



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

ROZPRAWA DOKTORSKA

Analiza możliwości wykorzystania pasów
technologicznych elektroenergetycznych linii
przesyłowych do rozbudowy sieci dystrybucyjnych

Autor: mgr inż. Konrad Franciszek Kochanowicz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Tarko

Praca wykonana:
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

Kraków, 2023



AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

FIELD OF SCIENCE: ENGINEERING AND TECHNOLOGY

SCIENTIFIC DISCIPLINE AUTOMATION, ELECTRONICS, ELECTRICAL
ENGINEERING AND SPACE TECHNOLOGIES

DOCTORAL THESIS

Analysis of the feasibility of using transmission line's
right of way for the expansion of distribution grid

Author: Konrad Franciszek Kochanowicz, M.Sc.

First supervisor: Wiesław Nowak, D.Sc.

Assisting supervisor: Rafał Tarko, Ph.D.

Completed in:

AGH University of Science and Technology
Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science
and Biomedical Engineering
Department of Electrical Engineering and Power Engineering

Krakow, 2023

*Składam serdeczne podziękowania
Panu dr hab. inż. Wiesławowi Nowakowi
za inspirację do podjęcia tematu rozprawy,
wsparcie na każdym etapie realizacji badań
oraz cenne wskazówki i spostrzeżenia,
które były bardzo pomocne w jej realizacji.*

*Dziękuję Panu dr inż. Rafałowi Tarko,
za wieloletnią współpracę,
udzielane cenne wskazówki,
przekazaną wiedzę
oraz motywowanie do pracy.*

*Dziękuję rodzinie,
która wspierała mnie na każdym etapie realizacji badań
dobrym słowem oraz motywowała do pracy.*

*Szczególne podziękowania kieruję do Pana Sławomira Samka
prezesa dawnego BSiPE Energoprojekt Kraków SA
oraz do Pana Tomasza Musiała
prezesa TD Energo sp. z o.o.
za umożliwienie mi realizacji niniejszej rozprawy
na gruncie mojej pracy zawodowej,
a także do koleżanek i kolegów,
którzy wspierali mnie w czasie jej realizacji.*

Streszczenie

Polska gospodarka stanęła przed wyzwaniem koniecznej i trudnej transformacji energetycznej, wynikającej z tzw. *europskiego zielonego ład*, mającego doprowadzić do realizacji celu, jakim jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

Trwający proces transformacji skupiony jest na sektorze wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych oraz na modernizacji i rozbudowie sieci przesyłowych. Zmiany w tym sektorze, szczególnie szybki przyrost mocy zainstalowanej ze źródeł odnawialnych wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię, obnażyły słabość systemu elektroenergetycznego w zakresie dystrybucji energii elektrycznej na poziomie średniego i wysokiego napięcia.

Modernizacja sektora dystrybucji energii elektrycznej jest wyzwaniem ze względów finansowych, społecznych oraz prawnych. Operatorzy systemów dystrybucyjnych nie dysponują zasobami finansowymi na szybką rozbudowę sieci, ponadto budowa tej infrastruktury spotyka się z oporem społecznym, a proces inwestycyjny może trwać nawet kilka lat. Z tego powodu trwa poszukiwanie rozwiązań alternatywnych mogących przyspieszyć proces budowy i modernizacji sieci dystrybucyjnych.

Celem badań było określenie czynników i warunków determinujących możliwość bezpiecznej budowy oraz niezawodnej eksploatacji napowietrznych linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych. Zaprezentowane w rozprawie wyniki stanowią podstawę do rozważania możliwości wykorzystania tych pasów do rozbudowy sieci dystrybucyjnych.

Abstract

The Polish economy faced the challenge of a necessary and difficult energy transformation, resulting from the so-called *European Green Deal*, aimed at achieving the goal of reducing greenhouse gas emissions.

The ongoing transformation process is focused on the sector of electricity generation from renewable sources and on the modernisation and expansion of transmission networks. Developments in this sector, particularly the rapid growth of installed capacity from renewable sources together with increasing energy demand, have exposed the weakness of the electricity grid in terms of electricity distribution at medium and high voltage levels.

Modernising the electricity distribution sector is a challenge for financial, social and legal reasons. Distribution system operators do not have the financial resources to expand the electrical grid quickly, moreover, the construction of this infrastructure meets with public resistance and the investment process may take even several years. For this reason, there is an ongoing search for alternatives that can accelerate the process of construction and modernisation of distribution grid.

The main objective of the research was to determine the factors and conditions ensuring the possibility of safe construction and reliable operation of overhead distribution lines in the right-of-ways of transmission lines. The results presented in this dissertation provide a basis for considering the possibility of using these right-of-ways to expand distribution grid.

Spis treści

Streszczenie	4
Abstract.....	5
Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	8
1. Wstęp	10
1.1. Teza i cel rozprawy	10
1.2. Zakres rozprawy.....	11
2. Problemy oddziaływań pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii elektroenergetycznych	13
3. Aspekty normatywne możliwości lokalizacji linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych.....	20
3.1. Wstęp.....	20
3.2. Analiza normatywnych wymagań prowadzenia linii elektroenergetycznych w zblizeniu.....	21
3.3. Wyniki analizy możliwości lokalizacji linii dystrybucyjnych ze względów na wymagania normatywne	28
4. Badania skumulowanych pól elektrycznych w zblizonych liniach przesyłowych i dystrybucyjnych.....	31
4.1. Wstęp.....	31
4.2. Metoda badań skumulowanych pól elektrycznych	33
4.3. Wyniki badań skumulowanych pól elektrycznych	39
5. Modele do badania skutków napięciowych i prądowych oddziaływań elektromagnetycznych linii przesyłowych na linie dystrybucyjne	49
5.1. Modele uproszczone.....	49
5.1.1. Oddziaływanie pojemnościowe	49
5.1.2. Oddziaływanie magnetyczne	53
5.1.3. Zastosowanie modeli uproszczonych do badań napięć i prądów indukowanych w układach modelowych.....	56
5.2. Modele zaawansowane.....	67
6. Badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w budowanych liniach dystrybucyjnych.....	75

6.1.	Wstęp.....	75
6.2.	Model montażu sekcji odciągowej linii dystrybucyjnej.....	77
6.3.	Wyniki badań	79
7.	Badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w eksploatowanych liniach dystrybucyjnych	88
7.1.	Przedmiot badań.....	88
7.2.	Badania i analizy wpływu linii przesyłowych na parametry jakości energii elektrycznej w liniach dystrybucyjnych	91
7.3.	Badania i analizy zagrożenia porażeniowego osób wykonujących prace eksploatacyjne na linii dystrybucyjnej w warunkach oddziaływania linii przesyłowej	99
8.	Podsumowanie	105
	Bibliografia	107

Wykaz ważniejszych oznaczeń

α_{ii}, α_{ij}	współczynniki potencjalne własne
b_1, b_2	najmniejsza normatywna dopuszczalna odległość w środku przęsła pomiędzy przewodami
β_{ij}	współczynniki potencjalne wzajemne
B	indukcja magnetyczna
C	macierze pojemności
$C_{k,k}$	pojemności własne (doziemne)
$C_{i,j}, C_{j,i}$	pojemności wzajemne
D_{pp}	minimalny normatywny odstęp w powietrzu dla układu faza – faza
D_{el}	minimalny normatywny odstęp w powietrzu dla układu faza – ziemia
E	natężenie pola elektrycznego
\mathbf{E}	wektor natężenia pola elektrycznego
$E1 \div E4$	warianty eksploatacji linii dystrybucyjnej
$E_B \div E_E$	siły elektromotoryczne
E_{xm}, E_{ym}, E_{zm}	amplitudy wektorów składowych natężenia pola elektrycznego
f	częstotliwość napięcia
f_{+40}	zwis przewodów w temperaturze +40°C
H	natężenie pola magnetycznego
h_S	wysokość zawieszenia przewodów linii przesyłowej
h_D	wysokość zawieszenia przewodów linii dystrybucyjnej
I_{DR}	natężenie prądu rażeniowego
\mathbf{I}_P	wektor prądów płynących w przewodach linii przesyłowej
\mathbf{I}_D	wektor prądów płynących w przewodach linii dystrybucyjnej
\mathbf{I}_O	wektor prądów płynących w przewodach odgromowych
k_{pp}, k_{el}	współczynniki redukcyjne do obliczeń b_1, b_2
l_{ins}	długość łańcucha izolatorowego
L_F	odległość miejsca zwarcia w linii przesyłowej
L_R	długość rozwieszanego przewodu
L_Z	długość odcinka zbliżenia
Φ_{con}	kąt wychyłu łańcucha izolatorowego
Φ_{ins}	kąt wychyłu przewodów
φ_i	faza napięcia
ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z	fazy wektorów składowych natężenia pola elektrycznego
P_4	moc czynna przesyłana linią przesyłową
P_1	moc czynna przesyłana linią dystrybucyjną
Q_4	moc bierna przesyłana linią przesyłową
Q_1	moc bierna przesyłana linią dystrybucyjną

$R1\div R3$	warianty rozwieszania przewodów
R_0, R_1	rezystancje dla składowej symetrycznej zerowej i zgodnej
R_{CZ}	rezystancja człowieka
R_{UB}	rezystancja uziemienia bębna i hamownika
R_{UD}	rezystancja uziemienia słupa linii dystrybucyjnej
R_{UW}	rezystancja uziemienia wciągarki
S_4	moc obciążenia linii przesyłowej 400 kV
S_I	moc obciążenia linii dystrybucyjnej
S_B	szerokość strefy oddziaływania składowej magnetycznej
S_E	szerokość strefy oddziaływania składowej elektrycznej
$S_{E(LP)}$	szerokość strefy oddziaływania linii przesyłowej
$S_{E(LD)}$	szerokość strefy oddziaływania linii dystrybucyjnej
$S_{E(P-D)}$	szerokość strefy oddziaływania skumulowanego
S_{PT}	szerokość pasa technologicznego linii przesyłowej
U	wartość skuteczna napięcia fazowego
U_A, U_B, U_C	wartości skuteczne napięcia fazy A, B, C
$\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$	zespolone wartości napięć fazowych A, B, C
$\underline{U}_{1(D)}, \underline{U}_{2(D)}$	wartości napięć składowych symetrycznych kolejności zgodnej i przeciwnej
U_D	wartość skuteczna napięcia dotykowego (indukowanego)
U_N	wartość skuteczna napięcia nominalnego
U_P	wartość skuteczna napięcia międzyfazowego linii przesyłowej
$\mathbf{U_P}$	wektor napięć przewodów linii przesyłowej
$\mathbf{U_D}$	wektor napięć przewodów linii dystrybucyjnej
$\mathbf{U_0}$	wektor napięć przewodów odgromowych
$v_i(t)$	potencjał chwilowy odcinka aproksymującego
$q_j(t)$	ładunek odcinka aproksymującego
w	wskaźnik asymetrii
$W1\div W4$	warianty układów konfiguracji zbliżenia linii
W_A	wskaźnik asymetrii
X_0, X_1	reaktancje dla składowej symetrycznej zerowej i zgodnej
ΔX_{ins}	odległość wychylenia izolatora
ΔX_{con}	odległość wychylenia przewodu fazowego
X_{tow}	wysięg poprzecznika
X_{SD}	odległość między osiami linii
$Z_{k,k}$	ziemnopowrotne impedancje własne
$Z_{i,j}, Z_{j,i}$	ziemnopowrotne impedancje wzajemne
\mathbf{Z}	macierze impedancji

1. Wstęp

1.1. Teza i cel rozprawy

Polski system elektroenergetyczny stanął przed wyzwaniem koniecznej i trudnej transformacji, wynikającej głównie z czynników i uwarunkowań zewnętrznych związanych z sytuacją geopolityczną, jak również z licznymi czynnikami wewnętrznymi, których źródłem jest wieloletni okres zastoju w obszarze rozwoju i rozbudowy sieci elektroenergetycznych. Przyjęte przez Komisję Europejską i zaakceptowane przez państwa członkowskie Unii Europejskiej akty prawne związane z tzw. *zielonym ładem*, mają dostosować politykę klimatyczną, energetyczną, transportową i podatkową na potrzeby realizacji celu, jakim jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do 2030 roku o co najmniej 55% w porównaniu z poziomem z roku 1990. Dla polskiej gospodarki – która tradycyjnie oparta była i jest na paliwach kopalnych, głównie węgla kamiennym i brunatnym – realizacja powyższych założeń jest procesem trudnym, bowiem w chwili obecnej generacja z tych dwóch paliw odpowiada za ponad 71% całkowitej ilości energii elektrycznej wytworzonej w naszym kraju.

Trwający obecnie w Polsce proces transformacji energetycznej skupia się głównie na sektorze wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii oraz na modernizacji i rozbudowie sieci przesyłowej o napięciu 400 kV. Realizowane są pierwsze duże inwestycje w morskie farmy wiatrowe na Bałtyku, a na wstępnym etapie prac przygotowawczych znajduje się planowana od wielu lat pierwsza polska elektrownia atomowa. Równocześnie obserwuje się duży i dynamiczny rozwój sektora mikroinstalacji fotowoltaicznych montowanych przez osoby prywatne, a także rosnącą liczbę inwestycji w farmy fotowoltaiczne o mocach rzędu kilkudziesięciu, a nawet kilkuset megawatów. Działania te, wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną, a także w pewnym stopniu zmianą przyzwyczajień konsumentów energii wywołane zmianą stylu życia, obnażyły słabość systemu elektroenergetycznego w zakresie dystrybucji energii elektrycznej na poziomie średniego i wysokiego napięcia.

Wskutek tak dynamicznych procesów modernizacji sektora wytwarzania energii elektrycznej, obszar gospodarki związany z jej dystrybucją nie jest w stanie nadążyć za postępującymi zmianami. Wynika to z szeregu czynników dotyczących finansowania nowych, jak i modernizowania istniejących linii oraz stacji elektroenergetycznych, poprzez czynniki środowiskowe, kwestie społeczne, a kończąc na uwarunkowaniach prawnych. Operatorzy systemów dystrybucyjnych realizując swoją bieżącą działalność, nie dysponują zasobami finansowymi na tak szybką rozbudowę sieci dystrybucyjnych, szczególnie na poziomie napięcia 110 kV. Dodatkowo procesy inwestycyjne związane z budową tych obiektów mogą trwać nawet kilka lat.

Jednym z zasadniczych elementów procesów inwestycyjnych rozbudowy sieci dystrybucyjnych jest pozyskanie terenu i prawa do gospodarowania nieruchomościami dla celów budowlanych. Proces ten jest niezmiernie czasochłonny i wymagający znacznego zaangażowania w prowadzenie negocjacji z właścicielami gruntów. Równocześnie wymaga znacznych nakładów finansowych, koniecznych do wykupu gruntów pod stacje elektroenergetyczne oraz na ustanowienie służebności gruntowej przesyłu pod linie dystrybucyjne.

Z powyższych względów pożądanym jest poszukiwanie rozwiązań alternatywnych, co stało się inspiracją do podjęcia problematyki będącej przedmiotem niniejszej rozprawy. Przedstawiono w niej badania dotyczące możliwości przyspieszenia procesu budowy i modernizacji sieci dystrybucyjnych, poprzez wykorzystanie istniejących pasów technologicznych linii przesyłowych. W rozprawie sformowano następującą tezę:

Intensyfikacja rozbudowy elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych – wynikająca z procesów transformacji energetycznej – możliwa jest przez wykorzystanie do tego celu pasów technologicznych elektroenergetycznych linii przesyłowych.

Celem badań, których wyniki przedstawiono w niniejszej dysertacji było określenie głównych czynników i warunków determinujących możliwość bezpiecznej budowy oraz niezawodnej eksploatacji napowietrznych linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych. Należy nadmienić, że płynące z przeprowadzonych badań wnioski słuszne są nie tylko dla polskiej energetyki, ale również mogą być aplikowane w innych krajach.

1.2. Zakres rozprawy

Treść pracy została zawarta w siedmiu rozdziałach oznaczonych numerami 2÷8. Rozdział 2 poświęcono problematyce oddziaływania pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii elektroenergetycznych. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi na zdrowie i życie ludzkie oraz negatywnym skutkom oddziaływania tych pól na infrastrukturę techniczną.

W rozdziale 3 przedstawiono zagadnienia normatywne projektowania zbliżonych do siebie linii elektroenergetycznych. Przeprowadzono analizę stawianym tym obiektom wymagań technicznych, wynikających z aktualnej normalizacji projektowania. Rezultaty tej analizy stały się podstawą do określenia zakresów zmienności parametrów badanych w dalszych częściach rozprawy.

Rozdział 4 poświęcono zagadnieniu skumulowanych pól elektrycznych w zbliżonych liniach elektroenergetycznych. Przedstawiono w nim opracowany w oparciu o metodę ładunków symulowanych model obliczeniowy, który stał się podstawą określenia warunków koniecznych do lokalizacji napowietrznej linii dystrybucyjnej w zbliżeniu do linii przesyłowej.

W rozdziale 5 przedstawiono uproszczone modele oddziaływań pojemnościowych i magnetycznych, które opracowano i zastosowano do badań napięć i prądów indukowanych w liniach zbliżonych. Umożliwiły one określenie wpływu analizowanych parametrów zbliżenia na skutki wzajemnego oddziaływania linii. W rozdziale tym, przedstawiono także, opracowany na potrzeby badań zaawansowany model odcinków zbliżeń linii przesyłowych i dystrybucyjnych, który jednocześnie stanowi istotne rozszerzenie możliwości obliczeniowych i udoskonalenie programu ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP–ATP).

Modele zaawansowane zostały wykorzystane do badań parametrów jakości energii elektrycznej oraz zagrożenia porażeniowego, wynikających z napięć i prądów indukowanych podczas budowy i późniejszej eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasach technologicznych linii przesyłowych. Wyniki tych badań i wnioski przedstawiono w rozdziałach 6 oraz 7.

Podsumowanie rozprawy zawarto w rozdziale 8.

2. Problemy oddziaływań pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii elektroenergetycznych

Obiekty infrastruktury elektroenergetycznej są źródłem szeregu różnych oddziaływań środowiskowych, wśród których jednym z istotniejszych jest emisja pola elektromagnetycznego do środowiska. Zgodnie z *Prawem Ochrony Środowiska* [111], emisja ta rozumiana jest jako wprowadzenie bezpośrednio lub pośrednio, w wyniku działalności człowieka, do powietrza, wody, gleby lub ziemi energii pola elektromagnetycznego, przez które rozumie się pole elektryczne, magnetyczne oraz elektromagnetyczne o częstotliwościach od 0 Hz do 300 GHz.

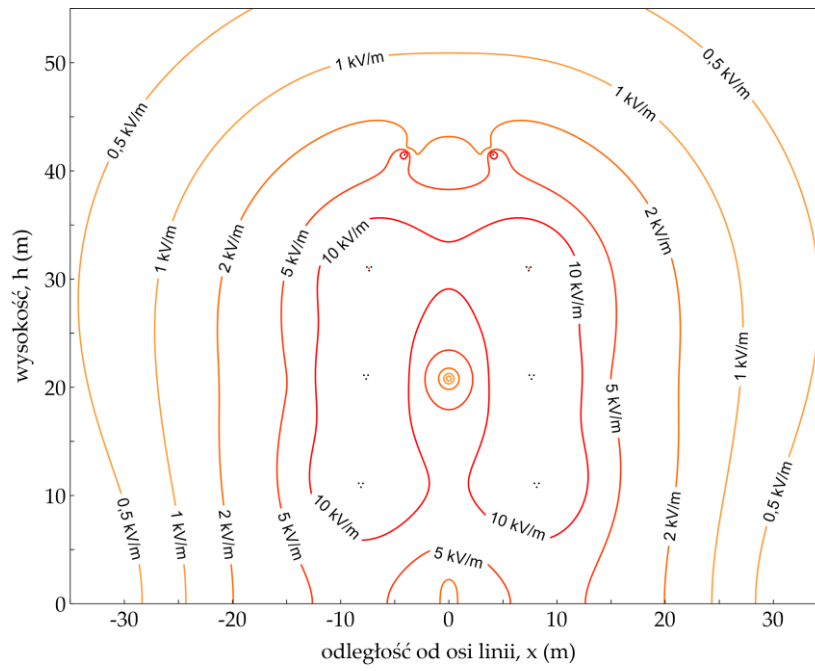
Specyfiką pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej 50 Hz (60 Hz) jest możliwość odrębnego rozpatrywania, badań i analiz składowej elektrycznej oraz składowej magnetycznej tego pola. Dlatego też zgodnie z ustawą [111], jak i rozporządzeniem [91] ocenę tej emisji przeprowadza się oddzielnie na podstawie wartości natężenia pola elektrycznego E (kV/m) oraz indukcji magnetycznej B (μ T) lub natężenia pola magnetycznego H (A/m).

Na wielkość emisji pola elektromagnetycznego wpływa wiele czynników, wśród których podstawowe znaczenie mają napięcie znamionowe oraz obciążenie prądowe linii. Równie istotnym czynnikiem jest rozmieszczenie przestrzenne przewodów fazowych i odgromowych linii, wynikające z zastosowanych konstrukcji wsporczych oraz łańcuchów izolatorowych [48, 106]. Na rysunku 2.1 przedstawiono przykładowe obrazy pola elektrycznego i pola magnetycznego o częstotliwości sieciowej, w przekroju poprzecznym dwutorowej linii przesyłowej 400 kV. Obraz pola elektrycznego (rys. 2.1a) oraz obraz pola magnetycznego (rys. 2.1b) stanowią zbiory izolinii o jednakowej wartości natężenia pola elektrycznego oraz indukcji magnetycznej, które są wybranymi wartościami dopuszczalnymi pola elektromagnetycznego, przyjmowanymi w różnych krajach dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową (tab. 2.1).

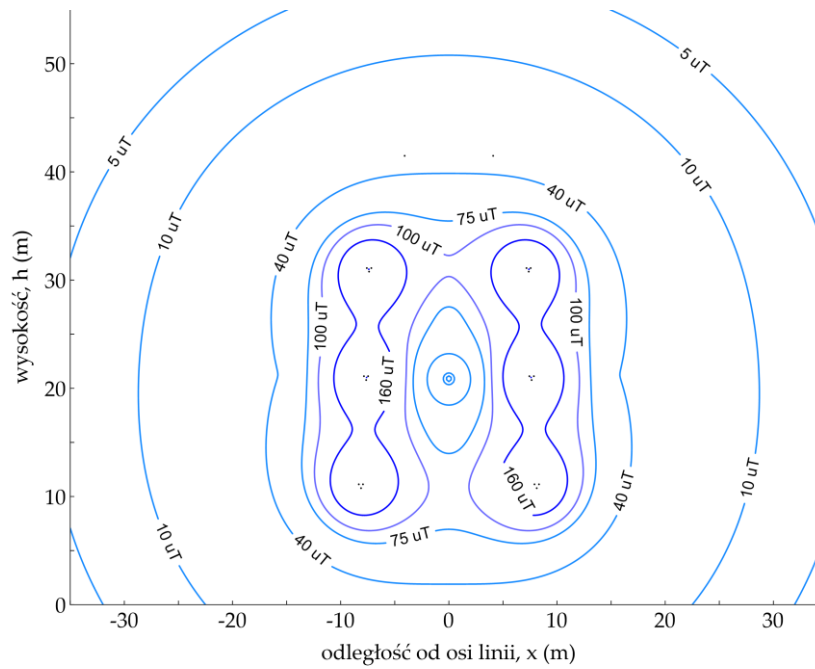
Strefy oddziaływania elektromagnetycznego

Zasięg strefy oddziaływania elektromagnetycznego wynika z przestrzennego rozkładu pola elektrycznego oraz pola magnetycznego i ograniczony jest miejscem występowania założonych wartości dopuszczalnych. W praktyce, nie ma jednolitych wytycznych dotyczących bezpiecznego poziomu oddziaływania elektromagnetycznego na środowisko. Do najczęściej przywoływanych w literaturze poziomów oddziaływań można zaliczyć wartości zawarte w przewodniku International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) wydanym w 1998 roku [39].

a)



b)



Rysunek 2.1. Obraz pola elektrycznego (a) oraz pola magnetycznego (b) w przekroju poprzecznym dwutorowej linii przesyłowej 400 kV dla napięcia roboczego $U_r = 420$ kV oraz obciążenia $I_r = 2500$ A (badania własne)

Tabela 2.1. Wartości dopuszczalne pola elektromagnetycznego, przyjmowane w wybranych krajach dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową [63]

Państwo	50 Hz	
	Natężenie pola elektrycznego (kV/m)	Indukcja magnetyczna (μT)
China	4	100
Chorwacja	2	40
Czechy	2	200
Japonia	3	200
Polska	1	75
Rosja	0,5	5
Słowenia	0,5	10
Wielka Brytania	9	360

W dokumencie tym przyjęto, że dopuszczalna wartość składowej elektrycznej wynosi $E = 5$ kV/m, natomiast wartość składowej magnetycznej $B = 100$ μT, dla terenów przeznaczonych do stałego przebywania ludności. Zalecenia te zostały ujęte w wydanej w 1999 roku rekomendacji Unii Europejskiej [18] i zostały przyjęte w większości krajów w Europie. Należy również nadmienić, że w 2010 roku ICNIRP opublikowała nowe wytyczne [40], w których zwiększona została dopuszczalna wartość indukcji pola magnetycznego z 100 μT do 160 μT. Pomimo tego, niektórych krajach obowiązują lokalne regulacje prawne [63], w których wartości dopuszczalne pól elektrycznych i magnetycznych są zarówno większe, jak i mniejsze od wartości zalecanych w przedstawionych dokumentach międzynarodowych. Przykładami takich odstępstw są wymagania funkcjonujące w krajach wymienionych w tabeli 2.1, z której wynika, że polskie regulacje prawne [92] są jednymi z bardziej rygorystycznych.

Z przedstawionych na rysunku 2.2 obrazów wynika, że wartości dopuszczalne indukcji magnetycznej $B = 75$ μT zawierają się w przestrzeni, w której natężenie pola elektrycznego $E > 5$ kV/m. Z tego powodu o szerokości strefy oddziaływania elektromagnetycznego linii elektroenergetycznej decydować będzie składowa elektryczna pola elektromagnetycznego (rys. 2.2) [49, 106], bowiem:

$$S_{E1} > S_{E5} > S_B \quad (2.1)$$

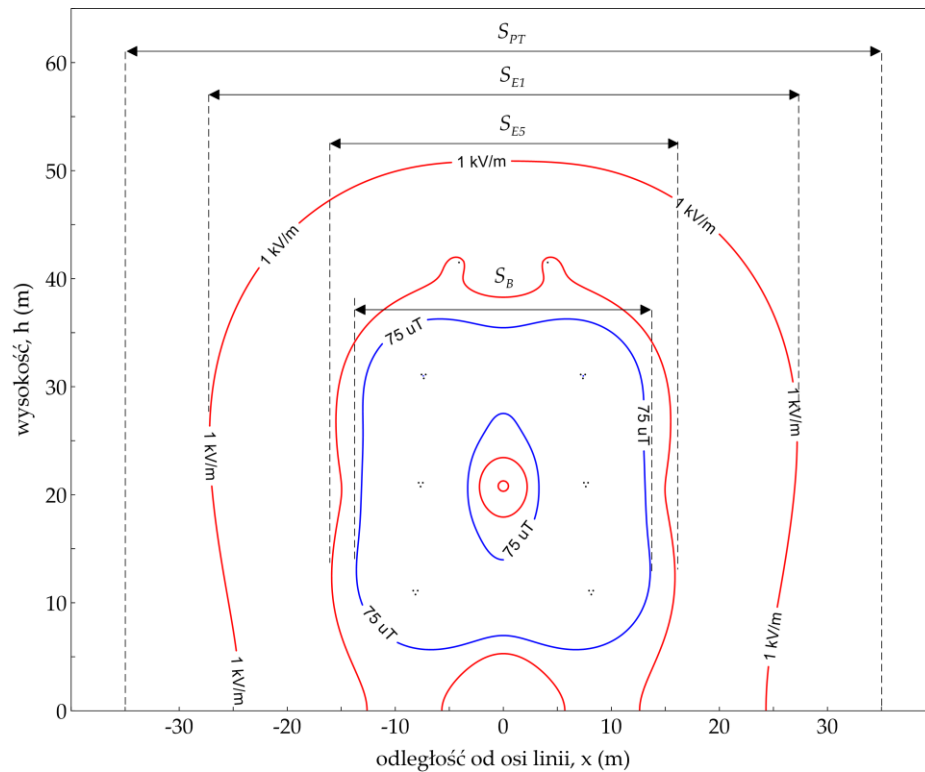
gdzie: S_{E1} – szerokość strefy oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu 1 kV/m, S_{E5} – szerokość strefy oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu 5 kV/m, S_B – szerokość strefy oddziaływania pola magnetycznego o indukcji 75 μT. Jednocześnie zasięg strefy S_{E1} jest podstawą określania szerokości S_{PT} pasa technologicznego linii napowietrznej:

$$S_{PT} \geq S_{E1} \quad (2.2)$$

która w Polsce dla linii 400 kV najczęściej przyjmowana jest jako $S_{PT} = 70$ m.

Pomimo, że o szerokości strefy oddziaływania decyduje składowa elektryczna, to z punktu widzenia problematyki niniejszej dysertacji, dotyczącej możliwości

wykorzystania pasów technologicznych elektroenergetycznych linii przesyłowych do rozbudowy sieci dystrybucyjnych, istotne jest rozpatrywanie również oddziaływania składowej magnetycznej. Prowadzi ono bowiem do indukowania napięć i prądów w liniach dystrybucyjnych zbliżonych do linii przesyłowych.



Rysunek 2.2. Porównanie szerokości pasa technologicznego S_{PT} oraz szerokości stref S_{EI} i S_{ES} oddziaływania pola elektrycznego oraz strefy S_B pola magnetycznego w przekroju poprzecznym linii dwutorowej 400 kV

Zarówno oddziaływanie składowej elektrycznej, jak i oddziaływanie składowej magnetycznej wiąże się z szeregiem negatywnych skutków dla otoczenia, przez które prowadzone są linie elektroenergetyczne. Dlatego też oddziaływania te, są obszarem ustawicznych badań prowadzonych zarówno w aspekcie ich wpływu na organizmy żywe i środowisko, jak i inną infrastrukturę techniczną.

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe

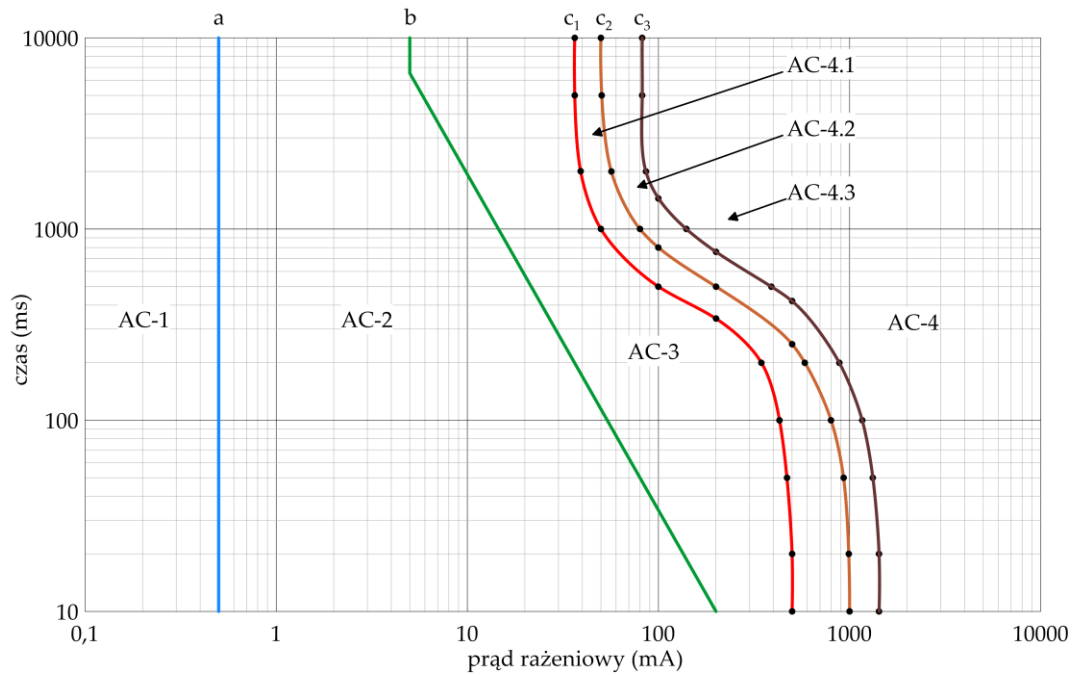
Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe i środowisko jest tematem budzącym duże zainteresowanie społeczne. Dotyczy to szczególnie sytuacji, w których planowane i budowane są nowe linie elektroenergetyczne wysokich i najwyższych napięć, co stanowi istotne zagadnienie w czasie spotkań ze społecznością na etapie realizacji tych zamierzeń [86].

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy, wytyczne WHO [113], INCIRP [40] czy stowarzyszeń naukowych [1] potwierdzają, że w określonych warunkach pola

elektromagnetyczne o częstotliwości sieciowej mogą być źródłem negatywnych efektów w organizmach żywych. Jednak ich wpływ jest często trudny do zweryfikowania [54], pomimo prowadzonych w tym obszarze licznych badań, między innymi [23, 30, 31, 45, 62]. Przedmiotem tych badań są: zjawiska entoptyczne, zaburzenia neurobehawioralne, wpływ na układ neuroendokryny, zaburzenia neurodegeneracyjne, problemy z układem rozrodczym czy rozwój nowotworów. Dotychczasowe badania często nie dają jednoznacznych wyników dotyczących negatywnych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego. Jedynie w przypadku badań nad nowotworami, wśród środowiska naukowego panuje konsensus, że składowa magnetyczna pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej może być czynnikiem potencjalnie kancerogennym. Zgodnie z klasyfikacją Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC) składowa ta zaliczana jest do grupy 2B – substancje możliwie rakotwórcze dla człowieka – w przeciwieństwie do składowej elektrycznej, dla której nie określono takiego wpływu (zaliczana do grupy 3 – substancje niemożliwe do zaklasyfikowania jako rakotwórcze dla człowieka).

Pośrednim skutkiem oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe jest zagrożenie porażeniowe prądem elektrycznym, spowodowane dotknięciem części urządzeń elektroenergetycznych, na których został wyindukowany potencjał przez pole elektromagnetyczne. Za prekursora badań w dziedzinie elektropatologii powszechnie uznaje się S. Jellinka [43], który był nie tylko pomysłodawcą wykonywania resuscytacji krążeniowo-oddechowej u porażonych prądem elektrycznym, ale także autorem jednych z pierwszych wytycznych [44], dotyczących postępowania w takich przypadkach.

Oddziaływanie prądu na ludzki organizm objawia się szeregiem skutków, zależnych od wartości przepływającego prądu oraz indywidualnych właściwości biofizycznych organizmów żywych. Skutki działania prądu na człowieka w głównej mierze zależą od drogi jego przepływu przez organizm [53], natężenia oraz czasu trwania. Bezpieczeństwo porażeniowe jest tematem licznych publikacji [10, 19, 42, 60] oraz prac normalizacyjnych, efektem których było opracowanie wytycznych dotyczących tego zagrożenia [37], w tym przedstawionych na rysunku 2.3 krzywych, wyróżniających strefy skutków patofizjologicznych rażenia prądem elektrycznym.



Rysunek 2.3. Strefy czasowo-prądowe skutków patofizjologicznych prądów rażeniowych przemiennych o wartości do 10 A i częstotliwości od 15 do 100 Hz, płynących na drodze lewa ręka – obie stopy. a – próg odczuwania i reakcji, b – granica samouwolnienia, c_1 , c_2 , c_3 – próg prawdopodobieństwa wystąpienia fibrylacji komór serca odpowiadającym kolejnym kwantylom (0%, 5%, 50%), strefy: AC-1 – brak negatywnych reakcji organizmu, AC-2 – brak wystąpienia szkodliwych skutków fizjologicznych, AC-3 – brak uszkodzeń organicznych, AC-4.1÷AC4.3 wystąpienia fibrylacji komór serca (0÷50%),

Oddziaływanie pola elektromagnetycznego na obiekty infrastruktury technicznej

Zagadnienia oddziaływań linii elektroenergetycznych na naziemne i podziemne obiekty infrastruktury technicznej, były i ciągle są przedmiotem licznych prac badawczych, których podwaliny teoretyczne zostały opracowane przez F. Pollaczka [82] oraz J. R. Carsona [12, 13]. Główne obszary tych badań skupiają się wokół kilku grup zagadnień, wśród których szczególne miejsce zajmują oddziaływania na metalowe rurociągi, linie telekomunikacyjne czy inne linie elektroenergetyczne.

Badania oddziaływań linii elektroenergetycznych na rurociągi podjęto w latach pięćdziesiątych XX wieku, gdy zaczęto odnotowywać liczne przypadki uszkodzenia infrastruktury gazowej lokalizowanej w pobliżu linii wysokich napięć. Wpływ pola elektromagnetycznego na gazociągi może objawiać się na szereg sposobów, jednak głównym zagrożeniem dla tych obiektów jest zjawisko korozji elektrolitycznej. Badania tych zjawisk zaowocowały licznymi publikacjami zarówno w literaturze zagranicznej, jak i literaturze polskiej. Opublikowane w nich wyniki badań skupiały się na ogólnych zagadnieniach związanych z wyznaczaniem napięć i prądów indukowanych [15, 17, 20, 21, 22, 41] oraz wpływem tych zjawisk na gazociągi [16, 58, 93, 94], ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska korozji [97, 98, 100] i sposobów przeciwdziałania [4, 5]. W literaturze tematu szczególne miejsce zajmują polskie prace prof. W. Machczyńskiego, na przykład [57, 58, 20].

Badania wpływu infrastruktury energetycznej na linie telekomunikacyjne są historycznie najwcześniejsze i sięgają już przełomu XIX/XX wieku. Po raz pierwszy zauważono wówczas, że budowa sieci elektroenergetycznych w sąsiedztwie obwodów telekomunikacyjnych może powodować zakłócenia w ich pracy. Źródłem tych zakłóceń były zarówno zetknięcia przewodów linii elektroenergetycznych z infrastrukturą telekomunikacyjną (liniami, urządzeniami) w czasie awarii, jak i oddziaływanie pola elektromagnetycznego pochodzącego od urządzeń elektroenergetycznych. Skutkiem tych zjawisk było najczęściej występowanie szumu w sygnale telefonicznym. Zauważono również możliwość wystąpienia zagrożenia porażeniowego spowodowanego indukowaniem się napięć i prądów zagrażających zdrowiu i życiu użytkowników urządzeń łączności. Pierwsze badania w tym zakresie prowadzone były przez J. B. Taylora [108] oraz następnie J. J. Smith [96]. Intensywnym okresem badawczym wpływu linii i stacji elektroenergetycznych na linie telekomunikacyjne były lata 60, w których pojawiły się liczne publikacje m.in. A. J. Pesonena [71, 72, 73]. W Polsce prekursorami badań tych zagadnień byli E. Bobiński, W. Gajda oraz A. Piłatowicz [76, 75]. Intensywna rozbudowa zarówno infrastruktury telekomunikacyjnej, jak i elektroenergetycznej była przyczyną opracowania pierwszych wytycznych międzynarodowych między innymi IEEE [36] czy CCITT [14], jak również wytycznych polskich [29].

Wzajemny wpływ dwóch równoległych linii względem siebie objawia się zmianą oddziaływania pola elektromagnetycznego w otoczeniu tych obiektów oraz wzajemnym indukowaniem się napięć. Oddziaływanie to najczęściej będzie związane ze stanem, w którym to linia o napięciu wyższym oddziałuje na linię o napięciu niższym. Badania w tym obszarze skupiają się na oddziaływaniu skumulowanego pola elektromagnetycznego [85], poruszały zagadnienia jakości energii [32, 52, 59], napięć indukowanych i zagrożenia porażeniowego [34, 35, 67], prowadzenia dwóch linii w zbliżeniu [11, 65, 95]. Ponadto poruszane były zagadnienia redukcji oddziaływania linii [66, 70, 87, 104], pracy na potencjale [56, 68], lokalizacji obiektów w pobliżu linii [69] oraz wpływu linii prądu przemiennego na linie prądu stałego [101, 103]. Publikowane były również prace związane z oddziaływaniem napowietrznych linii elektroenergetycznych na linie kablowe [33]. W większości prace te, skupiają się tylko na jednym aspekcie problemu, pomijając pozostałe. Takie podejście powoduje, że obecnie brakuje rozpoznania i szczegółowych wytycznych pozwalających jednoznacznie określić, które z przedstawionych aspektów będą stanowić główne problem w możliwości wykorzystania pasów technologicznych do rozbudowy sieci dystrybucyjnej. Zagadnienie to jest przedmiotem niniejszej dysertacji.

3. Aspekty normatywne możliwości lokalizacji linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych

3.1. Wstęp

Możliwość wykorzystania pasów technologicznych linii przesyłowych do rozbudowy infrastruktury sieciowej wysokich oraz średnich napięć, wymaga określenia szerokości tych pasów oraz z rozważenia technicznych aspektów zbliżenia linii do siebie.

W ogólnym ujęciu pas technologiczny jest obszarem wzdłuż obiektów liniowych, na którym występują ograniczenia w sposobie możliwości zagospodarowania terenu, a jednocześnie poza obszarem tym oddziaływanie obiektu na środowisko nie powinno przekraczać ustalonych przepisami prawa wartości dopuszczalnych. W pasie technologicznym ustanawiana jest służebność gruntowa na rzecz operatora sieci przesyłowej, pozwalająca nie tylko na spełnienie wymagań środowiskowych, ale również na zapewnienie możliwości wykonywania czynności eksploatacyjnych i remontowych. Szerokości pasów technologicznych linii przesyłowych (tab. 3.1) nie są jednakowe, jednak w ogólnym przypadku, czynnikiem determinującym szerokość tych pasów jest oddziaływanie linii na środowisko.

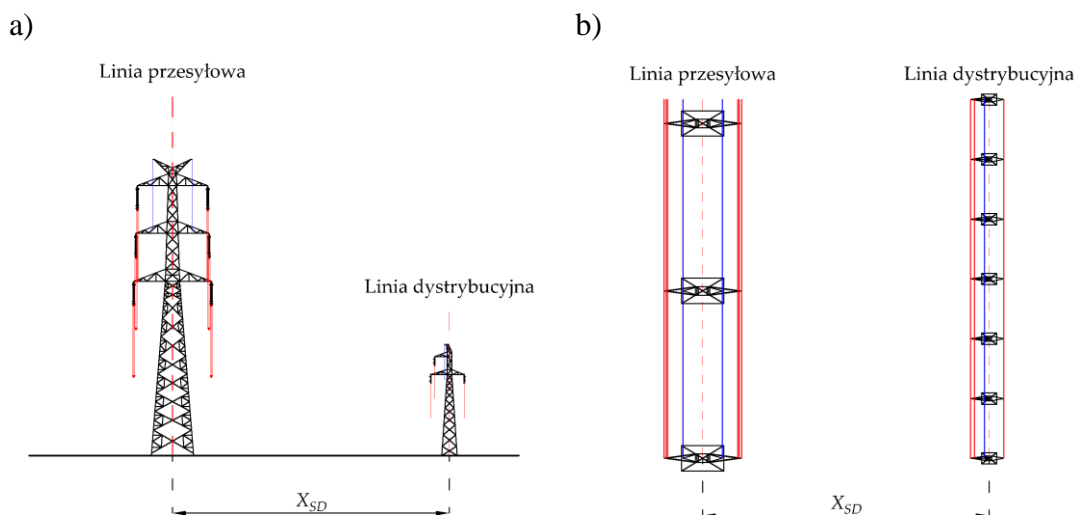
Tabela 3.1 Szerokości pasów technologicznych linii przesyłowych w Polsce [83]

Rodzaj linii	Szerokość pasa technologicznego
Linie 220 kV	50 m (2×25 m)
Linie 400 kV	
– wybudowane do roku 1998	80 m (2×40 m)
– dwutorowe wybudowane na słupach serii Z52	60 m (2×30 m)
– oddane do użytkowania po roku 2010	70 m (2×35 m)
Linia 750 kV	140 m (2×70 m)

Należy podkreślić, że autor w swojej praktyce projektowej spotkał się również z odstępstwami od wartości zawartych w tabeli 3.1, na przykład pas o szerokości 56 m (2×28 m) dwutorowej linii 400 kV. Zgodnie ze specyfikacją techniczną [84] operatora systemu przesyłowego, typowe szerokości pasów technologicznych obecnie budowanych linii przesyłowych 400 kV wynoszą 70 m (2×35 m).

3.2. Analiza normatywnych wymagań prowadzenia linii elektroenergetycznych w zbliżeniu

Możliwość prowadzenia dwóch linii elektroenergetycznych równoległe względem siebie (rys. 3.1) wiąże się z koniecznością spełnienia szeregu wymagań technicznych, zapewniających ich bezpieczną eksploatację. W praktyce spełnienie tych wymagań prowadzi do określenia minimalnej odległości X_{SD} między osiami linii, wynikającej z możliwości zbliżenia tych linii do siebie, uwarunkowanej wytrzymałością elektryczną odstępów powietrznych. Na wielkość X_{SD} wpływ mają również czynniki techniczne związane z konstrukcją słupa oraz rodzajem zastosowanej izolacji, a także czynniki pozatechniczne wynikające przede wszystkim ze specyfiki obszaru na którym zlokalizowane są obie linie (np. przeszkody terenowe).



Rysunek 3.1. Prowadzenie dwóch linii (przesyłowej i dystrybucyjnej) w zbliżeniu, równoległe względem siebie: a) widok przekroju, b) widok z góry
 X_{SD} – odległość między osiami linii

Wymagania co do odległości X_{SD} wynikają z dokumentów normatywnych [78, 79, 80, 81]. Według zapisów obowiązującej normy PN-EN 50341-1:2013-03 (podobnie jak i wydań poprzednich) w Polsce odstępów izolacyjnych wyznacza się dla dwóch układów obciążeń mechanicznych przewodów: 1) przy maksymalnej projektowej temperaturze pracy przewodów oraz 2) przy obciążeniu przewodów wiatrem.

