



*Marek Wancerz*

## Wykorzystanie baz danych do modelowania i ewidencji linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia



Lublin 2022

Wykorzystanie baz danych do modelowania  
i ewidencji linii elektroenergetycznych  
wysokiego napięcia

# Podręczniki – Politechnika Lubelska



POLITECHNIKA  
LUBELSKA  
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI  
I INFORMATYKI

Marek Wancerz

# Wykorzystanie baz danych do modelowania i ewidencji linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia



Lublin 2022

Recenzenci:

dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. uczelni, Politechnika Śląska

dr hab. inż. Adam Smolarczyk, Politechnika Warszawska

„Konkurs na wydanie podręcznika akademickiego lub skryptu” edycja I

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2022

ISBN: 978-83-7947-541-4

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

[www.wpl.pollub.pl](http://www.wpl.pollub.pl)

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: Drukarnia Akapit Sp. z o. o.

[www.drukarniaakapit.pl](http://www.drukarniaakapit.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

## Spis treści

1. Wstęp .....	11
2. Modelowanie napowietrznych linii elektroenergetycznych.....	12
2.1. Przewody .....	12
2.2. Słupy .....	14
2.3. Konwencja oznaczeń słupów .....	19
2.4. Fizyczna interpretacja parametrów linii.....	21
2.4.1. Rezystancja linii.....	21
2.4.2. Reaktancja linii .....	23
2.4.3. Konduktancja poprzeczna linii.....	24
2.4.4. Susceptancja poprzeczna linii .....	25
2.4.5. Pojęcie obwodu ziemnopowrotnego .....	26
3. Wzory do obliczania parametrów linii .....	28
3.1. Obliczanie rezystancji linii .....	28
3.2. Obliczanie reaktancji linii .....	30
3.3. Obliczanie konduktancji linii .....	32
3.4. Obliczanie susceptancji pojemnościowej linii .....	33
3.5. Obliczanie składowej zerowej impedancji linii .....	33
3.6. Przeplatanie przewodów fazowych linii .....	35
3.7. Obciążalność linii 110 kV.....	37
3.8. Charakterystyczne wymiary konstrukcji wsporczych.....	41
4. Wstęp do teorii baz danych .....	47
5. Przykład wykorzystania bazy danych do ewidencji parametrów linii elektroenergetycznych.....	49
5.1. Projekt bazy danych .....	49
5.2. Opis aplikacji bazodanowej .....	51
6. Przykład wykorzystania narzędzi komercyjnych do modelowania linii elektroenergetycznych.....	56
7. Podsumowanie .....	63
Literatura.....	65



## Wykorzystanie baz danych do modelowania i ewidencji linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia

### Streszczenie

Poprawne określenie parametrów sieci jest bardzo istotne w aspekcie analiz rozptyłów mocy, obliczeń zwarciovych, badań stabilności lokalnej i globalnej oraz nastaw zabezpieczeń linii elektroenergetycznych. Linia elektroenergetyczna prądu przemiennego charakteryzowana jest przez rezystancję, reaktancję, konduktancję i susceptancję pojemnościową. Wszystkie te wielkości występują w każdym elementarnym odcinku rozpatrywanej linii.

Aby zbudować schemat zastępczy linii, trzeba je połączyć tak jak one występują w rzeczywistości, czyli należałoby przedstawić schemat linii zestawiony z nieskończonej liczby elementarnych odcinków. Schemat ten wiernie odwzorowuje linię, lecz operowanie nim w obliczeniach praktycznych jest uciążliwe i prowadzi do skomplikowanych zależności. W praktyce dokładność obliczeń jest uzależniona od wiarygodnych danych wejściowych.

W skrypcie zaprezentowano podstawową teorię wyznaczania parametrów schematu zastępczego linii oraz bazę danych i aplikację komputerową do obliczania parametrów elektrycznych linii elektroenergetycznych na podstawie min. typów przewodów oraz sylwetek słupów. Baza danych do ewidencji parametrów linii pełni równocześnie rolę katalogu sylwetek słupów i przewodów.

**Słowa kluczowe:** przewody robocze i odgromowe, konstrukcje wsporcze, parametry podłużne i poprzeczne linii, schemat zastępczy linii, obwód ziemnopowrotny, obciążalność linii, bazy danych.



## Using databases for modelling and records high-voltage power lines

### Summary

Correct determination of network parameters is very important in terms of power flow analysis, short-circuit calculations, local and global stability tests, and power line protection settings. An alternating current power line is characterized by resistance, reactance, conductance and capacitive susceptance. All these quantities occur in elementary section of the considered line.

In order to build an equivalent line diagram, these parameters must be connected as they actually appear. The line would have to be represented by a line diagram composed of an infinite number of elementary segments. This scheme represents a line, but operating it in practical calculations is difficult and leads to complicated relationships. In practice, the accuracy of the calculations depends on the correct input data.

The script presents the basic theory of determining the parameters of the line equivalent scheme. A database and a computer application for calculating the electrical parameters of power lines are also presented. The database for recording line parameters is a catalog of transmission tower and wires.

**Keywords:** line circuit conductors and earth conductors, transmission tower types, line parameters, equivalent diagram of the line, earth return circuit, line load capacity, databases.

## Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

$\alpha$  – wskaźnik niesymetrii

$h$  – zwis przewodu

$B$  – macierz susceptancji

$C$  – macierz pojemności

EAZ – Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieczeniowa

KSE – Krajowy System Elektroenergetyczny

NN – najwyższe napięcie (220 kV, 400 kV)

SEE – System elektroenergetyczny

nN – niskie napięcie

SN – średnie napięcie (najczęściej 6 kV i 15 kV)

SQL – język programowania baz danych (ang. *Structured Query Language*)

$U_0$  – napięcie kolejności zerowej

$U_1$  – napięcie kolejności zgodnej

$U_2$  – napięcie kolejności przeciwnej

WN – wysokie napięcie (110 kV)

$x_{pu} - x$  w jednostkach względnych

$\underline{Y}$  – element macierzy admitancyjnej

$\underline{Y}$  – macierz admitancyjna

$\underline{Z}$  – element macierzy impedancyjnej

$\underline{Z}$  – macierz impedancyjna

PF – Power Factor



# 1. Wstęp

Energetyka jest dziedziną nauki zajmującą się wytwarzaniem, przetwarzaniem i dystrybucją energii elektrycznej. Szybko rosnąca liczba odbiorców wymuszała budowę nowych elektrowni, zlokalizowanych z reguły w miejscach wydobywania surowców kopalnych. To z kolei wymuszało konieczność przesyłu energii elektrycznej na duże odległości, co powodowało wzrost strat przesyłowych. Przesył i dystrybucja energii elektrycznej na duże odległości musi być realizowana przez linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia (WN). Stawia to przed współczesnymi projektantami wyzwania zaprojektowania sieci tak, aby zapewnić jak najniższe straty w czasie przesyłu energii elektrycznej przy zapewnieniu ciągłości jej dostaw, szczególnie w odniesieniu do linii napowietrznych. Dlatego, aby ułatwić prace projektowe, stworzono szereg norm standaryzujących proces konstruowania sieci energetycznych. We współczesnej energetyce istotnym zadaniem jest ograniczanie awaryjności sieci.

Awaryjność wiąże się z przerwami w przesyłach energii elektrycznej i zmniejszeniem bezpieczeństwa energetycznego przedsiębiorstw i odbiorców indywidualnych. Aby podnosić niezawodność systemu energetycznego (SEE) przeprowadza się wymagane prace eksploatacyjne, w tym: oględziny i remonty oraz wykorzystuje się nowoczesne technologie diagnostyczne [35].

W skrypcie przedstawiono podstawy budowy linii napowietrznych WN. Omówiono budowę przewodów oraz konstrukcji wsporczych oraz przedstawiono sposób modelowania tych linii dla potrzeb obliczeń rozpliwowych oraz zwarciovych. Wprowadzono pojęcie obwodu ziemnopowrotnego, które jest podstawowym i najczęściej stosowanym układem sieci elektrycznych wszystkich napięć od 110 kV w górę. Przedstawiony został także proces budowy matematycznego modelu linii WN.

W elektrotechnice, a szczególnie w elektroenergetyce stosuje się pojęcie schematu zastępczego elementu, czyli fragmentu obwodu elektrycznego wykazującego w rozważanych zjawiskach odpowiednie cechy. W każdym modelu podkreśla się cechy elementu dominujące w rozpatrywanym zjawisku, pomija natomiast cechy nie mające istotnego wpływu na wyniki obliczeń. Ta tematyka została również poruszona w skrypcie.

W celu wsparcia projektantów w kontekście budowy linii dystrybucyjnych przesyłowych wykorzystano bazę danych do ewidencji, katalogowania oraz obliczeń jej parametrów. Porównano również sposoby modelowania linii WN za pomocą baz danych oraz dedykowanych narzędzi symulacyjnych.

Wykorzystanie baz danych do obliczeń parametrów linii oraz ewidencji sylwetek słupów i przewodów pozwoli służbom energetycznym odpowiedzialnym za analizy systemowe na szybki dostęp do wiarygodnych danych.

## 2. Modelowanie napowietrznych linii elektroenergetycznych

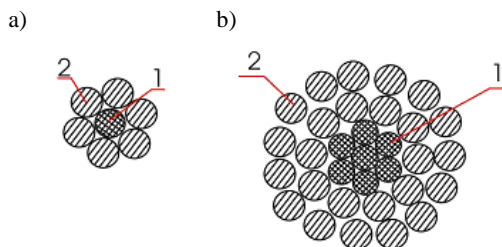
Do elementów składowych linii elektroenergetycznej zaliczamy między innymi: przewody, izolatory, konstrukcje wsporcze i osprzęt. Wszystkie powyższe części składowe wykorzystywane są do tworzenia ciągów przesyłowych.

Liniami napowietrznymi nazywamy linie umieszczone na otwartej przestrzeni wykonane przewodami gołymi lub coraz częściej przewodami izolowanymi, umieszczonymi na konstrukcjach wsporczych, umożliwiając przesył energii elektrycznej. Wyróżniamy (pod względem sposobu modelowania) następujące rodzaje linii [13, 21]:

- linie I rodzaju – linie nN;
- linie II rodzaju – linie napowietrzne SN do 30 kV włącznie oraz linie kablowe;
- linie III rodzaju – linie napowietrzne o napięciu znamionowym powyżej 30 kV oraz kablowe od 30 kV w górę (pod warunkiem, że długość linii nie przekracza 400 km).

### 2.1. Przewody

Przewody linii energetycznych budowane są z miedzi lub z aluminium. Dla linii napowietrznych WN stosuje się przewody stalowo–aluminiowe, wykonane jako linki. Ostatnie rozwiązania to przewody wykonane ze specjalnego typu aluminium lub przewody z rdzeniem wykonanym z włókien węglowych [17]. Jednoczesne zerwanie wszystkich drutów linki jest mało prawdopodobne, podczas gdy przewód jednodrutowy łatwo pęka, szczególnie w miejscach lekko uszkodzonych. Ponadto przewody jednodrutowe o większych przekrojach są sztywne i trudniejsze w montażu niż linki. Linki aluminiowe są skręcane z pewnej liczby drutów (7, 19, 37, 61) zależnej od przekroju. Linki stalowo–aluminiowe mają rdzeń z drutu lub linki stalowej, na którym umieszczono druty aluminiowe (rys. 2.1.) [29, 30, 31].



