}^{pu} & \underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} & -\underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} \\ -\underline{Z}_{0 \text{ II, I}}^{pu} & \underline{Z}_{0 \text{ II, I}}^{pu} & -\underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} & \underline{Z}_{0 \text{ I, I}}^{pu} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \text{I}' \\ \text{II} \\ \text{II}' \end{matrix}, \quad (3.45)$$

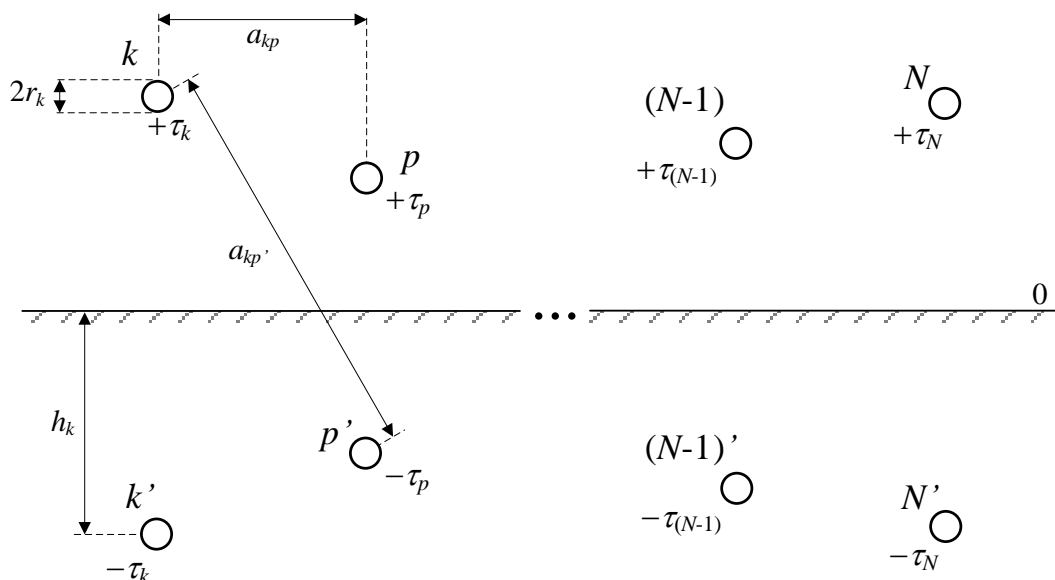
oraz  $\underline{Z}_{0 j, i}^{pu} = \underline{Z}_{0 i, j}^{pu}$ ,



### 3.2 Parametry poprzeczne

Rozpatruje się  $N$  ( $N = 0,5W'$ ) przewodów zawieszonych nad powierzchnią ziemi, w tym  $\left(3 \cdot n \cdot \sum_{i=1}^n m_i\right)$  przewodów, które stanowią przewody robocze  $n$ -torowej linii napowietrznej oraz  $g$  przewodów odgromowych. Przewody te uważa się za nieskończenie długie, równoległe do siebie i powierzchni ziemi stanowiącą płaszczyznę przewodzącą, walce o promieniu  $r_k$ , gdzie  $k$  - przewód linii napowietrznej  $k \in (1, 2, \dots, N)$  o gęstości liniowej ładunku równej  $\tau$ . Zakłada się, że odległość między dowolnym  $k$ -tym i  $p$ -tym przewodem, jak również między  $k$ -tym przewodem i ziemią jest bardzo duża w porównaniu z promieniem przewodu, wtedy odpowiednio  $a_{kp} \gg r_k$ ,  $h_k \gg r_k$  [4].

Analizowana  $n$ -torowa linia napowietrzna jest więc układem  $N$  elektrycznych osi równoległych naładowanych równomiernie o gęstości liniowej ładunku  $\tau$ . Ziemię zastępuje się fikcyjnymi przewodami stanowiącymi zwierciadlane odbicia rzeczywistych przewodów o gęstości liniowej ładunku  $-\tau$  (rys. 3.11).



Rys. 3.11 Przekrój WWLN o  $N$  przewodach wraz z ich zwierciadlanymi odbiciami

Zależność między potencjałami przewodów a ładunkami na ich powierzchni można wówczas zapisać jako:

$$\mathbf{V} = \mathbf{PQ} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \vdots \\ \underline{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Q}_1 \\ \underline{Q}_2 \\ \vdots \\ \underline{Q}_N \end{bmatrix}, \quad (3.47)$$

gdzie:

$\mathbf{V}$  – macierz kolumnowa potencjałów przewodów WWLN,

$\mathbf{Q}$  – macierz kolumnowa ładunków na powierzchniach przewodów WWLN,

$\mathbf{P}$  – macierz jednostkowych potencjałowych współczynników Maxwella w  $\frac{1}{F}$ , zdefiniowanych według zależności (3.48)÷(3.49) [2, 4]:

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{r_k}, \quad (3.48)$$

$$P_{kp} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{a_{kp'}}{a_{kp}}, \quad (3.49)$$

$\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ ,

$h_k$  – wysokość zawieszenia przewodu  $k$  nad ziemią,  $k \in \{1 \dots N\}$ ,

$r_k$  – promień przewodu  $k$ ,

$a_{kp}$  – odległość między przewodami  $k$  i  $p$ ,  $k, p \in \{1 \dots N\}$ ,  $p \neq k$ ,

$a_{kp'}$  – odległość między przewodem  $k$  i zwierciadlanym odbiciem przewodu  $p$ ,  $p' \in \{1' \dots N'\}$ .

Współczynnik potencjałowy  $P_{kk}$ , będący parametrem własnym, dotyczy danego przewodu  $k$ , współczynnik  $P_{kp}$ , będący parametrem wzajemnym, dotyczy pary przewodów  $k$  i  $p$ . Współczynniki  $P_{kk}$  oraz  $P_{kp}$  są współczynnikami Maxwella (w  $1/F$ ) będącymi odwrotnościami pojemności cząstkowych wyznaczanych bezpośrednio z parametrów konstrukcyjnych linii.

### 3.2.1 Model parametrów poprzecznych dla wielkości fazowych

Porządkując równanie (3.47), otrzymuje się zależność między potencjałami węzłowymi oraz ładunkami na powierzchni przewodów WWLN:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{P}_{EL}^T \\ \mathbf{P}_{EL} & \mathbf{P}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q}_E \end{bmatrix}, \quad (3.50)$$

gdzie:

$\mathbf{V}_E, \mathbf{Q}_E$  – potencjały i ładunki związane z przewodami odgromowymi,

$\mathbf{P}_E, \mathbf{P}_{EL}$  – macierze współczynników potencjałowych Maxwella związanych z przewodami odgromowymi,

$\mathbf{V}, \mathbf{Q}$  – potencjały i ładunki związane z przewodami fazowymi linii  $n$ -torowej zbudowanej z  $m$ -przewodowych wiązek (3.51):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_I \\ \vdots \\ \mathbf{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{I,I} & \cdots & \mathbf{P}_{I,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}_{n,I} & \cdots & \mathbf{P}_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_I \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_n \end{bmatrix}, \quad (3.51)$$

$\mathbf{V}_i$  – macierz kolumnowa potencjałów przewodów fazowych, zbudowanych z  $m_i$ -przewodowych wiązek,  $i$ -tego toru prądowego WWLN,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ ,

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} \underline{V}_{L1_{i1}} & \cdots & \underline{V}_{L1_{im_i}} & \underline{V}_{L2_{i1}} & \cdots & \underline{V}_{L2_{im_i}} & \underline{V}_{L3_{i1}} & \cdots & \underline{V}_{L3_{im_i}} \end{bmatrix}^T, \quad (3.52)$$

1...3*m<sub>i</sub>*

$\mathbf{Q}_i$  – macierz kolumnowa ładunków na powierzchniach przewodów fazowych, zbudowanych z  $m_i$ -przewodowych wiązek,  $i$ -tego toru prądowego WWLN,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ ,

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} \underline{Q}_{L1_{i1}} & \cdots & \underline{Q}_{L1_{im_i}} & \underline{Q}_{L2_{i1}} & \cdots & \underline{Q}_{L2_{im_i}} & \underline{Q}_{L3_{i1}} & \cdots & \underline{Q}_{L3_{im_i}} \end{bmatrix}^T, \quad (3.53)$$

1...3*m<sub>i</sub>*

$\mathbf{P}_{i,i}$  – macierz współczynników potencjałowych Maxwella własnych i wzajemnych przewodów fazowych, zbudowanych z  $m_i$ -przewodowych wiązek,  $i$ -tego toru prądowego WWLN,  $i \in \{I, II, III, \dots, n\}$ . Poszczególne podmacierze macierzy  $\mathbf{P}_{i,i}$  są skonstruowane analogicznie jak podmacierze macierzy impedancyjnej  $\mathbf{Z}_{i,i}$  dla parametrów wzdłużnych WWLN (3.18)÷(3.20); wartości poszczególnych ich elementów wyznacza się z zależności (3.48)÷(3.49),

$\mathbf{P}_{i,j}$  – macierz współczynników potencjałowych Maxwella wzajemnych przewodów fazowych należących do dwóch różnych torów prądowych  $i, j$  WWLN,  $i, j \in \{I, II, III, \dots, n\} \wedge j \neq i$ . Poszczególne macierze  $\mathbf{P}_{i,j}$  są skonstruowane analogicznie jak macierze  $\mathbf{Z}_{i,j}$  dla parametrów wzdłużnych WWLN (3.21)÷(3.22), a wartości ich elementów wyznacza się z (3.48)÷(3.49). Dodatkowo, z uwagi na założenie o symetrii linii względem swoich krańców:  $\mathbf{P}_{i,j} = \mathbf{P}_{j,i}^T$ .

Analogicznie jak dla parametrów wzdłużnych, dąży się do zredukowania liczby równań opisujących linię, stąd dokonuje się agregacji  $m$ -przewodowych wiązek w przewody zastępcze oraz eliminacji przewodów odgromowych (8). Ostatecznie otrzymuje się (3.54):

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{L1_1}^{pu} \\ \underline{V}_{L2_1}^{pu} \\ \underline{V}_{L3_1}^{pu} \\ \vdots \\ \underline{V}_{L1_n}^{pu} \\ \underline{V}_{L2_n}^{pu} \\ \underline{V}_{L3_n}^{pu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{WzL1_1}^{e,pu} & P_{M(L1_1-L2_1)}^{e,pu} & P_{M(L1_1-L3_1)}^{e,pu} & \cdots & P_{m(L1_1-L1_n)}^{e,pu} & P_{m(L1_1-L2_n)}^{e,pu} & P_{m(L1_1-L3_n)}^{e,pu} \\ P_{M(L2_1-L1_1)}^{e,pu} & P_{WzL2_1}^{e,pu} & P_{M(L2_1-L3_1)}^{e,pu} & \cdots & P_{m(L2_1-L1_n)}^{e,pu} & P_{m(L2_1-L2_n)}^{e,pu} & P_{m(L2_1-L3_n)}^{e,pu} \\ P_{M(L3_1-L1_1)}^{e,pu} & P_{M(L3_1-L2_1)}^{e,pu} & P_{WzL3_1}^{e,pu} & \cdots & P_{m(L3_1-L1_n)}^{e,pu} & P_{m(L3_1-L2_n)}^{e,pu} & P_{m(L3_1-L3_n)}^{e,pu} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m(L1_n-L1_1)}^{e,pu} & P_{m(L1_n-L2_1)}^{e,pu} & P_{m(L1_n-L3_1)}^{e,pu} & \cdots & P_{WzL1_n}^{e,pu} & P_{M(L1_n-L2_n)}^{e,pu} & P_{M(L1_n-L3_n)}^{e,pu} \\ P_{m(L2_n-L1_1)}^{e,pu} & P_{m(L2_n-L2_1)}^{e,pu} & P_{m(L2_n-L3_1)}^{e,pu} & \cdots & P_{M(L2_n-L1_n)}^{e,pu} & P_{WzL2_n}^{e,pu} & P_{M(L2_n-L3_n)}^{e,pu} \\ P_{m(L3_n-L1_1)}^{e,pu} & P_{m(L3_n-L2_1)}^{e,pu} & P_{m(L3_n-L3_1)}^{e,pu} & \cdots & P_{M(L3_n-L1_n)}^{e,pu} & P_{M(L3_n-L2_n)}^{e,pu} & P_{WzL3_n}^{e,pu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Q}_{L1_1}^{pu} \\ \underline{Q}_{L2_1}^{pu} \\ \underline{Q}_{L3_1}^{pu} \\ \vdots \\ \underline{Q}_{L1_n}^{pu} \\ \underline{Q}_{L2_n}^{pu} \\ \underline{Q}_{L3_n}^{pu} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

przy czym:

- macierz współczynników potencjałowych Maxwella jest pełna i symetryczna,
- indeks górny „e” oznacza, że uwzględniono wpływ występowania przewodów odgromowych na wartości elementów macierzy  $\mathbf{P}$  poprzez ujęcie tego oddziaływania w postaci dodatkowego składnika, tj. współczynnika potencjałowego „poprawki”  $-P_e$  zgodnie z metodą opisaną w załączniku 8; stąd



$$P_{WzL_i}^e = P_{WzL_i} - P_{eL_i} \quad \text{dla } i \in \{I, II, \dots, n\}, L \in \{L1, L2, L3\},$$

$$P_{M(K_i-L_i)}^e = P_{M(K_i-L_i)} - P_{e(K_i-L_i)} \quad \text{dla } i \in \{I, II, \dots, n\}, L, K \in \{L1, L2, L3\} \wedge K \neq L,$$

$$P_{m(K_i-L_j)}^e = P_{m(K_i-L_j)} - P_{e(K_i-L_j)} \quad \text{dla } i, j \in \{I, II, \dots, n\} \wedge j \neq i, L, K \in \{L1, L2, L3\},$$

z uwagi na niesymetrię fazową układu każdy ze współczynników  $P_e$  może przyjmować inną wartość,

- indeks górny „pu” oznacza, że wartości elementów macierzy są podane w jednostkach względnych (ang. *per unit*),
- indeks dolny „z” oznacza, że w wartościach współczynników potencjałowych własnych przewodów fazowych uwzględniono wzajemne oddziaływanie poszczególnych przewodów  $m$ -przewodowej wiązki, zgodnie z odpowiednim przekształceniem (zał. 8).

Potencjał ziemi wynosi zero, przez co można zapisać  $\mathbf{V} = \mathbf{U}$ , gdzie  $\mathbf{U}$  to macierz kolumnowa napięć węzłowych WWLN. Przekształcenie (3.55) pozwala opisać zależność między prądami i napięciami WWLN:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{Q}^{pu} = (\mathbf{P}^{pu})^{-1} \frac{d}{dt} \mathbf{U}^{pu}, \quad (3.55)$$

stąd:

$$\mathbf{I}^{pu} = j\omega (\mathbf{P}^{pu})^{-1} \mathbf{U}^{pu} = j\omega \mathbf{C}^{pu} \mathbf{U}^{pu}, \quad (3.56)$$

gdzie:

$\mathbf{U}^{pu}$ ,  $\mathbf{I}^{pu}$  – macierze napięć i prądów fazowych WWLN,

$\mathbf{C}^{pu}$  – poszukiwana macierz pojemności cząstkowych WWLN,  $\mathbf{C}^{pu} = (\mathbf{P}^{pu})^{-1}$ .

Susceptancja WWLN dana jest wówczas zależnością (3.57):

$$\mathbf{B}^{pu} = \omega \mathbf{C}^{pu}. \quad (3.57)$$

### 3.2.2 Model parametrów poprzecznych dla składowych symetrycznych

Wyznaczenie modelu parametrów poprzecznych WWLN dla składowych symetrycznych sprowadza się do przekształcenia opisanego zależnością :

$$\mathbf{C}_s^{pu} = \mathbf{s}^{-1} \mathbf{C}^{pu} \mathbf{s} \quad \text{lub} \quad \mathbf{C}_s^{pu} = \mathbf{s}^{-1} (\mathbf{P}^{pu})^{-1} \mathbf{s} = (\mathbf{s}^{-1} \mathbf{P}^{pu} \mathbf{s})^{-1} = (\mathbf{P}_s^{pu})^{-1}, \quad (3.58)$$

gdzie:

$\mathbf{s}$  – macierz przekształcenia według (3.33).

Dla WWLN niesymetrycznej macierz pojemności składowych symetrycznych  $\mathbf{C}_s^{pu}$  jest macierzą pełną i symetryczną.

Analogicznie jak dla parametrów wzdłużnych, macierz pojemności składowych symetrycznych  $C_s^{pu}$  jest macierzą pełną.

### 3.2.3 Konduktancja poprzeczna WWLN

Przedstawiając założenia do budowy modelu matematycznego WWLN podano, że pomija się konduktancję poprzeczną linii  $G$ . Jednak w praktyce dla linii NN i WN w niesprzyjających warunkach atmosferycznych może wystąpić zjawisko ulotu, które modeluje się za pomocą konduktancji porzeczej. Dla całości obrazu modelowania linii, poniżej podano sposób uwzględnienia ulotu, jednak w dalszych obliczeniach  $G$  nie będzie uwzględniane.

Zjawisko ulotu występuje wówczas, gdy napięcie krytyczne ulotu  $U_{kr}$  zmniejszy swoją wartość poniżej napięcia fazowego roboczego linii  $U_f$ . Konduktancję jednostkową linii wyznacza się na podstawie zależności:

$$G' = \frac{P'_{ul}}{U_f^2}, \quad (3.59)$$

gdzie, wykorzystując podejście Peek'a [72],  $P'_{ul}$  to jednostkowe straty mocy w jednej fazie linii napowietrznej związane ze zjawiskiem ulotu:

$$P'_{ul} = \frac{241}{\delta_u} (f + 25) (U_f - U_{fkr})^2 \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot 10^{-5}, \frac{\text{kW}}{\text{km}}, \quad (3.60)$$

oraz

$$\delta_u = \frac{0,302p}{273+t},$$

przy spełnieniu warunków:

$p$  – ciśnienie atmosferyczne równe 980 kPa,

$t$  – temperatura otoczenia równa +25°C,

$f$  – częstotliwość sieci zasilającej równa 50 Hz, wówczas  $\delta_u \approx 1$  otrzymuje się:

$$P'_{ul} \approx 0,182 \cdot \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot (U_f - U_{fkr})^2, \frac{\text{kW}}{\text{km}}, \quad (3.61)$$

przy czym zależność (3.61) jest słuszna wyłącznie, gdy  $U_f > U_{kr}$ ;

$r$  – promień przewodu w cm; dla przewodów wiązkowych: promień zastępczy przewodu,

$D$  – średnia geometryczna odległość między przewodami fazowymi toru  $i$  w cm,

$U_f$  – napięcie robocze fazowe; przyjmuje się największą możliwą wartość równą  $\frac{U_s}{\sqrt{3}}$ ,  $U_s$  –

najwyższe napięcie sieci,

$U_{kr}$  – napięcie krytyczne fazowe w linii z pojedynczymi przewodami w kV:

$$U_{kr} = 48,9 \rho m_a m_p r \log \frac{D}{r}, \quad (3.62)$$

$m_p$  – współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu ( $m_p = 1$  dla nowego przewodu i  $0,83 \div 0,87$  dla linek),

$m_a$  – współczynnik uwzględniający wpływ warunków pogodowych ( $m_a = 1$  dla dobrej pogody i  $0,8$  dla złej pogody),

$\rho$  – gęstość powietrza.

Straty mocy czynnej ulotu przedstawia się układem jednakowych konduktancji  $G$  umieszczonych między węzłami faz  $L_i$  ( $L_i = \{L1_i, L2_i, L3_i\}$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ ) i węzłem odniesienia:

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 \dots 3n \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} G & & \\ & \ddots & \\ & & G \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ 3n \end{matrix} \end{matrix}, \quad (3.63)$$

Konduktancja składowych symetrycznych linii  $n$ -torowej:

$$\mathbf{G}_s = \mathbf{G}, \quad (3.64)$$

stąd:

$$G_1 = G_2 = G_0 = G. \quad (3.65)$$

Ze względu małą wartość strat mocy (a w efekcie strat energii), konduktancja linii może zostać **pominięta**. Dodatkowo, nowobudowane linie napowietrzne WN i NN są projektowane w taki sposób aby uzyskać  $U_{kr} > U_f$ , wówczas zjawisko ulotu nie występuje.

### 3.2.4 Przypadek szczególny – symetryczna WWLN

Podobnie jak dla modelu parametrów wzdluznych, rozważając w pełni symetryczną WWLN oraz przy zastosowaniu uproszczeń opisanych w załączniku 8, odpowiednie podmacierze macierzy współczynników potencjałowych Maxwella przyjmują postać (3.66)÷(3.67):

$$\mathbf{P}_{ii}^{pu} = P_{Wz_i}^{e,pu} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix} + P_{M_i}^{e,pu} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.66)$$

$$\mathbf{P}_{ij}^{pu} = P_{m_{ij}}^{e,pu} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.67)$$

Dla  $i, j \in \{I, II, \dots, n\} \wedge j \neq i$ .

Macierze pojemności składowych symetrycznych dla w pełni symetrycznej WWLN, zgodnie z przekształceniem (3.58), prezentują się następująco:

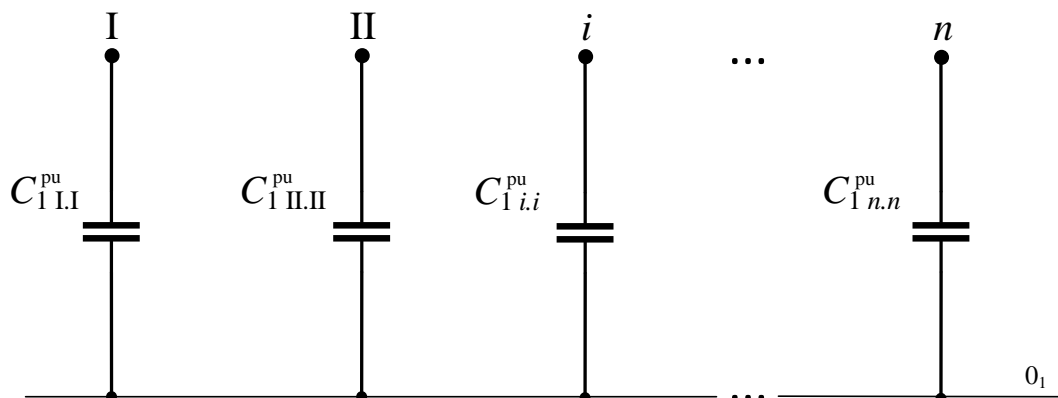
$$\mathbf{C}_1^{\text{pu}} = \mathbf{C}_2^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} C_{1\text{I.I}}^{\text{pu}} & & & \\ & \ddots & & \\ & & C_{1n.n}^{\text{pu}} & \\ & & & n \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \vdots \\ n \end{matrix}, \quad (3.68)$$

będące macierzami diagonalnymi oraz dla składowej zerowej macierz postaci

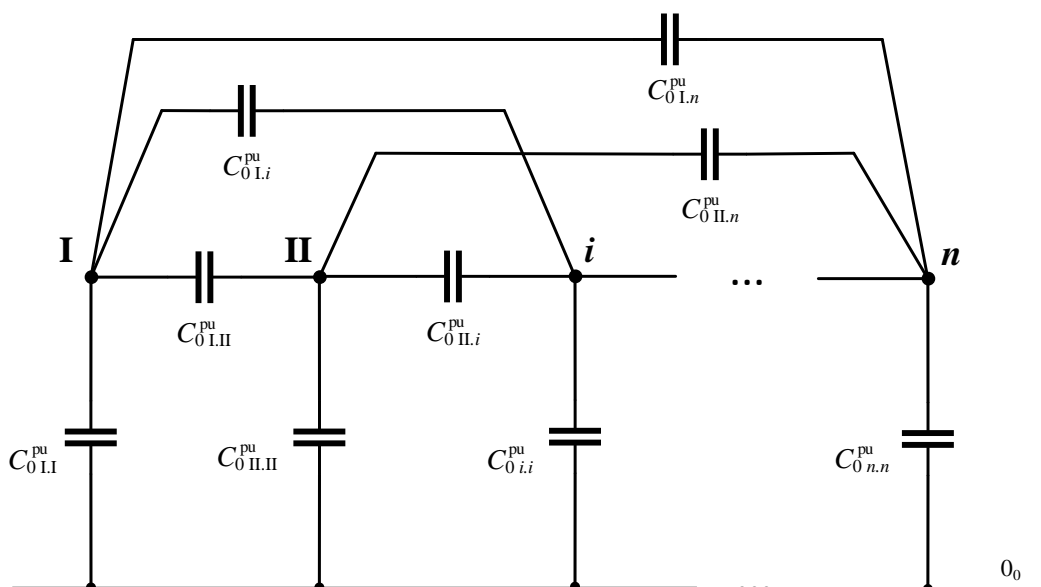
$$\mathbf{C}_0^{\text{pu}} = \begin{bmatrix} C_{0\text{I.I}}^{\text{pu}} & \cdots & C_{0\text{I}.n}^{\text{pu}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{0n.\text{I}}^{\text{pu}} & \cdots & C_{0n.n}^{\text{pu}} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{I} \\ \vdots \\ n \end{matrix}, \quad (3.69)$$

przy czym  $C_{0j.i}^{\text{pu}} = C_{0i.j}^{\text{pu}}$ ,  $j \neq i$  będąca macierzą pełną.

Macierzom (3.68) i (3.69) przyporządkowuje się schematy zastępcze przedstawione na rysunkach 3.12 oraz 3.13.



Rys. 3.12 Schemat zastępczy pojemności dla składowych zgodnej i przeciwnej WWLN



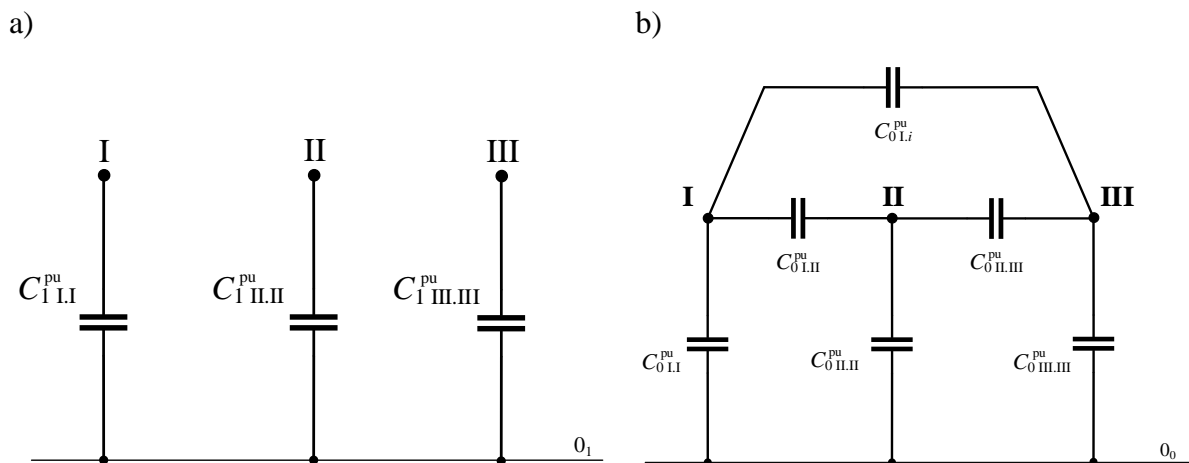
Rys. 3.13 Schemat zastępczy pojemności dla składowej zerowej WWLN

Zależności (3.70) i (3.71) są modelem parametrów poprzecznych dla składowych symetrycznych WWLN o trzech torach prądowych.

$$\mathbf{B}_1^{\text{pu}} = \mathbf{B}_2^{\text{pu}} \stackrel{n=3}{=} j\omega \begin{bmatrix} C_{1\text{ I.I}}^{\text{pu}} & & \\ & C_{1\text{ II.II}}^{\text{pu}} & \\ & & C_{1\text{ III.III}}^{\text{pu}} \end{bmatrix}, \quad (3.70)$$

$$\mathbf{B}_0^{\text{pu}} \stackrel{n=3}{=} j\omega \begin{bmatrix} C_{0\text{ I.I}}^{\text{pu}} & C_{0\text{ I.II}}^{\text{pu}} & C_{0\text{ I.III}}^{\text{pu}} \\ C_{0\text{ II.I}}^{\text{pu}} & C_{0\text{ II.II}}^{\text{pu}} & C_{0\text{ II.III}}^{\text{pu}} \\ C_{0\text{ III.I}}^{\text{pu}} & C_{0\text{ III.II}}^{\text{pu}} & C_{0\text{ III.III}}^{\text{pu}} \end{bmatrix}, \quad (3.71)$$

gdzie:  $C_{0\text{ j.i}}^{\text{pu}} = C_{0\text{ i.j}}^{\text{pu}}$ ,  $j \neq i$ . Zależnościom tym odpowiadają schematy zastępcze przedstawione na rysunku 3.14.



Rys. 3.14 Schemat zastępczy a) zgodny oraz przeciwny, b) zerowy WWLN o trzech torach prądowych ( $n = 3$ )

### 3.3 Rozkład pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN

Rozważa się rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu WWLN. Zakłada się, że wiązkowe przewody fazowe WWLN zostały zagregowane do pojedynczych przewodów zastępczych, zatem nie rozważa się natężenia pola przy powierzchni przewodów, przedmiotem analiz jest natężenie pola elektromagnetycznego w znacznej odległości od powierzchni przewodów. Ziemię traktuje się jako półpłaszczyznę przewodzącą. Pole elektryczne i magnetyczne linii napowietrznej nie jest w rzeczywistości polem płaskim, ponieważ ze względu na zwisy, poszczególne przewody nie są równoległe do ziemi, lecz tworzą krzywe zbliżone do krzywych łańcuchowych (zał. 8.2). Na potrzeby analiz zakłada się, że na małych odcinkach linii przewody WWLN są równoległe do powierzchni ziemi, przez co pole elektryczne WWLN może być traktowane w przybliżeniu jak pole płaskie [1, 8, 30].

## 3.3.1 Rozkład natężenia pola elektrycznego

W prowadzonej analizie, przewody robocze zasilają się napięciem sinusoidalnym „sztywnym” (niezależnym od obciążenia linii). Przewody linii traktuje się jak długie walce o przekroju kołowym o promieniu  $r_k$ , gdzie  $k$  – wybrany przewód WWLN  $k \in \{1, 2, \dots, 3n\}$ . Na powierzchni przewodów znajduje się ładunek o gęstości liniowej  $\tau_k$ . Zgodnie z zasadą zwierciadlanego odbicia, na przewodach zastępujących ziemię znajduje się ładunek o gęstości liniowej  $-\tau_k$ . Oś  $Oz$  współrzędnych kartezjańskich jest równoległa do rozważanego przewodu, oś  $Ox$  leży na powierzchni ziemi, oś  $Oy$  jest również w płaszczyźnie ziemi i jest do niej prostopadła [1, 8].

Zakłada się, że zarówno potencjały jak i ładunki WWLN, kolejno opisane macierzami  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{Q}$  wszystkich przewodów są stałe wzdłuż całej długości WWLN. Wartości skuteczne potencjałów  $\mathbf{V}$  przewodów fazowych wynoszą:

$$\mathbf{V} = \sqrt{\frac{1}{3}} \mathbf{U}_n, \quad (3.72)$$

wtedy:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{L1_1} \\ \underline{V}_{L2_1} \\ \underline{V}_{L3_1} \\ \vdots \\ \underline{V}_{L1_n} \\ \underline{V}_{L2_n} \\ \underline{V}_{L3_n} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} \underline{U}_{nL1_1} \\ \underline{U}_{nL2_1} \\ \underline{U}_{nL3_1} \\ \vdots \\ \underline{U}_{nL1_n} \\ \underline{U}_{nL2_n} \\ \underline{U}_{nL3_n} \end{bmatrix}, \quad (3.73)$$

przy czym z uwagi na symetryczne zasilanie  $\underline{U}_{nL1_i} = \underline{U}_{nL2_i} = \underline{U}_{nL3_i} = \underline{U}_{n_i}$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ ,

oraz:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}^e \mathbf{V}, \quad (3.74)$$

gdzie:  $\mathbf{U}_n$  – macierz kolumnowa napięcia zasilającego WWLN stopnia  $3n \times 1$ ,  $\underline{U}_{n_i}$  – napięcie znamionowe toru prądowego  $i$  WWLN,  $\mathbf{C}^e$  – macierz pojemności cząstkowych WWLN (w poszczególnych wartościach pojemności cząstkowych uwzględniono składnik uwzględniający oddziaływanie przewodów odgromowych – zgodnie z (8.30)). Wyznaczają się wartości skuteczne ładunków dla każdej fazy  $L_i$  toru prądowego  $i$  WWLN o  $3n$  liczbie przewodów:

$$\underline{Q}_{L_i} = \sum_{k=1}^{3n} C_{L_i k} \underline{V}_k, \quad (3.75)$$

gdzie  $L_i = \{L1_i, L2_i, L3_i\}$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ ,  $k$  – przewód fazowy WWLN.

Jednostkowa ( $l = 1$  km) gęstość liniowa ładunku określona jest zależnością:

$$\tau = \frac{Q}{l}. \quad (3.76)$$

Na podstawie znajomości ładunków jednostkowych  $\tau$  przypadających na jednostkę długości  $k$ -tego przewodu, określa się wektor natężenia pola quasi-statycznego w dowolnym punkcie przestrzeni otaczającej linię. Na rysunku 3.15 przedstawiono ładunek o gęstości liniowej  $\tau_k$  położony w punkcie o współrzędnych  $(x_k, y_k)$  oraz jego zwierciadlany obraz w postaci ładunku o gęstości liniowej  $\tau_{k'} = -\tau_k$  położony w punkcie  $(x_k, -y_k)$ . W dowolnym punkcie  $(x, y)$  półpłaszczyzny reprezentującej przestrzeń nad powierzchnią ziemi, ładunki o gęstościach liniowych  $\tau_k$  oraz  $\tau_{k'}$  wytwarzają natężenia pól  $\vec{E}_k$  i  $\vec{E}_{k'}$ .

Punkt  $(x, y)$  jest w polu elektrycznym dwóch osi elektrycznych, zatem składowe natężenia pola elektrycznego  $E_k$  oraz  $E_{k'}$  wynoszą:

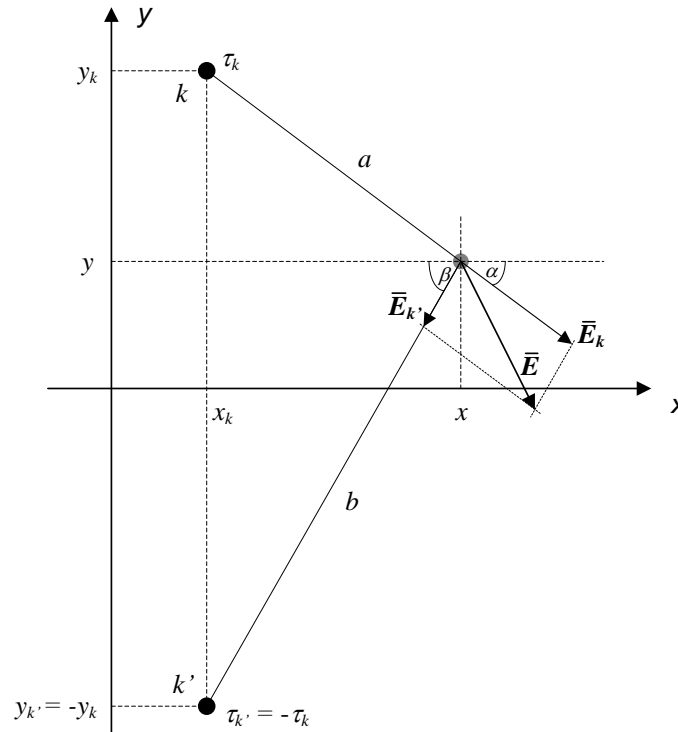
$$E_k = |\vec{E}_k| = \frac{Q_k}{2\pi\epsilon_0 a l} = \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0 a}, \quad (3.77)$$

$$E_{k'} = |\vec{E}_{k'}| = \frac{Q_{k'}}{2\pi\epsilon_0 b l} = \frac{\tau_{k'}}{2\pi\epsilon_0 b}. \quad (3.78)$$

Składowe  $E_{kx}, E_{ky}, E_{k'x}, E_{k'y}$  zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rysunku 3.15 wynoszą:

$$E_{kx} = E_k \frac{x - x_k}{a} = \frac{\tau_k (x - x_k)}{2\pi\epsilon_0 a^2}, \quad E_{ky} = E_k \frac{y - y_k}{a} = \frac{\tau_k (y - y_k)}{2\pi\epsilon_0 a^2}, \quad (3.79)$$

$$E_{k'x} = E_{k'} \frac{x - x_k}{b} = \frac{\tau_{k'} (x - x_k)}{2\pi\epsilon_0 b^2}, \quad E_{k'y} = E_{k'} \frac{y + y_k}{b} = \frac{\tau_{k'} (y + y_k)}{2\pi\epsilon_0 b^2}. \quad (3.80)$$



**Rys. 3.15** Natężenie pola elektrycznego  $E$  wywołane w punkcie przestrzeni o współrzędnych  $(x, y)$  przez parę ładunków o gęstościach liniowych  $\tau_k$  i  $\tau_{k'}$

Składowe wypadkowego natężenia pola elektrycznego pochodzącego od dwóch osi elektrycznych o gęstości liniowej ładunku  $\tau_k$  oraz  $\tau_k' = -\tau_k$  w rozważanym punkcie  $(x, y)$  wynoszą:

$$E_x = E_{kx} + E_{k'x} = \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0} \frac{4yy_k(x-x_k)}{\left[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2\right]\left[(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2\right]}, \quad (3.81)$$

$$E_y = E_{ky} + E_{k'y} = \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0} \frac{-2y_k \left[ y_k^2 - y^2 + (x-x_k)^2 \right]}{\left[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2\right]\left[(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2\right]}. \quad (3.82)$$

Stosując zależności (3.81)÷(3.82), na mocy zasady superpozycji, składowe natężenia pola elektrycznego generowane przez układ wszystkich  $3n$  przewodów WWLN wynoszą:

$$\underline{E}_x^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \sum_{k=1}^{3n} \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0} \frac{4yy_k(x-x_k)}{\left[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2\right]\left[(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2\right]} = E_x(x, y)e^{j\varphi_x(x, y)}, \quad (3.83)$$

$$\underline{E}_y^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \sum_{k=1}^{3n} \frac{\tau_k}{2\pi\epsilon_0} \frac{-2y_k \left[ y_k^2 - y^2 + (x-x_k)^2 \right]}{\left[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2\right]\left[(x-x_k)^2 + (y+y_k)^2\right]} = E_y(x, y)e^{j\varphi_y(x, y)}. \quad (3.84)$$

Ładunki zespolone  $\underline{Q}_{L_t}$  (3.75) generują w każdym punkcie przestrzeni składowe zespolone natężenia pola elektrycznego  $\underline{E}_x^{(\Sigma 3n)}$ ,  $\underline{E}_y^{(\Sigma 3n)}$  o różnych fazach, co w postaci czasowej można zapisać w sposób ogólny:

$$E_x^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{2}E_x(x, y)\cos(\omega t + \varphi_x(x, y)), \quad (3.85)$$

$$E_y^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{2}E_y(x, y)\cos(\omega t + \varphi_y(x, y)). \quad (3.86)$$

Składowe wektora natężenia pola elektrycznego są funkcjami harmonicznymi o różnych kątach. Wektor wypadkowy  $\vec{E}^{(\Sigma 3n)}$  w ciągu jednego okresu zakreśla w przestrzeni elipsę. Wartość chwilową wektora wypadkowego natężenia pola elektrycznego wyznacza się z zależności (3.87):

$$E^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{\left(E_x^{(\Sigma 3n)}(x, y, t)\right)^2 + \left(E_y^{(\Sigma 3n)}(x, y, t)\right)^2}. \quad (3.87)$$

W tym przypadku moduł wektora natężenia pola elektrycznego wyznacza się rozpatrując punkt powierzchni  $(x, y)$  w płaszczyźnie Gaussa przez co każdemu punktowi przestrzeni przyporządkowuje się liczbę zespoloną o module równym (3.87):

$$\underline{E}^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = E_x^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) + jE_y^{(\Sigma 3n)}(x, y, t). \quad (3.88)$$

Zastosowanie wzorów Eulera dla zależności (3.85), (3.86) skutkuje postaciami (3.89)÷(3.90):

$$\underline{E}_x^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{2}E_x(x, y) \frac{e^{j(\omega t + \varphi_x(x, y))} + e^{-j(\omega t + \varphi_x(x, y))}}{2}, \quad (3.89)$$



$$\underline{E}_y^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{2} E_y(x, y) \frac{e^{j(\omega t + \varphi_y(x, y))} + e^{-j(\omega t + \varphi_y(x, y))}}{2}, \quad (3.90)$$

wówczas:

$$\underline{E}^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{2} \left\{ \frac{1}{2} [\underline{E}_x(x, y) + j\underline{E}_y(x, y)] e^{j\omega t} + \frac{1}{2} [\underline{E}_x^*(x, y) + j\underline{E}_y^*(x, y)] e^{-j\omega t} \right\}, \quad (3.91)$$

gdzie:

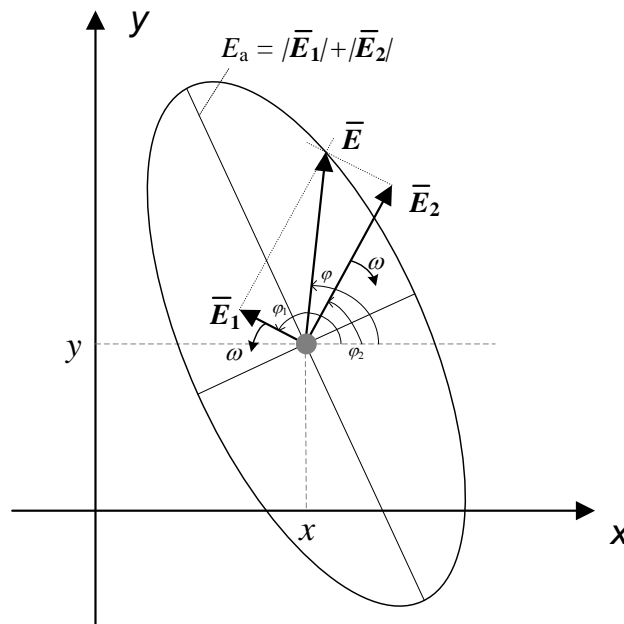
$$\underline{E}_1^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \frac{1}{2} [\underline{E}_x(x, y) + j\underline{E}_y(x, y)], \quad (3.92)$$

$$\underline{E}_2^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \frac{1}{2} [\underline{E}_x^*(x, y) + j\underline{E}_y^*(x, y)], \quad (3.93)$$

wtedy:

$$\underline{E}^{(\Sigma 3n)}(x, y, t) = \sqrt{2} \underline{E}_1^{(\Sigma 3n)}(x, y) e^{j\omega t} + \sqrt{2} \underline{E}_2^{(\Sigma 3n)}(x, y) e^{-j\omega t}. \quad (3.94)$$

Wypadkowe pole elektryczne w dowolnym punkcie  $(x, y)$  przestrzeni wokół WWLN jest polem eliptycznym złożonym z sumy dwóch pól wirujących z tą samą prędkością kątową  $\omega$  w przeciwnych kierunkach (rys. 3.16) [1, 8].



Rys. 3.16 Wypadkowe pole elektryczne w punkcie otoczenia WWLN

Maksymalna wartość, która może wystąpić w dowolnym punkcie  $(x, y)$  rozpatrywanej przestrzeni występuje w kierunku półosi dużej elipsy pola wirującego i wynosi:

$$E_{\max}^{(\Sigma 3n)}(x, y) = |\underline{E}_1(x, y)| + |\underline{E}_2(x, y)|. \quad (3.95)$$

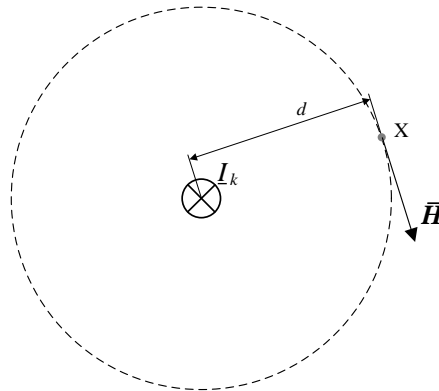
Maksymalne natężenie pola elektrycznego występuje w przypadku, gdy kąty fazowe składowych natężenia pola elektrycznego  $\varphi_x(x, y)$  oraz  $\varphi_y(x, y)$  są równe.

## 3.3.2 Rozkład natężenia pola magnetycznego

Natężenie pola magnetycznego w dowolnym punkcie X pola wytworzonego przez  $3n$  nieskończenie długich prostoliniowych przewodów WWLN o przekrojach kołowych  $r_k$  i różnych prądach  $I_k$  (rys. 3.17) wyznacza się z prawa przepływu:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^N I_k, \quad (3.96)$$

gdzie  $k$  – przewód WWLN z prądem  $I_k$ ,  $k \in (1, 2, \dots, 3n)$ .



Rys. 3.17 Zastosowanie prawa przepływu do wyznaczenia natężenia pola  $\vec{H}$  w punkcie X

Przewód z prądem  $I$  znajduje się w odległości  $d$  od punktu X, gdzie  $d \gg r$ . Przez punkt X poprowadzono płaszczyznę prostopadłą do osi przewodu, a następnie z punktu X zakreślono okrąg o promieniu  $d$  na tej płaszczyźnie wyznaczając drogę całkowania. Wektor  $\vec{H}$  jest styczny do zakreślonego okręgu, a ze względu na symetrię osiową natężenie pola ma w każdym punkcie tego okręgu jednakowy moduł. Wobec powyższego, na podstawie prawa przepływu, otrzymuje się wyrażenie:

$$|\vec{H}| = H = \frac{I}{2\pi d}. \quad (3.97)$$

Rozważa się przewód napowietrzny  $k$  przez który płynie prąd  $I_k$ . Przyjęto przepływ prądu w płaszczyźnie  $Oz$  tak jak pokazano na rysunku 3.18.

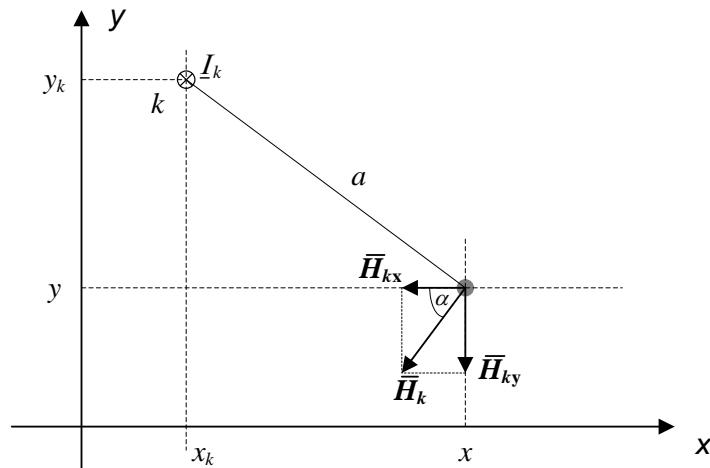
Zgodnie z (3.97) natężenie pola magnetycznego w punkcie  $(x, y)$  wynosi:

$$|\vec{H}_k| = H_k = \frac{I_k}{2\pi a}, \quad (3.98)$$

a składowe  $H_{kx}$  oraz  $H_{ky}$  wynoszą w tym przypadku:

$$H_{kx} = H_k \frac{y - y_k}{a} = \frac{I_k (y - y_k)}{2\pi a^2} = \frac{I_k}{2\pi} \frac{(y - y_k)}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad (3.99)$$

$$H_{ky} = H_k \frac{x - x_k}{a} = \frac{I_k (x - x_k)}{2\pi a^2} = \frac{I_k}{2\pi} \frac{(x - x_k)}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}. \quad (3.100)$$



Rys. 3.18 Natężenie pola magnetycznego  $\vec{H}$  wywołane w punkcie przestrzeni o współrzędnych  $(x, y)$  przez przewód z prądem  $I_k$

Trójfazową WWLN o  $3n$  przewodach zasila się prądem  $\mathbf{I}$ :

$$\mathbf{I} = \left[ \underline{I}_{L1_1} \quad \underline{I}_{L2_1} \quad \underline{I}_{L3_1} \quad \cdots \quad \underline{I}_{L1_n} \quad \underline{I}_{L2_n} \quad \underline{I}_{L3_n} \right]^T, \quad (3.101)$$

gdzie w obrębie każdego toru  $i$ , prądy tworzą układ symetryczny składowej zgodnej. Na skutek płynących w przewodach fazowych prądów, składowe natężenia pola magnetycznego wynoszą:

$$\underline{H}_x^{(\Sigma 3n)} = \sum_{k=1}^{3n} \frac{\underline{I}_k}{2\pi} \frac{(y - y_k)}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad (3.102)$$

$$\underline{H}_y^{(\Sigma 3n)} = \sum_{k=1}^{3n} \frac{\underline{I}_k}{2\pi} \frac{(x - x_k)}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}. \quad (3.103)$$

Wypadkowe natężenie pola magnetycznego wyznacza się z zależności (3.104):

$$H^{(\Sigma 3n)} = \sqrt{\left(\underline{H}_x^{(\Sigma 3n)}\right)^2 + \left(\underline{H}_y^{(\Sigma 3n)}\right)^2}. \quad (3.104)$$

Analogicznie jak w przypadku natężenia pola elektrycznego, pole magnetyczne wokół WWLN jest polem eliptycznym. Rozpatrując pole magnetyczne w przestrzeni Gaussa, maksymalną wartość wypadkowego natężenia pola magnetycznego wytworzonego przez  $3n$  przewodów WWLN w punkcie  $(x, y)$  wyznacza się z zależności (3.105):

$$H_{\max}^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \left| \underline{H}_1(x, y) \right| + \left| \underline{H}_2(x, y) \right|, \quad (3.105)$$

gdzie

$$\underline{H}_1^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \frac{1}{2} \left[ \underline{H}_x(x, y) + j \underline{H}_y(x, y) \right], \quad (3.106)$$

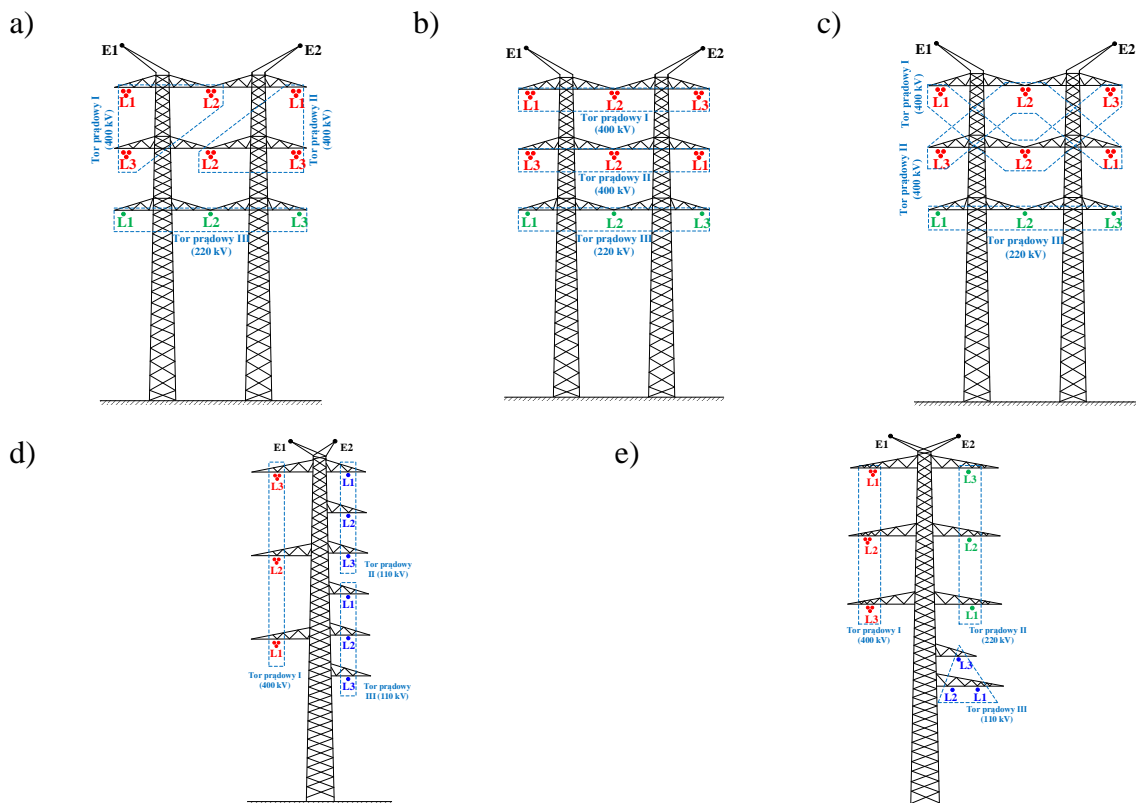
$$\underline{H}_2^{(\Sigma 3n)}(x, y) = \frac{1}{2} \left[ \underline{H}_x^*(x, y) + j \underline{H}_y^*(x, y) \right]. \quad (3.107)$$

Przykładowe obliczenia wielkości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego przedstawiono w kolejnym rozdziale. Obliczenia wykonano dla wybranych sylwetek WWLN.