Dla pierwszego układu obciążeń konieczne jest wyznaczenie minimalnych odległości b , pomiędzy przewodami fazowymi linii przesyłowej i linii dystrybucyjnej [77] wyznaczonej dla z parametrów linii o napięciu wyższym:

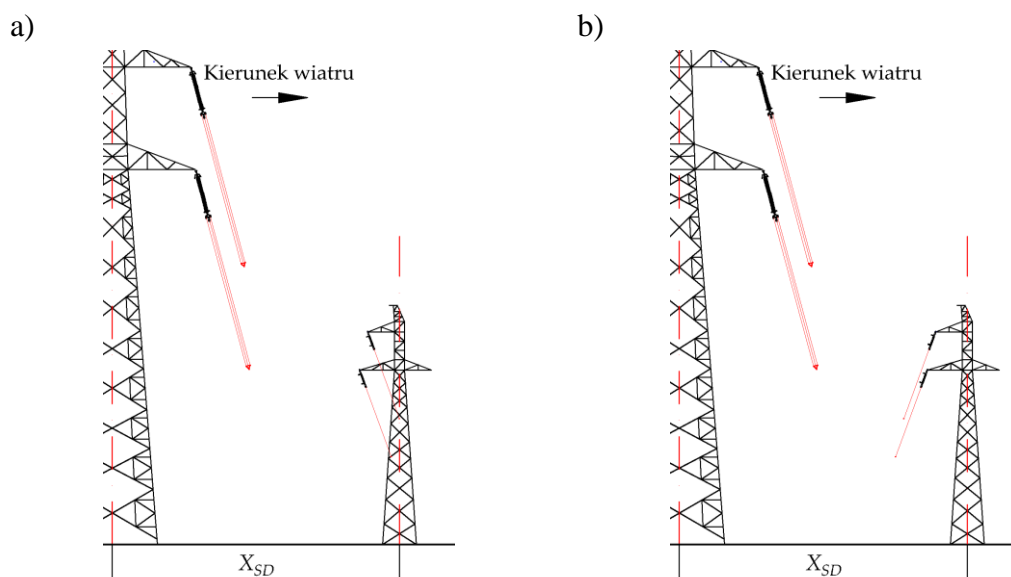
$$b_1 = k\sqrt{f_{+40} + l_i} + k_{pp} D_{pp} \quad (3.1)$$

oraz pomiędzy przewodami odgromowymi a przewodami fazowymi:

$$b_2 = k\sqrt{f_{+40} + l_i} + k_{el}D_{el} \quad (3.2)$$

gdzie: k – współczynniki zależne od materiału i przekroju przewodów; f_{+40} – zwis przewodów w temperaturze $+40^\circ\text{C}$ (m); l_i – długość pionowa łańcuchów przelotowych/zawiesi przelotowych od punktu zawieszenia do przewodu (m); k_{pp} , k_{el} – współczynniki redukcyjne; D_{pp} – minimalny odstęp (m) w powietrzu dla układu faza – faza; D_{el} – minimalny odstęp (m) w powietrzu dla układu faza – ziemia.

Dla drugiego układu obciążeń, w sytuacji obciążenia wiatrem, minimalną wartość parametru X_{SD} wyznacza się na podstawie sprecyzowanych w normie [79] wartości odstępów izolacyjnych D_{pp} dla układu faza–faza. Na rysunku 3.2 zaprezentowano dwa hipotetyczne stany wychylenia przewodów.

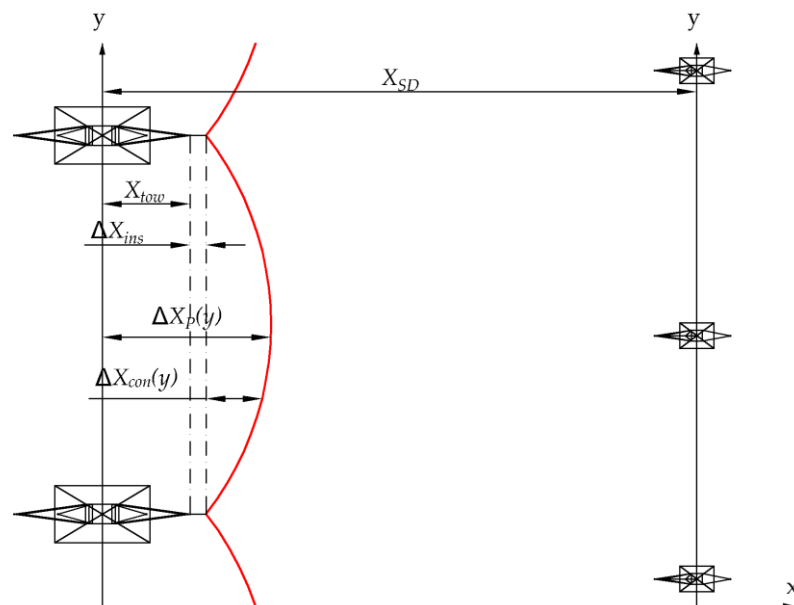


Rysunek 3.2. Hipotetyczne stany wychylenia przewodów a) wychył przewodów obu linii zgodnie z kierunkiem wiatru, b) wychył przewodów do siebie

Wychylenie przewodów przedstawione na rysunku 3.2a wydaje się najbardziej naturalne, ponieważ przewody obu linii wychylają się zgodnie z kierunkiem parcia wiatru. Założenie takiego wychylenia przewodów, mogłoby jednak w wielu przypadkach doprowadzić do sytuacji, w której pomimo spełnienia zapisów normatywnych dochodziłoby do nadmiernego zbliżenia pomiędzy przewodami dwóch linii. Istnieje bowiem realne zagrożenie, że przewody obu linii mogą wychylić się ku sobie jak przedstawiono na rysunku 3.2b. W sytuacji wystąpienia porywów wiatru, siła pozioma, której źródłem jest parcie wiatru ulega częstym zmianom, co przekłada się na nadanie układowi określonej energii potencjalnej w momencie wychylenia przewodów. Tym samym, w momencie gdy brakuje parcia wiatru lub zostanie ono nagle zredukowane, układ pod wpływem siły ciężkości zacznie oscylować, powodując

wychylanie się przewodów do czasu wytracenia zgromadzonej energii. Ze względu, na fakt, iż linie przesyłowe i dystrybucyjne na ogół charakteryzują się różnymi długościami przęseł, naciągami i rodzajem przewodów, istnieje realna szansa zaistnienia takiej sytuacji. Dodatkowo, należy uwzględnić fakt, że zapis w normie dotyczy konieczności zachowania odległości D_{pp} dla 58-procentowego obciążenia tzw. wiatrem nominalnym, pomijając całkowicie obciążenie wiatrem ekstremalnym. Z tego powodu minimalne odległości zbliżenia ze względu na warunek obciążenia wiatrem powinny być większe niż suma wartości D_{pp} oraz wychyłów przewodów obu linii ku sobie.

W celu określenia odległości $\Delta x_p(y)$ w jakiej może znaleźć się wychylający się przewód względem osi linii w określonym przekroju linii, konieczne jest określenie trzech głównych czynników: wysięgu poprzecznika, rodzaju izolacji oraz odległości wynikającej z wychylenia przewodu. Na rysunku 3.3 przedstawiono graficzną interpretację wpływu poszczególnych składowych na odległość przewodu od osi linii.



Rysunek 3.3. Składowe odległości przewodu od osi linii w sytuacji obciążenia wiatrem

$\Delta x_p(y)$ – odległość rzutu przewodu od osi linii, X_{tow} – odległość wysięgu poprzecznika,
 ΔX_{ins} – odległość wysięgu izolatora, $\Delta X_{con}(y)$ – odległość wychylenia przewodów

Pierwszy z wymienionych czynników – wysięg poprzecznika X_{tow} jest składową stałą, zależną od typu konstrukcji wsporczej. Na ogół przy zastosowaniu typowych łańcuchów izolatorowych wartość wysięgu poprzecznika jest podana w katalogach producentów konstrukcji wsporczych.

Drugi czynnik, którym jest rodzaj zastosowanej izolacji, wpływa bezpośrednio na wartość odległości ΔX_{ins} . W zależności od rodzaju zastosowanych łańcuchów izolatorowych wartość ΔX_{ins} może być wielkością stałą lub zmienną. Przy zastosowaniu łańcuchów odciągowych oraz łańcuchów przelotowych typu ŁP, ŁP2, ŁPA i im podobnych, wychylenie łańcucha a tym samym wartość parametru ΔX_{ins} zależec będzie od parcia wiatru, długości oraz budowy łańcucha. W przypadku łańcuchów

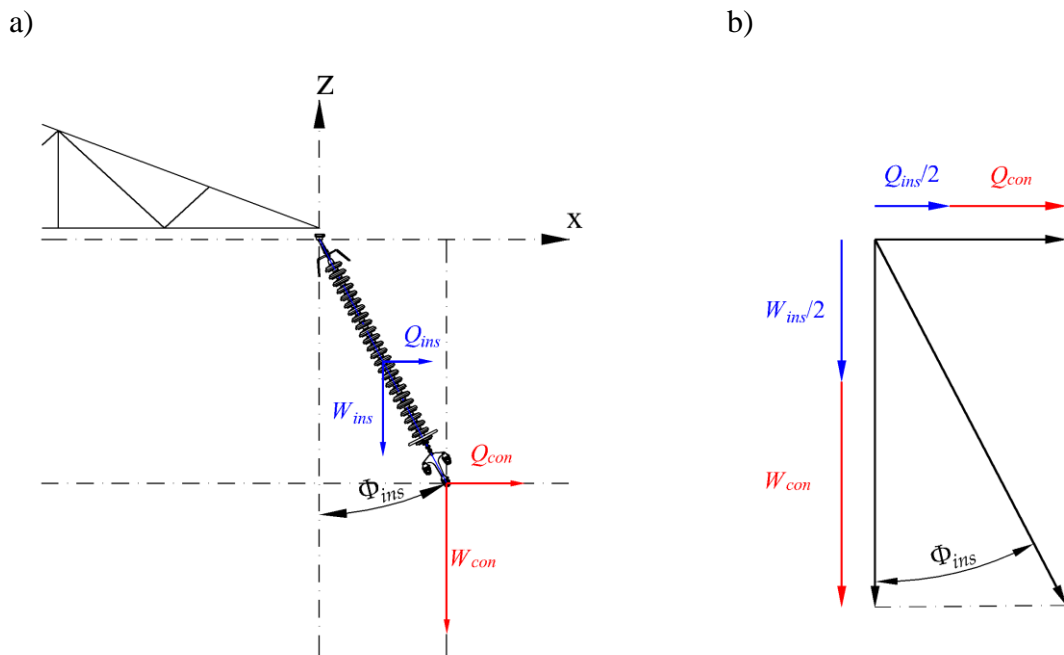
z ograniczonym stopniem swobody (takich jak ŁPV) oraz izolatorów wsporczych, wartość ta będzie stała – niezależna od sił zewnętrznych. Dla łańcuchów przelotowych typu ŁPV wartość parametru ΔX_{ins} ma wartość ujemną i jest równa połowie rozstawu łańcucha, natomiast dla izolatorów wsporczych wynosi 0 m.

Dla pozostałych typów łańcuchów izolatorowych, jak ŁP czy ŁP2 wartość parametru ΔX_{ins} można wyznaczyć wg wzoru:

$$\Delta X_{ins} = l_{ins} \operatorname{tg} \Phi_{ins} \quad (3.3)$$

gdzie: l_{ins} – długość łańcucha przelotowego, Φ_{ins} – kąt wychylenia łańcucha (rys. 3.4).

Ogólne wytyczne dotyczące wyznaczania kąta Φ_{ins} (oraz kąta wychyłu przewodów Φ_{con}) zawarte są w normie [78]. Aby wyznaczyć kąt wychyłu łańcucha izolacyjnego należy wziąć pod uwagę zarówno oddziaływanie wynikające z sił parcia wiatru i ciężaru łańcucha, ale również należy uwzględnić oddziaływanie pochodzące od przewodu.



Rysunek 3.4. Rozkład sił działających na łańcuch przelotowy: a) rozkład sił w łańcuchu; b) zastępczy układ sił sprowadzony do punktu zawieszenia łańcucha

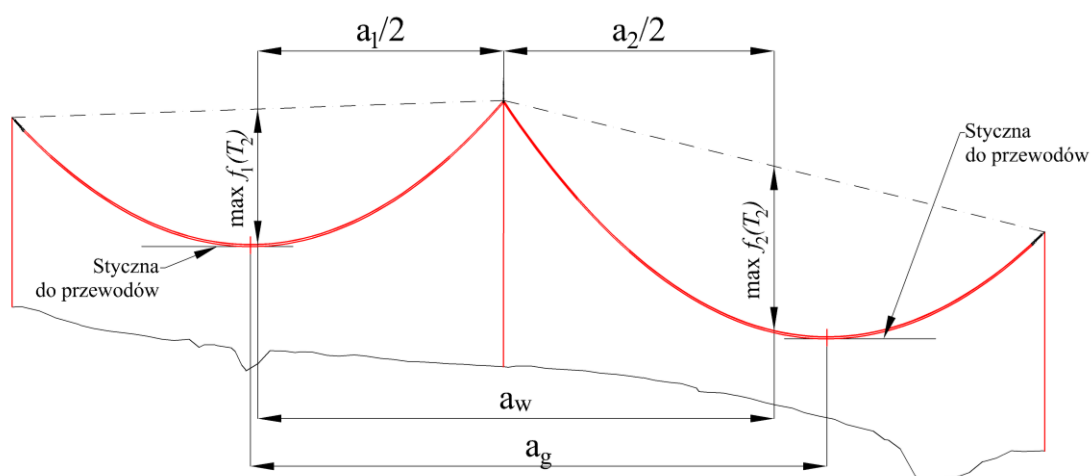
Kąt Φ_{ins} wychyłu izolatora otrzymuje się poprzez rozwiązanie równania równowagi momentów sił ciężkości W_{ins} (ciężar łańcucha) i W_{con} (ciężar przewodu) oraz sił parcia wiatru Q_{ins} (na łańcuch) i Q_{con} (na przewód):

$$\sum \vec{M}_{ins} + \sum \vec{M}_{con} = 0 \quad (3.4)$$

Traktując łańcuch jak bryłę sztywną, rozwiązaniem równania 3.4 jest:

$$\Phi_{ins} = \arctg \left(\frac{Q_{con} + \frac{1}{2} Q_{ins}}{W_{con} + \frac{1}{2} W_{ins}} \right) \quad (3.5)$$

Wyznaczenie wartości sił Q_{con} należy przeprowadzić dla rozpiętości przęsła wiatrowego, a W_{con} dla rozpiętości przęsła ciężarowego. Rozpiętość przęsła wiatrowego definiowana jest jako średnia arytmetyczna rozpiętości przęseł sąsiednich dla danej konstrukcji wsporczej. Natomiast rozpiętość przęsła ciężarowego wyznaczana jest jako suma odległości pomiędzy punktami przegięcia krzywych zwisania dwóch sąsiadujących z analizowaną konstrukcją wsporczą przęseł. Na rysunku 3.5 zaprezentowano graficzną interpretację dla rozpiętości przęsła ciężarowego i rozpiętości przęsła wiatrowego.



Rysunek 3.5. Wizualizacji rozpiętości przęsła wiatrowego i ciężarowego
 a_1, a_2 – rozpiętość przęsła, a_w – rozpiętość przęsła wiatrowego, a_g – rozpiętość przęsła ciężarowego

Ostatnim, i kluczowym czynnikiem jest odległość wychylenia przewodu $\Delta X_{con}(y)$, dla której wyznaczenia wymagana jest znajomość parametrów mechanicznych przewodu oraz oddziaływania wiatrem. Wykonanie obliczeń $\Delta X_{con}(y)$ jest trudne i w praktyce inżynierskiej wymaga zastosowania specjalistycznego oprogramowania wykorzystującego na przykład metodę elementów skończonych albo zastosowania metody uproszczonej. W metodzie tej przyjmuje się między innymi następujące założenia:

- krzywa zwisania przewodu jest parabolą;
- przewód zachowuje się jak bryła sztywna;
- punkty zawieszenia przewodów znajdują się na tej samej wysokości;
- pomija się zwiększenie naprężeń przewodów pochodzących od siły wiatru.

Uwzględniając powyższe założenia, ogólne równanie na wartość odległości wysięgu przewodu w dowolnym miejscu przęsła przyjmuje postać:

$$\Delta X_{con}(y) = f(y, T_2) \operatorname{tg} \Phi_{con} \quad (3.5)$$

gdzie: $f(y, T_2)$ – wartości zwisu przewodu (m) w odległości y dla temperatury przewodu T_2 ; Φ_{con} – kąt wychylenia przewodu pod wpływem wiatru.

Do wyznaczenia wychylenia przewodów konieczne jest rozwiązanie *równania stanu przewodów* [47]:

$$H_{C2}^2 \left[H_{C2} - H_{C1} + \frac{E_Y A (am_{C1}g)^2}{24H_{C1}^2} + E_Y A \varepsilon_t (T_2 - T_1) \right] = \frac{E_Y A (am_{C2}g)^2}{24} \quad (3.6)$$

gdzie: H_{C1} – naciąg przewodu w stanie referencyjnym (N); H_{C2} – naciąg przewodu w stanie poszukiwanym (N); E_Y – moduł sprężystości wzdłużnej przewodu (N/m²), A – przekrój obliczeniowy przewodu (m²); a – długość przęsła (m); m_{C1} – masa jednostkowa przewodu w stanie referencyjnym (kg/m); m_{C2} – masa jednostkowa przewodu w stanie poszukiwanym (kg/m); g – przyspieszenie ziemskie (m/s²); ε_t – współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej przewodu (1/°C); T_1 – temperatura w stanie referencyjnym (°C); T_2 – temperatura w stanie poszukiwanym (°C).

Do wyznaczenia naciągu w sekcji odciągowej przyjmuje się długość tzw. przęsła równoważnego a_{id} , którego wartość wyznacza się z zależności:

$$a_{id} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i}} \quad (3.7)$$

gdzie: a_i – długość i -tego przęsła (m); $i = 1, 2, \dots, n$ – numer przęsła w sekcji odciągowej.

Równanie stanu przewodu przyjmuje postać:

$$H_{C(T_2)}^3 + H_{C(T_2)}^2 \left[\frac{E_Y A (am_{C1}g)^2}{24H_{C(T_1)}^2} + E_Y A \varepsilon_t (T_2 - T_1) - H_{C(T_1)} \right] - \frac{E_Y A (am_{C2}g)^2}{24} = 0 \quad (3.8)$$

Warunki referencyjne są zawsze jednoznacznie określone (np. $H_{C(T_1)} = 15000$ N w 10°C). Przyjmując określone stałe materiałowe przewodu oraz wartość temperatury w której poszukiwane są wartości zwisu (np. $T_2 = 40^\circ\text{C}$) przedstawione równanie wielomianowe trzeciego stopnia z jedną niewiadomą $H_{C(T_2)}$ rozwiązywane jest metodami numerycznymi. Znajomość wartości naciągu przewodu $H_{C(T_2)}$ pozwala wyznaczyć maksymalny zwis w przęsle zgodnie z równaniem:

$$\max_y [f(y, T_2)] = \frac{a_i^2 m_{c2} g}{8H_{c2}(T_2)} \quad (3.9)$$

Zgodnie z jednym z podstawowych założeń opisując zwis przewodu funkcją paraboliczną możliwe jest określenie wartości zwisu $f(y, T_2)$ w dowolnym punkcie zawieszenia.

Kąt wychyłu przewodów Φ_{con} , wyznaczany jest według analogicznej procedury jak kąt wychylenia izolacji:

$$\Phi_{con} = \arctg\left(\frac{Q_{con}}{W_{con}}\right) \quad (3.10)$$

Wyznaczenie parcia wiatru zgodnie z obecną normalizacją [78, 79], gdzie wartość referencyjną V_R – prędkości wiatru, wyznacza się według wzoru:

$$V_R = V_h(h) = c_{dir} c_o k_t \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) V_{b,0} \quad (3.11)$$

gdzie: c_{dir} – współczynnik kierunkowy wiatru; k_t – współczynnik terenu; c_o – współczynnik orografii; h – wysokość odniesienia nad poziomem terenu (m); z_0 – wymiar chropowatości terenu (m); $V_{b,0}$ – bazowa prędkość wiatru wg normy (m/s).

Bazowa prędkość wiatru $V_{b,0}$, określona jest dla poszczególnych stref wiatrowych. Rozwijając składniki w równaniach 3.5 oraz 3.10, równania wychyłu łańcuchów izolatorowych oraz przewodów przyjmują postać:

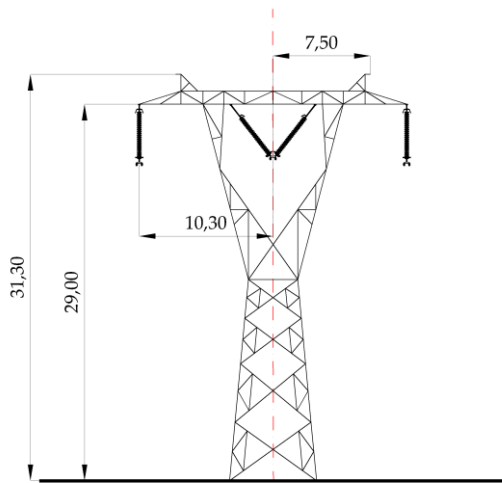
$$\Phi_{ins} = \arctan\left(\frac{0,58\left(\frac{\rho}{2}\right)C_{con}V_R^2G_{con}Da_w + \frac{0,58\left(\frac{\rho}{2}\right)C_{ins}V_R^2G_{ins}A_{ins}}{2}}{m_c g a_c + \frac{1}{2}m_{ins}g}\right) \quad (3.12)$$

$$\Phi_{con} = \arctan\left(\frac{0,58\left(\frac{\rho}{2}\right)C_{con}V_R^2G_{con}Da_w}{m_c g a_c}\right) \quad (3.13)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza (kg/m^3); C_{con} – współczynnik oporu aerodynamicznego przewodu; C_{ins} – współczynnik oporu aerodynamicznego izolatora; G_{con} – współczynnik konstrukcyjny dla przęsła; G_{ins} – współczynnik konstrukcyjny dla izolatora; D – średnica przewodu (m), a_w – długość przęsła wiatrowego (m); a_c – długość przęsła ciężarowego (m); m_c – masa jednostkowa przewodu (kg/m^3); m_{ins} – masa łańcucha izolacyjnego (kg).

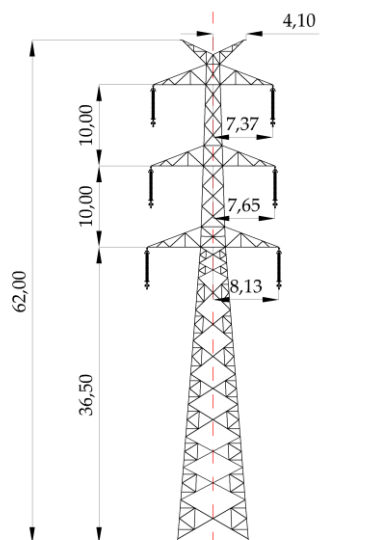
3.3. Wyniki analizy możliwości lokalizacji linii dystrybucyjnych ze względów na wymagania normatywne

Spośród szeregu katalogowych rozwiązań analizie poddano typowe konstrukcje wspanocze linii przesyłowych 400 kV. W liniach jednotorowych podstawowymi słupami są konstrukcje z płaskim układem przewodów, natomiast w liniach dwutorowych z pionowym, lub zbliżonym do pionowego układzie przewodów. Sylwetki słupów przedstawiono na rysunkach 3.6 oraz rysunku 3.7.



Seria	Y25
Typ	P
Przewody robocze	2 x AFL–8 525 mm ²
Napężenie przewodów roboczych	90 MPa
Przewody odgromowe	AFL–1,7 70 mm ²
Napężenie przewodów odgromowych	190 MPa
Nominalna rozpiętość przęsła	450 m

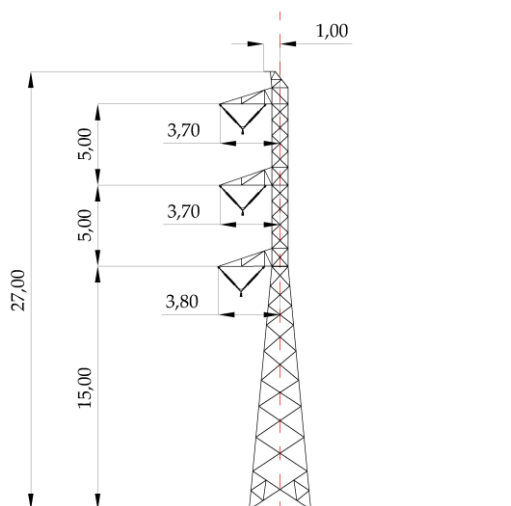
Rysunek 3.6. Sylwetka oraz wybrane dane katalogowe jednotorowego słupa linii 400 kV [7]



Seria	E33
Typ	P
Przewody robocze	3 x AFL–8 350 mm ²
Naciąg przewodów roboczych	22,7 kN
Przewody odgromowe	AFL–1,7 95 mm ²
Naciąg przewodów odgromowych	13,7 kN
Nominalna rozpiętość przęsła	450 m

Rysunek 3.7. Sylwetka oraz wybrane dane katalogowe dwutorowego słupa linii 400 kV [8]

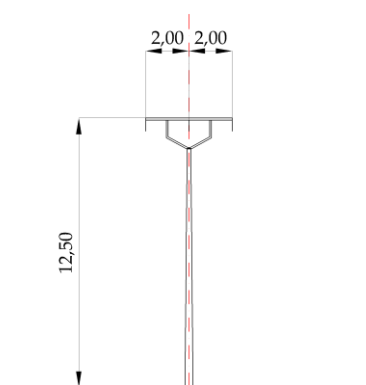
Spośród rozwiązań katalogowych sylwetek słupów linii dystrybucyjnych, w analizie przyjęto sylwetki przedstawione na rysunkach: rysunek 3.8 – linia wysokiego napięcia, rysunek 3.9 – linia średniego napięcia 15 kV. Wybór konstrukcji wsporczych został dokonany arbitralnie z uwzględnieniem informacji dotyczących typowych pasów technologicznych linii przesyłowych oraz doświadczeń autora rozprawy. Ma to szczególne znaczenie w przypadku linii 110 kV, których konstrukcje mogą cechować się dość dużą różnorodnością.



Seria	EJ24
Typ	PL
Przewody robocze	AFL-6 240 mm ²
Naciąg przewodów roboczych	17,0 kN
Przewody odgromowe	AFL-1,7 70 mm ²
Naciąg przewodów odgromowych	13,0 kN
Nominalna rozpiętość przęsła	320 m

* sylwetka słupa dla strefy S2 W2, naciągi podane dla S1 W1

Rysunek 3.8. Sylwetka oraz wybrane dane katalogowe jednotorowego słupa linii 110 kV [9]



Seria	LSNS 70 (50)
Typ	P2
Przewody robocze	AFL-6 70 mm ²
Napężenie przewodów roboczych	110 MPa
Nominalna rozpiętość przęsła	137 m

Rysunek 3.9. Sylwetka oraz wybrane dane katalogowe jednotorowego słupa linii 15 kV [28]

Dane przewodów fazowych oraz odgromowych wykorzystywane w badaniach zostały zaczerpnięte z katalogu producenta przewodów [6].

Uwzględniając przedstawione w wcześniejszych podrozdziałach normatywne wymagania dotyczące stanów mechanicznego obciążenia przewodów oraz danych sylwetek słupów otrzymano trzy grupy zakresów odległości między osiami linii w których:

- zabroniona jest lokalizacja linii;
- możliwa jest lokalizacja linii w szczególnych przypadkach (np. w zakresie ograniczonych długości przęseł lub odpowiednia lokalizacja słupów);
- dopuszczalna jest lokalizacja linii bez żadnych ograniczeń technicznych.

Wartości parametrów zostały przyjęte zgodnie z najnowszą normą dla typowych wymagań projektowanych linii w pierwszej strefie wiatrowej. Wyniki określające zakres możliwości lokalizacji linii ze względu na wymagania normatywne przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Zakresy zabronionych, przejściowych oraz dopuszczalnych odległości między osiami dwóch równoległych linii

Linia systemowa	Linia dystrybucyjna	Odległość X_{SD} (m)		
		strefa zabroniona	strefa przejściowa	strefa dopuszczalna
400 kV – linia jednotorowa Y25 P – układ płaski	110 kV – linia jednotorowa EJ24 PL – układ pionowy	< 18,94	18,94÷27,83	> 27,83
	15 kV – linia jednotorowa LSNS P2 – układ płaski	< 17,66	17,66÷29,16	> 29,16
400 kV – linia dwutorowa E33 P – układ pionowy	110 kV – linia jednotorowa EJ24 PL – układ pionowy	< 17,24	17,24÷27,81	> 27,81
	15 kV – linia jednotorowa LSNS P2 – układ płaski	< 15,96	15,96÷29,14	> 29,14

W ramach rozważań przyjęto, że dalsze badania zostaną przeprowadzone dla jednej wartości szerokości pasa technologicznego wynoszącej 70 m (2×35 m), która jest zgodna z obowiązującym standardem. Otrzymany zakres wartości X_{SD} dla strefy przejściowej oraz strefy dopuszczalnej potwierdzają, że ze względów normatywnych nie ma technicznych przeciwwskazań do lokalizacji linii dystrybucyjnej w założonym pasie technologicznym linii przesyłowej.

4. Badania skumulowanych pól elektrycznych w zbliżonych liniach przesyłowych i dystrybucyjnych

4.1. Wstęp

Rozważając lokalizację linii dystrybucyjnych w zbliżeniu do linii przesyłowych, wyróżnić można trzy przypadki oddziaływania pola elektrycznego, które przedstawiono na rysunku 4.1. W przypadku pierwszym (rys. 4.1a), linia dystrybucyjna zlokalizowana jest na zewnątrz pasa technologicznego linii przesyłowej, a odległość X_{SD} między osiami linii jest na tyle duża, że występuje indywidualne oddziaływanie pola elektrycznego każdej z tych linii. Łączna szerokość stref oddziaływania jest większa niż szerokość pasa technologicznego linii przesyłowej:

$$S_{E(LP)} + S_{E(LD)} > S_{PT} \quad (4.1)$$

gdzie: $S_{E(LP)}$ – szerokość strefy oddziaływania linii przesyłowej; $S_{E(LD)}$ – szerokość strefy oddziaływania linii dystrybucyjnej; S_{PT} – szerokość pasa technologicznego linii przesyłowej.

W drugim (rys. 4.1b) i trzecim przypadku (rys. 4.1c), linia dystrybucyjna zlokalizowana jest w pasie technologicznym linii przesyłowej:

$$X_{SD} \leq \frac{S_{PT}}{2} \quad (4.2)$$

i występuje skumulowane oddziaływanie tych linii wywołane superpozycją pól elektrycznych. Szerokość $S_{E(P-D)}$ strefy oddziaływania skumulowanego w przypadku drugim jest mniejsza niż sumaryczna szerokość indywidualnych stref oddziaływania:

$$S_{E(P-D)} < S_{E(LP)} + S_{E(LD)} \quad (4.3)$$

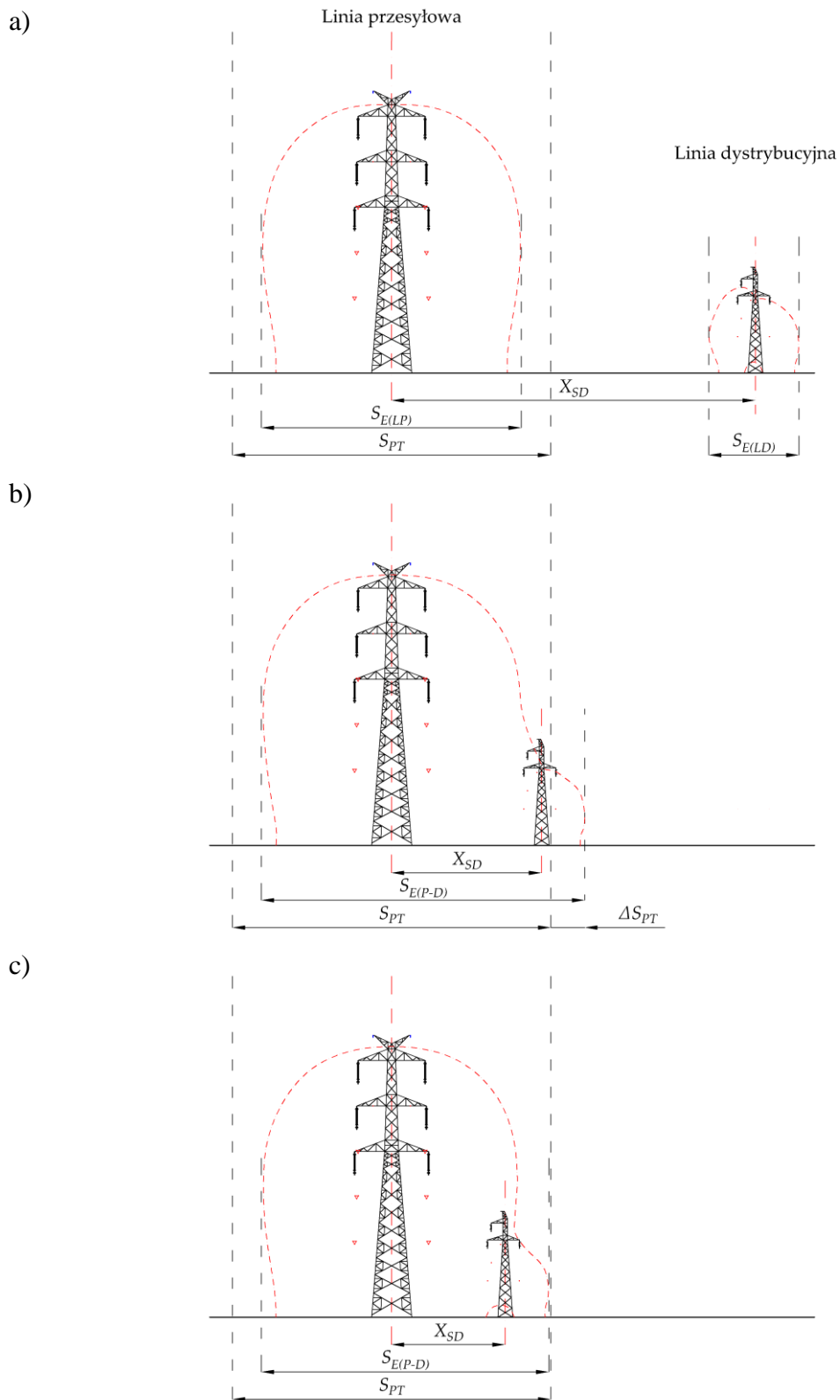
jednak poszerzeniu ulega szerokość pasa technologicznego:

$$S'_{PT} = S_{PT} + \Delta S_{PT} \quad (4.4)$$

Natomiast w przypadku trzecim:

$$S_{E(P-D)} \leq S_{PT} \quad (4.5)$$

Sytuacje przedstawione na rysunkach 4.1b i 4.1c pozytywnie przekładają się na redukcję wpływu oddziaływania pola elektrycznego na środowisko. Jednak w przypadku trzecim, spełniającym nierówność 4.4 uzyskuje się maksymalne wykorzystanie istniejącego pasa technologicznego linii przesyłowej. Właśnie ten przypadek zbliżenia linii dystrybucyjnej do linii przesyłowej jest przedmiotem dalszych rozważań w niniejszej dysertacji.



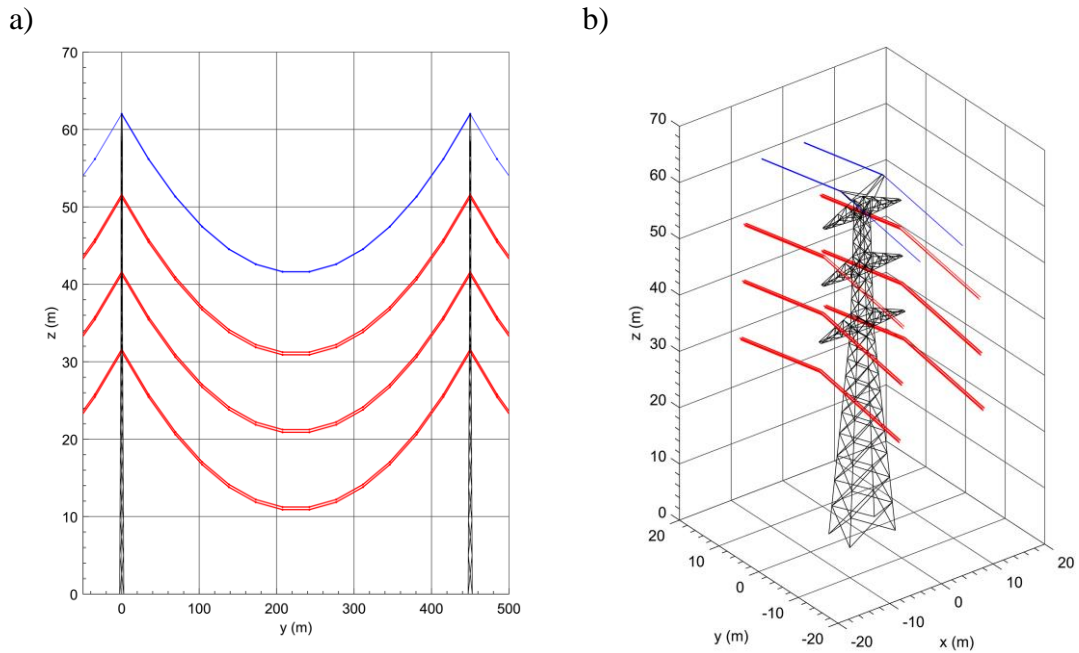
Rysunek 4.1. Lokalizacja linii dystrybucyjnej w zbliżeniu do linii przesyłowej: a) indywidualne obszary stref oddziaływania pól elektrycznych; b) skumulowany obszar stref oddziaływania – zasięg oddziaływania większy niż szerokość pasa technologicznego; c) skumulowany obszar stref oddziaływania – strefa oddziaływania zawarta w pasie technologicznym

4.2. Metoda badań skumulowanych pól elektrycznych

Podstawą modelu obliczania skumulowanej składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii zbliżonych, jest metoda ładunków symulowanych. W metodzie tej rzeczywisty rozkład ładunków na powierzchniach przewodników o znanych wartościach potencjałów, jest zastępowany zbiorem ładunków fikcyjnych (symulujących) tak, aby obraz pola elektrycznego wywołany tymi ładunkami był jak najbardziej zbliżony do obrazu pola ładunków rzeczywistych.

Pierwszym badaczem, który wykorzystał zestaw ładunków skupionych do analiz pola w układzie pręt – płaszczyzna był L. Loeb [55] w 1950 roku. W następnych latach badacze M. S. Abou-Seada i E. Nasser wykorzystali ówczesne komputery do wykonania rozkładu potencjału w celu obliczenia pola elektrycznego dookoła pręta zaokrąglonego [2], a następnie dla układu dwóch cylindrycznych przewodników [3]. Sama nazwa *metoda ładunków symulowanych* (CSM – Charge Simulation Method) została zaproponowana w 1969 roku przez H. Steinbiglera, który w swojej rozprawie doktorskiej [99] przedstawił kompletną procedurę obliczeniową. W tym czasie pojawia się również praca polskiego badacza B. Konorskiego [50]. Należy również odnotować prace szeregu czołowych amerykańskich przedsiębiorstw energetycznych (m.in. General Electric Company) oraz instytucji naukowych (badacze J. G. Anderson, L. E. Zaffanella, D. W. Deno i inni), efektem których było wydanie przez Electric Power Research Institute (EPRI) w 1975 roku pierwszej wersji publikacji *Transmission Line Reference Book. 345 kV and above* [24]. W publikacji tej przedstawione zostały zagadnienia zarówno dotyczące pola elektromagnetycznego, jak również innych zjawisk związanych z oddziaływaniem linii najwyższych napięć, w tym zakłóceń radioelektrycznych oraz hałasu.

W rozważanej metodzie jako ładunki symulujące przyjmuje się najprostsze pod względem geometrycznym elementy, między innymi ładunki liniowe, rozłożone równomiernie na odcinku linii prostej [112]. Na rysunku 4.2 przedstawiono sposób odwzorowania przewodów przykładowego przęsła (rysunku 4.2a) oraz konstrukcji wsporczej dwutorowej linii 400 kV (rysunku 4.2b). Przedstawiona linia wyposażona jest w sześć przewodów fazowych wykonanych jako wiązki trójprzewodowe (łącznie 18 przewodów) oraz dwa przewody odgromowe. Kształt krzywej łańcuchowej każdego z przewodów linii aproksymowano 13 odcinkami prostoliniowymi. Konstrukcja wsporcza została odwzorowana w postaci zbioru 352 odcinków reprezentujących kształtowniki tworzące kratownicę słupa. Potencjały odcinków aproksymujących przewody fazowe są równe napięciom fazowym linii, a potencjały odcinków aproksymujących przewody odgromowe oraz konstrukcję wsporczą są równe zero.



Rysunek 4.2. Sposób odwzorowania przykładowej dwutorowej linii 400 kV do metody ładunków symulowanych: a) przewodów przęsła, b) konstrukcji wsporczej [106]

Podstawą obliczeń jest zastosowanie dla zbioru n ładunków rozłożonych równomiernie na odcinkach aproksymujących metody odbić lustrzanych i zasady superpozycji potencjału, na podstawie której można zapisać układ równań [64, 105, 106, 114]:

$$v_i(t) = \sum_{j=1}^n (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) q_j(t) \quad (4.6)$$

przy czym:

- $v_i(t) = \sqrt{2}U_i \sin(2\pi f t + \varphi_i)$ dla odcinków przewodów fazowych
- $v_i(t) = 0$ dla odcinków przewodów odgromowych i konstrukcji słupa

który również można zapisać w postaci macierzowej:

$$[v(t)] = ([\alpha] - [\beta])^{-1} [q(t)] \quad (4.7)$$

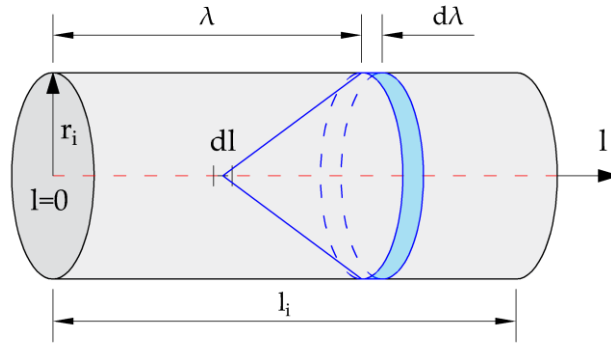
gdzie: $v_i(t)$ – potencjał chwilowy i -tego odcinka aproksymującego; U_i – wartość skuteczna napięcia fazowego i -tego odcinka aproksymującego; f – częstotliwość napięcia; φ_i – faza napięcia; $q_j(t)$ – ładunek j -tego odcinka aproksymującego; α_{ij} – współczynnik potencjalny pomiędzy odcinkiem i -tym, a j -tym; β_{ij} – współczynnik potencjalny pomiędzy odcinkiem i -tym, a odbiciem lustrzanym odcinka j -tego.

W równaniu (4.7) znane są potencjały odcinków aproksymujących $v_i(t)$, natomiast współczynniki potencjalne α_{ij} oraz β_{ij} oblicza się na podstawie geometrii tych odcinków w przyjętym układzie współrzędnych na podstawie następującej zależności:

$$\alpha_{ij} \text{ lub } \beta_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l_i l_j} \iint_{l_i, l_j} \frac{dl_i \cdot dl_j}{r} \quad (4.8)$$

gdzie: r – odległość między elementami dl_i i dl_j przewodów o długościach l_i i l_j .

Współczynniki potencjalne własne α_{ii} ($i = 1, \dots, n$) wyznacza się poprzez skupienie ładunku q_i na osi odcinka, a następnie obliczenie średniego potencjału odcinka wywołanego tym ładunkiem (rys. 4.3).



Rysunek 4.3. Układ do wyznaczania współczynnika potencjalnego własnego

Potencjał dv_i pierścienia o szerokości $d\lambda$ od ładunku skupionego na odcinku elementarnym dl opisany jest równaniem:

$$dv_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 l_i \sqrt{(\lambda - l)^2 + r_i^2}} dl, \quad l \in [0, l_i], \quad \lambda \in [0, l_i] \quad (4.9)$$

W celu wyznaczenia potencjału v_i pierścienia od całego ładunku osi przewodzi się całkowanie równania 4.9 w całym zakresie długości odcinka:

$$v_i = \int_0^{l_i} dv_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 l_i} \left(\operatorname{arsh} \frac{\lambda}{r_i} + \operatorname{arsh} \frac{l_i - \lambda}{r_i} \right) \quad (4.10)$$

Tym samym, wzór na średni potencjał odcinka przewodów przyjmuje postać:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{l_i} \int_0^{l_i} v d\lambda = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0 l_i} \left[\operatorname{arsh} \frac{l_i}{r_i} + \frac{r_i}{l_i} - \sqrt{\left(\frac{r_i}{l_i}\right)^2 + 1} \right] \quad (4.11)$$

Na podstawie zależności (4.11) możliwe jest zapisanie równania na współczynniki potencjalne własne α_{ii} :

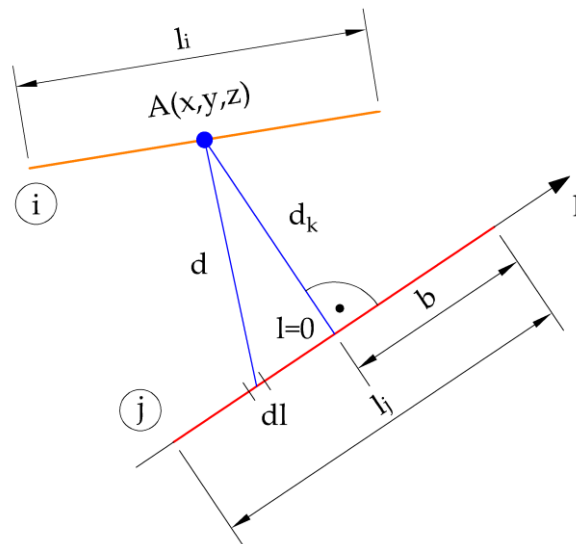
$$\alpha_{ii} = \frac{\bar{v}_i}{q_i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l_i} \left[\operatorname{arsh} \frac{l_i}{r_i} + \frac{r_i}{l_i} - \sqrt{\left(\frac{r_i}{l_i}\right)^2 + 1} \right] \quad (4.12)$$

gdzie: l_i – długość i -tego odcinka aproksymującego; r_i – promień i -tego odcinka aproksymującego; ϵ_0 – stała przenikalności elektrycznej próżni, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

W sytuacji w której $r_i \ll l_i$, typowej dla analizowanych przypadków linii, wzór (4.12) upraszcza się do postaci:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l_i} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_i}{r_i} - 1 \right) \quad (4.13)$$

Wyznaczenie współczynników potencjalnych wzajemnych α_{ij} ($i \neq j$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$) oraz β_{ij} ($i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$) dla dwóch dowolnie usytuowanych odcinków aproksymujących przewoźa się rozważając przewody i -ty i j -ty w przyjętym układzie współrzędnych $0xyz$ (rys. 4.4).