Rys. 2.1. Linki stalowo–alumi niowe: a) linka alumi niowa z drutem stalowym, b) linka alumi niowa z linką stalową; 1–drut stalowy, 2–drut alumi niowy [13]

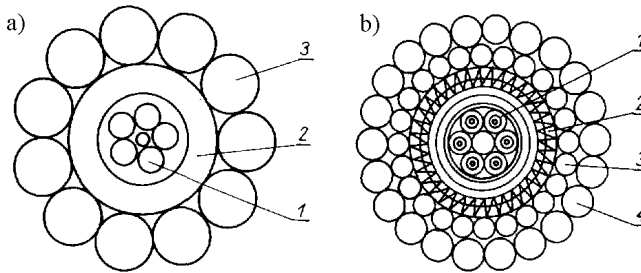
Zarówno miedź, jak i aluminium są stosowane w alotropowych odmianach twardych. Dzięki temu dla linek miedzianych można dopuszczać jako normalne, naprężenia 186 MPa, dla linek alumi niowych 79 MPa. Jednak dopuszczalne naprężenie aluminium jest zbyt małe, aby można było budować linie o dużych rozpiętościach przęsła, co jest konieczne w sieciach WN i NN. Już wiele lat temu nasunęła się myśl, aby wykorzystać we wspólnej konstrukcji stal jako materiał o dużej wytrzymałości mechanicznej i aluminium jako materiał o dużej przewodności, czyli przewodności elektrycznej [33]. Tak powstał przewód stalowo–alumi niowy. Jego wytrzymałość zależy od stosunku przekroju stali do aluminium i wynosi od 98 do 118 MPa. Wytrzymałość aluminium przy współpracy ze stalą można przyjmować na poziomie 89 MPa. Oprócz wymienionych przewodów, w pewnych okresach rozwoju elektroenergetyki, stosowano także przewody z innych materiałów (stalowe, z brązu, aldreju) i o innych konstrukcjach np. rurowe. W przewodach stalowo–alumi niowych stosunek stali do aluminium wynosi 1:6; 1:8; 1:1,7. Dzielnik stosunku Fe:Al stawia się po symbolu przewodu. Przykłady oznaczeń przewodów przedstawiono poniżej:

- L 50 – przewód miedziany, wielodrutowy (linka) o przekroju 50 mm<sup>2</sup>;
- AL 120 – przewód alumi niowy, wielodrutowy (linka) o przekroju 120 mm<sup>2</sup>;
- AFL 4–240 – przewód stalowo–alumi niowy, wielodrutowy o stosunku Al do Fe 4:1 i przekroju 240 mm<sup>2</sup>.

Typowe przekroje przewodów fazowych:

- AFL 6–35 mm<sup>2</sup> – do odgałęzień w sieci pozamiejskiej SN;
- AFL 6–70 mm<sup>2</sup> – do linii magistralnych SN, z wyjątkiem początkowych odcinków wymiarowych na specjalny poziom prądu zwarcowego (12,5 kA);
- AFL 6–120 mm<sup>2</sup> – do początkowych odcinków magistral i odgałęzień w liniach SN wyprowadzonych ze stacji o specjalnym poziomie mocy zwarcia;
- AFL 6–240 mm<sup>2</sup> – do linii 110 kV;
- AFL 8–350 mm<sup>2</sup> – do linii 110 kV;
- AFL 8–525 mm<sup>2</sup> – do linii 110 kV, 220 kV, 400 kV.

Innym rodzajem przewodów są przewody odgromowe, które chronią linie przed wyładowaniami atmosferycznymi, czy przewody przeciw-drganio-we, których konstrukcja tłumi drgania przewodów. Budowa przewodów odgromowych została przedstawiona na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Budowa przewodów odgromowych typu OPGW [37]:  
 a) przewód aluminiowy, (1) kabel optyczny ze światłowodami,  
 (2) powłoka aluminiowa gładka, (3) warstwa drutów ze stopu aluminium;  
 b) przewód stalowo-aluminiowy (1) kabel optyczny ze światłowodami,  
 (2) powłoka aluminiowa gładka, (3) warstwa drutów stalowych ocynkowanych,  
 (4) warstwa drutów aluminiowych

## 2.2. Słupy

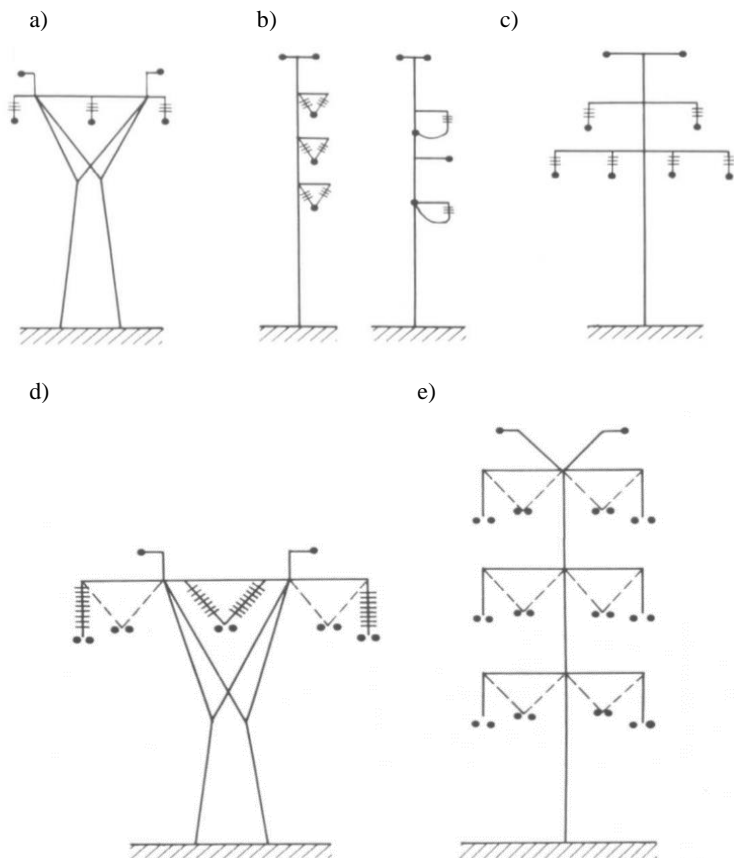
Konstrukcje wsporcze (słupy) są elementami wykorzystywanymi do zawieszania przewodów z osprzętem. Są one osadzone w gruncie bezpośrednio lub częściej za pomocą fundamentów. Można również używać wsporników ustawionych na dachach budynków lub przymocowanych do ścian; sposób ten stosowano wiele lat temu dla zmniejszenia kosztów budowy linii sieci nN. Rozwiązania takie okazały się wielce niewygodne w eksploatacji i zaczęto je wycofywać; można je jeszcze spotkać w starych dzielnicach miast. Słupy linii napowietrznych najogólniej biorąc dzieli się na dwie podstawowe grupy:

- przelotowe;
- mocne;

przy czym typ słupa zależy od:

- typu linii (jedno- czy dwutorowa);
- napięcia znamionowego;
- rozpiętości przęsła;
- rodzaju zastosowanych izolatorów;
- zastosowanego materiału.