## 4 PRACA WWLN JAKO ELEMENTU SYSTEMU PRZESYŁOWEGO

Model matematyczny WWLN w postaci macierzy admitancyjnych oraz macierzy pojemności dla wielkości fazowych oraz składowych symetrycznych pozwala na dokładny opis WWLN w systemie elektroenergetycznym, a przez to umożliwia wykonanie analiz pracy tego elementu sieci przesyłowej. W ramach pracy doktorskiej skupiono się na skutkach występowania niesymetrii fazowej WWLN na wybrane parametry jakości energii elektrycznej oraz rozważono skutki niesymetrii geometrycznej linii na poprawną pracę sieci przesyłowej. Wyznaczono rozkłady pola elektromagnetycznego, którego źródłem są WWLN, a także rozważono wpływ geometrii sylwetki słupa oraz ułożenia faz na pojawianie się napięcia kolejności zerowej w przypadku symetrycznego obciążenia linii w poszczególnych torach, ze szczególnym zwróceniem uwagi na tor o najniższym napięciu znamionowym. Wyznaczono wskaźniki niesymetrii i nierównoważenia w stanach pracy normalnej sieci przesyłowej z WWLN o różnych długościach oraz stopniu niesymetrii geometrycznej. Kolejno przeprowadzono analizę zwarciovą, której celem było wyznaczenie prądów początkowych zwarcé jedno- i trójfazowych na końcu toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym objętego zwarciev, a także udziały prądów zwarciovych płynących badanym torem.

Wymienione analizy prowadzono dla szeregu sylwetek wielonapięciowych linii trójtorowych. W pracy w sposób szczegółowy przedstawiono wyniki dla pięciu wybranych konstrukcji linii (rys. 4.1). Wyselekcjonowane sylwetki charakteryzują się różnym stopniem niesymetrii geometrycznej, w tym sposobem prowadzenia torów prądowych oraz doborem napięć znamionowych tych torów. Parametry geometryczne omawianych WWLN opisano szerzej w załączniku 8.2.



**Rys. 4.1** Analizowane linie trójtorowe a) dwunapięciowa 2×400+220 kV (tory prądowe 400 kV w układzie trójkątów), b) dwunapięciowa 2×400+220 kV w układzie płaskim, c) dwunapięciowa 2x400+220 kV (tory 400 kV w układzie zygzaka), d) linia dwunapięciowa 400+2×110 kV, e) linia trójnapięciowa 400+220+110 kV

Sylwetki pierwsza i czwarta, przedstawione na rysunkach 4.1a i 4.1d, to rzeczywiste WWLN pracujące w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (rys. 2.3b,c). WWLN przedstawione na rysunkach 4.1b i 4.1c są prowadzone na tej samej konstrukcji wsporczej co pierwsza WWLN (rys. 4.1a), lecz różnią się sposobem ułożenia torów prądowych 400 kV. Parametry geometryczne piątej konstrukcji (rys. 4.1e) dobrano na podstawie wymiarów geometrycznych czterotorowej, trójnapięciowej linii napowietrznej pracującej w Polsce (rys. 2.3f), które następnie zweryfikowano w oparciu o normę [105].

**Celem** prowadzonych obliczeń jest poznanie i przybliżenie zjawisk występujących w WWLN na skutek wzajemnego oddziaływania torów prądowych o różnych napięciach znamionowych i różnym stopniu niesymetrii geometrycznej.

#### 4.1 Analiza rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN

Istotną kwestią związaną z użytkowaniem napowietrznych linii przesyłowych jest występowanie pola elektromagnetycznego w ich otoczeniu w ujęciu narażeń środowiskowych. O istotności wskazanej powyżej tematyki świadczą liczne publikacje naukowe m.in. [29, 32, 70, 98]. Zależność między poziomem pola elektromagnetycznego i spodziewanymi skutkami jego oddziaływania na organizmy żywe, w szczególności człowieka, znalazły szczególne zainteresowanie takich organizacji jak International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Council of European Union (CEU), World Health Organization (WHO). Z uwagi na to, że linie napowietrzne wysokich napięć są obiektami obejmującymi swym zasięgiem znaczne obszary terenu, na których mogą przebywać ludzie, w niektórych krajach, w tym także w Polsce, opracowano szczegółowe przepisy określające warunki budowy linii napowietrznych wysokiego napięcia pod kątem ograniczenia zasięgu powstających wokół nich pól elektromagnetycznych.

Obecnie limity natężenia pola elektromagnetycznego pochodzącego od elementów sieci przesyłowo-rozdziałowej o częstotliwości sieciowej 50 Hz w wybranych krajach bazują na wytycznych przedstawionych w dokumencie ICNIRP [99]. Organizacje ICNIRP oraz WHO określają limit natężenia pola elektrycznego, tzw. punkt odniesienia, na poziomie 5 kV/m bez dodatkowych ograniczeń czasowych przebywania w tym polu [101, 117]. Limit natężenia pola magnetycznego, również bez dodatkowych ograniczeń czasowych, wynosi 80 A/m. Wytyczne CEU przedstawione w dokumencie [96] są tożsame z wytycznymi ICNIRP. Wartości te zostały przyjęte w krajowych normach w takich państwach jak m.in. Francja, Szwajcaria, Wielka Brytania, Austria, Czechy, Chorwacja, Portugalia. W Niemczech ustalono bardziej szczegółowe wytyczne ze wskazaniem czasu narażenia na działanie pola elektromagnetycznego. Niemiecki dokument wskazuje limit natężenia pola elektrycznego na poziomie 10 kV/m w przypadku krótkotrwałego przebywania w polu oraz dla niewielkich obszarów terenów niezabudowanych. Na pozostałych terenach obowiązuje wartość graniczna 5 kV/m. W przypadku natężenia pola magnetycznego dopuszcza się przebywanie w czasie poniżej 1h/dobę w polu o natężeniu 120 A/m. Dla pozostałych przypadków obowiązuje dopuszczalna wartość natężenia pola 80 A/m. W USA przepisy są zróżnicowane w zależności od wybranego stanu. Przykładowo dla Stanu Nowy York określono wartości graniczne pola na krawędzi (1,6 kV/m oraz 16 A/m) i wewnątrz (11,8 kV/m oraz 16 A/m) pasa ochronnego.

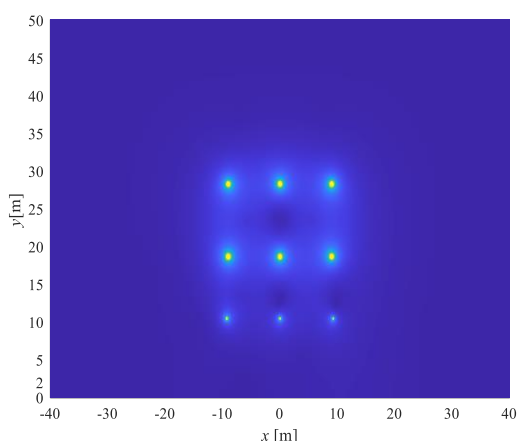
Zgodnie z polskimi przepisami [104, 107] dopuszczalne dla miejsc dostępnych dla ludzi poziomy pola elektrycznego i magnetycznego wynoszą kolejno 10 kV/m i 60 A/m. Ponadto na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową natężenie pola elektrycznego nie może przekraczać wartości 1 kV/m.

Przeprowadzone analizy rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu pięciu badanych trójtorowych WWLN o sylwetkach przedstawionych na rysunku 4.1 obejmowały:

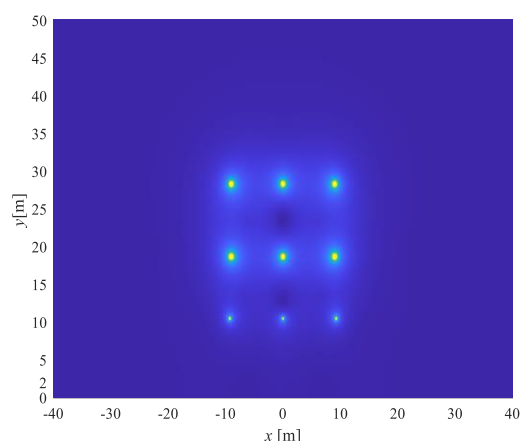
- wyznaczenie rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji odległości od osi słupa badanych WWLN,
- wyznaczenie maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego analizowanych WWLN w funkcji zastosowanego układu faz WWLN,
- wyznaczenie maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego analizowanych WWLN w funkcji przesunięcia kątów napięć zasilających WWLN.

Na wartość natężenia pola elektromagnetycznego generowanego przez linię przesyłową mają wpływ przede wszystkim układ geometryczny jej przewodów, napięcie znamionowe oraz prąd obciążenia (rozdz. 3.3). Badane trójtorowe wielonapięciowe linie napowietrzne obciążono prądami równymi prądom dopuszczalnym długotrwale poszczególnych torów, zgodnie z tabelą 1.2. Przyjęto, że kąty fazowe napięć zasilających poszczególnych torów są jednakowe (przyjęto zerowe kąty fazowe napięć dla faz L1). Natężenie pola elektromagnetycznego badano w miejscu, w którym natężenie to jest największe, a więc w miejscu największego zwisu przewodu (zał. 8.2.2). Na rysunkach 4.2 i 4.3 przedstawiono kolejno rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu badanych linii napowietrznych.

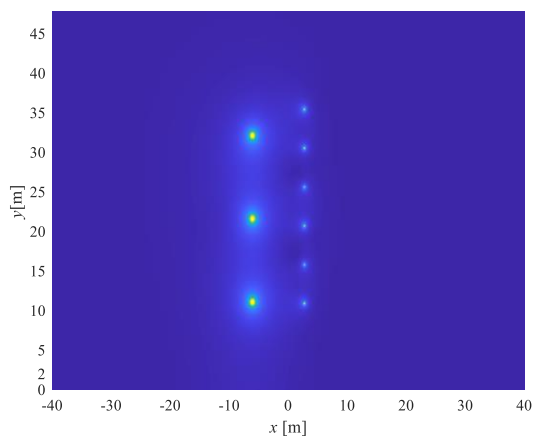
a) pierwsza WWLN



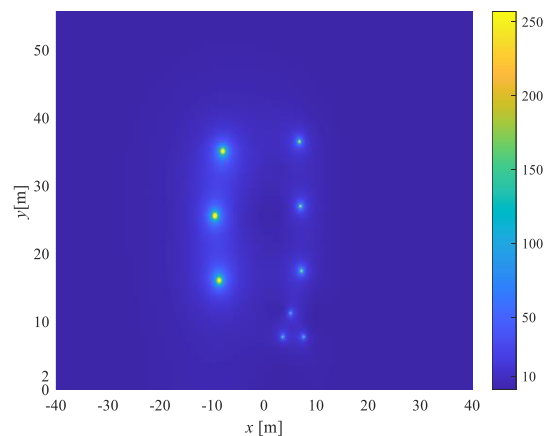
b) druga i trzecia WWLN



c) czwarta WWLN

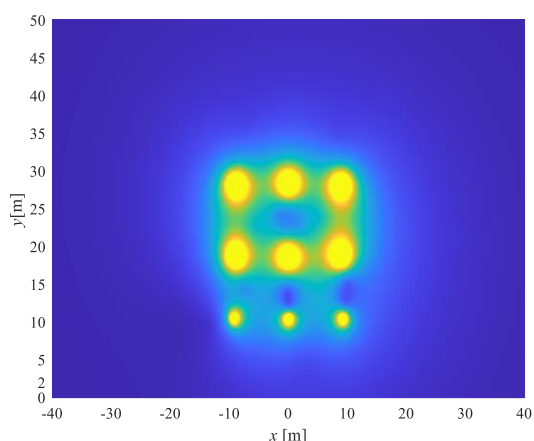


d) piąta WWLN

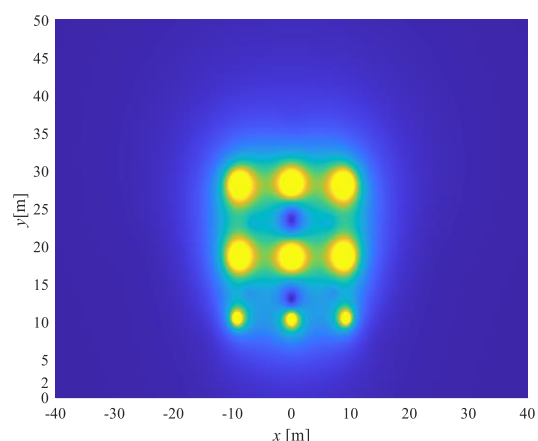


Rys. 4.2 Natężenie pola elektrycznego w kV/m w otoczeniu badanych trójtorowych linii wielonapięciowych

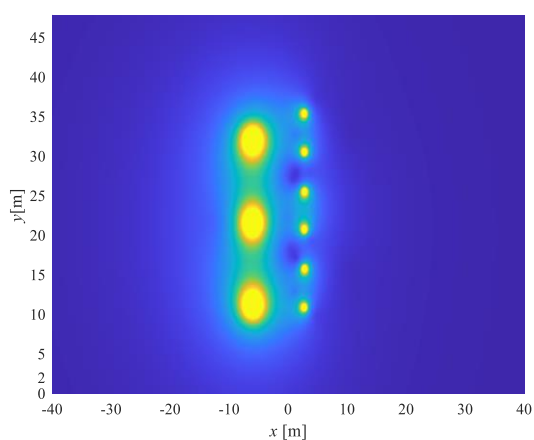
a) pierwsza WWLN



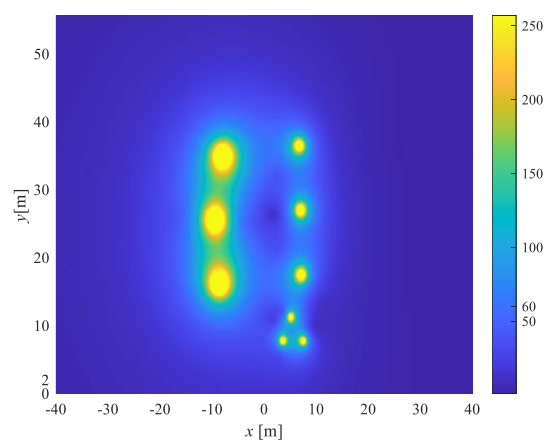
b) druga i trzecia WWLN



c) czwarta WWLN



d) piąta WWLN



**Rys. 4.3 Natężenie pola magnetycznego w A/m w otoczeniu badanych trójtorowych linii wielonapięciowych**

Największe wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występują w miejscu zawieszenia przewodów. Z uwagi na podobny rozkład przewodów fazowych w sylwetkach drugiej i trzeciej (rys. 4.1b,c) oraz przyjęcie tych samych warunków pracy tych linii (kąty fazowe napięć zasilających poszczególne tory prądowe są jednakowe), rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla tych WWLN są jednakowe. Z tego względu w pracy przedstawiono je w sposób łączny (rys. 4.2b, rys. 4.3b oraz rys. 4.5).

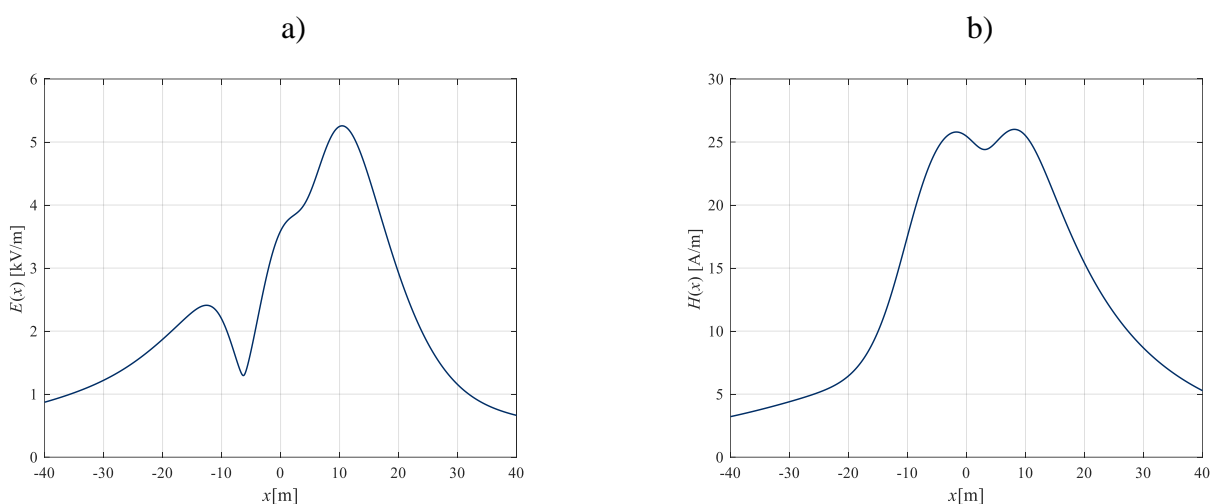
#### 4.1.1 Rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji odległości od osi słupa

Z punktu widzenia eksploatacyjnego linii napowietrznych najistotniejsza jest znajomość maksymalnych wartości natężenia pola elektromagnetycznego generowanego przez te linie w miejscach dostępnych dla ludzi. Z tego względu, natężenie pola elektrycznego i magnetycznego badano w miejscu największego zwisu przewodów (zał. 8.2) na wysokości 2 metrów nad ziemią, która jest wartością normatywną, przyjmowaną jako wysokość, na której mogą przebywać ludzie (rys. 4.4 ÷ rys. 4.7).

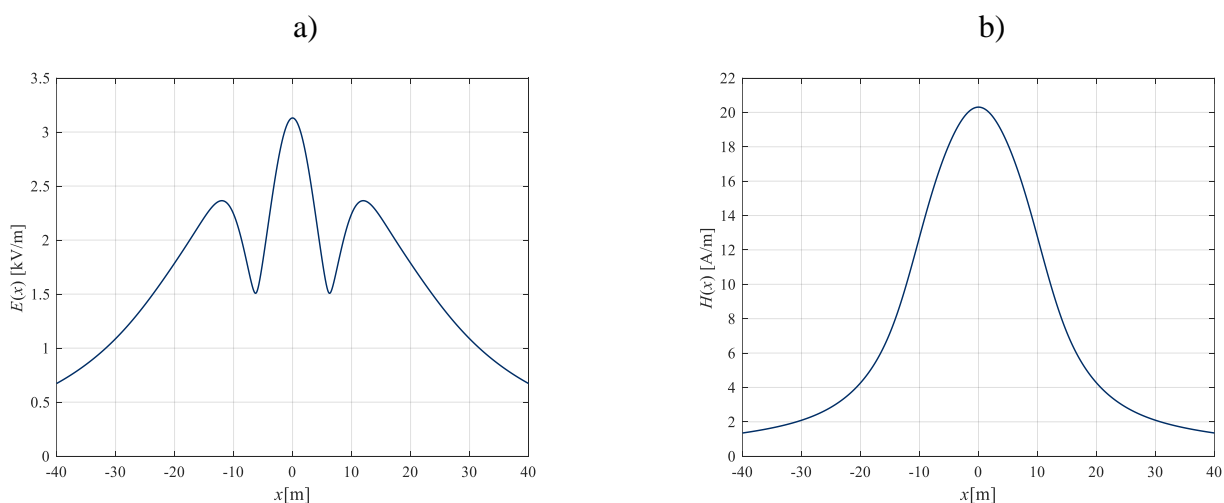
Na rysunkach 4.4 i 4.5 przedstawiono rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego trzech WWLN prowadzonych na tej samej, symetrycznej względem osi

słupa, konstrukcji wsporczej lecz charakteryzujących się różnym układem prowadzenia torów prądowych.

Dla pierwszej sylwetki zauważa się niesymetrię krzywych  $E$  oraz  $H$  względem osi słupa. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występują blisko osi zawieszenia przewodów fazowych L3 torów II i III. W tym przypadku bezpośrednio sąsiadujących przewodów fazowych toru II o zerowym kącie przesunięcia fazowego skutkuje największymi wartościami natężenia pola elektromagnetycznego 5,26 kV/m i 26 A/m w zakresie badanych odległości od osi słupa. W osi zawieszenia przewodu fazowego L1 toru III, wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego są znacznie niższe i wynoszą odpowiednio 2,04 kV/m i 18,4 A/m (bliskie sąsiedztwo przewodu fazowego L1 toru II). W przypadku zastosowania płaskiego układu przewodów fazowych lub układu torów prądowych o napięciu znamionowym 400 kV typu „zygzak”, możliwe jest osiągnięcie symetrycznych rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego o niższych maksimach tj. 3,13 kV/m oraz 20,31 A/m występujących w osi słupa (rys. 4.5).



Rys. 4.4 Rozkłady natężenia pola a) elektrycznego, b) magnetycznego pierwszej WWLN 2x400 + 220 kV

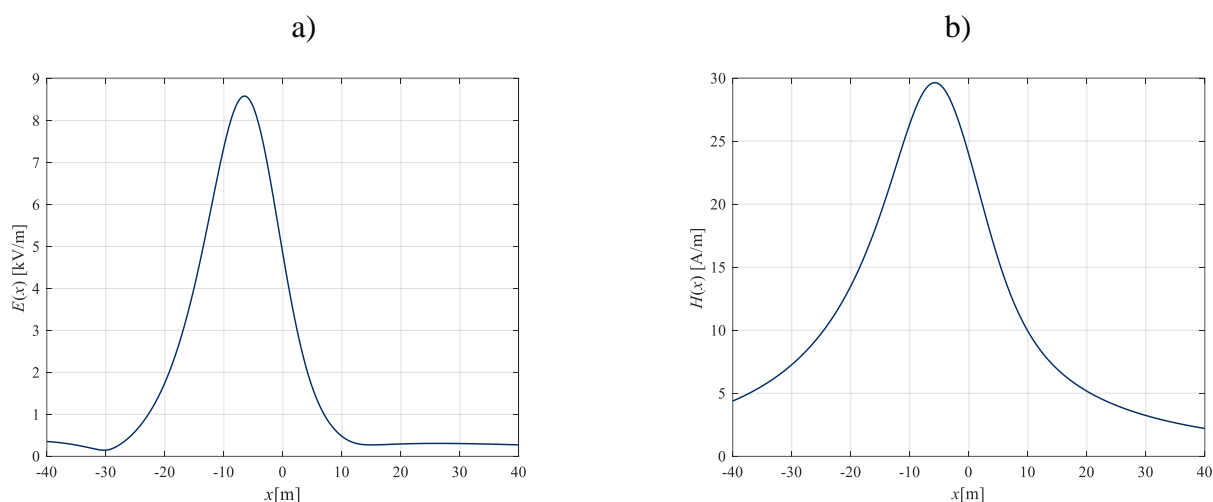


Rys. 4.5 Rozkłady natężenia pola a) elektrycznego, b) magnetycznego drugiej i trzeciej WWLN 2x400+220 kV

Dla czwartej WWLN (rys. 4.1d) uzyskuje się rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego, których maksima są przesunięte w kierunku zawieszenia toru

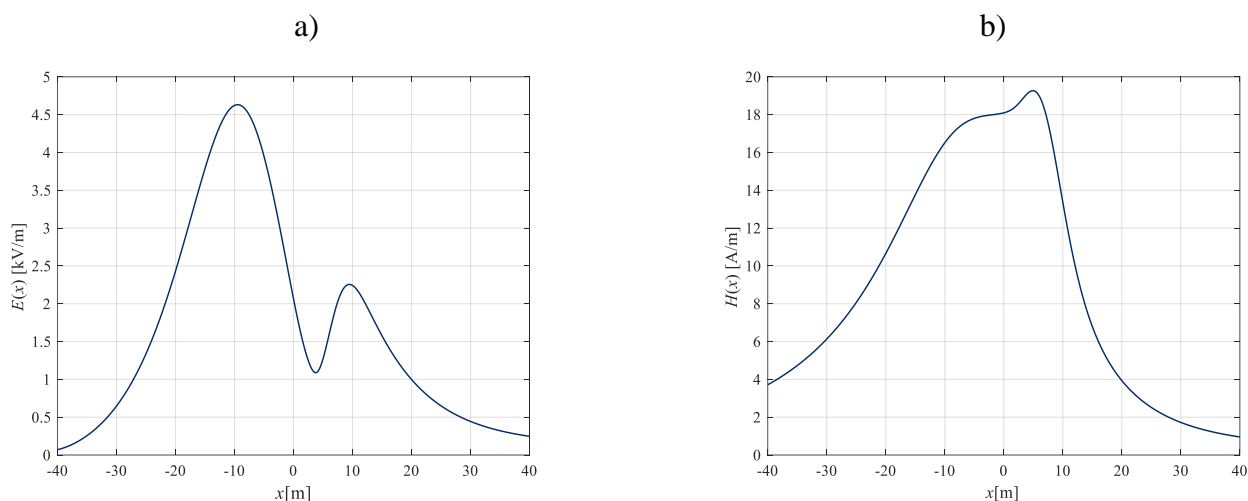


o najwyższym napięciu znamionowym. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego rozważanej linii wynoszą kolejno: 8,56 kV/m i 29,64 A/m. Z uwagi na węższą konstrukcję rozważanej sylwetki, dopuszczalną według polskich przepisów wartość natężenia pola elektrycznego (1 kV/m) osiąga się już przy około 23 metrach od osi słupa. W poprzednich przypadkach wartość tą osiągnięto w odległości ponad 30 metrów od osi słupa. Należy zaznaczyć, że osiągnięcie wartości dopuszczalnej natężenia pola elektrycznego dla wszystkich badanych konstrukcji WWLN zachodzi w obszarze pasa technologicznego tych linii.



Rys. 4.6 Rozkłady natężenia pola a) elektrycznego, b) magnetycznego czwartej WWLN 400 + 2x110 kV

Dla trójnapięciowej konstrukcji z rysunku 4.1e, ponownie maksymalne natężenie pola elektrycznego 4,63 kV/m osiągnięto w pobliżu osi zawieszenia toru prądowego o najwyższym napięciu znamionowym (400 kV). Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła 19,27 A/m i wystąpiła około 5 metrów od osi słupa, w miejscu zawieszenia torów 220 i 110 kV. Wartość 1 kV/m osiągnięto w odległości 27 metrów od osi słupa w kierunku prowadzenia toru prądowego o napięciu znamionowym 400 kV oraz 20 metrów od osi słupa w kierunku zawieszenia torów 220 kV i 110 kV.



Rys. 4.7 Rozkłady natężenia pola a) elektrycznego, b) magnetycznego piątej WWLN 400 + 220 + 110 kV

Należy podkreślić, że dla wszystkich analizowanych trójtorowych linii wielonapięciowych nie zostały przekroczone obowiązujące w Polsce limity natężenia pola

elektrycznego (10 kV/m), a maksymalne natężenie pola magnetycznego jest znacznie niższe niż ustalona graniczna wartość dopuszczalna, mimo pełnego obciążenia linii prądami dopuszczalnymi. Z tego powodu dalsze szczegółowe rozważania są prowadzone dla generowanych przez WWLN wartości natężenia pola elektrycznego.

#### 4.1.2 Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w funkcji zastosowanego układu faz WWLN

Wyznaczono maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w zależności od zastosowanego układu faz przy założeniu, że kąty fazowe napięć faz L1 poszczególnych torów są zerowe. Szczegółowe wyniki obliczeń zawarto w załączniku CD – tabela 1. Tabela 4.1 prezentuje największe oraz najmniejsze maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego osiągnięte przy zastosowaniu różnych układów przewodów fazowych w poszczególnych torach, a także wartość maksymalnego natężenia pola elektrycznego przy zastosowaniu układu faz jak na rysunku 4.1, które przyjęto jako wartości odniesienia oznaczone indeksem górnym „b”.

**Tab. 4.1 Wybrane wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego  $E$  w kV/m badanych WWLN w zależności od zastosowanego układu przewodów fazowych**

	Pierwsza WWLN	Druga WWLN	Trzecia WWLN	Czwarta WWLN	Piąta WWLN
$\max(E_{\max})$	6,71	6,69	6,78	9,36	5,19
$E_{\max}^b$	5,26	3,13	3,13	8,58	4,63
$\min(E_{\max})$	2,69	2,69	3,13	8,53	4,34

Rozkład przewodów fazowych WWLN ma decydujące znaczenie na generowane maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w badanym otoczeniu WWLN. Zależność ta jest szczególnie zauważalna przy porównaniu trzech pierwszych WWLN (rys. 4.1a,b,c), gdzie różnica wynikająca z zastosowanego układu faz wynosi około 4 kV/m. Dla pierwotnie przyjętych układów przewodów fazowych, zgodnie z rysunkiem 4.1 (przypadki bazowe), maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego mieszczą się w przedziale  $\min(E_{\max}) < E_{\max}^b < \max(E_{\max})$  dla czterech WWLN, a w przypadku trzeciej WWLN, dla zastosowanego układu przewodów fazowych osiąga się wartość  $\min(E_{\max})$ .

W tabeli 4.2 przedstawiono wybrane układy przewodów fazowych analizowanych WWLN, dla których osiągnięto minimalną wartość maksymalnego natężenia pola elektrycznego w badanych warunkach. W tabeli przedstawiono dodatkowo grafikę ilustrującą omawiane układy. Zastosowane kolory żółty, niebieski i różowy w poszczególnych torach prądowych (oznaczonych błękitną przerywaną linią) stanowią odpowiadające sobie fazy w torach prądowych. Fioletową ramką oznaczono bazowe układy przewodów fazowych w torach prądowych badanych WWLN zgodnie z rysunkiem 4.1. Poszczególne litery A, B, C dla danego toru oznaczają położenia faz kolejno L1, L2, L3, zaś sam sposób oznaczenia położenia (A, B, C) jest taki, że położenia oznaczane są od góry do dołu oraz z lewej do prawej strony. Metoda oznaczenia układów faz torów prądowych w poszczególnych sylwetkach WWLN została opisana w załączniku 8.2.

**Tab. 4.2** Najlepsze układy przewodów fazowych w torach prądowych WWLN, dla których osiąga się najmniejsze maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego  $E_{max}$  w kV/m

Lp.	Układ faz toru prądowego			Maksymalne natężenie pola elektrycznego $E_{max}$ , kV/m	Grafika przedstawiająca układy przewodów fazowych	
	I	II	III			
<b>Pierwsza WWLN (rys. 8.10a)</b>						
1.	ABC	ABC	ABC	5,26	zgodnie z rys. 4.1a	
Grupa I	9.	ABC	BCA	CAB	2,69	
	49.	BCA	CAB	ABC	2,69	
	74.	CAB	ABC	BCA	2,69	
	138.	ACB	BAC	CBA	2,69	
	178.	BAC	CBA	ACB	2,69	
	203.	CBA	ACB	BAC	2,69	
<b>Druga WWLN (rys. 8.10b)</b>						
31.	ABC	CBA	ABC	3,13	zgodnie z rys. 4.1b	
Grupa I	9.	ABC	BCA	CAB	2,69	
	49.	BCA	CAB	ABC	2,69	
	74.	CAB	ABC	BCA	2,69	
	138.	ACB	BAC	CBA	2,69	
	178.	BAC	CBA	ACB	2,69	
	203.	CBA	ACB	BAC	2,69	
Grupa I'	14.	ABC	CAB	BCA	2,69	
	39.	BCA	ABC	CAB	2,69	
	79.	CAB	BCA	ABC	2,69	
	143.	ACB	CBA	BAC	2,69	
	168.	BAC	ACB	CBA	2,69	
	208.	CBA	BAC	ACB	2,69	
<b>Trzecia WWLN (rys. 8.10c)</b>						
31.	ABC	CBA	ABC	3,13		
Grupa I	62.	BCA	BAC	BCA		3,13
	93.	CAB	ACB	CAB		3,13
	124.	ACB	CAB	ACB		3,13
	155.	BAC	BCA	BAC		3,13
	186.	CBA	ABC	CBA		3,13
Grupa 2	6.	ABC	ABC	CBA	3,13	
	47.	BCA	BCA	BAC	3,13	
	88.	CAB	CAB	ACB	3,13	
	129.	ACB	ACB	CAB	3,13	
	170.	BAC	BAC	BCA	3,13	
	211.	CBA	CBA	ABC	3,13	

	Lp.	Układ faz toru prądowego			Maksymalne natężenie pola elektrycznego $E_{max}$ , kV/m	Grafika przedstawiająca układy przewodów fazowych
		I	II	III		
Grupa 3	35.	ABC	CBA	BAC	3,13	
	64.	BCA	BAC	ACB	3,13	
	96.	CAB	ACB	CBA	3,13	
	122.	ACB	CAB	BCA	3,13	
	151.	BAC	BCA	ABC	3,13	
	183.	CBA	ABC	CAB	3,13	
Grupa 3'	34.	ABC	CBA	ACB	3,13	
	66.	BCA	BAC	CBA	3,13	
	95.	CAB	ACB	BAC	3,13	
	121.	ACB	CAB	ABC	3,13	
	153.	BAC	BCA	CAB	3,13	
	182.	CBA	ABC	BCA	3,13	
<b>Czwarta WWLN (rys. 8.10d)</b>						
	181.	CBA	ABC	ABC	8,58	zgodnie z rys. 4.1d
Grupa 1	18.	ABC	CAB	CBA	8,53	
	41.	BCA	ABC	BAC	8,53	
	82.	CAB	BCA	ACB	8,53	
	141.	ACB	CBA	CAB	8,53	
	164.	BAC	ACB	BCA	8,53	
	205.	CBA	BAC	ABC	8,53	
Grupa 2	24.	ABC	ACB	CBA	8,53	
	71.	BCA	CBA	BAC	8,53	
	100.	CAB	BAC	ACB	8,53	
	111.	ACB	ABC	CAB	8,53	
	158.	BAC	CAB	BCA	8,53	
	187.	CBA	BCA	ABC	8,53	
<b>Piąta WWLN (rys. 8.10e)</b>						
	36.	ABC	CBA	CBA	4,63	zgodnie z rys. 4.1e
Grupa 1	35.	ABC	CBA	BAC	4,34	
	64.	BCA	BAC	ACB	4,34	
	96.	CAB	ACB	CBA	4,34	
	122.	ACB	CAB	BCA	4,34	
	151.	BAC	BCA	ABC	4,34	
	183.	CBA	ABC	CAB	4,34	

Dla drugiej i trzeciej WWLN, które posiadają oś symetrii wzdłuż osi słupa zidentyfikowano grupy konfiguracji przewodów fazowych będących lustrzanymi odbiciami – dla drugiej WWLN to grupy 1 i 1', a dla trzeciej WWLN to grupy 3 i 3'.

#### 4.1.3 Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w funkcji kątów fazowych napięć zasilających

W kolejnej analizie wyznaczono maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego rozważanych WWLN, przy założeniu układu przewodów fazowych takiego jak na rysunku 4.1, w funkcji kątów fazowych poszczególnych torów prądowych w taki sposób, że zmieniano wartości kątów fazowych napięć zasilających w zakresie  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$  i  $0^\circ$ . Dla każdego z torów prądowych przyjęto fazę L1 za fazę odniesienia. Zakres zmian kątów napięć zasilających dobrano z uwagi na przeciętne rzeczywiste ruchowe warunki pracy linii napowietrznych. Szczegółowe wyniki obliczeń zawarto w załączniku CD – tabela 2. Tabela 4.3 przedstawia największe i najmniejsze maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego osiągane przy różnych konfiguracjach kątów napięć zasilających WWLN.

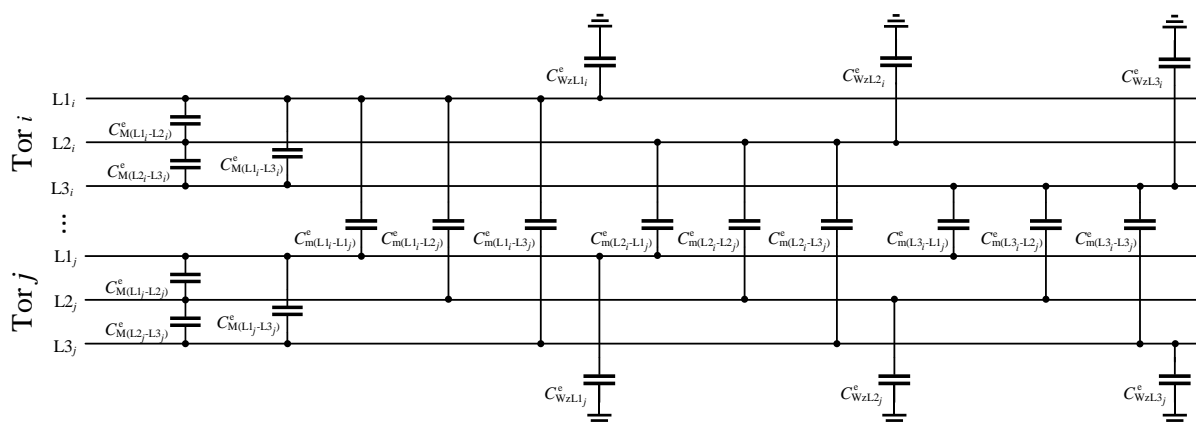
Tab. 4.3 Wybrane wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego  $E$  w kV/m badanych WWLN w zależności od konfiguracji kątów napięć zasilających

	Pierwsza WWLN	Druga WWLN	Trzecia WWLN	Czwarta WWLN	Piąta WWLN
$\max(E_{\max})$	5,46	4,93	5,04	8,89	4,83
$E_{\max}^b$	5,26	3,13	3,13	8,58	4,63
$\min(E_{\max})$	4,41	3,10	2,65	8,48	4,40

Przesunięcie kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów prądowych WWLN nie ma dominującego znaczenia na generowane maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego w badanym otoczeniu linii.

#### 4.2 Analiza niesymetrii pojemnościowej WWLN

Zależność parametrów elektrycznych od geometrii linii sprawia, że niesymetria geometryczna WWLN jest powodem niesymetrii pojemnościowej [24, 34, 36, 47, 49]. Na rysunku 4.8 przedstawiono wybrane pojemności cząstkowe WWLN zgodnie z macierzą pojemności  $C^e$  (8.30).



Rys. 4.8 Wybrane pojemności cząstkowe torów  $i, j$  WWLN,  $i, j \in \{I, II, \dots, n\} \wedge j \neq i$

Macierz pojemności składowych symetrycznych niesymetrycznej WWLN jest pełna i symetryczna względem przekątnej głównej, zgodnie z (4.1):

$$\mathbf{C}_S^e = \begin{bmatrix} C_{0_1}^e & C_{10_1}^e & C_{20_1}^e & & C_{0_{n,1}}^e & C_{10_{n,1}}^e & C_{20_{n,1}}^e \\ C_{10_1}^e & C_{1_1}^e & C_{21_1}^e & \dots & C_{01_{n,1}}^e & C_{1_{n,1}}^e & C_{21_{n,1}}^e \\ C_{20_1}^e & C_{21_1}^e & C_{2_1}^e & & C_{02_{n,1}}^e & C_{12_{n,1}}^e & C_{2_{n,1}}^e \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ C_{0_{n,1}}^e & C_{01_{n,1}}^e & C_{20_{n,1}}^e & & C_{0_n}^e & C_{10_n}^e & C_{20_n}^e \\ C_{10_{n,1}}^e & C_{1_{n,1}}^e & C_{21_{n,1}}^e & \dots & C_{10_n}^e & C_{1_n}^e & C_{21_n}^e \\ C_{20_{n,1}}^e & C_{21_{n,1}}^e & C_{2_{n,1}}^e & & C_{10_n}^e & C_{21_n}^e & C_{2_n}^e \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Ze względu na występowanie niesymetrii pojemnościowej, zasilenie wybranych torów prądowych WWLN napięciem symetrycznym powoduje powstanie niezerowych, niesymetrycznych potencjałów na przewodach odłączonych torów. W analizach przyjęto, że zasila się tory prądowe WWLN o wyższych napięciach znamionowych, a torem badanym jest tor prądowy o najniższym napięciu znamionowym – tor prądowy  $n$ . Tory prądowe od I do  $n-1$  zasila się napięciem symetrycznym a potencjał ziemi wynosi zero, wówczas:

$$j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{I,I}^e & \dots & \mathbf{C}_{I,n}^e \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{n,I}^e & \dots & \mathbf{C}_{n,n}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_I \\ \vdots \\ \mathbf{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_I \\ \vdots \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

gdzie:

$\mathbf{U}_i, \mathbf{I}_i$  – napięcia fazowe i prądy fazowe toru prądowego  $i$ , gdzie  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ .

W odłączonym torze prądowym  $n$  WWLN nie płyną prądy, wówczas zależność (4.2) przyjmuje postać:

$$j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{I,I}^e & \dots & \mathbf{C}_{I,n}^e \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{n,I}^e & \dots & \mathbf{C}_{n,n}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_I \\ \vdots \\ \mathbf{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_I \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

gdzie:  $\mathbf{C}_{i,j}^e = (\mathbf{C}_{j,i}^e)^T \wedge j \neq i$  oraz  $\mathbf{0}$  – macierz kolumnowa zer o wymiarze  $3 \times 1$ .

Napięcia fazowe toru prądowego  $n$ :

$$\mathbf{U}_n = -(\mathbf{C}_{n,n}^e)^{-1} (\mathbf{C}_{n,I}^e \mathbf{U}_I + \dots + \mathbf{C}_{n,(n-1)}^e \mathbf{U}_{(n-1)}). \quad (4.4)$$

Ostatecznie na podstawie (4.4) wyznacza się napięcie kolejności zerowej (napięcie przesunięcia punktu neutralnego sieci) w badanym torze prądowym  $n$ :

$$U_0 = \frac{1}{3} |\underline{U}_{L1_n} + \underline{U}_{L2_n} + \underline{U}_{L3_n}|. \quad (4.5)$$

Zsumowanie w obrębie toru  $n$  powstałych potencjałów (przy potencjale ziemi równym zero można zapisać  $\underline{U}_{L_i} = \underline{V}_{L_i}$ ) daje wartość potrójonej składowej zerowej napięcia  $U_0$ . Jest to napięcie powodujące przesunięcie punktu neutralnego sieci, której częścią jest tor prądowy  $n$ .

Pojawienie się napięcia  $U_0$ , wynikającego z niesymetrii pojemnościowej WWLN, ma szczególne znaczenie w przypadku linii wielonapięciowych, gdzie niesymetria fazowa, głównie niesymetria pojemności między fazami różnych torów, wywołuje niedopuszczalnie wysokie napięcia przesunięcia punktu neutralnego w sieci o niższym napięciu [34, 36, 43, 47, 49, 84, 85]. Wywołane napięcie  $U_0$  jest poważnym problemem w ujęciu pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz pojawienia się prądów składowej zerowej o znacznych wartościach w normalnych stanach pracy sieci przesyłowej. Równie istotna jest kwestia bezpieczeństwa i realne zagrożenie porażeniowe podczas prac eksploatacyjno-naprawczych (prace pod napięciem) linii napowietrznych.

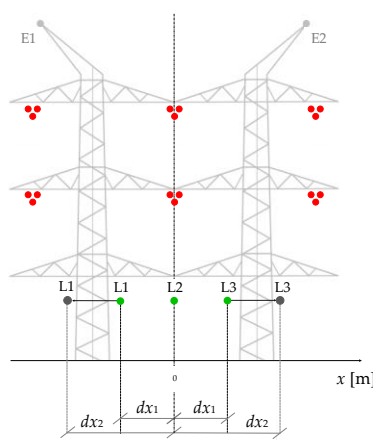
Przeprowadzono szereg analiz napięcia zerowego pojawiającego się w torze prądowym o najniższym napięciu znamionowym dla trzech sylwetek linii trójtorowych (rys. 4.1). Scenariusze analiz obejmowały:

- wyznaczenie napięcia  $U_0$  w funkcji usytuowania toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym względem osi słupa lub w funkcji geometrii tego toru prądowego,
- wyznaczenie napięcia  $U_0$  w funkcji zastosowanego układu faz WWLN,
- wyznaczenie napięcia  $U_0$  w funkcji kątów fazowych napięć zasilających torów prądowych WWLN.

Napięcie zerowe pojawiające się w torze prądowym III wyznaczono zasilając tory prądowe o napięciach wyższych przy założeniu, że kąty fazowe napięć zasilających faz L1 tych torów są zerowe ( $\varphi_{U_{Li}} = 0^\circ$ ,  $i = \{I, II\}$ ), a układy przewodów fazowych tych torów przedstawia rysunek 4.1.

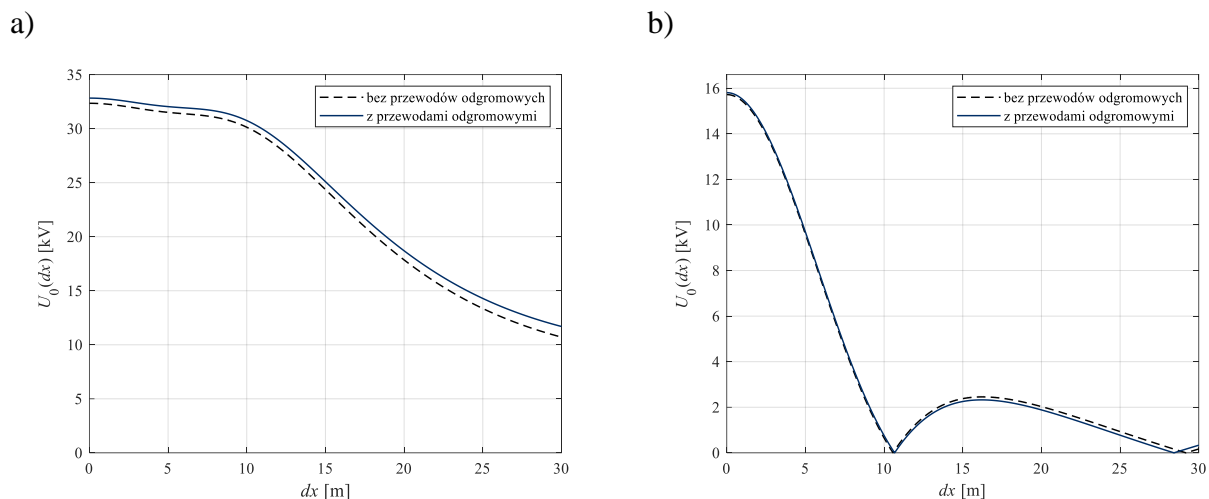
#### 4.2.1 Wpływ geometrii zawieszenia przewodów

Pierwszy scenariusz analizy napięcia zerowego wykonano dla trzech pierwszych WWLN (rys. 4.1a,b,c). Wartość napięcia zerowego została wyznaczona w funkcji położenia skrajnych przewodów toru prądowego III tych WWLN, w taki sposób, że skrajne przewody rozsuwano symetrycznie po obu stronach osi słupa, wyznaczając wartość napięcia zerowego indukowanego w tym torze (rys. 4.9). Zbadano również wpływ przewodów odgromowych na wartość indukowanego napięcia zerowego.



**Rys. 4.9 Rozsuwanie skrajnych faz toru prądowego III symetrycznie względem osi słupa**  
 $dx_1, dx_2$  – wybrane położenia przewodów fazowych L1 i L3 toru 220 kV

Napięcie  $U_0$  pojawiające się w torze III w funkcji rozsunęcia faz dla trzech WWLN przedstawiono na rysunku 4.10. Krzywe te są symetryczne względem osi  $y$  z uwagi na symetryczne rozsuwanie przewodów L1 i L3 względem osi słupa. Ponownie, dla drugiej i trzeciej WWLN uzyskano ten sam efekt z uwagi na przyjęte warunki pracy tych WWLN (układy przewodów fazowych, zerowe przesunięcie kątów fazowych napięć zasilających).



**Rys. 4.10** Napięcie  $U_0$  w funkcji rozsunęcia skrajnych przewodów toru prądowego III względem osi słupa  
a) dla pierwszej WWLN (rys. 4.1a), b) dla drugiej i trzeciej WWLN (rys. 4.1b,c)

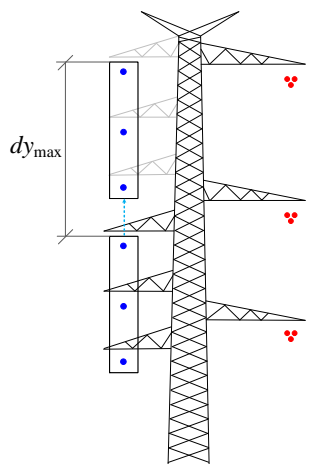
W zakresie realnych odległości zawieszenia skrajnych przewodów fazowych toru III WWLN, dla pierwszej rozważanej sylwetki, napięcie zerowe mieści się w zakresie  $(29,96 \div 32,40)$  kV, analogicznie dla drugiej i trzeciej sylwetki zakres ten wynosi  $(0 \div 13,3)$  kV. W rzeczywistym miejscu zawieszenia przewodów L1 i L3, wartość napięcia zerowego generowanego w torze prądowym III wynosi 31,19 kV dla sylwetki z rysunku 4.1a oraz 1,76 kV dla sylwetek z rysunków 4.1b,c. Zastosowanie odpowiedniego układu torów prądowych WWLN, a co za tym idzie – stopnia niesymetrii geometrycznej WWLN, istotnie wpływa na wartość pojawiającego się napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci  $U_0$ . W tym przypadku, zastosowanie układu płaskiego oraz układu „zygzaka” (dla torów 400 kV) charakteryzuje się najmniejszymi osiąganymi wartościami maksymalnymi napięcia zerowego  $\max(U_0)$ . Dla analizowanych przypadków, przewody odgromowe nie wpływają w znaczącym stopniu na wartość generowanego napięcia zerowego  $U_0$  (rys. 4.10).

Drugi scenariusz dotyczył analiz linii dwutorowej, będącej „częścią” czwartej WWLN (rys. 4.1d). Badana linia dwutorowa składa się wyłącznie z torów I (400 kV) oraz III (110 kV) rzeczywistej WWLN zgodnie z rysunkiem 4.11. W ramach analiz napięcia zerowego, zmieniano położenie toru III w taki sposób, aby w skrajnych położeniach tor ten był torem dolnym i górnym rzeczywistej linii trójtorowej.

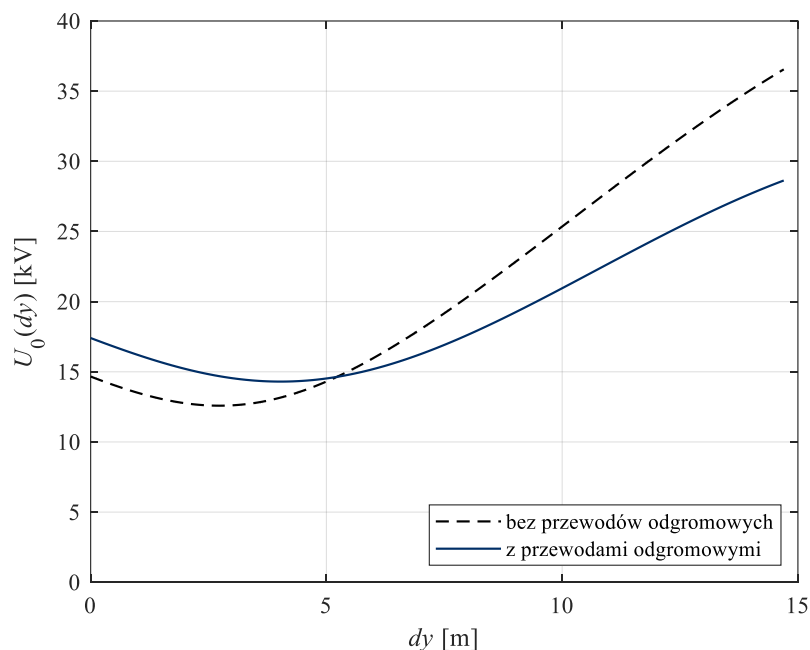
Zauważono pozytywny wpływ przewodów odgromowych, które powodują zmniejszenie indukowanego napięcia zerowego wraz ze zbliżaniem się dolnego toru do przewodów odgromowych, są to zmiany położenia badanego toru w przedziale  $dy = (5,2 \div 14,7)$  metrów. W skrajnym położeniu ( $dy = 14,7$  m) osiąga się redukcję napięcia  $U_0$  o około 7,9 kV. Można wyciągnąć wniosek, że przewody odgromowe korzystnie wpływają na górny tor linii trójtorowej i niekorzystnie na tor dolny, gdzie w zakresie zmian  $dy = (0 \div 5,2)$  m wpływają na zwiększenie napięcia zerowego. W skrajnym – dolnym – położeniu toru III, wpływ przewodów odgromowych powoduje wzrost napięcia zerowego o 2,75 kV. Minimum  $U_0$ , przy uwzględnieniu przewodów odgromowych, wynosi 14,03 kV i osiąga się ją przy



$dy = 4,03$  m, wówczas odległość badanego toru od ziemi oraz od przewodów odgromowych jest jednakowa (24,3 m).