Rysunek 4.4. Układ do wyznaczania współczynnika potencjalnego wzajemnego

Dla odcinka i -tego, znajdującego się w polu elektrycznym ładunku q_j równomiernie rozłożonego w osi odcinka j -tego możliwe jest wyznaczenie potencjału w punkcie $A(x, y, z)$ przewodu i -tego od elementu dl przewodu j -tego zgodnie z równaniem:

$$dv_A = \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0 l_j d} dl = \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0 l_j} \frac{dl}{\sqrt{d_k^2 + l^2}}, \quad l \in [-b, l_j - b] \quad (4.14)$$

Analogicznie jak przy wyprowadzeniu potencjałów własnych, w celu otrzymania potencjału w punkcie A (v_A) od całego odcinka j -tego, konieczne jest wykonanie całkowania równania 4.14:

$$v_A = \int_{-b}^{l_j - b} dv_A = \frac{q_j}{4\pi\epsilon_0 l_j} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_j - b}{d_k} + \operatorname{arsh} \frac{b}{d_k} \right) \quad (4.15)$$

Średni potencjał przewodu i -tego, którego źródłem jest ładunek zgromadzony na przewodzie j -tym można zapisać w postaci równania:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{l_i} \int_{l_i} v_A dl \quad (4.16)$$

W ogólnym przypadku analityczne całkowanie (4.15) według (4.16) nie jest możliwe. Z tego powodu w obliczeniach numerycznych całkę we wzorze (4.16) zastępuje się sumą. Tym samym równanie na średni potencjał przewodu i -tego przyjmuje postać:

$$\bar{v}_i \cong \frac{1}{l_i} \sum_{k=1}^N v_A \Delta l_i \quad (4.17)$$

gdzie N jest liczbą podziału i -tego odcinka aproksymującego na elementarne odcinki o długości $\Delta l_i = l_i/N$. Stosując podstawienie (4.15) do (4.17) otrzymuje się:

$$\alpha_{ij} \text{ (or } \beta_{ij}) = \frac{\bar{v}_i}{q_j} = \frac{\Delta l}{4\pi\epsilon_0 l_i l_j} \sum_{k=1}^N \left(\operatorname{arsh} \frac{l_j - b}{d_k} + \operatorname{arsh} \frac{b}{d_k} \right) \quad (4.18)$$

Nieznany wektor ładunków $[q(t)]$ można wyznaczyć poprzez rozwiązanie równania (4.7):

$$q(t) = (\alpha - \beta)^{-1} u(t) \quad (4.19)$$

Ładunki $q_i(t)$ – jako kombinacje liniowe funkcji harmoniczných o tej samej pulsacji ω , są funkcjami harmonicznymi, które można zapisać w postaci:

$$q_i = Q_i \sin(\omega t + \Theta_i) \quad (4.20)$$

Wyznaczone ładunki odcinków pozwalają, wykorzystując zasadę superpozycji, wyznaczyć potencjał v_B pola elektrycznego w punkcie $B(x,y,z)$ zlokalizowany w otoczeniu linii elektroenergetycznej:

$$v_B(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n [\alpha_{Bi}(x, y, z) - \beta_{Bi}(x, y, z)] q_i(t) \quad (4.21)$$

gdzie $\alpha_{Bi}(\beta_{Bi})$ – współczynnik potencjalny pomiędzy punktem B a i -tym odcinkiem (odbiciem lustrzanym odcinka). Współczynnik ten wynika z zależności (4.8) i (4.18):

$$\alpha_{Bi}(\beta_{Bi}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l_i} \int_{l_i} \frac{dl_i}{r} \quad (4.22)$$

$$\alpha_{Bi}(\beta_{Bi}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 l_i} \left(\operatorname{arsh} \frac{l_i - b}{d_k} + \operatorname{arsh} \frac{b}{d_k} \right), \quad i = 1, \dots, n \quad (4.23)$$

w której r jest odległością między elementem dl_i i -tego przewodu o długości l_i , a punktem B . Wektor natężenia pola elektrycznego w punkcie B jest gradientem potencjału (4.21):

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} v_B(x, y, z, t) \quad (4.24)$$

W przestrzeni trójwymiarowej, wektor ten posiada trzy składowe, które jako funkcje czasu można przedstawić w postaci równań :

$$\begin{cases} E_x(x, y, z, t) = E_{xm}(x, y, z) \sin[\omega t + \phi_x(x, y, z)] \\ E_y(x, y, z, t) = E_{ym}(x, y, z) \sin[\omega t + \phi_y(x, y, z)] \\ E_z(x, y, z, t) = E_{zm}(x, y, z) \sin[\omega t + \phi_z(x, y, z)] \end{cases} \quad (4.25)$$

gdzie: E_{xm}, E_{ym}, E_{zm} – amplitudy wektorów składowych; ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z – fazy wektorów składowych.

W danym punkcie przestrzeni wektor wypadkowy opisuje więc elipsę, a tym samym pole elektryczne ma polaryzację eliptyczną. Wartość chwilową wektora wypadkowego można wyznaczyć z zależności:

$$E(x, y, z, t) = \sqrt{E_x^2(x, y, z, t) + E_y^2(x, y, z, t) + E_z^2(x, y, z, t)} \quad (4.26)$$

Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego E_m wypadkowego wektora stanowić będzie połowę długości osi wielkiej elipsy:

$$E_m(x, y, z) = \max_t \{E(x, y, z, t)\} \quad (4.27)$$

W celu oceny oddziaływania pola elektrycznego na środowisko, wykorzystuje się wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego. Tym samym wartość wyznaczona w punkcie B przyjmowana do oceny oddziaływania wyznaczana jest z równania:

$$E_B(x, y, z) = \frac{\max_t [E(x, y, z, t)]}{\sqrt{2}} \quad (4.28)$$

Bazując na podstawie powyższych założeń oraz równań (4.6)÷(4.28) opracowano numeryczne algorytmy obliczeniowe, które zostały zaimplementowane w programie MATLAB i wykorzystane do badań przedstawionych w niniejszym rozdziale. Poprawność zastosowanych modeli obliczeniowych została potwierdzona pomiarami [49, 106].

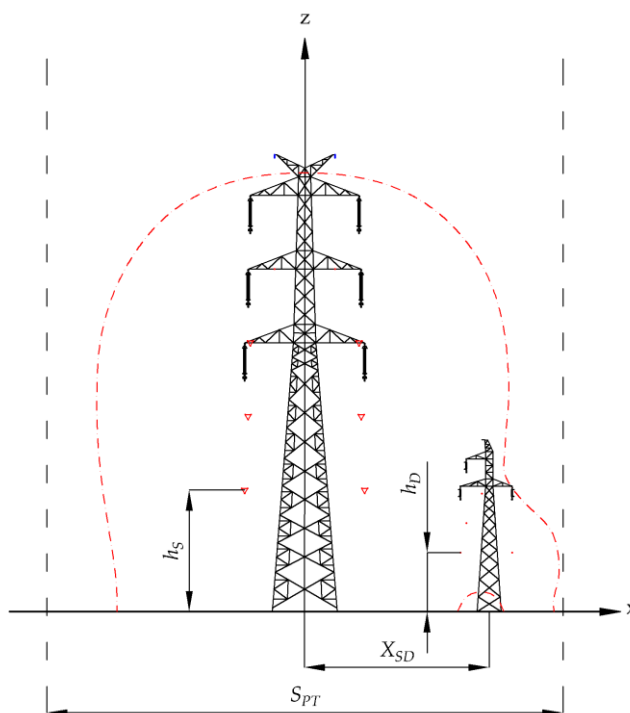
4.3. Wyniki badań skumulowanych pól elektrycznych

Celem badań było wyznaczenie skumulowanego oddziaływania natężenia pola elektrycznego w sytuacji zlokalizowania linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej, zgodnie z ideą przedstawioną na rysunku 4.1c. Wyniki badań przedstawiono w postaci nomogramów natężenia pola elektrycznego $E = 1$ kV/m na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej:

$$E(h_s, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m dla } x = S_{PT}/2 \quad (4.29)$$

dla zmiennych wysokości h_s , h_D przewodów linii przesyłowej i dystrybucyjnej oraz odległości X_{SD} między osiami tych linii (rys. 4.5).

Na rysunkach 4.6÷4.11 przedstawiono nomogramy (4.29) dla wybranych konfiguracji I÷IV lokalizacji linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii przesyłowych (tab. 4.1 i tab. 4.2).

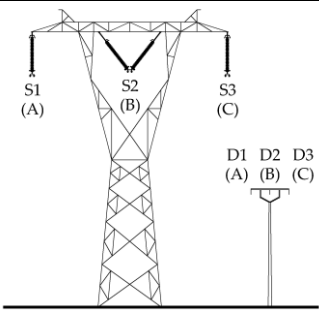
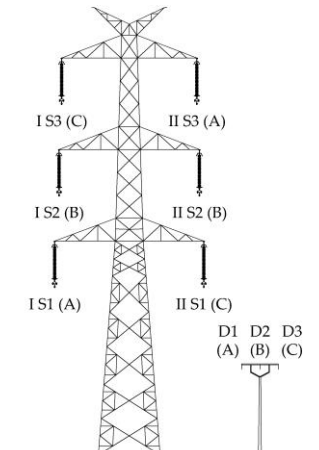


Rysunek 4.5. Graficzna interpretacja parametrów uwzględnionych w badaniach natężenia pola elektrycznego.

Tabela 4.1. Konfiguracje lokalizacji linii dystrybucyjnej 110 kV w pasie technologicznym linii przesyłowej 400 kV

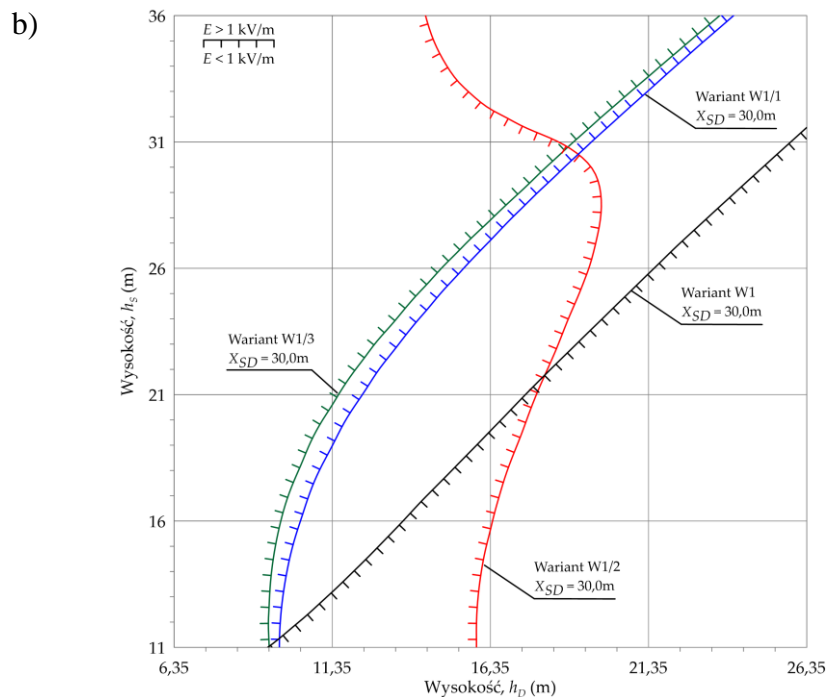
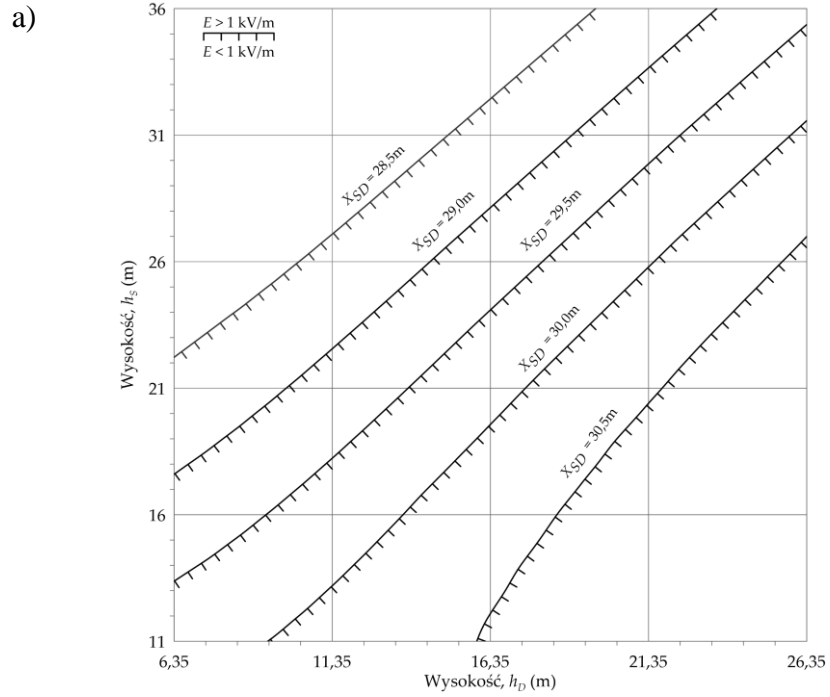
	Wariant konfiguracji	Linia przesyłowa	Linia dystrybucyjna
W1		400 kV jednotorowa układ płaski	110 kV jednotorowa układ pionowy
W2		400 kV dwutorowa układ pionowy	110 kV jednotorowa układ pionowy
A, B, C – oznaczenie fazy			

Tabela 4.2. Konfiguracje lokalizacji linii dystrybucyjnej 15 kV w pasie technologicznym linii przesyłowej 400 kV

Wariant konfiguracji		Linia przesyłowa	Linia dystrybucyjna
W3		400 kV jednotorowa układ płaski	15 kV jednotorowa układ płaski
W4		400 kV dwutorowa układ pionowy	15 kV jednotorowa układ płaski
A, B, C – oznaczenie fazy			

Na rysunku 4.6a przedstawiono nomogram dla konfiguracji W1 z tabeli 4.1. Wartości liczbowe parametrów h_S i h_D odpowiadają typowym zakresom wysokości zawieszenia dolnych przewodów fazowych w liniach przesyłowych 400 kV i w liniach dystrybucyjnych 110 kV. Przedstawione na rysunku 4.6a krzywe dotyczą odległości X_{SD} pomiędzy osiami linii z zakresu 28,5÷30,5 m. Ponadto krzywe te stanowią również granice obszarów wartości parametrów h_S i h_D , dla których wartości natężenia pola elektrycznego na granicy pasa technologicznego są większe niż 1 kV/m albo są mniejsze niż 1 kV/m. Natomiast na rysunku 4.6b przedstawiono nomogram dla wybranej odległości $X_{SD} = 30$ m, ale również dla trzech innych niż w tabeli 4.1 wariantów układu kolejności faz, oznaczonych jako W1/1, W1/2 i W1/3.

Obszar wysokości h_S i h_D , w którym wartości natężenia pola elektrycznego na granicy pasa technologicznego są mniejsze niż 1 kV/m, ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem wartości parametru X_{SD} . Można stwierdzić, że dla $X_{SD} \leq 28$ m na granicy pasa nie wystąpi przekroczenie wartości 1 kV/m, niezależnie od rozpatrywanych wysokości h_S i h_D .

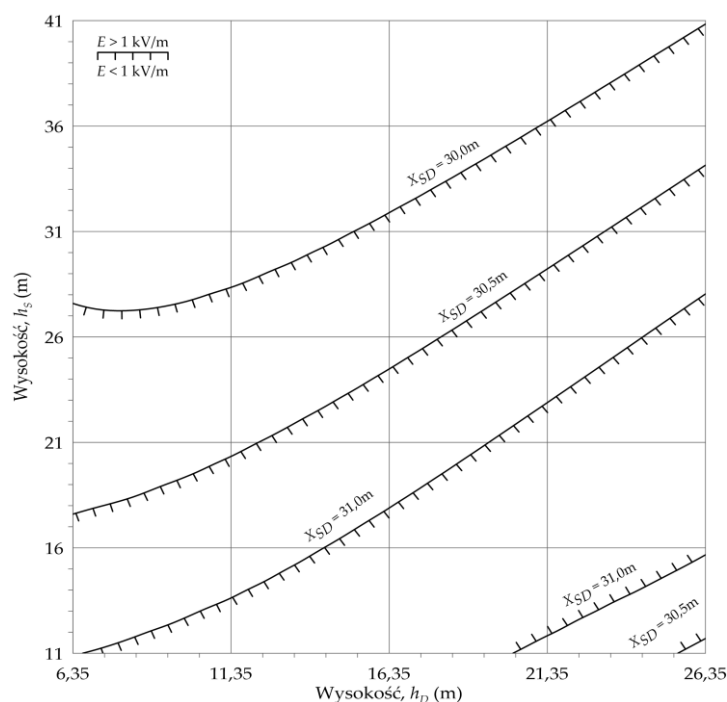


Wariant	Kolejność faz					
	S1	S2	S3	D1	D2	D3
W1	A	B	C	A	B	C
W1/1	A	B	C	C	A	B
W1/2	A	B	C	B	C	A
W1/3	A	B	C	C	B	A

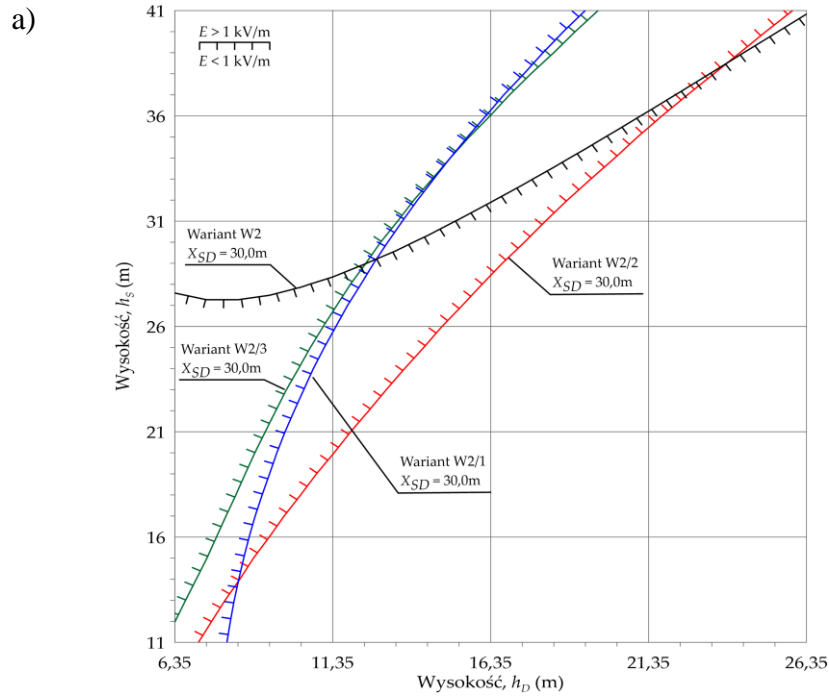
Rysunek 4.6. Nomogram $E(h_s, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji W1: a) układ faz przedstawiony w tabeli 4.1; b) układy faz W1/1, W1/2, W1/3

Natomiast przekroczenie to nastąpi dla odległości $X_{SD} \geq 31$ m. W pozostałym zakresie $28,0 \text{ m} < X_{SD} < 31$ m konieczne jest skorelowanie wysokości zawieszenia przewodów linii dystrybucyjnej 110 kV z wysokością zawieszenia przewodów linii przesyłowej 400 kV, przy czym kolejność faz linii dystrybucyjnej jest czynnikiem istotnie wpływającym na wysokości zawieszenia przewodów h_S, h_D (rys. 4.6b).

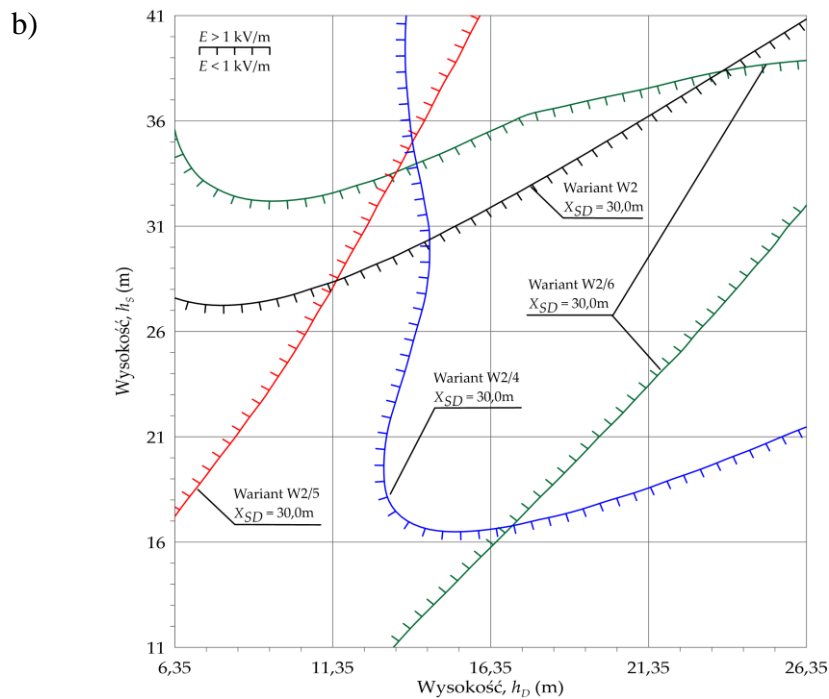
Na rysunku 4.7 przedstawiono dla wariantu W2 (tab. 4.1) nomogram analogiczny jak na rysunku 4.6a dla wariantu W1. Także w tym wariancie zwiększanie wartości parametru X_{SD} powoduje zmniejszenie się dopuszczalnych zakresów wysokości h_S, h_D zawieszenia przewodów linii. Jednak w przeciwieństwie do wariantu W1, dla wartości $X_{SD} = 30,5$ m oraz $X_{SD} = 31,0$ m obszary dopuszczalnych wartości h_S, h_D wyznaczają dwie krzywe graniczne. Ponadto na nomogramie nie występują krzywe dla odległości $X_{SD} < 30,0$ m, dla których wartość 1 kV/m na granicy pasa technologicznego nie zostanie przekroczona niezależnie od rozpatrywanych wysokości h_S i h_D . Nie występują również krzywe dla odległości $X_{SD} > 31,0$ m, dla których na granicy strefy natężenie pola elektrycznego $E > 1$ kV/m. Na rysunku 4.8 przedstawiono nomogramy, uwzględniające wpływ kolejności faz linii dystrybucyjnej 110 kV (rys. 4.8a, warianty W2/1, W2/2, W2/3) oraz linii przesyłowej 400 kV (rys. 4.8b, warianty W2/4, W2/5, W2/6).



Rysunek 4.7. Nomogram $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1$ kV/m na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji W2 przedstawionego w tabeli 4.1

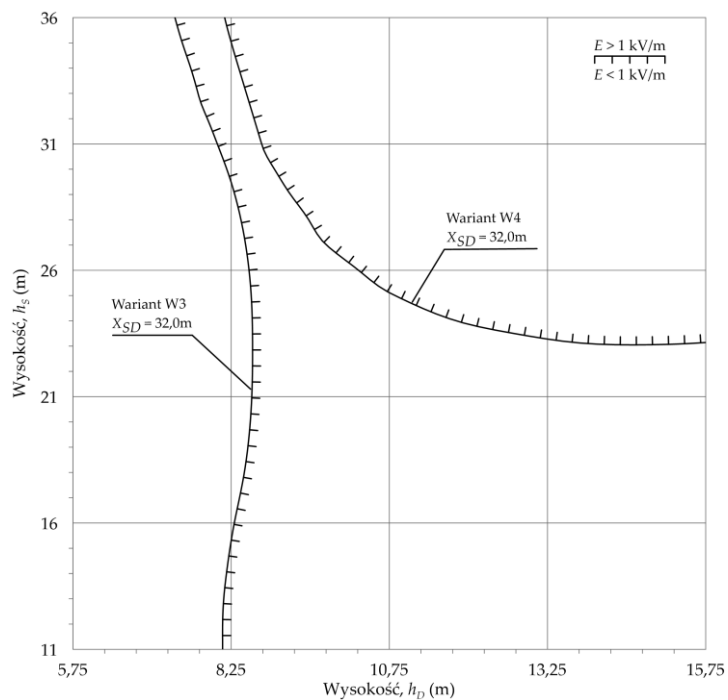


Wariant	Kolejność faz								
	I S1	I S2	I S3	II S1	II S2	II S3	D1	D2	D3
W2	A	B	C	C	B	A	A	B	C
W2/1	A	B	C	C	B	A	C	A	B
W2/2	A	B	C	C	B	A	B	C	A
W2/3	A	B	C	C	B	A	C	B	A

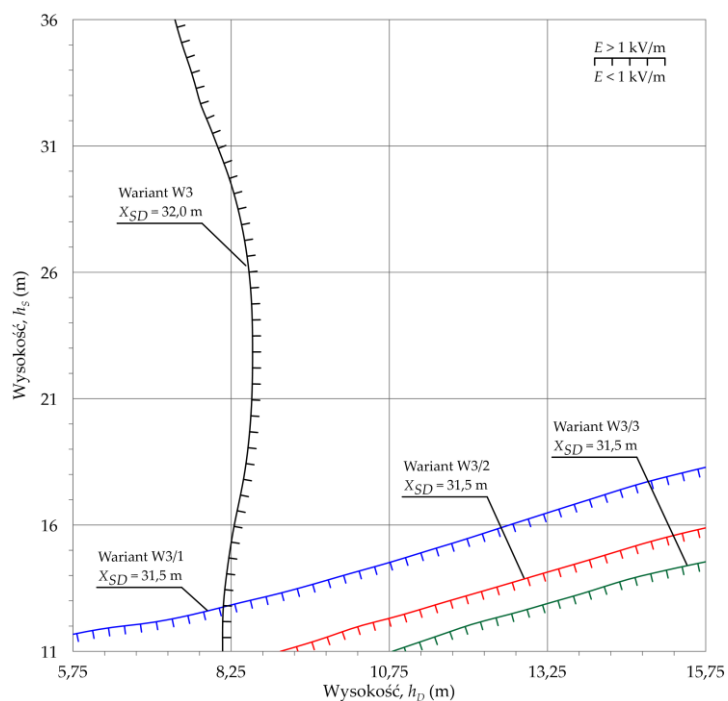


Wariant	Kolejność faz								
	I S1	I S2	I S3	II S1	II S2	II S3	D1	D2	D3
W2	A	B	C	C	B	A	A	B	C
W2/4	A	B	C	B	C	A	A	B	C
W2/5	A	B	C	B	A	C	A	B	C
W2/6	A	B	C	C	A	B	A	B	C

Rysunek 4.8. Nomogram $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji W2 z tabeli 4.1: a) układy faz W2/1, W2/2, W2/3; b) układy faz W2/4, W2/5, W2/6

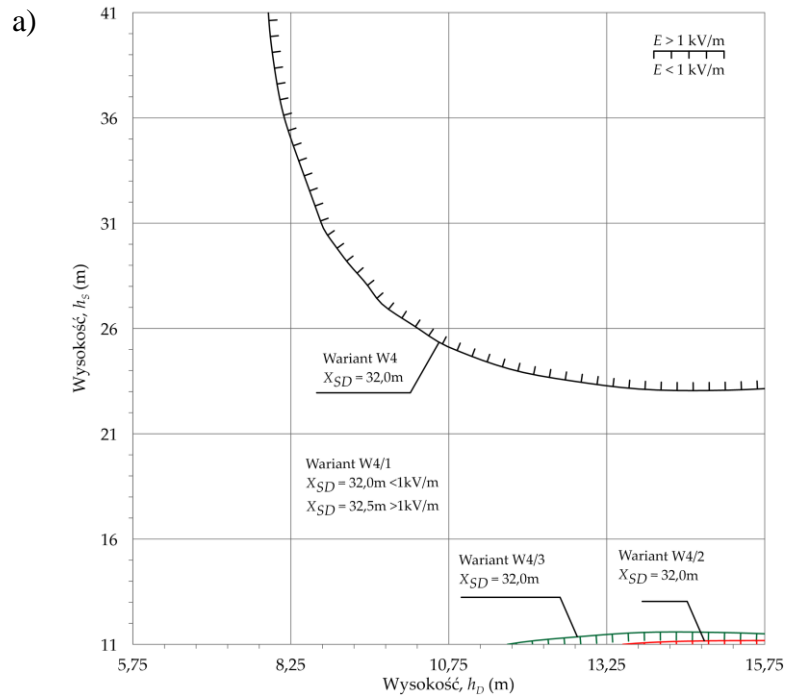


Rysunek 4.9. Nomogram $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji W3 i W4

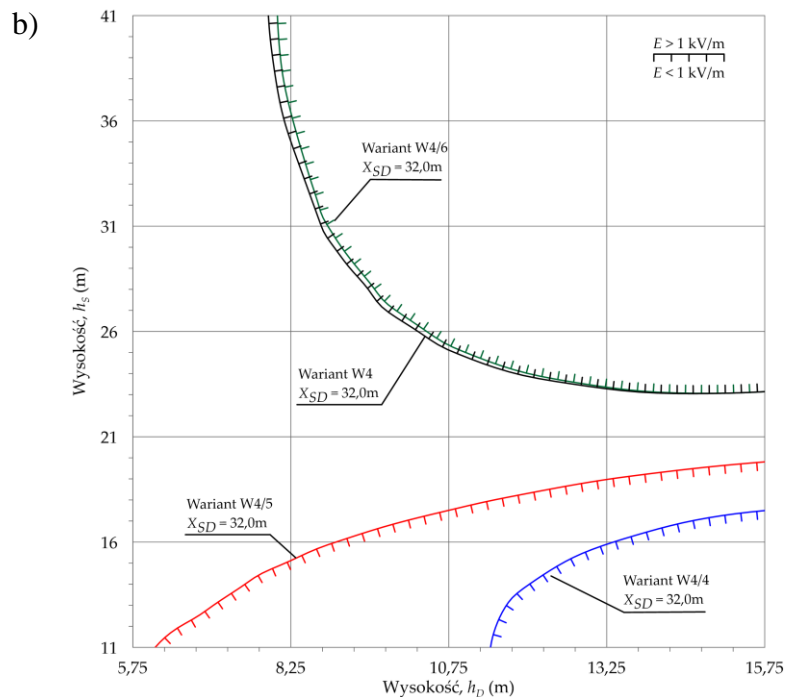


Wariant	Kolejność faz					
	S1	S2	S3	D1	D2	D3
W3	A	B	C	A	B	C
W3/1	A	B	C	C	A	B
W3/2	A	B	C	B	C	A
W3/3	A	B	C	C	B	A

Rysunek 4.10. Nomogram $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1 \text{ kV/m}$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu układu faz W3/1, W3/2, W3/3



Wariant	Kolejność faz								
	I S1	I S2	I S3	II S1	II S2	II S3	D1	D2	D3
W4	A	B	C	C	B	A	A	B	C
W4/1	A	B	C	C	B	A	C	A	B
W4/2	A	B	C	C	B	A	B	C	A
W4/3	A	B	C	C	B	A	C	B	A



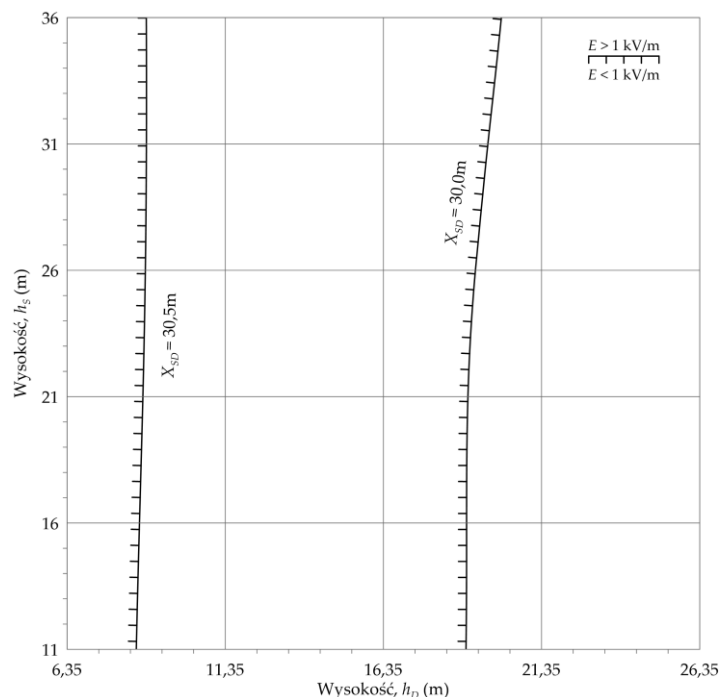
Wariant	Kolejność faz								
	I S1	I S2	I S3	II S1	II S2	II S3	D1	D2	D3
W4	A	B	C	C	B	A	A	B	C
W4/4	A	B	C	B	C	A	A	B	C
W4/5	A	B	C	B	A	C	A	B	C
W4/6	A	B	C	C	A	B	A	B	C

Rysunek 4.11. Nomogram $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1 kV/m$ na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantu konfiguracji W4 z tabeli 4.2: a) układy faz W4/1, W4/2, W4/3; b) układy faz W4/4, W4/5, W4/6

W kolejnych wariantach W3 oraz W4 przedmiotem badań były układy prowadzenia linii dystrybucyjnej 15 kV w pasie technologiczny linii przesyłowej 400 kV. Na rysunku 4.9 przedstawiono nomogram dla tych wariantów.

W porównaniu do przypadków z linią dystrybucyjną 110 kV, w wariantach W3 oraz W4, w analizowanym zakresie wysokości h_S , h_D zawieszenia przewodów występują tylko krzywe dla $X_{SD} = 32,0$ m. Przeprowadzone badania wykazały bowiem, że w rozważanym zakresie wysokości zawieszenia przewodów, dla odległości $X_{SD} \leq 31,5$ m możliwa jest lokalizacja linii dystrybucyjnej 15 kV w pasie technologicznym linii przesyłowej 400 kV, bez ryzyka przekroczenia 1 kV/m natężenia pola elektrycznego na granicy tego pasa. Wniosek ten jest słuszny jednak tylko dla kolejności faz przedstawionych w tabeli 4.2. Podobnie jak miało to miejsce w wariantach W1 oraz W2, w wariantach z linią dystrybucyjną 15 kV również występuje wpływ zależności pomiędzy wysokością h_S , h_D zawieszenia przewodów a kolejnością faz. Nomogramy dla tych przypadków przedstawiono na rysunkach 4.10 (warianty W3/1, W3.2, W3/3 w których zmianie ulegała kolejność faz w linii dystrybucyjnej), 4.11a (warianty W4/1, W4/2, W4/3, również przy zmianie faz w linii dystrybucyjnej) oraz 4.11b (dla kolejności faz linii przesyłowej w wariantach W4/4, W4/5, W4/6).

Przeprowadzono również badania dla wariantów W1 oraz W2 przy założeniu, że linia przesyłowa 400 kV jest odłączona od napięcia a jej przewody fazowe są uziemione, natomiast linia dystrybucyjna 110 kV znajduje się w stanie pracy normalnej (W1/0, W2/0). Sytuacja ta odpowiada stanowi w którym na linii 400 kV wykonywane są czynności eksploatacyjne. Nomogram dla tego przypadku przedstawiono na rysunku 4.12.



Rysunek 4.12. Nomogram $E(h_S, h_D, X_{SD}) = 1$ kV/m na granicy pasa technologicznego linii przesyłowej 400 kV dla wariantów konfiguracji W1 i W2 w stanie wykonywania czynności eksploatacyjnych na linii przesyłowej oraz w normalnym stanie pracy

Nomogram z rysunku 4.12 pokazuje, że wymagane jest również rozważenie wyłączenia linii przesyłowej, w pasie której zlokalizowana jest linia dystrybucyjna 110 kV. Sytuacja ta występuje również przy projektowaniu linii wielotorowych, w których szerokość pasa technologicznego może wynikać ze stanu pracy linii przy pracującym tylko jednym torze.

Przedstawione w niniejszym rozdziale nomogramy stanowią oryginalny sposób wyznaczania maksymalnej odległości między osiami linii zbliżonych do siebie oraz wzajemnej korelacji wysokości zawieszenia ich przewodów. Nomogramy mają charakter użytkowy i umożliwiają wstępny dobór rozwiązań przyczyniających się do intensyfikacji wykorzystania pasów technologicznych linii przesyłowych do budowy i powadzenia w nich linii dystrybucyjnych. Mogą one zostać wykorzystane również przez operatorów sieci dystrybucyjnych, w celu wykorzystania pasów technologicznych jako korytarzy dla własnej infrastruktury. Umożliwiają także dobór odpowiedniego układu przewodów fazowych linii dystrybucyjnej.

Zaprezentowane podejście do tematu oddziaływania pola elektrycznego pozwala na analizę nie tylko linii o napięciach które były przedmiotem badań, ale może zostać rozszerzone na analizę linii o różnych napięciach i konfiguracjach. Podejście to nie jest również ograniczone do jednej wartości granicznej 1 kV/m, ale może zostać dostosowane do innych wartości kryterialnych.

Należy jednak podkreślić, że wnioski płynące z przedstawionej w niniejszym rozdziale analizy stanowią warunek konieczny, ale nie wystarczający dla prowadzenia linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej. Rozważenia bowiem wymagają również inne aspekty tego problemu. Są nimi napięcia indukowane i wynikające z nich zagrożenie porażeniowe, zarówno podczas budowy linii dystrybucyjnej, jak i jej późniejszej eksploatacji, a także wpływ tych oddziaływań na parametry jakości napięcia w linii dystrybucyjnej podczas jej eksploatacji w pasie technologicznym linii przesyłowej. Zagadnienia te są przedmiotem kolejnych rozdziałów niniejszej rozprawy.

5. Modele do badania skutków napięciowych i prądowych oddziaływań elektromagnetycznych linii przesyłowych na linie dystrybucyjne

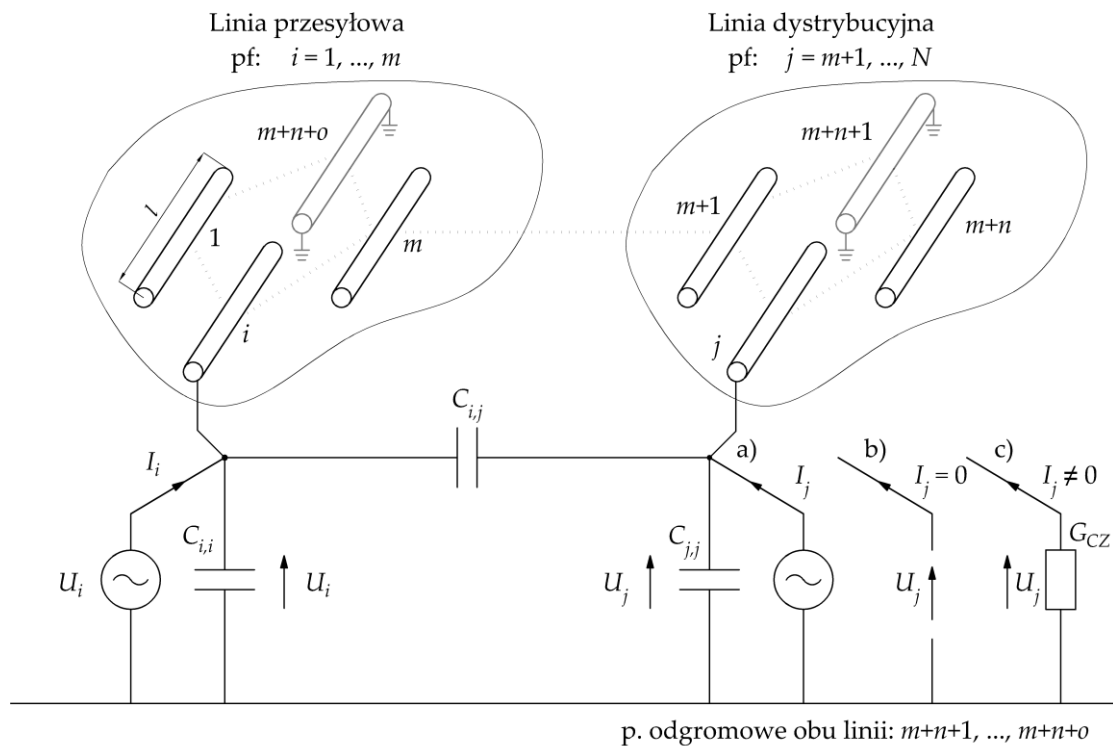
W niniejszym rozdziale przedstawiono opracowane modele matematyczne oddziaływań elektromagnetycznych linii przesyłowych na zlokalizowane w ich pasach technologicznych linie dystrybucyjne. Modele te opracowano jako modele makroskopowe na gruncie teorii obwodów elektrycznych i teorii obwodów ziemnopowrotnych [51, 102]. Umożliwiają one wyznaczenie skutków oddziaływań jakimi są indukowane w (na) przewodach linii dystrybucyjne napięcia i wywołane nimi prądy.

W rozdziale 5.1 przedstawiono uproszczone modele oddziaływań pojemnościowych i magnetycznych, które zastosowanie mają dla wyidealizowanych przypadków zbliżeń linii dystrybucyjnych do linii przesyłowych i umożliwiają przede wszystkim rozpoznanie związków o charakterze jakościowym. Modele uproszczone nie mają jednak bezpośredniego zastosowania do badań skutków oddziaływań w bardziej złożonych układach. W rozdziale 5.2 przedstawiono modele zaawansowane, które ujmują nie tylko jednoczesność oddziaływań pojemnościowych i magnetycznych, ale także pozwalają na uwzględnienie niejednorodności struktur zbliżeń linii dystrybucyjnych do linii przesyłowych.

5.1. Modele uproszczone

5.1.1. Oddziaływanie pojemnościowe

Przyjęty do analizy oddziaływania pojemnościowego wyidealizowany model układu linii przesyłowej i dystrybucyjnej przedstawiono na rysunku 5.1. Model zawiera łącznie m przewodów fazowych linii przesyłowej, n przewodów fazowych linii dystrybucyjnej oraz łącznie o przewodów odgromowych obu linii. Napięcia przewodów fazowych wynoszą U_k , $k = 1, \dots, N$, natomiast przewody odgromowe są uziemione. W modelu wyodrębniono pojemności własne (doziemne) $C_{k,k}$, $k = 1, \dots, N+o$ poszczególnych przewodów oraz pojemności wzajemne $C_{i,j} = C_{j,i}$, $i \neq j$, $i = 1, \dots, N+o$, $j = 1, \dots, N+o$ pomiędzy przewodami.



Rysunek 5.1. Schemat zastępczy oddziaływania pojemnościowego: a) obie linie w stanie pracy normalnej b) linia przesyłowa w stanie pracy normalnej, linia dystrybucyjna odłączona c) linia przesyłowa w stanie pracy normalnej, linia dystrybucyjna odłączona i jeden z przewodów fazowych zwarty doziemnie przez człowieka

Dla rozważanego modelu w ogólnym przypadku (rys. 5.1a) można dla napięć i prądów zapisać równanie macierzowe:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_P \\ \mathbf{I}_D \\ \mathbf{I}_O \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{PP} & \mathbf{C}_{PD} & \mathbf{C}_{PO} \\ \mathbf{C}_{DP} & \mathbf{C}_{DD} & \mathbf{C}_{DO} \\ \mathbf{C}_{OP} & \mathbf{C}_{OD} & \mathbf{C}_{OO} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_P \\ \mathbf{U}_D \\ \mathbf{U}_O \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

gdzie:

$$\mathbf{I}_P = [I_1 \dots I_i \dots I_m]^T, \quad \mathbf{I}_D = [I_{m+1} \dots I_j \dots I_N]^T, \quad \mathbf{I}_O = [I_{N+1} \dots I_{N+1} \dots I_{N+o}]^T$$

$$\mathbf{U}_P = [U_1 \dots U_i \dots U_m]^T, \quad \mathbf{U}_D = [U_{m+1} \dots U_j \dots U_N]^T, \quad \mathbf{U}_O = [0 \dots 0 \dots 0]_{l \times o}^T$$

$$\mathbf{C}_{PP} = \begin{bmatrix} C_{1,1} & \cdots & C_{i,1} & \cdots & C_{m,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1,i} & \cdots & C_{i,i} & \cdots & C_{m,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1,m} & \cdots & C_{i,m} & \cdots & C_{m,m} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{DD} = \begin{bmatrix} C_{m+1,m+1} & \cdots & C_{j,m+1} & \cdots & C_{N,m+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m+1,j} & \cdots & C_{j,j} & \cdots & C_{N,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m+1,N} & \cdots & C_{j,N} & \cdots & C_{N,N} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{OO} = \begin{bmatrix} C_{N+1,N} & \cdots & C_{N+o,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N+1,N+o} & \cdots & C_{N+o,N+o} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{PD} = \begin{bmatrix} C_{m+1,1} & \cdots & C_{j,1} & \cdots & C_{N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m+1,i} & \cdots & C_{j,i} & \cdots & C_{N,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m+1,m} & \cdots & C_{j,m} & \cdots & C_{N,m} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{DP} = \begin{bmatrix} C_{1,m+1} & \cdots & C_{i,m+1} & \cdots & C_{m,m+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1,j} & \cdots & C_{i,j} & \cdots & C_{m,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1,N} & \cdots & C_{i,N} & \cdots & C_{m,N} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{OP} = \begin{bmatrix} C_{1,N+1} & \cdots & C_{i,N+1} & \cdots & C_{m,N+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{1,N+o} & \cdots & C_{i,N+o} & \cdots & C_{m,N+o} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{OD} = \begin{bmatrix} C_{m+1,N+1} & \cdots & C_{j,N+1} & \cdots & C_{N,N+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m+1,N+o} & \cdots & C_{j,N+o} & \cdots & C_{N,N+o} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{PO} = \begin{bmatrix} C_{N+1,1} & \cdots & C_{N+o,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N+1,i} & \cdots & C_{N+o,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N+1,m} & \cdots & C_{N+o,m} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{DO} = \begin{bmatrix} C_{N+1,m+1} & \cdots & C_{N+o,m+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N+1,j} & \cdots & C_{N+o,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N+1,N} & \cdots & C_{N+o,N} \end{bmatrix}$$

W rozważanym układzie wyróżnić można dwa stany: 1) obie linie znajdują się w stanie pracy normalnej (rys. 5.1a) oraz 2) stan, w którym linia przesyłowa znajduje się pod napięciem, natomiast linia dystrybucyjna została odłączona, a jej przewody fazowe nie zostały uziemione (rys. 5.3b).