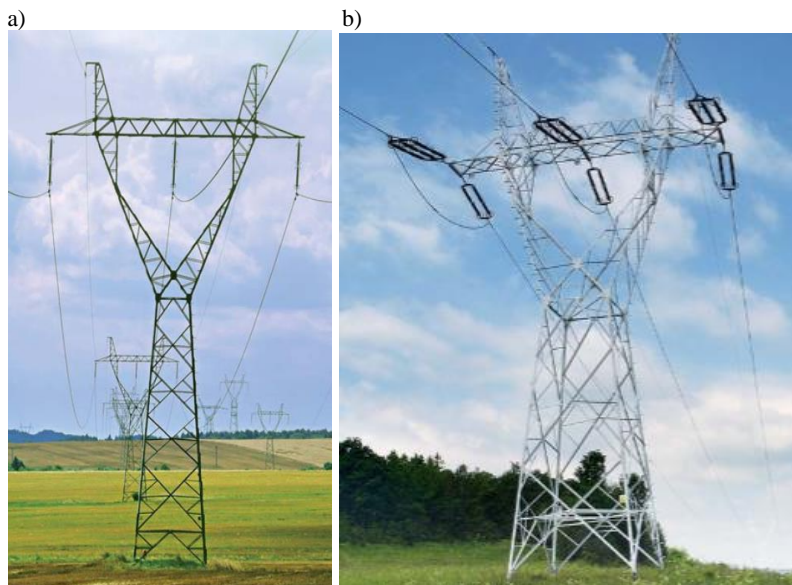
Na rys. 2.3. zestawiono typowe sylwetki słupów zarówno jednotorowych jak i dwutorowych linii napowietrznych.



Rys. 2.3. Zestawienie słupów różnych konstrukcji [24]:  
 a) H52, b) H52-PL, c) M52 – 220 kV, d) Y52, e) Z52 – 400 kV

Na rys. 2.3. przedstawio wybrane konstrukcje wsporcze w sposób uproszczony. Takie podejście ułatwia modelowanie poszczególnych sylwetek w programach symulacyjnych (wysokość zawieszenia przewodów oraz przestrzenna topologia przewodów). Na rys. 2.4. przedstawione zostały przykładowe sylwetki słupów 220 kV z podziałem na słupy przelotowe i mocne.





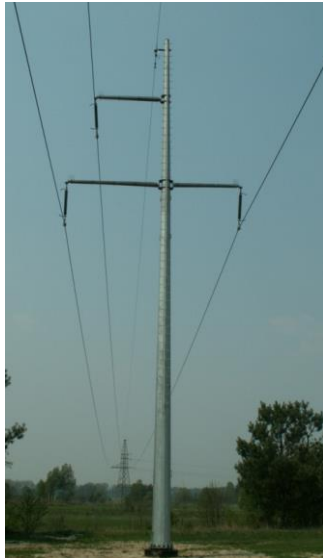
Rys. 2.4. Fotografie konstrukcji wsporczych linii 220 kV:  
a) słup przelotowy H52, b) słup mocny H52 [32]

Do pierwszej grupy słupów zaliczamy skrzyżowaniowe (PS), narożne (N) oraz słupy przelotowe (P). Słupy te charakteryzują się lekką konstrukcją i nie są wytrzymałe na naciąg przewodów. Wynika stąd konieczność wyslizgu przewodu z uchwytu przelotowego w przypadku zerwania się przewodu i wystąpienia siły naciągu działającej na słup. Słupy przelotowe mają za zadanie tylko podtrzymanie przewodu, a więc działają na nie siły pionowe pochodzące od ciężaru przewodu wraz z ewentualną sadzią. Dodatkowo słupy przelotowe muszą wytrzymywać obciążenia pochodzące od działania wiatru na słupy i przewodów na nich zawieszonych. Słupy narożne (N) są przeznaczone do podtrzymania przewodów i przyjmowania wypadkowej siły naciągu wynikającej z kąta załomu. Do słupów mocnych (M) zalicza się słupy odporowe (O), odporowo–narożne (ON) oraz krańcowe (K). Są to słupy o mocniejszej konstrukcji dostosowane do działania sił naciągu przewodów. Stosuje się na nich zawieszenie odciągowe.

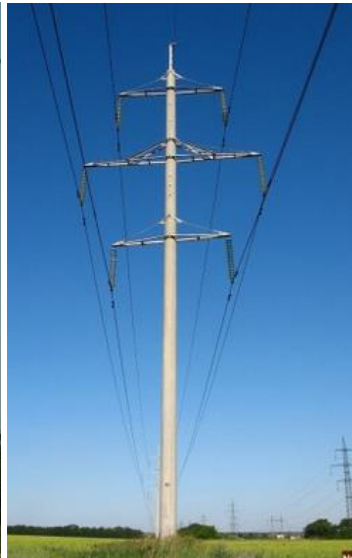
Słupy odporowe są stawiane na końcach sekcji odciągowej ze słupami przelotowymi w środku, na prostych odcinkach linii. Słupy odporowo–narożne wykorzystywane są w punktach załomu linii, zaś słupy krańcowe stosuje się na początku i końcu linii, są one dostosowane do wytrzymywania całkowitego jednostronnego naciągu linii. Dla sieci nN i SN stosuje się słupy żelbetowe z żelbetu wirowanego, wibrowanego, strunobetonu i z kablobetonu. Słupy wykonane nowoczesnymi metodami są lżejsze, dzięki czemu można je łatwiej transportować. Możliwa jest więc produkcja przemysłowa zapewniająca większą dokładność wy-