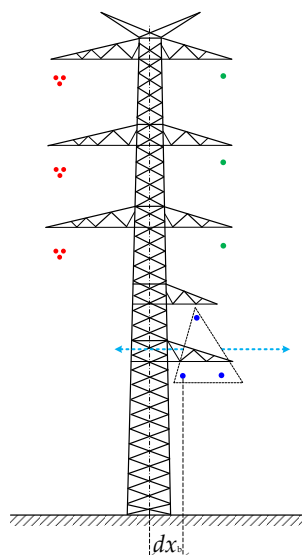


Rys. 4.11 Przesuwanie toru prądowego III w miejsce toru prądowego II

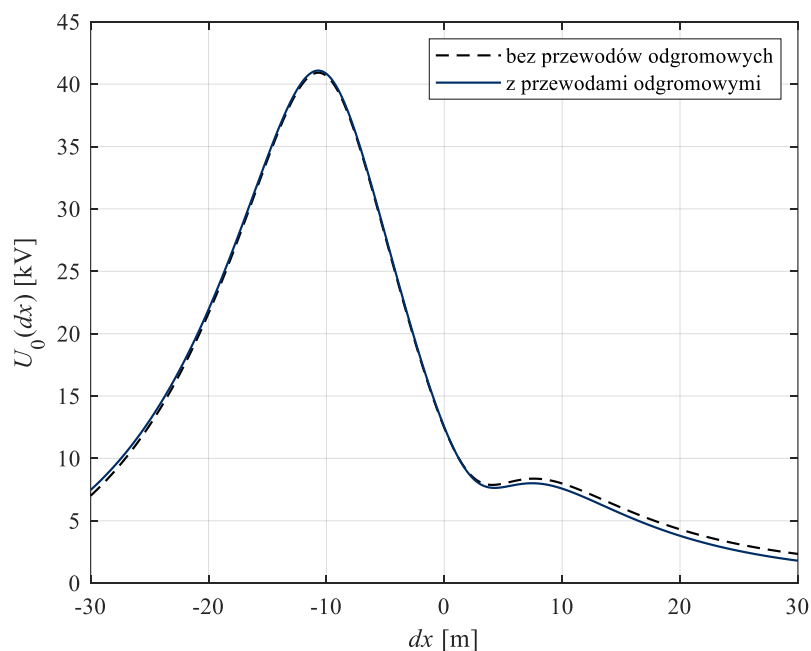


Rys. 4.12 Napięcie  $U_0$  w funkcji przesunięcia toru prądowego III w miejsce toru prądowego II

Trzeci scenariusz obejmował wyznaczenie napięcia zerowego w funkcji położenia badanego toru III piątej WWLN względem osi słupa (rys. 4.13). Wpływ niesymetrii pojemnościowej WWLN na wartość pojawiającego się napięcia zerowego w badanym torze III przedstawia rysunek 4.14. Usytuowanie toru prądowego III pod torem prądowym o wyższym napięciu znamionowym (400 kV) powoduje znaczny wzrost napięcia zerowego do wartości 41,09 kV, co stanowi 37,4% wartości napięcia znamionowego tego toru. Dla rzeczywistego położenia toru 110 kV napięcie  $U_0$  osiąga wartość 7,75 kV ( $0,07U_{nIII}$ ). Obserwacja ta potwierdza słuszność prowadzenia torów prądowych o niższych napięciach znamionowych w sąsiedztwie torów prądowych o tym samym lub zbliżonym poziomie napięcia roboczego. W tym przypadku nie obserwuje się znaczącego wpływu przewodów odgromowych na wartość napięcia  $U_0$ .



Rys. 4.13 Przesuwanie toru prądowego III względem osi słupa dla WWLN z rys. 4.1d



Rys. 4.14 Napięcie  $U_0$  w funkcji usytuowania toru prądowego III względem osi słupa

#### 4.2.2 Wpływ układu przewodów fazowych WWLN

Wyznaczono wartości napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci  $U_0$  w zależności od zastosowanego układu faz przy założeniu, że kąty fazowe napięć faz L1 zasilonych torów są zerowe. Szczegółowe wyniki obliczeń zawarto w załączniku CD – tabela 3. Tabela 4.4 prezentuje największe oraz najmniejsze maksymalne wartości napięcia zerowego  $U_0$  osiągnięte przy zastosowaniu różnych układów przewodów fazowych w poszczególnych torach, a także wartość napięcia zerowego przy zastosowaniu układu faz jak na rysunku 4.1 –  $U_0^b$ .

**Tab. 4.4** Wybrane wartości napięcia zerowego  $U_0$  w kV pojawiające się w torze prądowym III badanych WWLN w zależności od zastosowanego układu przewodów fazowych

	Pierwsza WWLN	Druga WWLN	Trzecia WWLN	Czwarta WWLN	Piąta WWLN
$\max(U_0)$	33,79	2,79	33,79	25,20	27,54
$U_0^b$	31,18	1,76	1,76	16,38	7,75
$\min(U_0)$	1,76	1,76	1,76	16,38	7,75

Porównując wartości uzyskanych napięć zerowych dla trzech pierwszych WWLN (rys. 4.1a,b,c) stwierdza się, że sposób prowadzenia torów prądowych ma duże znaczenie dla tego zjawiska. Dla układu płaskiego (rys. 4.1b) wartość maksymalnego  $U_0$  wynosi 2,79 kV, gdzie dla pierwszej i trzeciej WWLN (rys. 4.1a,c) osiąga się nawet 33,79 kV. Układ przewodów pierwszej WWLN (rys. 4.1a) jako jedyny z badanych WWLN jest niekorzystny pod kątem generowanego w torze III napięcia  $U_0$ . Dla pozostałych sylwetek uzyskano minimalne wartości napięć  $U_0$  przy zerowych kątach fazowych faz L1 zasilonych torów (tab. 4.4).

W tabeli 4.5 przedstawiono układy przewodów fazowych w torach prądowych analizowanych WWLN, dla których uzyskano minimalne wartości napięcia  $U_0$  oraz grafikę ilustrującą te układy. Ponownie poszczególne kolory (żółty, niebieski, różowy) odnoszą się do odpowiadających faz w torach prądowych, gdzie tor III nie jest zasilony (kolor szary). Fioletową ramką oznaczono bazowe układy przewodów fazowych w torach prądowych badanych WWLN zgodne z rysunkiem 4.1.

Największą liczbą grup konfiguracji układów przewodów fazowych w torach prądowych, które skutkują najmniejszymi wartościami napięcia zerowego indukującego się w torze prądowym III charakteryzują się druga i trzecia WWLN (tab. 4.5). Odpowiednie fazy zasilonych torów są rozłożone symetrycznie względem osi przechodzącej w połowie odległości między torami I i II (symetria osiowa dla grup nr 2 drugiej i trzeciej WWLN).

**Tab. 4.5** Najlepsze układy przewodów fazowych w torach prądowych WWLN, dla których osiąga się najniższe napięcie  $U_0$  w torze prądowym III

Lp.	Układ faz toru prądowego		Napięcie $U_0$ w torze prądowym III, kV	Grafika przedstawiająca układy przewodów fazowych
	I	II		
<b>Pierwsza WWLN (rys. 8.10a)</b>				
1.	ABC	ABC	31,18	zgodnie z rys. 4.1a
Grupa 1	6.	ABC	1,76	
	11.	BCA	1,76	
	16.	CAB	1,76	
	21.	ACB	1,76	
	26.	BAC	1,76	
	31.	CBA	1,76	

Lp.	Układ faz toru prądowego		Napięcie $U_0$ w torze prądowym III, kV		Grafika przedstawiająca układy przewodów fazowych		
	I	II	Druga WWLN (rys. 8.10a)	Trzecia WWLN (rys. 8.10a)	Druga WWLN (rys. 8.10a)	Trzecia WWLN (rys. 8.10a)	
Grupa 1	6.	ABC	CBA	1,76	1,76		
	11.	BCA	BAC	1,76	1,76		
	16.	CAB	ACB	1,76	1,76		
	21.	ACB	CAB	1,76	1,76		
	26.	BAC	BCA	1,76	1,76		
	31.	CBA	ABC	1,76	1,76		
Grupa 2	1.	ABC	ABC	1,76	1,76		
	8.	BCA	BCA	1,76	1,76		
	15.	CAB	CAB	1,76	1,76		
	22.	ACB	ACB	1,76	1,76		
	29.	BAC	BAC	1,76	1,76		
	36.	CBA	CBA	1,76	1,76		
			Czwarta WWLN (rys. 8.10a)	Piąta WWLN (rys. 8.10a)	Czwarta WWLN (rys. 8.10a)	Piąta WWLN (rys. 8.10a)	
Grupa 1	6.	ABC	CBA	16,38	7,75		
	11.	BCA	BAC	16,38	7,75		
	16.	CAB	ACB	16,38	7,75		
	21.	ACB	CAB	16,38	7,75		
	26.	BAC	BCA	16,38	7,75		
	31.	CBA	ABC	16,38	7,75		

Dla pozostałych wyselekcjonowanych konfiguracji drugiej i trzeciej WWLN, zauważa się tendencję położenia wybranej fazy w pozycji środkowej względem pozostałych faz oraz symetrii środkowej tych faz względem punktu znajdującego się w osi słupa w połowie odległości między torami I i II. Podobne rozłożenie na konstrukcji wsporczej wykazuje pierwsza WWLN. W ujęciu rozłożenia faz w zasilonych torach, piąta WWLN również charakteryzuje się symetrią środkową względem punktu znajdującego się w osi drugiej poprzeczki słupa i połowie odległości między I i II torem prądowym tej WWLN. Ułożenie przewodów fazowych w torach prądowych I i II czwartej WWLN również cechuje się symetrią środkową.

#### 4.2.3 Wpływ kątów fazowych napięć zasilających

Tabela 4.6 prezentuje wyniki analiz napięcia zerowego w zależności od kątów fazowych zasilonych torów I i II. Kąty fazowe napięć zasilających zmieniano w zakresie  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$  i  $0^\circ$ , odpowiadających przeciętnym ruchowym warunkom pracy linii napowietrznych, przy przyjęciu fazy L1 jako fazę odniesienia. Szczegółowe wyniki obliczeń zawarto w załączniku CD – tabela 4. Tabela 4.6 przedstawia uzyskane największe i najmniejsze wartości napięcia zerowego pojawiającego się w badanym torze prądowym przy różnych kątach fazowych napięć zasilających WWLN.

**Tab. 4.6** Wybrane wartości napięcia zerowego  $U_0$  w kV pojawiające się w torze prądowym III badanych WWLN w zależności od konfiguracji kątów napięć zasilających

	Pierwsza WWLN	Druga WWLN	Trzecia WWLN	Czwarta WWLN	Piąta WWLN
$\max(U_0)$	37,51	2,16	19,56	19,63	19,93
$U_0^b$	31,18	1,76	1,76	16,38	7,75
$\min(U_0)$	16,52	1,76	1,76	16,38	0,64

Odpowiednia konfiguracja kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów pozwala na dodatkową redukcję napięcia zerowego, co uzyskano dla pierwszej i piątej WWLN (rys. 4.1a,e). Przy ustalonym układzie przewodów fazowych zgodnym z rysunkiem 4.1, minimalną wartość napięcia zerowego  $\min(U_0)$  uzyskano dla drugiej, trzeciej i czwartej WWLN. Z analizowanych WWLN (rys. 4.1) jedynie druga WWLN (w układzie płaskim) nie wykazuje dużej podatności na warunki pracy sieci w postaci przesunięcia kątów fazowych napięć zasilających, dla której napięcie zerowe w zależności od tego parametru zmienia się w zakresie  $(1,76 \div 2,16)$  kV.

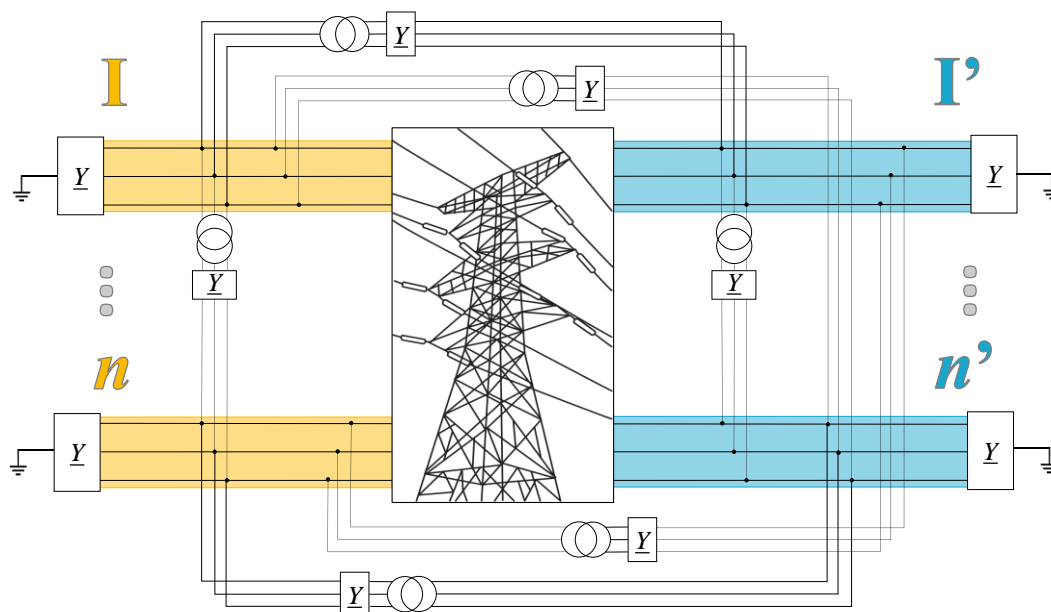
Uzyskane wyniki potwierdzają, że zarówno dobór odpowiedniego układu przewodów fazowych, jak i wartości kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów prądowych WWLN mają znaczący wpływ na wartość napięcia zerowego pojawiającego się w torze o najniższym napięciu znamionowym. Nieodpowiednio dobrany układ przewodów lub niekorzystne warunki pracy linii, rozumianej jako konfiguracja kątów fazowych napięć zasilających, mogą spowodować zwiększenie napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci o najniższym napięciu znamionowym.

### 4.3 Analiza niesymetrii impedancyjnej WWLN

Kolejną konsekwencją niesymetrii geometrycznej WWLN jest niesymetria fazowa poszczególnych torów prądowych, a tym samym pojawienie się niesymetrii impedancyjnej, która wprost przekłada się na asymetrię napięciową i prądową w układzie [20, 34, 48, 49, 50, 77]. Celem prowadzonych analiz było określenie wpływu niesymetrii impedancyjnej WWLN na wybrane parametry jakości energii elektrycznej w postaci wskaźników niesymetrii i niezrównoważenia dla obciążeń roboczych z uwagi na zastosowaną geometrię WWLN.

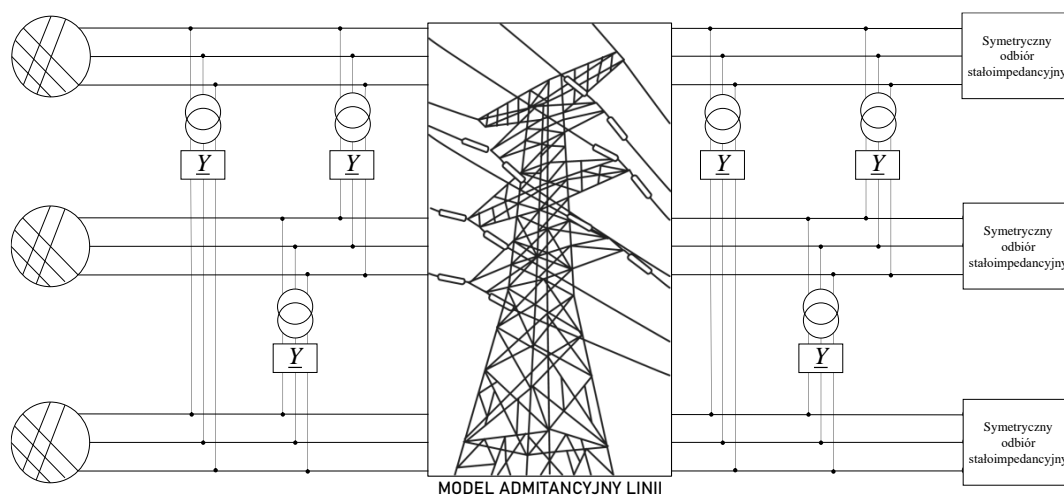
Do celów analitycznych wykorzystano utworzony i zaimplementowany w programie Matlab model admitancyjny WWLN, gdzie poszczególne parametry modelu zostały wyznaczone na podstawie parametrów geometrycznych linii trójtorowych (zał. 8.2.1) oraz stałych materiałowych (tab. 8.1) zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 3.

System zewnętrzny odwzorowano jako symetryczne źródła zastępcze od strony zasilania WWLN oraz symetryczne odbiory stałoimpedancyjne od strony odbioru. W zależności od prowadzonej analizy, parametry odbiorów stałoimpedancyjnych dla poszczególnych torów prądowych WWLN dobrano w taki sposób, aby wymusić przepływ prądów o wartościach równych prądom dopuszczalnym długotrwale tych torów  $I_{ddi}$  ( $i \in \{I, II, \dots, n\}$ ) lub ich krotnością.



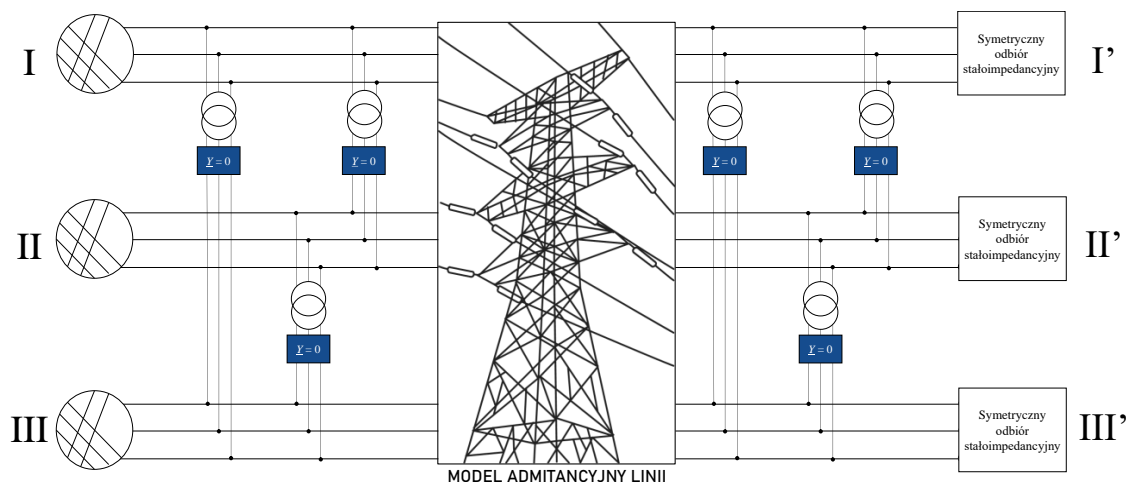
Rys. 4.15 Pełny ekwiwalent sieci zewnętrznej WWLN

Pełny ekwiwalent sieci zewnętrznej obejmuje połączenia wszystkich węzłów granicznych (rys. 4.15), a admitancje poszczególnych gałęzi łączących te węzły określa się z definicji macierzy admitancyjnej [21, 88]. W toku przygotowywania modelu otoczenia sieciowego, poszukiwano skrajnie niekorzystnych stanów pracy układu, dla których uzyskiwano najwyższe wartości wskaźników niezrównoważenia oraz niesymetrii. Poszukiwanie takiego stanu pracy polegało na zmianie wartości admitancji połączeń pomiędzy poszczególnymi węzłami WWLN (rys. 4.15). W efekcie, ekwiwalent połączeń międzysystemowych ograniczono do powiązań pomiędzy poszczególnymi poziomami napięć na początkach i końcach WWLN, co przedstawia rysunek 4.16.

Rys. 4.16 Zredukowany model sieci zewnętrznej WWLN o  $n = 3$ 

Dalsze przygotowywanie modelu, polegało na zmianie wartości pozostałych admitancji połączeń, co pozwoliło na dalszą redukcję modelu. Najgorsze warunki pracy, tj. największe osiągnięte wartości wskaźników niesymetrii i niezrównoważenia, zidentyfikowano dla układu przedstawionego na rysunku 4.17, zatem w sytuacji, gdy wszystkie torry prądowe WWLN są

„oddalone” elektrycznie od siebie co osiąga się, poprzez wyzerowanie admitancji pozostałych połączeń.



Rys. 4.17 Model sieci zewnętrznej z WWLN do analiz niesymetrii impedancyjnej

Obliczenia polegały na wyznaczeniu napięć na końcach poszczególnych torów prądowych WWLN, kolejno wyznaczeniu składowych symetrycznych tych wielkości i ostatecznie wyznaczono wskaźniki nierównoważenia  $\alpha_0$ , będące stosunkiem modułu składowej zerowej napięcia do modułu składowej zgodnej (4.6) oraz wskaźniki niesymetrii  $\alpha_2$ , definiowane jako stosunek modułu napięcia składowej przeciwnej do składowej zgodnej (4.7) [9, 15, 106]:

$$\alpha_0 = \frac{|U_0|}{|U_1|} \cdot 100\% , \quad (4.6)$$

$$\alpha_2 = \frac{|U_2|}{|U_1|} \cdot 100\% . \quad (4.7)$$

Przeprowadzono szereg analiz niesymetrii impedancyjnej WWLN badając wskaźniki nierównoważenia oraz niesymetrii w torach prądowych o najniższym napięciu znamionowym, ponieważ generalnie są one najbardziej narażone na działanie asymetrii napięć: [34, 77], rysunek 4.18. Tabela 5 (zał. CD) prezentuje wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii wyznaczone dla wszystkich torów prądowych badanych WWLN w zależności od układu przewodów fazowych w ich torach prądowych. Szersze spojrzenie na przedstawione wyniki unaocznia, że w zdecydowanej większości w torze prądowym III (o najniższym napięciu znamionowym) w pierwszej kolejności dochodzi do przekroczenia analizowanych wskaźników.

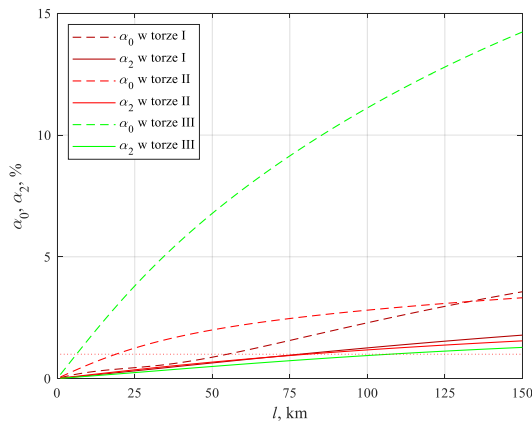
Scenariusze analiz obejmowały:

- wyznaczenie wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$  w funkcji długości WWLN w zakresie od 1 km do 150 km przy obciążeniu torów prądowych prądami dopuszczalnymi długotrwale i pracy jałowej toru III oraz przy obciążeniu wszystkich torów prądowych prądami dopuszczalnymi długotrwale,
- wyznaczenie wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$  w funkcji zastosowanego układu faz WWLN dla długości linii wynoszącej 75 km oraz przy obciążeniu wszystkich torów prądowych połową prądów dopuszczalnych długotrwale,

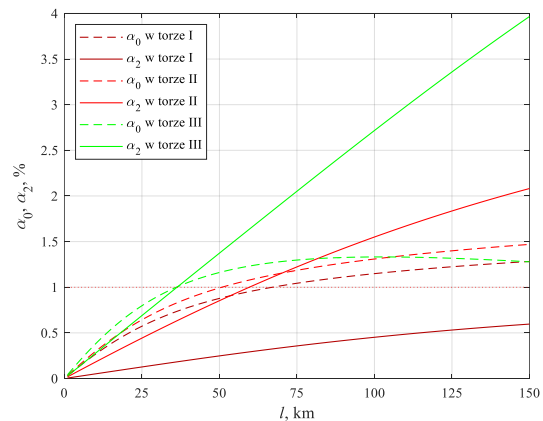
- wyznaczenie wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$  w funkcji przesunięcia kąta napięcia zasilającego torów prądowych WWLN dla długości linii wynoszącej 75 km oraz przy obciążeniu wszystkich torów prądowych połową prądów dopuszczalnych długotrwanie.

Przepisy krajowe [106] podają wyłącznie graniczne wartości dla wskaźnika niesymetrii  $\alpha_2$ , który nie powinien przekraczać 1%. Przyjęto tą samą graniczną wartość dla wskaźnika nierównoważenia  $\alpha_0$ . W dalszej części pracy wskaźniki  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$  traktuje się równoważnie.

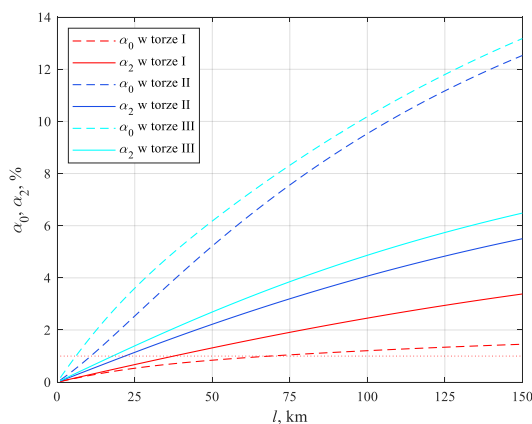
a) pierwsza WWLN



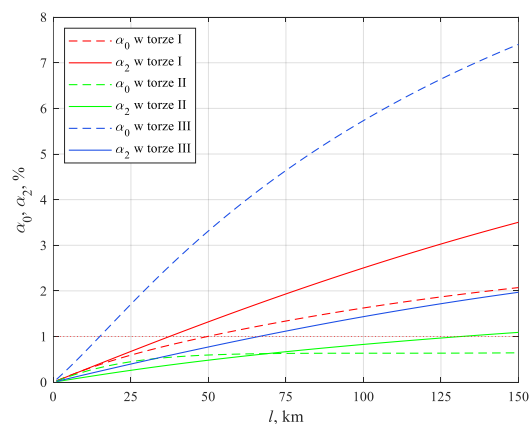
b) druga i trzecia WWLN



c) czwarta WWLN



d) piąta WWLN



**Rys. 4.18** Wskaźniki nierównoważenia oraz niesymetrii w funkcji długości WWLN dla wszystkich torów prądowych przy obciążeniu ich prądami dopuszczalnymi długotrwanie

#### 4.3.1 Wskaźniki asymetrii w funkcji długości linii

Do analiz wskaźników nierównoważenia i niesymetrii w funkcji długości badanych WWLN założono układy przewodów fazowych zgodnie z rysunkiem 4.1 oraz zerowe przesunięcia kątów fazowych napięć zasilających torów prądowych tych WWLN.

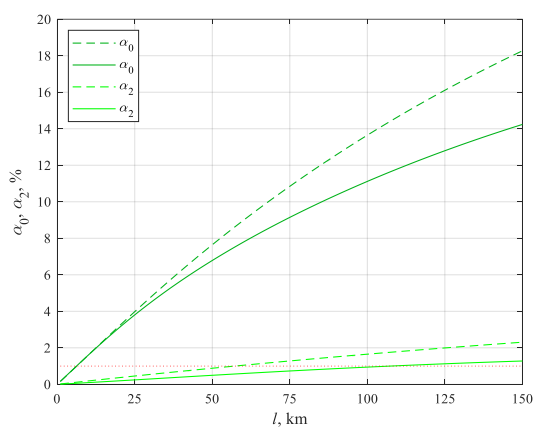
Na rysunku 4.19 przedstawiono wskaźniki nierównoważenia oraz niesymetrii dla pierwszej, drugiej i trzeciej WWLN w funkcji długości linii napowietrznej. Liniami przerywanymi oznaczono wartości wskaźników asymetrii przy pracy jałowej toru prądowego III.



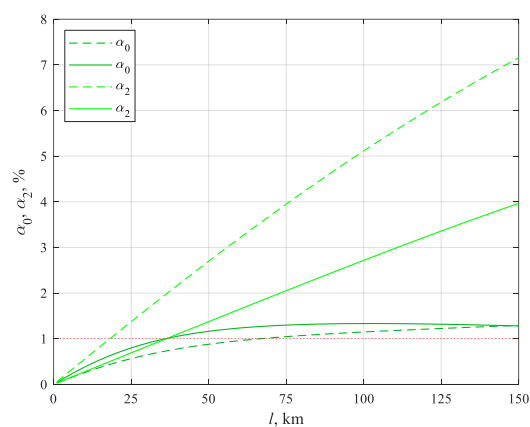
Dla pierwszej WWLN i zastosowanym zgodnie z rysunkiem 4.1a układem przewodów fazowych, obciążenie toru prądowego III wpływa na obniżenie wartości wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$  w całym zakresie badanych długości WWLN. Dla długości linii 150 km wskaźnik  $\alpha_0$  osiąga wartość 18,27% przy pracy jałowej toru III i 14,24% przy obciążeniu tego toru, natomiast wskaźnik  $\alpha_2$  osiąga znacznie mniejsze wartości tj. odpowiednio 2,31% i 1,28%. Z uwagi na dopuszczalną wartość 1%, maksymalna długość WWLN dla tej sylwetki słupa mogłaby wynosić 6 km przy obciążaniu wszystkich torów prądami dopuszczalnymi długotrwanie, gdzie decydującym byłby wskaźnik  $\alpha_0$ , dla którego w pierwszej kolejności osiągnięta jest wartość dopuszczalna. Graniczną wartość 1% w przypadku wskaźnika niesymetrii osiąga się przy długości linii wynoszącej 107 km. Gdyby WWLN obciążyć prądem równym połowie prądów dopuszczalnych długotrwanie poszczególnych torów, co jest zbliżone do rzeczywistych warunków pracy linii napowietrznych, graniczną wartość wskaźnika nierównoważenia osiąga się przy dwukrotnie większej długości WWLN.

Dla drugiej i trzeciej WWLN (rys. 4.1b,c), charakteryzującej się tą samą konstrukcją wsporczą lecz innym ułożeniem torów prądowych, osiąga się znacznie niższe wskaźniki nierównoważenia. Dla linii o długości 150 km uzyskuje się 1,29% przy nieobciążonym torze III oraz 1,28% przy obciążeniu tego toru. Wskaźnik niesymetrii, przy długości linii 150 km, osiąga kolejno 7,15% oraz 3,97%. Graniczna długość WWLN, przy której spełniony jest warunek dopuszczalnej wartości wskaźników asymetrii osiągnięto dla 36 km. W analizowanej sylwetce i zastosowanym układzie przewodów fazowych, obciążenie toru III powoduje wzrost wskaźnika  $\alpha_0$  i redukcję wskaźnika  $\alpha_2$  w całym zakresie badanych długości WWLN.

a)



b)

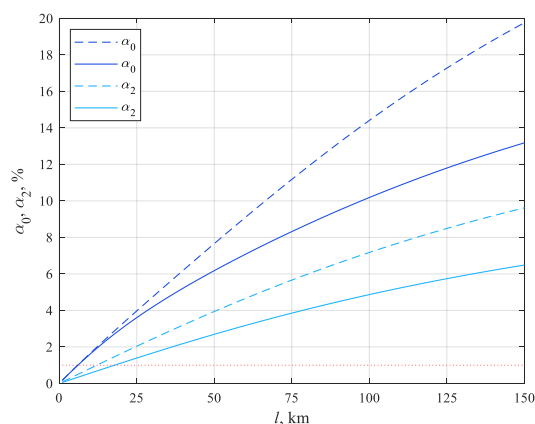


**Rys. 4.19** Wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii w funkcji długości WWLN wyznaczone dla toru prądowego III (220 kV); a) dla pierwszej WWLN z rys. 4.1a, b) dla drugiej i trzeciej WWLN z rys. 4.1b,c (linia przerywana – przy nieobciążonym torze III i obciążeniu pozostałych torów  $I_{ad}$ , linia ciągła – przy obciążeniu wszystkich torów  $I_{ad}$ )

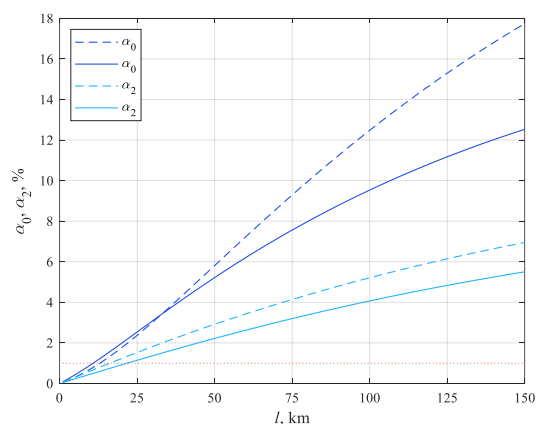
W przypadku czwartej analizowanej WWLN 400 + 2×110 kV (Rys. 4.1d), wyznaczono wskaźniki asymetrii dla torów I i II, tj. torów prądowych o napięciu znamionowym 110 kV. Analizując wykresy przedstawione na rysunku 4.20, zauważa się większe narażenie na niesymetrię napięciową toru prądowego III – dolnego. Obciążenie badanego toru prądowego w znaczny sposób ogranicza wartości wskaźników nierównoważenia oraz niesymetrii dla toru III oraz wskaźnika niesymetrii w torze II w całym zakresie badanych długości linii. W przypadku wskaźnika nierównoważenia w torze II obciążenie tego toru wpływa na

redukcję tego wskaźnika w zakresie długości (1 ÷ 33) km WWLN. Maksymalne osiągnięte wartości wskaźników asymetrii zestawiono w tabeli 4.7.

a)



b)



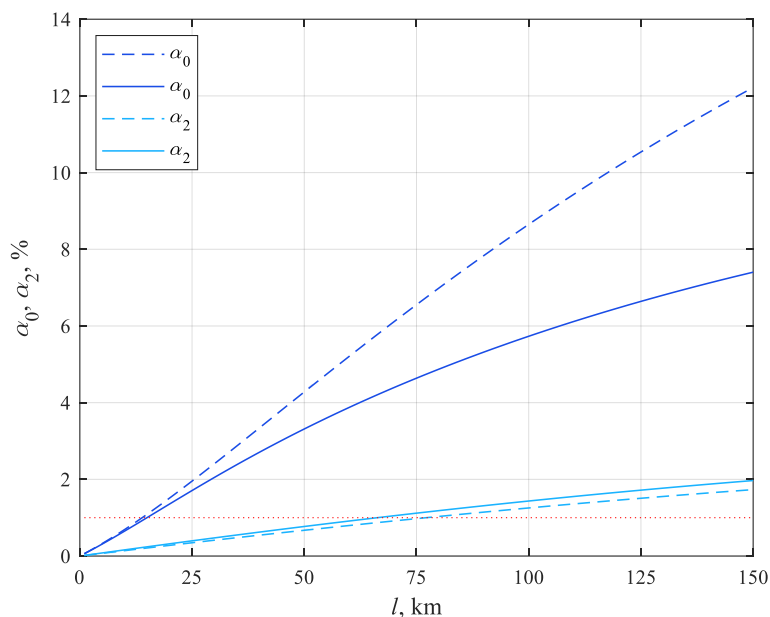
**Rys. 4.20** Wskaźniki nierównowagi oraz niesymetrii w funkcji długości czwartej WWLN  
 a) wyznaczone dla toru III (110 kV), b) wyznaczone dla toru II (110 kV)  
 (linia przerywana – przy nieobciążonym torze III i obciążeniu pozostałych torów  $I_{dd}$ , linia ciągła – przy obciążeniu wszystkich torów  $I_{dd}$ )

**Tab. 4.7** Wskaźniki asymetrii dla badanych torów II i III przy długości linii wynoszącej 150 km

Badany tor 110 kV	Badany tor nieobciążony		Badany tor obciążony	
	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %
II	17,74	6,95	12,53	5,50
III	19,75	9,62	13,18	6,49

W odniesieniu do toru III, graniczną wartość 1% przy obciążeniu wszystkich torów prądami dopuszczalnymi długotrwale osiąga się przy długości linii wynoszącej 6 km dla wskaźnika nierównowagi oraz 18 km dla wskaźnika niesymetrii. Analogicznie w odniesieniu do toru prądowego II są to długości odpowiednio: 11 km i 22 km.

W przypadku ostatniej analizowanej WWLN, obciążenie badanego toru prądowego III prowadzi do zmniejszenia wartości wskaźnika nierównowagi, dla długości 150 km z poziomu 12,22% do poziomu 7,40%. Natomiast w przypadku wskaźnika niesymetrii, obciążenie badanego toru prowadzi do niewielkiego wzrostu tego wskaźnika – dla długości linii 150 km z poziomu 1,73% do poziomu 1,97%. Wartość graniczną 1% osiąga się przy długościach linii wynoszących 15 km dla wskaźnika  $\alpha_0$  i 66 km dla wskaźnika  $\alpha_2$  przy obciążeniu wszystkich torów prądami dopuszczalnymi długotrwale (rys. 4.21).



**Rys. 4.21** Wskaźniki nierównowagi oraz niesymetrii w funkcji długości piętej WWLN wyznaczone dla toru prądowego III (110 kV)  
(linia przerywana – przy nieobciążonym torze III i obciążeniu pozostałych torów  $I_{da}$ , linia ciągła – przy obciążeniu wszystkich torów  $I_{da}$ )

Do wyznaczenia wskaźników nierównowagi oraz niesymetrii wykorzystano z modelu obciążenia stałompedancyjnego przy napięciowym zasileniu symetrycznym WWLN. Wraz ze zwiększaniem się długości WWLN, a przez to wzrostem impedancji układu, prądy płynące w torach WWLN ulegały obniżeniu. Wspomniane zmiany nie były korygowane do wartości oczekiwanych w toku prowadzonych analiz, tj. nie korygowano wartości prądów obciążenia torów prądowych WWLN wraz z wydłużaniem się WWLN, co miało wpływ na wartości wskaźników asymetrii. W tabeli 4.8 przedstawiono wyniki wskaźników asymetrii dla długości linii 150 km przy braku korekty i przy zastosowaniu korekty prądów obciążenia torów do wartości równych prądom dopuszczalnym długotrwale poszczególnych torów.

**Tab. 4.8** Wskaźniki asymetrii w torze prądowym III badanych WWLN przy długości linii 150 km z uwzględnieniem obniżania się prądów obciążenia linii wraz z jej wydłużeniem

Badana WWLN	Bez korekty prądów obciążenia		Z korektą prądów obciążenia	
	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %
Pierwsza	14,24	1,28	15,50	2,00
Druga	1,28	3,97	1,29	4,25
Trzecia	1,28	3,97	1,29	4,25
Czwarta	13,18	6,46	12,90	7,21
Piąta	7,40	1,97	6,28	2,32

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 4.8, zauważa się, że wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii są większe dla przypadku, w którym utrzymuje się obciążenie poszczególnych torów WWLN na stałym poziomie wraz ze zwiększaniem się jej długości. Zjawisko to jest również zauważalne na poszczególnych wykresach wskaźników asymetrii liczonych w funkcji długości WWLN, gdzie obserwuje się nieliniowy wzrost tych wskaźników charakteryzujący się mniejszymi wartościami przyrostów wraz ze zwiększaniem się długości linii.

Ostatecznie, zauważa się, że stosując korektę prądów obciążenia przy każdorazowej zmianie długości WWLN wskaźniki niesymetrii i nierównoważenia przyjmują jeszcze wyższe wartości niż w modelu zastosowanym do analiz. Ponownie uwidacznia się znaczny wpływ niesymetrii impedancyjnej na pracę WWLN i jej otoczenie sieciowe, w tym przypadku objawiające się znacznymi wartościami wskaźników nierównoważenia i niesymetrii już dla niewielkich długości linii.

Biorąc pod uwagę maksymalne długości linii, przy których nie następuje przekroczenie dopuszczalnych wartości wskaźników asymetrii w torze prądowym III, najlepszy wynik osiągnięto dla drugiej i trzeciej WWLN, a najgorszy dla pierwszej i czwartej WWLN (tab. 4.9).

**Tab. 4.9** Maksymalne długości badanych WWLN w km, przy których nie przekracza się dopuszczalnej wartości wskaźników asymetrii

Prądy obciążenia WWLN	Pierwsza WWLN (rys. 4.1a)	Druga WWLN (rys. 4.1b)	Trzecia WWLN (rys. 4.1c)	Czwarta WWLN (rys. 4.1d)	Piąta WWLN (rys. 4.1e)
$I_{dd}$	6	36	36	6	15
$\frac{1}{2}I_{dd}$	12	72	72	12	30

#### 4.3.2 Wskaźniki asymetrii w funkcji układu przewodów fazowych WWLN

W kolejnym etapie analizy niesymetrii impedancyjnej WWLN, wyznaczono wskaźniki nierównoważenia oraz niesymetrii w torze o najniższym napięciu znamionowym w funkcji konfiguracji układu przewodów fazowych w torach prądowych. Dla prowadzonej analizy założono, że przesunięcie kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów prądowych jest równe zero, długość badanych WWLN wynosi 75 km, linie napowietrzne obciążono symetrycznymi odbiorami stałaimpedancyjnymi o wartości wymuszającej przepływ prądów równych połowie prądów dopuszczalnych długotrwale zgodnie z tabelą 1.2 (sezon zimowy). Pełne zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w załączniku CD – tabela 6.

Porównując badane sylwetki WWLN pod względem wskaźników asymetrii (zał. CD – tab. 6) zauważono, że najgorszą pod względem występujących wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$  jest czwarta WWLN o pionowym układzie przewodów fazowych (rys. 4.1d), dla której uzyskuje się wysokie wskaźniki nierównoważenia, w tym przekraczające poziom 10%. Dodatkowo jedynie dla sześciu konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych tej WWLN wartość wskaźnika niesymetrii nie przekracza poziomu 2%, a dla trzech układów wskaźnik

ten nie przekracza wartości granicznej 1%. Dla omawianej WWLN nie zidentyfikowano układu dla którego wskaźniki asymetrii spełniają warunek  $\alpha_0 < 2\% \wedge \alpha_2 < 2\%$ .

Najlepszymi wskaźnikami asymetrii charakteryzuje się piąta WWLN 400 + 220 + 110 kV (rys. 4.1e), dla której w 94% analizowanych konfiguracji przewodów fazowych wskaźnik niesymetrii nie przekracza wartości granicznej 1%, a dla pozostałych układów wskaźnik  $\alpha_2$  nie przekracza 2%. Wartości wskaźnika niezrównoważenia przekraczają w niektórych przypadkach 10%. Nie zidentyfikowano par wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$ , które spełniają warunek:  $\alpha_0 < 1\% \wedge \alpha_2 < 1\%$ .

Najkorzystniejszą pod względem wskaźnika niezrównoważenia jest druga WWLN 2×400 + 220 kV w układzie płaskim (rys. 4.1b), dla której wskaźnik ten zawsze mieści się w przedziale (0 ÷ 2)%, a dla 89% analizowanych konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych tej WWLN wskaźnik ten jest mniejszy od wartości granicznej 1%. Występują pary wskaźników, które spełniają warunek  $\alpha_0 < 2\% \wedge \alpha_2 < 1\%$ .

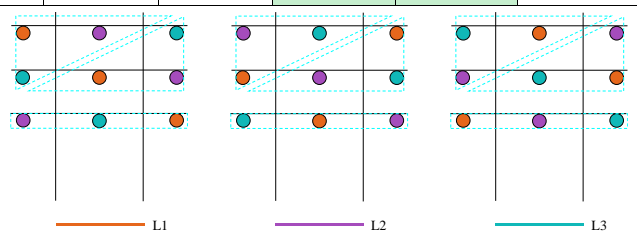
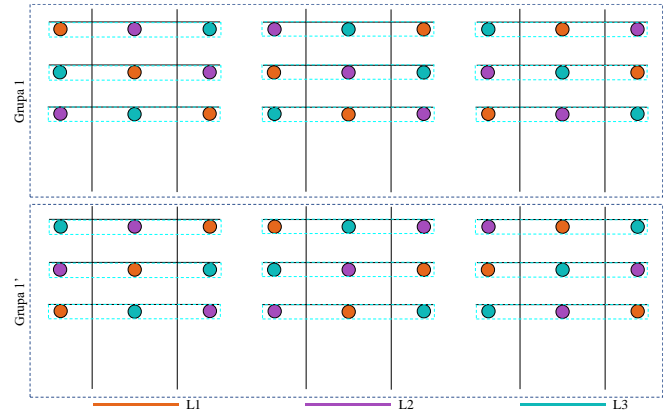
Dla wszystkich badanych układów WWLN 2×400 + 220 kV, tj. pierwszej, drugiej i trzeciej WWLN zidentyfikowano pary wskaźników  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$ , które spełniają warunek  $\alpha_0 < 1\% \wedge \alpha_2 < 1\%$ .

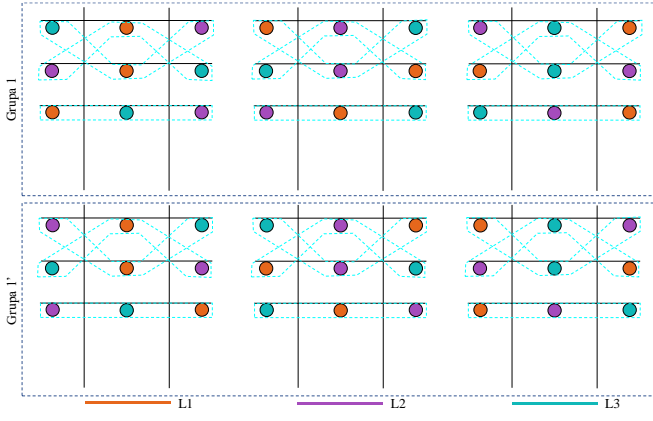
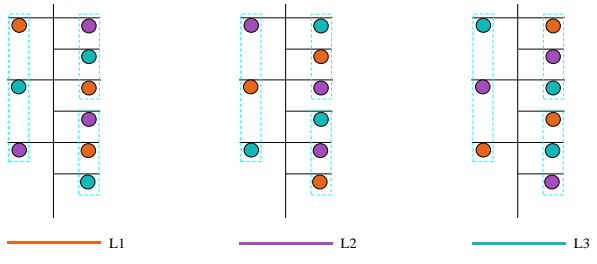
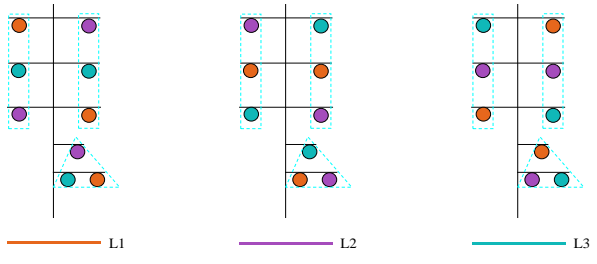
Poszukiwano najlepszego układu przewodów fazowych, dla każdej rozważanej WWLN, pod względem osiąganych wskaźników asymetrii. Wybór najlepszego układu przewodów fazowych, dla którego para wskaźników asymetrii była najmniejsza, został dokonany etapowo:

- 1) wybierano układy przewodów fazowych, dla których pary wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii spełniają warunek:
  - a.  $\alpha_0 < 1\% \wedge \alpha_2 < 1\%$ ,
  - b. jeżeli wskaźniki nie spełniają warunku z punktu 1a to wówczas poszerza się obszar poszukiwania nakładając warunek:  $\alpha_0 < 1\% \wedge \alpha_2 < 2\%$  lub  $\alpha_0 < 2\% \wedge \alpha_2 < 1\%$ ,
  - c. jeżeli nie są spełnione warunki z punktu 1b to wówczas zakłada się, że wskaźniki muszą spełniać warunek  $\alpha_0 < 2\% \wedge \alpha_2 < 2\%$ ,
  - d. jeżeli nie jest spełniony warunek z punktu 1c to wówczas poszukuje się par wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii, w których jeden z nich osiąga wartość poniżej 2%,
- 2) wyznacza się średnią arytmetyczną wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii:
 
$$\frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2},$$
- 3) wyboru najlepszego układu dokonuje wybierając ten układ przewodów fazowych, dla którego średnia arytmetyczna wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii jest najmniejsza.

W tabeli 4.10 przedstawiono wyselekcjonowane, zgodnie z powyższą procedurą, konfiguracje przewodów fazowych WWLN, dla których otrzymuje się najlepsze wskaźniki asymetrii. W tabeli przedstawiono również grafikę ilustrującą te układy. Fioletową ramką oznaczono bazowy układ przewodów fazowych, tj. zgodny z rysunkiem 4.1.

Tab. 4.10 Najlepsze układy przewodów fazowych w torach prądowych rozważanych WWLN pod względem wskaźników nierównoważenia i niesymetrii w torze prądowym III

Lp.	Układ faz toru prądowego			Wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii, %		Średnia arytmetyczna wskaźników $\alpha_0$ i $\alpha_2$ , %
	I	II	III	$\alpha_0$	$\alpha_2$	$\frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2}$
<b>Pierwsza WWLN (rys. 8.10a)</b>						
1.	ABC	ABC	ABC	5,39	0,37	2,88
9.	ABC	BCA	CAB	0,21	0,75	<b>0,48</b>
49.	BCA	CAB	ABC	0,21	0,75	<b>0,48</b>
74.	CAB	ABC	BCA	0,21	0,75	<b>0,48</b>
						
<b>Druga WWLN (rys. 8.10b)</b>						
9.	ABC	BCA	CAB	0,21	0,75	<b>0,48</b>
31.	ABC	CBA	ABC	1,02	1,03	1,03
49.	BCA	CAB	ABC	0,21	0,75	<b>0,48</b>
74.	CAB	ABC	BCA	0,21	0,75	<b>0,48</b>
143.	ACB	CBA	BAC	0,21	0,75	<b>0,48</b>
168.	BAC	ACB	CBA	0,21	0,75	<b>0,48</b>
208.	CBA	BAC	ACB	0,21	0,75	<b>0,48</b>
						
<b>Trzecia WWLN (rys. 8.10c)</b>						
31.	ABC	CBA	ABC	1,02	1,03	1,03
35.	ABC	CBA	BAC	0,39	0,93	<b>0,66</b>
64.	BCA	BAC	ACB	0,39	0,93	<b>0,66</b>
96.	CAB	ACB	CBA	0,39	0,93	<b>0,66</b>

Lp.	Układ faz toru prądowego			Wskaźniki niezrównoważenia i niesymetrii, %		Średnia arytmetyczna wskaźników $\alpha_0$ i $\alpha_2$ , %
	I	II	III	$\alpha_0$	$\alpha_2$	$\frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2}$
121.	ACB	CAB	ABC	0,39	0,93	0,66
153.	BAC	BCA	CAB	0,39	0,93	0,66
182.	CBA	ABC	BCA	0,39	0,93	0,66
						
<b>Czwarta WWLN (rys. 8.10d)</b>						
125.	ACB	CAB	BAC	4,54	1,75	3,15
156.	BAC	BCA	CBA	4,54	1,75	3,15
181.	CBA	ABC	ABC	4,97	2,06	3,52
184.	CBA	ABC	ACB	4,54	1,75	3,15
						
<b>Piąta WWLN (rys. 8.10e)</b>						
36.	ABC	CBA	CBA	2,55	0,59	1,57
123.	ACB	CAB	CAB	1,47	0,58	1,03
152.	BAC	BCA	BCA	1,47	0,58	1,03
181.	CBA	ABC	ABC	1,47	0,58	1,03
						

Dla pierwszej, czwartej i piątej WWLN zidentyfikowano po jednej grupie najlepszych układów przewodów fazowych w torach prądowych, która charakteryzuje się najmniejszą niesymetrią impedancyjną. W obrębie każdej grupy znajdują się trzy układy ilustrujące dokładny rozkład przewodów fazowych L1, L2 i L3 w tej konfiguracji. Dla drugiej i trzeciej WWLN występują po dwie takie grupy układów, które stanowią swoje lustrzane odbicia – grupa 1 i 1' (tab. 4.10).

#### 4.3.3 Wskaźniki asymetrii w funkcji kątów fazowych napięć zasilających

W ramach ostatniego etapu przeprowadzono analizę zależności wskaźników nierównoważenia oraz niesymetrii w torze III dla zastosowanego układu przewodów fazowych (zgodnie z rysunkiem 4.1) i długości linii 75 km, przy zmianie wartości kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów prądowych WWLN. Zakres zmian kątów fazowych napięć dla każdego z torów prądowych obejmował następujące przypadki:  $-30^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  (bazowy),  $+10^\circ$ ,  $+30^\circ$ . Zakres kątów wynika z warunków ruchowych jakie mogą wystąpić podczas pracy rzeczywistej WWLN. W tabeli 7 (zał. CD) zawarto całościowe zestawienie wyników uzyskanych w ramach tej analizy dla wszystkich badanych sylwetek. W tabeli 4.11 przedstawiono maksymalne i minimalne wartości analizowanych wskaźników, które osiągnięto w zależności od występujących kątów fazowych napięć w poszczególnych torach prądowych badanych WWLN.