Dla stanu pierwszego z układu równań (5.1) wprost wynikają zależności na prądy ładowania linii \mathbf{I}_P , \mathbf{I}_D , \mathbf{I}_O dla danych wartości napięć \mathbf{U}_P , \mathbf{U}_D :

$$\begin{cases} \mathbf{I}_P = j\omega(\mathbf{C}_{PP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{PD}\mathbf{U}_D) \\ \mathbf{I}_D = j\omega(\mathbf{C}_{DP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{DD}\mathbf{U}_D) \\ \mathbf{I}_O = j\omega(\mathbf{C}_{OP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{OD}\mathbf{U}_D) \end{cases} \quad (5.2)$$

Dla drugiego rozpatrywanego stanu w układzie równań (5.1) należy przyjąć $\mathbf{I}_D = 0$ (rys. 5.1b):

$$\begin{cases} \mathbf{I}_P = j\omega(\mathbf{C}_{PP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{PD}\mathbf{U}_D) \\ 0 = j\omega(\mathbf{C}_{DP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{DD}\mathbf{U}_D) \\ \mathbf{I}_O = j\omega(\mathbf{C}_{OP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{OD}\mathbf{U}_D) \end{cases} \quad (5.3)$$

co pozwala wyznaczyć poszukiwane napięcia indukowane (dotykowe) na przewodach fazowych linii dystrybucyjnej:

$$\mathbf{U}_D = -\mathbf{C}_{DD}^{-1}\mathbf{C}_{DP}\mathbf{U}_P \quad (5.4)$$

W celu wyznaczenia wartości prądu rażeniowego przepływającego przez organizm człowieka w przypadku dotknięcia j -tego odziemionego przewodu fazowego linii dystrybucyjnej (rys. 5.1c), w równaniu (5.1) zamiast prądów $\mathbf{I}_D = 0$ należy podstawić:

$$\mathbf{I}_{DR} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \frac{U_{Dj}}{R_{CZ}} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{R_{CZ}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \mathbf{U}_D = \mathbf{G}_{CZ}\mathbf{U}_D \quad (5.5)$$

gdzie: R_{CZ} – rezystancja człowieka. Tym samym równanie (5.3) przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_P = j\omega(\mathbf{C}_{PP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{PD}\mathbf{U}_D) \\ \mathbf{G}_{CZ}\mathbf{U}_D = j\omega(\mathbf{C}_{DP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{DD}\mathbf{U}_D) \\ \mathbf{I}_O = j\omega(\mathbf{C}_{OP}\mathbf{U}_P + \mathbf{C}_{OD}\mathbf{U}_D) \end{cases} \quad (5.6)$$

z której wyznaczyć można napięcia \mathbf{U}_D

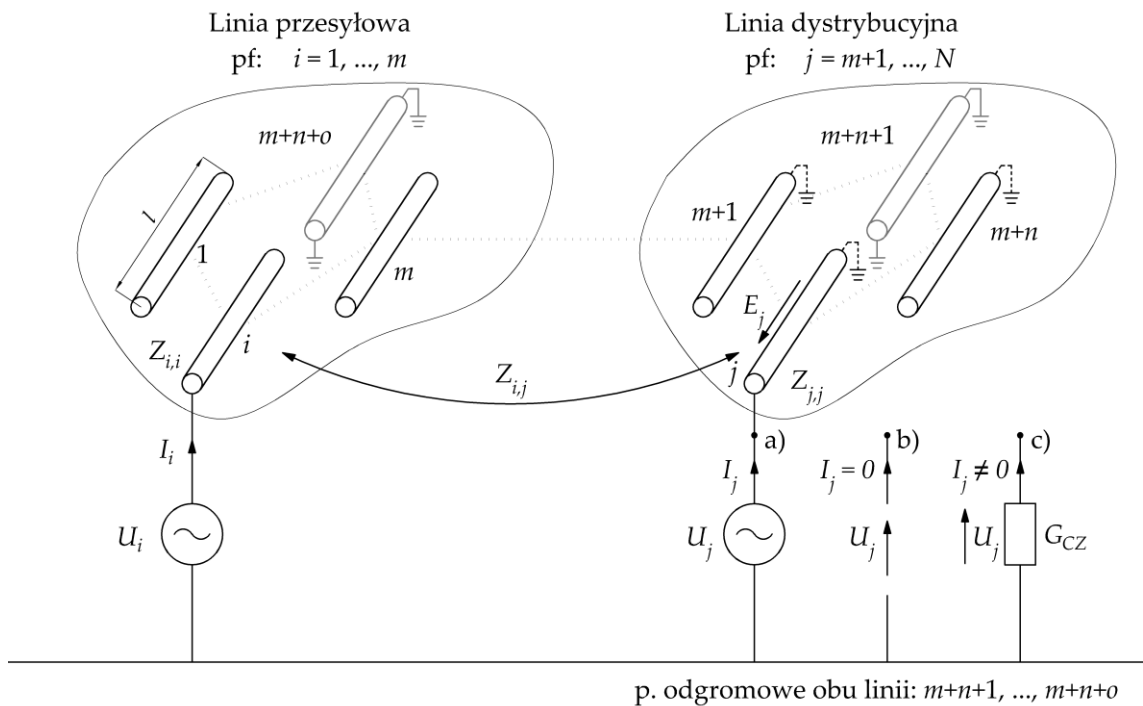
$$\mathbf{U}_D = j\omega(\mathbf{G}_{CZ} - j\omega\mathbf{C}_{DD})^{-1}\mathbf{C}_{DP}\mathbf{U}_P \quad (5.7)$$

a w konsekwencji poszukiwany prąd rażeniowy:

$$\mathbf{I}_{DR} = j\omega\mathbf{G}_{CZ}(\mathbf{G}_{CZ} - j\omega\mathbf{C}_{DD})^{-1}\mathbf{C}_{DP}\mathbf{U}_P \quad (5.8)$$

5.1.2. Oddziaływanie magnetyczne

Przyjęty do analizy oddziaływania magnetycznego wyidealizowany model układu linii przesyłowej i dystrybucyjnej przedstawiono na rysunku 5.2. Tak jak w przypadku modelu przedstawionego na rysunku 5.1, również w tym przypadku model zawiera łącznie m przewodów fazowych linii przesyłowej, n przewodów fazowych linii dystrybucyjnej oraz łącznie o przewodów odgromowych obu linii. Napięcia przewodów fazowych wynoszą U_k , $k = 1, \dots, N$, natomiast przewody odgromowe są obustronnie uziemione. W modelu wyodrębniono ziemnopowrotne impedancje własne $Z_{k,k}$, $k = 1, \dots, N+o$ poszczególnych przewodów oraz ziemnopowrotne impedancje wzajemne $Z_{i,j} = Z_{j,i}$, $i \neq j$, $i = 1, \dots, N+o$, $j = 1, \dots, N+o$ pomiędzy przewodami.



Rysunek 5.2. Schemat zastępczy oddziaływania magnetycznego: a) obie linie w stanie pracy normalnej b) linia przesyłowa w stanie pracy normalnej, linia dystrybucyjna odłączona c) linia przesyłowa w stanie pracy normalnej, linia dystrybucyjna odłączona i jeden z przewodów fazowych zwarty doziemnie przez człowieka

W ogólnym przypadku oddziaływania magnetycznego (rys. 5.2a) równania napięć i prądów przyjmują postać:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_P \\ \mathbf{U}_D \\ \mathbf{U}_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{PP} & \mathbf{Z}_{PD} & \mathbf{Z}_{PO} \\ \mathbf{Z}_{DP} & \mathbf{Z}_{DD} & \mathbf{Z}_{DO} \\ \mathbf{Z}_{OP} & \mathbf{Z}_{OD} & \mathbf{Z}_{OO} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_P \\ \mathbf{I}_D \\ \mathbf{I}_O \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

gdzie:

$$\mathbf{U}_P = [U_1 \dots U_i \dots U_m]^T, \mathbf{U}_D = [U_{m+1} \dots U_j \dots U_N]^T, \mathbf{U}_O = [0 \dots 0 \dots 0]_{l \times o}^T$$

$$\mathbf{I}_P = [I_1 \dots I_i \dots I_m]^T, \mathbf{I}_D = [I_{m+1} \dots I_j \dots I_N]^T, \mathbf{I}_O = [I_{N+1} \dots I_{N+1} \dots I_{N+o}]^T$$

$$\mathbf{Z}_{PP} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & \dots & Z_{i,1} & \dots & Z_{m,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1,i} & \dots & Z_{i,i} & \dots & Z_{m,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1,m} & \dots & Z_{i,m} & \dots & Z_{m,m} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{DD} = \begin{bmatrix} Z_{m+1,m+1} & \dots & Z_{j,m+1} & \dots & Z_{N,m+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m+1,j} & \dots & Z_{j,j} & \dots & Z_{N,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m+1,N} & \dots & Z_{j,N} & \dots & Z_{N,N} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{OO} = \begin{bmatrix} Z_{N+1,N} & \dots & Z_{N+o,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N+1,N+o} & \dots & Z_{N+o,N+o} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{PD} = \begin{bmatrix} Z_{m+1,1} & \dots & Z_{j,1} & \dots & Z_{N,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m+1,i} & \dots & Z_{j,i} & \dots & Z_{N,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m+1,m} & \dots & Z_{j,m} & \dots & Z_{N,m} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{DP} = \begin{bmatrix} Z_{1,m+1} & \dots & Z_{i,m+1} & \dots & Z_{m,m+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1,j} & \dots & Z_{i,j} & \dots & Z_{m,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1,N} & \dots & Z_{i,N} & \dots & Z_{m,N} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{OP} = \begin{bmatrix} Z_{1,N+1} & \dots & Z_{i,N+1} & \dots & Z_{m,N+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1,N+o} & \dots & Z_{i,N+o} & \dots & Z_{m,N+o} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{OD} = \begin{bmatrix} Z_{m+1,N+1} & \dots & Z_{j,N+1} & \dots & Z_{N,N+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m+1,N+o} & \dots & Z_{j,N+o} & \dots & Z_{N,N+o} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{PO} = \begin{bmatrix} Z_{N+1,1} & \dots & Z_{N+o,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N+1,i} & \dots & Z_{N+o,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N+1,m} & \dots & Z_{N+o,m} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_{DO} = \begin{bmatrix} Z_{N+1,m+1} & \dots & Z_{N+o,m+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N+1,j} & \dots & Z_{N+o,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N+1,N} & \dots & Z_{N+o,N} \end{bmatrix}$$

Analogicznie jak w przypadku oddziaływań pojemnościowych, również dla rozważanych oddziaływań magnetycznych można wyróżnić dwa stany: 1) obie linie znajdują się w stanie pracy normalnej (rys. 5.2a) oraz 2) stan, w którym linia przesyłowa znajduje się pod napięciem, natomiast linia dystrybucyjna została odłączona, a przewody fazowe zostały jednostronnie uziemione (rys. 5.2b).

Przyjęto, że w linii przesyłowej płyną prądy \mathbf{I}_P wymuszone przez impedancje \mathbf{Z}_{Ob} przyłączone do końców przewodów fazowych:

$$\mathbf{Z}_{ob} = \frac{U_{NP}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{I_1} & \dots & \frac{1}{I_i} & \dots & \frac{1}{I_m} \end{bmatrix}^T \quad (5.10)$$

gdzie: U_{NP} – napięcie znamionowe linii przesyłowej.

Dla stanu pierwszego z układu równań (5.9) wynikają zależności na prądy linii \mathbf{I}_P , \mathbf{I}_D , \mathbf{I}_O dla danych wartości napięć U_P , U_D , U_O . Ponieważ napięcie przewodów odgromowych $U_O = 0$, to możliwa jest redukcja układu równań (5.9) do następującej postaci:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_P = (\mathbf{Z}_{PP} + \mathbf{1}_{m \times m} \mathbf{Z}_{ob}) \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}_{PD} \mathbf{I}_D + \mathbf{Z}_{PO} \mathbf{I}_O \\ \mathbf{U}_D = \mathbf{Z}_{DP} \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}_{DD} \mathbf{I}_D + \mathbf{Z}_{DO} \mathbf{I}_O \\ 0 = \mathbf{Z}_{OP} \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}_{OD} \mathbf{I}_D + \mathbf{Z}_{OO} \mathbf{I}_O \end{cases} \quad (5.11)$$

co po dalszych przekształceniach prowadzi do:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_P = \mathbf{Z}'_{PP} \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}'_{PD} \mathbf{I}_D \\ \mathbf{U}_D = \mathbf{Z}'_{DP} \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}'_{DD} \mathbf{I}_D \end{cases} \quad (5.12)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}'_{PP} &= (\mathbf{Z}_{PP} + \mathbf{1}_{m \times m} \mathbf{Z}_{ob} - \mathbf{Z}_{PO} \mathbf{Z}_{OO}^{-1} \mathbf{Z}_{OP}) \\ \mathbf{Z}'_{PD} &= (\mathbf{Z}_{PD} - \mathbf{Z}_{PO} \mathbf{Z}_{OO}^{-1} \mathbf{Z}_{OD}) \\ \mathbf{Z}'_{DP} &= (\mathbf{Z}_{DP} - \mathbf{Z}_{DO} \mathbf{Z}_{OO}^{-1} \mathbf{Z}_{OP}) \\ \mathbf{Z}'_{DD} &= (\mathbf{Z}_{DD} - \mathbf{Z}_{DO} \mathbf{Z}_{OO}^{-1} \mathbf{Z}_{OD}) \end{aligned}$$

Dla drugiego rozpatrywanego stanu w równaniu (5.12) należy przyjąć $\mathbf{I}_D = 0$ (rys. 5.2b). Wówczas przyjmuje ono postać:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_P = \mathbf{Z}'_{PP} \mathbf{I}_P \\ \mathbf{U}_D = \mathbf{Z}'_{DP} \mathbf{I}_P \end{cases} \quad (5.13)$$

z której można wyznaczyć napięcia na początku linii dystrybucyjnej, które są siłami elektromotorycznymi \mathbf{E} indukowanymi przez prądy płynące w linii przesyłowej:

$$\mathbf{U}_D = \mathbf{E} = \mathbf{Z}'_{DP} (\mathbf{Z}'_{PP})^{-1} \mathbf{U}_P \quad (5.14)$$

W celu wyznaczenia wartości prądu rażeniowego przepływającego przez organizm człowieka w przypadku dotknięcia niezziemionego końca j -tego przewodu fazowego

linii dystrybucyjnej (rys. 5.2c), w równaniu (5.12) zamiast prądów $\mathbf{I}_D = 0$ należy podstawić:

$$\mathbf{I}_{DR} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \frac{U_{Dj}}{R_{CZ}} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{R_{CZ}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \mathbf{U}_D = \mathbf{G}_{CZ} \mathbf{U}_D \quad (5.15)$$

i wówczas:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_P = \mathbf{Z}'_{PP} \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}'_{PD} \mathbf{G}_{CZ} \mathbf{U}_D \\ \mathbf{U}_D = \mathbf{Z}'_{DP} \mathbf{I}_P + \mathbf{Z}'_{DD} \mathbf{G}_{CZ} \mathbf{U}_D \end{cases} \quad (5.16)$$

z rozwiązania równania (5.16) otrzymuje się wartości napięć dotykowych \mathbf{U}_D :

$$\mathbf{U}_D = \left(\mathbf{1}_o + \mathbf{Z}'_{DP} (\mathbf{Z}'_{PP})^{-1} \mathbf{Z}'_{PD} \mathbf{G}_{CZ} - \mathbf{Z}'_{DD} \mathbf{G}_{CZ} \right)^{-1} \mathbf{Z}'_{DP} (\mathbf{Z}'_{PP})^{-1} \mathbf{U}_P \quad (5.17)$$

a podstawiając (5.17) do (5.15) wartości prądów rażeniowych:

$$\mathbf{I}_{DR} = \mathbf{G}_{CZ} \left[\left(\mathbf{1}_o + \mathbf{Z}'_{DP} (\mathbf{Z}'_{PP})^{-1} \mathbf{Z}'_{PD} \mathbf{G}_{CZ} - \mathbf{Z}'_{DD} \mathbf{G}_{CZ} \right)^{-1} \mathbf{Z}'_{DP} (\mathbf{Z}'_{PP})^{-1} \mathbf{U}_P \right] \quad (5.18)$$

Dla przedstawionych w niniejszym i poprzednim rozdziale zależności opracowano algorytmy obliczeniowe, które zaimplementowano w środowisku obliczeniowym MATLAB.

5.1.3. Zastosowanie modeli uproszczonych do badań napięć i prądów indukowanych w układach modelowych

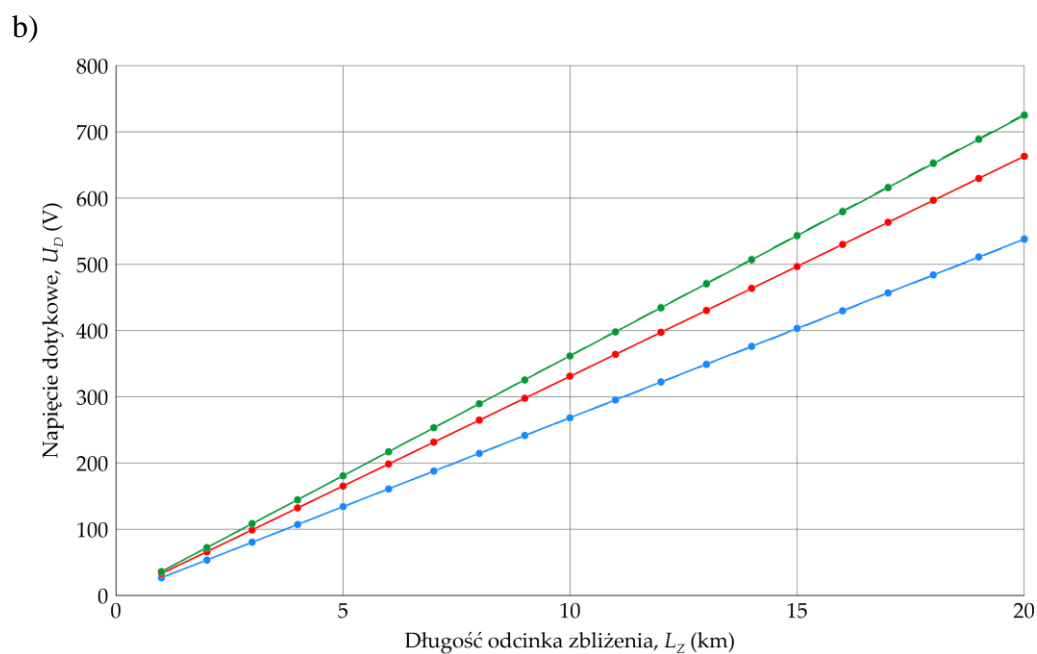
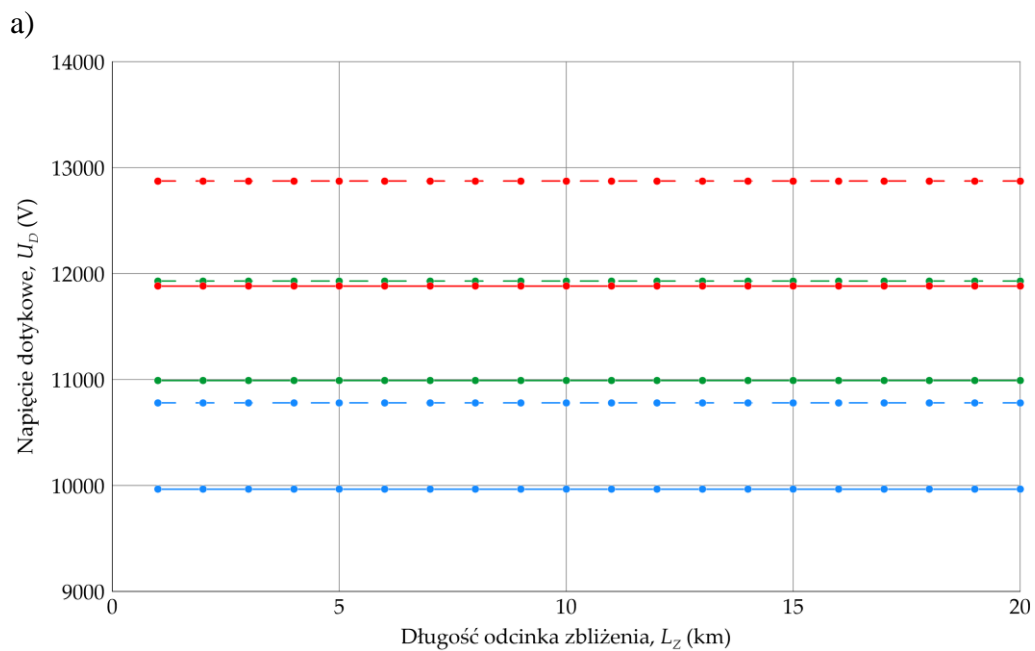
Przedstawione w rozdziałach 5.1.1 i 5.1.2 modele oraz opracowane dla nich programy obliczeniowe, zastosowano do badań oddziaływań linii przesyłowych na linie dystrybucyjne. Celem tych badań było rozpoznanie związków jakościowych i ilościowych pomiędzy wartościami napięć dotykowych oraz prądów rażeniowych, a parametrami określającymi wzajemne usytuowanie rozważanych linii w pasie technologicznym linii przesyłowej, którymi były (rys. 4.5): długość odcinka zbliżenia L_Z ,

odległość między osiami linii X_{SD} , wysokość zawieszenia przewodów linii przesyłowej h_S i linii dystrybucyjnej h_D oraz liczba przewodów składowych wiązki linii przesyłowej.

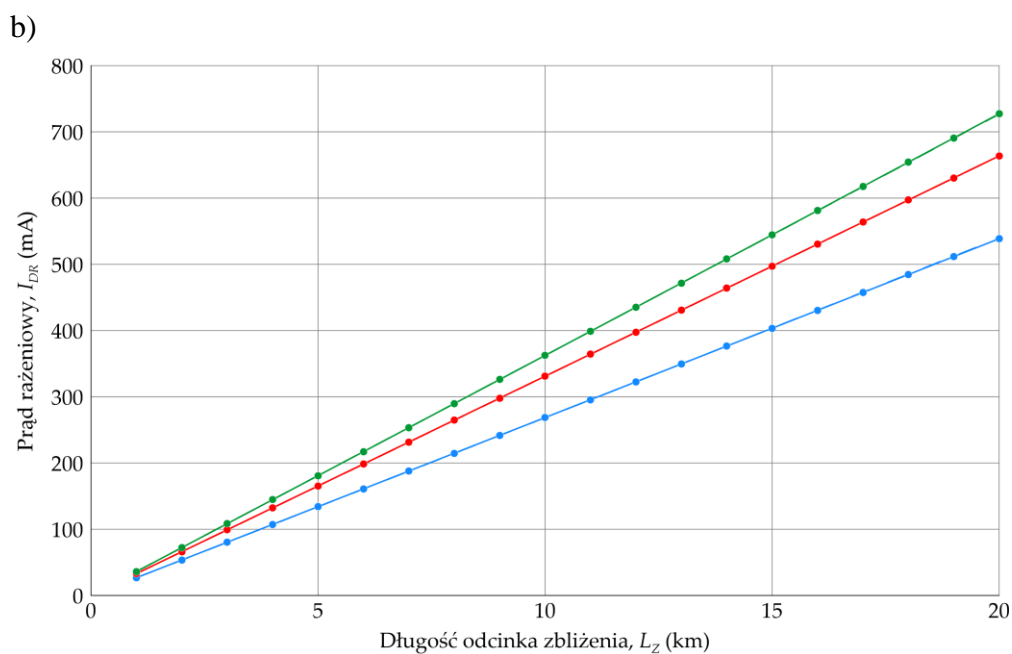
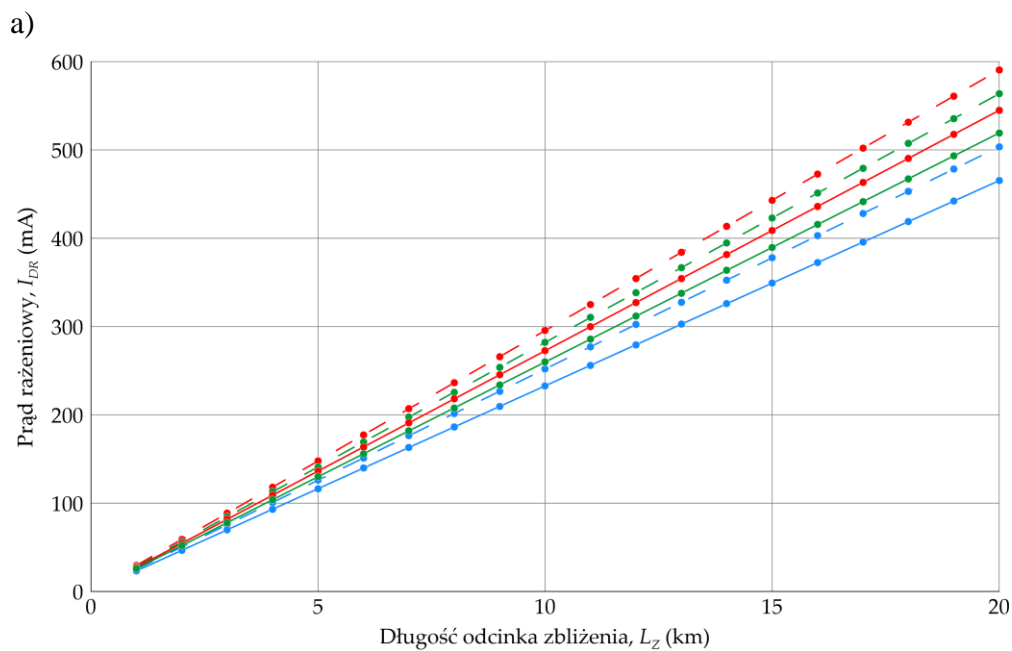
Na rysunku 5.3 przedstawiono zależności napięć dotykowych U_D od długości odcinka zbliżenia L_Z , które indukowane są w linii dystrybucyjnej 110 kV w wyniku oddziaływania pojemnościowego (rys. 5.3a) oraz oddziaływania magnetycznego (rys. 5.3b) linii przesyłowej 400 kV. Zależności te dotyczą wariantu W1 z tabeli 4.1 i wartości parametrów $X_{SD} = 30,0$ m, $h_S = 10,0$ m oraz $h_D = 10,0$ m. Założono, że napięcie linii przesyłowej wynosi $U_P = 420$ kV, a jej przewody fazowe obciążone są symetrycznym układem prądów o wartości $I_P = 1000$ A, co odpowiada przesyłowi mocy około 700 MW.

Z przedstawionych na rysunku 5.3 wykresów wynika, że napięcia dotykowe wywołane oddziaływaniem pojemnościowym są niezależne od długości odcinka zbliżenia linii. Wartości tych napięć są rzędu kilkunastu kilowoltów i są różne dla poszczególnych faz linii dystrybucyjnej, a ponadto w pewnym stopniu zależne są również od tego, czy w linii 400 kV zastosowana jest wiązka dwu- albo trójprzewodowa. Całkowicie odmienny charakter mają napięcia indukowane wywołane oddziaływaniem magnetycznym. Wartości tych napięć są rzędu kilkuset woltów i są wprost proporcjonalne do długości L_Z . Ponadto z równań przedstawionych w rozdziale 5.2 wynika również, że napięcia U_D są wprost proporcjonalne do obciążenia linii przesyłowej. Podobnie jak w przypadku oddziaływań pojemnościowych, występuje zróżnicowanie napięć dotykowych na poszczególnych fazach linii dystrybucyjnej, jednak nie występuje tu wpływ liczby przewodów składowych wiązki linii 400 kV.

Na rysunku 5.4 przedstawiono zależności prądów rażeniowych płynących przez ciało człowieka o rezystancji $R_{CZ} = 1000 \Omega$, które wywołane są przez dotknięcie przewodu fazowego linii dystrybucyjnej. Prądy rażeniowe wywołane oddziaływaniem pojemnościowym (rys. 5.4a) są wprost proporcjonalne do długości zbliżenia L_Z , pomimo, że napięcia dotykowe są od tej długości niezależne (rys. 5.3a). Również prądy rażeniowe wywołane oddziaływaniem magnetycznym (rys. 5.4b) są liniowo zależne od długości L_Z . W obu rodzajach oddziaływań wartości prądów rażeniowych są porównywalne ze sobą i wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset miliamperów. Przy oddziaływaniu pojemnościowym wartości te determinowane są rezystancją R_{CZ} oraz pojemnościami wzajemnymi pomiędzy dotykanym przewodem, a przewodami linii przesyłowej. Natomiast przy oddziaływaniu magnetycznym prądy rażeniowe wywołane są działaniem siły elektromotorycznej E (rys. 5.2) indukowanej w dotykanym przewodzie, która wymusza przepływ tego prądu w obwodzie złożonym z rezystancji R_{CZ} oraz impedancji ziemnopowrotnej dotykanego przewodu. Z tego powodu – ponieważ wartość tej impedancji jest wielokrotnie mniejsza od rezystancji R_{CZ} – wartości prądów rażeniowych $I_{DR} \approx U_D / R_{CZ}$.



Rysunek 5.3. Zależności napięć dotykowych U_D w funkcji długości odcinka zbliżenia L_Z oraz liczby przewodów w wiązce a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne (wariant W1, $X_{SD} = 30,0$ m, $h_S = 10,0$ m, $h_D = 10,0$ m, $U_P = 420$ kV, $I_P = 1000$ A)



	Wiązka dwuprzewodowa	Wiązka trójprzewodowa
Dotykany przewód nr 1	●—●—●	-●- -●- -●-
Dotykany przewód nr 2	●—●—●	-●- -●- -●-
Dotykany przewód nr 3	●—●—●	-●- -●- -●-

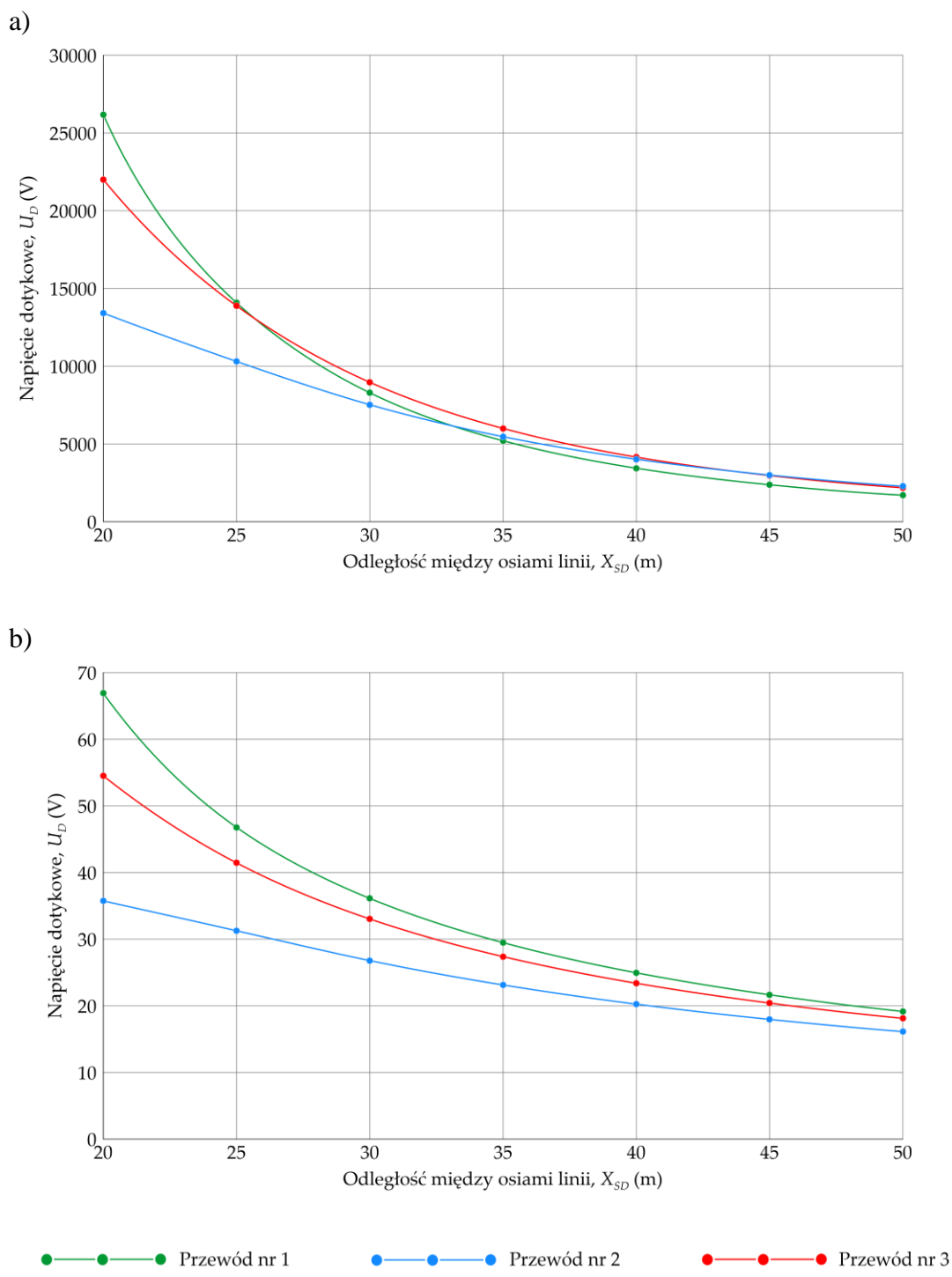
Rysunek 5.4. Zależności prądów rażeniowych I_{DR} w funkcji długości odcinka zbliżenia L_Z oraz liczby przewodów w wiązce a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne
(wariant W1, $X_{SD} = 30,0$ m, $h_S = 10,0$ m, $h_D = 10,0$ m, $U_P = 420$ kV, $I_P = 1000$ A)

Na rysunku 5.5 przedstawiono wartości indukowanych pojemnościowo i magnetycznie napięć dotykowych U_D , w funkcji odległości X_{SD} między osiami linii. Natomiast na rysunku 5.6 przedstawiono wartości prądów rażeniowych, wynikających z przedstawionych na rysunku 5.5 napięć dotykowych. Dotyczą one również wariantu W1 z tabeli 4.1 dla wartości parametrów: $L_Z = 1$ km, $h_S = 10,0$ m, $h_D = 10,0$ m, $U_P = 420$ kV oraz $I_P = 1000$ A. Z rysunku 5.5 i 5.6 wynika, że zarówno napięcia dotykowe, jak i prądy rażeniowe których źródłem są oddziaływania pojemnościowe (rys. 5.5a, 5.6a) oraz oddziaływania magnetyczne (rys. 5.5b, 5.6b) maleją ze wzrostem wartości parametru X_{SD} .

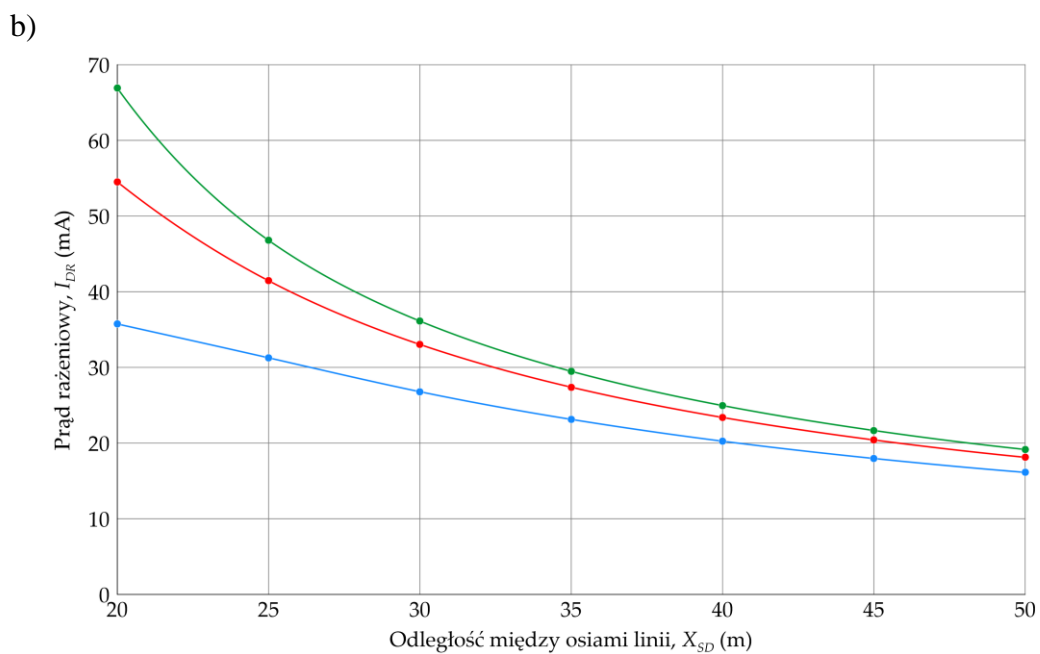
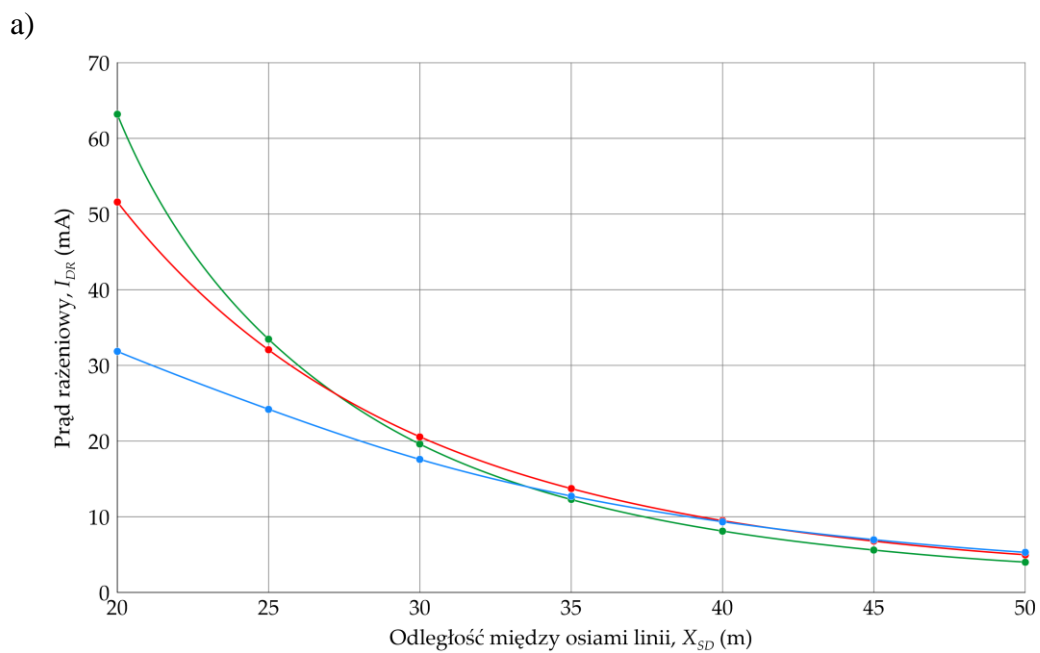
Na kolejnych rysunkach 5.7 i 5.8 przedstawiono w sposób poglądowy wyniki badań wpływu wysokości h_S i h_D na wartości indukowanych pojemnościowo (rys. 5.7a) i magnetycznie (rys. 5.7b) napięć dotykowych U_D oraz odpowiadających im prądów rażeniowych (5.8a i 5.8b). Pokazują one wzajemny wpływ parametrów h_S i h_D na badane napięcia i prądy. Także te wykresy dotyczą wariantu W1 dla wartości parametrów: $L_Z = 1$ km, $X_{SD} = 30,0$ m, $U_P = 420$ kV oraz $I_P = 1000$ A. Bardziej szczegółowe (ilościowe) przedstawienie wpływu wysokości zawieszenia przewodów obu linii zawierają rysunki 5.9 i 5.10, na których przedstawiono zależności $U_D = f(h_D)$ oraz $I_{DR} = f(h_D)$ dla wybranych wysokości h_S .

Zaprezentowane dotychczas wyniki badań dotyczą stanu normalnej pracy linii 400 kV. Innym, wymagającym rozważenia stanem pracy linii 400 kV jest przepływ w niej prądów zwarciovych. Pomimo, że stan zwarcia linii przesyłowej jest względnie krótki (rzędu kilkuset milisekund, co wynika z czasów działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej), to jednak bardzo duże wartości prądów zwarciovych prowadzić będą do indukowania napięć dotykowych i prądów rażeniowych zdecydowanie większych niż w stanie pracy normalnej. Szczególnie istotne będzie to dla zwarć jednofazowych, co wynika to nie tylko z braku kompensacji pola magnetycznego od prądów płynących w fazach niezwarciwych, ale również z tego, że zwarcia jednofazowe stanowią największy odsetek (nawet około 80÷90%) zakłóceń zwarciovych [46]. Na rysunku 5.11 przedstawiono przykładowe porównanie prądów rażeniowych z rysunku 5.4b oraz prądów rażeniowych wywołanych oddziaływaniem magnetycznym prądu zwarciovego $I_{k1} = 10$ kA płynącym w fazie C (wariant W1, tab. 4.1) linii 400 kV.

Płynące z przedstawionych wyników badań wnioski dotyczą nie tylko wariantu W1, ale mogą zostać również uogólnione na pozostałe warianty W2÷W4 (w tab. 4.1 i 4.2). Wyniki te pokazują, że lokalizacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej towarzyszyć może zagrożenie porażeniowe, zarówno podczas wykonywania na linii dystrybucyjnej prac budowlanych, jak i prac eksploatacyjnych.