konania, większą wytrzymałość i bardziej estetyczny wygląd. Do wad słupów żelbetonowych należy trudność dzielenia ich na części dla ułatwienia transportu. Dlatego słupy te stosowane są najczęściej dla linii nN i SN niewymagających dużych długości żerdzi. Rzadziej są używane dla linii 110 kV, nigdy przy napięciach wyższych niż 110 kV. Dla linii o napięciu 110 kV stosuje się najczęściej słupy kratowe z kształtowników stalowych, tworzą one konstrukcje o podstawie kwadratu lub prostokąta. Do zalet tych słupów należy transport w drobnych elementach i montowanie dopiero na stanowisku w miejscu ustawiania. Słupy stalowe mogą być konstruowane dla dowolnych wysokości i sił na nie działających. Ich wadą jest wysoka przewodność oraz konieczność zabezpieczenia przed korozją. Są wprawdzie coraz pewniejsze sposoby zabezpieczenia przed rdzewieniem, lecz zwiększają one koszt. Trwałość takiego zabezpieczenia jest także ograniczona, chociaż znacznie większa niż metoda tradycyjnego malowania. Nowe rozwiązania to słupy o konstrukcji rurowej (rys. 2.5.).

a)



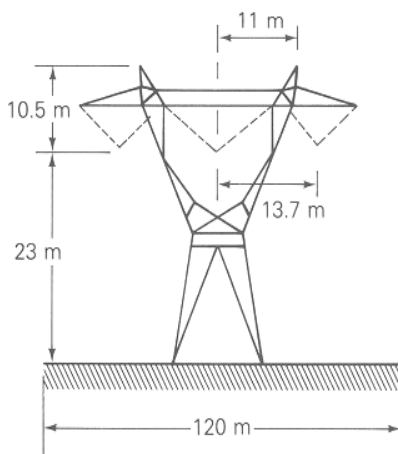
b)



Rys. 2.5. Przykłady konstrukcji rurowej a) linia jednotorowa; b) linia dwutorowa [3]

Wysokości słupów muszą być tak dobrane, aby zawieszony przewód w najniższym swym punkcie nie znalazł się niżej niż dopuszcza norma [25]. W normie tej podano sposób określania wysokości najniższego przewodu, w zależności od tego, nad jakim terenem linia przebiega. Najmniejsze są wymagania dotyczące przejścia nad terenami niezabudowanymi, najwyższe słupy stawia się przy skrzyżowaniu linii z innymi liniami, domami i obiektami inżynieryjnymi lub transportowymi. W ten sposób na podstawie norm można określić sylwetkę słupa, przyjmując pewien sposób rozmieszczenia przewodów [25, 26, 27, 28]. W zależności

od rodzaju konstrukcji wymuszonej rodzajem linii, słupy mogą zajmować duży obszar terenu nawet dla linii jednotorowej, co ilustruje rys. 2.6.



Rys. 2.6. Zajętość pasa terenu w stosunku do wymiarów słupa WN 400 kV [20]

Poniżej umieszczono tab. 2.1. przedstawiającą różne rodzaje słupów w zależności od rodzaju terenu, przez który musi przebiegać linia elektroenergetyczna.

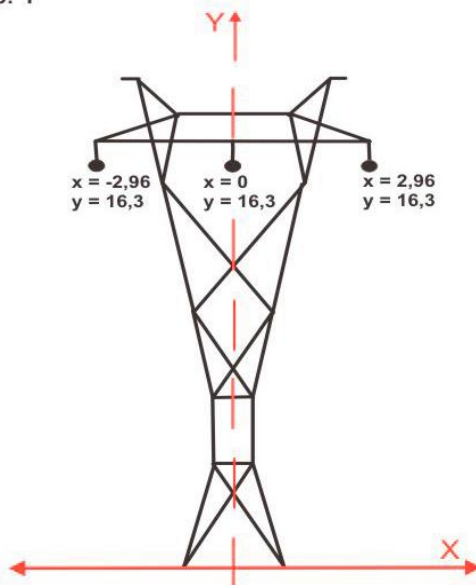
Tab. 2.1. Serie słupów w zależności od rodzaju terenu [24]

Seria słupów	Napięcie znamionowe	Liczba torów	Przekrój przewodów roboczych	Przeznaczenie
	kV		szt.	
Z52	400	2	wiązka 2x525	Wszystkie rodzaje terenu z wyjątkiem lasów, gdzie stosuje się serię ZL52
Y52	400	1	wiązka 2x525	Linie we wszystkich rodzajach terenu
M52	400	2	525	Linie w terenie otwartym
ML52	220	2	525	Zmniejszona szerokość pasa terenu
H52	220	1	525	Powszechnie stosowane rozwiązanie
OS24	220	2	240	Linie w terenie otwartym
O24	110	2	240	Tereny zurbanizowane
B2	110	1	240	Powszechnie stosowane rozwiązanie o dużym asortymencie typów słupów
C3	110	2	350	Linie o zwiększonym przekroju $S$

### 2.3. Konwencja oznaczeń słupów

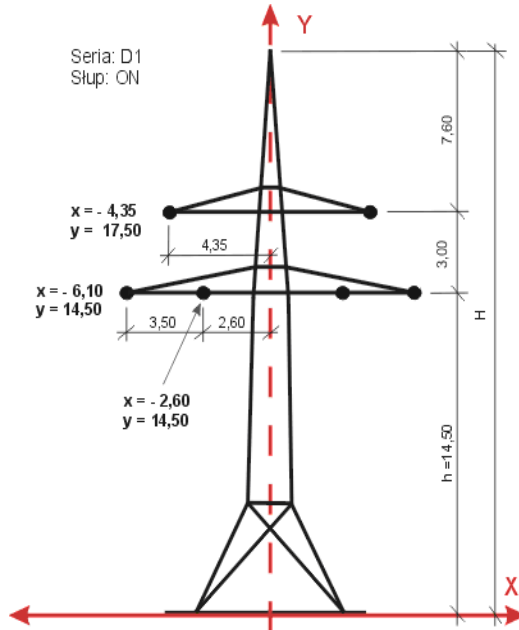
Konwencja oznaczenia słupów prezentowana w dalszej części rozdziału została przedstawiona na rysunkach od rys. 2.7. do rys. 2.9. Konstrukcję słupa umieszczono w układzie współrzędnych, co ułatwia interpretację i oznaczenie parametrów słupa (oznaczenia X, Y są odległościami od odpowiadających im osi i przyjmują wartości dodatnie lub ujemne w zależności od ćwiartki układu współrzędnych). Zastosowany sposób prezentacji sylwetek słupów umożliwia wykorzystanie zawartych na rysunkach danych do zaawansowanych aplikacji obliczeniowych [36].