**Tab. 4.11** Maksymalne i minimalne wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii w % osiągnięte w zależności od występującego układu kątów fazowych napięć zasilających dla analizowanych WWLN

	Pierwsza WWLN (rys. 4.1a)		Druga WWLN (rys. 4.1b)		Trzecia WWLN (rys. 4.1c)		Czwarta WWLN (rys. 4.1d)		Piąta WWLN (rys. 4.1e)	
	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %	$\alpha_0$ , %	$\alpha_2$ , %
$\max(\alpha_0)$ lub $\max(\alpha_2)$	6,48	1,49	1,10	2,61	3,74	2,17	6,90	3,27	6,84	0,93
$\alpha_0^b$ lub $\alpha_2^b$	5,39	0,37	1,02	1,03	1,02	1,03	4,97	2,06	2,55	0,59
$\min(\alpha_0)$ lub $\min(\alpha_2)$	2,94	0,07	0,77	1,03	0,77	1,02	4,42	1,62	2,28	0,22

Na podstawie przeprowadzonej analizy zauważa się, że możliwe jest wystąpienie redukcji wskaźników niesymetrii i nierównoważenia w zależności od przesunięcia kątów napięć fazowych poszczególnych torów prądowych (tab. 4.11). Należy zaznaczyć, że w zależności od badanej WWLN zmniejszenie jednego ze wskaźników asymetrii najczęściej powoduje zwiększenie się drugiego ze nich (zał. CD – tab. 7).

Przykładem WWLN, dla której uzyskano polepszenie zarówno wskaźnika niesymetrii jak i nierównoważenia jest trzecia WWLN, dla której otrzymano wartości  $\alpha_0 = 0,89\%$  i  $\alpha_2 = 1,02\%$  dla następujących konfiguracji kątów fazowych napięć zasilających torów prądowych, gdzie za fazę odniesienia przyjęto L1:

- $0^\circ$  (tor I),  $-10^\circ$  (tor II),  $-10^\circ$  (tor III),
- $10^\circ$  (tor I),  $0^\circ$  (tor II),  $0^\circ$  (tor III).

Najgorsze wskaźniki otrzymano dla układu:  $-30^\circ$  (tor I),  $30^\circ$  (tor II),  $-30^\circ$  (tor III), wówczas uzyskano maksymalne wartości wskaźników dla tej sylwetki, tj.  $\alpha_0 = 3,74\%$  i  $\alpha_2 = 2,17\%$ .



Dla pozostałych analizowanych WWLN minimalizacja jednego ze wskaźników asymetrii powodowała maksymalizację drugiego z nich. Przykładowo, dla czwartej WWLN otrzymano  $\alpha_0 = 4,42\%$  (min) i  $\alpha_2 = 3,27\%$  (max) i konfiguracji kątów fazowych napięć zasilających (gdzie L1 jest fazą odniesienia):  $30^\circ$  (tor I),  $30^\circ$  (tor II),  $-30^\circ$  (tor III).

W przypadku drugiej WWLN (rys. 4.1b) najkorzystniejszą konfiguracją kątów napięć fazowych poszczególnych torów prądowych jest stan, w którym są one „w fazie”, tzn. gdy przesunięcie kątów fazowych napięć zasilających jest zerowe. Przy takich konfiguracjach otrzymuje się pary wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii, dla których wartości tych wskaźników jedynie w niewielkim stopniu przekraczają dopuszczalną wartość graniczną 1%, tj.  $\alpha_0 = 1,02\%$  i  $\alpha_2 = 1,03\%$ .

Pod względem niesymetrii impedancyjnej, którą opisuje się i ocenia poprzez pryzmat  $\alpha_0$  i  $\alpha_2$ , najlepszymi cechami, tj. najmniejszym stopniem niesymetrii, charakteryzują się druga i trzecia WWLN. Najgorsze cechy wykazuje czwarta WWLN.

#### 4.4 Analiza zwarciowa

Podstawą do przeprowadzenia analizy zwarciowej w układach sieciowych zawierających WWLN są obserwacje z analizy niesymetrii impedancyjnej tych linii. Niesymetria geometryczna linii napowietrznej przekłada się na wartości spodziewanych prądów zwarciowych płynących w poszczególnych fazach tej linii.

Praktyczne podejście wykorzystywane w analizach zwarciowych zakłada korzystanie z modelu linii symetrycznej tj. modelu uproszczonego (model admitancyjny takiej linii opisano w rozdziale 3.1.3). Przy modelu symetrycznym prądy zwarć jednofazowych w danym węźle są takie same dla różnych faz, a dla zwarć trójfazowych w poszczególnych fazach płyną te same prądy. W WWLN, które charakteryzują się znaczną niesymetrią impedancyjną, w wyniku zwarcia trójfazowego, w każdej fazie może popłynąć inny prąd, a prąd zwarcia jednofazowego będzie zależał do fazy, w której ono nastąpiło.

Z uwagi na przedstawione zjawiska oraz obserwacje dotyczące znaczącej niesymetrii WWLN, celem analiz zwarciowych jest ocena wpływu rodzaju zastosowanego modelu WWLN przy modelowaniu zwarć. W ramach analizy zwarciowej wyznaczono początkowe prądy zwarcia jedno- i trójfazowego w układach z badanymi sylwetkami WWLN, szacując błędy przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego).

Rozważono szereg scenariuszy, których celem było określenie w jakim stopniu zastosowanie modelu uproszczonego (symetrycznego) do opisu niesymetrycznej WWLN wpływa na uzyskiwane wartości prądów zwarcia jedno- i trójfazowych w miejscu zwarcia tj. na końcu toru o najniższym napięciu znamionowym (zwarcie w węźle III') oraz na wyznaczanie udziału prądu zwarciowego od strony toru prądowego III WWLN objętego zwarcie. Miarą oceny wpływu rodzaju zastosowanego modelu są procentowe błędy względne zdefiniowane według zależności (4.8) i (4.9):

$$\delta I_{zw\%} = \frac{\left| I_{zw\ pu}^{sym} \right| - \left| I_{zw\ pu}^{niesym} \right|}{\left| I_{zw\ pu}^{niesym} \right|} \cdot 100\% , \quad (4.8)$$

$$\delta I_{gał\%} = \frac{\left| I_{gał\ pu}^{sym} \right| - \left| I_{gał\ pu}^{niesym} \right|}{\left| I_{gał\ pu}^{niesym} \right|} \cdot 100\% , \quad (4.9)$$

gdzie:

$\delta I_{zw\%}$  – procentowy błąd względny wyznaczania prądu zwarcia przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego);

$I_{zw\ pu}^{sym}$ ,  $I_{zw\ pu}^{niesym}$  – początkowy prąd zwarcia jedno- lub trójfazowego w jednostkach względnych uzyskany przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego), gdy indeks górny „sym” lub modelu dokładnego (niesymetrycznego), gdy indeks „niesym”;

$\delta I_{gał\%}$  – procentowy błąd względny wyznaczania udziału prądu zwarcia od strony gałęzi badanego toru prądowego III przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego);

$I_{gał\ pu}^{sym}$ ,  $I_{gał\ pu}^{niesym}$  – prąd gałęziowy udziału prądu zwarcia od strony gałęzi badanego toru prądowego III, liczony na końcu toru III (węzeł III’), przy zastosowaniu modelu uproszczonego (symetrycznego), gdy indeks górny „sym” lub modelu dokładnego (niesymetrycznego), gdy indeks „niesym”.

W przeciwieństwie do poprzednich analiz, nie realizuje się obliczeń zwarciovych w funkcji przesunięcia kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów prądowych WWLN [6, 14]. W niniejszej analizie wspomniane zmiany nie są decydujące z punktu widzenia wyznaczanych prądów zwarciovych, ponieważ zmiany te wpływają w głównej mierze na prąd rozptywowy w normalnych warunkach pracy systemu, tj. przed wystąpieniem zwarcia. Uproszczona analiza zwarciova uwzględniająca wspomniane przesunięcia fazowe  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $0^\circ$  (bazowy) potwierdziła, że nie mają one znaczącego wpływu na wartości otrzymanych błędów [37].

Algorytm prowadzenia analizy zwarciovej przedstawia się następująco:

- 1) w pierwszym kroku wyznacza się macierz impedancyjną zwarciową układu  $Z_{zw\ pu}$ , będącą odwrotnością macierzy admitancyjnej zwarciovej  $Y_{zw\ pu}$ :

$$Z_{zw\ pu} = Y_{zw\ pu}^{-1}, \quad (4.10)$$

gdzie:

$$Y_{zw\ pu} = Y_{WWLN\ pu} + Y_{ot\ pu} + Y_{k\ pu}, \quad (4.11)$$

oraz:

$Y_{WWLN\ pu}$  – macierz admitancyjna WWLN,

$Y_{ot\ pu}$  – macierz admitancyjna otoczenia sieciowego WWLN,

$Y_{k\ pu}$  – macierz admitancyjna rodzaju zwarcia;

- 2) wyznaczenie napięć w węzłach układu  $U_{pu}$  zgodnie z przedstawioną zależnością:

$$U_{pu} = Z_{zw\ pu} \cdot I_{ot\ pu}, \quad (4.12)$$

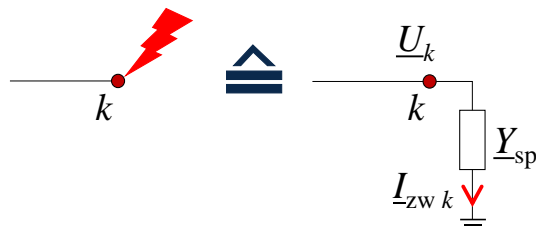
gdzie:

$I_{ot\ pu}$  – prądy otoczenia sieciowego WWLN wynikające z mocy zwarciovych i napięć znamionowych systemów zastępczych zasilających układ (rys. 4.24);

- 3) wyznaczenie prądów zwarcia:

- a. jednofazowego, gdzie prąd zwarcia wyznacza się jako iloczyn napięcia w węźle  $k$  i admitancji  $Y_{sp}$  czyli admitancji o bardzo dużej wartości, będącej w tym przypadku modelem metalicznego zwarcia doziemnego:

$$\underline{I}_{zw\ pu\ k} = \underline{U}_{pu\ k} \cdot \underline{Y}_{sp} \quad (4.13)$$



Rys. 4.22 Ilustracja modelu zwarcia jednofazowego

Macierz admitancyjna rodzaju zwarcia  $\mathbf{Y}_{k\ pu}$  przedstawia się zależnością (4.14):

$$\mathbf{Y}_{k\ l\ f} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{sp} & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{III}' L1 \\ \text{III}' L2 \\ \text{III}' L3 \end{matrix} \quad (4.14)$$

- b. trójfazowego, wówczas korzysta się z zależności (4.15):

$$\underline{I}_{p-q\ pu} = (\underline{U}_{pk\ pu} - \underline{U}_{qk\ pu}) \cdot \underline{Y}_{p-q\ pu} \quad (4.15)$$

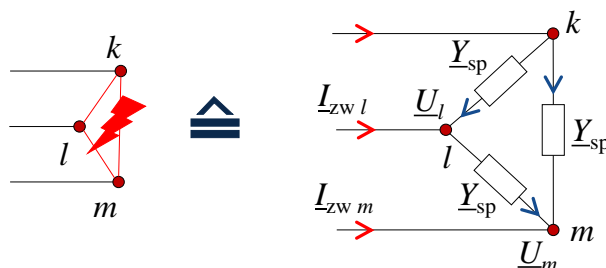
gdzie:

$\underline{U}_{pk\ pu}$  – napięcie węzła  $p$  podczas zwarcia w węźle  $k$ ,

$\underline{U}_{qk\ pu}$  – napięcie węzła  $q$  podczas zwarcia w węźle  $k$ ,

$\underline{Y}_{p-q\ pu}$  – admitancja gałęzi między wybranymi węzłami  $p$  i  $q$ .

Prąd płynący dowolną gałęzią od węzła  $p$  do węzła  $q$ , przy zwarcu w węźle  $k$  oblicza się jako iloczyn różnicy napięć węzłowych tj. napięcia w węźle  $p$  i węźle  $q$  przy zwarcu w węźle  $k$  oraz admitancji gałęzi łączącej węzły  $p$  i  $q$ . Chcąc wyznaczyć prąd zwarcia trójfazowego, wyznacza się prądy płynące w „trójkącie zwarciovym” (rys. 4.23), a następnie na podstawie pierwszego prawa Kirchhoffa wyznacza się wartości prądów zwarcia w każdej fazie.



Rys. 4.23 Ilustracja modelu zwarcia trójfazowego („trójkąt zwarciovym”)

W tym przypadku, macierz admitancyjna rodzaju zwarcia przyjmuje postać (4.16):

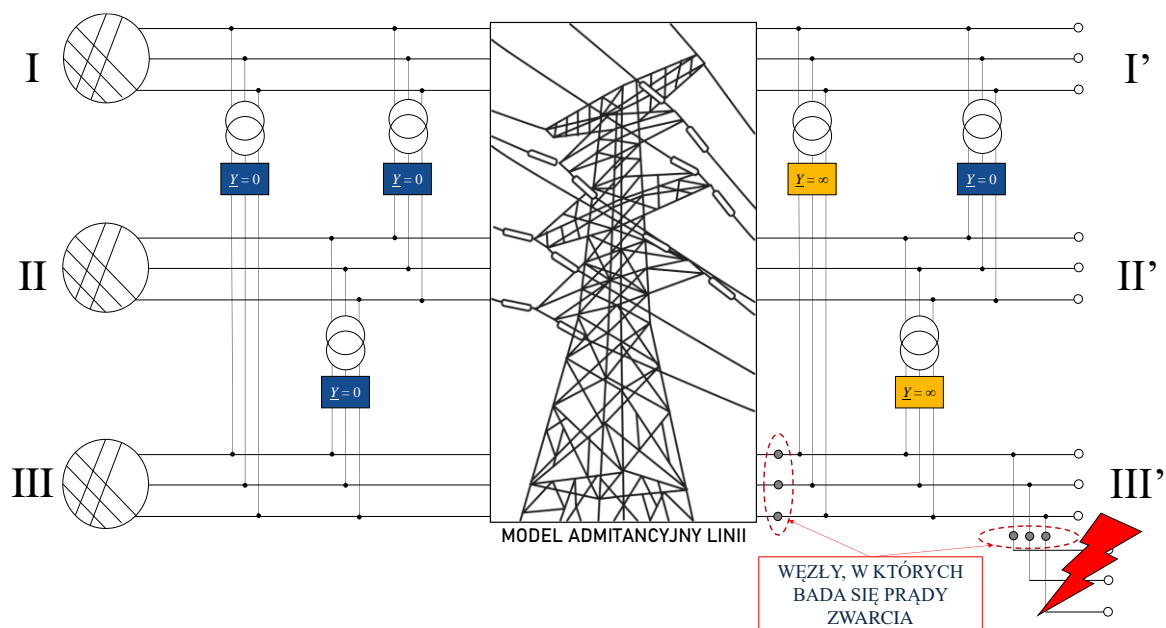
$$\mathbf{Y}_{k3f} = \begin{matrix} & \text{III' L1} & \text{III' L2} & \text{III' L3} \\ \begin{bmatrix} 2\underline{Y}_{sp} & -\underline{Y}_{sp} & -\underline{Y}_{sp} \\ -\underline{Y}_{sp} & 2\underline{Y}_{sp} & -\underline{Y}_{sp} \\ -\underline{Y}_{sp} & -\underline{Y}_{sp} & 2\underline{Y}_{sp} \end{bmatrix} & \text{III' L1} \\ & \text{III' L2} \\ & \text{III' L3} \end{matrix} \quad (4.16)$$

Analogicznie jak w przypadku analizy niesymetrii impedancyjnej, początkowo został zamodelowany pełny ekwiwalent sieci zewnętrznej [21, 60], natomiast w dalszych krokach prowadzi się do określenia układu, dla którego różnice pomiędzy modelem symetrycznym i niesymetrycznym będą największe. Zakłada się, że zwarcie występuje na końcu toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym, tj. w węźle III'.

Poddawane analizie trójtorowe linie wielonapięciowe zasilono od strony węzłów początkowych poprzez systemy zastępcze, a od strony węzłów końcowych WWLN pracuje w stanie jałowym. Zasilenie WWLN od strony węzłów końcowych powoduje jedynie zwiększenie poziomu prądów zwarciovych i ich przepływ do miejsca zwarcia bez pośrednictwa WWLN, przez co zaburza obserwację wpływu niesymetrii badanej WWLN na poziomy prądów zwarciovych, co jest głównym celem tej analizy. Natomiast obciążenie WWLN od strony węzłów końcowych np. odbiorami stałaimpedancyjnymi, które nie są źródłem prądu zwarciovego, nie ma istotnego wpływu na uzyskane rozprędy prądów zwarciovych.

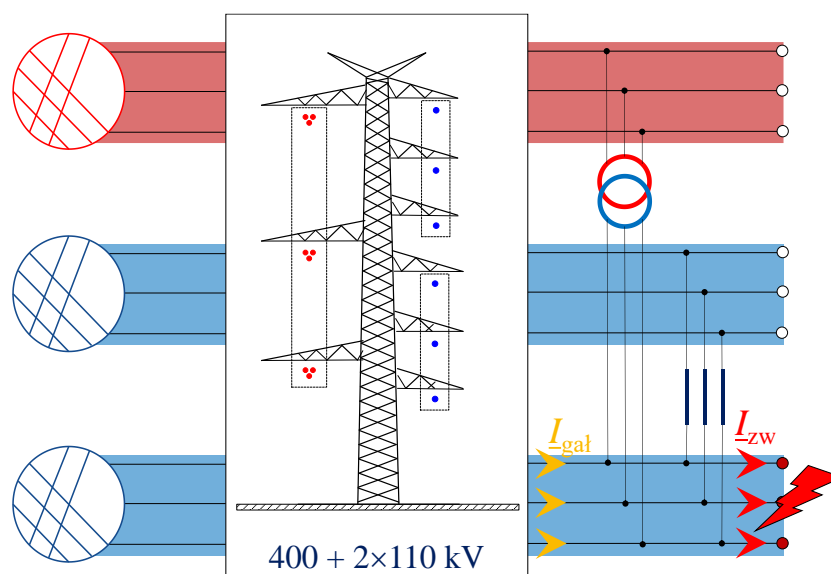
Poszukiwanie najbardziej niekorzystnego układu pracy WWLN, poprzez zmianę admitancji połączeń pomiędzy poszczególnymi jej węzłami, pozwoliło na ograniczenie modelu sieci zewnętrznej do modelu zawierającego jedynie połączenia między poszczególnymi poziomami napięć w początkowych i końcowych węzłach linii. Można zauważyć, że wyeliminowane połączenia stanowiły „ucieczkę” dla prądów zwarciovych poza WWLN, co mając na uwadze postawiony cel, czyli określenie wpływu zastosowanego modelu WWLN na poziom prądów zwarciovych, potwierdza słuszność takiej redukcji modelu. W otrzymanym układzie przez wszystkie tory prądowe płyną składowe prądów zwarcia, czyli prądy o dużych wartościach i ich oddziaływanie na siebie jest znaczne.

Kolejny etap przygotowywania modelu sieci zewnętrznej do analiz zwarciovych polegał na doborze admitancji pozostałych połączeń. Najgorsze warunki pracy, czyli największe różnice między zastosowaniem modelu symetrycznego i niesymetrycznego, występowały dla układu pracy przedstawionego na rysunku 4.24. Zaznaczone na niebiesko admitancje wynoszą zero, a więc stanowią przerwę. Zaznaczone na żółto admitancje są nieskończenie duże, czyli stanowią bezpośrednie połączenie. W efekcie wyeliminowano połączenia występujące między węzłami początkowymi WWLN. Ich obecność powodowała przepływ prądu zwarciovego głównie przez tor objęty zwarcie, czyli tor prądowy III. Ponownie występowała sytuacja, w której duża część prądu zwarciovego „omijała” WWLN, a tym samym wpływ niesymetrii fazowej linii nie był dostatecznie uwypuklony. Eliminacji uległo również połączenie między torami nie objętymi zwarcie na końcu linii z analogicznych powodów.



Rys. 4.24 Model sieci zewnętrznej z WWLN do analizy zwarciowej

W efekcie, model sieci zewnętrznej przeznaczony do analizy zwarciowej to układ, w którym końce poszczególnych torów znajdują się elektrycznie blisko siebie, co realizuje się poprzez przyłączanie transformatora pomiędzy końce torów o różnych napięciach i sprzęgieł pomiędzy tory o tych samych napięciach (przykładowy układ - rys. 4.25).

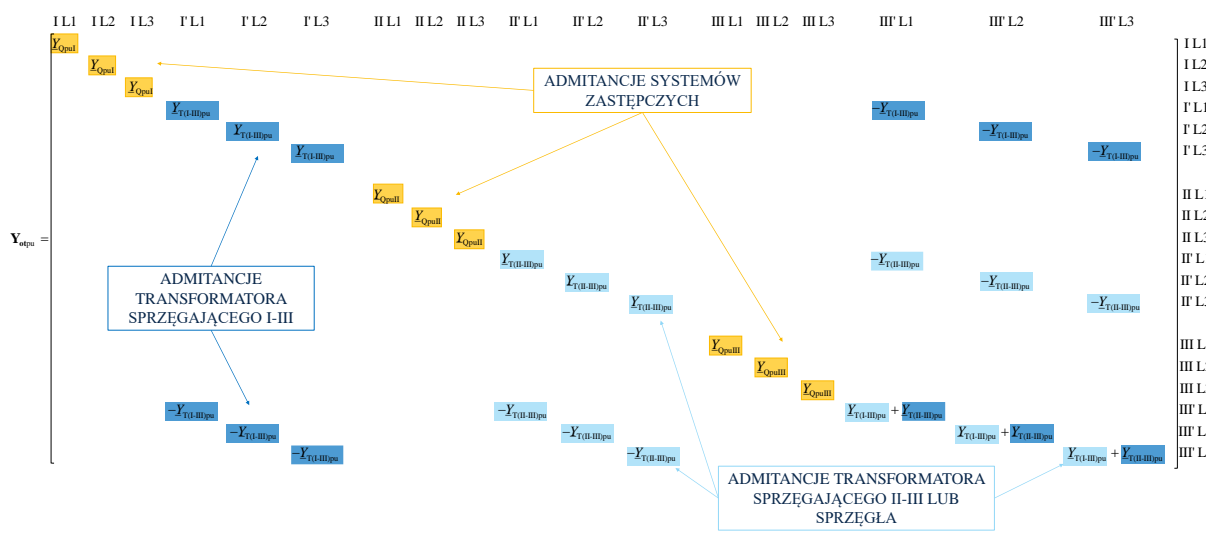


Rys. 4.25 Przykład połączeń torów prądowych o różnych i tych samych napięciach znamionowych

Otrzymany model sieci został odwzorowany za pomocą macierzy admittancejnej otoczenia (rys. 4.26). W węzłach reprezentujących początek WWLN, czyli na przekątnej głównej, występują admittance systemów zastępczych, przy czym przyjęto następujące moce zwarciove tych systemów w zależności od napięcia znamionowego: dla 400 kV  $S_{kQ}'' = 5000 \text{ MV}\cdot\text{A}$ , dla 220 kV  $S_{kQ}'' = 3500 \text{ MV}\cdot\text{A}$ , a dla 110 kV  $S_{kQ}'' = 2000 \text{ MV}\cdot\text{A}$ . Poza przekątną główną, dla węzłów końcowych WWLN, występują admittance transformatorów sprzęgających tory I-III oraz II-III (gdy  $U_{nII} \neq U_{nIII}$ ) lub admittance sprzęgła, gdy  $U_{nII} = U_{nIII}$

wzięte ze znakiem przeciwnym. Ponieważ nie ma połączeń w tych węzłach do ziemi, to zgodnie z zasadą tworzenia macierzy admittancejnej sieci, admittancej tych transformatorów pojawiają się również na przekątnej głównej tej macierzy.

Z uwagi na różne napięcia znamionowe poszczególnych torów prądowych wszystkie admittancej, które występują w macierzy admittancejnej otoczenia sieciowego są przedstawione w jednostkach względnych. Przyjęto moc bazową równą  $S_b = 100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ .



Rys. 4.26 Ilustracja poszczególnych elementów admittancej otoczenia  $Y_{ot \text{ pu}}$

Rozważono następujące scenariusze analiz zwarciovych, wyznaczając procentowe błędy względne prądów zwarcia  $\delta I_{zw\%}$  oraz procentowe błędy względne prądów gałęziowych (udziałów prądów zwarcia) od strony badanego toru prądowego III  $\delta I_{gal\%}$  (rys. 4.24) w funkcji:

- długości WWLN, przy ustalonym układzie przewodów fazowych zgodnym z rysunkiem 4.1,
- układu przewodów fazowych w torach prądowych WWLN, przy ustalonej długości linii wynoszącej 75 km.

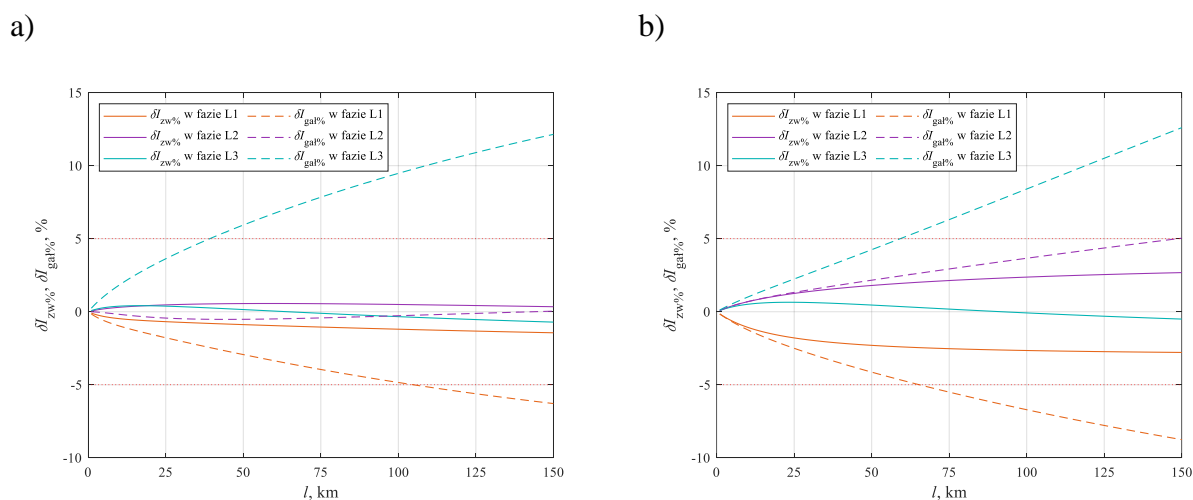
Dopuszcza się  $\pm 5\%$  procentowy błąd względny wyznaczanych prądów w wyniku zastosowania modelu uproszczonego podczas modelowania zwarć [7].

#### 4.4.1 Prądy zwarcia w funkcji długości WWLN

Rysunek 4.27 przedstawia uzyskane procentowe błędy względne prądów zwarcia  $\delta I_{zw\%}$  oraz prądów udziałów  $\delta I_{gal\%}$  w funkcji długości WWLN dla pierwszej analizowanej sylwetki (rys. 4.1a) przy wystąpieniu zwarcia trójfazowego i jednofazowego w węzle III' (rys. 4.24). W przypadku prądów zwarcia uzyskane błędy wynikające z zastosowania modelu symetrycznego nie przekraczają poziomu  $\pm 5\%$  w całym zakresie badanych długości linii. Dla długości WWLN równej 150 km wartość bezwzględna  $\delta I_{zw\%}$  przy zwarciu trójfazowym nie przekracza 0,75%, a przy zwarciu jednofazowym 2,75%. Krzywe odzwierciedlające błędy  $\delta I_{zw\%}$ , dla obydwu rodzajów zwarć, charakteryzują się małymi przyrostami w funkcji wydłużania linii. Na podstawie przedstawionych wyników, wnioskuje się, że zastosowanie

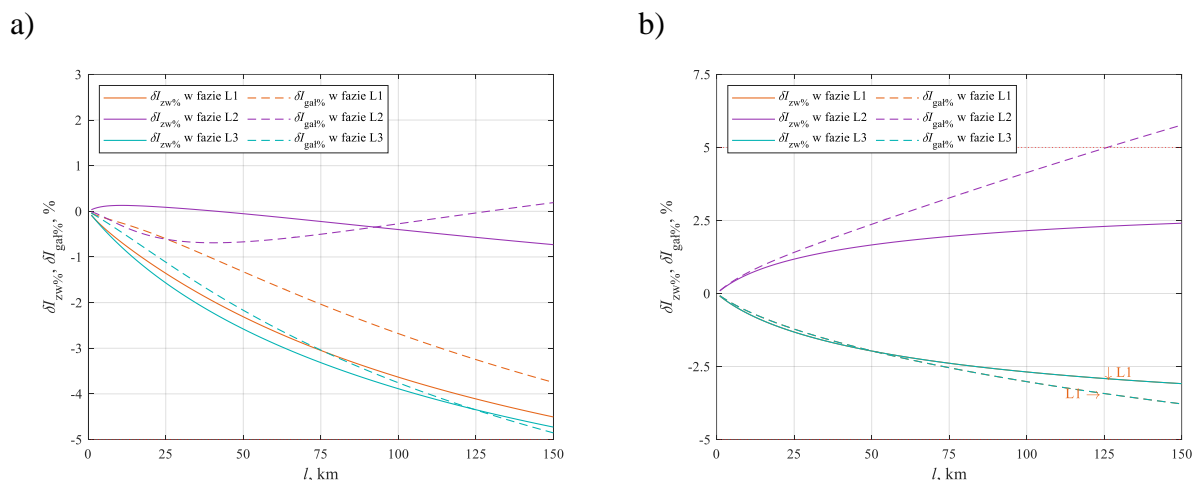
modelu uproszczonego do odwzorowania prądów zwarcia dla analizowanej sylwetki jest wystarczające.

Błędy  $\delta I_{\text{gal}\%}$  mają tendencję wzrostową, wyróżniającą się dużymi przyrostami wraz ze zwiększaniem się długości linii. Występuje przekroczenie dopuszczalnego poziomu błędu zarówno przy modelowaniu zwarcia trójfazowego, jak i jednofazowego. W przypadku zwarcia trójfazowego (rys. 4.27a), przekroczenie następuje przy długości linii 40 km w fazie L3 oraz przy 105 km w fazie L1. Dla zwarcia jednofazowego (rys. 4.27b) wartość graniczną osiąga się przy długości linii wynoszącej 60 km w fazie L3 oraz przy 66 km dla fazy L1. Ostatecznie zastosowanie modelu uproszczonego do szacowania prądów udziałów płynących od strony badanego toru prądowego jest wystarczające dla WWLN o długości maksymalnie 39 km. Powyżej tej długości niesymetria impedancyjna WWLN przekłada się na znaczne błędy  $\delta I_{\text{gal}\%}$  osiągające nawet 12,14% przy długości linii 150 km (rys. 4.27a, faza L3).



**Rys. 4.27** Procentowe błędy względne  $\delta I_{\text{zw}\%}$ ,  $\delta I_{\text{gal}\%}$  w funkcji długości pierwszej WWLN przy zwarciu  
a) trójfazowym, b) jednofazowym

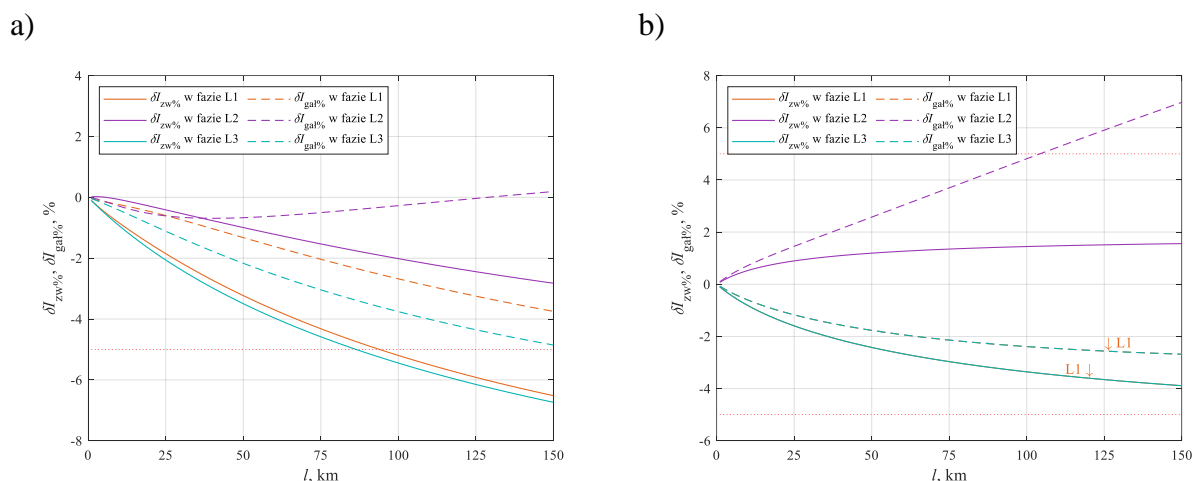
Dla podobnej konstrukcji wsporczej lecz innym sposobie prowadzenia torów prądowych i układzie przewodów fazowych w tych torach zgodnie z rysunkiem 4.1b, tj. dla drugiej WWLN, procentowe błędy względne  $\delta I_{\text{zw}\%}$  oraz  $\delta I_{\text{gal}\%}$  w przypadku zwarcia trójfazowego (rys. 4.28a) nie przekraczają wartości granicznej  $\pm 5\%$  w całym zakresie badanych długości linii. Należy jednak zwrócić uwagę, że przyrosty poszczególnych błędów wraz ze zwiększaniem się długości WWLN są znaczne, stąd wydłużenie linii o kolejne kilometry spowoduje przekroczenie wartości dopuszczalnej, w pierwszej kolejności w fazach L3 (dla  $\delta I_{\text{zw}\%}$  oraz  $\delta I_{\text{gal}\%}$ ) i L1 (dla  $\delta I_{\text{zw}\%}$ ). Rozkład błędów  $\delta I_{\text{zw}\%}$  i  $\delta I_{\text{gal}\%}$  podczas modelowania zwarcia jednofazowego przedstawia rysunek 4.28b. Z uwagi na zastosowany układ przewodów fazowych w torach prądowych tej linii (rys. 4.1b) procentowe błędy względne  $\delta I_{\text{zw}\%}$  i  $\delta I_{\text{gal}\%}$  osiągnięte dla fazy L1 są takie same jak dla fazy L3. Błędy  $\delta I_{\text{zw}\%}$  nie przekraczają poziomu  $\pm 5\%$  w całym zakresie badanych długości linii, natomiast dla długości linii 127 km osiągnięta jest wartość graniczna błędu  $\delta I_{\text{gal}\%}$  w fazie L2. Ostatecznie zastosowanie modelu uproszczonego dla badanej WWLN nie powoduje przekroczenia dopuszczalnego poziomu błędu 5% przy długości linii wynoszącej maksymalnie 126 km.



Rys. 4.28 Procentowe błędy względne  $\delta I_{zw\%}$ ,  $\delta I_{gal\%}$  w funkcji długości drugiej WWLN przy zwarciu

a) trójfazowym, b) jednofazowym

W przypadku trzeciej WWLN, toru 400 kV w układzie „zygzaka”, uzyskuje się podobne rozkłady błędów jak dla drugiej WWLN. Przekroczenie granicy -5% dla parametru  $\delta I_{zw\%}$  następuje przy długości 87 km dla fazy L3 oraz 93 km dla fazy L1 przy zwarciu trójfazowym. Dodatkowo niemal graniczną wartość błędu  $\delta I_{gal\%}$  osiąga się dla fazy L3. Dla zwarcia jednofazowego, wartość 5% osiąga parametr  $\delta I_{gal\%}$  w fazie L2 przy długości linii równej 104 km. Ostatecznie maksymalna długość tej WWLN nie powodująca wprowadzenia błędu powyżej 5% przy szacowaniu prądów zwarcia w torze prądowym III wynosi 86 km.



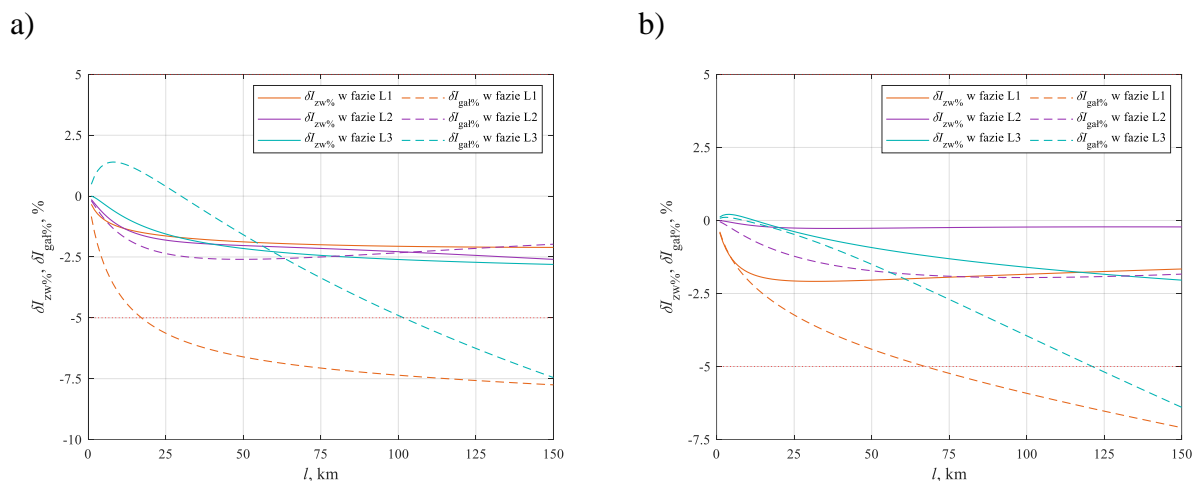
Rys. 4.29 Procentowe błędy względne  $\delta I_{zw\%}$ ,  $\delta I_{gal\%}$  w funkcji długości trzeciej WWLN przy zwarciu

a) trójfazowym, b) jednofazowym

Stosowanie modelu uproszczonego do opisu czwartej WWLN o pionowym układzie prowadzenia torów prądowych (rys. 4.1d) charakteryzuje się niewielkimi błędami  $\delta I_{zw\%}$  przy szacowaniu prądów zwarcia (rys. 4.30). Procentowe błędy względne mieszczą się w zakresie  $(0 \div -2,81)\%$  przy zwarciu trójfazowym oraz  $(0 \div -2,08)\%$  przy zwarciu jednofazowym. Szacowanie prądów udziałów przy zastosowaniu modelu uproszczonego od strony gałęzi badanego toru III powoduje przekroczenie dopuszczalnej granicy błędu, które następuje przy długości linii już 18 km dla fazy L1 oraz 102 km dla fazy L3 przy zwarciu trójfazowym,

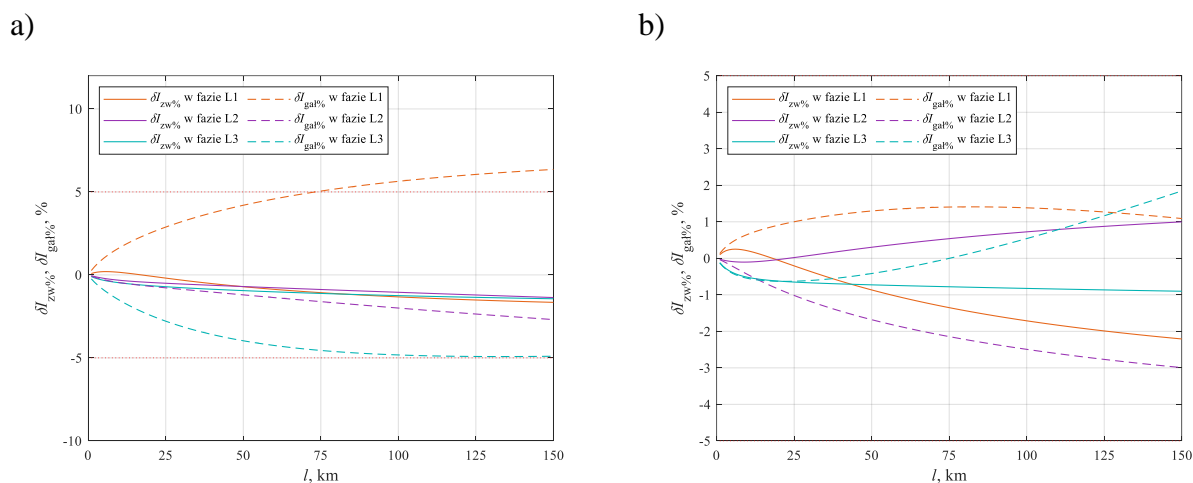


a także 68 km dla fazy L1 i 122 km dla fazy L3 przy zwarciu jednofazowym. Dla długości linii wynoszącej 150 km maksymalny błąd  $\delta I_{\text{gal}\%}$  występuje w fazie L1 i osiąga  $-7,75\%$  przy zwarciu trójfazowym (rys. 4.30a) oraz  $-7,09\%$  przy zwarciu jednofazowym (rys. 4.30b). Niesymetria badanej WWLN najbardziej uwidacznia się dla  $\delta I_{\text{gal}\%}$  liczonego w fazie L3 przy zwarciu trójfazowym, dla której błędy przyjmują zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości o znacznej wartości przyrostu zmian w całym zakresie badanych długości linii. Dopuszczalną długością WWLN o badanej konstrukcji, którą można opisywać modelem symetrycznym jest 18 km.



**Rys. 4.30** Procentowe błędy względne  $\delta I_{\text{zw}\%}$ ,  $\delta I_{\text{gal}\%}$  w funkcji długości czwartej WWLN przy zwarciu a) trójfazowym, b) jednofazowym

W przypadku linii trójnapięciowej z rysunku 4.1e nie następuje przekroczenie dopuszczalnego poziomu błędów  $\delta I_{\text{zw}\%}$  oraz  $\delta I_{\text{gal}\%}$  przy zwarciu jednofazowym (rys. 4.31b). Jedynie przy zwarciu trójfazowym osiąga się wartość 5% błędu  $\delta I_{\text{gal}\%}$  w fazie L1 przy szacowaniu prądów udziałów od strony badanej gałęzi. Długość WWLN, która nie powoduje przekroczenia granicznej wartości  $\pm 5\%$  w żadnej z faz i obydwu analizowanych rodzajach zwarcia wynosi 73 km.



**Rys. 4.31** Procentowe błędy względne  $\delta I_{\text{zw}\%}$ ,  $\delta I_{\text{gal}\%}$  w funkcji długości piątej WWLN przy zwarciu a) trójfazowym, b) jednofazowym

Podsumowując, biorąc pod uwagę maksymalne długości linii przy, których nie następuje przekroczenie maksymalnego poziomu błędu przy modelowaniu zwarć w torze prądowym III, najlepszy wynik osiągnięto dla drugiej WWLN (układ płaski), a najgorszy dla czwartej WWLN (tab. 4.12).

**Tab. 4.12** Maksymalne długości badanych WWLN w km, przy których nie przekracza się dopuszczalnego poziomu błędu przy modelowaniu zwarć

Pierwsza WWLN (rys. 4.1a)	Druga WWLN (rys. 4.1b)	Trzecia WWLN (rys. 4.1c)	Czwarta WWLN (rys. 4.1d)	Piąta WWLN (rys. 4.1e)
39	126	86	17	73

#### 4.4.2 Prądy zwarcia w funkcji układu przewodów fazowych WWLN

Druga analiza dotyczyła wyznaczenia procentowych błędów względnych  $\delta I_{zw\%}$  oraz  $\delta I_{gal\%}$  przy ustalonej długości WWLN wynoszącej 75 km w zależności od konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych tej linii. Pełne wyniki analiz zestawiono w tabelach 8÷12 (zał. CD). Poszukiwano najlepszej konfiguracji przewodów fazowych WWLN, tzn. takiego układu, dla którego nie zostaje przekroczony dopuszczalny poziom błędu  $\pm 5\%$  dla każdej z faz, podczas szacowania prądów zwarcia oraz prądów udziałów przy zastosowaniu modelu symetrycznego do opisu niesymetrycznej WWLN. Spośród wybranych układów, które spełniają powyższy warunek, za najlepszy układ wybrano ten, w którym osiąga się najmniejszą maksymalną wartość bezwzględną błędu  $\delta I_{zw\%}$  lub  $\delta I_{gal\%}$ . W tabeli 4.13 przedstawiono wyselekcjonowane najlepsze układy dla każdej z analizowanych WWLN.

Wyboru najlepszych układów przewodów fazowych w torach prądowych WWLN dokonano w toku następującego postępowania:

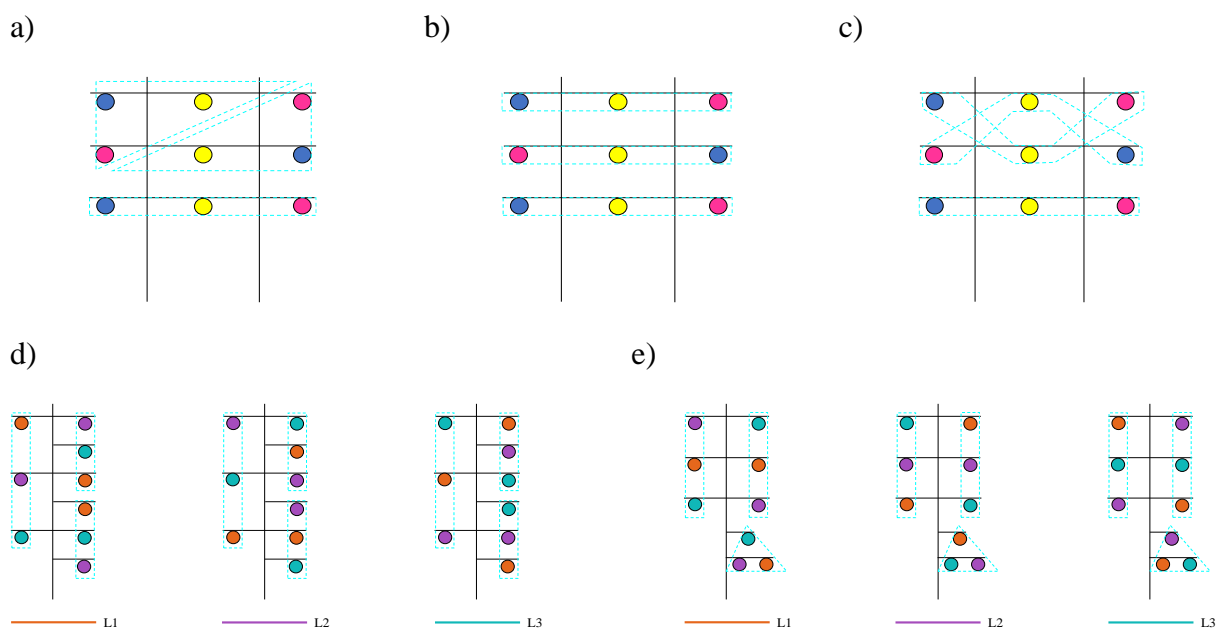
- 1) wyznaczono wartości bezwzględne  $\delta I_{zw\%}$  oraz  $\delta I_{gal\%}$ ,
- 2) wyselekcjonowano układy, dla których  $|\delta I_{zw\%}|$  oraz  $|\delta I_{gal\%}|$  nie przekraczają wartości 5%,
- 3) zdefiniowano wskaźnik  $\overline{\delta I\%}$  będący średnią arytmetyczną wielkości  $|\delta I_{zw\%}|$  i  $|\delta I_{gal\%}|$  rozważanego układu,
- 4) najlepszy układ przewodów fazowych na podstawie analizy zwarciowej charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem  $\overline{\delta I\%}$ .

Fioletową ramką oznaczono układy bazowe tj. odpowiadające konfiguracjom przewodów fazowych zgodnie z rysunkiem 4.1. Metoda oznaczenia układów faz torów prądowych w poszczególnych sylwetkach WWLN została opisana w załączniku 8.2

**Tab. 4.13 Zestawienie najlepszych układów przewodów fazowych w torach prądowych rozważanych WWLN na podstawie analizy zwarciowej**

Lp.	Układ faz toru prądowego			Procentowe błędy względne przy zwarciu trójfazowym						Procentowe błędy względne przy zwarciu jednofazowym						$\overline{\delta I}_\%, \%$
				w miejscu zwarcia $\delta I_{zw}\%, \%$			od gałęzi toru III $\delta I_{gal}\%, \%$			w miejscu zwarcia $\delta I_{zw}\%, \%$			od gałęzi toru III $\delta I_{gal}\%, \%$			
	I	II	III	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	
<b>Pierwsza WWLN (rys. 8.10a)</b>																
1.	ABC	ABC	ABC	-1,05	0,55	-0,11	-3,95	-0,42	7,84	-2,53	2,14	0,18	-5,50	2,93	6,31	7,84
31.	ABC	CBA	ABC	-2,62	0,22	-2,89	-2,04	-0,50	-3,04	-2,22	2,13	-2,22	-2,98	2,80	-2,98	2,22
62.	BCA	BAC	BCA	0,22	-2,89	-2,62	-0,50	-3,04	-2,04	2,13	-2,22	-2,22	2,80	-2,98	-2,98	2,22
93.	CAB	ACB	CAB	-2,89	-2,62	0,22	-3,04	-2,04	-0,50	-2,22	-2,22	2,13	-2,98	-2,98	2,80	2,22
124.	ACB	CAB	ACB	-2,89	-2,62	0,22	-3,04	-2,04	-0,50	-2,22	-2,22	2,13	-2,98	-2,98	2,80	2,22
155.	BAC	BCA	BAC	0,22	-2,89	-2,62	-0,50	-3,04	-2,04	2,13	-2,22	-2,22	2,80	-2,98	-2,98	2,22
186.	CBA	ABC	CBA	-2,62	0,22	-2,89	-2,04	-0,50	-3,04	-2,22	2,13	-2,22	-2,98	2,80	-2,98	2,22
<b>Druga WWLN (rys. 8.10b)</b>																
31.	ABC	CBA	ABC	-3,05	-0,22	-3,32	-2,04	-0,50	-3,04	-2,39	1,95	-2,39	-2,54	3,27	-2,54	2,27
62.	BCA	BAC	BCA	-0,22	-3,32	-3,05	-0,50	-3,04	-2,04	1,95	-2,39	-2,39	3,27	-2,54	-2,54	2,27
93.	CAB	ACB	CAB	-3,32	-3,05	-0,22	-3,04	-2,04	-0,50	-2,39	-2,39	1,95	-2,54	-2,54	3,27	2,27
124.	ACB	CAB	ACB	-3,32	-3,05	-0,22	-3,04	-2,04	-0,50	-2,39	-2,39	1,95	-2,54	-2,54	3,27	2,27
155.	BAC	BCA	BAC	-0,22	-3,32	-3,05	-0,50	-3,04	-2,04	1,95	-2,39	-2,39	3,27	-2,54	-2,54	2,27
186.	CBA	ABC	CBA	-3,05	-0,22	-3,32	-2,04	-0,50	-3,04	-2,39	1,95	-2,39	-2,54	3,27	-2,54	2,27
<b>Trzecia WWLN (rys. 8.10c)</b>																
31.	ABC	CBA	ABC	-4,32	-1,53	-4,58	-2,04	-0,50	-3,04	-2,97	1,35	-2,97	-2,14	3,70	-2,14	2,61
62.	BCA	BAC	BCA	-1,53	-4,58	-4,32	-0,50	-3,04	-2,04	1,35	-2,97	-2,97	3,70	-2,14	-2,14	2,61
93.	CAB	ACB	CAB	-4,58	-4,32	-1,53	-3,04	-2,04	-0,50	-2,97	-2,97	1,35	-2,14	-2,14	3,70	2,61
124.	ACB	CAB	ACB	-4,58	-4,32	-1,53	-3,04	-2,04	-0,50	-2,97	-2,97	1,35	-2,14	-2,14	3,70	2,61
155.	BAC	BCA	BAC	-1,53	-4,58	-4,32	-0,50	-3,04	-2,04	1,35	-2,97	-2,97	3,70	-2,14	-2,14	2,61
186.	CBA	ABC	CBA	-4,32	-1,53	-4,58	-2,04	-0,50	-3,04	-2,97	1,35	-2,97	-2,14	3,70	-2,14	2,61
<b>Czwarta WWLN (rys. 8.10d)</b>																
16.	ABC	CAB	ACB	0,68	-0,60	-1,36	2,18	0,57	-0,57	0,99	-1,50	-0,29	3,96	-1,22	0,19	1,18
42.	BCA	ABC	CBA	-0,60	-1,36	0,68	0,57	-0,57	2,18	-1,50	-0,29	0,99	-1,22	0,19	3,96	1,18
83.	CAB	BCA	BAC	-1,36	0,68	-0,60	-0,57	2,18	0,57	-0,29	0,99	-1,50	0,19	3,96	-1,22	1,18
181.	CBA	ABC	ABC	-2,00	-2,15	-2,44	-7,06	-2,50	-3,36	-1,94	-0,24	-1,31	-5,23	-1,91	-2,70	2,74
<b>Piąta WWLN (rys. 8.10e)</b>																
36.	ABC	CBA	CBA	-1,07	-0,88	-1,12	5,05	-1,61	-4,55	-1,35	0,54	-0,78	1,40	-2,14	0,00	1,71
125.	ACB	CAB	BAC	-1,64	-1,29	-0,75	1,04	-4,59	-0,34	-1,44	-0,79	0,31	0,65	0,01	-3,11	1,33
156.	BAC	BCA	CBA	-0,75	-1,64	-1,29	-0,34	1,04	-4,59	0,31	-1,44	-0,79	-3,11	0,65	0,01	1,33
184.	CBA	ABC	ACB	-1,29	-0,75	-1,64	-4,59	-0,34	1,04	-0,79	0,31	-1,44	0,01	-3,11	0,65	1,33

Przedstawione w tabeli 4.13 układy zaprezentowano w sposób graficzny na rysunku 4.32, przy czym w przypadku pierwszej, drugiej i trzeciej WWLN kolory żółty, niebieski i różowy w poszczególnych torach prądowych odpowiadają tym samym fazom.