Rysunek 5.5. Zależności napięć dotykowych U_D w funkcji odległości między osiami linii X_{SD}
 a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne
 (wariant W1, $L_Z = 1$ km, $h_S = 10,0$ m, $h_D = 10,0$ m, $U_P = 420$ kV, $I_P = 1000$ A)



Dotykany przewód nr 1



Dotykany przewód nr 2

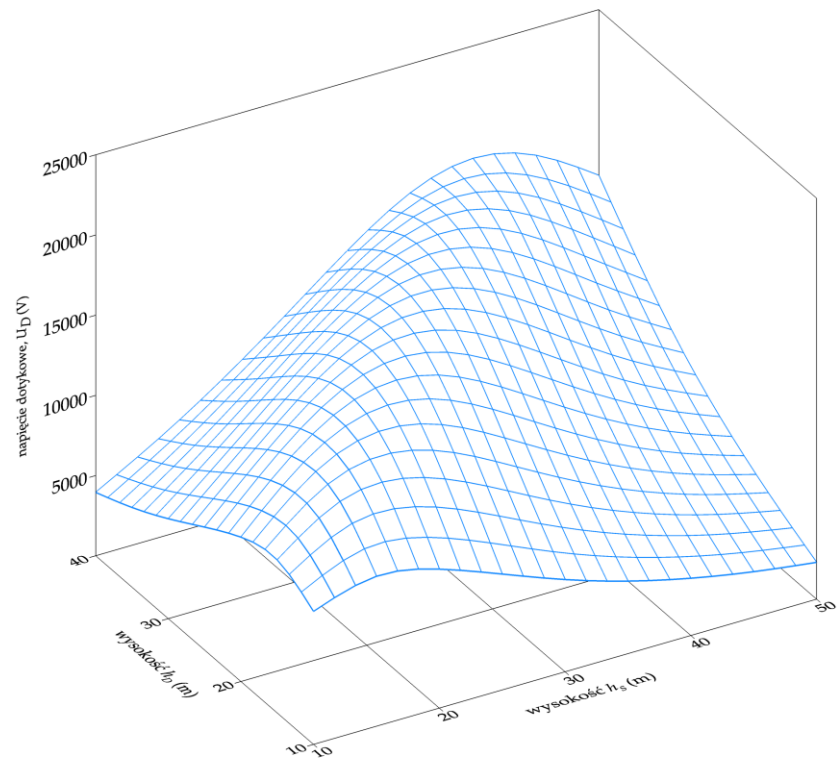


Dotykany przewód nr 3

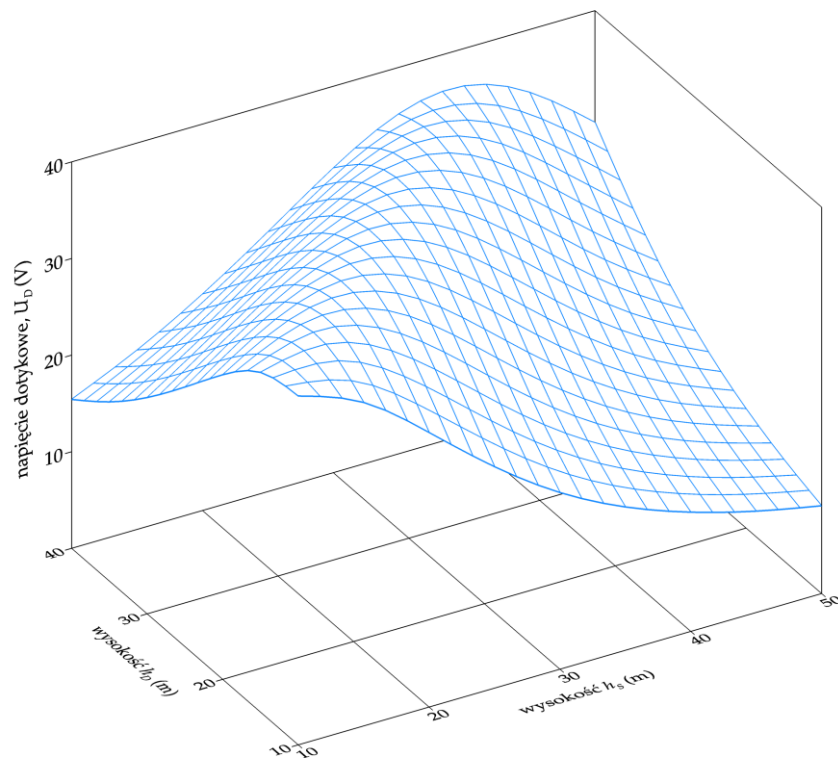


Rysunek 5.6. Zależności prądów rażeniowych I_{DR} w funkcji odległości między osiami linii X_{SD}
 a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne
 (wariant W1, $L_Z = 1$ km, $h_S = 10,0$ m, $h_D = 10,0$ m, $U_P = 420$ kV, $I_P = 1000$ A)

a)



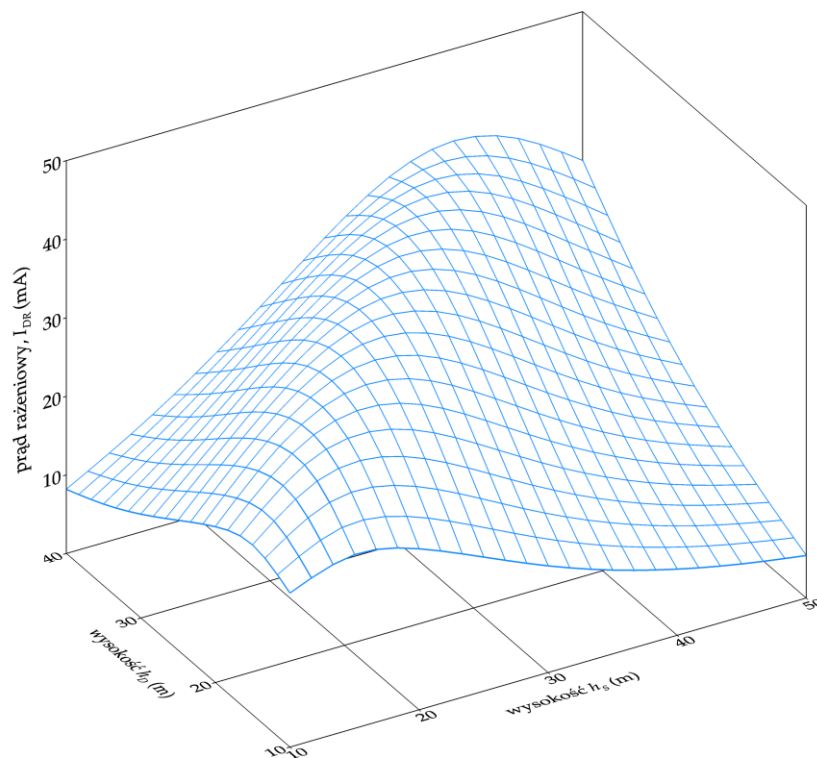
b)



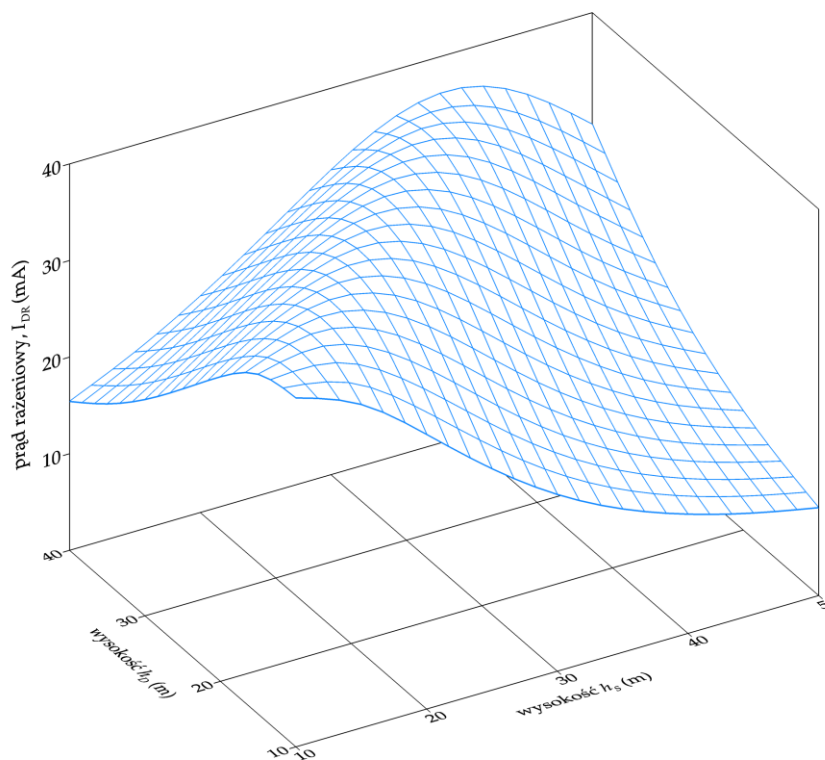
Rysunek 5.7. Zależności napięć dotykowych U_D w funkcji wysokości zawieszenia przewodów h_S , h_D
a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne

(wariant W1, $L_Z = 1$ km, $X_{SD} = 30,0$ m, $U_p = 420$ kV, $I_p = 1000$ A)

a)



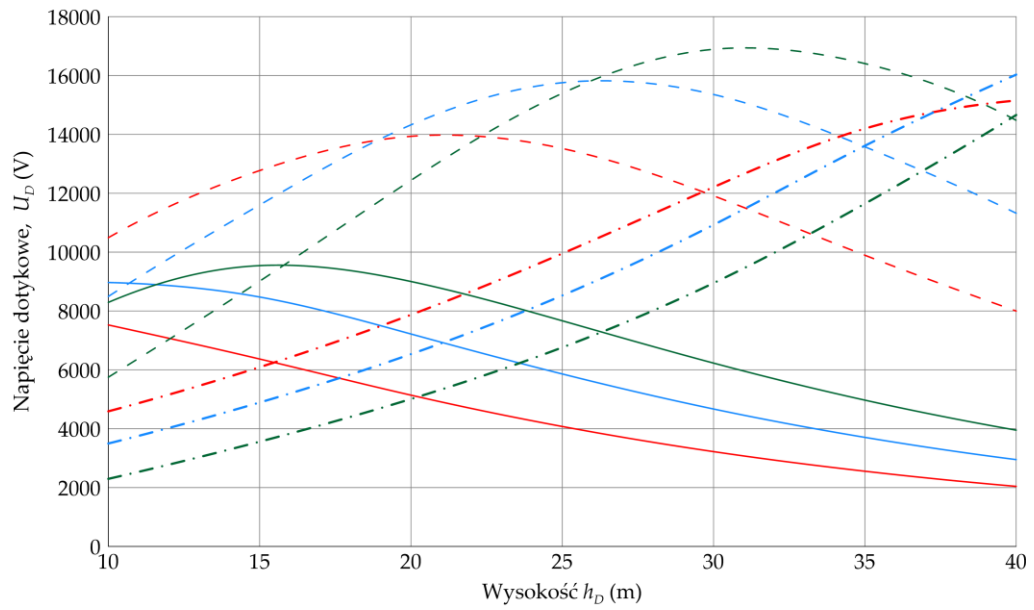
b)



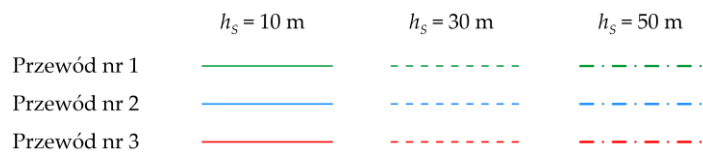
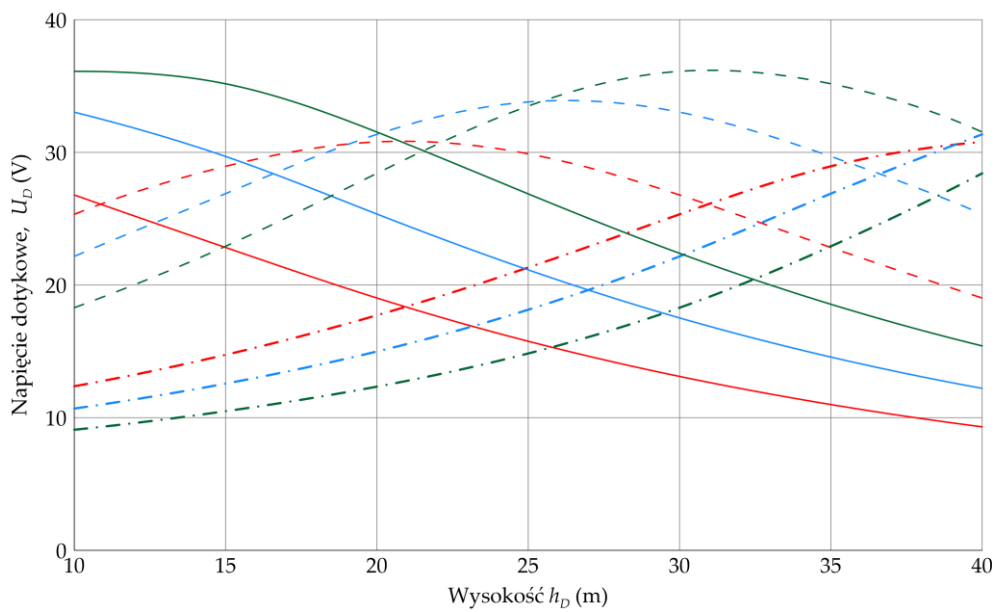
Rysunek 5.8. Zależności prądów rażeniowych I_{DR} w funkcji wysokości zawieszenia przewodów h_S , h_D
a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne

(wariant W1, $L_Z = 1$ km, $X_{SD} = 30,0$ m, $U_p = 420$ kV, $I_p = 1000$ A)

a)

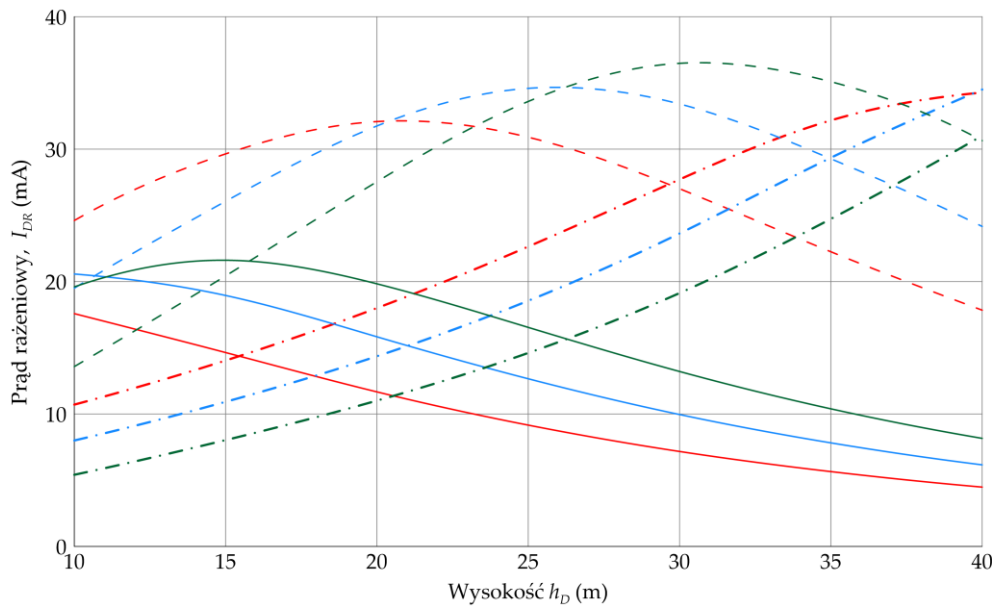


b)

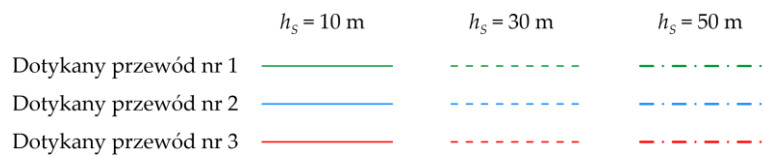
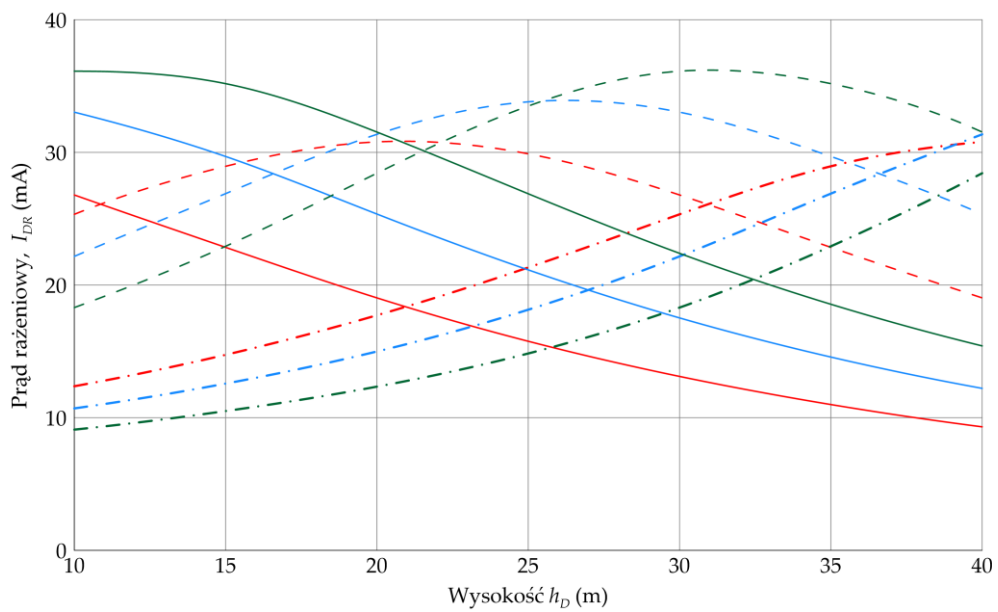


Rysunek 5.9. Zależności $U_D = f(h_D)$ dla wybranych wysokości zawieszenia przewodów h_s
 a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne
 (wariant W1, $L_Z = 1 \text{ km}$, $X_{SD} = 30,0 \text{ m}$, $U_P = 420 \text{ kV}$, $I_P = 1000 \text{ A}$)

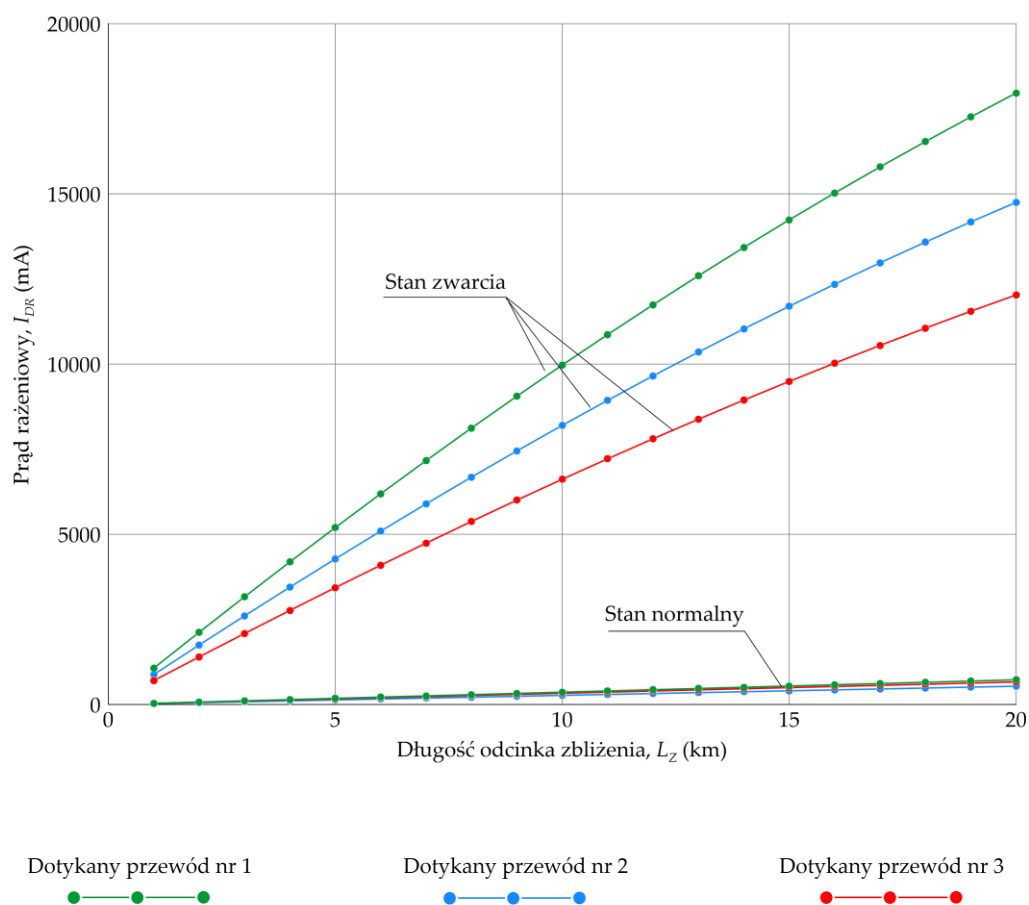
a)



b)



Rysunek 5.10. Zależności $I_{DR} = f(h_D)$ dla wybranych wysokości zawieszenia przewodów h_s
 a) oddziaływanie pojemnościowe, b) oddziaływanie magnetyczne
 (wariant W1, $L_Z = 1 \text{ km}$, $X_{SD} = 30,0 \text{ m}$, $U_P = 420 \text{ kV}$, $I_P = 1000 \text{ A}$)

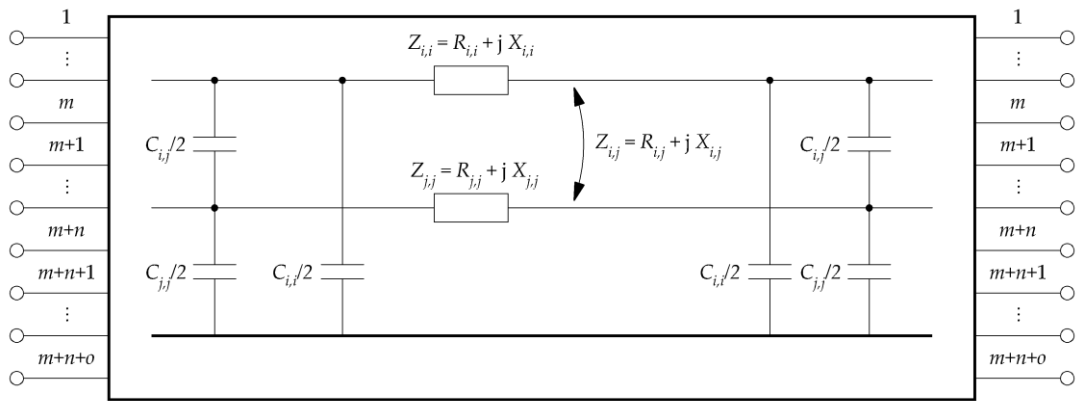


Rysunek 5.11. Zależności prądów rażeniowych I_{DR} wywołanych oddziaływaniem magnetycznym w funkcji długości odcinka zbliżenia L_Z przy zwarciu fazy C linii przesyłowej (wariant W1, $X_{SD} = 30,0$ m, $h_S = 10,0$ m, $h_D = 10,0$ m, $U_p = 420$ kV, $I_p = 1000$ A)

5.2. Modele zaawansowane

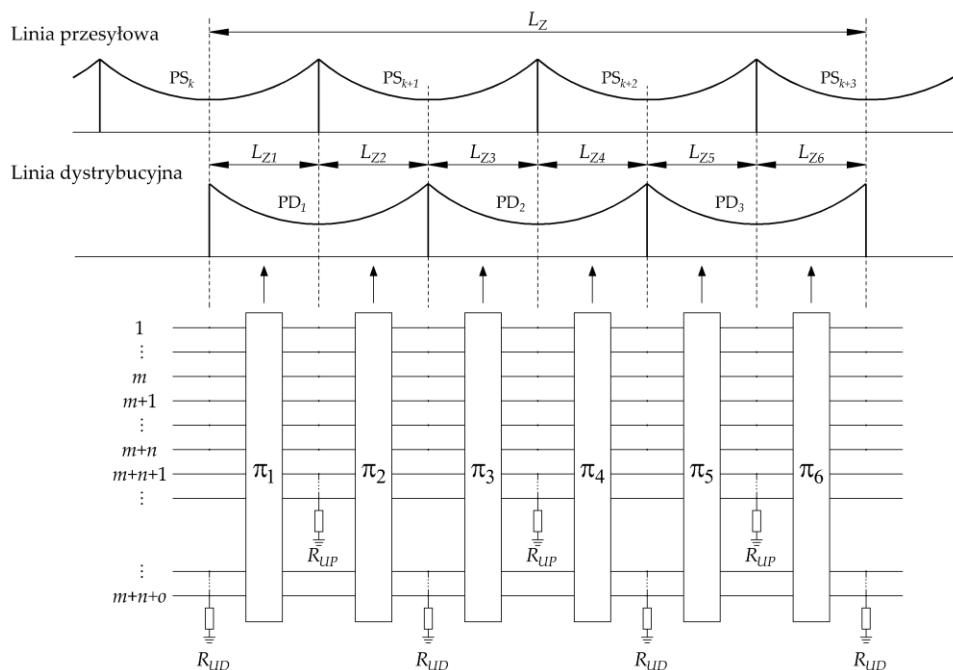
Pomimo wysokich walorów użytkowych, przedstawionych w rozdziale 5.1 uproszczonych modeli oddziaływań, nie mają one bezpośredniego zastosowania do badań skutków oddziaływań w bardziej złożonych, zbliżonych do rzeczywistości przypadkach. Wynika to z trzech powodów.

Pierwszym z nich jest jednoczesność oddziaływania pojemnościowego i magnetycznego, pomimo tego, że w danym stanie pracy zbliżonych linii jedno z tych oddziaływań może mieć dominujący charakter. Rozwiązaniem tego problemu może być przyjęcie modelu zbliżonych linii w postaci sprzężonych wzajemnie czwórników typu π – rysunek 5.12.



Rysunek 5.12. Schemat modelu typu π

Drugim powodem jest to, że modele uproszczone uwzględniają tylko oddziaływanie pomiędzy odcinkami linii o skończonej długości. W rzeczywistych przypadkach odcinek zblżenia ma strukturę niejednorodną, co wynika z różnych długości pręseł i połączeń przewodów odgromowych z uziomami słupów. Prowadzi to do modelu odcinka zblżenia linii w postaci szeregowego połączenia modeli cząstkowych pododcinków, których granice wyznaczają słupy linii przesyłowej i dystrybucyjnej. Na rysunku 5.13 pokazano przykładowe zblżenie na długości L_Z trzech pręseł $PD_1 \div PD_3$ linii dystrybucyjnej do czterech pręseł $PS_k \div PS_{k+3}$ linii przesyłowej, którego model stanowi szeregowe połączenie modeli typu π wyodrębnionych sześciu pododcinków zblżenia o długościach $L_{Z1} \div L_{Z6}$, pomiędzy którymi do przewodów odgromowych przyłączone są rezystancje R_{UP} i R_{UD} uziomów słupów.

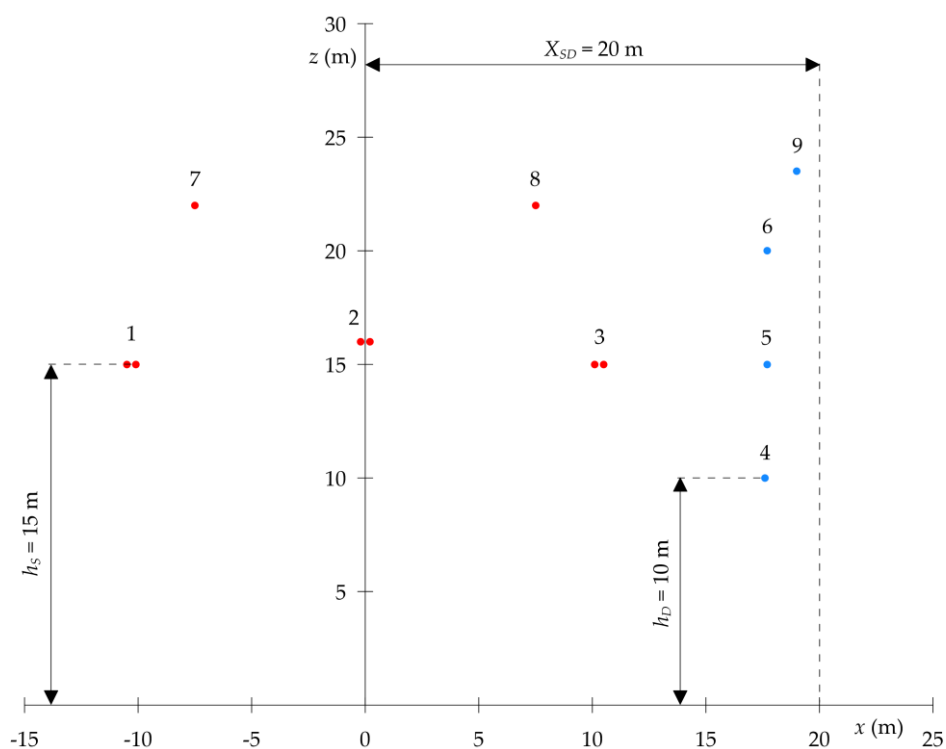


Rysunek 5.13. Modele odcinka zblżenia w postaci szeregowego połączenia modeli cząstkowych kolejnych odcinków typu π

Zaproponowany sposób modelowania odcinka zbliżenia pozwala na analizę skutków oddziaływań elektromagnetycznych rzeczywistych układów linii przesyłowych i dystrybucyjnych, a jedynymi ograniczeniami są założenia niezmienności rozmieszczenia geometrycznego przewodów w przekrojach pododcinków $\pi_1 \div \pi_6$ oraz jednorodności struktury gruntu.

Trzecim z powodów jest konieczność dokładnego odwzorowania przebiegów napięć i prądów, zarówno w stanie normalnym, jak i w zakłóceńowych stanach zwarciovych w oddziałującej linii przesyłowej. Dotyczy to szczególnie rozptywu prądów zwarciovych w przewodach fazowych i odgromowych.

Z powyższych powodów w badaniach, których wyniki przedstawione zostały w dalszych częściach niniejszej rozprawy, zastosowano opracowane dla programu symulacyjnego *ElectroMagnetic Transient Program* (EMTP-ATP) modele komputerowe oddziaływań w zbliżonych do siebie linii przesyłowych i dystrybucyjnych.



Rysunek 5.14. Przykładowe rozmieszczenie przewodów w przekroju pododcinka linii 110 kV w pasie technologicznym linii 400 kV

X_{SD} – odległość między osiami linii, h_S , h_D – wysokość zawieszenia przewodów linii przesyłowej i dystrybucyjnej, 1÷3 – przewody fazowe linii przesyłowej, 4÷6 – przewody fazowe linii dystrybucyjnej, 7÷9 – przewody odgromowe

Macierze \mathbf{R}_i , \mathbf{X}_i , \mathbf{C}_i dla i -tego pododcinka wyznaczane są w programie EMTP-ATP przy pomocy procedury LINE CONSTANTS. Danymi wejściowymi do procedury są współrzędne geometryczne określające rozmieszczenie przewodów w przestrzeni (rys. 5.14), parametry geometryczne i materiałowe przewodów oraz rezystywność gruntu. Przykładową strukturę pliku wsadowego *.atp z danymi pododcinka zbliżenia z rysunku 5.14 przedstawiono na rysunku 5.15.

```

0      1      2      3      4      5      6      7      8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1 BEGIN NEW DATA CASE
2 LINE CONSTANTS
3 $ERASE
4 C      BUS1->BUS2->BUS3->BUS4->BUS5->BUS6->BUS7->BUS8->BUS9->BUS10>BUS11>BUS12>
5 BRANCH S01P01S01K01S01P02S01K02S01P03S01K03S01P04S01K04S01P05S01K05S01P06S01K06
6 BRANCH S01P07S01K07S01P08S01K08S01P09S01K09
7 METRIC
8 C >>SKIN<-RESIS>IX<-----><-DIAM-><-HORIZ><VTOWER><-VMID-><-SEPAR><ALPHA<----->NB
9 1 .333 0.0564 4          3.1500 -10.30 15.00 10.00 40.0000 0.0 2
10 2 .333 0.0564 4          3.1500 0.00 16.00 11.00 40.0000 0.0 2
11 3 .333 0.0564 4          3.1500 10.30 15.00 10.00 40.0000 0.0 2
12 4 .313 0.1240 4          2.1700 17.60 10.00 10.00 0.0000 0.0 0
13 5 .313 0.1240 4          2.1700 17.70 15.00 15.00 0.0000 0.0 0
14 6 .313 0.1240 4          2.1700 17.70 20.00 20.00 0.0000 0.0 0
15 7 .200 0.4777 4          1.2750 -7.50 17.00 17.00 0.0000 0.0 0
16 8 .200 0.4777 4          1.2750 7.50 17.00 17.00 0.0000 0.0 0
17 9 .200 0.4777 4          1.2750 19.00 23.50 23.50 0.0000 0.0 0
18 BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
19 C -RHO-><-FRQ-><----->>I<-DIST-><-----><-><----->
20 100.0 50.0          1 0.5000          44
21 $PUNCH
22 BLANK CARD ENDING FREQUENCY CARDS
23 BLANK CARD ENDING LINE CONSTANT
24 BEGIN NEW DATA CASE
25 BLANK CARD

```

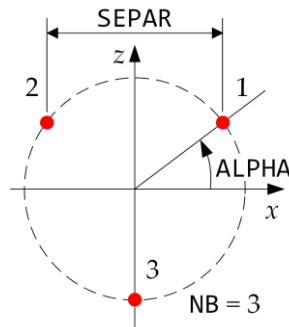
Rysunek 5.15. Struktura pliku *.atp dla przykładowego zbliżenia linii 400 kV do 110 kV z rysunku 5.14

W przedstawionym pliku wyróżnić można część stałą kodu (linie 1÷3, 21÷25), wynikającą ze składni języka programowania interpretowanego przez program EMTP–ATP oraz część zmienną zawierającą dane pododcinka zbliżenia.

W liniach 5 i 6 określone są węzły początkowe i końcowe kolejnych przewodów pododcinka, których dane zawarte są w liniach 9÷17. W kolumnach 1÷3 tych linii znajdują się numery przewodów z rysunku 5.14. W kolumnach 4÷8 znajdują się wartości parametru SKIN, będącego stosunkiem grubości części aluminiowej przewodu do jego zewnętrznej średnicy. W kolumnach 9÷16 znajdują się wartości parametru RESIS, będącego rezystancją DC przewodu (w Ω/km), a w kolumnach 17÷18 wartości parametru IX, definiującego sposób wyznaczania reaktancji wewnętrznej przewodów. Kolejne parametry oznaczają:

- DIAM (kolumny 27÷34) – średnica (cm) przewodu,
- HORIZ (kolumny 35÷42) – współrzędna pozioma (m) przewodu,
- VTOWER (kolumny 43÷50) – wysokość zawieszenia (m) przewodów na słupie,
- VMID (kolumny 51÷58) – odległość przewodu (m) od ziemi w środku przęsłach; macierze \mathbf{R}_i , \mathbf{X}_i , \mathbf{C}_i modelu pododcinka wyznaczone są dla średniej odległość przewodów od ziemi wynoszącej: $1/3 \cdot VTOWER + 2/3 \cdot VMID$,
- SEPAR (kolumny 59÷66) – odległość między przewodami wiązki (rys. 5.16),

- ALPHA (kolumny 67÷72) – kąt między pierwszym przewodem w wiązce, a płaszczyzną przechodzącą przez środek wiązki i równoległą do ziemi, mierzonym w stopniach przeciwnie do ruchu wskazówek zegara),
- NB (kolumny 79÷80) – liczba przewodów w wiązce.



Rysunek 5.16. Przewód wiązkowy

```

0          1          2          3          4          5          6          7          8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1  C <++++> Cards punched by support routine on 12-Nov-22 11.12.35 <++++>
2  C LINE CONSTANTS
3  C $ERASE
4  C BRANCH S01P01S01K01S01P02S01K02S01P03S01K03S01P04S01K04S01P05S01K05S01P06S01K06
5  C BRANCH S01P07S01K07S01P08S01K08S01P09S01K09
6  C METRIC
7  C 1 .333 0.0564 4          3.1500 -10.30 15.00 10.00 40.0000 0.0
8  C 2 .333 0.0564 4          3.1500 0.00 16.00 11.00 40.0000 0.0
9  C 3 .333 0.0564 4          3.1500 10.30 15.00 10.00 40.0000 0.0
10 C 4 .313 0.1240 4          2.1700 17.60 10.00 10.00 0.0000 0.0
11 C 5 .313 0.1240 4          2.1700 17.70 15.00 15.00 0.0000 0.0
12 C 6 .313 0.1240 4          2.1700 17.70 20.00 20.00 0.0000 0.0
13 C 7 .200 0.4777 4          1.2750 -7.50 17.00 17.00 0.0000 0.0
14 C 8 .200 0.4777 4          1.2750 7.50 17.00 17.00 0.0000 0.0
15 C 9 .200 0.4777 4          1.2750 19.00 23.50 23.50 0.0000 0.0
16 C BLANK CARD ENDING CONDUCTOR CARDS
17 C 100.0 50.0          1 0.5000          44
18 $VINTAGE, 1
19 $UNITS, 50., 0.0,
20 1S01P01S10K01          3.83383015E-02 2.98254055E-01 5.25856902E-03
21 2S01P02S01K02          2.39945358E-02 1.42098842E-01 -6.01475770E-04
22          3.82866038E-02 2.98307034E-01 5.29275896E-03
23 3S01P03S01K03          2.40041618E-02 1.20446120E-01 -1.20427031E-04
24          2.39945358E-02 1.42098842E-01 -5.41360562E-04
..
56 9S01P09S01K09          2.36821229E-02 1.07344920E-01 -6.62798809E-05
57          2.36769352E-02 1.18924411E-01 -1.22938756E-04
..
63          2.35770713E-02 1.34882968E-01 -2.13881503E-04
64          2.62288024E-01 3.79063737E-01 3.50012740E-03
65 $VINTAGE, -1,
66 $UNITS, -1., -1., { Restore values that existed b4 preceding $UNITS

```

Rysunek 5.17. Struktura pliku *.pch z macierzami R_i , X_i , C_i podocinka zbliżenia dwóch linii o danych zawartych w pliku z rysunku 5.15

W linii 20 znajdują się następujące parametry:

- RHO (kolumny 1÷8) – rezystywność ($\Omega \cdot m$) gruntu,
- FREQ (kolumny 9÷18) – częstotliwość (Hz), dla której obliczane są parametry linii,
- ICAP (kolumna 44) – sposób przedstawienia wynikowej macierzy pojemności linii,
- DIST (kolumny 45÷52) – długość (km) linii,
- IPU (kolumny 66÷68) – sposób przedstawienia wynikowych macierzy \mathbf{R}_i , \mathbf{X}_i , \mathbf{C}_i .

W wyniku działania procedury LINE CONSTANTS otrzymuje się plik tekstowy *.pch z macierzami \mathbf{R}_i , \mathbf{X}_i , \mathbf{C}_i , o strukturze przedstawionej na rysunku 5.17. Wartości liczbowe elementów macierzy zapisane są w postaci sformatowanej w liniach 20÷64:

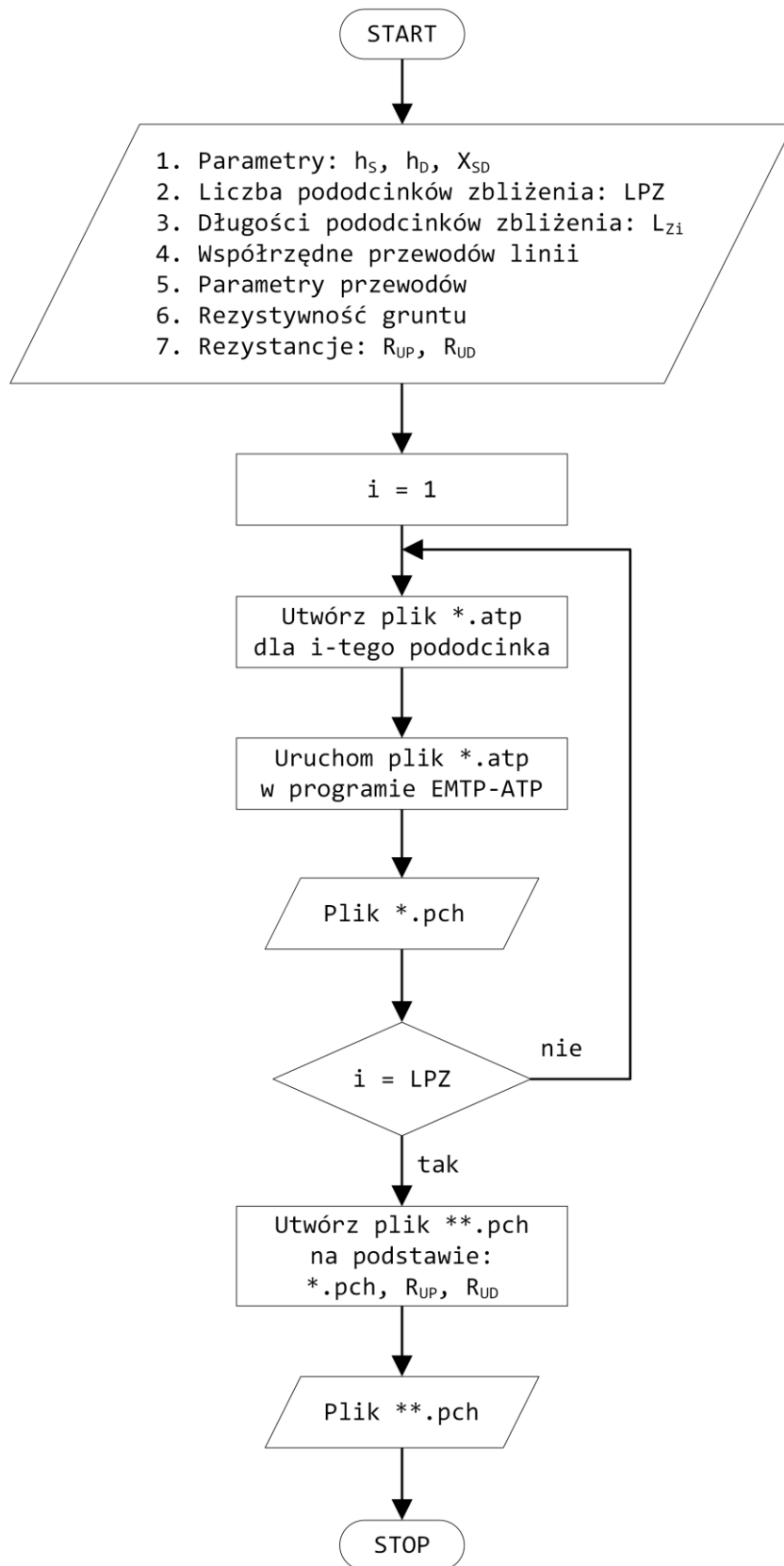
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
..								
20	1S01P01S01K01				R(1,1)		X(1,1)		C(1,1)
21	2S01P02S01K02				R(2,1)		X(2,1)		C(2,1)
22					R(2,2)		X(2,2)		C(2,2)
23	3S01P03S01K03				R(3,1)		X(3,1)		C(3,1)
24					R(3,2)		X(3,2)		C(3,2)
25					R(3,3)		X(3,3)		C(3,3)
..								

przy czym elementy macierzy \mathbf{R}_i (Ω) znajdują się w kolumnach 27÷42, elementy macierzy \mathbf{X}_i (Ω) w kolumnach 43÷58, a macierzy \mathbf{C}_i (μF) w kolumnach 59÷74.

Na potrzeby badań przedstawionych w niniejszym rozdziale, opracowano i zaimplementowano w środowisku matematycznym MATLAB algorytm automatycznego tworzenia modelu odcinka zblżenia – rysunek 5.18. Danymi wejściowymi do algorytmu są:

- parametry h_s , h_D , X_{SD} ,
- liczba pododcinków zblżenia LPZ ,
- długości pododcinków zblżenia L_{Zi} ,
- współrzędne przewodów linii,
- parametry przewodów,
- rezystywność gruntu,
- rezystancje uziemień R_{UP} , R_{UD} .

Na ich podstawie tworzone są pliki *.pch kolejnych pododcinków. W kolejnym etapie działania algorytmu tworzony jest plik wynikowy **.pch o strukturze przedstawionej na rysunku 5.19.



Rysunek 5.18. Algorytm automatycznego tworzenia modelu odcinka zблиżenia

```

0          1          2          3          4          5          6          7          8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
1  C -  dołączenie plików *.pch kolejnych pododcinków zblizenia
2  /BRANCH
3  $INSERT, d:\dr\badania5\oddziaływanie02\pod_01.pch
4  $INSERT, d:\dr\badania5\oddziaływanie02\pod_02.pch
5  $INSERT, d:\dr\badania5\oddziaływanie02\pod_03.pch
6  $INSERT, d:\dr\badania5\oddziaływanie02\pod_04.pch
..
..
k  C -  rezystancje uziomow slupow linii przesyłowej
k+1 C BUS1->BUS2->BUS3->BUS4-><----- R -----><----- L -----><----- C ----->
k+2 /BRANCH
k+3 $VINTAGE,1
..   PE01                      rup1
..   PE02                      rup2
..
..
.. /SWITCH
.. C BUS1->BUS2->.....MEASURING.....1
..   .....PE01                MEASURING      1
..   .....PE01                MEASURING      1
..   .....PE02                MEASURING      1
..   .....PE02                MEASURING      1
..
..
.. C -  rezystancje uziomow slupow linii dystrybucyjnej
.. C BUS1->BUS2->BUS3->BUS4-><----- R -----><----- L -----><----- C ----->
.. /BRANCH
.. $VINTAGE,1
..   DE01                      rud1
..   DE02                      rud2
..
..
.. /SWITCH
.. C BUS1->BUS2->.....MEASURING.....1
..   .....PD01                MEASURING      1
..   .....PD02                MEASURING      1
..
..

```

Rysunek 5.19. Struktura pliku **.pch odcinka zblizenia dwóch linii

Tworzone w przedstawiony sposób pliki **.pch są oryginalnymi modelami niejednorodnych struktur zblizeń linii przesyłowych oraz dystrybucyjnych i wynikających z nich oddziaływań elektromagnetycznych. Pliki te dołączone bezpośrednio do preprocesora graficznego ATPDraw umożliwiają nie tylko analizę skutków oddziaływań w układach jak najbardziej zblizonych do rzeczywistości, ale stanowią również istotne rozszerzenie możliwości obliczeniowych i udoskonalenie programu EMTP-ATP. Modele te zostały wykorzystane do badań napięć dotykowych oraz prądów rażeniowych w czasie budowy i późniejszej eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej, których wyniki przedstawiono w kolejnych rozdziałach 6 i 7.

6. Badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w budowanych liniach dystrybucyjnych

6.1. Wstęp

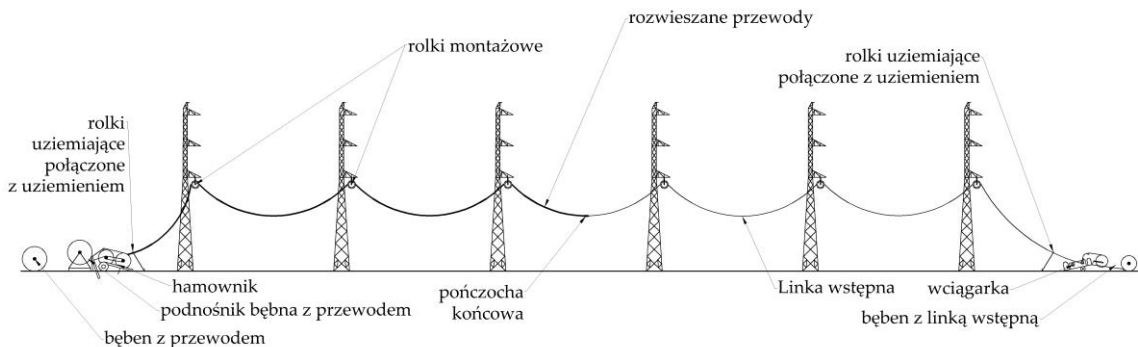
Budowa linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej jest złożonym procesem, wymagającym podjęcia szeregu dodatkowych czynności mających zapewnić możliwość wykonania linii. Realizacja takiego przedsięwzięcia, podobnie jak budowy zwykłej linii, wiąże się z przeprowadzeniem całościowego procesu administracyjnego związanego z opracowaniem projektów budowlanych, pozyskaniem prawa do terenu aż do uzyskania pozwolenia na budowę obiektu. W ramach niniejszej rozprawy kwestie formalno-prawne związane z opracowaniem i uzyskaniem wyżej wymienionych dokumentów, w tym sposób przeprowadzenia całej procedury, nie będą tematem rozważań, jednak należy w tym miejscu wskazać na dwa dokumenty mogące istotnie wpłynąć na możliwości wykorzystania pasów technologicznych.

Pierwszym z dokumentów jest *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych* [89]. Dokument ten stwierdza, że „(...) nie jest dopuszczalne sytuowanie stanowisk pracy, składowisk wyrobów i materiałów lub maszyn i urządzeń budowlanych bezpośrednio pod napowietrznymi liniami elektroenergetycznymi lub w odległości liczonej w poziomie od skrajnych przewodów mniejszej niż: (...) 30 m – dla linii o napięciu znamionowym powyżej 110 kV.” Zapis ten praktycznie wyklucza więc możliwość prowadzenia jakichkolwiek prac w pasach technologicznych, których szerokość na ogół jest mniejsza niż zdefiniowana w tym rozporządzeniu strefa zakazu prac. W praktyce natomiast prace w tym obszarze mogą być realizowane na podstawie zatwierdzonej *Instrukcji Bezpiecznego Wykonywania Robót Budowlanych* (IBWRB), co wynika to z zapisów ustawy *Prawo budowlane* [110]. W związku z powyższym można stwierdzić, że istnieją przeszkody prawne uniemożliwiające prowadzenie prac budowlanych linię dystrybucyjną w pasach technologicznych napowietrznych linii elektroenergetycznych.

Drugim dokumentem jest *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 28 sierpnia 2019 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych* [88], którego zapisy muszą zostać uwzględnione w *Instrukcji Bezpiecznego Wykonywania Robót Budowlanych*. Czynności wykonywane w pobliżu pracujących linii elektroenergetycznych wiążą się z ryzykiem porażenia prądem, nie tylko w przypadku bezpośredniego kontaktu z pracującą linią, ale również na skutek indukowania się napięć na narzędziach, maszynach czy elementach budowanej linii. Będzie to mieć miejsce

podczas całego spektrum prac budowlanych, jednak szczególnie duże zagrożenie występować będzie podczas montażu przewodów.

Montaż przewodów linii napowietrznych wykonywany jest metodą naciągową (tzw. metoda wciągarka–hamownik), która jest powszechnie stosowana w branży budownictwa elektroenergetycznego. W metodzie tej na jednym końcu sekcji odciągowej ustawiane są bębny z przewodami oraz hamownik, natomiast na drugim końcu ustawiona zostaje wciągarka przewodów (rys. 6.1).