Słup: P

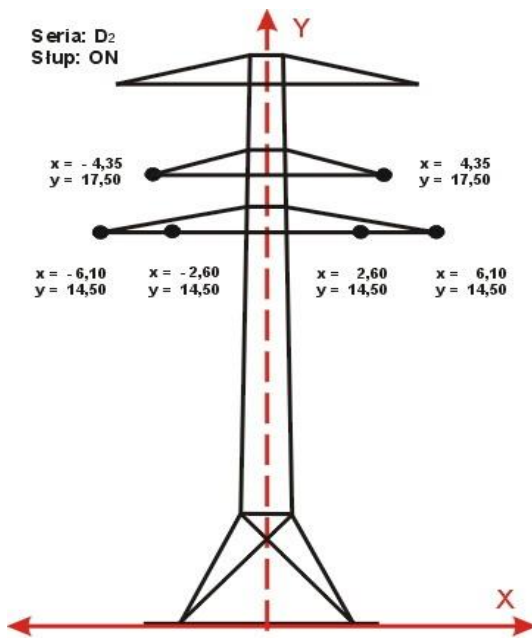


Rys. 2.7. Oznaczenia słupów: słup jednorodny serii A, model P

Wymiary poszczególnych słupów oraz charakterystyczne odległości zaczerpnięto z odpowiednich norm i katalogów [14, 15, 24, 29, 33].



Rys. 2.8. Oznaczenie słupów: dwutorowy ON (odporowo-narozny) serii D1



Rys. 2.9. Oznaczenie słupów: dwutorowy ON (odporowo-narozny) serii D2

## 2.4. Fizyczna interpretacja parametrów linii

Pomimo znacznego zróżnicowania gabarytów elektroenergetycznych linii napowietrznych oraz przekrojów stosowanych w nich przewodów, sposób ich modelowania w obliczeniach zwarciovych i rozptywach mocy jest prawie taki sam. Podobne są również parametry modeli tych linii wykorzystywane w obliczeniach. Opis matematyczny dokładnych modeli tych linii jest dość złożony z uwagi na fakt występowania pomiędzy przewodami sprzężeń magnetycznych i pojemnościowych oraz rozłożenie ich wzdłuż całej długości linii. Warto zwrócić uwagę, że dla linii dwutorowej z dwoma przewodami wiązkowymi i dwoma przewodami odgromowymi oddziaływania zachodzą pomiędzy aż czternastoma obwodami. W obliczeniach zwarciovych, w wyniku zastosowanych uproszczeń i przekształceń, podstawowy model zgodny ma postać czwórnik typu  $\pi$  o skupionych parametrach podłużnych (rezystancja, reaktancja) oraz parametrze poprzecznym (susceptancja) rozdzielonym po połowie na poszczególne końce modelu. Konduktancja poprzeczna w modelach linii jest z reguły pomijana. W obliczeniach uproszczonych, wykonywanych według zaleceń normatywnych dopuszczalne jest także pominięcie susceptancji, więc schemat zastępczy linii staje się po prostu dwójnikiem.

### 2.4.1. Rezystancja linii

Parametr ten związany jest z własnościami materiału, które określa rezystywność lub konduktywność. Rezystancją jednostkową przewodu  $R'$  nazywa się rezystancję jaką przedstawia przewód o długości jednego kilometra przy przepływie przez niego prądu przemiennego. Rozpatrując element przewodzący o długości  $l$  i przekroju  $S$  wykonany z metalu, który stanowi odcinek przewodu dołączonego do źródła energii elektrycznej, płynie w nim prąd elektryczny o natężeniu  $I$ . Zgodnie ze wzorem  $J = I / S$  możemy obliczyć gęstość tego prądu  $J$  w  $A/m^2$ . Z przepływem prądu w przewodzie związane jest występowanie wewnątrz przewodu pola elektrycznego, którego natężenie wynosi  $E$ . Zwrot wektora natężenia pola elektrycznego wewnątrz przewodu jest zgodny ze zwrotem wektora  $J$  gęstości prądu. Doświadczalnie stwierdzono, że im większa jest wartość natężenia pola  $E$  w przewodzie, tym większa jest gęstość prądu  $J$ , gdyż ruch ładunków w przewodzie związany jest z wartością natężenia pola elektrycznego działającego na te ładunki, zatem:

$$J = \gamma \cdot E \quad (2.1)$$

przy czym:

$\gamma$  – współczynnik proporcjonalności, zwany przewodnością elektryczną właściwą lub konduktywnością materiału, z którego wykonany jest przewód,  $E$  – natężenie pola elektrycznego.

Konduktywność jest zatem wielkością określającą własności przewodzące przewodnika. W praktyce konduktywność wyrażamy w  $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$  [2]. Odwrotność konduktywności oznaczamy przez  $\rho$  i nazywamy oporem elektrycznym właściwym lub rezystywnością materiału. Jednostką rezystywności jest  $\Omega \cdot \text{m}$ . Rezystywność metali i stopów można przedstawić jako sumę dwóch niezależnych od siebie składników [16]:

- rezystywności idealnej  $\rho_i$  odpowiadającej rezystywności idealnie periodycznej sieci krystalograficznej materiału;
- rezystywności resztkowej  $\rho_r$  wywołanej zakłóceniami sieci krystalicznej (deformacje i zanieczyszczenia).