**Rys. 4.32 Graficzne przedstawienie najlepszych konfiguracji przewodów fazowych w badanych WWLN otrzymanych w ramach analizy zwarciowej**

Analizując uzyskane wyniki analizy zwarciowej, ponownie obserwuje się, że druga WWLN wykazuje najmniejszą niesymetrię impedancyjną, która w tym przypadku uwidacznia się poprzez osiągnięte procentowe błędy względne przy wyznaczaniu prądów zwarcia z zastosowaniem modelu uproszczonego (symetrycznego). Dodatkowo dla analizowanego w sposób szczegółowy układu przewodów fazowych w tej linii (rys. 4.1b) przekroczenie błędu  $\pm 5\%$  następuje przy największej spośród innych WWLN długości linii – 126 km. Również bardzo dobre wyniki uzyskano dla trzeciej WWLN. Najgorszymi właściwościami ponownie cechuje się czwarta WWLN (tab. 11 – zał. CD,  $l_{\max} = 17$  km).

## 5 MOŻLIWOŚCI SYMETRYZACJI

Badania przeprowadzone i opisane w rozdziale 4 dowiodły złożoności zjawisk występujących w WWLN na skutek ich niesymetrii geometrycznej. W obrębie analiz wyróżniono najkorzystniejsze układy przewodów fazowych w torach prądowych WWLN, dla których uzyskano najniższe wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego  $E_{\max}$  (rozdz. 4.1.2), napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci o najniższym napięciu znamionowym  $U_0$  (rozdz. 4.2.2), najmniejszych wartości wskaźników niezrównoważenia  $\alpha_0$  i niesymetrii  $\alpha_2$  oraz układów (rozdz. 4.3.2), dla których osiągnięto najniższe wartości procentowych błędów  $\delta I_{zw\%}$ ,  $\delta I_{gal\%}$  przy stosowaniu modelu uproszczonego do opisu WWLN przy modelowaniu zwarc (rozdz. 4.4.2). Wyróżnione konfiguracje dla poszczególnych analiz nie są tożsame, a co za tym idzie zastosowanie któregośkolwiek z tych układów będzie prowadziło do osiągnięcia oczekiwanych wartości jedynie w jednym lub dwóch obszarach powodując często znaczne przekroczenia parametrów w pozostałych obszarach analiz.

Celem prowadzonych rozważań jest poszukiwanie takiego układu przewodów fazowych w torach prądowych WWLN, który daje zadowalające wyniki dla badanych wskaźników. Alternatywą do przedstawionej metody jest próba symetryzacji WWLN w celu zapewnienia wymaganych parametrów w każdym z badanych obszarów. Z tego względu przeprowadzono dwa rodzaje analiz:

- poszukiwanie najlepszego układu przewodów fazowych w torach prądowych badanych WWLN, który byłby kompromisem w zakresie uzyskiwanych parametrów kryterialnych osiągniętych w torze prądowym III,
- poszukiwanie najlepszych konfiguracji przeplotów przewodów fazowych badanego toru prądowego III analizowanych WWLN o ustalonym układzie przewodów fazowych zgodnym z rysunkiem 4.1, które zapewniają:
  - osiągnięcie najmniejszych wartości wskaźników asymetrii oraz procentowych błędów względnych przy szacowaniu prądów zwarcia w badanym torze prądowym i stałej długości linii wynoszącej 75 km,
  - zwiększenie maksymalnej długości WWLN, przy której nie zostaną przekroczone dopuszczalne wartości wskaźników asymetrii oraz procentowe błędy względne prądów zwarcia i prądów udziałów.

### 5.1 Wybór kompromisowego układu przewodów fazowych wynikającego z przeprowadzonych analiz niesymetrii

Poszukuje się konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych WWLN o długości 75 km bazując na wynikach analiz prowadzonych w rozdziałach 4.1÷4.4. Najlepszy układ przewodów fazowych WWLN charakteryzuje się następującymi cechami:

- osiąga się najmniejszą maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego  $E_{\max}$ ,
- osiąga się najmniejsze napięcie  $U_0$  pojawiające się w torze prądowym III na skutek niesymetrii pojemnościowej,
- otrzymuje się najmniejszą średnią arytmetyczną wskaźników niesymetrii i niezrównoważenia (dla długości WWLN równej 75 km),

- procentowe błędy względne wynikające z zastosowania uproszczonego modelu matematycznego do opisu niesymetrycznej WWLN o długości 75 km nie przekraczają dopuszczalnego poziomu  $\pm 5\%$ .

Dobór kompromisowego układu przewodów fazowych w torach prądowych rozważanych WWLN przeprowadzono zgodnie z następującym algorytmem:

- 1) w tabeli 5.1 zestawiono wielkości kryterialne: średnią arytmetyczną wskaźników nierównoważenia i niesymetrii  $\frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2}$ , średnią arytmetyczną wartości bezwzględnych błędów  $\delta I_{zw\%}$  i  $\delta I_{gal\%}$  (wskaźnik  $\overline{\delta I\%}$ ), informację czy dla rozważanego układu otrzymano minimalną wartość napięcia  $U_0$ ,
- 2) jeżeli dla rozważanego układu osiąga się minimalną wartość napięcia  $U_0$ , wówczas wyznacza wskaźnik  $O$  będący średnią ważoną zgodnie z zależnością (5.1):

$$O = \frac{w_a \cdot \frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2} + w_{z1} \cdot \overline{\delta I\%} + w_{z2} \cdot \max|\delta I\%|}{w_a + w_{z1} + w_{z2}}, \quad (5.1)$$

gdzie:

$w_a$  – waga dla kryterium związanego z analizą niesymetrii impedancyjnej,  $w_a = 2$ ,

$w_{z1}, w_{z2}$  – wagi dla kryterium związanego z analizą zwarciovą,  $w_{z1} = 1, w_{z2} = 1$ ,

- 3) w obrębie każdej analizowanej WWLN wybrano układy, dla których wskaźnik  $O$  jest najmniejszy.

Pełne wyniki analizy przedstawia tabela 13 (zał. CD), natomiast w tabeli 5.1 zaprezentowano wyselekcjonowane układy przewodów fazowych, dla których wartość wskaźnika  $O$  jest najmniejsza. Informacja o poziomie natężenia pola elektrycznego została zawarta w tabeli 5.1 jednak nie jest ona uwzględniana jako wartość kryterialna, ponieważ dla każdej z rozważanych sylwetek natężenie  $E_{max}$  nie przekracza wartości dopuszczalnej 10 kV/m.

Najlepsze układy przewodów fazowych w torach prądowych rozważanych WWLN zobrazowano na rysunku 5.1, zgodnie z tabelą 5.1.

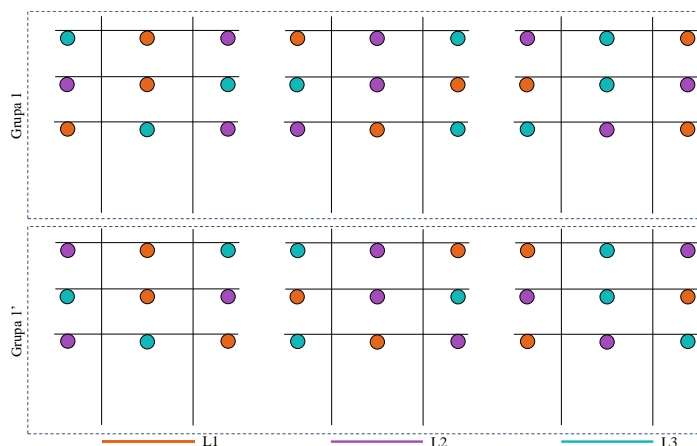
W każdej grupie znajdują się trzy odpowiadające sobie konfiguracje ułożenia poszczególnych przewodów fazowych tych WWLN. Dla pierwszych trzech WWLN otrzymano dwie grupy układów przewodów fazowych, które stanowią swoje zwierciadlane odbicia – grupa 1 i 1'. Dla czwartej i piątej WWLN uzyskano po jednej grupie układów.

Porównując badane WWLN, najlepsze właściwości wykazuje trzecia WWLN, dla której trzy z czterech decydujących wielkości kryterialnych są spełnione oraz dodatkowo spełniony jest warunek osiągnięcia przy tych układach najmniejszej wartości maksymalnego natężenia pola elektrycznego. Porównywalne i zarazem zadowalające wyniki otrzymuje się dla pierwszej i drugiej WWLN. Zdecydowanie najgorszymi właściwościami charakteryzuje czwarta WWLN, dla której nie osiągnięto wymaganego poziomu wskaźników asymetrii (średnia arytmetyczna wskaźników nierównoważenia i niesymetrii wynosi aż 3,91%). W celu obniżenia wartości tych parametrów należy zmniejszyć długość odcinka WWLN lub zastosować przeplot przewodów fazowych w tej linii.

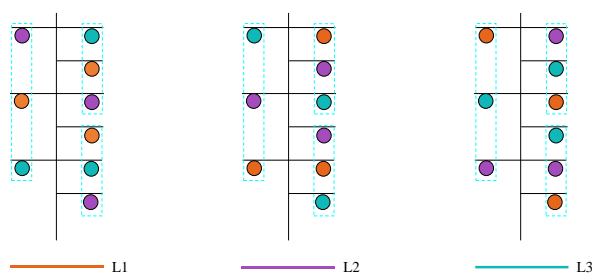
Tab. 5.1 Kompromisowe układy przewodów fazowych w torach prądowych analizowanych WWLN

Lp.	Układ faz toru prądowego			$\frac{\alpha_0 + \alpha_2}{2}$	$\overline{\delta I}_{\%}$	$\max  \delta I_{\%} $	$\min(U_0)$	$\min(E_{\max})$
	I	II	III	%	%	%	T/N	T/N
<b>Pierwsza WWLN (rys. 8.10a)</b>								
1.	ABC	ABC	ABC	2,88	2,79	7,84	N	N
35.	ABC	CBA	BAC	0,66	2,08	5,26	T	N
64.	BCA	BAC	ACB	0,66	2,08	5,26	T	N
96.	CAB	ACB	CBA	0,66	2,08	5,26	T	N
121.	ACB	CAB	ABC	0,66	2,08	5,26	T	N
153.	BAC	BCA	CAB	0,66	2,08	5,26	T	N
182.	CBA	ABC	BCA	0,66	2,08	5,26	T	N
<b>Druga WWLN (rys. 8.10b)</b>								
31.	ABC	CBA	ABC	1,03	2,27	3,32	T	N
35.	ABC	CBA	BAC	0,66	2,09	5,26	T	N
64.	BCA	BAC	ACB	0,66	2,09	5,26	T	N
96.	CAB	ACB	CBA	0,66	2,09	5,26	T	N
121.	ACB	CAB	ABC	0,66	2,09	5,26	T	N
153.	BAC	BCA	CAB	0,66	2,09	5,26	T	N
182.	CBA	ABC	BCA	0,66	2,09	5,26	T	N
<b>Trzecia WWLN (rys. 8.10c)</b>								
31.	ABC	CBA	ABC	1,03	2,61	4,58	T	T
35.	ABC	CBA	BAC	0,66	2,40	5,26	T	T
64.	BCA	BAC	ACB	0,66	2,40	5,26	T	T
96.	CAB	ACB	CBA	0,66	2,40	5,26	T	T
121.	ACB	CAB	ABC	0,66	2,40	5,26	T	T
153.	BAC	BCA	CAB	0,66	2,40	5,26	T	T
182.	CBA	ABC	BCA	0,66	2,40	5,26	T	T
<b>Czwarta WWLN (rys. 8.10d)</b>								
126.	ACB	CAB	CBA	3,91	1,44	3,54	T	N
154.	BAC	BCA	ACB	3,91	1,44	3,54	T	N
181.	CBA	ABC	ABC	3,52	2,74	7,06	N	N
185.	CBA	ABC	BAC	3,91	1,44	3,54	T	N
<b>Piąta WWLN (rys. 8.10e)</b>								
36.	ABC	CBA	CBA	1,57	1,71	5,05	T	N
123.	ACB	CAB	CAB	1,03	1,60	4,11	T	N
152.	BAC	BCA	BCA	1,03	1,60	4,11	T	N
181.	CBA	ABC	ABC	1,03	1,60	4,11	T	N

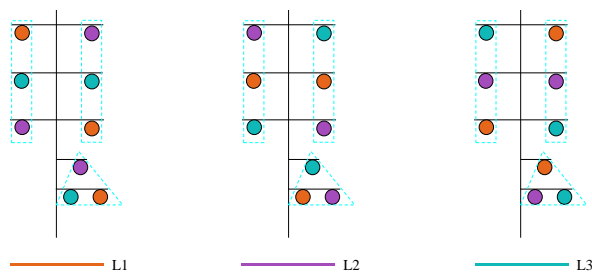
a) pierwsza, druga i trzecia WWLN



b) czwarta WWLN



c) piąta WWLN



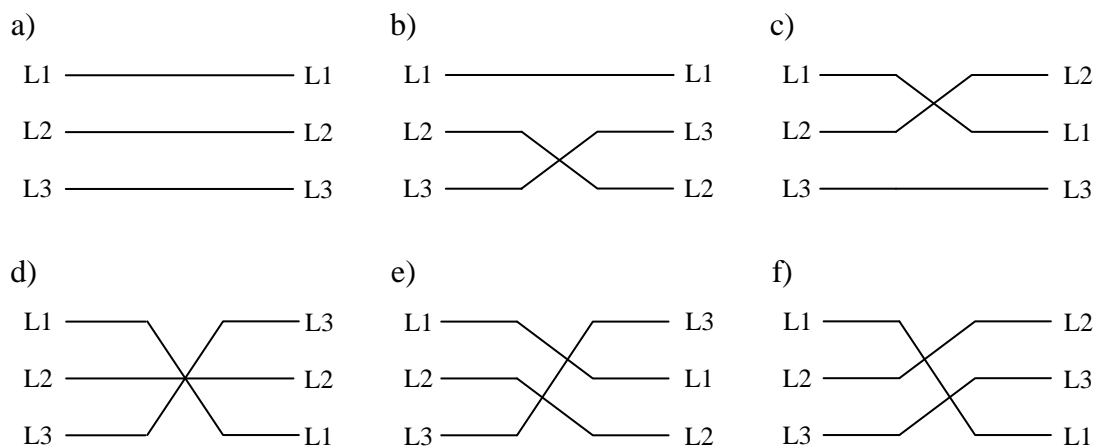
Rys. 5.1 Graficzne przedstawienie kompromisowych układów przewodów fazowych w torach prądowych WWLN zgodnie z tabelą 5.1

## 5.2 Symetryzacja WWLN

Kolejną ścieżką prowadzącą do ograniczenia skutków niesymetrii geometrycznej WWLN wpływająca na badane wielkości kryterialne jest pełna lub częściowa symetryzacja takiej linii. Symetryzacja jest rozumiana jako wykonanie transpozycji (inaczej przeplotów) przewodów fazowych w obrębie torów prądowych WWLN, tj. zmiany położenia tych przewodów względem siebie, a w efekcie również względem powierzchni ziemi i innych przewodów fazowych należących do pozostałych torów prądowych. Wykonanie częściowej symetryzacji linii napowietrznej będzie prowadziło do zbliżania się do „ideału” czyli do linii w pełni symetrycznej opisywanej modelem symetrycznym (rozd. 3.1.3, 3.2.4, 8.1.4).

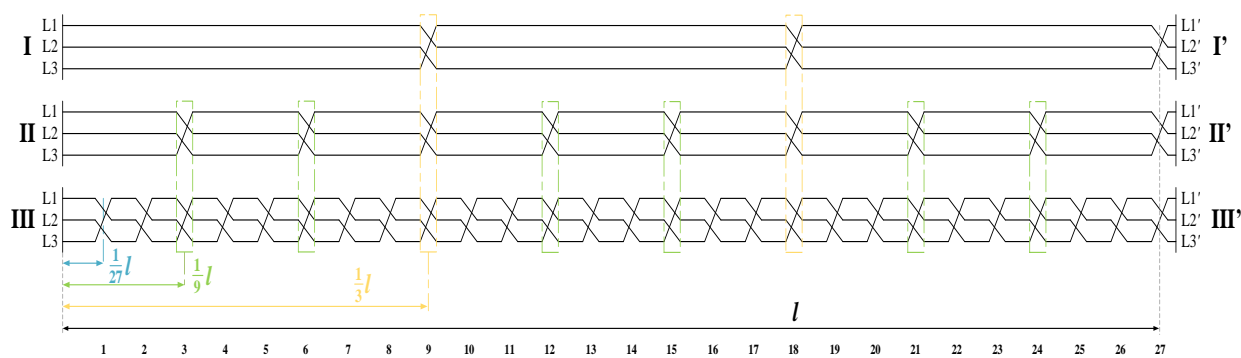


Naturalną symetrię fazową jednotorowej linii napowietrznej uzyskuje się w przypadku, gdy przewody linii są prowadzone w układzie trójkąta równobocznego, natomiast dla linii dwutorowej, gdy przewody tej linii tworzą układ sześciokąta foremnego. Symetrię fazową linii napowietrznych o innym układzie przewodów uzyskuje się poprzez wykonanie transpozycji jej przewodów fazowych. Na rysunku 5.2 przedstawiono ilustracje sześciu rodzajów przeplotów możliwych do wykonania w obrębie każdego toru prądowego.



**Rys. 5.2** Rodzaje transpozycji przewodów fazowych w wybranym torze prądowym WWLN a) brak przeplotu; b), c), d) przeplot pary przewodów; e), f) przeplot wszystkich przewodów [54]

W celu uzyskania pełnej symetrii fazowej trójtorowej linii napowietrznej należy wykonać 27 przeplotów typu e lub f (rys. 5.2), zgodnie z rysunkiem 5.3.



**Rys. 5.3** Pełny przeplot wykonany na linii trójtorowej

Wykonanie pełnej symetryzacji WWLN jest trudne do realizacji ze względów technicznych oraz ekonomicznych. W szczególności dla linii napowietrznych o niewielkich długościach (kilkunastu kilometrów), wykonanie ich pełnej symetryzacji jest niemożliwe. Z wymienionych przyczyn analizie poddano możliwość wykonania przeplotu toru prądowego III (tor o najniższym napięciu znamionowym), który jest najbardziej narażony na zjawiska wynikające z niesymetrii impedancyjnej. Symetryzacji badanego toru prądowego dokonano dla dwóch przypadków:

- w połowie długości WWLN ( $1/2 l$ ) – przeplot pojedynczy,
- w  $1/3$  długości i  $2/3$  długości WWLN – przeplot podwójny.

Należy zaznaczyć, że redukcja wpływu niesymetrii pojemnościowej na badany tor prądowy III nie wystąpi na skutek przeplotu tego toru prądowego. W celu zmniejszenia wartości pojawiającego się napięcia  $U_0$  w tym torze prądowym konieczne jest wykonanie przeplotów w torach o napięciach wyższych [34]. Analiza piątej WWLN (rys. 4.1e) pokazuje, że możliwa jest znaczna redukcja napięcia zerowego w badanym torze prądowym już przy przeplotcie w połowie długości linii, wówczas napięcie zerowe obniża się z wartości 7,7 kV do wartości 3,7 kV [36, 49].

Analizy przeprowadzone w rozdziałach 4.3 oraz 4.4 pozwoliły na określenie maksymalnych długości linii, przy których nie następuje przekroczenie granicznych wartości wskaźników asymetrii oraz procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć. Celem niniejszej analizy było:

- wyznaczenie wskaźników asymetrii oraz procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć w torze prądowym III przy ustalonej długości WWLN wynoszącej 75 km, poszukując najkorzystniejszego typu przeplotu pozwalającego na największe ograniczenie wspomnianych wielkości w tym torze;
- wyznaczenie wskaźników asymetrii oraz procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć w torze prądowym III przy maksymalnej długości WWLN wynikającej z analiz prowadzonych w rozdziałach 4.3 i 4.4, gdzie w torze prądowym III dokonuje się transpozycji przewodów fazowych poszukując najkorzystniejszego typu przeplotu, przy zastosowaniu, którego możliwe jest zwiększenie długości WWLN bez przekroczenia wielkości granicznych w tym torze.

Przeanalizowano wszystkie możliwe konfiguracje przeplotów w torze prądowym III. Sposób kodowania tych konfiguracji przedstawiono w załączniku 8.2.4 – tabela 8.3. Wnioski dotyczące skutków zastosowania przeplotów w torze prądowym III badanych WWLN będą odnoszone do wyselekcjonowanych, najlepszych ich typów.

### 5.2.1 Wpływ zastosowania przeplotów przewodów fazowych w torze prądowym III przy stałej długości linii

W pierwszej kolejności wyznaczono wskaźniki niezrównoważenia i niesymetrii w torze prądowym III badanych WWLN (rys. 4.1) przy stałej długości linii 75 km. W tabeli 5.2 przedstawiono wybrane, najlepsze przeploty wykonane w torze prądowym III, które pozwoliły na największe ograniczenie wartości wskaźników asymetrii. Pełne zestawienie znajduje się w załączniku CD – tabela 14.

Wykonanie przeplotu toru III pierwszej badanej WWLN (rys. 4.1a) w połowie jej długości nie wpłynęło na polepszenie uzyskiwanych wartości wskaźników asymetrii. Przeplot podwójny pozwolił na niewielką redukcję wskaźnika niezrównoważenia i eliminację wskaźnika niesymetrii. Dla drugiej (rys. 4.1b) i trzeciej (rys. 4.1c) WWLN osiągnięto poprawę obydwu wskaźników asymetrii i tylko dla tych dwóch linii uzyskano wartości tych wskaźników mieszczące się w dopuszczalnej granicy ( $0 \div 1$ )%. Dla pierwszej (rys. 4.1a), czwartej (rys. 4.1d) i piątej (rys. 4.1e) WWLN przeplot toru prądowego III praktycznie nie wpłynął na polepszenie się tego wskaźnika (tab. 5.2, zał. CD – tab. 14).

**Tab. 5.2 Wybrane wyniki analizy wpływu zastosowania przeplotów toru prądowego III na wartości wskaźników asymetrii badanych WWLN o długości  $l = 75$  km**

Rozważana sylwetka	Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
<b>Pierwsza</b> (rys. 4.1a)	Bez przeplotu	-	5,39	0,37
	Przeplot pojedynczy	4	5,39	0,37
	Przeplot podwójny	35, 42	5,28	0,00
<b>Druga</b> (rys. 4.1b)	Bez przeplotu	-	1,02	1,03
	Przeplot pojedynczy	3	0,70	0,99
	Przeplot podwójny	35, 42	0,67	0,00
<b>Trzecia</b> (rys. 4.1c)	Bez przeplotu	-	1,02	1,03
	Przeplot pojedynczy	3	0,70	0,99
	Przeplot podwójny	35, 42	0,67	0,00
<b>Czwarta</b> (rys. 4.1d)	Bez przeplotu	-	4,97	2,06
	Przeplot pojedynczy	4	5,23	1,08
	Przeplot podwójny	35, 42	5,06	0,00
<b>Piąta</b> (rys. 4.1e)	Bez przeplotu	-	2,55	0,59
	Przeplot pojedynczy	5	2,65	0,17
	Przeplot podwójny	35, 42	2,66	0,00

Pełny przeplot (lp. 35, 42 – tab. 8.3, zał. CD – tab. 14) w badanym torze prądowym pozwala na całkowitą eliminację wskaźnika niesymetrii w tym torze prądowym, lecz ma ograniczony wpływ w kształtowaniu wartości wskaźnika niezrównoważenia. W celu eliminacji wskaźnika  $\alpha_0$ , konieczne jest wykonanie przeplotów w torach o napięciach wyższych, co jest analogicznym podejściem do ograniczenia wpływu niesymetrii pojemnościowej opisywanej przez napięcie kolejności zerowej  $U_0$ .

Przeplot toru prądowego III w największym stopniu wpływa na wartość wskaźnika  $\alpha_0$  dla WWLN charakteryzujących się równomiernym rozłożeniem torów prądowych względem siebie, co ma miejsce dla drugiej (rys. 4.1b) i trzeciej (rys. 4.1c) WWLN. Dla tych sylwetek, możliwe jest zachowanie dopuszczalnych wartości wskaźników niesymetrii przy zastosowaniu przeplotu pary przewodów.

Biorąc pod uwagę możliwość redukcji wskaźnika  $\alpha_2$ , przeplot wykonany w połowie długości linii daje bardzo dobre wyniki dla piątej (redukcja z poziomu 0,59% do 0,17%) i czwartej WWLN, dla której wskaźnik ten maleje dwukrotnie.

Kolejna analiza dotyczyła określenia skutków zastosowania przeplotu w III torze prądowym WWLN w zakresie analizy zwarciowej, tj. szacowania prądów zwarcia i udziałów tych prądów z punktu widzenia badanego toru prądowego III. W tabeli 5.3 zaprezentowano wybrane zestawy wyników analizy zwarciowej badanych WWLN. Przyjęto długość linii wynoszącą 75 km, poszukując najlepszej konfiguracji przeplotów, która pozwoli na największą redukcję procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć w badanym torze prądowym. Pełne wyniki tej analizy znajdują się w załączniku CD – tabele 15÷19.

**Tab. 5.3 Wybrane wyniki analizy wpływu zastosowania przeplotów toru prądowego III na wartości procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć przy długości WWLN  $l = 75$  km**

Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	Procentowe błędy względne przy zwarciu trójfazowym						Procentowe błędy względne przy zwarciu jednofazowym					
		w miejscu zwarcia $\delta_{zw}\%$ , %			od gałęzi toru III $\delta_{gal}\%$ , %			w miejscu zwarcia $\delta_{zw}\%$ , %			od gałęzi toru III $\delta_{gal}\%$ , %		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
<b>Sylwetka pierwsza (rys. 4.1a)</b>													
Bez przeplotu	-	-1,05	0,55	-0,11	-3,95	-0,42	7,84	-2,53	2,14	0,18	-5,50	2,93	6,31
Przeplot pojedynczy	6	-1,10	0,22	-1,04	-3,99	-0,01	3,85	-2,49	1,60	0,11	-5,01	0,93	5,64
Przeplot podwójny	37	-1,17	0,09	-1,37	-4,27	0,00	2,45	-2,50	1,40	0,08	-5,07	0,20	5,32
<b>Sylwetka druga (rys. 4.1b)</b>													
Bez przeplotu	-	-3,05	-0,22	-3,32	-2,04	-0,50	-3,04	-2,39	1,95	-2,39	-2,54	3,27	-2,54
Przeplot pojedynczy	4	-1,19	-0,22	-1,63	2,92	-0,50	1,67	-1,62	1,95	-1,62	1,09	3,27	1,09
Przeplot podwójny	35, 42	-1,89	-0,75	-2,06	0,03	0,18	-0,22	-1,64	1,25	-1,64	0,81	0,69	0,81
<b>Sylwetka trzecia (rys. 4.1c)</b>													
Bez przeplotu	-	-4,32	-1,53	-4,58	-2,04	-0,50	-3,04	-2,97	1,35	-2,97	-2,14	3,70	-2,14
Przeplot pojedynczy	4	-2,48	-1,53	-2,92	2,92	-0,50	1,67	-2,20	1,35	-2,20	1,50	3,70	1,50
Przeplot podwójny	35, 42	-3,17	-2,05	-3,35	0,03	0,18	-0,22	-2,22	0,65	-2,22	1,22	1,10	1,22
<b>Sylwetka czwarta (rys. 4.1d)</b>													
Bez przeplotu	-	-2,00	-2,15	-2,44	-7,06	-2,50	-3,36	-1,94	-0,24	-1,31	-5,23	-1,91	-2,70
Przeplot pojedynczy	4	0,65	-2,07	-0,86	2,23	-2,91	-0,47	-0,97	-0,23	-0,03	0,49	-1,99	0,93
Przeplot podwójny	35, 42	0,00	-1,20	-1,16	-0,13	0,84	-0,80	-1,06	0,07	-0,33	-0,14	0,18	-0,68
<b>Sylwetka piąta (rys. 4.1e)</b>													
Bez przeplotu	-	-1,07	-0,88	-1,12	5,05	-1,61	-4,55	-1,35	0,54	-0,78	1,40	-2,14	0,00
Przeplot pojedynczy	5	-1,26	-0,97	-1,05	3,21	-2,65	-2,80	-1,35	0,91	-1,19	1,01	-0,13	-2,15
Przeplot podwójny	31	-1,33	-1,00	-1,03	2,61	-3,03	-2,24	-1,37	1,03	-1,33	0,88	0,52	-2,87

Przeplot w torze prądowym III badanych WWLN znacząco wpłynął na wartości procentowych błędów względnych. Już częściowa symetryzacja badanego toru prądowego pozwoliła na znaczne zbliżenie się modelu niesymetrycznej WWLN do modelu uproszczonego, czego wynikiem są omawiane procentowe błędy względne. Taka sytuacja ma miejsce dla niemal wszystkich badanych WWLN (2÷5). W przypadku pierwszej WWLN nie osiągnięto wymaganego poziomu błędów przy szacowaniu prądów udziałów od toru objętego zwarciami (w fazach L1 i L3), lecz ograniczono maksymalny błąd z poziomu 7,84% do 3,85% (przy przeplocie w połowie linii) i 2,45% (przy podwójnym przeplocie). Najlepsza konfiguracja przeplotów w tej WWLN skutkuje mniejszym maksymalnym błędem tj. 5,64% przy pojedynczym przeplocie i 5,32% przy podwójnym przeplocie (przed przeplotem 7,84%). Dla drugiej, trzeciej i czwartej WWLN już przeplot pary torów pozwala na ograniczenie omawianych błędów do dopuszczalnego poziomu. Dodatkowo w tych sylwetkach najlepszy efekt redukcji błędów dał pełny przeplot toru prądowego III (lp. 35, 42).

Analizując pełne wyniki procentowych błędów względnych dla drugiej i trzeciej WWLN (tab. 16÷17, zał. CD), należy zauważyć, że zastosowanie któregośkolwiek układu przeplotów w tych liniach nie skutkuje przekroczeniem dopuszczalnych błędów  $\pm 5\%$ .

Najlepsze przeploty wyselekcjonowane przy analizie niesymetrii impedancyjnej (tab. 5.2) w przypadku WWLN od drugiej do piątej, również nie skutkują przekroczeniem procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć (tab. 16÷19).

#### 5.2.2 Wpływ zastosowania przeplotów przewodów fazowych toru prądowego III na możliwość zwiększenia długości linii

Kolejne dwie analizy skupiały się na poszukiwaniu nowej maksymalnej długości WWLN, przy której nie zostały przekroczone dopuszczalne wartości wskaźników asymetrii i procentowych błędów względnych. Długością początkową od której rozpoczynają się analizy wpływu zastosowania przeplotu na badane wskaźniki są długości linii wynikające z analiz przeprowadzonych w rozdziałach 4.3, 4.4 określono dopuszczalne długości WWLN (tab. 4.9, tab. 4.12). Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 5.4 dla wskaźników asymetrii oraz w tabeli 5.5 dla analizy zwarciowej.

Pod względem osiąganych wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii, dla czwartej i piątej WWLN zastosowanie przeplotów nie pozwoliło na zwiększenie maksymalnej długości linii. Jedynie w przypadku pierwszej WWLN obydwa rodzaje przeplotu (pojedynczy i podwójny) skutkowały obniżeniem wartości wskaźników asymetrii poniżej 1% co pozwoliło na wzrost długości linii o 1 km (z 12 km na 13 km), natomiast dla czwartej WWLN wskaźniki mieszczą się w dopuszczalnym zakresie jedynie przy dokonaniu przeplotu w  $1/3l$  oraz  $2/3l$  co również pozwoliłoby na zwiększenie długości tej linii o 1 km. Ponownie druga i trzecia WWLN charakteryzują się największą podatnością na działanie przeplotów, które skutkują możliwością wydłużenia linii o 11 km w przypadku przeplotu pary przewodów w połowie długości linii, z kolei wykonanie pełnego przeplotu toru prądowego III, pozwala na wydłużenie tych WWLN do 150 km. Dla takiej długości tych linii, wskaźnik niesymetrii jest wyzerowany, a wskaźnik niezrównoważenia osiąga wartość 0,89%, co pozwala na dalsze wydłużanie linii. Analizy związane z wydłużaniem linii zakończono na długości 150 km, która jest granicą przedziału badanych długości WWLN. Dodatkowo, dalsze wydłużanie linii, z uwagi na zastosowany model stałimpedancyjny, mogłoby dawać niewiarygodne wyniki co do rzeczywistej możliwości doboru maksymalnej długości linii z uwagi na wskaźniki asymetrii.

**Tab. 5.4 Wyniki poszukiwania nowej, maksymalnej długości WWLN obciążonej połową prądów dopuszczalnych długotrwale, dla której nie przekracza się wskaźników asymetrii, na skutek zastosowania przepletów w torze prądowym III**

Badana WWLN	Długość linii bez przepletu, km	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	Lp. najlepszego przepletu wg tab. 8.3	Nowa długość linii, km	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
Pierwsza	12	0,97	0,06	5	13	0,99	0,13
	13	1,04	0,06	31	13	0,98	0,17
Druga	72	1,00	0,99	2	84	0,89	1,00
	73	1,01	1,00	35, 42	150	0,87	0,00
Trzecia	72	1,00	0,99	2	84	0,89	1,00
	73	1,01	1,00	35, 42	150	0,87	0,00
Czwarta	12	1,00	0,34	2	13	1,02	0,34
	13	1,07	0,37	15, 39	13	1,00	0,20
Piąta	30	1,00	0,24	3	31	1,02	0,15
	31	1,04	0,25	21	31	1,03	0,14

W przypadku analizy zwarciowej, wykonanie przepletu, nawet częściowego, pozwoliło na zwiększenie maksymalnych długości wszystkich badanych WWLN (tab. 5.5). Dla drugiej, czwartej i piątej badanej WWLN możliwe było wydłużenie linii do wartości 150 km przy zachowaniu dopuszczalnego poziomu błędu. W przypadku pierwszej WWLN przy zastosowaniu przepletów toru III możliwe jest zwiększenie długości tej linii o 31 km (z 39 km na 70 km), natomiast dla trzeciej WWLN wzrost długości linii przy zachowaniu dopuszczalnych błędów przy modelowaniu zwarć osiągnął 18 km gdy zastosowano przeplet pojedynczy oraz 53 km gdy zastosowano przeplet podwójny.

**Tab. 5.5 Poszukiwanie nowej, maksymalnej długości WWLN, dla której nie przekracza się wartości dopuszczalnych błędów względnych przy modelowaniu zwarć, na skutek zastosowania przepletów w torze prądowym III**

	Długość linii, km	Procentowe błędy względne przy zwarciu trójfazowym						Procentowe błędy względne przy zwarciu jednofazowym					
		w miejscu zwarcia $\delta_{zw}, \%$			od gałęzi toru III $\delta_{gal}, \%$			w miejscu zwarcia $\delta_{zw}, \%$			od gałęzi toru III $\delta_{gal}, \%$		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Pierwsza WWLN (rys. 4.1a)													
Bez przepletu	39	-0,80	0,54	0,26	-2,44	-0,52	4,98	-2,13	1,60	0,57	-3,46	1,81	3,36
Bez przepletu	40	-0,81	0,54	0,25	-2,49	-0,52	5,07	-2,15	1,62	0,56	-3,52	1,84	3,44

Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	Nowa długość linii, km												
Przeplot pojedynczy	6	66	-1,05	0,27	-0,91	-3,64	0,05	3,48	-2,42	1,50	0,21	-4,60	0,89	4,98
Przeplot podwójny	37	70	-1,14	0,12	-1,30	-4,07	0,06	2,30	-2,46	1,36	0,14	-4,84	0,23	4,98
<b>Druga WWLN (rys. 4.1b)</b>		<b>Długość linii, km</b>												
Bez przeplotu		126	-4,13	-0,58	-4,36	-3,27	-0,03	-4,37	-2,92	2,30	-2,92	-3,44	5,00	-3,44
Bez przeplotu		127	-4,14	-0,58	-4,38	-3,29	-0,02	-4,40	-2,93	2,31	-2,93	-3,46	5,03	-3,46
Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	Nowa długość linii, km												
Przeplot pojedynczy	3	150	-4,43	-1,45	-4,65	-4,83	-0,49	-4,57	-2,73	1,81	-3,09	-1,24	1,62	-3,78
Przeplot podwójny	35, 42	150	-2,92	-1,55	-3,18	0,24	-0,15	-0,11	-2,28	1,65	-2,28	2,40	0,77	2,40
<b>Trzecia WWLN (rys. 4.1c)</b>		<b>Długość linii, km</b>												
Bez przeplotu		86	-4,73	-1,75	-4,99	-2,33	-0,40	-3,37	-3,15	1,40	-3,15	-2,26	4,19	-2,26
Bez przeplotu		87	-4,76	-1,77	-5,02	-2,35	-0,40	-3,40	-3,17	1,40	-3,17	-2,27	4,23	-2,27
Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	Nowa długość linii, km												
Przeplot pojedynczy	4	104	-3,26	-2,09	-3,73	3,47	-0,24	2,02	-2,60	1,46	-2,60	2,51	4,99	2,51
Przeplot podwójny	35, 42	139	-4,76	-3,43	-5,00	0,21	-0,11	-0,13	-3,00	0,79	-3,00	3,22	1,81	3,22
<b>Czwarta WWLN (rys. 4.1d)</b>		<b>Długość linii, km</b>												
Bez przeplotu		17	-1,49	-1,60	-1,20	-4,98	-2,05	1,01	-2,00	-0,22	-0,15	-2,68	-0,94	-0,22
Bez przeplotu		18	-1,51	-1,63	-1,25	-5,08	-2,10	0,94	-2,01	-0,23	-0,18	-2,76	-0,98	-0,25
Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	Nowa długość linii, km												
Przeplot pojedynczy	4	149	0,86	-2,48	-1,48	4,99	-2,55	-3,44	-0,39	-0,21	-1,02	3,57	-1,98	-1,84
Przeplot podwójny	31	150	-0,67	-2,89	-0,43	-3,02	-2,19	0,27	-1,00	-0,32	-0,76	-2,51	-0,10	-0,38
<b>Piąta WWLN (rys. 4.1e)</b>		<b>Długość linii, km</b>												
Bez przeplotu		73	-1,05	-0,86	-1,10	4,99	-1,58	-4,52	-1,32	0,52	-0,78	1,40	-2,11	-0,04
Bez przeplotu		74	-1,06	-0,87	-1,11	5,02	-1,59	-4,54	-1,33	0,53	-0,78	1,40	-2,13	-0,02
Rodzaj przeplotu	Lp. najlepszego przeplotu wg tab. 8.3	Nowa długość linii, km												
Przeplot pojedynczy	5	150	-1,82	-1,51	-1,40	3,71	-4,12	-2,80	-2,16	1,33	-1,33	0,84	-0,01	-2,24
Przeplot podwójny	20, 32	150	-2,01	-1,52	-1,31	2,82	-3,36	-3,32	-2,17	1,11	-1,19	0,82	-1,96	-0,89

Wybrane konfiguracje przeplotów, niewymienione w tabelach 5.4 i 5.5, skutkowały możliwością wydłużenia linii przy zachowaniu dopuszczalnych wartości analizowanych wskaźników, lecz efekt ten był gorszy. Warto dodać, że dla przeplotów proponowanych w tabeli 5.4 (związanych ze wskaźnikami asymetrii), procentowe błędy względne prądów zwarcia oraz prądów udziałów od toru objętego zwarcie wyznaczone w ramach analizy zwarciowej mieściły się w zakresie  $\pm 5\%$ .

Biorąc pod uwagę wyniki analiz prezentowane w tabelach 5.2 i 5.3 oraz 5.4 i 5.5, a także obserwacje i wnioski wynikające z analiz przedstawionych w rozdziale 4, najgorszymi właściwościami z uwagi na wprowadzane niesymetrie charakteryzuje się czwarta WWLN (rys. 4.1d), natomiast najkorzystniejszymi parametrami spośród badanych WWLN charakteryzuje się druga WWLN (rys. 4.1b), stąd została ona wybrana do ostatniego etapu analizy.



## 6 PRACA WWLN W SYSTEMIE PRZESYŁOWYM

W finalnym etapie pracy rozważono pracę wybranych trójtorowych linii wielonapięciowych w niesymetrycznym otoczeniu sieciowym. Skupiono się na osiąganych wskaźnikach asymetrii w najbliższym otoczeniu WWLN, z tego względu do dalszych analiz wybrano układy przewodów fazowych w torach prądowych tych WWLN, które odznaczają się najlepszym odwzorowaniem prądów zwarcia (tab. 4.13, rys. 4.32).

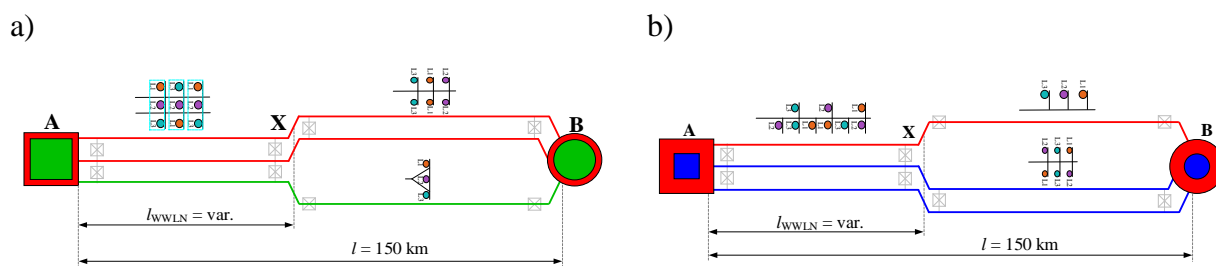
Przeprowadzono trzy scenariusze analiz, w których badano wskaźniki niezrównoważenia i niesymetrii w wybranych węzłach otoczenia sieciowego:

- współpraca WWLN z liniami tradycyjnymi (jednotorowymi i dwutorowymi jednonapięciowymi), gdzie bada się wpływ udziału WWLN w ciągu liniowym,
- współpraca WWLN z liniami tradycyjnymi (jednotorowymi i dwutorowymi jednonapięciowymi), które stanowią odejścia (odgałężenia) w wybranych torach prądowych WWLN,
- praca WWLN w rzeczywistej sieci przesyłowej, będącej rozbudowanym niesymetrycznym otoczeniem sieciowym.

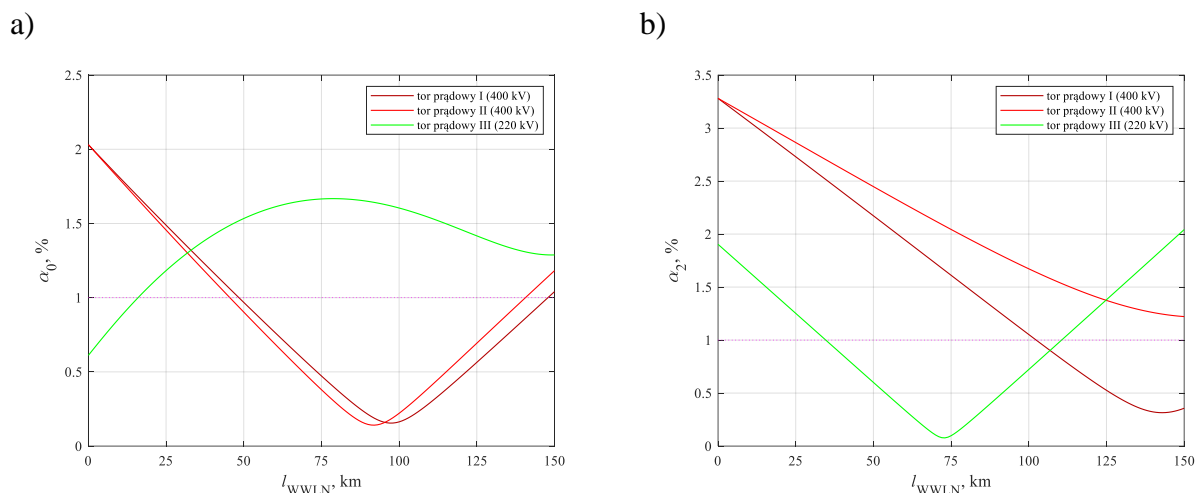
### 6.1 WWLN jako fragmenty tradycyjnych ciągów liniowych

Rozważono wpływ współpracy dwóch trójtorowych, dwunapięciowych linii napowietrznych stanowiących fragmenty tradycyjnych ciągów liniowych. Jest to przypadek bardzo często występujący w praktyce, gdzie np. linia trójtorowa rozdziela się na linię dwutorową i jednotorową. Do analiz przyjęto drugą i czwartą WWLN (rys. 4.1b,d), ponieważ w toku poprzednich analiz zostały one zidentyfikowane jako kolejno najlepsza i najgorsza sylwetka z uwagi na wprowadzane niesymetrie. Celem prowadzonej analizy jest zbadanie wpływu udziału WWLN o różnym stopniu niesymetrii geometrycznej w całkowitej długości ciągów liniowych zbudowanych jako tradycyjne linie jednotorowe i dwutorowe, jednonapięciowe.

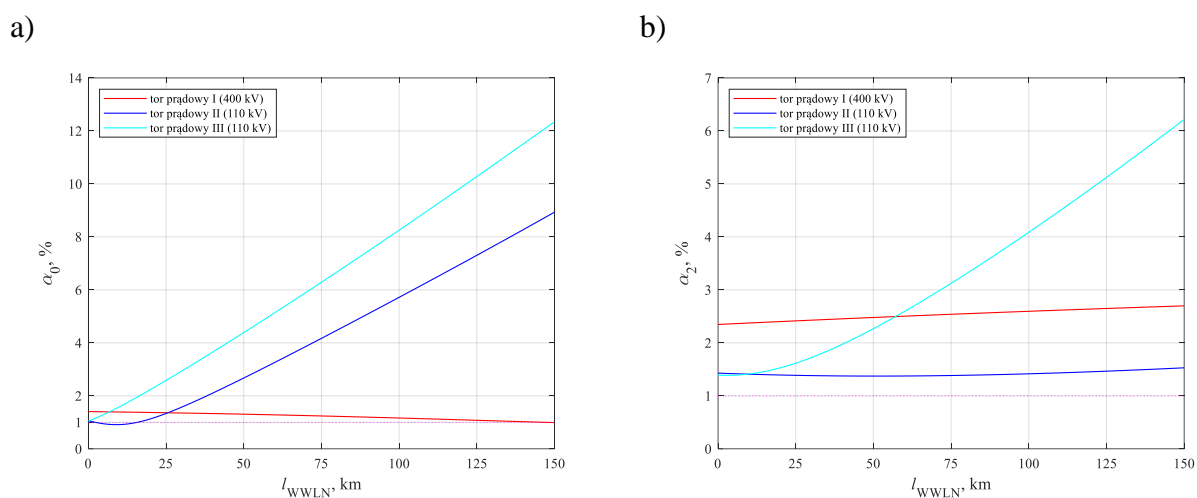
Poddane analizie układy sieciowe przedstawiono na rysunku 6.1. Ciągi liniowe relacji A-B, zasilono w stacji A i wyznaczano wskaźniki niezrównoważenia i niesymetrii na końcu tej relacji, tj. w stacji B. Linie obciążono połową mocy dopuszczalnych tych linii (tab. 1.2). Czynnikiem różnicującym prowadzone analizy była długość odcinka wielotorowego, wielonapięciowego, a więc udział WWLN w sumarycznej długości ciągu liniowego. Długość odcinka wielotorowego, wielonapięciowego  $l_{\text{WWLN}}$  zmieniano w zakresie  $(0 \div l)$  km, gdzie  $l$  to sumaryczna długość ciągu liniowego ( $l = 150$  km). Wyniki analiz przedstawiono na rysunkach 6.2 i 6.3.



Rys. 6.1 Układy poddane analizie wpływu udziału WWLN w tradycyjnych ciągach liniowych



**Rys. 6.2** Wskaźniki asymetrii wyznaczone w stacji B w funkcji udziału drugiej WWLN ( $2 \times 400 + 220$  kV) w sumarycznej długości ciągu liniowego, gdzie  $l_{WWLN} = 0$  km – ciąg liniowy zbudowany wyłącznie z dwóch linii tradycyjnych jedno- i dwutorowej,  $l_{WWLN} = 150$  km – ciąg liniowy zbudowany jako WWLN



**Rys. 6.3** Wskaźniki asymetrii wyznaczone w stacji B w funkcji udziału czwartej WWLN ( $400 + 2 \times 110$  kV) w sumarycznej długości ciągu liniowego, gdzie  $l_{WWLN} = 0$  km – ciąg liniowy zbudowany wyłącznie z dwóch linii tradycyjnych jedno- i dwutorowej,  $l_{WWLN} = 150$  km – ciąg liniowy zbudowany jako WWLN

Udział drugiej WWLN ( $2 \times 400 + 220$  kV) w ciągu liniowym z dwutorową linią 400 kV prowadzoną na konstrukcji Z52 oraz jednotorową linią 220 kV na słupach H52 w znaczny sposób wpływa na kształtowanie się wskaźników asymetrii w analizowanym układzie (rys. 6.1a). Wskaźniki nierównoważenia i niesymetrii osiągają niższe wartości w torach 400 kV wraz ze zwiększaniem się udziału WWLN. Wskaźniki niesymetrii w torach 400 kV osiągają najniższe wartości, w przypadku dużego udziału WWLN. Można wyróżnić procentowe przedziały długości odcinka WWLN, który nie powoduje przekroczenia wartości dopuszczalnej poszczególnych wskaźników asymetrii, przykładowo gdy WWLN stanowi od 30% do 93% długości ciągu liniowego, wówczas wskaźniki  $\alpha_0$  w torach prądowych 400 kV osiągają wartości poniżej 1%. Wskaźnik  $\alpha_0$  w torze prądowym III (220 kV) wzrasta wraz ze zwiększaniem się udziału WWLN w ciągu liniowym, osiągając maksimum, gdy WWLN stanowi około 50% długości ciągu liniowego, a następnie zmniejsza się, ostatecznie ( $l_{WWLN} = l$ ) uzyskując około dwukrotnie większą wartość niż w przypadku prowadzenia

dwoch linii jednonapięciowych ( $l_{\text{WWLN}} = 0$ ). Wskaźnik niesymetrii w torze prądowym III osiąga najniższą wartość, gdy WWLN stanowi około 50% długości ciągu liniowego. Zwiększanie długości odcinka wielotorowego, wielonapięciowego powyżej 73 km powoduje ponowny wzrost wskaźnika niesymetrii w torze o najniższym napięciu znamionowym.

W drugim z analizowanych układów czwarta WWLN stanowi fragment ciągu liniowego złożonego z linii jednotorowej 400 kV prowadzonej na słupach Y25 oraz linii dwutorowej 110 kV prowadzonej na konstrukcji wsporczej O24, zgodnie z rysunkiem 6.1b. W tym przypadku już niewielki udział WWLN charakteryzującej się dużym stopniem niesymetrii geometrycznej przekłada się na znaczne zwiększenie wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii w torze prądowym III, tj.  $\alpha_0 = 12,35\%$ ,  $\alpha_2 = 6,22\%$ , gdy  $l_{\text{WWLN}} = l$ . Znaczne wartości wskaźnika niezrównoważenia otrzymano również dla toru prądowego II, gdzie wzrost udziału WWLN w ciągu liniowym spowodował wzrost wartości wskaźnika do poziomu 8,93% dla  $l_{\text{WWLN}} = l$ . W torze prądowym I (400 kV) udział WWLN nie powoduje znaczących zmian wskaźników asymetrii, podobna tendencja występuje w torze prądowym II w przypadku wskaźnika niesymetrii  $\alpha_2$ .

Ponownie potwierdza się, że tor prądowy III jest szczególnie narażony na skutki niesymetrii impedancyjnej WWLN. Wraz ze wzrostem udziału odcinka wielotorowego, wielonapięciowego największe wskaźniki asymetrii osiąga się właśnie w tym torze prądowym.