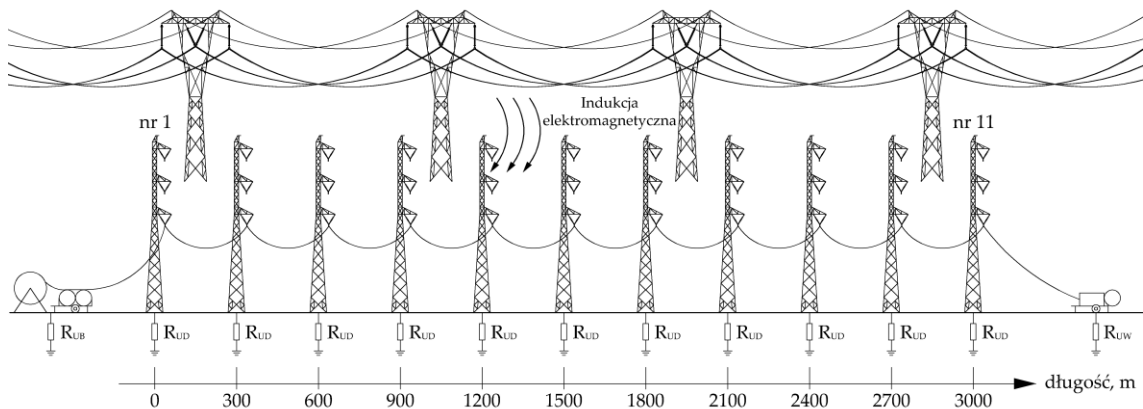
Rysunek 6.1. Ideowy schemat technologii rozwijania przewodu

W zależności od rodzaju terenu oraz parku maszynowego wykonawcy prac, proces rozwieszania przewodów rozpoczyna się od przeciągnięcia przez rolki montażowe zamontowane na konstrukcji słupa linki wstępnej albo poprzedzającej ją linki przedwstępnej (pilotującej). Następnie linka wstępna łączona jest z rozwieszanymi przewodami za pomocą tzw. pończochy końcowej albo bezpośrednio do uchwytów odciągowych przewodów, po czym rozpoczynany jest właściwy proces rozwieszania przewodów. Metoda naciągowa [38, 109] uznawana jest za najlepszą pod względem technicznym metodę montażu, ze względu na to, że przewody nie dotykają ziemi, dzięki czemu minimalizowane jest ryzyko ich uszkodzenia lub zabrudzenia.

W sytuacji gdy przewody linii dystrybucyjnej montowane są w zbliżeniu do pracującej linii przesyłowej, dochodzi do indukowania się w przewodach napięć, które mogą stanowić zagrożenie porażeniowe dla osób wykonujących prace budowlane. W praktyce uważa się, że najbardziej niebezpiecznymi czynnościami jest mocowanie łańcuchów odciągowych do konstrukcji słupa oraz demontaż rolek montażowych z łańcuchów przelotowych i montaż w ich miejsce właściwych uchwytów przewodów. W przypadku braku odpowiedniego wyposażenia lub popełnienia przez monter błędu może dojść do porażenia prądem.

6.2. Model montażu sekcji odciążowej linii dystrybucyjnej

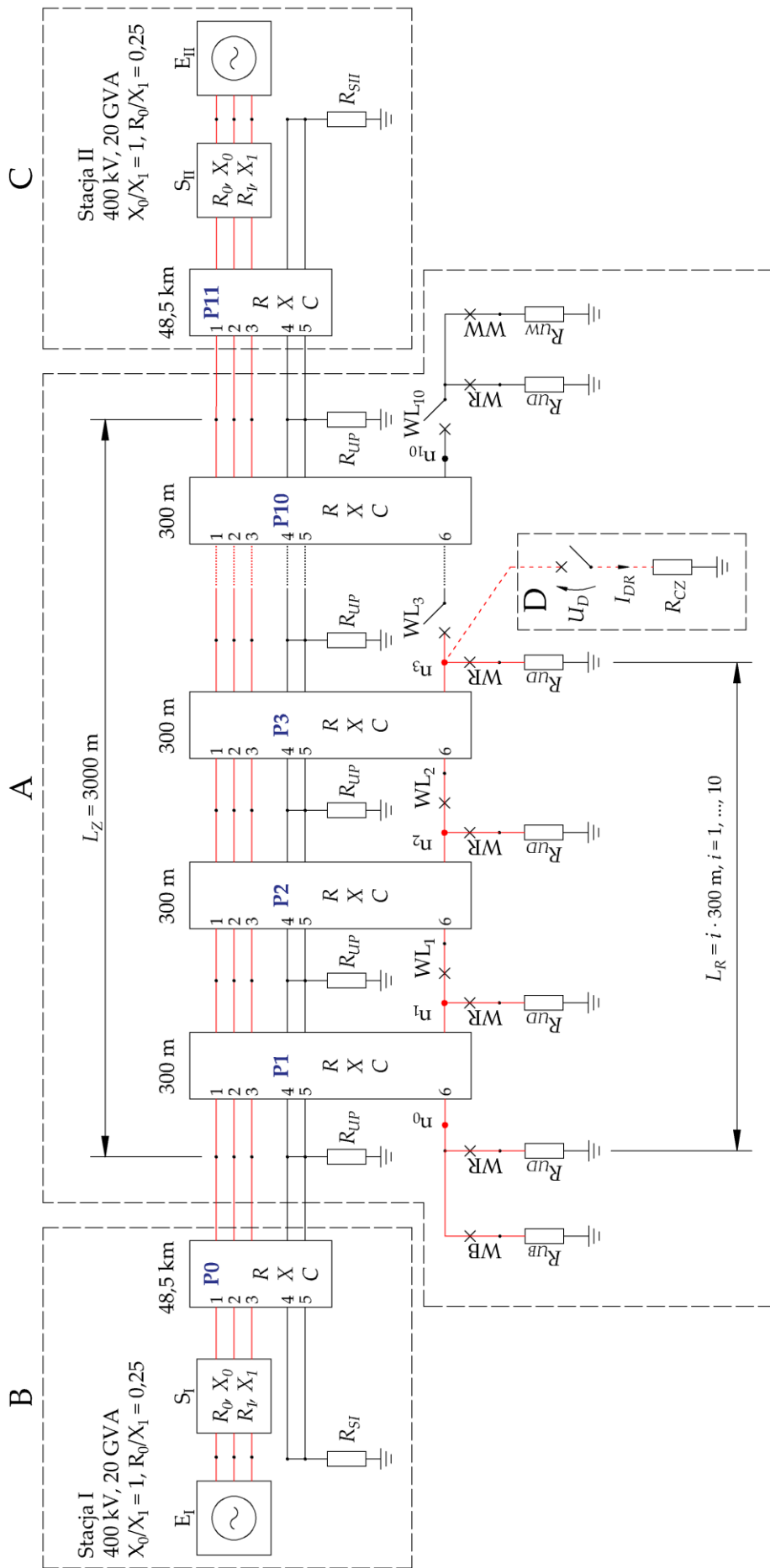
Przyjęty do badań model montażu sekcji odciążowej linii dystrybucyjnej przedstawiono na rysunku 6.2. Założono, że sekcję odciążową stanowi dziesięć jednakowych przęseł o łącznej długości 3000 m. Przyjęta długość rozwieszanego odcinka przewodów wynika między innymi z maksymalnej dopuszczalnej długości sekcji odciążowej w liniach 110 kV, określonych w standardach operatorów systemów dystrybucyjnych [26, 27, 74, 107]. Na rysunku 6.3 przedstawiono schemat modelu montażu sekcji odciążowej, który tworzą blok A modelu odcinka zbliżenia oraz bloki B i C sieci 400 kV.



Rysunek 6.2. Model montażu sekcji odciążowej linii dystrybucyjnej.

W skład bloku A wchodzi dziesięć sześcioprzewodowych przęseł P1÷P10 sekcji odciążowej o długości 300 m każde, zbliżonej do linii 400 kV. Przewody oznaczone numerami 1÷3 są wiązkowymi przewodami fazowymi linii 400 kV, a przewody 4÷5 są jej przewodami odgromowymi połączonymi z rezystancją R_{UP} uziemienia słupów. Przewód 6 jest rozwieszonym przewodem linii dystrybucyjnej. Wyłączniki WR odwzorowują połączenie albo odizolowanie rolek montażowych od uziomów R_{UD} słupów linii dystrybucyjnej, natomiast wyłączniki WB i WW odwzorowują połączenie albo odizolowanie bębna z hamownikiem przewodów i wciągarki od ich lokalnych uziomów o rezystancjach R_{UB} i R_{UW} . Wyłączniki podłużne WL1÷WL10 poprzez ich zamknięcie lub otwarcie umożliwiają symulację zmiennej długości rozwieszanego przewodu.

W skład bloku B wchodzi pięcioprzewodowy odcinek P0 linii przesyłowej 400 kV o długości 48,5 km, trójfazowe źródło napięcia E_I oraz blok S_I odwzorowujący zastępczą impedancję zwarciovą, określoną rezystancjami R_0 , R_1 i reaktancjami X_0 , X_1 dla składowej symetrycznej zerowej i zgodnej. Przewody odgromowe 4, 5 są przyłączone do uziomu stacji o rezystancji R_{SI} . Analogiczną strukturę ma blok C. Poprzez odpowiedni dobór amplitud i faz sił elektromotorycznych E_I i E_{II} możliwe jest odwzorowanie nie tylko danego obciążenia linii 400 kV, ale także stanów zwarciovych.



Rysunek 6.3. Schemat blokowy modelu montażu sekcji odciągowej

A – model sekcji odciągowej zblżenia, B, C – modele sieci 400 kV, D – blok analizy zagrożenia porażeniowego, P1-P10 –prześła odcinka zblżenia, P0, P11 – odcinek linii przesyłowej, R_{UP} , R_{UD} – rezystancje uzziemień słupów linii przesyłowej i dystrybucyjnej, R_{UB} – rezystancja uzziemienia bębna i hamownika, R_{UW} – rezystancja uzziemienia wieżgarki, E_I , E_2 – siły elektromotoryczne, R_{SI} , R_{SII} – rezystancje uzziemień stacji, R_0 , X_0 – rezystancja i reaktancja zerowa systemu, R_1 , X_1 – rezystancja i reaktancja zgodna systemu, R_{CZ} – rezystancja człowieka, L_R – długość rozważanego przewodu

Blok D jest blokiem analizy zagrożenia porażeniowego w punktach $n_0 \div n_{10}$ rozwieszanego przewodu, który pozwala określić napięcie dotykowe U_D i prąd rażeniowy I_{DR} płynący przez ciało człowieka o rezystancji R_{CZ} .

Opracowane wg schematu z rysunku 6.3 modele w programie EMTP-ATP zastosowano do badań oddziaływań elektromagnetycznych i ich skutków prądowo-napięciowych determinujących zagrożenie porażeniowe dla osób wykonujących prace budowlane. Spośród wielu możliwych w praktyce wariantów wprowadzenia prac montażowych, w badaniach rozważono ich pięć przypadków (tab. 6.1), które różnią się między sobą ze względu na sposób uziemienia bębna z hamownikiem, rolek montażowych oraz wciągarki.

Tabela 6.1. Rozważane warianty montażu sekcji odciągowej linii dystrybucyjnej

Wariant rozwiązania	Uziemiane elementy		
	bęben i hamownik	rolki montażowe	wciągarka
R1	–	–	–
R2	TAK	–	–
R3	TAK	TAK	TAK

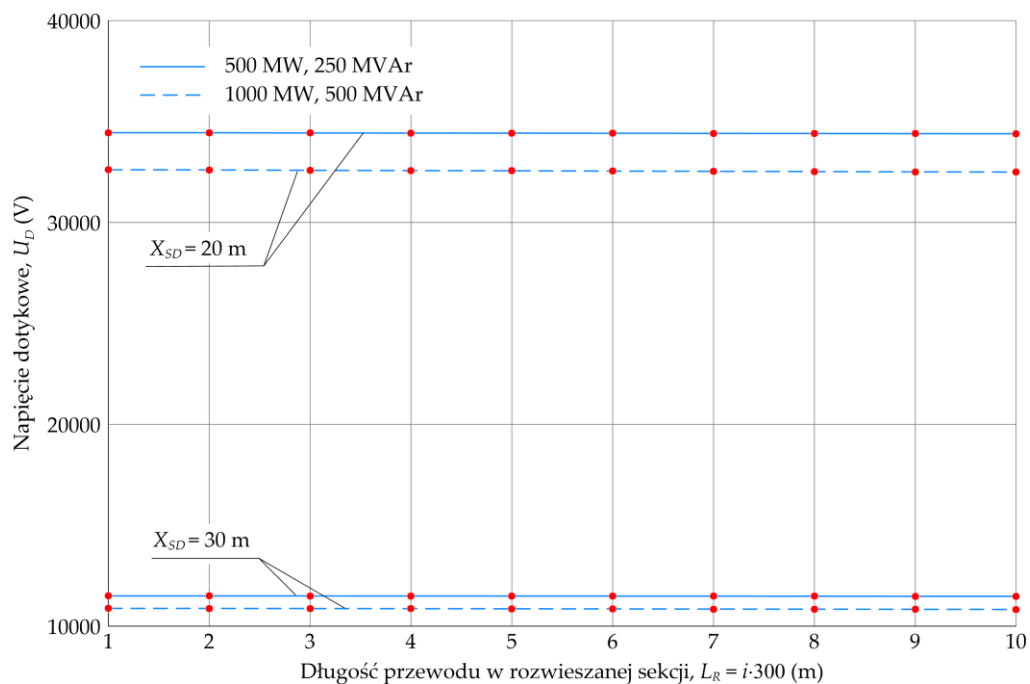
Napięcia dotykowe i prądy rażeniowe badano w funkcji długości L_R przewodu w rozwieszanej sekcji dla różnych odległości X_{SD} między osiami linii, obciążenia mocą S_4 linii przesyłowej, a w przypadkach stanów zwarć jednofazowych w linii 400 kV, również dla różnych miejsc jego wystąpienia i dla różnych przewodów fazowych dotkniętych tym zwarcie.

6.3. Wyniki badań

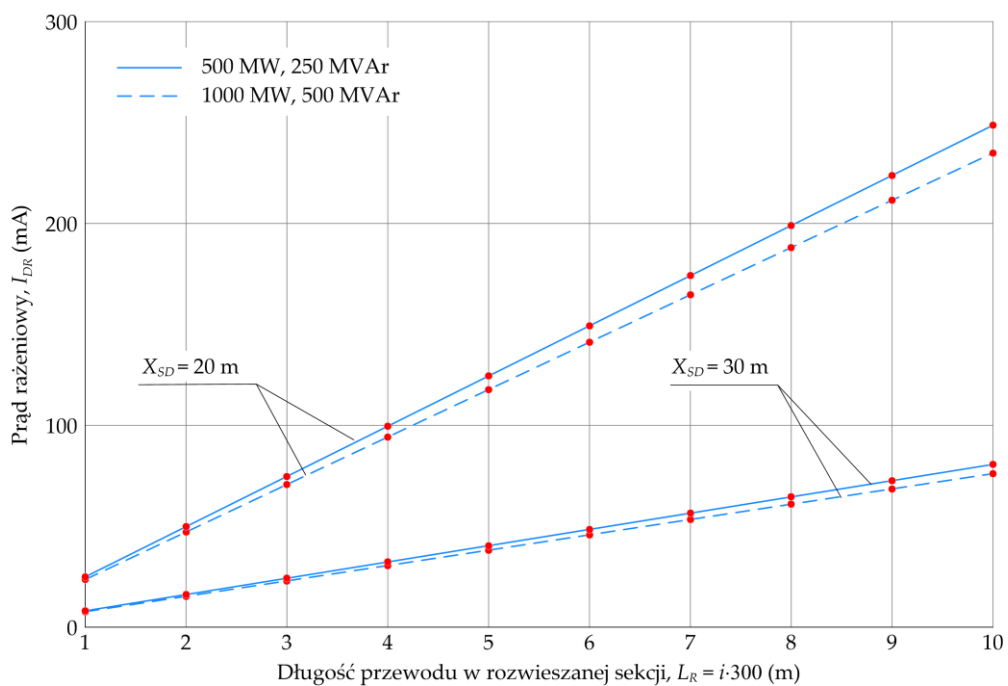
Na rysunkach 6.4÷6.6 przedstawiono zależności wartości napięć dotykowych U_D i prądów rażeniowych, które mogą wystąpić na początku rozwieszanego przewodu o długości L_R i są wywołane oddziaływaniem pracującej w stanie normalnym jednorodnej linii 400 kV (warianty W1, W3 – tab. 4.1). Założono, że rezystancje uziemień słupów linii dystrybucyjnej są jednakowe i wynoszą $R_{UD} = 10 \Omega$, a rezystancje uziemienia bębna oraz wciągarki wynoszą odpowiednio $R_{UB} = R_{UW} = 50 \Omega$.

Rysunek 6.4 dotyczy wariantu pierwszego montażu sekcji odciągowej (tab. 6.1), w którym rozwieszany przewód jest izolowany od ziemi. W związku z tym napięcia dotykowe (6.4a) są niezależne od długości L_R i charakteryzują się wartościami rzędu kilkunastu kilowoltów dla odległości $X_{SD} = 30$ m oraz rzędu kilkudziesięciu kilowoltów dla $X_{SD} = 20$ m.

a)

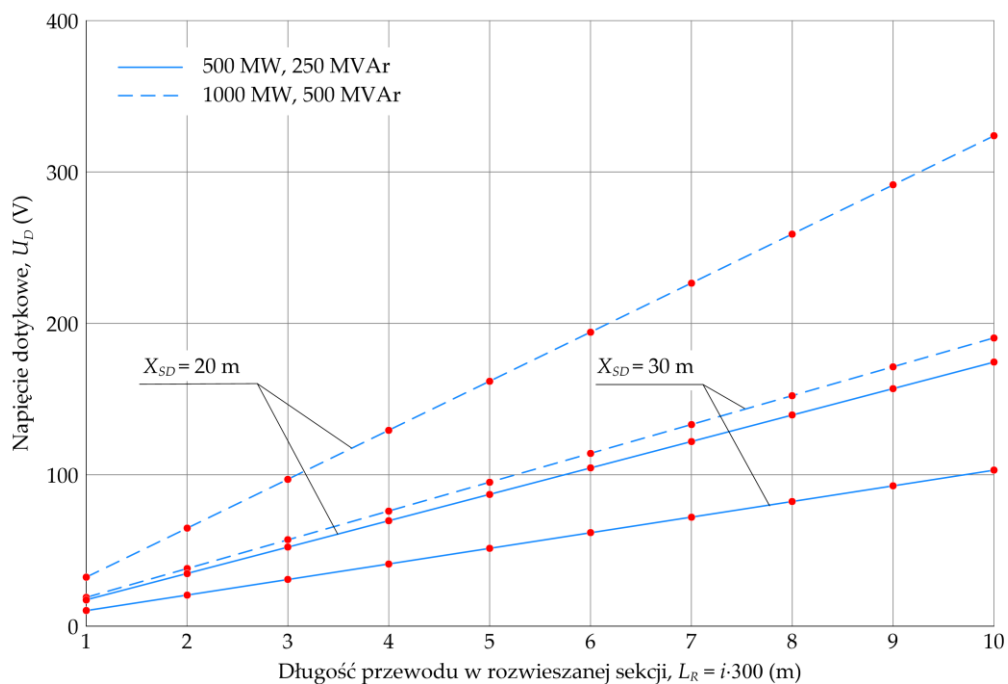


b)

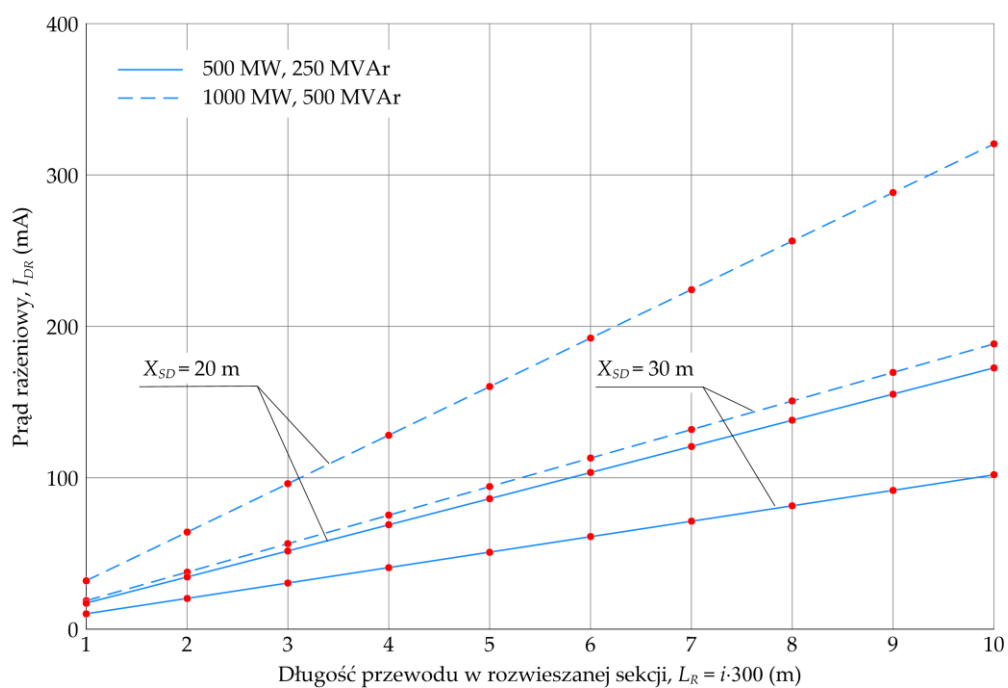


Rysunek 6.4. Zależności wartości napięć dotykowych U_D (a) i prądów rażeniowych I_{DR} (b) na początku rozwieszanego przewodu o długości L_R dla wariantu R1 rozwieszania przewodów: brak uziemienia bębna i hamownika, rolek montażowych oraz wciągarki – stan pracy normalnej linii przesyłowej 400 kV

a)

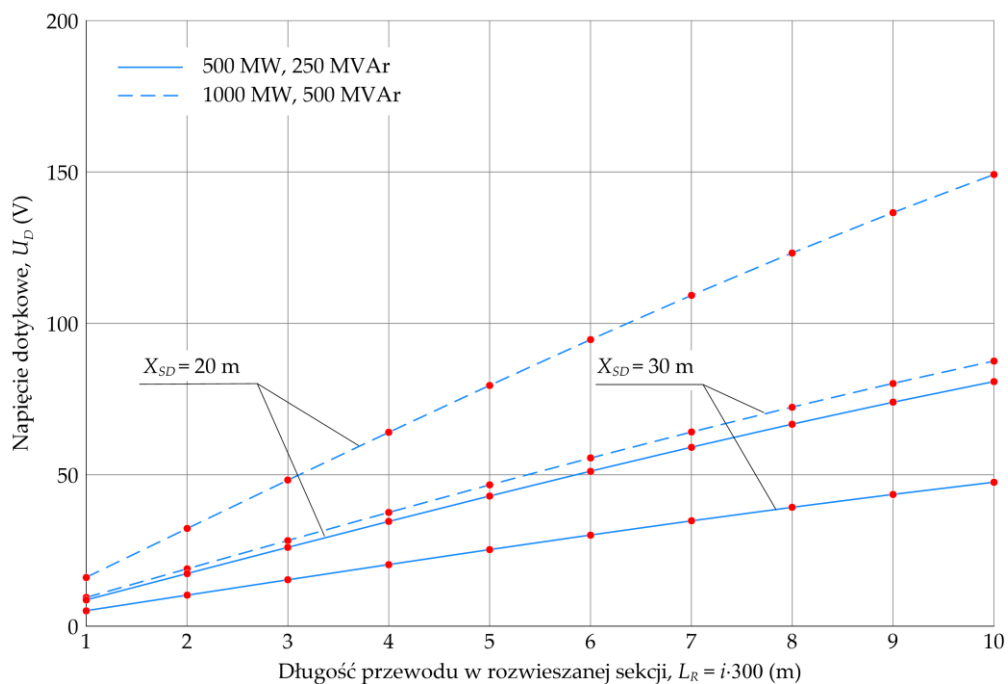


b)

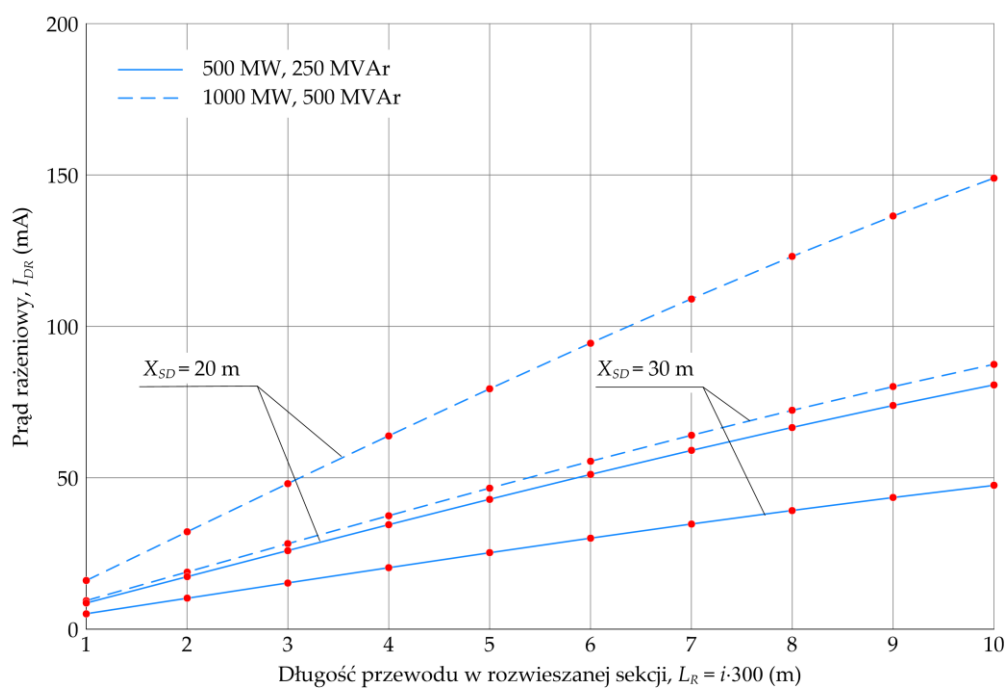


Rysunek 6.5. Zależności wartości napięć dotykowych U_D (a) i prądów rażeniowych I_{DR} (b) na początku rozwieszanego przewodu o długości L_R dla wariantu R2 rozwieszania przewodów: uziemienie bębna i hamownika, brak uziemienia rolek montażowych oraz wciągarki – stan pracy normalnej linii przesyłowej 400 kV

a)



b)



Rysunek 6.6. Zależności wartości napięć dotykowych U_D (a) i prądów rażeniowych I_{DR} (b) na początku rozwieszanego przewodu o długości L_R dla wariantu R3 rozwieszania przewodów: uziemienie bębna i hamownika, rolek montażowych oraz wciągarki – stan pracy normalnej linii przesyłowej 400 kV

Wartości te, są w pewnym stopniu zależne również od obciążenia S_4 linii 400 kV, co wynika – w odróżnieniu od modeli przedstawionych w rozdziale 5 – z łącznego ujęcia oddziaływania pojemnościowego i magnetycznego. Wartości prądów rażeniowych I_{DR} są liniowo zależne od długości L_R i mogą osiągać wartości dochodzące do około 80 mA przy odległości między osiami linii $X_{SD} = 30$ m oraz do około 240 mA przy odległości $X_{SD} = 20$ m. Również prądy rażeniowe są słabo zależne od obciążenia linii 400 kV w tym wariantcie montażu sekcji odciągowej linii dystrybucyjnej.

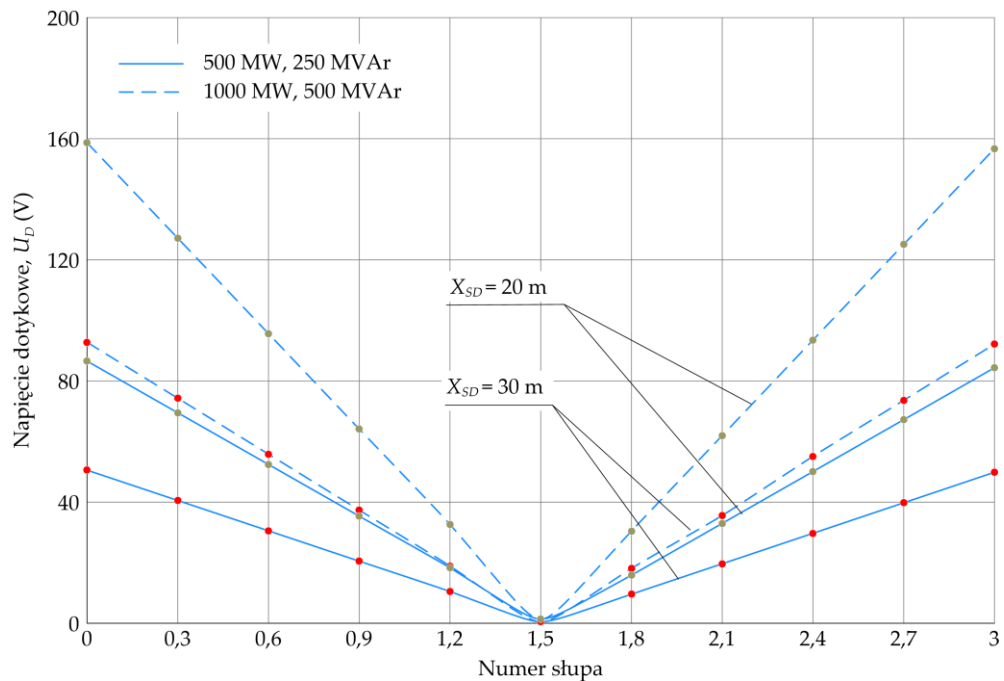
Uziemienie bębna (wariant R2, tab. 6.1) z którego rozwijany jest przewód powoduje, że dominującym rodzajem oddziaływania jest oddziaływanie magnetyczne, dlatego też zależności $U_D = f(L_R)$ są funkcjami liniowymi, co ilustruje rysunek 6.5a. Napięcia U_D nie przekraczają wartości około 320 V i są zależne nie tylko od odległości X_{SD} , ale również od obciążenia linii 400 kV. Zależności prądów rażeniowe $I_{DR} = f(L_R)$ cechują się tymi samymi własnościami co zależności $U_D = f(L_R)$, a ich wartości w przybliżeniu wynoszą $I_{DR} \approx U_D/R_{CZ}$, osiągając maksymalnie około 320 mA (rys. 6.5b). Dodatkowe uziemienie rolek montażowych (wariant R3, tab. 6.1) powoduje, że zarówno wartości napięć dotykowych (rys. 6.6a) jak i wartości prądów rażeniowych (rys. 6.6b) osiągają wartości około dwukrotnie mniejsze niż te przedstawione na rysunku 6.5 dla uziemienia tylko samego bębna. Ponadto zależności $U_D = f(L_R)$ i $I_{DR} = f(L_R)$ nieznacznie odbiegają od charakteru liniowego.

Przedstawione uprzednio na rysunkach 6.4÷6.6 wyniki badań dotyczyły sytuacji rozwieszania przewodów w sekcji odciągowej. Na rysunku 6.7 przedstawiono rozkłady napięcia dotykowego U_D (rys. 6.7a) oraz prądów rażeniowych I_{DR} (rys. 6.7b) na poszczególnych słupach, po zakończeniu procesu rozwieszania przewodu w sekcji odciągowej. Rozkłady te dotyczą tylko obustronnego uziemienia końców przewodu i określają między innymi zagrożenie porażeniowe na słupach podczas demontażu rolek oraz montażu w ich miejsce uchwyty przelotowych.

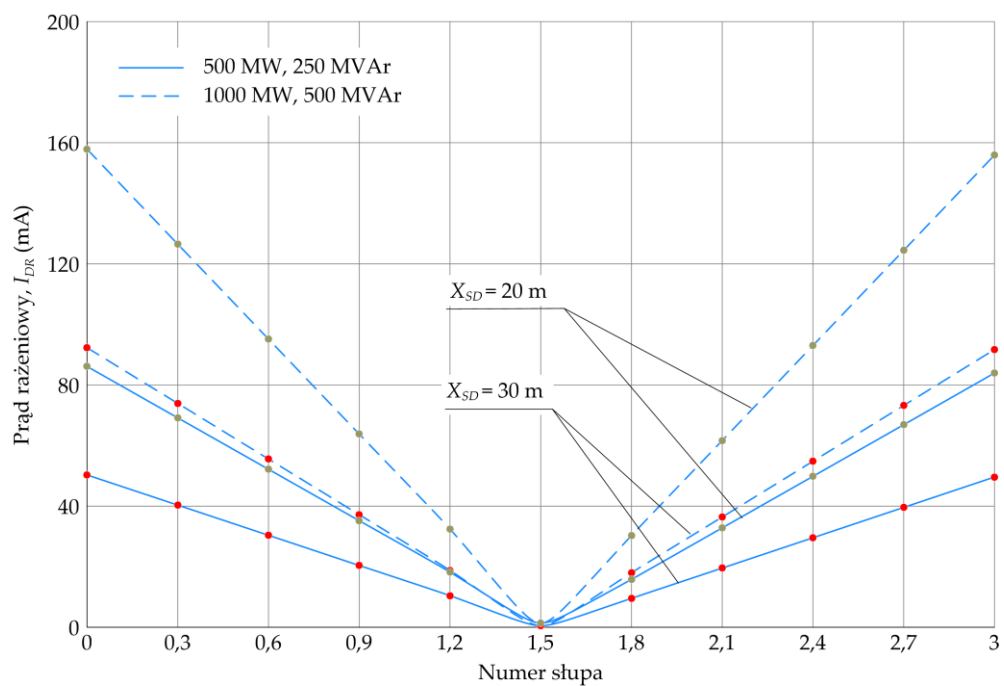
Oprócz normalnej pracy linii przesyłowej istotne jest również rozważenie jej oddziaływania na warunki budowy linii dystrybucyjnej podczas występowania w niej zwarć (rozdział 5.1.3, rys. 5.11), szczególnie podczas rozwieszania przewodów sekcji odciągowej.

Na rysunku 6.8 przedstawiono zależności napięć dotykowych U_D (rys. 6.8a) i prądów rażeniowych I_{DR} (rys. 6.8b) w funkcji długości L_R , które mogą wystąpić podczas przepływu prądów zwarciovych w linii 400 kV. Zaprezentowane krzywe otrzymane zostały przy założeniu wartości prądu 31,2 kA wywołanego jednofazowym zwarcieciem w rozdzielni 400 kV w stacji II (rys. 6.3) i dotyczą one wariantów R1, R2, R3 rozwieszania przewodu (tab. 6.1). Największe napięcia dotykowe rzędu kilku-, kilkunastu kilowoltów występują w wariantcie R1 (rys. 6.8a), natomiast największe wartości prądów rażeniowych, przekraczające nawet wartość 1000 mA, występują w wariantcie R2 (rys. 6.8b). Znaczenie ma również to, która faza linii 400 kV jest dotknięta zwarcieciem. W wariantcie R1 największe wartości U_D i I_{DR} pojawiają się przy zwarcieciu w fazie A (najdalej odsuniętej od rozwieszanego przewodu, tab. 4.1, wariant W1

a)

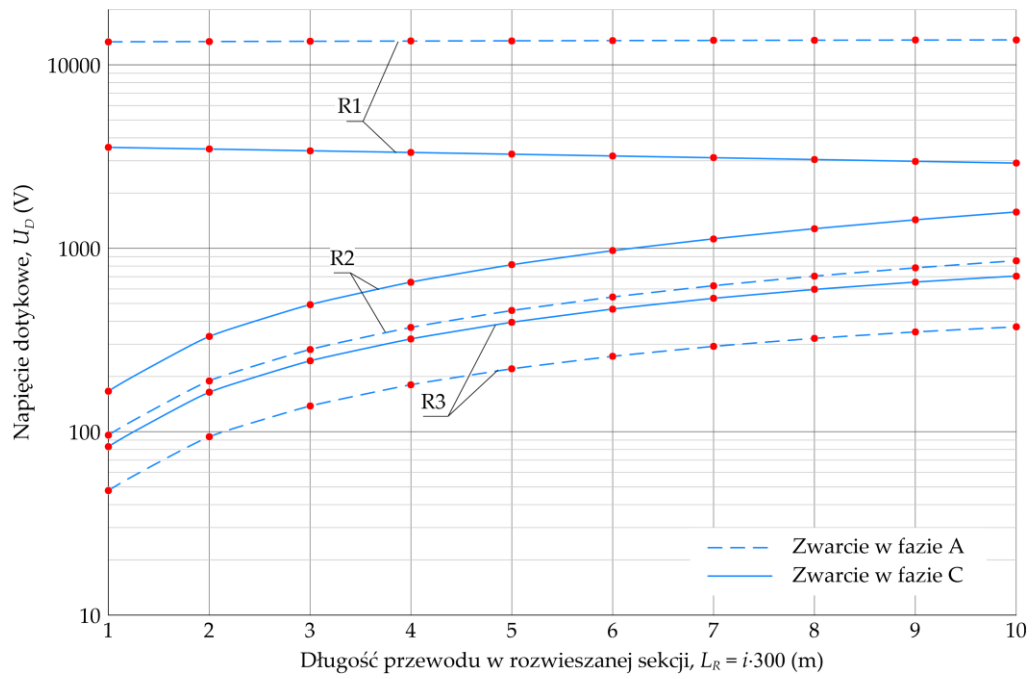


b)

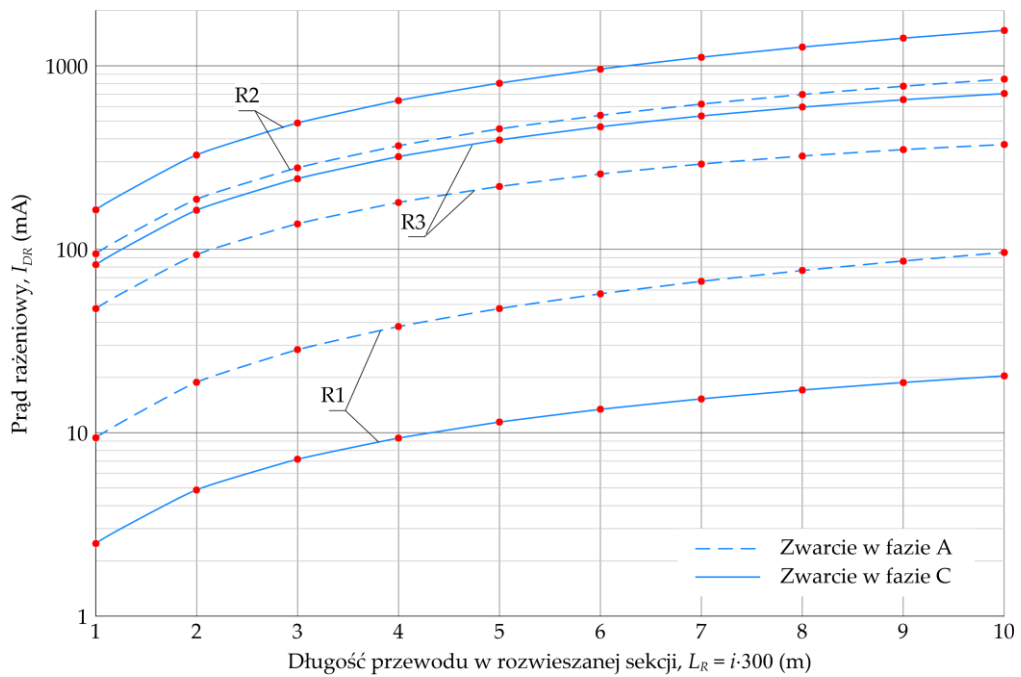


Rysunek 6.7. Rozkład wartości napięć dotykowych U_D (a) i prądów rażeńiowych I_{DR} (b) wzdłuż rozwieszonego przewodu – obustronne uziemienie końców przewodu (na słupie nr 1 i nr 11) w stanie pracy normalnej linii przesyłowej 400 kV

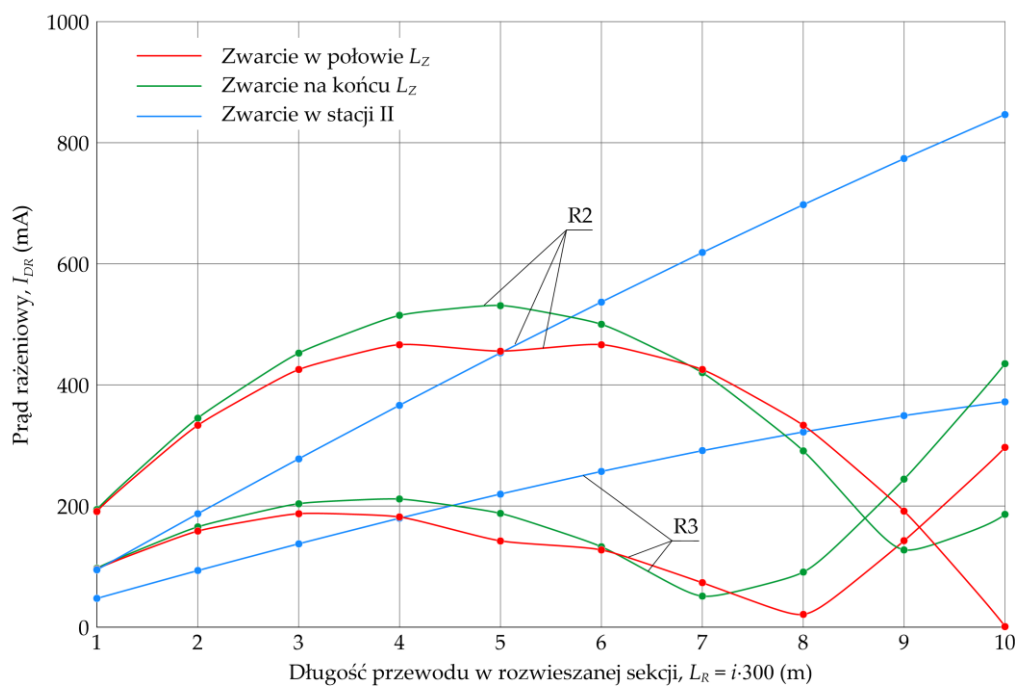
a)



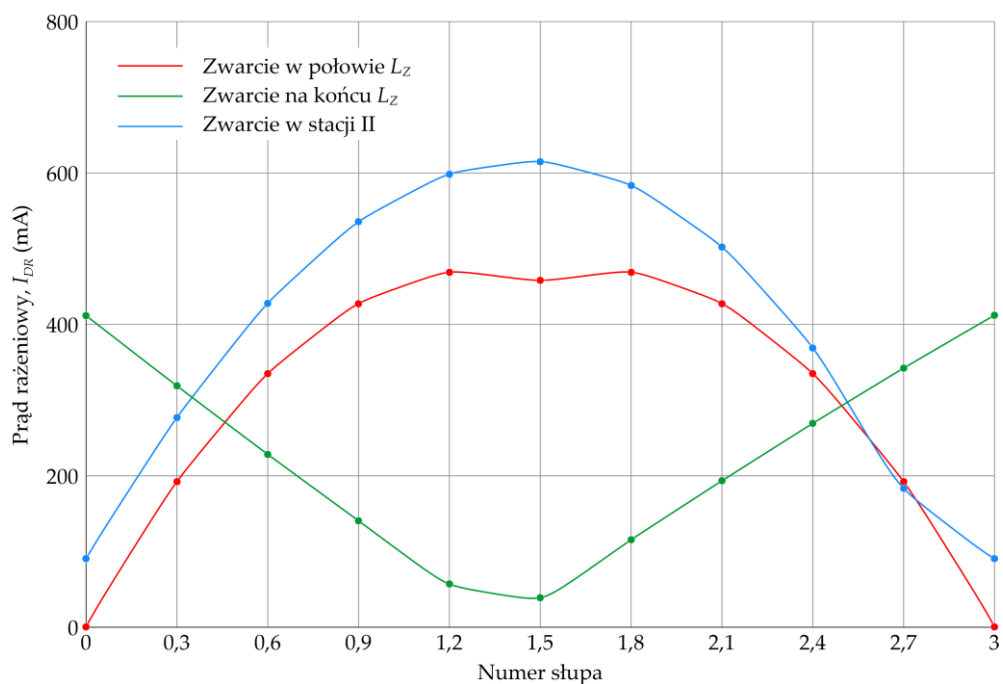
b)



Rysunek 6.8. Zależności wartości napięć dotykowych U_D (a) i prądów rażeniowych I_{DR} (b) na początku rozwieszanego przewodu o długości L_R w stanie zwarcia jednofazowego w rozdzielni 400 kV stacji II dla wariantów rozwieszania przewodów R1, R2, R3



Rysunek 6.9. Zależności prądów rażeniowych I_{DR} na początku rozwieszanego przewodu o długości L_R dla różnych miejsc wystąpienia zwarcia i wariantów rozwieszania przewodów

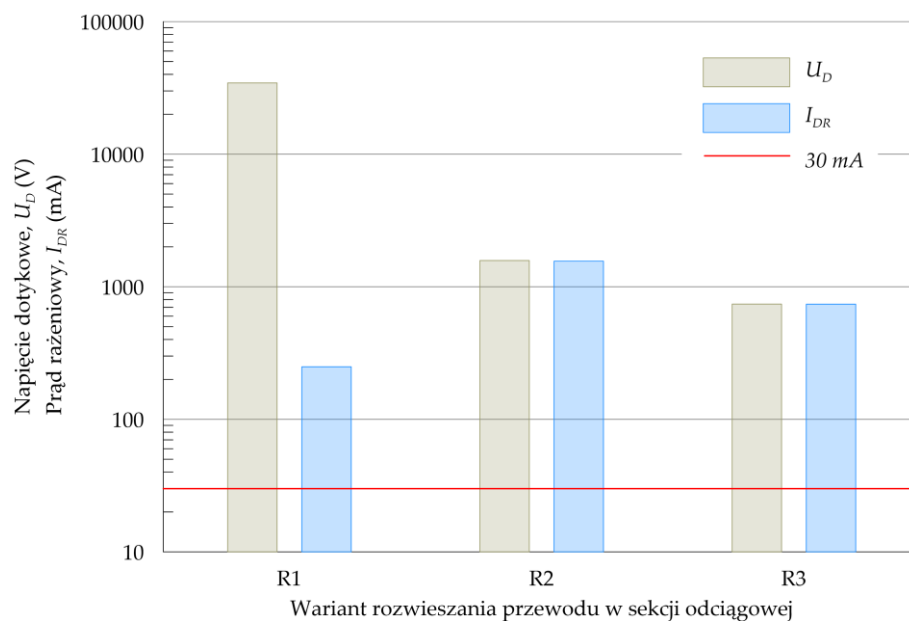


Rysunek 6.10. Rozkład wartości prądów rażeniowych I_{DR} wzdłuż rozwieszanego przewodu dla różnych miejsc wystąpienia zwarcia – obustronne uziemienie końców przewodu (na słupie nr 1 i nr 11)

albo W3), a w wariantach R2 i R3 przy zwarciu w fazie C, która jest najbliższa rozwieszanemu przewodowi.