Rezystywność  $\rho_i$  zależy od temperatury, zaś rezystywność  $\rho_r$  praktycznie od niej nie zależy. Wartość  $\rho_i$  powyżej pewnej charakterystycznej dla każdego materiału temperatury – zwanej temperaturą Debye’a i oznaczonej  $T_D$  wzrasta wprost proporcjonalnie do temperatury. Poniżej wartości  $T_D$  zależność  $\rho_i(T)$  ma charakter wykładniczy, a przy temperaturze około  $0,1T_D$  rezystywność  $\rho_i$  staje się proporcjonalna do temperatury bezwzględnej w potęgze piątej. Przybliżoną zależność rezystywności  $\rho_i$  od temperatury w zakresie  $(0,25 \div 1,5) \cdot T_D$  ujmuje tzw. formuła Boreliussa – Gruneisena, wg której:

$$\rho_i = \rho_D \left( 1,17 \cdot \frac{T}{T_D} - 0,17 \right) \quad (2.2)$$

przy czym:

$\rho_D$  – rezystywność idealna mierzona w temperaturze Deby’ego,  $T$  – temperatura rzeczywista,  $T_D$  – temperatura Debye’a.

W praktyce przy temperaturach ok.  $20^\circ\text{C}$  stosuje się uproszczony wzór określający zależność rezystywności metali i stopów od temperatury. Rezystywność całkowita (łącznie idealna i resztkowa) w temperaturze  $\vartheta$  wyrażonej w  $^\circ\text{C}$  wynosi:

$$\rho_\vartheta = \rho_{20} (1 + \alpha \Delta\vartheta) \quad (2.3)$$

w której:

$\rho_{20}$  – rezystywność w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – temperaturowy współczynnik rezystywności;  $\Delta\vartheta = (\vartheta - 20)$  – przyrost temperatury.

W miarę wprowadzania do danego metalu atomów innego metalu (tworzenia stopu) współczynnik temperaturowy maleje. Istnieje przy tym empiryczna zależność zwana regułą Matthiesena (sprawdzalna w ograniczonym zakresie wzajemnego stosunku składników stopu), zgodnie z którą iloczyn rezystywności  $\rho_\vartheta$

i współczynnika temperaturowego  $\alpha$  w danej temperaturze  $\vartheta$  jest wielkością stałą przy różnych stosunkach składników stopu i równa się iloczynowi tych wielkości dla metalu czystego [8].

Wartość  $\rho_i$  dąży do zera, gdy temperatura  $T$  dąży do zera bezwzględne. W niższych temperaturach ujawnia się zatem wpływ rezystywności resztkowej  $\rho_r$ . O wartości  $\rho_r$  decydują w większym stopniu zniekształcenia sieci krystalicznej niż zanieczyszczenia; dlatego też wyżarzając odpowiednio przewodnik uzyskuje się poprawę stopnia uporządkowania jego struktury (rekrystalizację), a tym samym zmniejszenie rezystywności  $\rho_r$ . Wartość  $\rho_r$  można jeszcze zmniejszyć zwiększając czystość metalu, co współcześnie jest realizowane w skali technicznej (obecnie uzyskuje się aluminium o czystości 99,999% a nawet 99,9999%). Rezystywność niektórych metali i stopów o dużej czystości maleje gwałtownie do niemierzalnej wartości poniżej pewnej temperatury charakterystycznej dla danego materiału. Temperatura ta nosi nazwę temperatury krytycznej  $T_{cr}$  lub temperatury przejścia i jest bliska 0°K. Zjawisko przewodzenia poniżej temperatury krytycznej nosi nazwę nadprzewodnictwa. Pole magnetyczne w przypadku wystąpienia nadprzewodnictwa zostaje wyparte poza przewodnik. Zewnętrzne pole magnetyczne przy powierzchni przewodnika powoduje wzrost temperatury krytycznej. Po przekroczeniu określonej wartości natężenia tego pola, zwanego natężeniem krytycznym, wprowadzenie przewodnika w stan nadprzewodnictwa staje się niemożliwe [12]. Duży wpływ na zmianę rezystancji w przewodach z materiałów magnetycznych, a więc na przykład ze stali, odgrywa zjawisko naskórkowości. Strumień magnetyczny we wnętrzu przewodu jest znacznie większy niż w przypadku przewodu z niemagnetycznego materiału przewodzącego – np. aluminiowego czy też miedzianego. W związku z tym przy przepływie prądu przemiennego następuje silniejsze wypieranie prądu do warstw zewnętrznych przewodu, przez co zachodzi jak gdyby zmniejszenie czynnego przekroju przewodu. Jest to równoważne ze zwiększeniem rezystywności w porównaniu z rezystywnością przy przepływie prądu stałego. Do wzrostu tego przyczyniają się również straty czynne związane z prądami wirowymi oraz histerezą w stali. Uwzględniając wzrost rezystancji, skutek działania wymienionych zjawisk oraz w skutek nagrzewania, można praktycznie przyjmować wartość przewodności w granicach od 5 do 6  $\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$ , jako przeciętną dla normalnych warunków pracującego w sieci przy 50 Hz przewodu stalowego [18].

#### 2.4.2. *Reaktancja linii*

Reaktancja jednostkowa linii związana jest z indukcyjnością, która jest ilorazem strumienia magnetycznego przenikającego przestrzeń ograniczoną przewodami i prądu przemiennego, który ten strumień wywołał. Ponieważ strumień ten w części przenika połowę objętości każdego z przewodów o promieniu  $r$  i w pozostałej części przenika przestrzeń między przewodami oddalonymi od siebie na



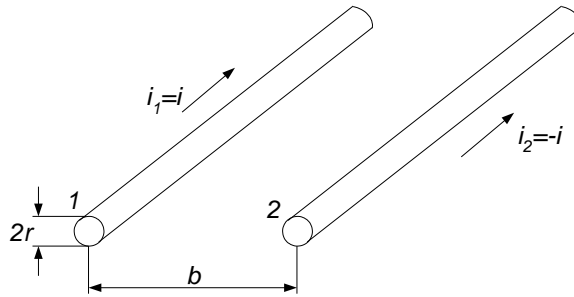
odległość  $b$  (rys. 2.10.), więc odpowiednio do tego indukcyjność ma dwa składniki [13]:

$$L' = \frac{\mu_0 \cdot \mu}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{b-r}{r} \quad (2.4)$$

gdzie:

$\mu_0$  – przenikalność magnetyczna przestrzeni między przewodami, czyli powietrza dla którego  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m;

$\mu$  – przenikalność magnetyczna względna materiału przewodowego (dla aluminium i miedzi  $\mu = 1$ , dla stali  $\mu \gg 1$ ).