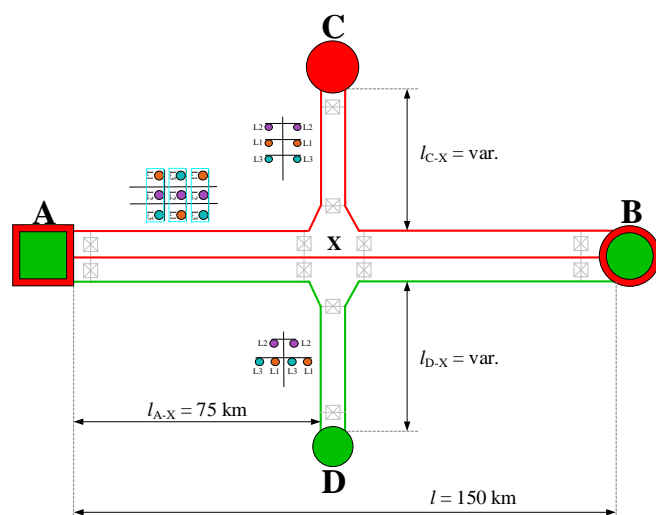
Odpowiedni dobór układu torów prądowych oraz konfiguracja przewodów fazowych w tych torach rzutuje na uzyskiwane wartości wskaźników niesymetrii na końcu torów prądowych współpracujących szeregowo z WWLN. Dla przedstawionej konfiguracji ciągu liniowego współpracującego z drugą WWLN (rys. 6.1a) dostrzega się pozytywny wpływ WWLN objawiający się zmniejszeniem wskaźników asymetrii w torach prądowych o napięciach wyższych, a także możliwość redukcji wskaźnika niesymetrii  $\alpha_2$  w torze prądowym III, gdy udział WWLN w ciągu liniowym wynosi około 50%.

Z uwagi na najmniejsze skutki niesymetrii impedancyjnej drugiej WWLN (rys. 4.1b), sylwetka ta została zakwalifikowana do dalszej części analiz.

## 6.2 WWLN z odejściami w postaci tradycyjnych linii napowietrznych

Innym przykładem współpracy WWLN z liniami tradycyjnymi jest układ przedstawiony na rysunku 6.4. W stacjach odbiorczych C i D zamodelowano odbiory stałaimpedancyjne, których parametry dobrano w taki sposób, aby odwzorować obciążenie na poziomie typowych transformatorów 400/110 kV i 220/110 kV, zatem moce odbierane w poszczególnych węzłach wynoszą  $P_C = 320$  MW,  $P_D = 155$  MW. Linię zasilono w stacji A i obciążono w stacji B w taki sposób, aby poszczególne tory prądowe WWLN w odcinku odejście-stacja B były obciążone na poziomie połowy prądów dopuszczalnych długostrwale.

Celem analiz jest określenie wpływu udziału długości odejść w wybranych torach prądowych WWLN na wartości wskaźników asymetrii w stacji B (na końcu WWLN) oraz stacjach C i D. Pozwoli to zaobserwować czy i w jakim stopniu następuje „przeniesienie” niesymetrii WWLN do stacji będących odejściami w tej linii. Parametrem różnicującym analizy była zmiana długości odcinków odgałęzień do stacji C i D, gdzie w układzie podstawowym (brak odejść)  $l_{C-X} = 0$  km,  $l_{D-X} = 0$  km.



Rys. 6.4 Druga WWLN (2×400+220 kV) wraz z odejściami w torach prądowych I (400 kV) i III (220 kV)

Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 6.1. Sekcja „Odejście C” oznacza zmianę długości  $l_{C-X}$  przy  $l_{D-X} = 0$  km, „Odejście D” zmianę długości  $l_{D-X}$  przy  $l_{C-X} = 0$  km, sekcja „Odejścia C i D” odnoszą się do jednoczesnych zmian długości odejść  $l_{C-X} = l_{D-X}$ .

Tab. 6.1 Wskaźniki niezrównoważenia i niesymetrii w funkcji zmiany długości odejść do stacji C i D

Badane węzły	B-1 (400 kV)		B-2 (400 kV)		B-3 (220 kV)		C (400 kV)		D (220 kV)	
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
<b>Brak odejść C i D</b>	1,12	0,85	1,23	1,96	1,41	1,37	0,61	0,66	0,74	0,18
<b>Odejście C</b>										
25 km	0,92	0,94	1,28	1,88	1,47	1,49	0,45	0,59	0,77	0,24
50 km	0,77	1,45	1,32	1,80	1,53	1,61	0,32	0,78	0,80	0,30
75 km	0,67	2,03	1,35	1,72	1,58	1,73	0,21	1,06	0,82	0,37
<b>Odejście D</b>										
25 km	1,14	0,82	1,25	1,89	1,20	1,82	0,62	0,65	0,77	0,46
50 km	1,16	0,80	1,27	1,81	0,99	2,22	0,63	0,63	0,85	0,71
75 km	1,18	0,78	1,28	1,73	0,79	2,57	0,63	0,61	0,95	0,92
<b>Odejścia C i D</b>										
25 km	0,95	0,96	1,30	1,82	1,26	1,94	0,46	0,59	0,79	0,51
50 km	0,81	1,51	1,35	1,71	1,09	2,47	0,33	0,80	0,88	0,82
75 km	0,73	2,13	1,40	1,63	0,93	2,93	0,22	1,11	0,98	1,09

Kolorami pomarańczowym i niebieskim oznaczano zmiany wskaźników asymetrii, gdy następowało ich kolejno zwiększenie i zmniejszanie w stosunku do przypadku „Bez odejść C i D” wraz z wydłużaniem się poszczególnych odgałęzień.

Wydłużanie odejścia C (400 kV) wpływa w zauważalny sposób zarówno na wartości wskaźników asymetrii w węzłach B-1 i C (400 kV), jak również na wskaźniki w węźle B-3 (220 kV). Wydłużanie odejścia D (220 kV) przekłada się w głównym stopniu na wartości wskaźników w torze prądowym III WWLN (węzeł B-3) oraz stacji odbiorczej D.

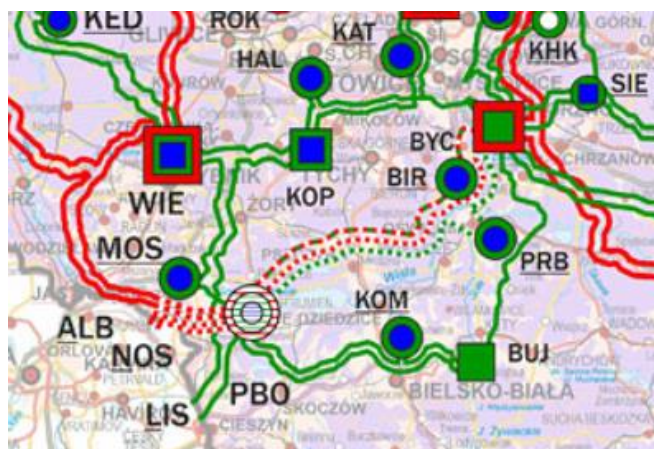
W przypadku równoczesnego zwiększania długości odgałęzień („Odejścia C i D”), decydujący wpływ na wartości wskaźników asymetrii w danym torze prądowym WWLN mają zmiany zachodzące w odpowiadających odgałęzieniach.

Dodatkowo wydłużenie odejścia C (400 kV) bardziej wpływa na wskaźniki w stacji D (220 kV), niż wydłużenie odejścia D na wskaźniki w stacji C. Ponownie świadczy to o większej podatności toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym na zmiany otoczenia sieciowego.

Zgodnie z oczekiwaniami, zaobserwowano jedynie nieznaczne zmiany wskaźników asymetrii w torze prądowym II (B-2). W tym torze prądowym nie modelowano odgałęzień.

### 6.3 Praca WWLN w rzeczywistym otoczeniu sieciowym

Plan rozwoju sieci przesyłowej na lata 2027-2030 [103] uwzględnia budowę trójtorowej, dwunapięciowej linii napowietrznej 400 + 2×220 kV (docelowo 2×400 + 220 kV) w obszarze PSE Południe (rys. 6.5). Przewidywana sumaryczna długość WWLN wynosi 75 km.



Rys. 6.5 Fragment planu rozbudowy sieci przesyłowej w południowym obszarze KSE [103, 115]

W ramach ostatniego etapu analiz, zamodelowano obszar przedstawiony na rysunku 6.5 zawierający trójtorową linię dwunapięciową 2×400 + 220 kV relacji Byczyna-Podborze (BYC-PBO). Schemat analizowanego niesymetrycznego układu sieciowego z WWLN przedstawiono na rysunku 6.6.

Z uwagi na wyniki uzyskane w ramach analiz prowadzonych w poprzednich częściach pracy, za sylwetkę nowobudowanej linii BYC-PBO przyjęto drugą analizowaną WWLN (płaski układ torów prądowych). W ramach analiz skupiono się na obserwacji wskaźników asymetrii w nowobudowanej stacji Podborze (PBO) oraz na odejściach od tej linii, czyli Bieruń (BIR) i Poręba (PRB). Dla linii trójtorowej dobrano układ przewodów fazowych,

który gwarantuje poprawne odwzorowanie wartości prądów zwarcia w torze prądowym III (zgodnie z wnioskami z rozdziału 4.4.2), ponieważ nie będzie prowadzić się już analizy zwarciowej w tym układzie. Ostatecznie zdecydowano się na układ przewodów fazowych zgodny z rysunkiem 4.1b, który został przeanalizowany w sposób szczegółowy. WWLN w układzie z rysunku 4.1b charakteryzuje się poprawnym odwzorowaniem prądów zwarcia dla znacznych długości linii – bez przepłotów 126 km (tab. 4.9), a w przypadku zastosowania któregośkolwiek z układów przepłotów nie powoduje pogorszenia procentowych błędów prądów zwarcia i gałęziowych prądów udziałów od strony toru prądowego III, dzięki czemu analiza zwarciowa nie musi być powtarzana. Dla wybranej sylwetki wskaźniki niezrównoważenia i niesymetrii przyjmują wartości dopuszczalne ( $< 1\%$ ) do długości linii wynoszącej 72 km, przy obciążeniu tej WWLN połową prądów dopuszczalnych długostrwale.

Otoczenie sieciowe zostało ograniczone w stacjach elektroenergetycznych, w których występuje generacja: stacje Dobrzeń (DBN), Wielopole (WIE), Byczyna (BYC), Kopanina (KOP), Bujaków (BUJ). W pozostałych węzłach zamodelowano odbiory stałaimpedancyjne, których parametry dobrano w taki sposób aby wymusić obciążenie wszystkich linii napowietrznych przynajmniej wartością połowy ich prądów dopuszczalnych długostrwale (tab. 1.2). W stacjach Bieruń (BIR), Poręba (PRB), Komorowice (KOM) i Moszczenica (MOS) następuje transformacja na napięcie 110 kV, stąd w tych węzłach zamodelowano odbiory, których parametry odpowiadają rzeczywistym transformatorom 400/110 kV i 220/110 kV.

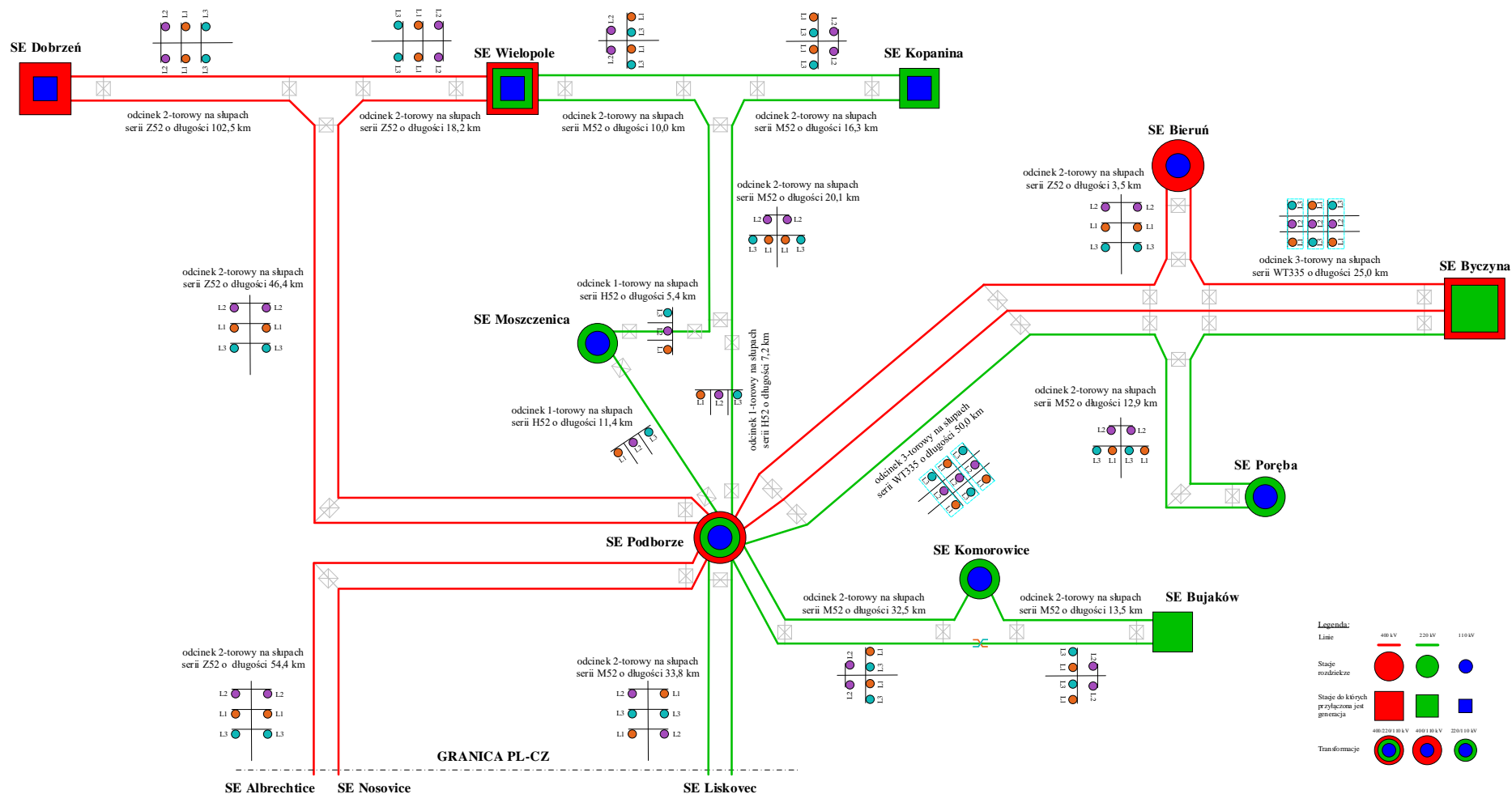
Odwzorowano długości odpowiednich połączeń liniowych oraz układy ich przewodów fazowych. Linie opisano poprzez macierze admitancyjne zawierające zarówno parametry wzdłużne jak i poprzeczne. Susceptancje zamodelowano w węzłach krańcowych linii. Rozważono również układ bez uwzględniania parametrów poprzecznych w modelach linii napowietrznych. Generalnie, parametry poprzeczne nie wpłynęły w znaczącym stopniu na wartości analizowanych wskaźników asymetrii w badanych węzłach układu.

Praca rozważanego układu sieciowego była realizowana przy otwartym sprzęgle między systemami 400 kV w stacji Podborze (PBO). Wstępnie przeanalizowano również pracę układu z zamkniętym sprzęgłem w tej stacji, co skutkowało obniżeniem wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii, lecz sądzi się, że układ taki jest mniej korzystny z punktu widzenia ruchowego.

Warunki pracy sieci odpowiadają dużemu eksportowi do systemu czeskiego – stacje Albrechtice (ALB), Nošovice (NOS), Lískovec (LIS). Parametry obciążenia wybranych połączeń liniowych przedstawiono w tabeli 6.2.

**Tab. 6.2 Wybrane przepływy w stanie pracy normalnej analizowanego układu sieciowego z WWLN**

Węzeł $p$	Węzeł $k$	$P_p$ , MW	$Q_p$ , Mvar	$P_k$ , MW	$Q_k$ , Mvar	$S/S_{dop}$ , -
BYC-1	BIR	1319,62	293,40	-1314,31	-216,11	0,68
BYC-2	PBO-2	1296,35	301,30	-1285,82	-150,41	0,67
BYC-3	PRB	349,00	97,59	-345,34	-69,62	0,78
BIR	PBO-1	1009,38	197,45	-1002,56	-106,37	0,52
PRB	PBO-3	243,94	49,10	-239,95	-20,94	0,54



Rys. 6.6 Analizowany układ sieciowy z WWLN (2x400 + 220 kV)

W tabeli 6.3 przedstawiono zmiany wskaźników asymetrii w wybranych węzłach układu sieciowego z WWLN w przypadku, gdy otoczenie sieciowe stacji Podborze zostało rozbudowane z postaci przedstawionej na rysunku 6.4 do postaci z rysunku 6.6.

**Tab. 6.3 Wpływ rozszerzenia układu sieciowego z WWLN o niesymetryczne otoczenie w stacji Podborze**

Badane węzły	B-1 / PBO-1 (400 kV)		B-2 / PBO-2 (400 kV)		B-3 / PBO-3 (220 kV)		C / BIR (400 kV)		D / PRB (220 kV)	
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
Układ z rys. 6.4*	0,77	0,34	0,89	0,91	0,99	0,93	0,28	0,22	0,41	0,16
Układ z rys. 6.6	0,37	0,96	0,68	0,90	0,82	1,11	0,14	0,30	0,20	0,24

\* dla  $l_{A-X} = 25$  km,  $l_{B-X} = 50$  km,  $l_{C-X} = 3,5$  km,  $l_{D-X} = 12,9$  km

Topologia otoczenia sieciowego WWLN w znaczącym stopniu kształtuje poziom asymetrii napięć w badanych węzłach. Rozszerzenie układu sieciowego do postaci przedstawionej na rysunku 6.6 spowodowało przekroczenie wskaźnika niesymetrii w węzle PBO-3 (220 kV). Przeanalizowano trzy warianty działań pozwalających na ograniczenie wskaźnika  $\alpha_2$  w tym węzle. Pierwsze dwa działania polegały na zastosowaniu przeplotu toru prądowego III (220 kV) WWLN w dłuższym odcinku tej linii (od rozgałęzienia do stacji PBO,  $l_{X-PBO} = 50$  km). Przeplot wykonano w połowie długości tego odcinka oraz w  $1/3$  i  $2/3$  długości tego odcinka. Trzecie podejście polegało na zmianie układu zasilania WWLN w torach prądowych I i III, które dokonano w miejscach odejść prowadzących do stacji Bieruń (400 kV) i Poręba (220 kV). W tabeli 6.4 zestawiono wyniki dla układu podstawowego (układ podstawowy) oraz dla trzech układów z zastosowanymi rozwiązaniami, dla których uzyskano najlepsze efekty ograniczenia wskaźnika niesymetrii w węzle PBO-3.

**Tab. 6.4 Porównanie wskaźników asymetrii w wybranych węzłach w tym w układach z zastosowaniem przeplotów w torze III WWLN oraz po zmianie sposobu zasilania WWLN w stacjach BIR i PRB**

	Układ podstawowy		Przeplot w $1/2l_{X-PBO}$		Przeplot w $1/3l_{X-PBO}$ i $2/3l_{X-PBO}$		Zmiana układu zasilania	
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
<b>PBO-1 (400 kV)</b>	0,37	0,96	0,37	1,00	0,37	0,99	0,36	0,49
<b>PBO-2 (400 kV)</b>	0,68	0,90	0,68	0,67	0,69	0,66	0,55	0,18
<b>PBO-3 (220 kV)</b>	0,82	1,11	0,82	0,87	0,85	0,83	0,86	1,00
<b>BIR (400 kV)</b>	0,14	0,30	0,13	0,28	0,13	0,28	0,36	0,64
<b>PRB (220 kV)</b>	0,20	0,24	0,21	0,67	0,14	0,82	0,27	0,56



Dla każdego z zaproponowanych rozwiązań znaleziono warianty, które pozwoliły na ograniczenie wskaźnika niesymetrii w węźle PBO-3, z dotrzymaniem dopuszczalnego poziomu wskaźników niezrównoważenia i niesymetrii w pozostałych węzłach układu. W przypadku zastosowania przeplotu w połowie dłuższego odcinka WWLN, najlepsze wyniki uzyskano dla przeplotu nr 4 (tab. 8.3). Dla analizowanej linii jest to zamiana położenia przewodów fazowych L1 i L3 toru prądowego III. W przypadku przeplotu w dwóch miejscach tego odcinka WWLN, najlepszy efekt uzyskano przy przeplocie nr 27, 33 toru prądowego III tej linii. Wyróżnione przeploty wykonane w krótszym odcinku WWLN dały mniejszy efekt poprawy wskaźnika asymetrii, przy czym dla obydwu przypadków przeplotu uzyskano dopuszczalny poziom wskaźnika  $\alpha_2$ , tj. dla przeplotu nr 4 – 1,00%, dla przeplotu nr 27, 33 – 1,00%. Najlepszy efekt zmiany układu zasilania dłuższego odcinka WWLN na wskaźniki asymetrii w badanej sieci uzyskano w przypadku, gdy przy odejściu ze stacji BIR zastosowano układ zasilania toru prądowego I L3-L1-L2 (pierwotnie: L1-L2-L3) oraz w odejściu od stacji PRB zmianę układu zasilania toru prądowego III w postaci L1-L3-L2 (pierwotnie: L1-L2-L3). Zmiana sposobu zasilania jedynie w krótszym odcinku WWLN (X-BYC) również pozwoliła na redukcję wskaźników niesymetrii do dopuszczalnego poziomu ( $\alpha_{2PBO-3} = 1,00\%$ ).

**Tab. 6.5 Wskaźniki asymetrii w wybranych węzłach analizowanego układu sieciowego z WWLN, w której zastosowano przeplot pojedynczy nr 4 przewodów fazowych w torze prądowym III w połowie długości dłuższego odcinka linii w funkcji wydłużania odejść do stacji BIR i PRB**

Badane węzły	PBO-1 (400 kV)		PBO-2 (400 kV)		PBO-3 (220 kV)		BIR (400 kV)		PRB (220 kV)	
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
<b>Układ podst.</b>	0,37	1,00	0,68	0,67	0,82	0,87	0,13	0,28	0,21	0,67
<b>Wydłużenie BIR</b>										
25 km	0,51	1,55	0,66	0,50	0,80	0,87	0,22	0,61	0,21	0,72
50 km	0,66	1,91	0,64	0,40	0,79	0,88	0,36	0,85	0,20	0,75
<b>Wydłużenie PRB</b>										
25 km	0,37	1,00	0,69	0,63	0,91	0,95	0,14	0,29	0,28	0,73
50 km	0,37	1,00	0,69	0,58	1,03	1,04	0,14	0,29	0,41	0,81
<b>Wydłużenie BIR i PRB</b>										
25 km	0,50	1,55	0,66	0,47	0,90	0,96	0,22	0,61	0,28	0,78
50 km	0,64	1,91	0,65	0,35	1,01	1,05	0,35	0,86	0,41	0,88

**Tab. 6.6** Wskaźniki asymetrii w wybranych węzłach analizowanego układu sieciowego z WWLN, w której zastosowano przepłót podwójny nr 27, 33 przewodów fazowych w torze prądowym III w  $1/3$  i  $2/3$  długości dłuższego odcinka linii w funkcji wydłużania odejść do stacji BIR i PRB

Badane węzły	PBO-1 (400 kV)		PBO-2 (400 kV)		PBO-3 (220 kV)		BIR (400 kV)		PRB (220 kV)	
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
Układ podst.	0,37	0,99	0,69	0,66	0,85	0,83	0,13	0,28	0,14	0,82
Wydłużenie BIR										
25 km	0,50	1,55	0,66	0,52	0,83	0,84	0,21	0,61	0,13	0,87
50 km	0,66	1,90	0,64	0,45	0,82	0,84	0,34	0,86	0,13	0,91
Wydłużenie PRB										
25 km	0,37	0,99	0,69	0,63	0,93	0,91	0,13	0,28	0,22	0,91
50 km	0,36	1,00	0,70	0,58	1,04	1,00	0,13	0,29	0,38	1,03
Wydłużenie BIR i PRB										
25 km	0,50	1,55	0,67	0,49	0,92	0,92	0,21	0,62	0,22	0,96
50 km	0,64	1,91	0,65	0,39	1,02	1,00	0,34	0,87	0,38	1,12

W kolejnym kroku badano wskaźniki asymetrii w układach sieciowych, w których zastosowano jedno z omówionych powyżej rozwiązań przy zwiększaniu długości odejść do stacji BIR i PRB. W tabelach 6.5, 6.6, 6.7 przedstawiono wyniki wskaźników asymetrii w wybranych węzłach analizowanego układu sieciowego przy zastosowaniu kolejno przepłotu nr 4 przewodów fazowych toru III w połowie dłuższego odcinka WWLN, przepłotu nr 27, 33 w  $1/3$  i  $2/3$  długości dłuższego odcinka WWLN oraz zmiany sposobu zasilania dłuższego odcinka WWLN zgodnie z układem opisanym w poprzednim akapicie.

Wydłużenie odejścia od stacji BIR powoduje przekroczenie wskaźnika niesymetrii w węzle PBO-1, do którego bezpośrednio jest podłączone. Zauważalnej zmianie ulegają również wskaźniki asymetrii w węzłach PBO-2 oraz BIR (tab. 6.5, tab. 6.6). W przypadku zmiany układu zasilania (tab. 6.7) przekroczone zostają wskaźniki niesymetrii w węzłach PBO-3 oraz BIR. Zastosowanie przepłotów toru prądowego III pozwala na zwiększenie długości odejścia PRB nieco ponad 25 km, nie powodując przekroczenia wskaźników asymetrii w badanych węzłach układu, czego nie uzyskano przy zmianie sposobu zasilania (tab. 6.7). Generalnie, zwiększenie stosunku długości odejść do długości badanej WWLN zmniejsza jej udział w kształtowaniu wskaźników niesymetrii napięć w analizowanych węzłach.

**Tab. 6.7** Wskaźniki asymetrii w wybranych węzłach analizowanego układu sieciowego z WWLN, w której zastosowano zmianę sposobu zasilania torów prądowych I i III w odgałęzieniach do stacji BIR i PRB w funkcji wydłużenia odcień do stacji BIR i PRB

Badane węzły	PBO-1 (400 kV)		PBO-2 (400 kV)		PBO-3 (220 kV)		BIR (400 kV)		PRB (220 kV)	
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$
Układ podst.	0,36	0,49	0,55	0,18	0,86	1,00	0,36	0,64	0,27	0,56
Wydłużenie BIR										
25 km	0,57	1,01	0,54	0,21	0,85	1,03	0,30	1,07	0,23	0,54
50 km	0,72	1,44	0,54	0,28	0,85	1,04	0,33	1,42	0,22	0,53
Wydłużenie PRB										
25 km	0,35	0,50	0,57	0,23	0,94	1,03	0,36	0,65	0,15	0,71
50 km	0,34	0,52	0,58	0,31	1,04	1,07	0,35	0,66	0,18	0,92
Wydłużenie BIR i PRB										
25 km	0,56	1,01	0,55	0,25	0,93	1,05	0,29	1,09	0,14	0,69
50 km	0,70	1,44	0,56	0,35	1,03	1,10	0,33	1,44	0,23	0,86

Porównując tendencje zmian wskaźników asymetrii w układzie zredukowanym (rys. 6.4) i rozbudowanym (rys. 6.6) zauważa się znaczny wpływ otoczenia sieciowego na kształtowanie się wskaźników w analizowanych układach. Zwiększanie długości odcień do stacji BIR i PRB w układzie rozbudowanym ograniczało się do zmian wskaźników asymetrii w węzłach powiązanych z tymi odgałęzieniami (odejście BIR – tor prądowy I WWLN, odejście PRB – tor prądowy III WWLN). Jest to również związane z małym stopniem niesymetrii wprowadzanej przez zastosowaną WWLN w tym układzie. Wybór sylwetki o dużym stopniu niesymetrii geometrycznej (np. czwarta WWLN – rys. 4.1d) będzie w dominujący sposób wpływać na uzyskiwane niesymetrie w układzie, szczególnie w sieci o najniższym napięciu znamionowym (rys. 6.3).

Z punktu widzenia praktycznego osiągnięte w analizowanym układzie przekroczenie wskaźnika niesymetrii nie jest znaczące. Celem prezentowanych w niniejszym rozdziale rozważań jest zaprezentowanie efektów zastosowanych metod likwidacji przekroczeń z udziałem trzech wariantów postępowania tj. zmiany układu prowadzenia przewodów fazowych w torach prądowych WWLN w różnych długościach i węzłach tej linii.

## 7 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W odpowiedzi na konieczność zapewnienia sprawnego przesyłu energii elektrycznej i ograniczeń związanych z rozbudową sieci przesyłowej, korzystnym rozwiązaniem stają się WWLN. Rozwój WWLN pozwala zapewnić przesył niezbędnej ilości energii przy wykorzystaniu minimalnej powierzchni terenu. Dodatkowo w liniach tych zachodzi możliwość osiągnięcia mniejszych wartości natężenia pola elektromagnetycznego niż w tradycyjnych rozwiązaniach. Niezaprzeczalne zalety jakimi cechują się rozwiązania wielotorowe, wielonapięciowe skutkują wzrostem ich udziału w sieciach przesyłowo-rozdziałczych, przez co pojawiła się potrzeba analizy skutków wprowadzanych niesymetrii przez WWLN i ich wpływu na pracę tych sieci. Wyzwaniem staje się wzajemne oddziaływanie torów prądowych o różnych poziomach napięć znamionowych, które rzutuje przede wszystkim na pracę sieci o najniższym napięciu znamionowym. Niesymetria geometryczna WWLN przekłada się na wybrane parametry jakości energii elektrycznej, a niewystarczające jej odzwierciedlenie w modelach matematycznych może doprowadzić do znacznych błędów przy szacowaniu prądów zwarcia w układach sieciowych.

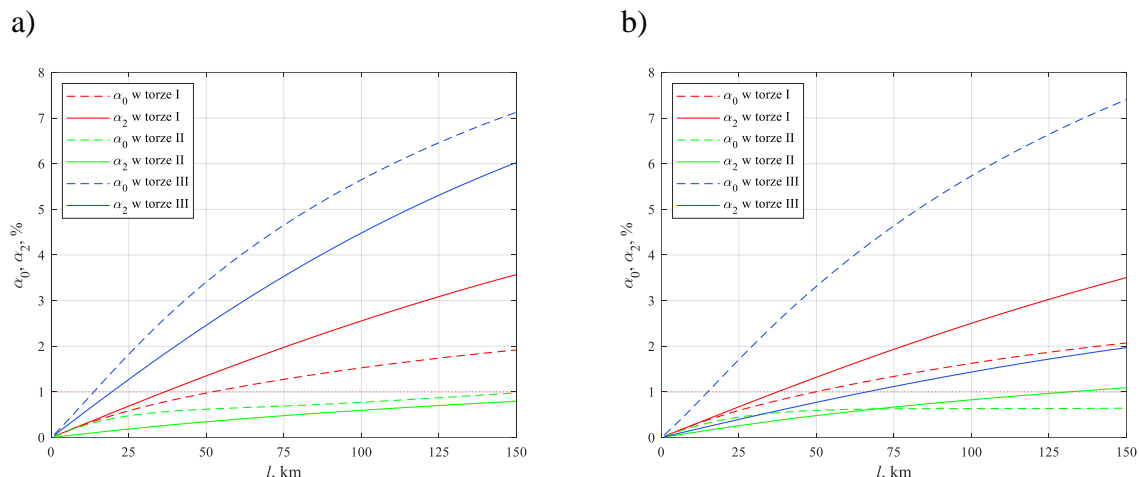
W ramach realizacji niniejszej rozprawy opracowano model matematyczny WWLN ( $n$ -torowej linii wielonapięciowej) w postaci macierzy admitancyjnych dla wielkości fazowych i składowych symetrycznych, który pozwala na dokładny opis tego elementu w strukturze systemu elektroenergetycznego. Model ten może być wykorzystywany do analiz stanów ustalonych (analizy rozplywu mocy, analizy wybranych parametrów jakości energii elektrycznej) i stanów quasi-ustalonych w obliczeniach zwarciovych. Liczne wnioski oraz praktyczne i szczegółowe zalecenia doboru WWLN wynikające z przeprowadzonych analiz porównawczych dla różnych wariantów sylwetek WWLN zawarto w rozdziałach 4 i 5.

Przeprowadzone w ramach pracy analizy WWLN pozwalają na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

1. WWLN nie charakteryzują się zwiększonym poziomem natężenia pola elektromagnetycznego w obszarach dostępnych dla ludzi w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami jednorodowymi i dwutorowymi, jednonapięciowymi. Umieszczenie toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym na konstrukcji wsporczej ma duży wpływ w kształtowaniu rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN. O ile to możliwe, tory prądowe o tych samych bądź zbliżonych napięciach roboczych powinny być prowadzone w swoim bezpośrednim sąsiedztwie (co przykładowo obrazuje pięta WWLN – rys. 4.7).
2. Niesymetria pojemnościowa WWLN, wynikająca z jej niesymetrii geometrycznej, jest przyczyną znacznych wartości napięcia kolejności zerowej, w szczególności w torze o najniższym napięciu znamionowym, co może doprowadzić do błędnego działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz przepływu prądów zerowych o znacznych wartościach w normalnych warunkach pracy tej sieci. W wyniku przeprowadzonych analiz wskazano układy faz, które redukują osiągnięte wartości napięcia  $U_0$  oraz zauważono, że druga i trzecia WWLN cechują się najmniejszymi wartościami tych napięć spośród badanych WWLN. Niesymetria impedancyjna również jest przyczyną znaczących wartości napięcia  $U_0$  w badanym torze. Przykładowo dla piątej WWLN obciążonej połową prądu dopuszczalnego długotrwale napięcie zerowe wynosi  $U_{0\text{TIII}}^{\text{imp}} = 43 \text{ V/km}$ , stąd dla linii o długości 75 km:  $U_{0\text{TIII}}^{\text{imp}} \Big|_{l=75\text{km}} = 3,2 \text{ kV}$ , natomiast  $U_{0\text{TIII}}^{\text{poj}} = 7,7 \text{ kV}$  [49]. W celu redukcji tych napięć rozwiązaniem jest zastosowanie odpowiedniego układu przewodów fazowych

w torach prądowych o wyższych napięciach (tab. 4.5) oraz odpowiednia lokalizacja toru o najniższym napięciu na konstrukcji wsporczej (rys. 4.14).

3. Zarówno dobór odpowiedniego układu przewodów fazowych, jak i wartości kątów fazowych napięć zasilających poszczególnych torów prądowych WWLN mają znaczący wpływ na wartość napięcia zerowego pojawiającego się w torze o najniższym napięciu znamionowym. Nieodpowiednio dobrany układ przewodów lub niekorzystne warunki pracy linii, rozumianej jako konfiguracja kątów fazowych napięć zasilających, mogą spowodować wzrost napięcia przesunięcia punktu neutralnego sieci o najniższym napięciu znamionowym. Ma to istotne znaczenie również w ujęciu eksploatacyjnym - konieczności prowadzenia prac konserwacyjnych lub naprawczych wyłączzonego toru przy dalszej pracy pozostałych torów prądowych (prace pod napięciem).
4. W ujęciu analizowanych parametrów jakości energii elektrycznej, praca niesymetrycznej WWLN przede wszystkim przekłada się na poziomy wskaźników nieznaczności oraz niesymetrii w torze o najniższym napięciu znamionowym (zał. CD – tab. 5), przez co ten tor prądowy będzie determinował graniczne wielkości WWLN, takie jak maksymalna długość linii, przy której nie nastąpi przekroczenie dopuszczalnych wartości wskaźników asymetrii i procentowych błędów względnych przy modelowaniu zwarć.
5. Na poziom wskaźników asymetrii w najbardziej narażonym torze (tu: tor III) wpływa przede wszystkim układ torów prądowych o wyższych napięciach znamionowych oraz układy przewodów fazowych w tych torach. Układ torów prądowych oraz ich przewodów fazowych jest istotny przede wszystkim z punktu widzenia wskaźnika nieznaczności w torze badanym (o najniższym napięciu znamionowym), bowiem redukcję tego wskaźnika można osiągnąć jedynie poprzez ingerencję w strukturę torów o napięciach wyższych. Wskaźnik niesymetrii w torze prądowym III może zostać zminimalizowany, poprzez zastosowanie przeplotów przewodów fazowych tego toru. Najkorzystniejszą konstrukcją pod względem osiąganych wskaźników asymetrii cechują się ponownie druga i trzecia WWLN. Pod względem maksymalnych długości linii nie powodujących przekroczenia wartości wskaźników asymetrii powyżej 1%, najlepsze rezultaty otrzymano dla drugiej i trzeciej badanej WWLN ( $I_{\max} = 72$  km), a najgorsze dla pierwszej i piątej WWLN ( $I_{\max} = 12$  km) przy obciążeniu wszystkich torów prądowych połową prądów dopuszczalnych długotrwale (tab. 4.9).
6. Na podstawie przeprowadzonej analizy zauważa się, że możliwa jest redukcja wskaźników niesymetrii i nieznaczności w zależności od przesunięcia kątów napięć fazowych poszczególnych torów prądowych (tab. 4.11). Należy zaznaczyć, że w zależności od badanej WWLN zmniejszenie jednego ze wskaźników asymetrii najczęściej powoduje zwiększenie się drugiego z nich (zał. CD – tab. 7).
7. Sposób prowadzenia toru prądowego III ma duże znaczenie w kształtowaniu wskaźnika niesymetrii na końcu tego toru prądowego (rys. 7.1). Układ trójkątny wpływa na znaczną redukcję wskaźnika  $\alpha_2$ . Pod względem oddziaływań wzajemnych w obrębie danego toru prądowego, układ trójkąta charakteryzuje znaczna symetria wynikająca ze zbliżonych odległości prowadzenia poszczególnych przewodów fazowych w tym torze. Na wartości wskaźnika nieznaczności mają wpływ przede wszystkim pozostałe tory prądowe WWLN – zarówno sposób ułożenia przewodów fazowych w tych torach, jak i usytuowanie tych torów względem toru prądowego III.



**Rys. 7.1** Wpływ prowadzenia toru prądowego o najniższym napięciu znamionowym na konstrukcji wsporczej na podstawie piątej WWLN (rys. 4.1e) przy obciążeniu wszystkich torów  $I_{dd}$   
 a) tor prądowy III w układzie płaskim, b) tor III w układzie trójkąta

8. Wyznaczenie procentowych błędów względnych prądów zwarcia w badanych węzłach układu określa stopień odwzorowania niesymetrycznej WWLN za pomocą modelu symetrycznego. Przy niewielkich długościach WWLN (do około 15 km) model ten jest wystarczający i nie generuje błędów powyżej założonego poziomu  $\pm 5\%$ . Stopień niesymetrii geometrycznej WWLN ma tu duże znaczenie. Najlepszymi pod względem szacowania prądów zwarciovych cechują się druga badana WWLN ( $l_{max} = 126$  km), a najgorszą okazała się czwarta WWLN, dla której poprawne odwzorowanie prądów zwarcia osiąga się do 17 km tej linii (tab. 4.12).
9. Opis WWLN o niewielkich długościach (do  $5 \div 10$  km dla linii o znacznym stopniu niesymetrii geometrycznej, np. czwarta WWLN) w postaci modelu uproszczonego nie generuje znacznych błędów przy modelowaniu zwarć. Powyżej 10 km dla tego typu sylwetki konieczne jest modelowanie tego elementu w sposób dokładny. Jeżeli możliwe jest zastosowanie konstrukcji charakteryzującej się mniejszym stopniem niesymetrii (np. druga i trzecia WWLN), wówczas modelowanie WWLN w sposób uproszczony z zastosowaniem modelu symetrycznego jest wystarczające również dla większych długości WWLN (powyżej 75 km).
10. Możliwe jest zwiększenie maksymalnej długości WWLN, przy której zachowane są dopuszczalne poziomy wskaźników asymetrii oraz procentowych błędów względnych w torze o najniższym napięciu znamionowym poprzez zastosowanie przeplotów przewodów fazowych tego toru prądowego.

Ponownie druga i trzecia WWLN charakteryzują się największą podatnością na działanie przeplotów, które skutkują możliwością wydłużenia linii o 11 km w przypadku przeplotu pary przewodów w połowie długości linii lub wykonując pełny przeplot toru prądowego III, na wydłużenie tych WWLN do 150 km. Dla pierwszej, czwartej i piątej WWLN nie uzyskano pożądanego efektu w postaci zwiększenia maksymalnej długości WWLN z uwagi na wprowadzaną niesymetrię (tab. 5.4).

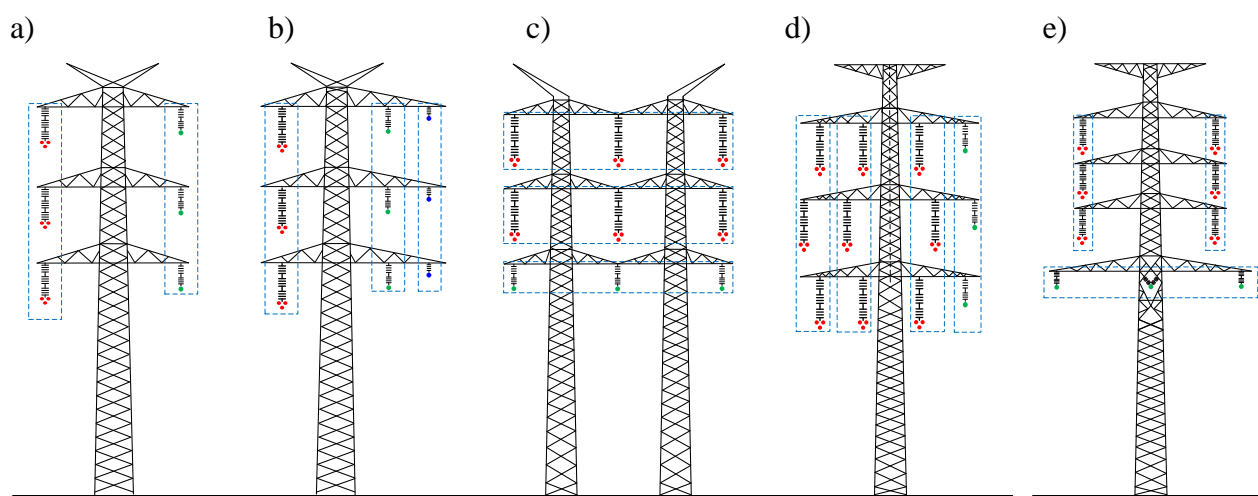
W przypadku analizy zwarcioviej, wykonanie przeplotu pozwoliło na zwiększenie maksymalnych długości wszystkich badanych WWLN (tab. 5.5). Dla drugiej, czwartej i piątej badanej WWLN możliwe było wydłużenie linii do wartości 150 km. W przypadku pierwszej WWLN przy zastosowaniu przeplotów toru III możliwe jest zwiększenie

długości tej linii o 30 km, natomiast dla trzeciej WWLN wzrost długości linii przy zachowaniu dopuszczalnych błędów przy modelowaniu zwarć osiągnął 18 km, gdy zastosowano przeplot w  $1/2l$  oraz 53 km gdy zastosowano przeplot w  $1/3l$  i  $2/3l$ .

11. Pełny przeplot (lp. 35, 42 – tab. 8.4, zał. CD – tab. 14) w badanym torze prądowym pozwala na całkowitą eliminację wskaźnika niesymetrii w tym torze, lecz ma ograniczony wpływ w kształtowaniu wartości wskaźnika nierównoważenia. W celu eliminacji wskaźnika  $\alpha_0$ , konieczne jest wykonanie przeplotów w torach o napięciach wyższych, co jest analogicznym podejściem do ograniczenia wpływu niesymetrii pojemnościowej opisywanej przez napięcie kolejności zerowej  $U_0$ . Przeplot toru prądowego III w największym stopniu wpływa na wartość wskaźnika  $\alpha_0$  dla WWLN charakteryzujących się równomiernym rozłożeniem torów prądowych względem siebie, co ma miejsce dla drugiej (rys. 4.1b) i trzeciej (rys. 4.1c) WWLN. Dla tych sylwetek, możliwe jest zachowanie dopuszczalnych wartości wskaźników niesymetrii przy zastosowaniu przeplotu pary przewodów.
12. Badania WWLN w rzeczywistej sieci przesyłowej ponownie potwierdziły, że tor prądowy III (tor o najniższym napięciu znamionowym) jest szczególnie narażony na skutki niesymetrii impedancyjnej i pojemnościowej WWLN. Wraz ze wzrostem udziału odcinka wielotorowego, wielonapięciowego największe wskaźniki asymetrii osiąga się właśnie w tym torze prądowym. Odpowiedni dobór układu torów prądowych oraz konfiguracja przewodów fazowych w tych torach rzutuje na uzyskiwane wartości wskaźników niesymetrii na końcu torów prądowych współpracujących szeregowo z WWLN (rys. 6.3, rys. 6.4).
13. Topologia otoczenia sieciowego WWLN w znaczącym stopniu kształtuje poziom wskaźników asymetrii napięć w badanych węzłach, co wynika również z zastosowania w badanym niesymetrycznym układzie sieciowym WWLN o małym stopniu niesymetrii. Wybór WWLN o dużym stopniu niesymetrii (np. czwarta WWLN) będzie dominująco rzutował na parametry pracy sieci już dla niewielkiego udziału WWLN w danym ciągu liniowym i otoczeniu sieciowym. Zatem istotnym jest odpowiedni dobór konstrukcji WWLN, tak aby zapewnić jak najmniejszy stopień asymetrii już samej WWLN i wprowadzanych przez nią niesymetrii impedancyjnych i pojemnościowych.
14. Obserwacje i wnioski wynikające z analiz przedstawionych w pracy pozwoliły na stwierdzenie, że najgorszymi właściwościami z uwagi na wprowadzaną niesymetrię charakteryzuje się czwarta WWLN (rys. 4.1d), natomiast najkorzystniejszymi parametrami spośród badanych WWLN charakteryzuje się druga WWLN (rys. 4.1b).
15. W ramach pracy, przeanalizowano również wiele innych WWLN, głównie np. rys. 2.1b,e i rys. 7.2e, a także rys. 7.2c w wariacie trójnapięciowym (400+220+110 kV) w układzie poziomym i pionowym. Bardzo dobre rezultaty uzyskano dla sylwetki z rysunku 7.2c w układzie pionowym (2×400 + 220 kV), dla której zidentyfikowano układy przewodów fazowych, dla których wskaźniki asymetrii nie przekraczają 1% do 107 km długości linii, a także nie zostają przekroczone procentowe błędy względne prądów zwarcia w torze prądowym III. Napięcie  $U_0$  dla takiego układu faz (lp. 138) wyniosło 6,6 kV, co daje  $3\% U_{nIII}$ , a maksymalne natężenie pola elektrycznego wyniosło 3,5 kV/m. Przeploty toru III pozwoliły na znaczne zwiększenie maksymalnej długości linii bez niebezpieczeństwa przekroczenia wskaźników asymetrii oraz procentowych błędów względnych prądów zwarcia. Zadowolające wyniki otrzymano również dla wariantu trójnapięciowego (w układzie płaskim na konstrukcji z rysunku 7.2c), dla której  $l_{max} = 131$  km,  $U_0 = 5,02$  kV ( $4,6\% U_{nIII}$ ),  $E_{max} = 3,3$  kV/m. Jednak w tym przypadku dla toru prądowego o napięciu

znamionowym 110 kV otrzymano grosze wyniki modelowania prądów zwarcia. Dla wariantu trójnapięciowego w układzie poziomym (rys. 7.2c), sytuacja powtórzyła się, tj. przy długości linii 75 km maksymalny procentowy błąd względny przy modelowaniu zwarć wyniósł 6,03%. Pełny przeplot tego toru prądowego wyeliminował ten problem. Przedstawione obserwacje pozwoliły na potwierdzenie zwiększenia „wrażliwości” toru III z uwagi na niesymetrię całej WWLN, gdy jego napięcie znamionowe w stosunku do pozostałych torów prądowych jest niższe. Zatem najbardziej podatnym na skutki niesymetrii WWLN będzie miał tor prądowy o napięciu znamionowym 110 kV, szczególnie we współpracy z torem/torami o napięciu 400 kV (np. czwarta, piąta WWLN).

16. Na podstawie prowadzonych analiz, można wyciągnąć wniosek, że najmniejszym stopniem niesymetrii geometrycznej przekładającej się na badane parametry charakteryzują się WWLN o pionowym układzie torów prądowych, przy czym tory te muszą być prowadzone w sposób równoległy do siebie (rys. 7.2a÷d, rys. 2.1j). Rozwiązania takie można spotkać m.in. w Polsce (rys. 2.3a) i Hiszpanii (rys. 2.2c). Takie układy prowadzą do równomiernego oddziaływania wszystkich torów na siebie. Nieco gorszą konfiguracją WWLN jest równomierne rozłożenie toru o najniższym napięciu znamionowym względem pozostałych torów prądowych w innych układach. Przykładem takiej WWLN jest sylwetka z rysunku 7.2e (układ przewodów fazowych - lp. 93), dla której dopuszczalne wartości wskaźników asymetrii i procentowych błędów względnych prądów zwarcia otrzymywano do długości tej linii wynoszącej 58 km. Podwójny przeplot toru prądowego III (lp. 17, 35, 42) pozwolił na zwiększenie dopuszczalnej długości linii do 93 km.



**Rys. 7.2 WWLN charakteryzujące się małym stopniem niesymetrii geometrycznej z uwagi na tor prądowy o najniższym napięciu znamionowym**

Zaprezentowane wyniki analiz oraz przedstawione wnioski potwierdzają słuszność przyjętej tezy pracy. WWLN z punktu widzenia uwarunkowań zewnętrznych rozwoju systemu są rozwiązaniem bardzo korzystnym, zaś pojawiająca się niekorzystna niesymetria napięć i prądów występująca głównie w torze prądowym o najniższym napięciu może być wyeliminowana, bądź ograniczona, przy pomocy prostych środków technicznych takich jak zmiana sposobu zasilania, wykonanie pojedynczych przeplotów, co w torze o najniższym napięciu jest stosunkowo łatwo realizowalne lub poprzez wybór odpowiedniej sylwetki słupa (i sposobu prowadzenia torów prądowych), charakteryzującego się mniejszą asymetrią geometryczną. Opracowany w ramach niniejszej pracy model admitancyjny wielotorowej,



wielonapięciowej linii napowietrznej został wykorzystany przez Operatora Sieci Przesyłowej PSE S.A. [110] na potrzeby odwzorowania tego obiektu w modelach sieciowych.

Uzyskane wyniki analiz pozwalają na sformułowanie kierunków dalszych badań. Pierwszym z nich jest poszukiwanie wskaźnika geometrycznego pozwalającego na zidentyfikowane sylwetek WWLN charakteryzujących się małym stopniem asymetrii geometrycznej. Działanie to pozwoli na ograniczenie wyboru konstrukcji nowopowstającej WWLN do sylwetek cechujących się stosunkowo niewielkimi wprowadzanymi niesymetriami napięć i prądów w systemie. Kolejne zadanie będzie rozszerzać prowadzone analizy o linie napowietrzne hybrydowe, które również cieszą się coraz większą popularnością [39, 67, 81]. W liniach tych na wspólnej konstrukcji wsporczej prowadzone są tory prądowe prądu przemiennego (HVAC, ang. *High Voltage Alternating Current*) oraz stałego (HVDC, ang. *High Voltage Direct Current*).

## BIBLIOGRAFIA

### Książki, monografie, rozprawy doktorskie

1. Baron B.: *Pole elektryczne linii przesyłowych trójfazowych najwyższych napięć*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1980.
2. Bernas S., Ciok Z.: *Modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
3. Clarke E.: *Circuit Analysis of A-C Power Systems*. Vol. 1. John Wiley & Sons Inc., New York, 1943.
4. Dommel H.W.: *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. Microtran Power System Analysis Corporation, Portland 1996.
5. Kacejko L., Kahl T.: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne*. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1961.
6. Kacejko P., Machowski J.: *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2013.
7. Kanicki A.: *Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2001.
8. Konorski B.: *Pole elektryczne trójfazowej linii przesyłowej*. Komitet Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk. Postępy techniki wysokich napięć Zeszyt 8. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1970.
9. Kowalski Z.: *Jakość energii elektrycznej*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
10. Krakowski M.: *Obwody ziemnopowrotne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
11. Kubek P.: *Analiza zwiększenia zdolności przesyłowej eksploatowanych linii napowietrznych wysokiego i najwyższego napięcia*. Rozprawa doktorska, Gliwice 2015.
12. Kumala R.: *Identyfikacja zakłóceń w wielotorowych różnopoziomowych napięciowo liniach elektroenergetycznych*. Rozprawa doktorska, Gliwice 2016.
13. Kumala R.: *Uwarunkowania występowania maksymalnych udarów prądowych w liniach wielonapięciowych*. Aktualne Zagadnienia Energetyki Tom II, Wójs K., Szulc P. (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014.
14. Lis R., Sobierajski M., Łabuzek M.: *Analiza w Matlabie stanów ustalonych i zwarciovych systemów elektroenergetycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
15. Mielczarski W.: *Handbook: Energy Systems & Markets*. Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, Łódź 2018.
16. Mitkowski W.: *Równania macierzowe i ich zastosowania*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
17. Popczyk J. (red.): *Bezpieczeństwo elektroenergetyczne w społeczeństwie postprzemysłowym na przykładzie Polski*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.