Na wartości napięć i prądów wpływa również miejsce wystąpienia zwarcia, co ilustruje rysunek 6.9, na którym pokazano wartości prądów rażeniowych I_{DR} dla zwarcia: a) w rozdzielni 400 kV stacji II, b) na końcu odcinka zbliżenia, c) w połowie odcinka zbliżenia. W sytuacjach a) i b) ma miejsce jednokierunkowy przepływ prądu zwarciovego od stacji I do stacji II, natomiast w sytuacji c) do miejsca zwarcia dopływają prądy od obu stacji. Jednak niezależnie od miejsca zwarcia prądy rażeniowe mogą osiągać wartości kilkuset miliamperów, co pokazuje również rysunek 6.10 przedstawiający rozkłady wartości prądów I_{DR} wzdłuż rozwieszonego odcinka przewodu sekcji odciągowej.

Przeprowadzone badania wykazały, że podczas budowy linii dystrybucyjnych w pasie technologicznych linii przesyłowych należy liczyć się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego. Na rysunku 6.11 przedstawiono największe spodziewane wartości napięć dotykowych U_D i prądów rażeniowych I_{DR} , jakie mogą wystąpić w wyniku przepływu w linii przesyłowej prądów zwarciovych. Należy zauważyć, że wartości prądów I_{DR} są wielokrotnie większe od wartości 30 mA, uznawanej za próg wystąpienia fibrylacji komórek serca.



Rysunek 6.11. Największe wartości napięć dotykowych U_D i prądów rażeniowych I_{DR} w wariantach R1, R2, R3 rozwieszania przewodów

W ogólności można więc stwierdzić, że prowadzenie prac budowlanych w pasie technologicznym linii przesyłowych, wiąże się z możliwością wystąpienia porażień w przypadku tradycyjnego sposobu realizacji prac naciągowych. Z tego powodu możliwość montażu przewodów jest dopuszczalna tylko w przypadku czasowego wyłączenia linii przesyłowej z eksploatacji albo przy zastosowaniu technologii prac pod napięciem [25, 61].

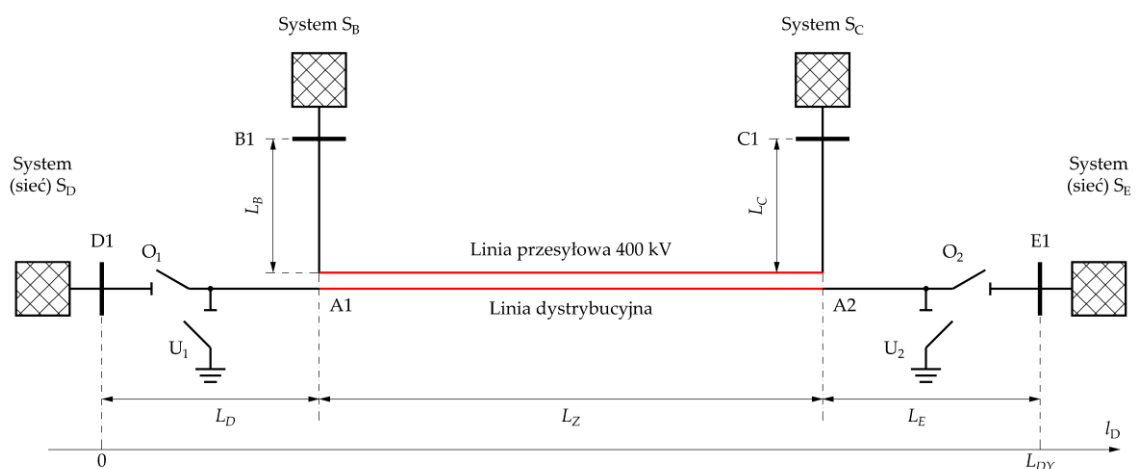
7. Badania wpływu linii przesyłowych na wartości napięć i prądów indukowanych w eksploatowanych liniach dystrybucyjnych

7.1. Przedmiot badań

Możliwość eksploatacji linii dystrybucyjnej wybudowanej w pasie technologicznym linii przesyłowej jest kolejnym kluczowym aspektem badań wyniki których przedstawiono w niniejszym rozdziale. Znajomość skutków oddziaływania linii przesyłowej na linię dystrybucyjną istotna jest nie tylko z punktu widzenia potencjalnej degradacji parametrów określających jakość energii elektrycznej [90]. Istotne również są warunki bezpieczeństwa i higieny pracy podczas przeprowadzania czynności konserwacyjnych, naprawczych oraz remontowych na linii dystrybucyjnej, które w przeciwieństwie do warunków budowy wynikać będą z oddziaływania linii przesyłowej na całym odcinku zblżenia.

W rozdziale 7.2 przedstawiono wyniki badań i analiz wpływu linii przesyłowych na parametry jakości energii elektrycznej, jakim są wartości napięć fazowych i wartość wskaźnika asymetrii w liniach dystrybucyjnych. Natomiast w rozdziale 7.3 przedstawiono wyniki badań spodziewanych prądów rażeniowych w wyłączonych spod napięcia liniach dystrybucyjnych, jakie mogą być wywołane oddziaływaniem elektromagnetycznym linii przesyłowych.

Przejęty do badań schemat układu elektroenergetycznego przedstawiono na rysunku 7.1.



Rysunek 7.1. Schemat układu elektroenergetycznego przyjętego do badań oddziaływań linii przesyłowej na linię dystrybucyjną podczas eksploatacji

Układ tworzą linia przesyłowa 400 kV przyłączona do systemów S_B i S_C oraz linia dystrybucyjna przyłączona do systemów (sieci) S_D i S_E . Linie te pomiędzy punktami B1 i C1 są do siebie zbliżone na długości L_Z , w wyniku lokalizacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej. Długość linii przesyłowej wynosi $L_{SY} = L_B + L_Z + L_C$, gdzie L_B oraz L_C są długościami odcinków linii 400 kV pomiędzy punktami B1–A1 oraz A2–C1. Natomiast długość linii dystrybucyjnej $L_{DY} = L_D + L_Z + L_E$, gdzie L_D , L_E długości odcinków D1–A1, A2–E1. Schemat zawiera również odłączniki O_1 , O_2 oraz uziemniki U_1 , U_2 , których zamknięcie bądź otwarcie odwzorowuje różne stany pracy linii dystrybucyjnej, przedstawione w tabeli 7.1. Analogicznie jak w rozdziale poprzednim, również w tym rozdziale zaprezentowano wynik badań dotyczące wariantów W1 i W3 z tabeli 4.1, bowiem wnioski ogólne płynące z tych badań słuszne są również dla wariantów W2 i W4.

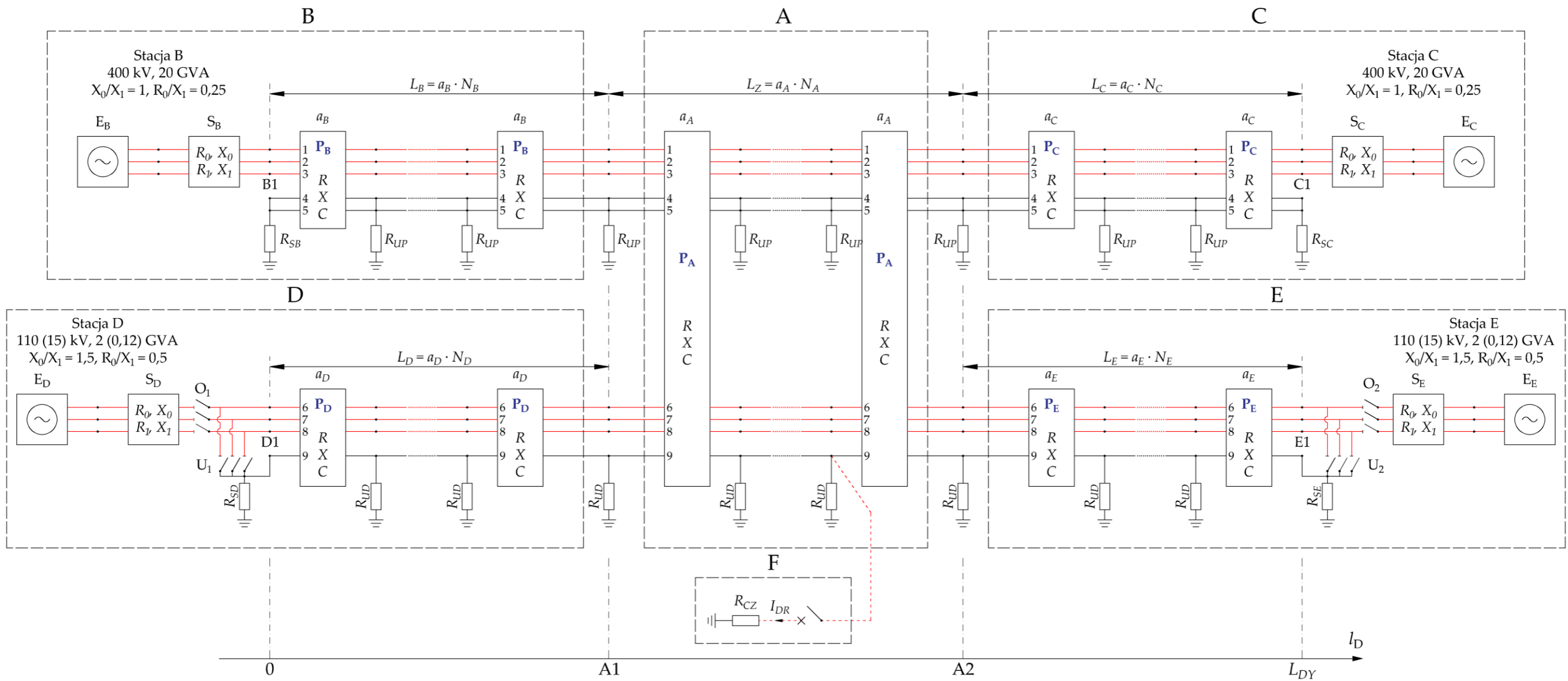
Tabela 7.1. Rozważane warianty podczas eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej.

Wariant	Stan pracy linii dystrybucyjnej	Stan łącznika			
		O_1	U_1	U_2	O_2
E1	normalny	1	0	0	1
E2	wyłączona, nieuziemia	0	0	0	0
E3	wyłączona, uziemia jednostronnie	0	1	0	0
E4	wyłączona, uziemia obustronnie	0	1	1	0

Na rysunku 7.2 przedstawiono schemat modelu do analizy warunków eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej, który tworzą blok A modelu odcinka zbliżenia, bloki B i C sieci 400 kV oraz bloki D i E sieci dystrybucyjnej.

W skład bloku A, będącego modelem odcinka zbliżenia, wchodzi N_A dziewięcioprzewodowych pręseł P_A o jednakowej rozpiętości a_A . Przewody oznaczone numerami 1÷3 są wiązkowymi przewodami fazowymi linii 400 kV, a przewody 4÷5 są jej przewodami odgromowymi połączonymi z rezystancją R_{UP} uziemienia słupów. Przewody 6÷8 są przewodami fazowymi linii dystrybucyjnej, natomiast przewód 9 jest przewodem odgromowym tej linii połączony z rezystancją R_{UD} (tylko w wariantcie W1).

Bloki B i C odwzorowują linię 400 kV poza odcinkiem zbliżenia, wraz z zasilającymi ją zastępczymi systemami elektroenergetycznymi. W skład bloku B (C) wchodzi: N_B (N_C) pięcioprzewodowych pręseł P_B (P_C) o jednakowej rozpiętości a_B (a_C), trójfazowe źródło napięcia E_B (E_C) oraz blok S_B (S_C) odwzorowujący zastępczą impedancję zwarciovą, określoną rezystancjami R_0 , R_1 i reaktancjami X_0 , X_1 dla składowej symetrycznej zerowej i zgodnej. Przewody odgromowe 4, 5 są przyłączone do uziemień słupów R_{UP} oraz w stacji do uziomu o rezystancji R_{SB} (R_{SC}).



Rysunek 72. Schemat blokowy modelu do analizy warunków eksploatacji linii dystrybucyjnej w pasie technologicznym linii przesyłowej

A – model odcinka zblizenia, B, C – modele sieci 400 kV, D, E – modele sieci dystrybucyjnej, F – blok do analizy zagrożenia porażeniowego, P_A – przesła odcinka zblizenia, P_B, P_C – przesła odcinka linii przesyłowej, P_D, P_E – przesła odcinka linii dystrybucyjnej, R_{UP}, R_{UD} – rezystancje ziemi słupów linii przesyłowej i dystrybucyjnej, E_B, E_C, E_D, E_E – siły elektromotoryczne, S_B, S_C, S_D, S_E – modele impedancji zwarcia systemu, R_ν, R_ν – rezystancje ziemi stacji, R_ϕ, X_0 – rezystancja i reaktancja zerowa systemu, R_ν, X_1 – rezystancja i reaktancja zgodna systemu, R_{CZ} – rezystancja człowieka, L_Z – długość odcinka zblizenia, L_B, L_C – długość odcinka linii 400 kV, L_D, L_E – długość odcinka linii dystrybucyjnej, O_1, O_2, U_1, U_2 – wyłączniki odwzorujące stany łączników w stacjach D i E, a_A, a_E – rozpiętości przeseł, N_A, N_E – liczba przeseł, I_{DR} – prąd rażeniowy, A1, A2 – punkty początku i końca odcinka zblizenia, B1, C1, D1, E1 – punkty początków (końców) linii

Analogiczną strukturę mają bloki D i E. Dodatkowymi elementami są w nich wyłączniki odwzorowujące wyspecyfikowane w tabeli 7.1 stany łączników O_1 , U_1 , O_2 , U_2 . Poprzez odpowiedni dobór amplitud i faz sił elektromotorycznych $E_B \div E_E$ możliwe jest odwzorowanie nie tylko zadanego obciążenia linii 400 kV oraz linii dystrybucyjnej, ale także stanów zwarciovych linii przesyłowej. Model zawiera również blok F pozwalający wyznaczyć prąd rażeniowy I_{DR} płynący przez ciało człowieka o rezystancji R_{CZ} .

Opracowane w programie EMTP-ATP modele według schematu z rysunku 7.2 zastosowano do badań oddziaływań elektromagnetycznych i ich skutków prądowo-napięciowych determinujących wartości napięć fazowych, wskaźnik asymetrii oraz zagrożenie porażeniowe osób wykonujących prace eksploatacyjne.

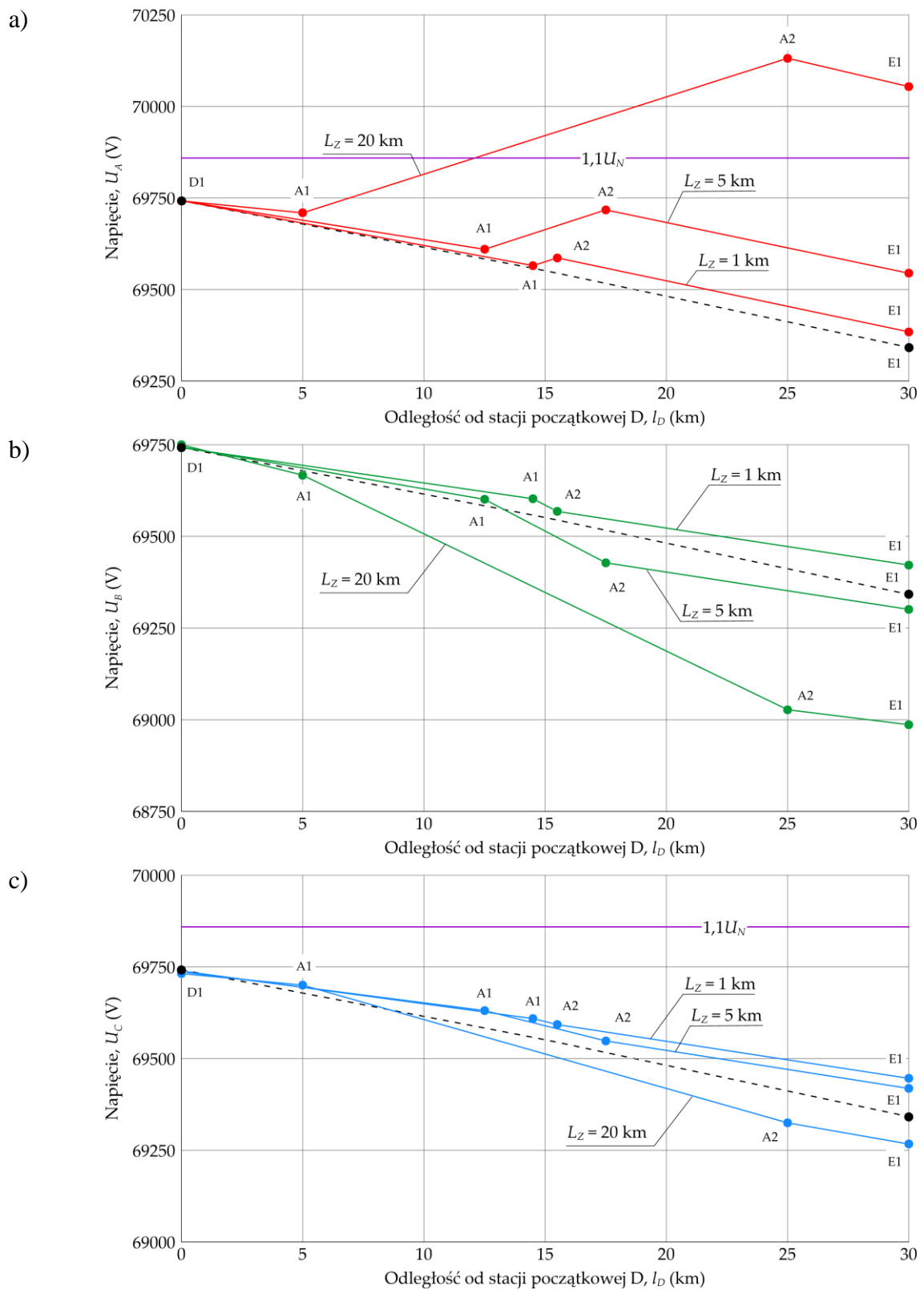
7.2. Badania i analizy wpływu linii przesyłowych na parametry jakości energii elektrycznej w liniach dystrybucyjnych

Podstawą oceny skutków oddziaływania linii przesyłowych w stanie pracy normalnej (wariant E1, tab. 7.1) są napięcia fazowe U_A , U_B , U_C w zbliżonej linii dystrybucyjnej oraz wskaźnik asymetrii W_A wyrażony wzorem:

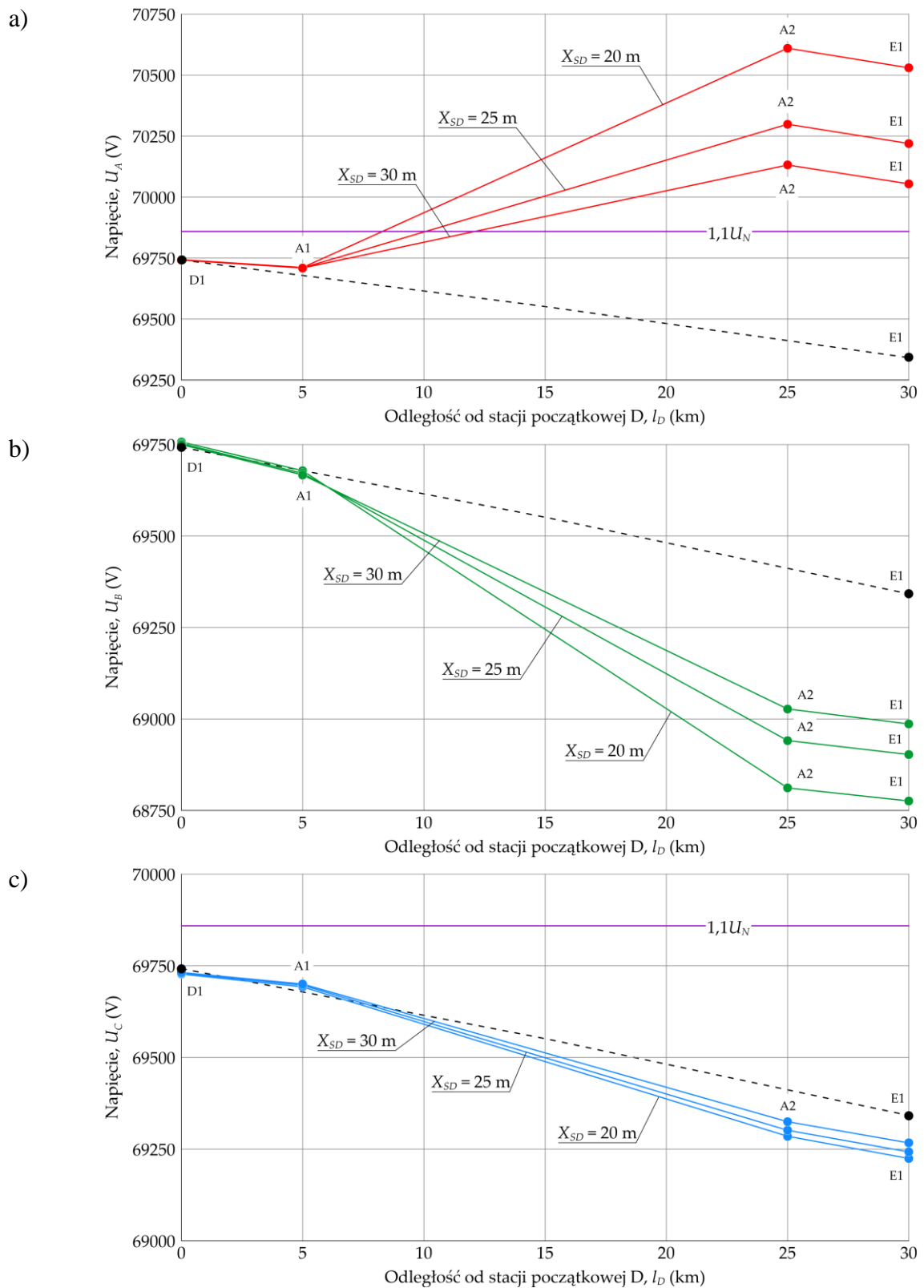
$$W_A = \left| \frac{\underline{U}_{2(D)}}{\underline{U}_{1(D)}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C}{\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C} \right| \cdot 100\% \quad (7.1)$$

gdzie: \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C – zespolone wartości napięć fazowych, $a = \exp(j2\pi/3)$, $\underline{U}_{1(D)}$, $\underline{U}_{2(D)}$ – wartości napięć składowych symetrycznych kolejności zgodnej i przeciwnej.

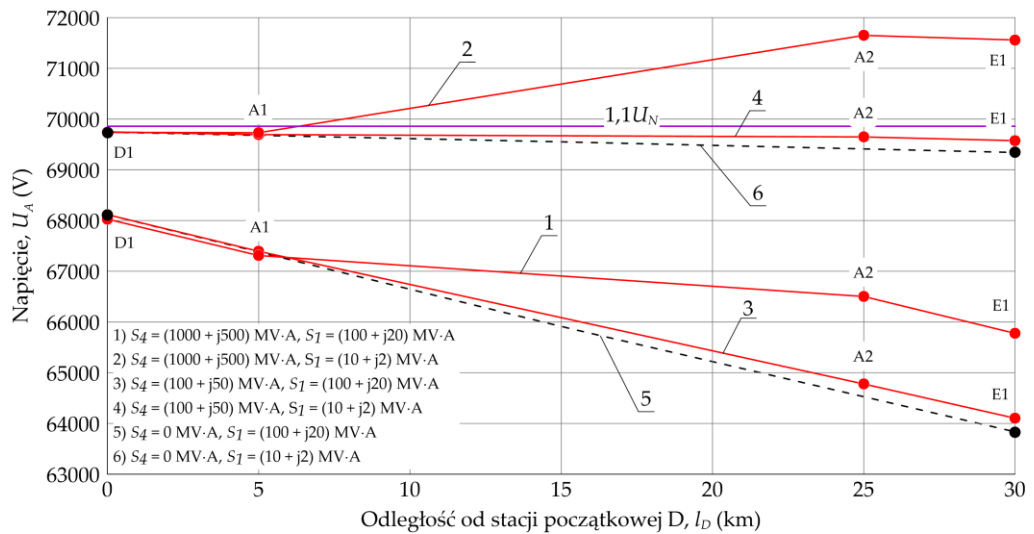
Na rysunkach 7.3a÷c przedstawiono rozkłady napięć fazowych U_A , U_B , $U_C = f(l_D)$ wzdłuż linii dystrybucyjnej 110 kV (wariant W1, tab. 4.1) dla różnych długości zbliżenia L_Z , które otrzymano dla obciążenia $S_4 = (500 + j250)$ MV·A linii 400 kV oraz obciążenia $S_1 = (10 + j2)$ MV·A linii 110 kV. Zaprezentowane na rysunku 7.3 wykresy ilustrują deformacje rozkładów napięć fazowych względem rozkładu liniowego który wystąpiłby w linii 110 kV przy braku oddziaływania elektromagnetycznego linii 400 kV. Deformacje te są tym większe, im większa jest długość odcinka zbliżenia, a odległość X_{SD} między osiami jest mniejsza – rysunek 7.4. Ponadto zależne są one również od wielkości obciążeń obu linii, co przedstawiono na rysunku 7.5.



Rysunek 7.3. Rozkłady napięć fazowych wzdłuż linii 110 kV zbliżonej do linii 400 kV prowadzonej w odległości $X_{SD} = 30$ m: a) faza A, b) faza B, c) faza C w funkcji odległości od stacji początkowej D l_D dla różnych wartości długości odcinka zbliżenia L_Z



Rysunek 7.4. Zależności wartości napięć fazowych w zbliżonej linii 110 kV prowadzonej w pasie technologicznym linii 400 kV: a) faza A, b) faza B, c) faza C w funkcji odległości od stacji początkowej D l_D dla różnych wartości odległości między osiami linii X_{SD}

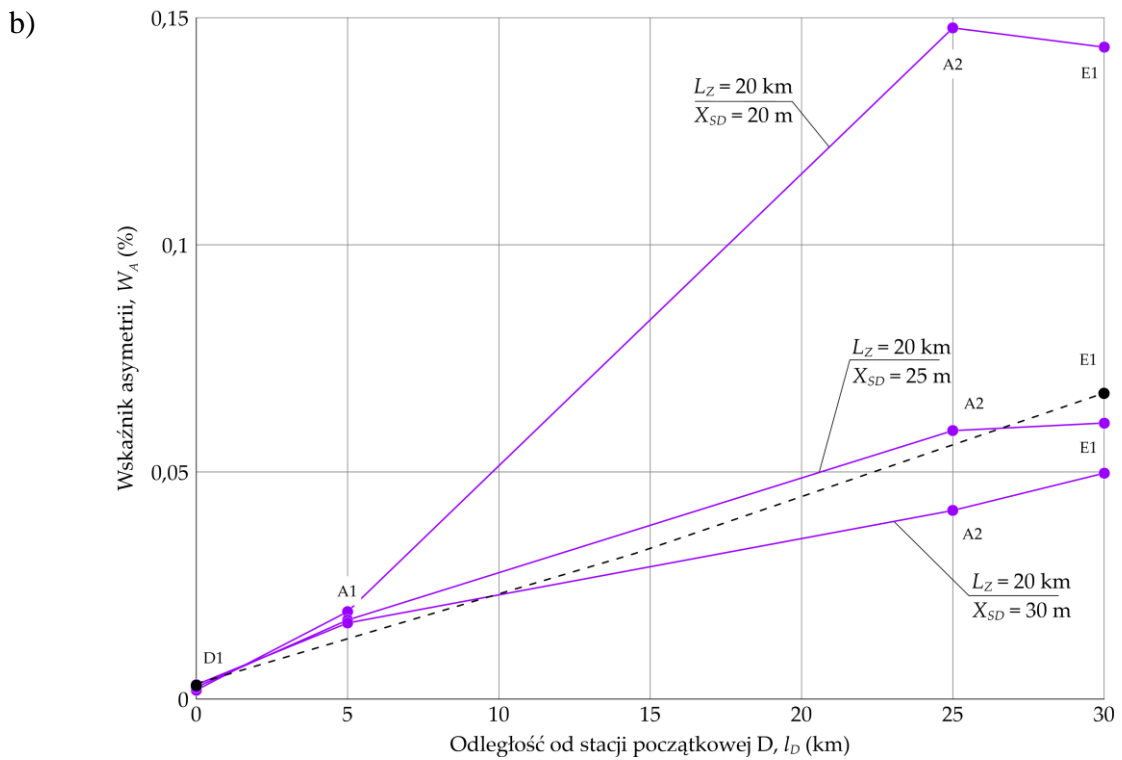
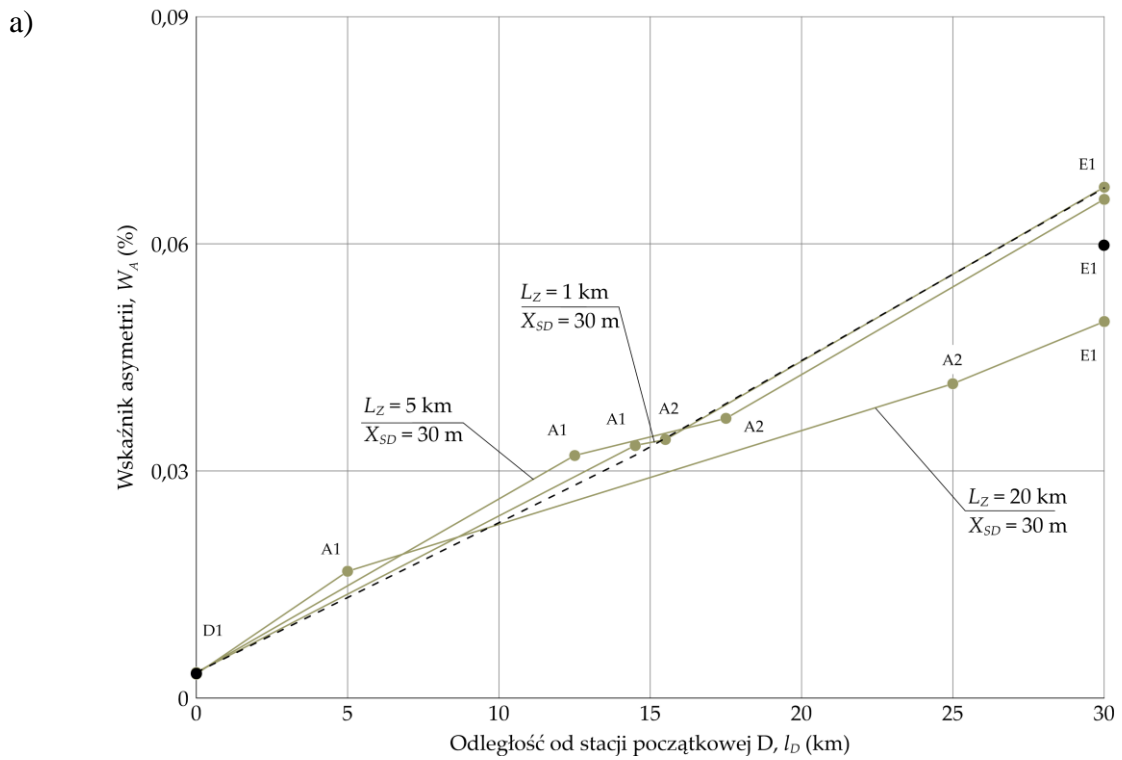


Rysunek 7.5. Zależności wartości napięcia fazy A w zbliżonej linii 110 kV prowadzonej w pasie technologicznym linii 400 kV w funkcji odległości od stacji początkowej D l_D dla różnych wartości obciążenia S_4 i S_1 .

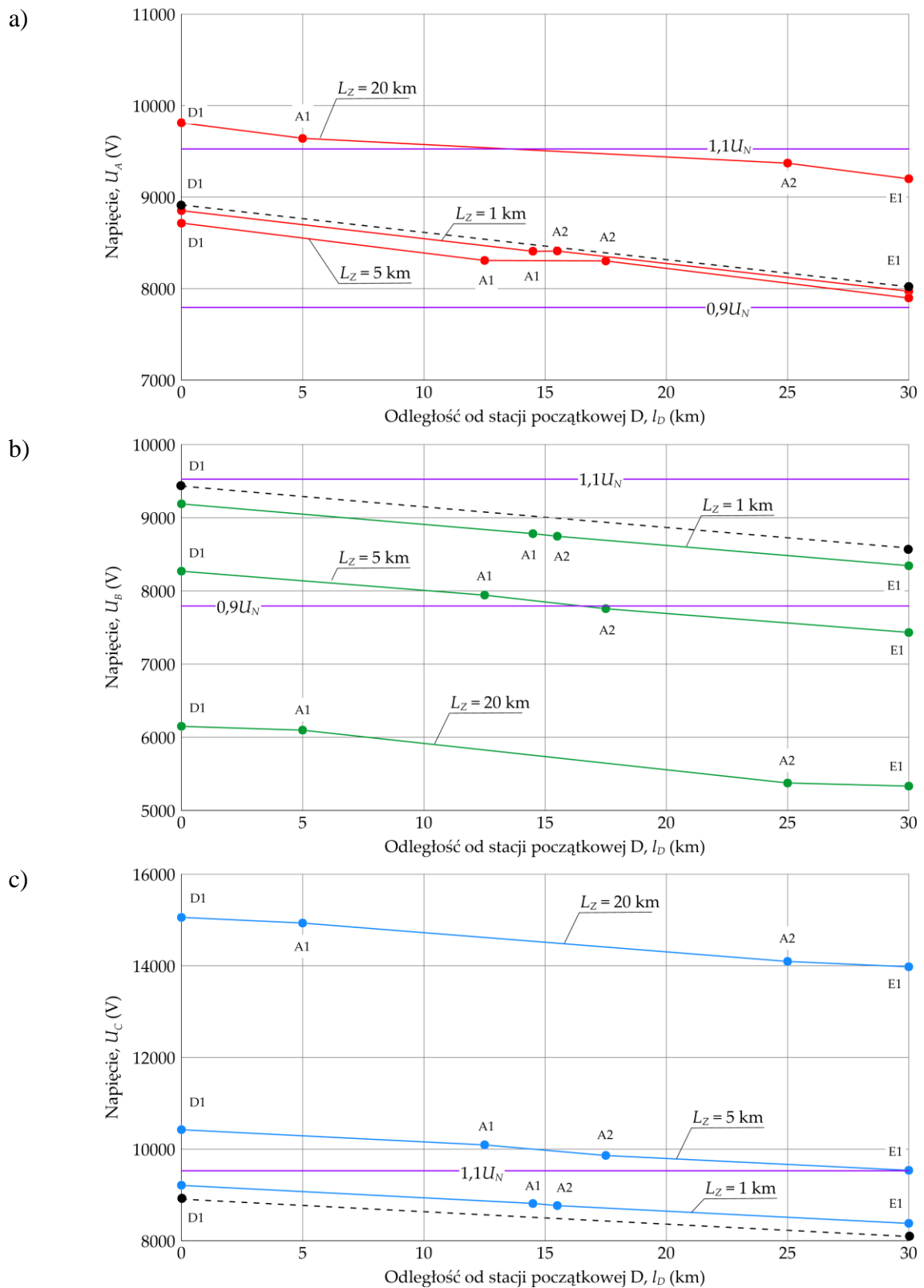
Oddziaływanie elektromagnetyczne linii 400 kV na zbliżoną linię 110 kV może być przyczyną przekroczenia w niej dopuszczalnej wartości napięcia wynoszącej $1,1U_N$ [90], gdzie U_N – napięcie znamionowe sieci, co potwierdzają rysunki 7.3a oraz 7.4a. Przeprowadzone badania wykazały, że z tego względu, przy odległości $X_{SD} = 30$ m długość L_Z zbliżenia linii 110 kV do 400 kV nie powinna przekraczać ok. 10 km, a przy odległości $X_{SD} = 20$ m długość $L_Z < 5$ km.

Badania wykazały również, że pomimo istotnej deformacji rozkładów napięć w linii dystrybucyjnej, wartości wskaźnika asymetrii W_A (7.1) nie przekraczają dopuszczalnej według rozporządzenia [90] wartości 1%. Potwierdzają to przedstawione na rysunkach 7.6a, b rozkłady wartości tego wskaźnika $W_A = f(l_D)$, dla wybranych wartości długości zbliżeń L_Z oraz odległości X_{SD} .

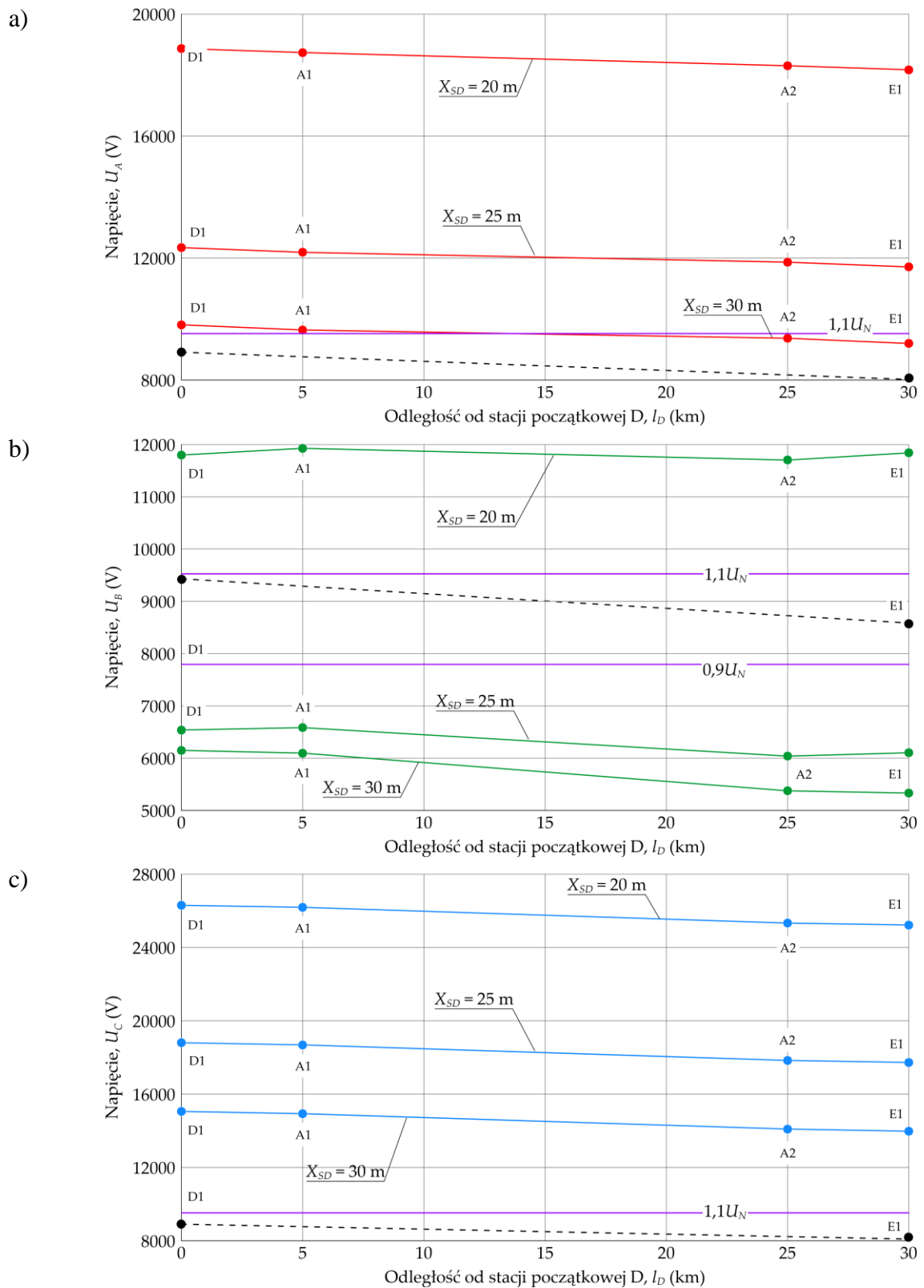
Badaniom poddano również wariant W3 (tab. 4.1) z linią dystrybucyjną 15 kV. Na rysunkach 7.7÷7.9 przedstawiono rozkłady napięć fazowych i wskaźnika asymetrii, analogiczne jak dla linii 110 kV. Z rozkładów napięć fazowych wynika, że oddziaływanie elektromagnetyczne linii 400 kV jest tak silne, że wartości tych napięć praktycznie w każdej sytuacji nie mieszczą się w dopuszczalnym według rozporządzenia [90] przedziale $(0,9 \div 1,1) U_N$. Pomimo tak silnej deformacji napięć wartości wskaźnika asymetrii (rys. 7.9) mieszczą się w wymaganym przedziale $0 \div 2\%$. Otrzymane wyniki badań upoważniają więc do jednoznacznego stwierdzenia, że napowietrzne linie dystrybucyjne 15 kV nie powinny być lokalizowane w pasach technologicznych linii 400 kV.