18. Reta-Hernández M.: *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution. Chapter 6: Transmission Line Parameters*. Wydanie trzecie. CRC Press, Boca Raton 2012.
19. Witek B.: *Projektowanie elektroenergetycznych układów przesyłowych. Wybrane zagadnienia teoretyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
20. Ziemianek S.: *Stany ustalone w systemach elektroenergetycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.
21. Żmuda K. i inni: *Laboratorium sieci elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
22. Żmuda K.: *Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze. Wybrane zagadnienia z przykładami*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.

### Artykuły, referaty konferencyjne

23. Anderson P.M., Boowen D.W., Shah A.P.: *An Indefinite Admittance Network Description for Fault Computation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 89, No. 6, 1970.
24. Brierley R.H., Morched A.S., Grainger T.E.: *Compact Right-of-Ways with Multi-Voltage Towers*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, 1991.
25. Carson J.R.: *Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return*. Bell System Technical Journal 05/1926.
26. Cenký M., Pípa M., Kment A.: *Computations of Electrical Parameters of Untransposed Overhead Lines*. 16<sup>th</sup> International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Kouty nad Desnou 2015.
27. Costea M., Baran I.: *Benefits and Problems raised by Multi-circuit Overhead Lines Operation*. 12<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest 2021.
28. Dai F., Zhou Z., Wang X., Qi X.: *An Optimization Method of Distance Protection for Parallel Lines on the same Tower*. 7<sup>th</sup> International Forum on Electrical Engineering and Automation, Hefei 2020.
29. Das H., Gogi, K., Chatterjee S.: *Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans*. 1<sup>st</sup> Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST, Itanagar 2015.
30. Deltuva R., Lukočius R.: *Distribution of Magnetic Field in 400 kV Double-Circuit Transmission Lines*. Applied Sciences, 2020.
31. Deželak K., Stumberger G., Jakl F.: *Arrangements of overhead power line conductors related to the electromagnetic field limits*. International Symposium on Modern Electric Power Systems, Wrocław 2010.
32. Dołęga W.: *Planowanie rozwoju infrastruktury elektroenergetycznej w aspekcie ochrony środowiska*. Polityka Energetyczna, Tom 16, Zeszyt 3, 2013.
33. Dommel H.W.: *Overhead Line Parameters from Handbook Formulas and Computer Programs*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 2, 1985.

34. Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: *Construction and Modeling of Multi-Circuit Multi-Voltage HVAC Transmission Lines*. Energies 2021, 14, 421.
35. Dziendziel A., Kocot H., Kubek P.: *Wielonapięciowe elektroenergetyczne linie napowietrzne WN i NN – rozwój, modelowanie*. Konferencja Naukowo-Techniczna PTPiREE „Elektroenergetyczne linie napowietrzne i kablowe wysokich i najwyższych napięć”, Wisła 2019.
36. Dziendziel A., Kocot H.: *Korzyści i wyzwania związane z rozwojem wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych WN i NN*. Przegląd Elektrotechniczny 03/2022.
37. Dziendziel A.: *Obliczenia zwarciove w układach zawierających wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne WN i NN*. Konferencja Naukowo-Techniczna PTPiREE „Linie i stacje elektroenergetyczne”, Wisła 2021.
38. Feng G., Wang Y., Zhang B.: *Study on Electromagnetic Environment of Multi-circuit Transmission Lines on Same Tower*. International Conference on Power System Technology, New Delhi 2008.
39. Gralista E.M., Gibescu M., Velitsikakis K.: *On the Modelling of a Hybrid HVAC-HVDC Overhead Transmission Line: Techniques and Challenges*. International Conference on High Voltage Engineering and Application, Athens 2018.
40. Habrych M., Wróblewski Z.: *Tendencje w budowie wielotorowych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia w aspekcie oddziaływania pola elektromagnetycznego na środowisko*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Sieci”, Szklarska Poręba 2004.
41. Jaworski M.: *Non-standard solutions for supports of high voltage overhead lines in the aspect of landscape protection and electromagnetic field impact*. Przegląd Elektrotechniczny 03/2022.
42. Kacejko P., Miller P., Osik J.: *Wyznaczanie parametrów linii napowietrznych*. Energetyka 03/1995.
43. Kamrat W., Szczepański T.: *Wybrane zagadnienia budowy i eksploatacji sieci przesyłowych najwyższych napięć*. Energetyka 10/2009.
44. Kanalik M., Pavlik M., Kolcun M.: *The impact of multi-system overhead lines operation with different voltage levels to voltage unbalance*. 2015.
45. Kizilcay M., Neumann C.: *Backflashover Analysis for 110-kV Lines at Multi-Circuit Overhead Line Towers*. 7<sup>th</sup> International Conference on Power Systems Transients, Montréal 2007.
46. Kizilcay M.: *Mitigation of Back-Flashovers for 110-kV Lines at Multi-Circuit Overhead Line Towers*. International Conference on Power Systems Transients, Kyoto 2009.
47. Kocot H., Dziendziel A.: *Chosen analyses for multi-circuit multi-voltage overhead lines capacitances*. Przegląd Elektrotechniczny 08/2020.
48. Kocot H., Dziendziel A.: *Impedance models of multi-circuit multi-voltage overhead lines*. Przegląd Elektrotechniczny 12/2019.
49. Kocot H., Dziendziel A.: *Korzyści i wyzwania związane z rozwojem wielotorowych, wielonapięciowych linii napowietrznych*. Konferencja Naukowo-Techniczna SEP „Gdańskie Dni Elektryki”, Gdańsk 2021.

50. Kocot H., Kubek P., Dziendziel A.: *Wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne WN i NN*. Śląskie Wiadomości Elektryczne 05/2021.
51. Kocot H.: *Zastępowanie linii o napięciu 220 kV liniami 400 kV jako sposób na zwiększenie zdolności przesyłowych krajowego systemu elektroenergetycznego*. Konferencja „Rynek Energii Elektrycznej. Bezpieczeństwo energetyczne Polski”. Lublin 2016.
52. Kong Y., Zhang B., Zheng T., Zhang J., Wang H.: *Research on Reclosing Scheme for Parallel Lines on the Same Tower*. IEEE Conference Power & Energy Society General Meeting, Denver 2015.
53. Konotop I., Novitsky A., Westermann D.: *Constraints on the Use of Local Compensation of the Correction of Neutral Voltage Displacement Caused by the Influence of Nerby Power Lines*. Power Quality and Supply Reliability Conference, Rakvere 2014.
54. Moodley G.V., Dama D., Vajeth R.: *Consideration of elektromagnetic induction during Transposition Studies*, IEEE AFRICON 2004.
55. Li J., Wang Z., Xia Z., Wang T., Zeng W., Yan Y., Yang Q., Li W., Long C., Ren H.: *Research for the Maintenance Way of Partial Outage on 500 kV/220 kV Four-circuit Mixed-voltage Transmission Lines on the Same Tower*. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chengdu 2016.
56. Li X., Li F., Liu P., Cai W., Cai Z.: *Modeling Approach for Short-Transmission Lines on the same Tower with Different Wire Parameters and Tower Structure*. International Conference on Power System Technology, 2018.
57. Li X., Du Z., Wen J., Chen J., Gu S.: *Research on Lightning Performance of Quadrupole Circuit Transmission Line with Dual Voltage 500/220-kV on the Same Tower*. 3<sup>rd</sup> IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Beijing 2011.
58. Liang H., Zhu C., Li X., Zhang X., Cau W.: *Simulation Research of the Unbalanced Factor under the Mutual Influence of the Multi Voltage Level Quadruple-Circuit Sharing the Same Tower*. IEEE International Conference on Power and Renewable Energy, Shanghai 2016.
59. Liu W., Liu K., Pan M., Xu G.: *Research on Electromagnetic Character of 500/220 kV Mixed-voltage Quadruple-circuit Transmission Line*. 12<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering, Wrocław 2013.
60. Milano M., Srivastava K.: *Dynamic REI equivalents for short circuit and transient stability analyses*. Electric Power Systems Research, Vol. 79, Iss. 6, 2009.
61. Miller P., Wancerz M.: *Problematyka wyznaczania i ewidencji parametrów linii WN z wykorzystaniem baz danych*. Electrical Engineering 74/2013.
62. Miller P., Wancerz M.: *Wpływ sposobu wyznaczania parametrów linii 110 kV na dokładność obliczeń sieciowych*. Przegląd Elektrotechniczny 04/2014.
63. Mujezinović A., Čarsimamović S., Čarsimamović A., Muharemović A., Turković I.: *Electric field calculation of overhead transmission lines in Bosnia and Herzegovina*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Gothenburg 2014.

64. Nazarčík T., Benešová Z.: *Modelling of the transients on the multi-circuit EHV/HV overhead transmission lines*. 18<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, Kutna Hora 2017.
65. Nazarčík T., Benešová Z.: *Origin of the circulating currents on the quadruple EHV/VHV transmission line during the specific operation*. 18<sup>th</sup> International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Kouty nad Desnou 2017.
66. Novitskiy, A., Westermann D.: *Interaction of Multi-Circuit Overhead Transmission Lines of Different Voltages Located on the Same Pylons*. Power Quality and Supply Reliability, Tartu 2012.
67. Novitskiy A., Westermann D.: *Some aspects of steady state simulations of AC/DC hybrid transmission lines*. International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Milan 2017.
68. Nowak W., Tarko R., Koziół J.: *Analysis of Overhead Lines Working Conditions – Case Study of Electromagnetic Coupling Effect*. 51<sup>st</sup> Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau 2006.
69. Pana A., Baloi A., Molnar-Matei F.: *Numerical evaluation of the effects of phase admittances asymmetry at HVAC overhead lines*. XII International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Łagów 2015.
70. Pang, X.F., Liu L.: *Variations of Proliferation States of Cells Under Action of Electromagnetic Field of High-Voltage Transmission Lines*. IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, Beijing 2007.
71. Pasierbek A.: *Wyznaczanie parametrów modelu linii przesyłowej na podstawie wskazań dwóch synchronofazorów*. Referat konferencyjny, XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Jurata 2013.
72. Peek F.W.: *The Law of Corona and the Dielectric Strength of Air-IV The Mechanism of Corona Formation and Loss*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. XLVI, 1927.
73. Pollaczek F.: *Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung*. Elektrische Nachrichten-Technik 3, 1926.
74. Rahman S., Khan I., Alkhamash H.I., Nadeem M.F.: *A Comparison Review on Transmission Mode for Onshore Integration of Offshore Wind Farms: HVDC or HVAC*. Electronics 2021, 10, 1489.
75. Riba J.R., Bogarra S., Gómez-Pau Á., Moreno-Eguilaz M.: *Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 134, 2020.
76. Riberio M.F., Vasconcelos J.A., Teixeira D.A.: *Optimization of Compact Overhead Lines of 138/230 kV: Optimal Selection and Arrangement of Cables and Definition of the Best Transmission Line Tower Topology*. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Milan 2017.
77. Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B.: *Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych*. Przegląd Elektrotechniczny 07/2014.

78. Skomudek W., Szpindler P.: *Innowacyjne słupy stalowe pełnościennie w elektroenergetycznych liniach napowietrznych najwyższych napięć*. Przegląd Elektrotechniczny 09/2012.
79. Skomudek W., Szpindler P.: *Rozkład składowych pola elektromagnetycznego wokół przewodów linii napowietrznych wysokich napięć wykonanych na słupach pełnościennych*. Pomiar Automatyka Kontrola 07/2013.
80. Skomudek W.: *Rozwój elektroenergetycznych kompaktowych linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć*. Acta Energetica Vol. 1, 2011.
81. Stanojev O., Garrison J., Hedtke S., Franck C.M., Demiray T.: *Benefit Analysis of a Hybrid HVAC/HVDC Transmission Line: a Swiss Case Study*. IEEE Power Tech Conference, Milan 2019.
82. Su Z., Wang P., Yang Z., Zhenyu X.: *Method for Parameter Decoupling for Four-circuit Transmission Lines on The Same Tower*. IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai 2012.
83. Tang C., Yin X., Zhang Z.: *Research on Capacitance Current Compensation Scheme of Current Differential Protection of Complex Four-Circuit Transmission Lines on the Same Tower*. Energies 2017, 10, 1071.
84. Tarko R., Nowak W., Szpyra W.: *Oddziaływania elektromagnetyczne w napowietrznych liniach elektroenergetycznych*. Energia Elektryczna 02/2016.
85. Tarko R., Szpyra W., Nowak W.: *Analysis of Possibilities to Reduce the Voltage Induced in Multi-circuit and Multi-voltage Overhead Lines*. Acta Energetica 3/24, 2015.
86. Wang Y., Wang H., Xue H., Yang C., Yan T.: *Research on the Electromagnetic Environment of 110 kV Six-circuit Transmission Line on the Same Tower*. Innovative Smart Grid Technologies, Tianjin 2012.
87. Wang Y.F., Xu X., Xue H., Sun L.: *Research on a New Method to Measure Unbalance of Multiple-Circuit Transmission Lines on the Same Tower Considering the Impact of Ground Wire*. IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Shanghai 2015.
88. Ward J.B.: *Equivalent Circuits for Power Flow Studies*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol .68, Iss. 1, 1949.
89. Wasilewski J., Kubek P.: *Multi-Criteria Phase Sequence Optimization in Selected the Highest-Voltage Power Lines Using Evolutionary Algorithm*. Acta Energetica 2/39, 2019.
90. Yang C., Wang L., Wang Y., Xue H., Yang X., Yan T., Huang Y.: *Computation of unbalance factors for six-circuit transmission line on the same tower*. IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan 2011.
91. Yang Q., Zou D., Tong C., Xia Z., Yan Y., Li J.: *The Safety Analysis of Live Working on 500/220 kV Four-parallel Lines on the Same Tower*. IEEE International Conference on Power System and Renewable Energy, Shanghai 2016.
92. Yang Y., Fortin S., Ma J., Dawalibi F.P.: *GMR of Stranded Multi-Zone Conductors*. The 4<sup>th</sup> IASTED Asian Conference on Power and Energy Systems, Langkawi 2008.
93. Zeng G., Cai Z., Huang M., Liu Z.: *Analysis and Countermeasures of Misoperation of Zero Sequence Pilot Protection on Circuit Lines of Same Pole*. 3<sup>rd</sup> International

- Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing 2008.
94. Zeńczak M.: *Ocena oddziaływania pól elektrycznych i magnetycznych linii elektroenergetycznych na środowisko naturalne na podstawie nowej normy PN-EN 50341-1*. Wiadomości Elektrotechniczne 03/2006.
95. Zeńczak M.: *Problemy techniczne przy wyznaczaniu zajętości terenu przez napowietrzne linie elektroenergetyczne*. Wiadomości Elektrotechniczne 07/2014.

### **Normy, broszury techniczne, raporty**

96. *Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)*. Official Journal L199, 30/07/1999, 1999/519/EC.
97. Dołowy K., Kraszewski A., Różycki S.: *Linie elektroenergetyczne najwyższych napięć. Informator dla administracji publicznej i społeczeństwa*. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Konstancin-Jeziorna 2015.
98. *Electric and Magnetic Fields from Overhead Power Lines. A Summary of Technical and Biological Aspects*. Raport Empetus Close Corporation dla ESKOM Holdings Ltd, 2006.
99. *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields*. Health Physics 1998.
100. *IEEE Guide for the Parameter Measurement of AC Transmission Lines*. IEEE Standards Association, New York, 2019.
101. *IRPA/INIRC Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields*. Health Physics 1990.
102. Paś J.: *Linie napowietrzne wysokich napięć – środowisko elektromagnetyczne a ograniczenia w użytkowaniu terenów*. Biuletyn WAT, Warszawa 2014.
103. Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2021-2030. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Konstancin-Jeziorna 2018.
104. PN-EN 50341-1:2013-03: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne.
105. PN-EN 50341-2-22:2016-04 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV – Część 2-22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski.
106. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz.U. 2007 nr 93 poz. 623).
107. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. 2019, poz. 1883).
108. Standardowa Specyfikacja Techniczna Wymagania odnośnie zakresu i metodyki pomiarów parametrów elektrycznych linii elektroenergetycznych NN. Konstancin-Jeziorna 2019.



109. Sztuba M. i inni: *Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka. Informator*. Wydanie 4, Biuro Konsultingowo-Inżynierskie „EKO-MARK”, Warszawa 2008.

### **Opracowania niepublikowane**

110. Opracowanie PSE Innowacje sp. z o.o.: *Budowa i wdrożenie narzędzi do obsługi parametrów elektrycznych*. Zawiera m.in. *Algorytm wyznaczania parametrów linii wielotorowych dla składowej zgodnej i zerowej*. Katowice 2021.

### **Strony internetowe**

111. Mapa sieci elektroenergetycznej: <http://ebin.josm.pl/electricity/#5/51.44/20.15>
112. Strona internetowa Bundesamt für Strahlenschutz: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)
113. Strona internetowa CTC Global, producenta przewodów ACCC: [www.ctcglobal.com](http://www.ctcglobal.com)
114. Strona internetowa Operator Systemu Przesyłowego w Wielkiej Brytanii: [www.nationalgrid.com](http://www.nationalgrid.com)
115. Strona internetowa Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A.: [www.pse.pl](http://www.pse.pl)
116. Strona internetowa Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej: [www.ptpiree.pl](http://www.ptpiree.pl)
117. Strona internetowa Światowej Organizacji Zdrowia: [www.who.int](http://www.who.int)

## ZAŁĄCZNIKI

### 8.1 Uproszczenia modelu matematycznego

#### 8.1.1 Uwzględnienie występowania przewodów wiązkowych

Przewody  $n$ -torowej linii napowietrznej są zbudowane z  $m$ -przewodowych wiązek. Rozróżnia się liczbę przewodów w wiązce w zależności od rozważanego toru prądowego, tj. każdy z przewodów fazowych toru prądowego  $i$  WWLN jest zbudowany z  $m_i$  przewodów, gdzie  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ .

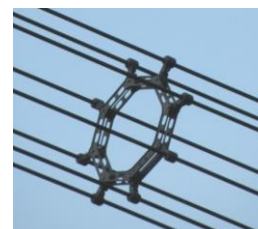
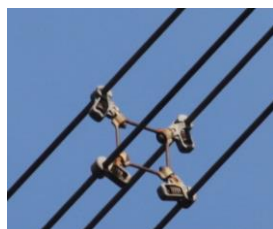
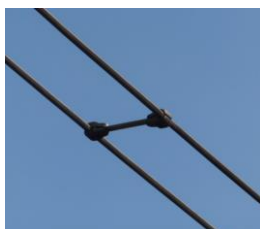
W celu agregacji  $m$ -przewodowych wiązek w przewód zastępczy zakłada się symetrię wiązek, tj. w obrębie każdej fazy zbudowanej z  $m$  przewodów, odstęp między tymi przewodami są jednakowe. W Polsce przeciętna odległość między przewodami wiązki, uzyskiwana dzięki zastosowaniu odstępników (rys. 8.1), wynosi 40 cm.

a)  $a = 40$  cm

b)  $a_1 = 40$  cm,  
 $a_2 = 40\sqrt{2}$  cm

c)

d)

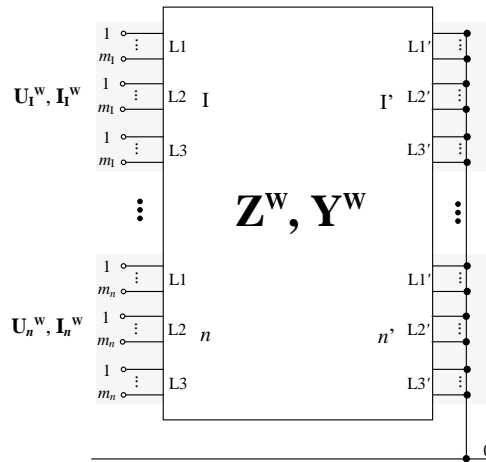


e)  $a = 40$  cm



Rys. 8.1 Przewody wiązkowe w liniach napowietrznych a)  $m = 2$ , b)  $m = 4$ , c)  $m = 6$ , d)  $m = 8$ , e)  $m = 3$

Zależność między prądami i napięciami węzłowymi WWLN, której przewody fazowe są zbudowane z  $m$ -przewodowych wiązek opisuje równanie (3.15). W celu dokonania odpowiedniego przekształcenia, jeden z krańców WWLN połączono z potencjałem odniesienia (rys. 8.2).



Rys. 8.2 Schemat blokowy WWLN do agregacji przewodów wiązkowych

Dla układu pokazanego na rysunku 8.2, zależność między prądami i napięciami węzłowymi WWLN przyjmuje postać:

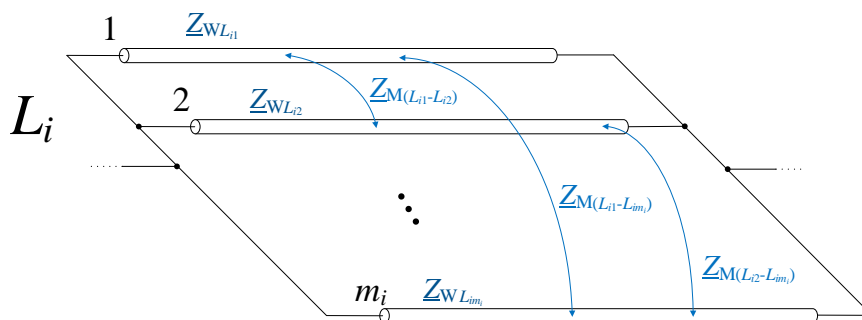
$$\mathbf{U}^w = \mathbf{Z}^w \mathbf{I}^w, \quad (8.1)$$

stąd:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_I^w \\ \vdots \\ \mathbf{U}_n^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{I,I}^w & \cdots & \mathbf{Z}_{n,I}^{w,T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Z}_{n,I}^w & \cdots & \mathbf{Z}_{n,n}^w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_I^w \\ \vdots \\ \mathbf{I}_n^w \end{bmatrix},$$

gdzie:  $\mathbf{U}_i^w$  oraz  $\mathbf{I}_i^w$  to macierze kolumnowe napięć i prądów węzłowych kolejnych torów prądowych WWLN, a  $\mathbf{Z}^w$  to macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów fazowych zbudowanych z  $m$ -przewodowych wiązek, zgodnie z (3.18)÷(3.22).

Każdy przewód wiązkowy tworzący fazę  $L_i$  toru prądowego  $i$ ,  $L_i = \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ , traktuje się jako  $m_i$  obwodów ziemnopowrotnych połączonych na swoich krańcach (rys. 8.3).

Rys. 8.3 Obwody ziemnopowrotne skojarzone z przewodami wiązki tworzącej fazę  $L_i$ 

Każdy z obwodów ziemnopowrotnych tworzących fazę  $L_i$  charakteryzuje impedancja własna  $\underline{Z}_{WL_{im_i}}$ , a impedancja wzajemna  $\underline{Z}_{M(L_{i1}-L_{im_i})}$  opisuje oddziaływania między poszczególnymi parami obwodów ziemnopowrotnych tej wiązki.

Wykorzystując teorię obwodów ziemnopowrotnych oraz założenia, że przewody tworzące wiązkę są jednakowe i znajdują się blisko siebie, można przyjąć, że w każdym z  $m_i$  przewodów płynie taki sam prąd równy  $\frac{1}{m_i} \underline{I}$ , stąd dla każdej fazy toru  $i$ :

$$\underline{U}_{L_i k} = \underline{U}_{L_i}, \quad (8.2)$$

$$\sum_{k=1}^{m_i} \underline{I}_{L_i k} = \underline{I}_{L_i}, \quad (8.3)$$

stąd:

$$\underline{I}_{L_i 1} = \underline{I}_{L_i 2} = \dots = \underline{I}_{L_i m_i} = \frac{1}{m_i} \underline{I}_{L_i}, \quad (8.4)$$

gdzie:  $k \in \{1, \dots, m_i\}$ ,  $L = \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ .

W wiązce zawierającej  $m_i$  przewodów można wyróżnić  $\frac{m_i(m_i-1)}{2}$  impedancji wzajemnych, wówczas impedancja wzajemna występująca między przewodami tej wiązki jest równa średniej arytmetycznej wszystkich impedancji pętli ziemnopowrotnych występujących w tej wiązce:

$$\underline{Z}_{MwL_i} = \frac{2}{m_i(m_i-1)} \sum_{\substack{k=1, p=1 \\ p > k}}^{m_i} \underline{Z}_{M(L_i k - L_i p)}. \quad (8.5)$$

Po podstawieniu do równania (8.5) zależności na impedancję wzajemną (3.6), otrzymuje się:

$$\underline{Z}_{MwL_i} \approx 0,049 + j0,145 \log \frac{\delta}{D_{wi}}, \quad (8.6)$$

gdzie:

$$D_{wi} = \left( \prod_{\substack{k=1, p=2 \\ p > k}}^{m_i} a_{kp} \right)^{\frac{2}{m_i(m_i-1)}} - \text{średnia geometryczna wszystkich odstępów między przewodami}$$

w  $m_i$ -przewodowej wiązce,

$a_{kp}$  – odstęp między przewodami  $k$  i  $p$  wiązki,  $k, p = \{1, \dots, m_i\}$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ .

Z uwagi na fakt, że przewody wchodzące w skład wiązki fazy  $L_i$  są ze sobą połączone na obu końcach, to napięcie dowolnego przewodu tej wiązki  $\underline{U}_{L_i k}$  wynosi:

$$\underline{U}_{L_i k} = \frac{1}{m_i} \underline{I}_{L_i} \left( \underline{Z}_{wL_i k} + (m_i - 1) \underline{Z}_{MwL_i} \right), \quad (8.7)$$

a zatem impedancja przewodu zastępczego (równoważnego) wiązki  $\underline{Z}_{wzL_i}$ :

$$\underline{Z}_{WzL_i} = \frac{\underline{U}_{L_i, k}}{\underline{I}_{L_i}} = \frac{1}{m_i} \left( \underline{Z}_{WzL_i, k} + (m_i - 1) \underline{Z}_{MwL_i} \right), \quad (8.8)$$

ostatecznie:

$$\underline{Z}_{WzL_i} \approx \frac{1}{m_i} R'_k + 0,049 + j0,145 \log \frac{\delta}{\sqrt[m_i]{GMR \cdot D_{wi}^{m_i-1}}}. \quad (8.9)$$

Można udowodnić, że:

$$\underline{Z}_{WzL_i} \approx \frac{1}{m_i} R'_k + 0,049 + j0,145 \log \frac{\delta}{\sqrt[m_i]{GMR \cdot m_i \cdot R_i^{m_i-1}}}, \quad (8.10)$$

gdzie:  $R_i$  – promień okręgu opisanego na wiązkowym przewodzie fazowym toru  $i$ , stąd  $D_{wi} = \sqrt[m_i]{m_i R_i}$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ .

W wyniku przedstawionego przekształcenia (agregacji), impedancje  $\underline{Z}_{M(L_k - K_{ip})}$  (3.20),  $k, p = \{1, \dots, m_i\}$ , skojarzone z oddziaływaniem przewodów fazowych w obrębie każdego toru  $i$  oraz impedancje  $\underline{Z}_{m(L_k - K_{jp})}$  (3.22),  $k = \{1, \dots, m_i\}$ ,  $p = \{1, \dots, m_j\}$ ,  $j \neq i$ , związane ze wzajemnym oddziaływaniem przewodów należących do różnych torów, pozostają bez zmian, ponieważ odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami fazowymi należącymi do wspólnego toru, jak również odległości pomiędzy przewodami fazowymi należącymi do dwóch różnych torów są znacznie większe od odległości przewodów tworzących wiązkę.

Ostatecznie macierz impedancyjna  $\mathbf{Z}^w$ , daną przez (8.1), opisującą  $n$ -torową linię napowietrzną o wiązkowych przewodach fazowych, spełniającą zależność  $\mathbf{U}^w = \mathbf{Z}^w \mathbf{I}^w$ , przekształca się w macierz  $\mathbf{Z}$  o wymiarze  $3n \times 3n$  (8.18), gdzie w równaniu występują prądy fazowe  $\underline{I}_{L_i}$  oraz napięcia fazowe  $\underline{U}_{L_i}$  (8.17) poszczególnych  $i$ -tych torów linii  $n$ -torowej [2, 6, 22]. Dzięki agregacji  $m$ -przewodów wiązki w jeden przewód zastępczy otrzymuje się jedynie węzły fazowe, do których dopływa prąd fazowy i występuje napięcie fazowe, co znacząco redukuje liczbę równań opisujących linię  $n$ -torową.

Analogiczne rozważania prowadzi się dla parametrów poprzecznych. W tym przypadku zakłada się, że potencjały przewodów wiązki oraz ładunki na powierzchniach tych przewodów są jednakowe, wówczas:

$$\underline{V}_{L_i, k} = \underline{V}_{L_i}, \quad (8.11)$$

$$\sum_{k=1}^{m_i} \underline{Q}_{L_i, k} = \underline{Q}_{L_i}, \quad (8.12)$$

gdzie:  $k \in \{1, \dots, m_i\}$ ,  $L = \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ .

Agregacja  $m$ -przewodowej wiązki w przewód zastępczy sprowadza się do korekty wartości współczynnika potencjałowego własnego przewodu, przez co uzyskuje się nową wartość współczynnika potencjałowego równoważnego przewodu  $P_{WzL_i}$  zgodnie z poniższą zależnością:

$$P_{WzL_i} = \frac{1}{m_i} \left( P_{WL_{i,k}} + (m_i - 1) P_{MwL_i} \right), \quad (8.13)$$

stąd:

$$P_{WzL_i} = \frac{1}{m_i} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_{L_i}}{r_k} \left( \frac{H_{L_iL_i'}}{D_{wi}} \right)^{m_i-1}, \quad (8.14)$$

lub:

$$P_{WzL_i} = \frac{1}{m_i} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_{L_i}}{r_k \cdot m_i} \left( \frac{H_{L_iL_i'}}{R_i} \right)^{m_i-1}, \quad (8.15)$$

gdzie:

$h_{L_i}$  – wysokość zawieszenia przewodu fazowego  $L_i$  nad ziemią,  $L_i \in \{L1, L2, L3\}$ ,  
 $i \in \{I, II, \dots, n\}$ ,

$r_k$  – promień przewodu  $k$  wiązki,  $k \in \{1, \dots, m_i\}$ ,

$H_{L_iL_i'}$  – odległość między przewodem fazowym  $L_i$  a jego lustrzanym odbiciem  $L_i'$ ,  
 $L_i \in \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ ,

$D_{wi} = \left( \prod_{\substack{k=1, p=2 \\ p > k}}^{m_i} a_{kp} \right)^{\frac{2}{m_i(m_i-1)}}$  – średnia geometryczna wszystkich odstępów między przewodami  
w  $m_i$ -przewodowej wiązce,

$a_{kp}$  – odstęp między przewodami  $k$  i  $p$  wiązki,  $k, p = \{1, \dots, m_i\}$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ ,

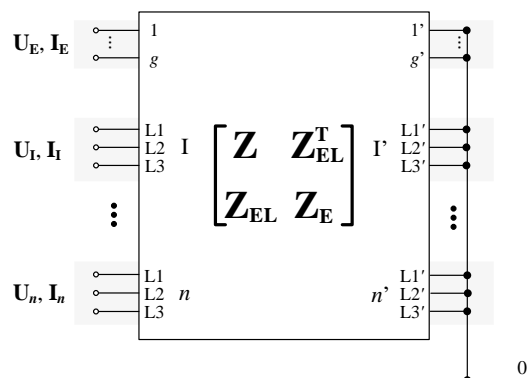
$R_i$  – promień okręgu opisanego na wiązkowym przewodzie fazowym toru  $i$ , stąd  
 $D_{wi} = m_i^{-1} \sqrt{m_i} R_i$ ,  $i = \{I, II, \dots, n\}$ .

Podobnie jak dla parametrów wzdłużnych, z uwagi na przeważające odległości przewodów fazowych danego toru, jak i pary torów prądowych w stosunku do odległości przewodów fazowych tworzących jedną wiązkę, wartości pozostałych potencjałowych współczynników Maxwella, tj.  $P_{M(L_{ik}-K_{ip})} \wedge k, p = \{1, \dots, m_i\}$ ,  $P_{m(L_{jk}-K_{jp})} \wedge k = \{1, \dots, m_i\}$ ,  
 $p = \{1, \dots, m_j\}$ ,  $j \neq i$ , pozostają bez zmian. Macierz  $\mathbf{P}^w$  przekształca się w macierz współczynników potencjałowych  $\mathbf{P}$  o wymiarze docelowym  $3n \times 3n$ .

### 8.1.2 Uwzględnienie oddziaływania przewodów odgromowych

Linie napowietrzne wysokich i najwyższych napięć w swojej konstrukcji są wyposażone w przewody odgromowe, które oddziałują na przewody fazowe linii. W celu ujęcia wpływu tego oddziaływania przy jednoczesnym ograniczeniu liczby równań opisujących WWLN, przez  $g$  oznaczono liczbę przewodów odgromowych oraz jeden z krańców linii połączono z ziemią (rys. 8.4) [2]. Zaznacza się, że w dalszych rozważaniach przewody fazowe WWLN

stanowią pojedyncze przewody na skutek agregacji  $m$ -przewodowych wiązek w przewody zastępcze.



Rys. 8.4 Schemat blokowy WWLN z  $g$  przewodami odgromowymi

Zależność między napięciami i prądami węzłowymi WWLN z  $g$  przewodami odgromowymi opisuje zależność (8.16):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{U}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{Z}_{EL}^T \\ \mathbf{Z}_{EL} & \mathbf{Z}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I}_E \end{bmatrix}, \quad (8.16)$$

gdzie:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1_1} \\ \underline{U}_{L2_1} \\ \underline{U}_{L3_1} \\ \vdots \\ \underline{U}_{L1_n} \\ \underline{U}_{L2_n} \\ \underline{U}_{L3_n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1_1} \\ \underline{I}_{L2_1} \\ \underline{I}_{L3_1} \\ \vdots \\ \underline{I}_{L1_n} \\ \underline{I}_{L2_n} \\ \underline{I}_{L3_n} \end{bmatrix}, \quad (8.17)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Wz L1_1} & \underline{Z}_{M(L1_1-L2_1)} & \underline{Z}_{M(L1_1-L3_1)} & & \underline{Z}_{M(L1_1-L1_n)} & \underline{Z}_{M(L1_1-L2_n)} & \underline{Z}_{M(L1_1-L3_n)} \\ \underline{Z}_{M(L2_1-L1_1)} & \underline{Z}_{Wz L2_1} & \underline{Z}_{M(L2_1-L3_1)} & \cdots & \underline{Z}_{M(L2_1-L1_n)} & \underline{Z}_{M(L2_1-L2_n)} & \underline{Z}_{M(L2_1-L3_n)} \\ \underline{Z}_{M(L3_1-L1_1)} & \underline{Z}_{M(L3_1-L2_1)} & \underline{Z}_{Wz L3_1} & & \underline{Z}_{M(L3_1-L1_n)} & \underline{Z}_{M(L3_1-L2_n)} & \underline{Z}_{M(L3_1-L3_n)} \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ \underline{Z}_{M(L1_n-L1_1)} & \underline{Z}_{M(L1_n-L2_1)} & \underline{Z}_{M(L1_n-L3_1)} & & \underline{Z}_{Wz L1_n} & \underline{Z}_{M(L1_n-L2_n)} & \underline{Z}_{M(L1_n-L3_n)} \\ \underline{Z}_{M(L2_n-L1_1)} & \underline{Z}_{M(L2_n-L2_1)} & \underline{Z}_{M(L2_n-L3_1)} & \cdots & \underline{Z}_{M(L2_n-L1_n)} & \underline{Z}_{Wz L2_n} & \underline{Z}_{M(L2_n-L3_n)} \\ \underline{Z}_{M(L3_n-L1_1)} & \underline{Z}_{M(L3_n-L2_1)} & \underline{Z}_{M(L3_n-L3_1)} & & \underline{Z}_{M(L3_n-L1_n)} & \underline{Z}_{M(L3_n-L2_n)} & \underline{Z}_{Wz L3_n} \end{bmatrix}, \quad (8.18)$$

$\mathbf{U}_E$  – macierz kolumnowa napięć węzłowych przewodów odgromowych o wymiarze  $g \times 1$ ; ze względu na uziemienie przewodów fazowych na krańcach WWLN można zapisać, że macierz napięć przewodów odgromowych jest macierzą kolumnową wypełnioną zerami,  $\mathbf{U}_E = \mathbf{0}$ ,

$\mathbf{I}_E$  – macierz kolumnowa prądów indukowanych w utworzonych przez przewody odgromowe zamknięte pętle ziemnopowrotne o wymiarze  $g \times 1$ ,

$\mathbf{Z}_E$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów odgromowych:

$$\mathbf{Z}_E = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{E1} & \underline{Z}_{E1E2} & \cdots & \underline{Z}_{E1Eg} \\ \vdots & & & \vdots \\ \underline{Z}_{EgE1} & \cdots & \underline{Z}_{EgE(g-1)} & \underline{Z}_{Eg} \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ g \end{matrix}, \quad (8.19)$$

gdzie:

$\underline{Z}_{Eg}$  – impedancja własna przewodu odgromowego  $g$ , liczona według (3.5),

$\underline{Z}_{EgE(g-1)}$  – impedancja wzajemna przewodów odgromowych  $g$  oraz  $(g-1)$ , liczona według (3.6),

$\mathbf{Z}_{EL}$  – macierz impedancji wzajemnych przewodów odgromowych i przewodów fazowych WWLN,

$$\mathbf{Z}_{EL} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{E1-L1_1} & \underline{Z}_{E1-L2_1} & \underline{Z}_{E1-L3_1} & \cdots & \underline{Z}_{E1-L1_n} & \underline{Z}_{E1-L2_n} & \underline{Z}_{E1-L3_n} \\ \vdots & & & & & \vdots & \\ \underline{Z}_{Eg-L1_1} & \underline{Z}_{Eg-L2_1} & \underline{Z}_{Eg-L3_1} & \cdots & \underline{Z}_{Eg-L1_n} & \underline{Z}_{Eg-L2_n} & \underline{Z}_{Eg-L3_n} \end{bmatrix}, \quad (8.20)$$

gdzie:

$\underline{Z}_{Eg-L_i}$  – impedancja wzajemna skojarzona z przewodem odgromowym  $Eg$  i fazą  $L_i$  toru prądowego  $i$  WWLN,  $L_i \in \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ .

By uwzględnić wpływ zamkniętych obwodów: przewód odgromowy - ziemia dąży się do przekształcenia macierzy impedancyjnej stopnia  $(3n + g) \times (3n + g)$  zapisanej zależnością (8.21) w macierz stopnia  $3n \times 3n$  poprzez eliminację  $g$  węzłów przewodów odgromowych.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{Z}_{EL}^T \\ \mathbf{Z}_{EL} & \mathbf{Z}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Wz L1_1} & \underline{Z}_M(L1_1-L2_1) & \underline{Z}_M(L1_1-L3_1) & \underline{Z}_M(L1_1-L1_n) & \underline{Z}_M(L1_1-L2_n) & \underline{Z}_M(L1_1-L3_n) & \underline{Z}_{E1-L1_1} & \underline{Z}_{Eg-L1_1} \\ \underline{Z}_M(L2_1-L1_1) & \underline{Z}_{Wz L2_1} & \underline{Z}_M(L2_1-L3_1) & \cdots & \underline{Z}_M(L2_1-L1_n) & \underline{Z}_M(L2_1-L2_n) & \underline{Z}_M(L2_1-L3_n) & \underline{Z}_{E1-L2_1} & \cdots & \underline{Z}_{Eg-L2_1} \\ \underline{Z}_M(L3_1-L1_1) & \underline{Z}_M(L3_1-L2_1) & \underline{Z}_{Wz L3_1} & \underline{Z}_M(L3_1-L1_n) & \underline{Z}_M(L3_1-L2_n) & \underline{Z}_M(L3_1-L3_n) & \underline{Z}_{E1-L3_1} & \underline{Z}_{Eg-L3_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Z}_M(L1_n-L1_1) & \underline{Z}_M(L1_n-L2_1) & \underline{Z}_M(L1_n-L3_1) & \underline{Z}_{Wz L1_n} & \underline{Z}_M(L1_n-L2_n) & \underline{Z}_M(L1_n-L3_n) & \underline{Z}_{E1-L1_n} & \underline{Z}_{Eg-L1_n} \\ \underline{Z}_M(L2_n-L1_1) & \underline{Z}_M(L2_n-L2_1) & \underline{Z}_M(L2_n-L3_1) & \cdots & \underline{Z}_M(L2_n-L1_n) & \underline{Z}_{Wz L2_n} & \underline{Z}_M(L2_n-L3_n) & \underline{Z}_{E1-L2_n} & \cdots & \underline{Z}_{Eg-L2_n} \\ \underline{Z}_M(L3_n-L1_1) & \underline{Z}_M(L3_n-L2_1) & \underline{Z}_M(L3_n-L3_1) & \underline{Z}_M(L3_n-L1_n) & \underline{Z}_M(L3_n-L2_n) & \underline{Z}_{Wz L3_n} & \underline{Z}_{E1-L3_n} & \underline{Z}_{Eg-L3_n} \\ \underline{Z}_{E1-L1_1} & \underline{Z}_{E1-L2_1} & \underline{Z}_{E1-L3_1} & \cdots & \underline{Z}_{E1-L1_n} & \underline{Z}_{E1-L2_n} & \underline{Z}_{E1-L3_n} & \underline{Z}_{E1} & \cdots & \underline{Z}_{E1Eg} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{Eg-L1_1} & \underline{Z}_{Eg-L2_1} & \underline{Z}_{Eg-L3_1} & \underline{Z}_{Eg-L1_n} & \underline{Z}_{Eg-L2_n} & \underline{Z}_{Eg-L3_n} & \underline{Z}_{EgE1} & \cdots & \underline{Z}_{Eg} \end{bmatrix} \quad (8.21)$$

Rozwiązując układ równań (8.16) otrzymuje się:



$$\mathbf{U} = (\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{\text{EL}}^{\text{T}} \mathbf{Z}_{\text{E}}^{-1} \mathbf{Z}_{\text{EL}}) \mathbf{I}. \quad (8.22)$$

Wyrażenie (8.23) jest tzw. „poprawką” wartości impedancji przewodów fazowych wynikającą z oddziaływania przewodów odgromowych. Zastosowanie opisanego przekształcenia powoduje wyeliminowanie  $g$  węzłów przewodów odgromowych i uzyskanie macierzy impedancyjnej o docelowym wymiarze  $3n \times 3n$ .

$$\mathbf{Z}_{\text{popr}} = \mathbf{Z}_{\text{EL}}^{\text{T}} \mathbf{Z}_{\text{E}}^{-1} \mathbf{Z}_{\text{EL}}, \quad (8.23)$$

$$\mathbf{Z}_{\text{popr}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\text{e} L1_1} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_1-L2_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_1-L3_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_1-L1_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_1-L2_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_1-L3_n)} \\ \underline{Z}_{\text{e} (L2_1-L1_1)} & \underline{Z}_{\text{e} L2_1} & \underline{Z}_{\text{e} (L2_1-L3_1)} & \cdots & \underline{Z}_{\text{e} (L2_1-L1_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L2_1-L2_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L2_1-L3_n)} \\ \underline{Z}_{\text{e} (L3_1-L1_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L3_1-L2_1)} & \underline{Z}_{\text{e} L3_1} & & \underline{Z}_{\text{e} (L3_1-L1_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L3_1-L2_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L3_1-L3_n)} \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ \underline{Z}_{\text{e} (L1_n-L1_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_n-L2_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_n-L3_1)} & & \underline{Z}_{\text{e} L1_n} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_n-L2_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L1_n-L3_n)} \\ \underline{Z}_{\text{e} (L2_n-L1_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L2_n-L2_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L2_n-L3_1)} & \cdots & \underline{Z}_{\text{e} (L2_n-L1_n)} & \underline{Z}_{\text{e} L2_n} & \underline{Z}_{\text{e} (L2_n-L3_n)} \\ \underline{Z}_{\text{e} (L3_n-L1_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L3_n-L2_1)} & \underline{Z}_{\text{e} (L3_n-L3_1)} & & \underline{Z}_{\text{e} (L3_n-L1_n)} & \underline{Z}_{\text{e} (L3_n-L2_n)} & \underline{Z}_{\text{e} L3_n} \end{bmatrix}. \quad (8.24)$$

Zatem ostateczną postać macierzy impedancyjnej  $\mathbf{Z}^{\text{e}}$  uwzględniającej oddziaływanie przewodów odgromowych uzyskuje się następująco:

$$\mathbf{Z}^{\text{e}} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{\text{popr}}, \quad (8.25)$$

stąd:

$$\mathbf{Z}^{\text{e}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\text{Wz} L1_1}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_1-L2_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_1-L3_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_1-L1_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_1-L2_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_1-L3_n)}^{\text{e}} \\ \underline{Z}_{\text{M}(L2_1-L1_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{Wz} L2_1}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L2_1-L3_1)}^{\text{e}} & \cdots & \underline{Z}_{\text{M}(L2_1-L1_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L2_1-L2_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L2_1-L3_n)}^{\text{e}} \\ \underline{Z}_{\text{M}(L3_1-L1_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L3_1-L2_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{Wz} L3_1}^{\text{e}} & & \underline{Z}_{\text{M}(L3_1-L1_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L3_1-L2_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L3_1-L3_n)}^{\text{e}} \\ & \vdots & & \ddots & & \vdots & \\ \underline{Z}_{\text{M}(L1_n-L1_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_n-L2_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_n-L3_1)}^{\text{e}} & & \underline{Z}_{\text{Wz} L1_n}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_n-L2_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L1_n-L3_n)}^{\text{e}} \\ \underline{Z}_{\text{M}(L2_n-L1_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L2_n-L2_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L2_n-L3_1)}^{\text{e}} & \cdots & \underline{Z}_{\text{M}(L2_n-L1_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{Wz} L2_n}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L2_n-L3_n)}^{\text{e}} \\ \underline{Z}_{\text{M}(L3_n-L1_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L3_n-L2_1)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L3_n-L3_1)}^{\text{e}} & & \underline{Z}_{\text{M}(L3_n-L1_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{M}(L3_n-L2_n)}^{\text{e}} & \underline{Z}_{\text{Wz} L3_n}^{\text{e}} \end{bmatrix},$$

gdzie:

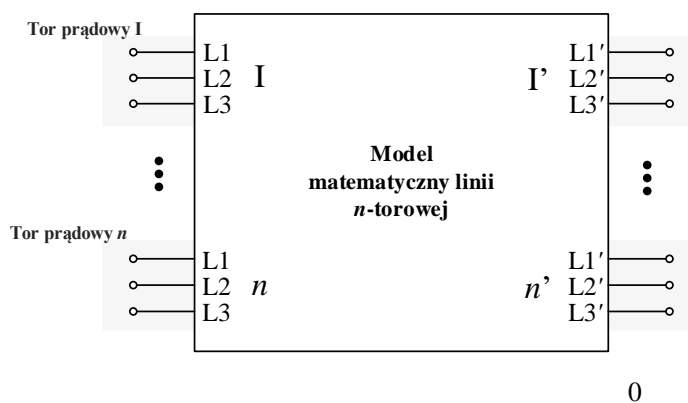
$$\underline{Z}_{\text{Wz} L_i}^{\text{e}} = \underline{Z}_{\text{Wz} L_i} - \underline{Z}_{\text{e} L_i} \quad \text{dla } i \in \{\text{I, II, ..., } n\}, L \in \{L1, L2, L3\},$$

$$\underline{Z}_{\text{M}(K_i-L_i)}^{\text{e}} = \underline{Z}_{\text{M}(K_i-L_i)} - \underline{Z}_{\text{e}(K_i-L_i)} \quad \text{dla } i \in \{\text{I, II, ..., } n\}, L, K \in \{L1, L2, L3\} \wedge K \neq L,$$

$$\underline{Z}_{\text{m}(K_i-L_j)}^{\text{e}} = \underline{Z}_{\text{m}(K_i-L_j)} - \underline{Z}_{\text{e}(K_i-L_j)} \quad \text{dla } i, j \in \{\text{I, II, ..., } n\} \wedge j \neq i, L, K \in \{L1, L2, L3\}.$$

Po dokonaniu **przekształceń agregacji przewodów wiązkowych oraz eliminacji węzłów przewodów odgromowych**, powraca się do macierzy impedancyjnej  $\mathbf{Z}$  o wymiarze (8.26), i postaci (3.25) – rysunek 8.5:

$$W'' = 2 \cdot (3 \cdot n). \quad (8.26)$$



Rys. 8.5 Zredukowany model WWLN

Analogiczne zależności zachodzą dla współczynników potencjałowych Maxwella, wówczas zależność między potencjałami i ładunkami WWLN z  $g$  przewodami odgromowymi opisuje zależność:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{P}_{EL}^T \\ \mathbf{P}_{EL} & \mathbf{P}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q}_E \end{bmatrix}, \quad (8.27)$$

gdzie:

$\mathbf{V}_E$  – macierz kolumnowa potencjałów węzłowych przewodów odgromowych o wymiarze  $g \times 1$ ; ze względu na uziemienie przewodów fazowych na krańcach WWLN można zapisać, że macierz potencjałów przewodów odgromowych jest macierzą kolumnową wypełnioną zerami,  $\mathbf{V}_E = \mathbf{0}$ ,

$\mathbf{Q}_E$  – macierz kolumnowa ładunków indukowanych na powierzchniach przewodów odgromowych o wymiarze  $g \times 1$ ,

$\mathbf{P}_E$  – macierz współczynników potencjałowych Maxwella własnych i wzajemnych przewodów odgromowych liczone kolejno według (3.48) oraz (3.49); struktura macierzy jest analogiczna jak dla macierzy  $\mathbf{Z}_E$  (8.19),

$\mathbf{P}_{EL}$  – macierz współczynników potencjałowych Maxwella wzajemnych skojarzonych z przewodami odgromowymi i przewodami fazowymi WWLN, liczone według (3.49); struktura macierzy jest analogiczna jak macierzy  $\mathbf{Z}_{LE}$  (8.20).

Rozwiązanie układu równań (8.27) pozwala uzyskać zależność (8.28) będącą macierzą współczynników potencjałowych Maxwella ujmujących oddziaływanie przewodów odgromowych:

$$\mathbf{P}^e = \mathbf{P} - \mathbf{P}_{EL}^T \mathbf{P}_E^{-1} \mathbf{P}_{EL}. \quad (8.28)$$

Realizacja powyższego przekształcenia sprowadza się do pomniejszenia każdego z elementów macierzy  $\mathbf{P}$  o wartość „poprawki”  $\mathbf{P}_{popr}$  (struktura analogiczna jak (8.24)):

$$\mathbf{P}_{popr} = \mathbf{P}_{EL}^T \mathbf{P}_E^{-1} \mathbf{P}_{EL}, \quad (8.29)$$

wtedy:

$$\mathbf{P}^e = \begin{bmatrix} P_{Wz L1_1}^e & P_{M(L1_1-L2_1)}^e & P_{M(L1_1-L3_1)}^e & & P_{m(L1_1-L1_n)}^e & P_{m(L1_1-L2_n)}^e & P_{m(L1_1-L3_n)}^e \\ P_{M(L2_1-L1_1)}^e & P_{Wz L2_1}^e & P_{M(L2_1-L3_1)}^e & \cdots & P_{m(L2_1-L1_n)}^e & P_{m(L2_1-L2_n)}^e & P_{m(L2_1-L3_n)}^e \\ P_{M(L3_1-L1_1)}^e & P_{M(L3_1-L2_1)}^e & P_{Wz L3_1}^e & & P_{m(L3_1-L1_n)}^e & P_{m(L3_1-L2_n)}^e & P_{m(L3_1-L3_n)}^e \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & \\ P_{m(L1_n-L1_1)}^e & P_{m(L1_n-L2_1)}^e & P_{m(L1_n-L3_1)}^e & & P_{Wz L1_n}^e & P_{M(L1_n-L2_n)}^e & P_{M(L1_n-L3_n)}^e \\ P_{m(L2_n-L1_1)}^e & P_{m(L2_n-L2_1)}^e & P_{m(L2_n-L3_1)}^e & \cdots & P_{M(L2_n-L1_n)}^e & P_{Wz L2_n}^e & P_{M(L2_n-L3_n)}^e \\ P_{m(L3_n-L1_1)}^e & P_{m(L3_n-L2_1)}^e & P_{m(L3_n-L3_1)}^e & & P_{M(L3_n-L1_n)}^e & P_{M(L3_n-L2_n)}^e & P_{Wz L3_n}^e \end{bmatrix},$$

gdzie:

$$P_{Wz L_i}^e = P_{Wz L_i} - P_{e L_i} \quad \text{dla } i \in \{I, II, \dots, n\}, L \in \{L1, L2, L3\},$$

$$P_{M(K_i-L_i)}^e = P_{M(K_i-L_i)} - P_{e(K_i-L_i)} \quad \text{dla } i \in \{I, II, \dots, n\}, L, K \in \{L1, L2, L3\} \wedge K \neq L,$$

$$P_{m(K_i-L_j)}^e = P_{m(K_i-L_j)} - P_{e(K_i-L_j)} \quad \text{dla } i, j \in \{I, II, \dots, n\} \wedge j \neq i, L, K \in \{L1, L2, L3\}.$$

Macierz pojemności dla wielkości fazowych przy uwzględnieniu oddziaływania przewodów odgromowych, zgodnie z przekształceniem

$$\mathbf{C}^e = (\mathbf{P}^e)^{-1},$$

przyjmuje postać:

$$\mathbf{C}^e = \begin{bmatrix} C_{Wz L1_1}^e & C_{M(L1_1-L2_1)}^e & C_{M(L1_1-L3_1)}^e & & C_{m(L1_1-L1_n)}^e & C_{m(L1_1-L2_n)}^e & C_{m(L1_1-L3_n)}^e \\ C_{M(L2_1-L1_1)}^e & C_{Wz L2_1}^e & C_{M(L2_1-L3_1)}^e & \cdots & C_{m(L2_1-L1_n)}^e & C_{m(L2_1-L2_n)}^e & C_{m(L2_1-L3_n)}^e \\ C_{M(L3_1-L1_1)}^e & C_{M(L3_1-L2_1)}^e & C_{Wz L3_1}^e & & C_{m(L3_1-L1_n)}^e & C_{m(L3_1-L2_n)}^e & C_{m(L3_1-L3_n)}^e \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & \\ C_{m(L1_n-L1_1)}^e & C_{m(L1_n-L2_1)}^e & C_{m(L1_n-L3_1)}^e & & C_{Wz L1_n}^e & C_{M(L1_n-L2_n)}^e & C_{M(L1_n-L3_n)}^e \\ C_{m(L2_n-L1_1)}^e & C_{m(L2_n-L2_1)}^e & C_{m(L2_n-L3_1)}^e & \cdots & C_{M(L2_n-L1_n)}^e & C_{Wz L2_n}^e & C_{M(L2_n-L3_n)}^e \\ C_{m(L3_n-L1_1)}^e & C_{m(L3_n-L2_1)}^e & C_{m(L3_n-L3_1)}^e & & C_{M(L3_n-L1_n)}^e & C_{M(L3_n-L2_n)}^e & C_{Wz L3_n}^e \end{bmatrix}. \quad (8.30)$$

### 8.1.3 Uwzględnienie zróżnicowania poziomów napięć znamionowych torów prądowych WWLN

Uwzględnienie w modelu matematycznym zróżnicowania poziomów napięć znamionowych torów prądowych  $n$ -torowej linii napowietrznej realizuje się za pomocą zastosowania jednostek względnych (pu – ang. *per unit*). Sprowadzenie to polega na przeliczeniu parametrów lub zmiennych opisujących dany obiekt z wielkości mianowanych na wielkości niemianowane, przy użyciu wielkości bazowej, wówczas:

$$A_{pu} = \frac{A}{A_b}, \quad (8.31)$$

gdzie:

$A_{pu}$  – wielkość/parametr w jednostkach względnych pu,

$A$  – wielkość/parametr w jednostkach mianowanych,

$A_b$  – wielkość bazowa, in. wielkość odniesienia.

Przekształcenie (8.31) jest przekształceniem liniowym, w którym uzyskanie parametrów modelu w jednostkach względnych uzyskuje się poprzez pomnożenie macierzy prądów  $\mathbf{I}$  oraz napięć  $\mathbf{U}$  przez macierze przekształcenia, wtedy:

$$\mathbf{I}^{pu} = \mathbf{I}_b^{-1} \mathbf{I}, \quad \mathbf{U}^{pu} = \mathbf{U}_b^{-1} \mathbf{U}, \quad (8.32)$$

gdzie macierze przekształcenia prądów  $\mathbf{I}_b$  (8.33) oraz napięć  $\mathbf{U}_b$  (8.34) są diagonalne i nieosobliwe:

$$\mathbf{I}_b = S_b \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{I} & \text{II} & \cdots & n \end{array} \\ \left[ \begin{array}{cccc} U_{b\text{I}}^{-1} \mathbf{1} & & & \\ & U_{b\text{II}}^{-1} \mathbf{1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & U_{bn}^{-1} \mathbf{1} \end{array} \right] \begin{array}{c} \text{I} \\ \text{II} \\ \vdots \\ n \end{array} \end{array}, \quad (8.33)$$

$$\mathbf{U}_b = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{I} & \text{II} & \cdots & n \end{array} \\ \left[ \begin{array}{cccc} U_{b\text{I}} \mathbf{1} & & & \\ & U_{b\text{II}} \mathbf{1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & U_{bn} \mathbf{1} \end{array} \right] \begin{array}{c} \text{I} \\ \text{II} \\ \vdots \\ n \end{array} \end{array}, \quad (8.34)$$

oraz:

$U_{bi}$  – napięcie bazowe  $i$ -tego toru linii  $n$ -torowej,

$S_b$  – moc bazowa,

$\mathbf{1}$  – macierz diagonalna jedynek stopnia  $3 \times 3$ .

Szukaną macierz admitancyjną WWLN w jednostkach względnych  $\mathbf{Y}^{pu}$  wyznacza się na podstawie poniższego przekształcenia. Zależność między prądami i napięciami węzłowymi WWLN określa się następująco

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU},$$

chcąc przedstawić prądy i napięcia w jednostkach względnych:

$$\mathbf{I}_b^{-1} \mathbf{I} = \mathbf{I}_b^{-1} \mathbf{YU}_b \mathbf{U}_b^{-1} \mathbf{U},$$

wówczas korzystając z (8.32):

$$\mathbf{I}^{pu} = \mathbf{Y}^{pu} \mathbf{U}^{pu},$$

stąd:

$$\mathbf{Y}^{pu} = \mathbf{I}_b^{-1} \mathbf{YU}_b, \quad (8.35)$$

zatem:

$$Y_{bi} = S_b U_{bi}^{-2} \quad \text{oraz} \quad Y_{bi,j} = S_b (U_{bi} U_{bj})^{-1}. \quad (8.36)$$

W przypadku przekształcenia macierzy  $\mathbf{Z}$  otrzymuje się analogiczne przekształcenie jak dla macierzy  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{Z}^{pu} = \mathbf{U}_b^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{I}_b, \quad (8.37)$$

wtedy:

$$Z_{bi} = S_b^{-1} U_{bi}^2 \quad \text{oraz} \quad Z_{bi,j} = S_b^{-1} U_{bi} U_{bj}. \quad (8.38)$$

Dla modelu parametrów poprzecznych macierze susceptancji, mające strukturę macierzy admitancyjnych, zostają przekształcone analogicznie jak dla parametrów wzdłużnych (8.35), przy czym:

$$B_{bi} = \omega C_{bi} = S_b U_{bi}^{-2} \quad \text{oraz} \quad B_{bi,j} = B_{bj,i} = \omega C_{bi,j} = S_b (U_{bi} U_{bj})^{-1}, \quad (8.39)$$

zatem:

$$C_{bi} = \frac{1}{\omega} S_b U_{bi}^{-2} \quad \text{oraz} \quad C_{bi,j} = C_{bj,i} = \frac{1}{\omega} S_b (U_{bi} U_{bj})^{-1}. \quad (8.40)$$

#### 8.1.4 Przypadek szczególny – linia symetryczna

Zakładając pełną symetrię fazową WWLN zachodzą następujące relacje:

- impedancje własne przewodów fazowych każdego toru prądowego  $i$ ,  $i \in \{\text{I, II, } \dots, n\}$ , liczone według (8.9), spełniają zależność:

$$\underline{Z}_{WzL1_i} = \underline{Z}_{WzL2_i} = \underline{Z}_{WzL3_i} = \underline{Z}_{Wz_i},$$

analogicznie dla współczynników potencjałowych Maxwella własnych przewodów fazowych oraz:

$$P_{WzL1_i} = P_{WzL2_i} = P_{WzL3_i} = P_{Wz_i},$$

liczone na podstawie (8.14):

$$P_{Wz_i} = \frac{1}{m_i} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i} \left( \frac{H_i}{D_{wi}} \right)^{m_i-1},$$

gdzie  $h_i$  – średnia geometryczna odległości przewodów fazowych toru prądowego  $i$  od ziemi;  $r_i$  – promień przewodu fazowego należącego do toru prądowego  $i$ ,  $H_i$  – średnia geometryczna odległości między przewodami fazowymi toru prądowego  $i$  a ich lustrzanymi odbiciami;

- impedancje wzajemne skojarzone z przewodami fazowymi toru prądowego  $i$ ,  $i \in \{\text{I, II, } \dots, n\}$ , spełniają zależność:

$$\underline{Z}_{ML1_i} = \underline{Z}_{ML2_i} = \underline{Z}_{ML3_i} = \underline{Z}_{M_i},$$

przy czym wartość impedancji  $\underline{Z}_{M_i}$  liczona jest według (8.41)

$$\underline{Z}_{Mi} \approx 0,049 + j0,145 \frac{\delta}{D_i}, \quad (8.41)$$

gdzie:  $D_i$  – średnia geometryczna odległości między przewodami fazowymi toru prądowego  $i$ .

Analogicznie dla jednostkowych współczynników potencjałowych Maxwella oraz:

$$P_{ML1_i} = P_{ML2_i} = P_{ML3_i} = P_{Mi},$$

wówczas:

$$P_{Mi} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_i}{D_i},$$

gdzie:  $H_i$  – średnia geometryczna odległości między przewodami fazowymi toru prądowego  $i$  a ich lustrzanymi odbiciami;

• impedancje wzajemne skojarzone z przewodami fazowymi należącymi do dwóch różnych torów prądowych  $i, j$  WWLN,  $i, j \in \{I, II, \dots, n\} \wedge j \neq i$ , spełniają zależności

$$\underline{Z}_{m(L_i-K_j)} = \underline{Z}_{m(K_i-L_j)} \text{ oraz}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{m(L1_i-L1_j)} &= \underline{Z}_{m(L1_i-L2_j)} = \underline{Z}_{m(L1_i-L3_j)} = \underline{Z}_{m(L2_i-L1_j)} = \underline{Z}_{m(L2_i-L2_j)} = \\ &= \underline{Z}_{m(L2_i-L3_j)} = \underline{Z}_{m(L3_i-L1_j)} = \underline{Z}_{m(L3_i-L2_j)} = \underline{Z}_{m(L3_i-L3_j)} = \underline{Z}_{mi,j}, \end{aligned}$$

gdzie:  $L_i, K_j$  – przewody fazowe torów  $i, j$ ; przy czym impedancja  $\underline{Z}_{mi,j}$  liczona jest według (8.42):

$$\underline{Z}_{mi,j} \approx 0,049 + j0,145 \frac{\delta}{D_{i,j}}, \quad (8.42)$$

gdzie:  $D_{i,j}$  – średnia geometryczna odległości między przewodami fazowymi poszczególnych torów  $i, j$ ;

Analogicznie dla jednostkowych współczynników potencjałowych Maxwella oraz

$$P_{mi,j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{i,j}}{D_{i,j}},$$

gdzie:  $H_{i,j}$  – średnia geometryczna odległości między przewodami fazowymi toru prądowego  $i$  a lustrzanymi odbiciami przewodów fazowych toru  $j$ ;

• impedancje wzajemne skojarzone z przewodami odgromowymi  $Eg$  i przewodami fazowymi  $L_i$  toru prądowego  $i$  WWLN,  $Eg \in \{1, 2, \dots\}$ ,  $L_i \in \{L1, L2, L3\}$ ,  $i \in \{I, II, \dots, n\}$ , spełniają zależność:

$$\underline{Z}_{Eg-L1_i} = \underline{Z}_{Eg-L2_i} = \underline{Z}_{Eg-L3_i} = \underline{Z}_{Eg-i},$$

przy czym impedancja  $\underline{Z}_{Eg-i}$  liczona jest według (8.43)

$$\underline{Z}_{Egi} \approx 0,049 + j0,145 \frac{\delta}{D_{Eg-i}}, \quad (8.43)$$

gdzie:  $D_{Eg-i}$  – średnia geometryczna odległości między przewodem odgromowym  $Eg$  i przewodami fazowymi toru  $i$ ;

Analogicznie dla jednostkowych potencjałowych współczynników Maxwella oraz:

$$P_{Egi} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{Eg-i}}{D_{Eg-i}},$$

gdzie:  $H_{Eg-i}$  – średnia geometryczna odległości między przewodem odgromowym  $Eg$  i lustrzanymi odbiciami przewodów fazowych toru prądowego  $i$ .

Wówczas macierz impedancyjna związana z przewodami fazowymi przyjmuje postać:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Wz_1} & \underline{Z}_{M_1} & \underline{Z}_{M_1} & \dots & \underline{Z}_{m_{1,n}} & \underline{Z}_{m_{1,n}} & \underline{Z}_{m_{1,n}} \\ \underline{Z}_{M_1} & \underline{Z}_{Wz_1} & \underline{Z}_{M_1} & \dots & \underline{Z}_{m_{1,n}} & \underline{Z}_{m_{1,n}} & \underline{Z}_{m_{1,n}} \\ \underline{Z}_{M_1} & \underline{Z}_{M_1} & \underline{Z}_{Wz_1} & \dots & \underline{Z}_{m_{1,n}} & \underline{Z}_{m_{1,n}} & \underline{Z}_{m_{1,n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Z}_{m_{n,1}} & \underline{Z}_{m_{n,1}} & \underline{Z}_{m_{n,1}} & \dots & \underline{Z}_{Wz_n} & \underline{Z}_{M_n} & \underline{Z}_{M_n} \\ \underline{Z}_{m_{n,1}} & \underline{Z}_{m_{n,1}} & \underline{Z}_{m_{n,1}} & \dots & \underline{Z}_{M_n} & \underline{Z}_{Wz_n} & \underline{Z}_{M_n} \\ \underline{Z}_{m_{n,1}} & \underline{Z}_{m_{n,1}} & \underline{Z}_{m_{n,1}} & \dots & \underline{Z}_{M_n} & \underline{Z}_{M_n} & \underline{Z}_{Wz_n} \end{bmatrix},$$

a macierz wynikająca z oddziaływania przewodów odgromowych opisana przez (8.24) przyjmuje postać:

$$\mathbf{Z}_{\text{popr}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{e_1} & \underline{Z}_{e_1} & \underline{Z}_{e_1} & \dots & \underline{Z}_{e_{1,n}} & \underline{Z}_{e_{1,n}} & \underline{Z}_{e_{1,n}} \\ \underline{Z}_{e_1} & \underline{Z}_{e_1} & \underline{Z}_{e_1} & \dots & \underline{Z}_{e_{1,n}} & \underline{Z}_{e_{1,n}} & \underline{Z}_{e_{1,n}} \\ \underline{Z}_{e_1} & \underline{Z}_{e_1} & \underline{Z}_{e_1} & \dots & \underline{Z}_{e_{1,n}} & \underline{Z}_{e_{1,n}} & \underline{Z}_{e_{1,n}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \underline{Z}_{e_{n,1}} & \underline{Z}_{e_{n,1}} & \underline{Z}_{e_{n,1}} & \dots & \underline{Z}_{e_n} & \underline{Z}_{e_n} & \underline{Z}_{e_n} \\ \underline{Z}_{e_{n,1}} & \underline{Z}_{e_{n,1}} & \underline{Z}_{e_{n,1}} & \dots & \underline{Z}_{e_n} & \underline{Z}_{e_n} & \underline{Z}_{e_n} \\ \underline{Z}_{e_{n,1}} & \underline{Z}_{e_{n,1}} & \underline{Z}_{e_{n,1}} & \dots & \underline{Z}_{e_n} & \underline{Z}_{e_n} & \underline{Z}_{e_n} \end{bmatrix}$$

oraz w przypadku występowania jednego przewodu odgromowego  $g = 1$ :

$$\underline{Z}_{e_i} = \frac{\underline{Z}_{E1-i}^2}{\underline{Z}_{E1}},$$

$$\underline{Z}_{e_{i,j}} = \frac{\underline{Z}_{E1-i} \underline{Z}_{E1-j}}{\underline{Z}_{E1}} \text{ oraz } \underline{Z}_{e_{j,i}} = \underline{Z}_{e_{i,j}}.$$

Stosując przekształcenie (8.25) oraz przechodząc na składowe symetryczne otrzymuje się macierze impedancyjne składowych symetrycznych WWLN:

$$\mathbf{Z}_1^c = \mathbf{Z}_2^c = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Wz_1} - \underline{Z}_{M_1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \underline{Z}_{Wz_n} - \underline{Z}_{M_n} & \\ & & & n \end{bmatrix} \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{1,11}^c & & & \\ & \ddots & & \\ & & \underline{Z}_{1,n,n}^c & \\ & & & n \end{bmatrix} \mathbf{I},$$

$$\mathbf{Z}_0^e = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Wz_1} + 2\underline{Z}_{M_1} - 3\underline{Z}_{e_1} & \cdots & 3\underline{Z}_{m_{1,n}} - 3\underline{Z}_{e_{1,n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 3\underline{Z}_{m_{n,1}} - 3\underline{Z}_{e_{n,1}} & \cdots & \underline{Z}_{Wz_n} + 2\underline{Z}_{M_n} - 3\underline{Z}_{e_n} \end{bmatrix} \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{0\ 1,1}^e & \cdots & \underline{Z}_{0\ 1,n}^e \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{0\ n,1}^e & \cdots & \underline{Z}_{0\ n,n}^e \end{bmatrix} \mathbf{I}$$

Stosując przekształcenie pozwalające przejść na jednostki względne (8.37), otrzymuje się (3.39)÷(3.41):

$$\mathbf{Z}_1^{e,pu} = \mathbf{Z}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_{Wz_1} - \underline{Z}_{M_1}}{\underline{Z}_{b_1}} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{\underline{Z}_{Wz_n} - \underline{Z}_{M_n}}{\underline{Z}_{b_n}} \end{bmatrix} \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{1\ 1,1}^{e,pu} & & \\ & \ddots & \\ & & \underline{Z}_{1\ n,n}^{e,pu} \end{bmatrix} \mathbf{I}$$

$$\mathbf{Z}_0^{e,pu} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_{Wz_1} + 2\underline{Z}_{M_1} - 3\underline{Z}_{e_1}}{\underline{Z}_{b_1}} & \cdots & \frac{3\underline{Z}_{m_{1,n}} - 3\underline{Z}_{e_{1,n}}}{\underline{Z}_{b_{1,n}}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{3\underline{Z}_{m_{n,1}} - 3\underline{Z}_{e_{n,1}}}{\underline{Z}_{b_{n,1}}} & \cdots & \frac{\underline{Z}_{Wz_n} + 2\underline{Z}_{M_n} - 3\underline{Z}_{e_n}}{\underline{Z}_{b_n}} \end{bmatrix} \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{0\ 1,1}^{e,pu} & \cdots & \underline{Z}_{0\ 1,n}^{e,pu} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{0\ n,1}^{e,pu} & \cdots & \underline{Z}_{0\ n,n}^{e,pu} \end{bmatrix} \mathbf{I}$$

$\underline{Z}_{b_i}$ ,  $\underline{Z}_{b_{i,j}}$  zgodnie z (8.38) oraz  $\underline{Z}_{b_{j,i}} = \underline{Z}_{b_{i,j}}$ .

Analogiczne zależności, na skutek których otrzymuje się macierze wynikowe o odpowiadającej strukturze, zachodzą dla potencjałowych współczynników Maxwella.

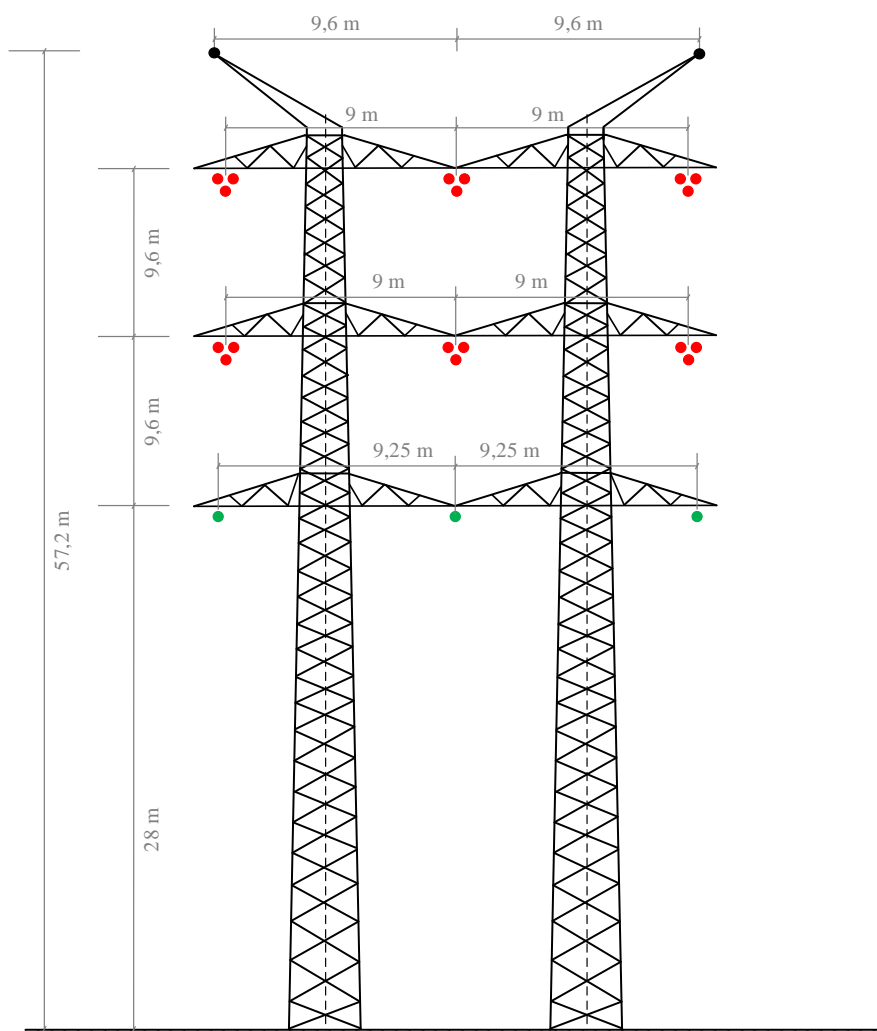


## 8.2 Geometria analizowanych WWLN

### 8.2.1 Parametry geometryczne i materiałowe przyjęte do analiz WWLN

Rozważa się cztery sylwetki WWLN o różnych poziomach napięć znamionowych i stopniu niesymetrii geometrycznej. Pierwsza, druga i trzecia WWLN wsparta jest na konstrukcji wsporczej serii WT335 M6+3 (rys. 8.6), przy czym linie te różnią się sposobem prowadzenia torów prądowych o napięciach znamionowych 400 kV (rys. 4.1a,b,c). Linia o torach prądowych 400 kV w układzie trójkątów i torze prądowym 220 kV w układzie płaskim pokazana na rysunku 4.1a jest rzeczywistą WWLN o długości 4,53 km, pracującą w obszarze PSE-Południe o relacji:

- tor prądowy I (400 kV) Łagisza – Rokitnica,
- tor prądowy II (400 kV) Łagisza – Tucznawa,
- tor prądowy III (220 kV) Łagisza – Joachimów.

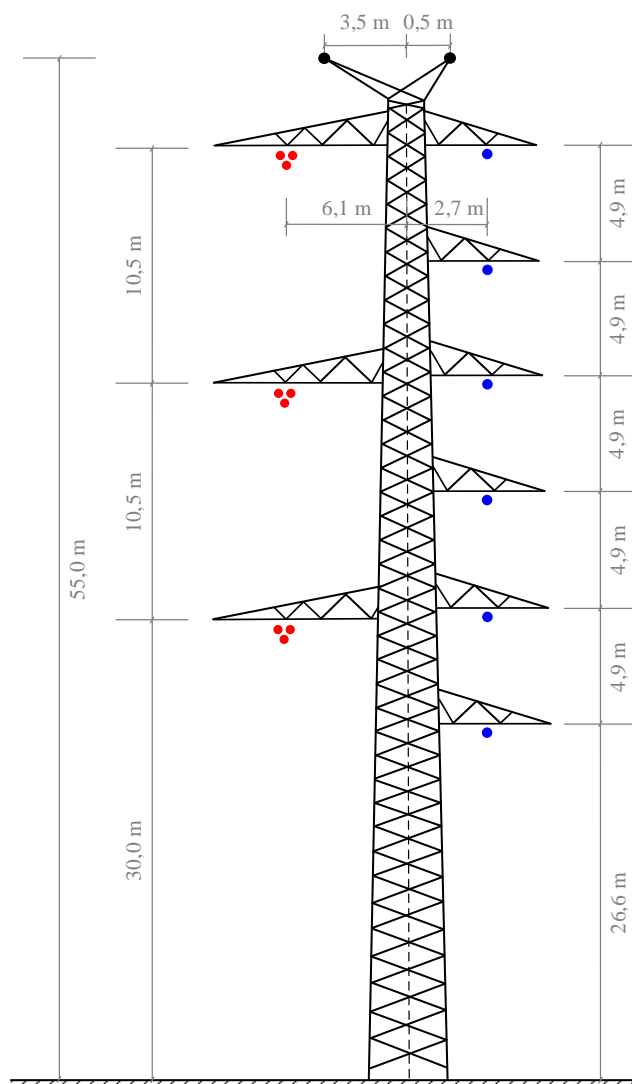


Rys. 8.6 Parametry geometryczne konstrukcji wsporczej serii WT335 M6+3

Czwarta rozważana WWLN to trójtorowa linia dwunapięciowa 400 + 2×110 kV, pracująca w obszarze PSE-Zachód i wychodząca ze stacji elektroenergetycznej Wrocław w kierunku Pasikowic, a dokładniej:

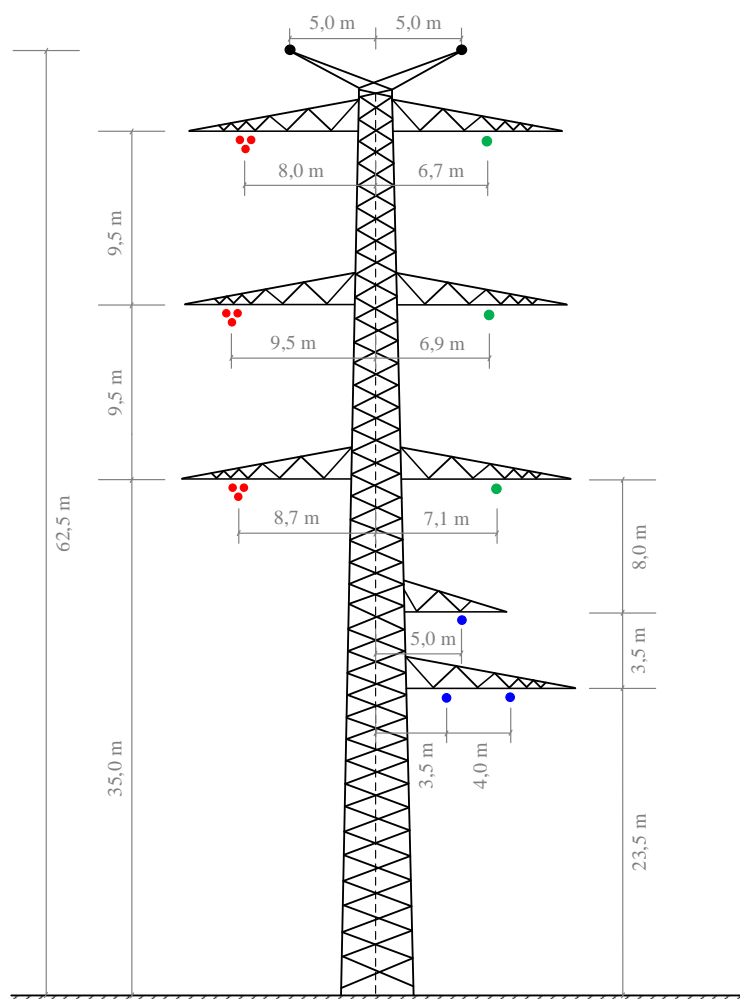
- tor prądowy I (400 kV) Dobrzeń – Wrocław,
- tor prądowy II (110 kV) Żórawina – Wrocław,
- tor prądowy III (110 kV) Bielany – Wrocław,

przewodzona na słupach pełnościennych serii W411 P1-10 (rys. 8.7). Odcinek wielonapięciowy ma długość 6,50 km.



Rys. 8.7 Parametry geometryczne konstrukcji wsporczej serii W411 P1-10

Parametry geometryczne piętej WWLN (rys. 8.8) dobrano w oparciu katalogi słupów 400 kV, 220 kV i 110 kV wzorując się na pracującej w KSE linii przedstawionej na rysunku 2.3f. Następnie, w oparciu o normę [105], parametry te zweryfikowano w ujęciu zapewnienia odpowiednich odstępów izolacyjnych pionowych dla torów prądowych 220 kV i 110 kV.



Rys. 8.8 Parametry geometryczne konstrukcji wsporczej dla linii trójtorowej trójnapięciowej

W tabeli 8.1 zestawiono wybrane parametry elektryczne i materiałowe zastosowane w badanych WWLN dla przewodów fazowych (w zależności od napięcia znamionowego toru prądowego, który tworzą) oraz przewodów odgromowych.

Tab. 8.1 Wybrane parametry elektryczne i materiałowe przewodów analizowanych WWLN [19]

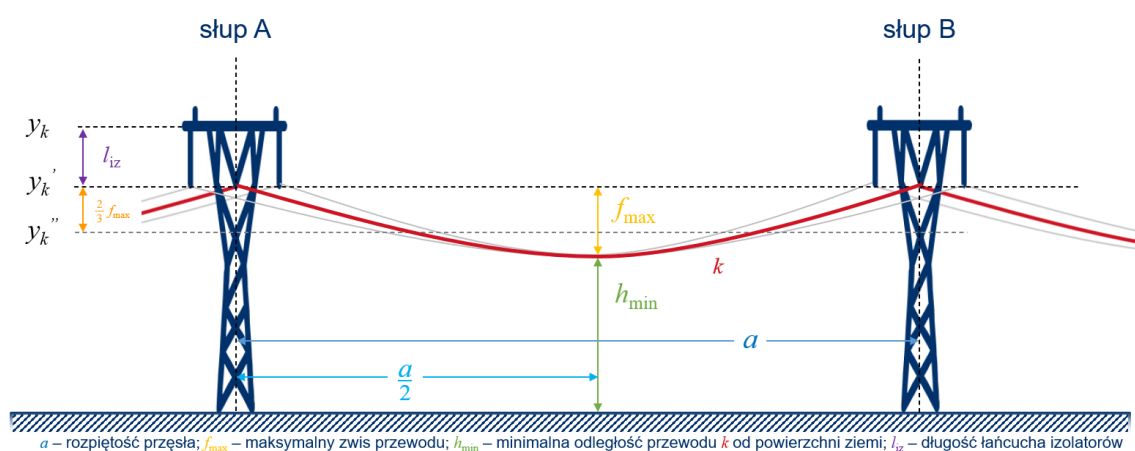
	Napięcie znamionowe toru prądowego, kV	Typ przewodu, -	Średnica zewnętrzna przewodu, mm	Rezystancja jednostkowa w 20°C, Ω/km	Współczynnik zależny od typu przewodu, -	Liczba przewodów w wiązce, -
Przewód fazowy	400	AFL-8 350 mm <sup>2</sup>	26,1	0,0821	0,816	3
	220	AFL-8 525 mm <sup>2</sup>	31,5	0,056	0,816	1
	110	AFL-6 240 mm <sup>2</sup>	21,7	0,124	0,816	1
Przewód odgromowy	-	AFL-1,7 95 mm <sup>2</sup>	15,0	0,345	0,780	1

Do obliczeń parametrów wzdłużnych analizowanych WWLN przyjęto rezystywność gruntu o wartości  $100 \Omega \cdot m$ .

### 8.2.2 Uwzględnienie zwisów i długości łańcuchów izolatorów

W rzeczywistości, w obrębie każdego przęsła, przewody linii napowietrznych przyjmują kształt krzywych łańcuchowych. Krzywa łańcuchowa odwzorowuje giętką linę, o stałym ciężarze na jednostkę długości krzywej, zamocowaną sztywno na końcach.

Zwisem przewodu nazywa się odległość pionową pomiędzy przewodem a linią prostą, łączącą punkty jego zawieszenia. Maksymalny zwis przewodu  $f_{max}$  występuje zawsze w środku przęsła [22]. Dla przęseł poziomych, a więc przęseł bez spadku, miejsce występowania maksymalnego zwisu przewodów jest również miejscem, w którym przewody linii znajdują się w minimalnej odległości od powierzchni ziemi (rys. 8.9).



**Rys. 8.9 Ilustracja zachowania krzywej łańcuchowej oraz maksymalnego zwisu przewodów fazowych linii napowietrznej w przęśle poziomym**

Jedną z decydujących wielkości wpływających na wartość parametrów elektrycznych linii napowietrznej jest wysokość zawieszenia jej przewodów. W prowadzonych analizach przyjmuje się, że przewody WWLN są równoległe do powierzchni ziemi na całej swojej długości. Przyjmuje się prowadzenie WWLN w przęsłach poziomych. W celu wyznaczenia średniej wysokości zawieszenia przewodu nad powierzchnią ziemi, należy uwzględnić długości izolatorów oraz kształt krzywej łańcuchowej. Wysokość zawieszenia przewodów wpływa zarówno na ułożenie poszczególnych torów prądowych względem siebie, co znajduje odzwierciedlenie w parametrach wzdłużnych i poprzecznych WWLN, a także na odległości przewodów do powierzchni ziemi, co zasadniczo wpływa na parametry poprzeczne tej linii.

Z tego powodu w obliczeniach admitancji i pojemności, parametr  $y_k$ , będący wysokością poprzecznika konstrukcji wsporczej, na którym prowadzony jest przewód napowietrzny  $k$ , został skorygowany o przeciętną długość łańcucha izolatorów oraz uwzględnia średnią wysokość zwisania krzywej łańcuchowej nad powierzchnią ziemi, zgodnie z zależnością (8.44) oraz rysunkiem 8.9, gdzie  $k = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  – liczba wszystkich przewodów WWLN.

$$y_k'' = y_k' - \frac{2}{3} f_{\max_i} = y_k - l_{iz_i} - \frac{2}{3} f_{\max_i}, \quad (8.44)$$

gdzie:

$y_k''$  – średnia wysokość zawieszenia przewodu napowietrzego  $k$  nad powierzchnią ziemi,

$y_k$  – wysokość poprzecznika, na którym prowadzony jest przewód napowietrzny  $k$ ,

$l_{iz_i}$  – przeciętna długość łańcucha izolatorów zastosowanych w torze prądowym  $i$ ,  
 $i = \{I, II, \dots, n\}$ , zgodnie z tabelą 8.2,

$f_{\max_i}$  – przeciętny maksymalny zwis przewodu w torze prądowym  $i$  zgodnie z tabelą 8.2.

**Tab. 8.2** Przeciętne wartości długości łańcucha izolatorów oraz maksymalnego zwisu przewodów<sup>(4)</sup> przyjętego do obliczeń parametrów elektrycznych WWLN

	Napięcie znamionowe toru prądowego, kV	Przeciętna rozpiętość przęsła, m	Przeciętna długość łańcucha izolatorów, m	Przeciętny maksymalny zwis przewodu, m
<b>Przewód fazowy</b>	400	420	5,6	13,3
	220	420	4,7	12,8
	110	420	2,2	13,5
		300	2,2	7,6
<b>Przewód odgromowy</b>	-	420	-	9,5
	-	300	-	4,7

W polskich liniach napowietrznych 400 kV i 220 kV znamionowa rozpiętość przęsła wynosi 450 m, natomiast w przypadku linii 110 kV przyjmuje się rozpiętości znamionowe równe 300 m. Rzeczywiste rozpiętości przęseł oscylują wokół wymienionych wartości i zależą w dużej mierze od warunków terenowych, rodzaju krzyżowanych obiektów, dopuszczalnego poziomu siły wiatru działającego na konstrukcje wsporcze, jak również od siły zrywającej zastosowanego przewodu roboczego. Budowa linii wielonapięciowej z różnymi rodzajami przewodów roboczych, wymaga optymalnego doboru rozpiętości przęseł poprzez optymalne rozmieszczenie słupów wzdłuż trasy linii. Przy odpowiednim doborze rozpiętości przęseł powinno się uwzględnić koordynację zwisów przewodów z punktu widzenia zachowania wymaganych odległości pionowych oraz nieprzekroczenie dopuszczalnej procentowej wartości znamionowej wytrzymałości przewodu, definiowanej przez wytyczne normatywne.

Jednym z możliwych rozwiązań, w przypadku doboru rozpiętości przęseł w liniach wielonapięciowych z różnymi rodzajami przewodów, jest wybór rozpiętości odpowiadającej liniom 110 kV, a więc rozpiętości wynoszącej około (300 ÷ 350) m oraz przewodu AFL-6 240 mm<sup>2</sup> o wartości znamionowej wytrzymałości przewodu RTS równej 82,8 kN. W takim podejściu, w torze 110 kV, można zastosować naprężenie podstawowe na poziomie 100 MPa, które odpowiada typowym liniom 110 kV, natomiast naprężenia przewodów na pozostałych poziomach napięciowych należy dobrać w sposób zapewniający zachowanie wymaganych

<sup>4</sup> Przeciętną wartość maksymalnego zwisu przewodu oszacowano w warunkach obciążenia połową prądu dopuszczalnego długotrwałego torów prądowych, temperatury otoczenia 15°C, natężenia promieniowania słonecznego 500 W/m<sup>2</sup>, prędkości wiatru 0,5 m/s o kącie natarcia 90° oraz typowej wartości naprężenia rozważanych przewodów.

odstępów izolacyjnych wewnętrznych. Drugim rozwiązaniem jest założenie rozpiętości pręseł odpowiadających liniom 400 kV, co powoduje konieczność zwiększenia naprężenia (naciągu) przewodów toru 110 kV aby zachować wymagane odstępów doziemne, przy założeniu, że tor 110 kV jest zawieszony na dolnym poprzeczniku słupa. Dotychczasowe obserwacje dotyczące optymalnego doboru rozpiętości pręseła, wskazują na wybór wariantu drugiego, czyli zawieszenia toru 110 kV na najniższym poprzeczniku słupa z wysokim naprężeniem podstawowym.

Rozwiązanie polegające na zastosowaniu długich pręseł i wysokiej wartości naciągu przewodu powoduje, że odległości przewodów toru 110 kV względem ziemi są zachowane z bardzo niewielką rezerwą [34]. Największy zastosowany naciąg przewodów nie może przekraczać 40% wytrzymałości przewodu na rozciąganie RTS w normalnych sekcjach odciągowych. Zastosowanie naprężenia podstawowego równego 115 MPa w torze z przewodem AFL-6 240 mm<sup>2</sup> powoduje, że występujący wówczas naciąg przewodu wynosi 38% RTS. Rekomendowanym rozwiązaniem byłoby wykonanie toru 110 kV przewodem AFL-8 525 mm<sup>2</sup>, co zapewniłoby zapewnienie wymaganych odległości doziemnych, z zachowaniem mniejszych wartości naciągu w przewodzie. Drugim możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie krótszych rozpiętości pręseł, przy zachowaniu przewodu AFL-6 240 mm<sup>2</sup> w torze linii 110 kV. Podejście takie skutkuje większą wymaganą liczbą konstrukcji wsporczych w danej linii, natomiast wpływa korzystnie na zwiększenie odstępów izolacyjnych doziemnych.

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki, dla analizowanych WWLN przyjęto przeciętną rozpiętość pręseła równą 420 metrów.

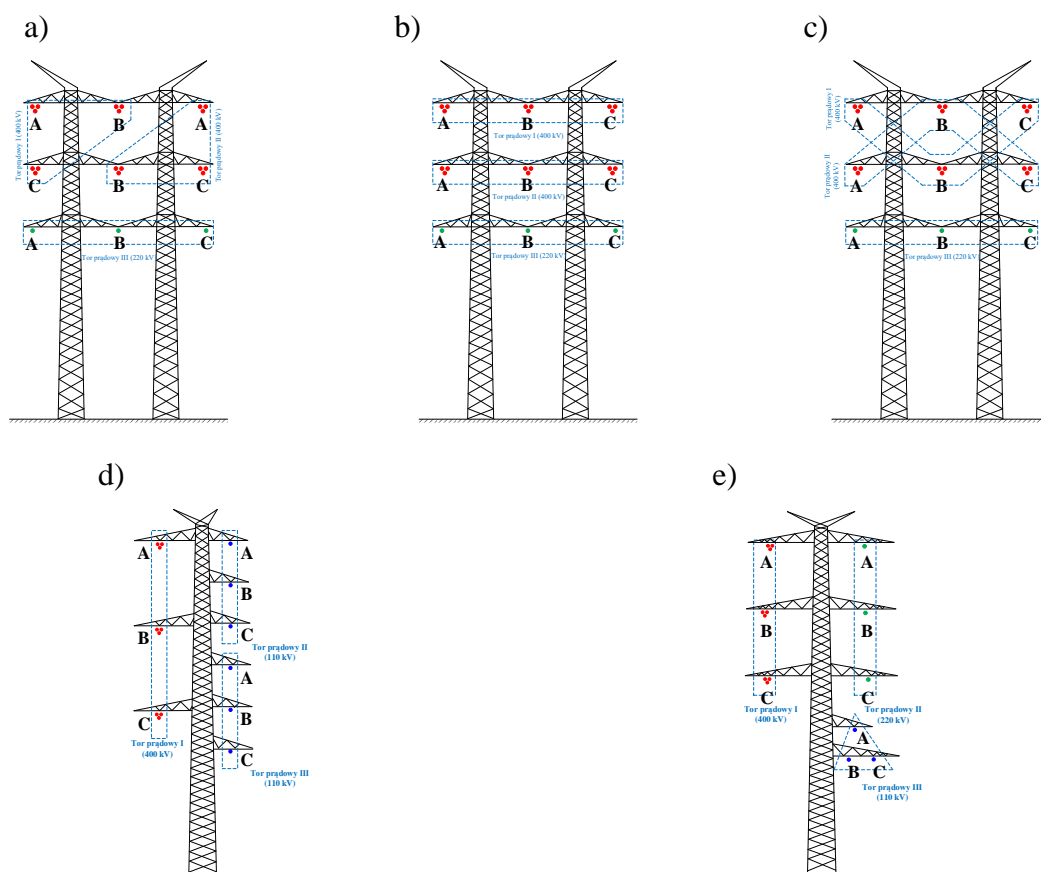
#### Wyznaczenie wartości natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN

Największa wartość natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii napowietrznej występuje w miejscu w którym przewody napowietrzne znajdują się najbliżej powierzchni ziemi. W przypadku pręseł poziomych (rys. 8.9), najmniejsza odległość przewodów linii napowietrznej od powierzchni ziemi występuje w miejscu największego zwisu przewodów, stąd w celu wyznaczenia natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wartość średniego zawieszenia przewodów nad powierzchnią ziemi wyznacza się zgodnie z zależnością (8.45):

$$y_{k \text{ PEM}}'' = h_{\min k} = y_k - l_{iz_i} - f_{\max_i} \quad (8.45)$$

## 8.2.3 Przyjęte oznaczenia układów przewodów fazowych WWLN

Liczba możliwych konfiguracji przewodów fazowych w torach prądowych linii trójnapięciowej wynosi  $6^3 = 216$ . W celu zwiększenia czytelności prezentowanych wyników, przyjęto robocze oznaczenia położenia/pozycji przewodów fazowych na badanych sylwetkach WWLN zgodnie z rysunkiem 8.10. Przyjęto sposób oznaczenia położenia wyznaczony od góry do dołu i od lewej do prawej strony. Oznaczenia te są wykorzystywane w analizach natężenia pola elektrycznego w otoczeniu WWLN, napięcia  $U_0$  pojawiającego się w torze o najniższym napięciu znamionowym, wskaźników nieznaczności  $\alpha_0$  oraz niesymetrii  $\alpha_2$  oraz analizie zwarciowej, gdzie rozważa się wpływ zastosowanego układu przewodów fazowych w torach prądowych WWLN na wybrane wielkości (zależne od rodzaju analizy).



Rys. 8.10 Sposób kodowania lokalizacji zawieszenia przewodów fazowych analizowanych WWLN

Rysunek 8.10 jest tożsamy z pierwszym badanym układem przewodów fazowych w torach prądowych tj. „1. ABC (tor I) – ABC (tor II) – ABC (tor III)”, który należy interpretować następująco:

- w torze prądowym I: faza L1 znajduje się na pozycji A, faza L2 na pozycji B, faza L3 na pozycji C,
- w torze prądowym II: faza L1 znajduje się na pozycji A, faza L2 na pozycji B, faza L3 na pozycji C,
- w torze prądowym III: faza L1 znajduje się na pozycji A, faza L2 na pozycji B, faza L3 na pozycji C,

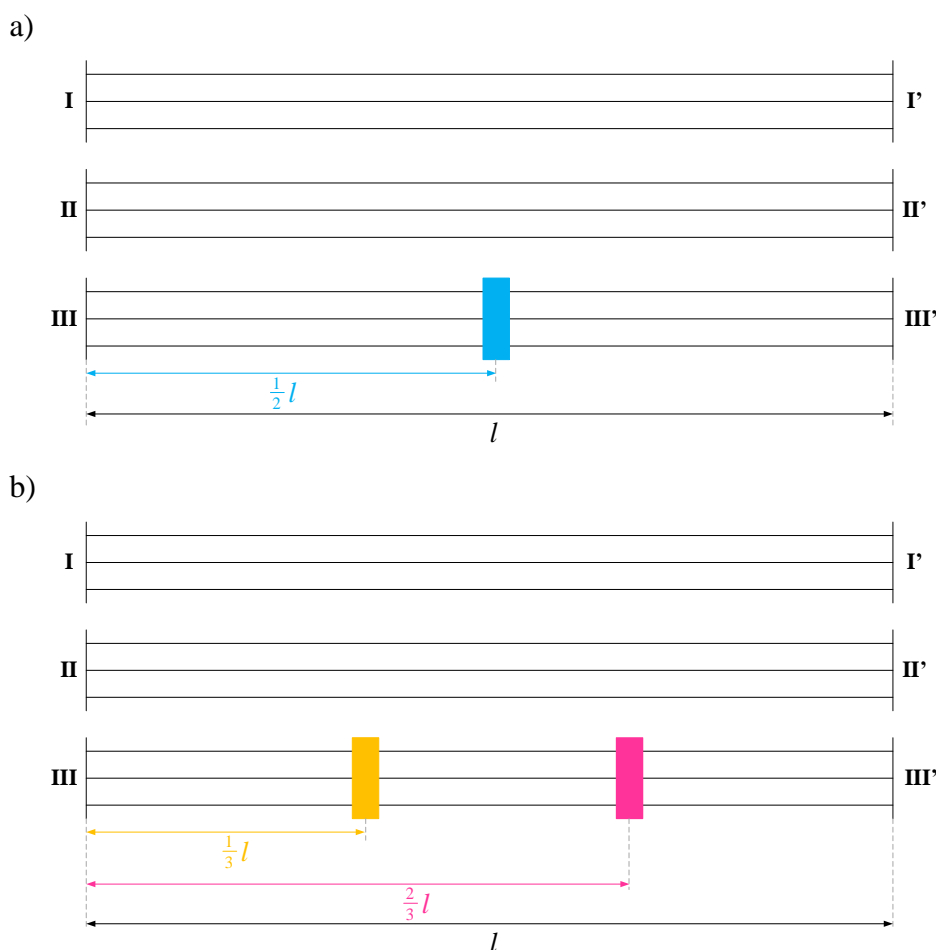
gdzie poszczególne pozycje określa rysunek 8.10 i w zależności od badanej sylwetki WWLN.

Układy bazowe, dla których wykonana jest pełna analiza wybranych wielkości, są wówczas opisane poprzez następujące układy (rys. 8.12):

- 1) sylwetka pierwsza (rys. 4.1a) – układ przewodów fazowych nr 1 (ABC–ABC–ABC),
- 2) sylwetka druga (rys. 4.1b) – układ przewodów fazowych nr 31 (ABC–CBA–ABC),
- 3) sylwetka trzecia (rys. 4.1c) - układ przewodów fazowych analogiczny jak dla drugiej sylwetki, tj. układ przewodów fazowych nr 31 (ABC–CBA–ABC),
- 4) sylwetka czwarta (rys. 4.1d) – układ przewodów fazowych nr 181 (CBA–ABC–ABC),
- 5) sylwetka piąta (rys. 4.1e) – układ przewodów fazowych nr 36 (ABC–CBA–CBA).

#### 8.2.4 Przyjęte oznaczenia przeplotów

Rozważono wszystkie konfiguracje przeplotów na torze prądowym III badanych WWLN. Miejsca wykonania przeplotów przedstawia rysunek 8.11, a w tabeli 8.3 przedstawiono przyjęte oznaczenia i numerację poszczególnych konfiguracji. Układy przewodów oznaczone numerami 1 i 7 są równoważne z niewykonaniem przeplotu.



**Rys. 8.11 Ilustracja wykonania przeplotu toru prądowego III WWLN**  
a) w połowie długości linii (przeplot pojedynczy), b) w  $\frac{1}{3}$  i  $\frac{2}{3}$  długości linii (przeplot podwójny)

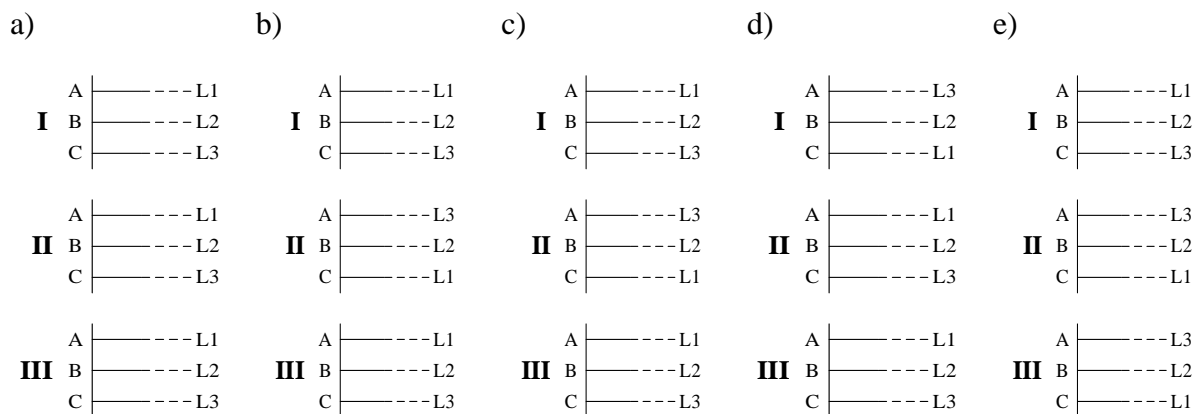
Oznaczenia poszczególnych typów przeplotu, zastosowane w tabeli 8.3, odpowiadają oznaczeniom z rysunku 5.2.



Tab. 8.3 Przyjęta numeracja rodzajów analizowanych przeplotów III toru prądowego WWLN

Lp.	Oznaczenie typu przeplotu	Grafika	Lp.	Oznaczenie typu przeplotu	Grafika				
<b>Przeplot w <math>\frac{1}{2}</math> długości linii – przeplot pojedynczy</b>									
1.	a		4.	d					
2.	b		5.	e					
3.	c		6.	f					
<b>Przeplot w <math>\frac{1}{3}</math> i <math>\frac{2}{3}</math> długości linii – przeplot podwójny</b>									
Lp.	$\frac{1}{3}l$	$\frac{2}{3}l$	$\frac{1}{3}l$	$\frac{2}{3}l$	Lp.	$\frac{1}{3}l$	$\frac{2}{3}l$	$\frac{1}{3}l$	$\frac{2}{3}l$
7.	a	a			25.	d	a		
8.	a	b			26.	d	b		
9.	a	c			27.	d	c		
10.	a	d			28.	d	d		
11.	a	e			29.	d	e		
12.	a	f			30.	d	f		
13.	b	a			31.	e	a		
14.	b	b			32.	e	b		
15.	b	c			33.	e	c		
16.	b	d			34.	e	d		
17.	b	e			35.	e	e		
18.	b	f			36.	e	f		
19.	c	a			37.	f	a		
20.	c	b			38.	f	b		
21.	c	c			39.	f	c		
22.	c	d			40.	f	d		
23.	c	e			41.	f	e		
24.	c	f			42.	f	f		

W początkowych odcinkach, tj. do  $1/2$  (przy przeplacie pojedynczym) oraz do  $1/3$  (przy przeplacie podwójnym) długości WWLN, układ przewodów poszczególnych torów prądowych jest zgodny z układami bazowymi badanych WWLN (rys. 4.1, rys. 8.12).



**Rys. 8.12** Początkowe układy przewodów fazowych pięciu badanych WWLN, w których dokonuje się przeplotu toru prądowego III