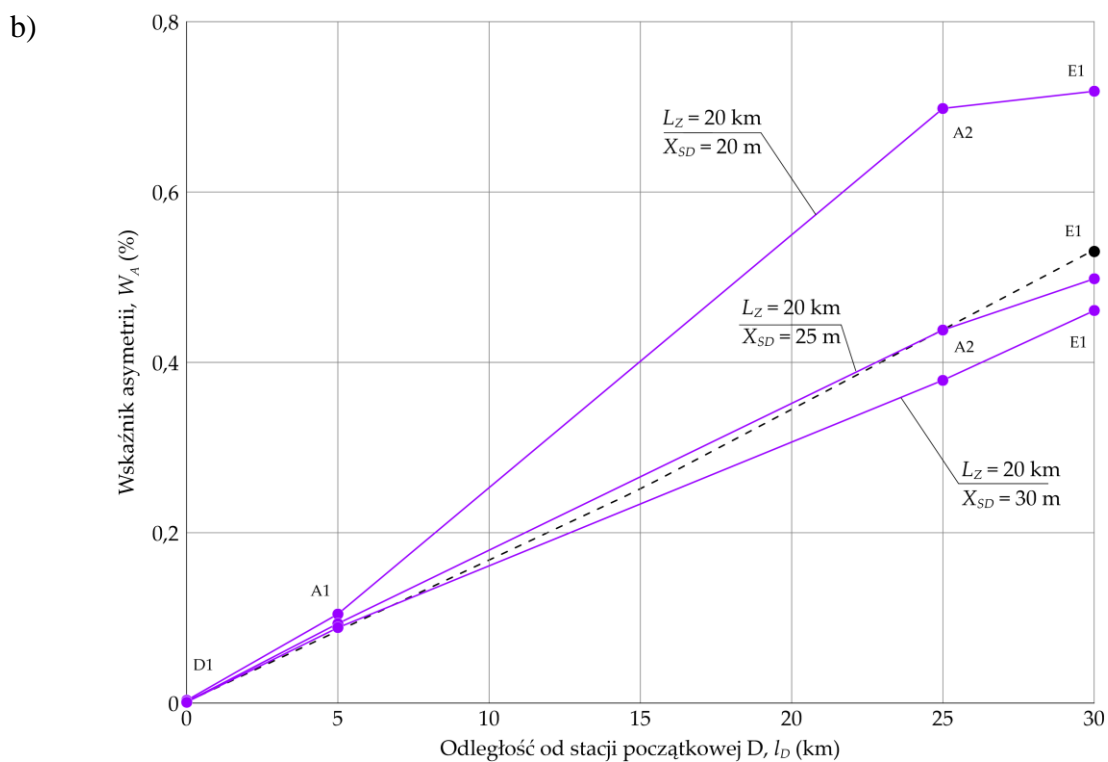
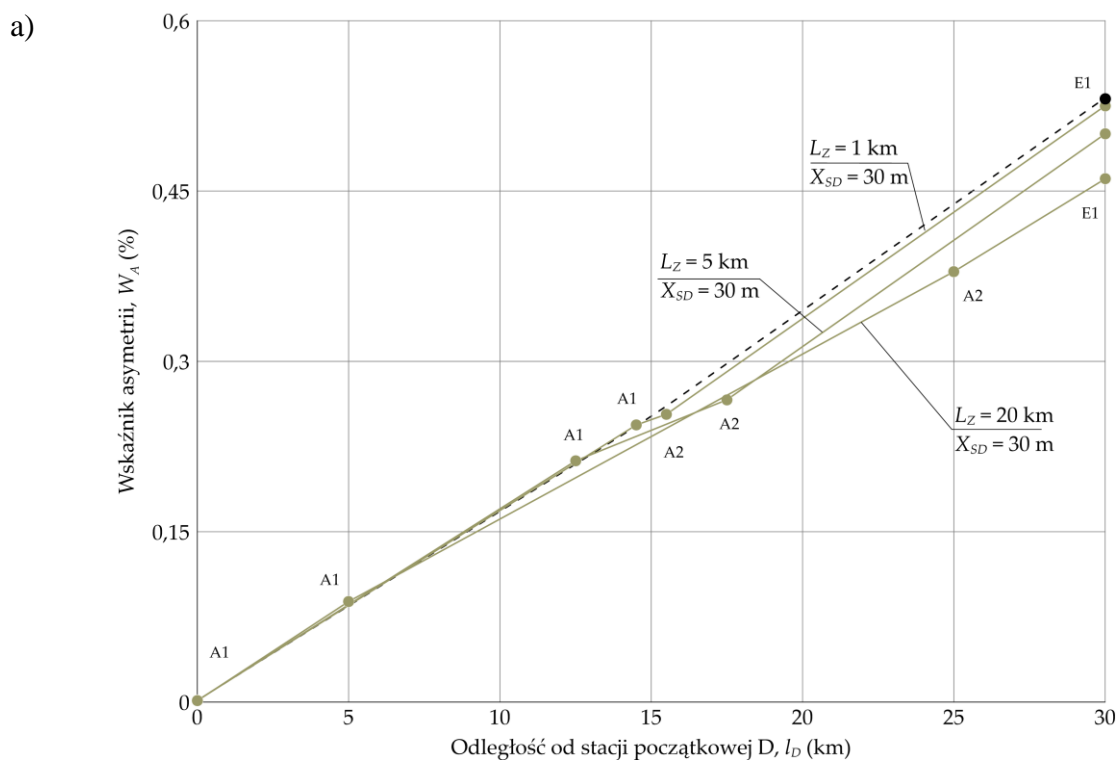
Rysunek 7.6. Zależności wartości wskaźnika asymetrii W_A w zbliżonej linii 110 kV prowadzonej w pasie technologicznym linii 400 kV: a) dla różnych wartości długości odcinka zbliżenia L_Z , b) dla różnych wartości odległości między osiami linii X_{SD}



Rysunek 7.7. Zależności wartości napięć fazowych w zbliżonej linii 15 kV prowadzonej w pasie technologicznym linii 400 kV: a) faza A, b) faza B, c) faza C w funkcji odległości od stacji początkowej D l_D dla różnych wartości długości odcinka zbliżenia L_Z



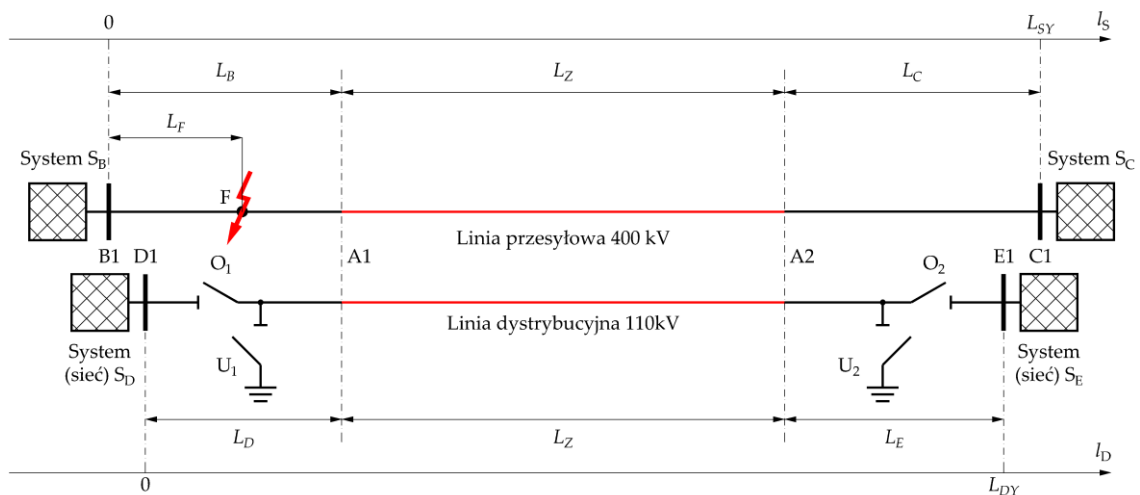
Rysunek 7.8. Zależności wartości napięć fazowych w zbliżonej linii 15 kV prowadzonej w pasie technologicznym linii 400 kV: a) faza A, b) faza B, c) faza C w funkcji odległości od stacji początkowej D l_D dla różnych wartości odległości między osiami linii X_{SD}



Rysunek 7.9. Zależności wartości wskaźnika asymetrii W_A w zbliżonej linii 15 kV prowadzonej w pasie technologicznym linii 400 kV: a) dla różnych wartości długości odcinka zbliżenia L_Z , b) dla różnych wartości odległości między osiami linii X_{SD}

7.3. Badania i analizy zagrożenia porażeniowego osób wykonujących prace eksploatacyjne na linii dystrybucyjnej w warunkach oddziaływania linii przesyłowej

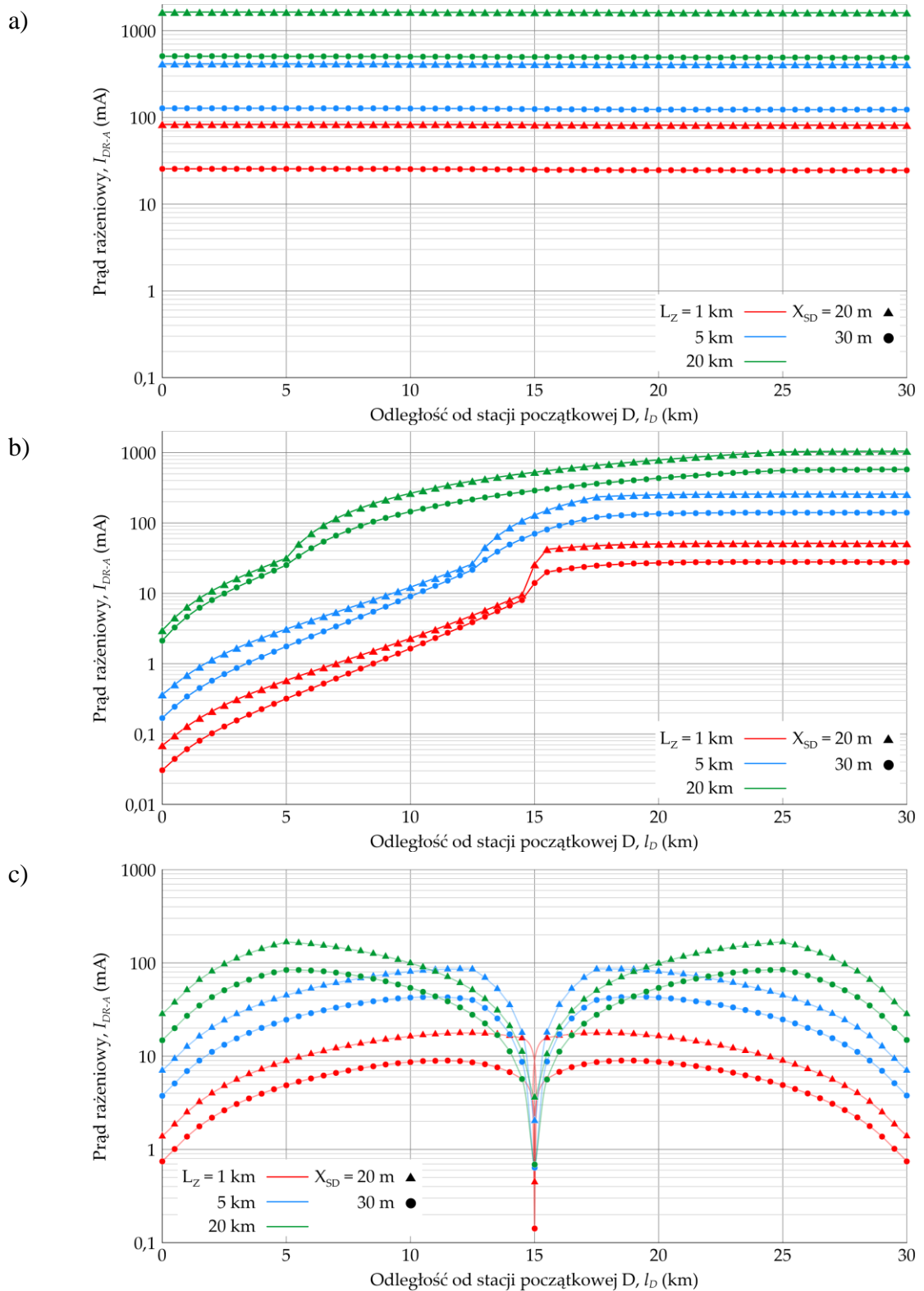
Podstawę oceny zagrożenia porażeniowego stanowił prąd rażeniowy, który może popłynąć przez ciało osoby narażonej na bezpośrednie działanie spodziewanego napięcia dotykowego, podczas wykonywania prac eksploatacyjnych na linii dystrybucyjnej w warunkach oddziaływania linii przesyłowej. Zagrożenie to zostało przeanalizowane dla wariantów E2÷E4 przedstawionych w tabeli 7.1, zarówno w stanach pracy normalnej, a także podczas zwarcia jednofazowych w różnych miejscach linii 400 kV – rysunek 7.10.



Rysunek 7.10. Schemat układu elektroenergetycznego przyjętego do badań oddziaływań linii przesyłowej na linię dystrybucyjną podczas eksploatacji

L_Z – długość odcinka zbliżenia A1–A2 linii 400 i 110 kV, l_D – odległość liczona wzdłuż linii dystrybucyjnej od stacji początkowej D (punktu D1), l_S – odległość liczona wzdłuż linii przesyłowej od stacji początkowej B (punktu B1), L_F – odległość miejsca zwarcia w linii przesyłowej,

Na rysunkach 7.11a÷c przedstawiono rozkłady prądów rażeniowych, które mogą wystąpić wzdłuż linii dystrybucyjnej w warunkach oddziaływania linii 400 kV obciążonej mocą $S_4 = (500 + j250)$ MV·A. Dotyczą one fazy A linii 110 kV, w której zagrożenie porażeniowe jest największe. Wartości prądów rażeniowych zależne są od stanu łączników O_1 , O_2 , U_1 , U_2 , parametrów zbliżenia L_Z i X_{SD} oraz od miejsca wykonywania prac eksploatacyjnych w linii 110 kV, określonego odległością l_D (rys. 7.10).



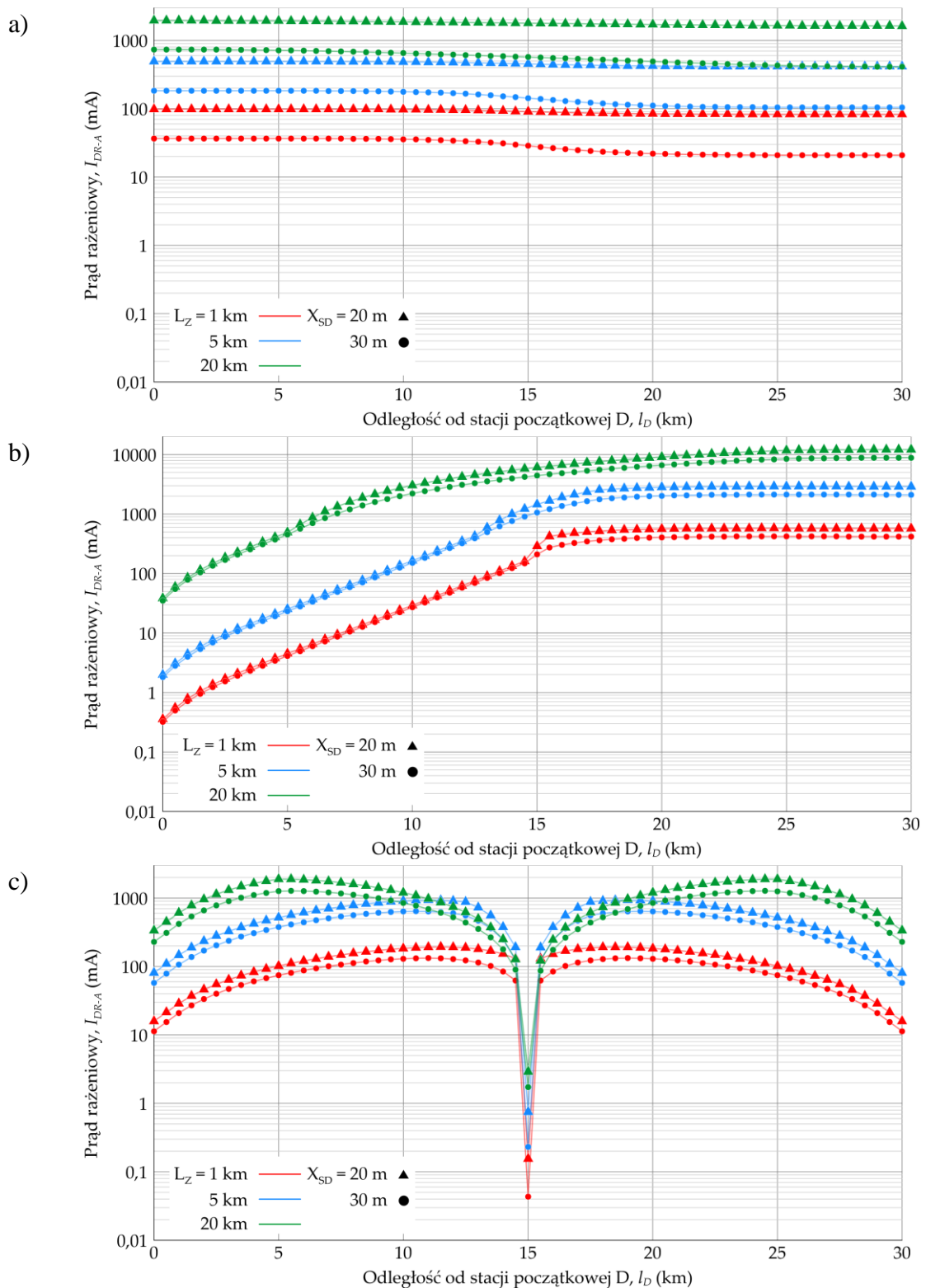
Rysunek 7.11. Rozkłady wartości spodziewanych prądów rażeniowych w linii dystrybucyjnej 110 kV w stanie pracy normalnej linii 400 kV: a) wariant E2 (linia dystrybucyjna nieziemiona), b) wariant E3 (jednostronne uziemienie linii dystrybucyjnej), c) wariant E4 (obustronne uziemienie linii dystrybucyjnej)

W wariancie E2 prąd rażeniowy jest praktycznie niezależny od odległości l_D , co wynika z tego, że odłączona od źródeł zasilania linia 110 kV nie jest uziemiona. Sytuacja taka może w praktyce wystąpić jako stan przejściowy pomiędzy operacjami łączeniowymi podczas uwalniania linii spod napięcia, a także jej ponownego przyłączenia do systemu. Dla rozważanych wartości parametrów L_Z i X_{SD} , prąd rażeniowy zawiera się w przedziale od 24 mA do 1640 mA, a jego wartość jest tym większa im większa jest długość L_Z i im mniejsza jest odległość X_{SD} .

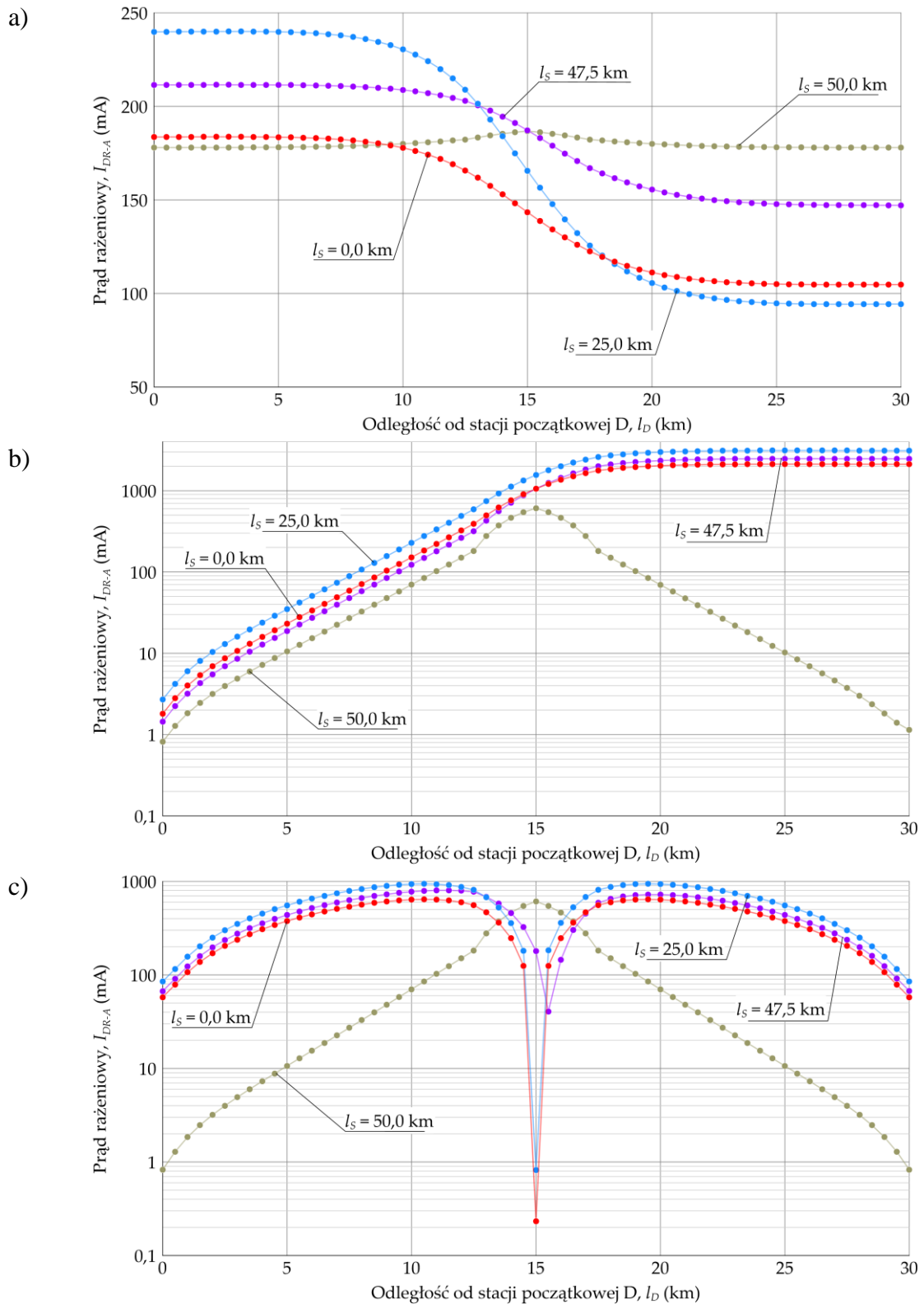
Przy jednostronnym oraz obustronnym uziemieniu przewodów fazowych linii dystrybucyjnej – warianty E3 i E4 przedstawione na rysunkach 7.11b i 7.11c – prądy rażeniowe zależne są od miejsca wykonywania czynności eksploatacyjnych, określonego odległością l_D . Podobnie jak w wariancie E2, również wariant E3 dotyczy stanu przejściowego pomiędzy operacjami łączeniowymi, przy czym jeden z końców linii dystrybucyjnej jest już uziemiony. W sytuacji tej zagrożenie porażeniowe zwiększa się wraz ze wzrostem odległości l_D , a wartości prądów rażeniowych na nieuziemionym końcu linii w stacji E zawierają się w przedziale od 28 mA do 1047 mA. Wariant E4, który dotyczy docelowego uziemienia obu końców linii dystrybucyjnej, najmniejsze (bliskie zeru) wartości prądów rażeniowych mogą pojawić się w środku odcinka zbliżenia, a wartości największe od 9 mA do 167 mA mogą pojawić się w pobliżu początku i końca odcinka zbliżenia (punkty A1 i A2 na rysunku 7.10). Pomimo, że w wariancie E4 prądy rażeniowe są mniejsze niż w wariantach E2 i E3, to jednak ich wartości mogą być na tyle duże, by stanowić poważne zagrożenie porażeniowe. Należy również podkreślić, że poziom tego zagrożenia ulegnie zwiększeniu w przypadku większego obciążenia linii 400 kV przesyłaną mocą. Jednak największe zagrożenie porażeniowe wystąpić może przy oddziaływaniu linii 400 kV dotkniętej zwarcie jednofazowym. Ilustruje to rysunek 7.12 na którym przedstawiono rozkłady wartości spodziewanych prądów rażeniowych w linii 110 kV, analogicznie jak na rysunku 7.11 dla stanu pracy normalnej.

Przy nieuziemionej linii 110 kV (wariant E2, rys. 7.12a) prądy rażeniowe są słabo zależne od odległości l_D , a ich wartości zawierają się w przedziale od 21 mA do 1956 mA i są nieznacznie większe od wartości przedstawionych na rysunku 7.11a. Przy jednostronnym uziemieniu linii (wariant E3, rys. 7.12b) zachowany jest kształt rozkładów jak na rysunku 7.11b, z tą jednak różnicą że wartości prądów rażeniowych są ponad 10-krotnie większe, i ich maksymalne wartości (dla $l_D = 30$ km) zawierają się w przedziale od 420 mA do 12157 mA. Przy obustronnym uziemieniu linii dystrybucyjnej (wariant E4, rys. 7.12c) kształty rozkładów są również zbliżone do rozkładów z rysunku 7.11c, a ich największe wartości także są ponad 10-krotnie większe i wynoszą od 132 mA do 1894 mA.

Przedstawione na rysunku 7.12 rozkłady dotyczyły zwarcia w linii 400 kV, które wystąpiło w miejscu $l_F = 0,0$ km (na szynach rozdzielni stacji B). Skala oddziaływania elektromagnetycznego zależna jest również od tego, w którym miejscu linii przesyłowej wystąpiło zwarcie. Ilustruje to rysunek 7.13, na którym przedstawiono wpływ miejsca zwarcia na rozkłady prądów rażeniowych w analizowanych wariantach E2÷E4.



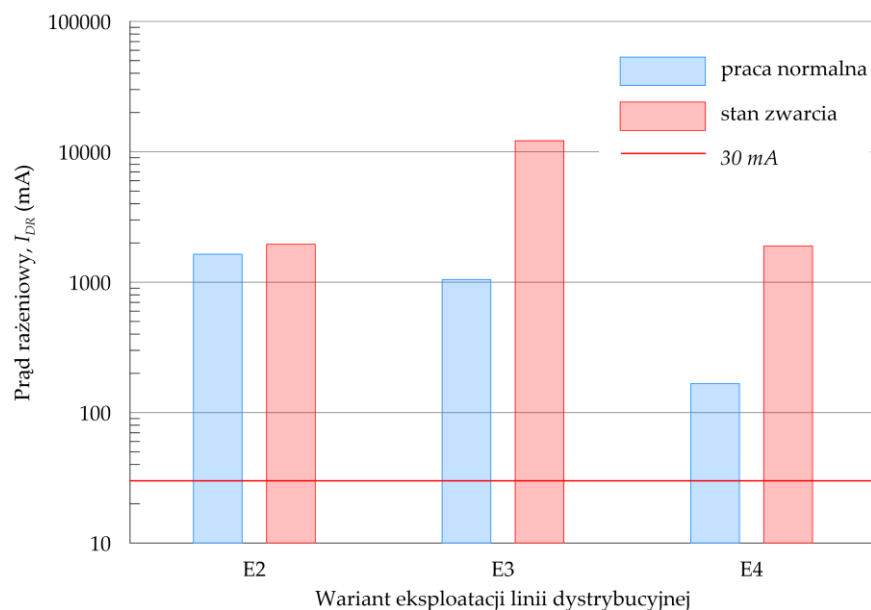
Rysunek 7.12. Rozkłady wartości spodziewanych prądów rażeniowych w linii dystrybucyjnej 110 kV w stanie zwarcia jednofazowego w stacji B 400 kV: a) wariant E2 (linia dystrybucyjna nieuziemiona), b) wariant E3 (jednostronne uzziemienie linii dystrybucyjnej), c) wariant E4 (obustronne uzziemienie linii dystrybucyjnej)



Rysunek 7.13. Rozkłady wartości spodziewanych prądów rażeniowych w linii dystrybucyjnej 110 kV w stanie zwarcia jednofazowego w różnych miejscach na linii 400 kV: a) wariant E2 (linia dystrybucyjna nieziemiona), b) wariant E3 (jednostronne uziemienie linii dystrybucyjnej), c) wariant E4 (obustronne uziemienie linii dystrybucyjnej)

W przypadku zwarć na odcinku od punktu B1 (początek linii w stacji B) do punktu A1 (początek odcinka zbliżenia) zachowany jest kształt rozkładów, a występujące różnice ilościowe wynikają z wartości przepływającego w odcinku zbliżenia jednokierunkowo prądu zwarciovego od stacji C do stacji B. W przypadku zwarć występujących w odcinku zbliżenia A1–A2, następuje jakościowa zmiana kształtów rozkładu wynikająca z tego, że oddziaływanie elektromagnetyczne linii przesyłowej wywołane jest przepływającymi w przeciwnych kierunkach prądami zwarciovymi od stacji B i stacji C. Nie zmienia to jednak tego, że wartości prądów rażeniowych są porównywalne z wartościami prądów występującymi poza odcinkiem zbliżenia.

Przeprowadzone badania wykazały, że również podczas eksploatacji linii dystrybucyjnych w pasie technologicznym linii przesyłowej należy liczyć się z wysokim poziomem zagrożenia porażeniowego. Na rysunku 7.14 przedstawiono największe spodziewane wartości prądów rażeniowych I_{DR} , jakie mogą wystąpić podczas normalnej pracy oraz zwarć jednofazowych w linii 400 kV. Należy zauważyć, że wartości prądów I_{DR} są wielokrotnie większe od wartości 30 mA, uznawanej za próg wystąpienia fibrylacji komór serca.



Rysunek 7.14. Największe wartości prądów rażeniowych I_{DR} w wariantach E2, E3, E4 eksploatacji linii dystrybucyjnej

Z tego powodu eksploatacja linii dystrybucyjnych wybudowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych dopuszczalna jest tylko w przypadku czasowego wyłączenia linii przesyłowej z eksploatacji albo przy zastosowaniu technologii prac pod napięciem.

8. Podsumowanie

Zagadnienie będące przedmiotem rozprawy należy do aktualnych problemów energetyki krajowej i światowej, wynikających z zachodzących w niej procesów transformacji w kierunku gospodarki niskoemisyjnej. Wyzwania jakie stawiają one przed sektorem elektroenergetyki wymusza konieczność poszukiwania alternatywnych, a zarazem innowacyjnych rozwiązań obniżenia kosztów i przyspieszenia realizacji tej transformacji. Do takich rozwiązań należy proponowana w rozprawie intensyfikacja rozbudowy elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych przez wykorzystanie do tego celu pasów technologicznych elektroenergetycznych linii przesyłowych.

Przeprowadzone badania wykazały, że energetyce krajowej możliwa jest lokalizacja linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych linii 400 kV, ale tylko w przypadku linii o napięciu znamionowym 110 kV. W przypadku linii średnich napięć 15 kV lokalizacja taka nie jest możliwa ze względu na niedopuszczalną degradację parametrów określających jakość napięcia zasilającego, w postaci nadmiernych odchyłeń wartości napięć fazowych, będących skutkiem oddziaływania elektromagnetycznego linii przesyłowych.

Przeprowadzone badania i analizy wykazały również, że w zależności od odległości między osiami linii, najdłuższe odcinki zbliżeń linii 110 kV w pasach technologicznych linii 400 kV nie powinny przekraczać długości 5÷10 km. Dla dłuższych odcinków zbliżeń należy liczyć się, podobnie jak w przypadku linii 15 kV, z nadmiernym odchyleniem wartości napięć fazowych.

Opracowane modele matematyczne oddziaływań elektromagnetycznych pozwoliły na określenie napięć indukowanych i wywołanych nimi prądów, będących skutkami oddziaływań elektromagnetycznych linii przesyłowych, zarówno w stanie pracy normalnej, jak i podczas przepływu w niej prądów wywołanych zakłóceniami zwarciovymi. Modele te zastosowano do określenia warunków budowy i przyszłej eksploatacji linii dystrybucyjnych usytuowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych w aspekcie zagrożenia porażeniowego.

Otrzymane wyniki badań i analiz warunków budowy linii dystrybucyjnych wykazują, że wykonywane prace budowlane i montażowe odbywać się mogą w warunkach dużego zagrożenia porażeniowego, szczególnie podczas rozciągania przewodów i montażu osprzętu łańcuchów izolatorowych. Przeprowadzone badania wykazały, że spodziewane wówczas wartości prądów rażeniowych mogą wielokrotnie przekraczać wartości stanowiące próg wystąpienia fibrylacji komór serca. Z tych powodów wszelkie prace budowlane na liniach dystrybucyjnych zbliżonych do linii przesyłowych, powinny być traktowane jako prace pod napięciem i powinny być wykonywane z wykorzystaniem odpowiednich technologii. Alternatywą mogłoby być czasowe wyłączenie linii przesyłowej, jednak ze względów na niezawodność systemu przesyłowego uzyskanie na to zgody jego operatora jest praktycznie niemożliwe.

Podobne wnioski wypływają z badań i analiz dotyczących eksploatacji linii dystrybucyjnych wybudowanych w pasach technologicznych linii przesyłowych. Również w tej sytuacji należy liczyć się z dużym zagrożeniem porażeniowym podczas wykonywania

prac eksploatacyjnych lub remontowych, co powoduje konieczność stosowania technologii prac pod napięciem nawet na odłączonej od zasilania i uziemionej obustronnie linii dystrybucyjnej.

Dokonując całościowego podsumowania przedstawionych w niniejszej rozprawie wyników badań, można stwierdzić, że postawiona w rozdziale pierwszym teza została udowodniona.

Rozprawa stanowi oryginalny wkład w problematykę projektowania i eksploatacji zbliżonych do siebie napowietrznych linii elektroenergetycznych. Osiągnięte rezultaty słuszne są nie tylko dla polskiej energetyki, ale również mogą być aplikowane w innych krajach. Stanowią one także punkt wyjścia do dalszych badań, dotyczących możliwości lokalizacji również kablowych linii dystrybucyjnych w pasach technologicznych napowietrznych linii przesyłowych.

Bibliografia

- [1] AIHA Nonionizing Radiation Committee: *Extremely Low Frequency (ELF) Fields White Paper*, Spain, 2007
- [2] Abou-Seada M.S., Nasser E.: *Digital Computer Calculation of the Electric Potential and Field of a Rod Gap*, Proc. IEEE, 56(5), 1968, 813–820
- [3] Abou-Seada M.S., Nasser E.: *Digital Computer Calculation of the Potential and its Gradient of a Twin Cylindrical Conductor*, IEEE Trans., 88(12), 1969, 1802–1814
- [4] Ancas L., Micu D.D., Topa V.: *Right of Way - Buried Metallic Pipelines HV-Power Lines*. 46th International Universities Power Engineering Conference, Germany, 2011
- [5] Bartoszewski M., Filipowicz S.F.: *Wybrane zagadnienia ochrony katodowej rurociągów przed korozją*, Prace Instytutu Elektrotechniki, Nr 232, 2007, str. 97–112
- [6] Biuro Stowarzyszenia STELEN: *Album linii napowietrznych średniego napięcia 15÷20 kV z przewodami gołymi na żerdziach wirowanych. Układ trójkątny LSNS 70 (50) Tom 1 Przewody o przekrojach 70 i 50 mm²*
- [7] Biuro Studiów i Projektów Energetycznych Energoprojekt Kraków SA: *Katalog słupów i fundamentów linii 400 i 750 kV*
- [8] Biuro Studiów i Projektów Energetycznych Energoprojekt Kraków SA: *Karta informacyjna. Elementy dwutorowej linii napowietrznej 400 kV z przewodami wiązkowymi 3xAFL–8 350mm² na słupach E33*
- [9] Biuro Studiów i Projektów Energetycznych Energoprojekt Kraków SA: *Karty informacyjne słupów dla jednotorowych linii 110kV. Seria EJ24*
- [10] Bogajewski W.: *Zagrożenie porażeniowe w pobliżu urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia*, Politechnika Poznańska Rozprawy nr 141, Poznań, 1982
- [11] Brandao Faria J. A.: *Electric and Magnetic Coupling Between Neighboring Multiconductor Transmission Lines Considering Short Interaction Lengths*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 1, 475–482, Jan. 2013
- [12] Carson J. R.: *Wave Propagation over Parallel Wires: The Proximity effect*, Philosophical Magazine, volume IXLI, 1921, pp. 607–633
- [13] Carson J. R.: *Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return*, Bell System Technical Journal, 5: 539, 1926
- [14] CCITT. *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines*, International Telecommunication Union, Geneva, 1963
- [15] Christoforidis G. C., Dokopoulos P. S., Psannis K. E.: *Induced voltages and currents on gas pipelines with imperfect coatings due to faults in a nearby*

- transmission line*, 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502), Porto, Portugal, 2001, 6 vol.4
- [16] Chrysostomou D., Dimitriou A., Kokkinos N. D., Charalambous C. A.: *Short-Term Electromagnetic Interference on a Buried Gas Pipeline Caused by Critical Fault Events of a Wind Park: A Realistic Case Study*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 2, March–April 2020, 1162–1170
- [17] Cotton I., Kopsidas K., Zhang Y.: *Comparison of Transient and Power Frequency-Induced Voltages on a Pipeline Parallel to an Overhead Transmission Line*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007, 1706–1714
- [18] Council of the European Union. Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). Off. J. Eur. Communities 1999, 42, 59–70
- [19] Czapp S.: *Ochrona przeciwporażeniowa w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokiego napięcia – aktualny stan normalizacji*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 35, ISSN 1425–5766, 2013, s. 21–26
- [20] Czarnywojtek P., Machczyński W.: *Symulacja oddziaływania konduktancyjnego na obwody ziemnowrotne*, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, No. 85, 2016, pp. 41-51
- [21] Czumbil L., Micu D. D., Munteanu C., Stet D.: *Optimization of pipeline-overhead line right-of-way using genetic algorithms*, 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, 2015, 531–534
- [22] Dawalibi F. P., Southey R. D.: *Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. II. Parametric analysis*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 1, Jan. 1990, 415–421
- [23] Danulescu R., Goiceanu C., Danulescu E., Reaboiu K.: *Possible neurological and cardiovascular effects in workers exposed to extremely low frequency electromagnetic fields*, 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Romania, 2012, pp. 641-644,
- [24] Doyle, J.R.; LaForest, J.J.; Lauber, T.S.: *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above 2nd ed.*, Electric Power Research Institute Inc.: Palo Alto, CA, USA, 1982
- [25] Dudek B.: *Prace pod napięciem w elektroenergetyce – bezwzględniowe techniki utrzymania sieci przesyłowej*, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Zeszyt 36, 2011
- [26] ENEA Operator Sp. z o. o.: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne i kablowe 110 kV. Standard w sieci dystrybucyjnej ENEA Operator sp. z o.o.*, Wersja 10.2020

- [27] ENERGA Operator: *Standard techniczny projektowania i budowy linii napowietrznych i kablowych 110 kV*, wydanie drugie, 2022
- [28] Eltrim Kable: *Przewody do linii napowietrznych*
- [29] Gajda W., Piłatowicz A., Puchalski T.: *Wytyczne zabezpieczenia linii i urządzeń telekomunikacyjnych przed szkodliwym działaniem linii i urządzeń elektroenergetycznych*, Ministerstwo Łączności, Warszawa, 1966.
- [30] Golbach L., Portelli L., Savelkoul H., Terwel S., Kuster N., de Vries R., Lidy Verburg-van Kemenade B.M.: *Calcium homeostasis and low-frequency magnetic and electric field exposure: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies*, *Environment International*, 92–93 (2016), pp. 695–706
- [31] Hamedani B.G., Goliaei B., Shariatpanahi S.P., Nezamtaheri M.: *An overview of the biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields combined with ionizing radiation*, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 172 (2022), pp. 50–59
- [32] Harries J. R., Randall J. L.: *Harmonic resonance on parallel high voltage transmission lines*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, Jan. 1997, 477–482
- [33] Harun Z. A., Osman M., Ariffin A. M., Zainal Abidin Ab Kadir M., *Effect of AC Interference on HV Underground Cables Buried Within Transmission Lines Right of Way*, 2021 IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Johor Bahru, Malaysia, 2021, pp. 73-76
- [34] He Y., Wei B., Jiang A., Wang L., Fu Z.: *Study on assessment and countermeasures of induced voltage on distribution lines under EHV/UHV transmission lines*, 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, 2014, 1582–1587
- [35] Horton R., Wallace K.: *Induced Voltage and Current in Parallel Transmission Lines: Causes and Concerns*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, 2339–2346, Oct. 2008
- [36] I. C. Report, *A Guide for the Protection of Wire Line Communications Facilities Serving Electric Power Stations*, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-85, no. 10, pp. 1065-1083, Oct. 1966
- [37] IEC 60479–1:2018: *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*
- [38] IEEE Power Engineering Society: *IEEE Guide to the Installation of Overhead Transmission Line Conductors*, IEEE Std 524™–2003
- [39] International Commission On Non–Ionizing Radiation Protection: *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time–varying electric, magnetic and electromagnetic field (up to 300 GHz)*, *Health Phys.* 1998, 74, 494–522.
- [40] International Commission On Non–Ionizing Radiation Protection: *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time–varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)*, *Health Phys.* 2010, 99, 818–836

- [41] Ismail H. M.: *Effect of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, Oct. 2007, 2466–2472
- [42] Jabłoński W.: *Napięciowe kryteria skuteczności ochrony przeciwporażeniowej przy uszkodzeniu w liniach oraz instalacjach elektrycznych niskiego i wysokiego napięcia*, Ochrona przeciwporażeniowa, nr 169
- [43] Jellinek S.: *Elektropathologie: Die Erkrankungen durch Blitzschlag und elektrischen Starkstrom in klinischer und Forensischer Darstellung*, Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart, 1903
- [44] Jellinek S.: *Der Elektrische Unfall: Skizziert für Ingenieur und Arzt*, Springer, Deuticke, Leipzig/Wien, 1927
- [45] Judáková Z., Janoušek L.: *Low Frequency Electromagnetic Field in Microenvironments and Their Possible Health Impacts*, 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv-Slavske, Ukraine, 2019, pp. 1-4
- [46] Kacejko P., Machowski J.: *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2017
- [47] Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U.: *Overhead Power Lines. Planning, Design, Construction*. Springer, Berlin, 2003
- [48] **Kochanowicz K.**, Nowak W., Szpyra, W., Tarko, R., Wszolek, T.: *Analiza konstrukcyjnych możliwości ograniczania szerokości strefy oddziaływania linii przesyłowych*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, ISSN 2353–1290, nr 62, 2019, s. 151–154.
- [49] **Kochanowicz K.**, Nowak W., Tarko R.: *Ograniczanie zasięgu oddziaływania pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez elektroenergetyczne linie przesyłowe*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033–2097, R. 98 NR 10/2022
- [50] Konorski B.: *Pole elektryczne przesyłowej linii trójfazowej*, PWN, Warszawa, 1970
- [51] Krakowski M.: *Obwody ziemnopowrotne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979
- [52] Larsen E. V., Walling R. A., Bridenbaugh C. J.: *Parallel AC/DC transmission lines steady-state induction issues*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 667-674, Jan. 1989
- [53] Lejdy B.: *Fibrylacja komórek serca jako skutek przepływu przemiennego prądu elektrycznego w organizmie człowieka*, Wiadomości Elektrotechniczne, R.76, 2008
- [54] Lewicka M., Dziejczak-Buczyńska M., Buczyński A.: *Wpływ promieniowania elektromagnetycznego na organizmy żywe*, Polskie

- Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, Polish Hyperbaric Research 2008/4(25)
- [55] Loeb L.B. et al.: *The Choice of Suitable Gap Forms for the Study of Corona Breakdown and the Field Along the Axis of a Hemispherically Capped Cylindrical Point-to-Plane Gap*. Review of Scientific Instruments, 21, 42–47, 1950
- [56] Łopatkiewicz R., Nadolny Z., Rakowska A.: *Pole elektryczne w strefie przebywania montera wykonującego prace pod napięciem na linii 400 kV*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033–2097, R. 86 Nr 11b, 2010
- [57] Machczyński W.: *Oddziaływanie elektromagnetyczne na obwody ziemnopowrotne – rurociągi podziemne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998
- [58] Machczyński W., Sokólski W., Rozwadowski J.: *Oddziaływanie indukcyjne linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi – Część II*, Wydawnictwo SIGMA–NOT, Ochrona przed Korozją, 8/2006
- [59] Mangunkusumo K. G. H., Kusuma A. A., Munir B. S.: *A Case Study of Mutual Impedance Effect in Parallel Transmission Lines Under Maintenance Condition* 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, Indonesia, 2018, pp. 192-195.
- [60] Markiewicz H.: *Bezpieczeństwo w elektroenergetyce*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa, 2017
- [61] Michniewski R.: *Wykonywanie prac w technologii PPN na liniach przesyłowych 400 kV, 220 kV i Rozdzielczych 110 kV w Energa-Operator S.A. Oddział w Toruniu*, Acta Energetica, Nr 1, 2009
- [62] Nadolny Z. *Oddziaływanie pola elektrycznego i magnetycznego na organizmy żywe*, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu, 2015, t. 65, nr 8
- [63] National Institute for Public Health and the Environment: *Comparison of International Policies on Electromagnetic Fields (Power Frequency and Radiofrequency Fields)*, National Institute for Public Health and the Environment, RIVM: Bilthoven, The Netherlands, 2017
- [64] Nowak W.: *Analityczny model oddziaływania linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia na sieć trakcji kolejowej*, Rozprawa Doktorska, Kraków, 1994
- [65] Nowak W., Tarko R.: *Analysis of the Feasibility of Locating 110 kV Line in 400 kV Right-of-way in Terms of Electromagnetic Interaction*, Acta Energetica, 1/14, 2013
- [66] Nowak W., Tarko R., Szpyra W.: *Analiza możliwości redukcji napięć indukowanych w wielotorowych liniach napowietrznych*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 42, 2015

- [67] Nowak W., Tarko R.: *Analysis of Electrical Shock Hazard Caused by Electromagnetic Coupling Effects in Parallel Overhead High Voltage Power Lines*, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 12, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1876
- [68] Nowicki T., Nadolny Z., Rakowska A.: *Analiza pola elektrycznego i magnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości w aspekcie oddziaływania na monterów w czasie wykonywania prac pod napięciem metodą na wysokim potencjale na linii 220 kV*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1k, 2004
- [69] Olesz M.: *Lokalizacja obiektów budowlanych w sąsiedztwie linii 110 kV*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej; ISSN 1425-5766, Nr 35, s.27–30, 2013
- [70] Olesz M.: *Ograniczanie natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii 110 kV*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej; ISSN 2353–1290, Nr 56, s.63–66, 2017
- [71] Pesonen A.J.: *Fernmeldekable in der Nahe der Hohspannungsmasten*, Elektrizitätswirtschaft, 1964, Nr 20.
- [72] Pesonen A.J.: *Protection of telecommunication systems of stations against potential rise*, 1964, Nr 3.
- [73] Pesonen A.J. i inni: *Earth potential rise and telecommunication lines*, CIGRE , 1970.
- [74] PGE Dystrybucja S.A.: *Tom 1. Linie napowietrzne 110 kV*. 2021
- [75] Piłatowicz A.: *Oddziaływanie obwodów elektroenergetycznych na obwody telekomunikacyjne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975
- [76] Piłatowicz. A: *Badanie oddziaływań linii elektroenergetycznych na linie telekomunikacyjne*, Energetyka, 1965, nr 12, Biuletyn Instytutu Energetyki nr 11/12
- [77] PN–E–05100–1:1998: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowania i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi*.
- [78] PN–EN 50341–1:2013–03: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne*
- [79] PN–EN 50341–2–22:2022–06: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 2–22: Krajowe Warunki Normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN 50341–1:2012)*.
- [80] PN–EN 50341–1:2005: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne*.
- [81] PN–EN 50341–3–22:2010: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych*.

- [82] Pollaczek F.: *Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung*, Elektrische Nachrichten Technik, 1926, Nr 3
- [83] PSE S.A.: *Wymagania dla szerokości standardowych pasów technologicznych napowietrznych linii 220 kV i 400 kV*, Konstancin–Jeziorna, czerwiec 2022 r.
- [84] PSE S.A.: *Linia napowietrzna 400 kV*, Konstancin–Jeziorna, grudzień 2022 r.
- [85] Rachedi A. B., Babouri A., Lemzadmi A., Nemamcha M., Berrouk F.: *Evaluation of electromagnetic field produced by multi-parallel high voltage lines*, 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kiev, 2014, 36–39
- [86] Rakowska A.: *Akceptacja społeczna budowy linii elektroenergetycznych*, Energia elektryczna, 2012
- [87] Rakowska A.: *Minimalizacja oddziaływania obiektów energetycznych na środowisko*, Elektro Info, nr 5, 2006, s. 24–32
- [88] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 28 sierpnia 2019 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych (tekst jednolity)*. Dz.U. 2021 poz. 1210
- [89] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych*. Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401
- [90] *Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego*. Dz.U. 2023 poz. 819
- [91] *Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 17 lutego 2020 r. w sprawie sposobów sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku*. Dz.U. 2022 poz. 2630
- [92] *Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku*, Dz.U. 2019 poz. 2448
- [93] Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F. H.: *Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines*, 2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, 2010, 1–6,
- [94] Serwiński R., Matus H.: *Problemy z oddziaływaniem linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi w dobrej izolacji*, XIV Krajowa Konferencja Pomiarów Korozyjnych w Ochronie Elektrochemicznej, Polska, 2016
- [95] Shen M., Shah S., Eftekhari R.: *Study of electromagnetic interference on distribution conductors from parallel transmission line and practical*

- mitigation solutions*, 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, 2014, 1–9
- [96] Smith J. J.: *Telephone Interference from A-C. Generators Feeding Directly on Line with Neutral Grounded*, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 49, no. 2, pp. 798-805, April 1930
- [97] Sokólski W.: *Prądy błędzące – prądy niechciane*, Magazyn Ex, Bezpieczeństwo w Strefach Zagrożonych Wybuchem, Nr. 3/2007, 2007, str. 61–64
- [98] Sokólski W.: *Korozja rurociągów stalowych pod wpływem oddziaływań elektrycznych*, XIII Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, Polska, 2014
- [99] Steinbigler H.: *Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren Rotation – symmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft*, Dissertation TU Munich, 1969
- [100] Stochaj P.: *Prądy błędzące jako źródło zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych*, Nafta–Gaz, Nr. 9/2013, 2013, str. 683–689
- [101] Sun Z., Lan L., Zhu Ch.: *The Lightning Shielding Effect to ± 1100 kV UHVDC Line Provided by a Parallel 500kV AC Line in a Joint Right-of-Way*, 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, 2018, pp. 1-6
- [102] Szymański G.: *Symulacja cyfrowa niebezpiecznych oddziaływań stacji i linii wysokich napięć*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998
- [103] Tang J., Zeng R., Ma H., He J., Zhao J., Li X., Wang Q.: *Analysis of Electromagnetic Interference on DC Line From Parallel AC Line in Close Proximity*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, 2401–2408, Oct. 2007
- [104] Tarko R., Szpyra W., Nowak W.: *Analysis of Possibilities to Reduce the Voltages Induced in Multi-circuit and Multi-voltage Overhead Lines*, Acta Energetica, No. 3/24, 2015
- [105] Tarko R.: *Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy warunków eksploatacyjnych wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych*, Rozprawa Doktorska, Kraków, 2007
- [106] Tarko, R., **Kochanowicz, K.**, Nowak, W.; Szpyra, W., Wszolek, T.: *Reduction of the Environmental Impact of Electric Field Generated by High Voltage Power Transmission Lines*, Energies 2021, 14, 6388.
- [107] TAURON Dystrybucja S.A.: *Standard techniczny nr 29/2018 dla warunków budowy elektroenergetycznych linii napowietrznych WN wraz z przewodami i osprzętem na terenie TAURON Dystrybucja S.A.*
- [108] Taylor J. B.: *Telegraph and telephone systems as affected by alternating-current lines*, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 28, no. 10, pp. 1287-1332, Oct. 1909

- [109] Towarzystwo projektowo – wykonawcze budownictwa elektroenergetycznego: *Przewody linii wysokiego napięcia budowa i remont linii. Instrukcja montażu*, L105/2000, Warszawa, 2000
- [110] *Ustawa Prawo Budowlane (tekst jednolity)*. Dz.U. 2020 poz. 1333
- [111] *Ustawa Prawo ochrony środowiska*. Dz.U. 2022 poz. 2556
- [112] Włodek R., Bajorek J.: *Obliczanie pól elektrycznych w układach elektroizolacyjnych wysokiego napięcia. Metody numeryczne*, Wydawnictwo AGH, Kraków, 1988
- [113] World Health Organization: *Extremely Low Frequency fields*, Environmental Health Criteria 238
- [114] Żmudzki L.: *Wpływ pól elektrycznych i magnetycznych na obwody wtórne w stacjach najwyższych napięć*, Rozprawa Doktorska, Kraków, 1984