Rys. 2.10. Linia jednofazowa [20]

$r$  – promień przewodu,  $b$  – odległość pomiędzy przewodami

Indukcyjność linii zależy od szeregu czynników, a mianowicie: od liczby przewodów linii (jednofazowa, trójfazowa), od wzajemnego odstępu i układu zawieszania przewodów, średnicy przewodów, ich materiału, a także jest ona indukcyjnością wypadkową indukcyjności własnej przewodu oraz indukcyjności wzajemnej. Indukcyjność wzajemna jest uwarunkowana wpływem drugiego przewodu przy linii jednofazowej lub pozostałych przewodów linii trójfazowej jednotorowej lub wielotorowej [18].

#### 2.4.3. Konduktancja poprzeczna linii

Konduktancja poprzeczna linii jest związana ze stratami mocy czynnej od upływności izolacji oraz od ulotu przewodów. Straty pochodzące od prądów upływności przez izolację (izolatory w linii napowietrznej, izolacja kabla w linii kablowej) są na ogół bardzo małe. Wywołane są one niedoskonałością izolacji i zależne są od jej stanu. W przypadku linii napowietrznej decydującą rolę odgrywa stan powierzchni izolatorów i warunki atmosferyczne (zabrudzenie, zawilgocenie). Rząd wielkości konduktancji poprzecznych pochodzący od tych strat wynosi  $10^{-8}$  S/km, w praktycznych obliczeniach wielkość ta jest pomijalna. Straty związane ze zjawiskiem ulotu są w liniach NN znacznie większe. Powstają one

w wyniku jonizacji powietrza wokół przewodów. Jeżeli zwiększony skutek jonizacji gradient pola elektrycznego w pobliżu powierzchni przewodu przekroczy wytrzymałość elektryczną powietrza, to zjawisko ulotu zacznie przyjmować widoczne praktycznie nasilenie – rosną straty czynne, określające odpowiednią wielkość konduktancji. Napięcie, od którego zaczynają w określonych warunkach powstawać w linii straty ulotowe, nazywamy *napięciem krytycznym*. Straty ulotowe wzrastają w miarę wzrostu napięcia liniowego według kwadratowej zależności ponad napięcie krytyczne [13]. Zależności pozwalające na wyznaczenie konduktancji linii oraz wynikających z jej istnienia strat przedstawiono w rozdz. 3.

#### 2.4.4. Susceptancja poprzeczna linii

Susceptancja linii związana jest przede wszystkim z wielkością pojemności roboczej linii. Pojemność ta jest wypadkową, powstałą z superpozycji cząstkowych pojemności między poszczególnymi fazami oraz między każdą z faz w stosunku do ziemi. W przypadku linii napowietrznych pojemności cząstkowe względem ziemi są, na skutek dużych wysokości linii nad ziemią – stosunkowo nieduże i w trakcie przekształcania odpowiednich zależności w układzie trójfazowym zostaje ich znaczenie całkowicie wyeliminowane. W wyniku tego, w przybliżonym wzorze praktycznym na pojemność roboczą linii napowietrznej wysokość linii w ogóle nie występuje. Pojemność ta zależy tylko od średniej geometrycznej odległości międzyprzewodowej i promienia przewodu. Pojemności linii z przewodami wiązkowymi są większe – mniej więcej w tym samym stosunku, w jakim mniejsze są reaktancje – od pojemności linii z przewodami pojedynczymi [8].

Przy wyznaczaniu pojemności przewodu linii względem ziemi korzysta się z pojęcia pojemności przewodnika odosobnionego. Pojemnością tą nazywa się stosunek ładunku nagromadzonego na przewodniku do jego potencjału względem obranego punktu w polu elektrycznym, któremu przypisuje się potencjał równy zeru, czyli:

$$C = \frac{Q}{\phi} \quad (2.5)$$

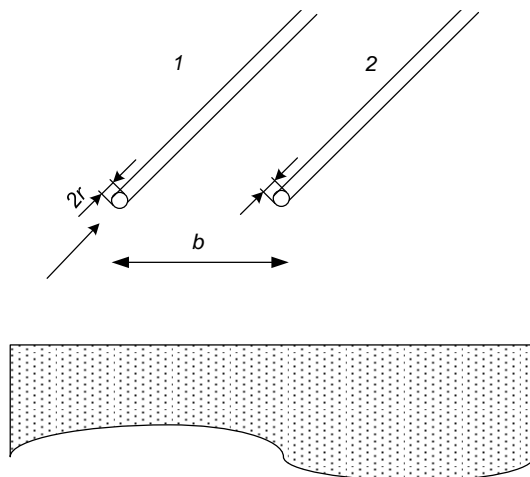
przy czym:

$Q$  – ładunek zgromadzony na przewodniku,  $\phi$  – potencjału wywołanego obecnością tego ładunku.

Zależności pozwalające na wyznaczenie susceptancji poprzecznej linii przedstawiono w rozdz. 3.

#### 2.4.5. Pojęcie obwodu ziemnowpowrotnego

Elementarnym pojęciem związanym z modelowaniem linii jest pojęcie *obwodu ziemnowpowrotnego* [12]. Składa się on z zawieszzonego nad ziemią pojedynczego przewodu, przez który płynie prąd powracający następnie przez ziemię uważaną za jednolitą przewodzącą półprzestrzeń. Na rys. 2.11. przedstawiono ilustrację tego pojęcia – prąd  $I$  płynie przewodem 1 i powraca jednolitą półprzestrznią przewodzącą. Napięcie indukowane w przewodzie 2 odniesione do prądu  $I$  jest miarą impedancji wzajemnej obwodów ziemnowpowrotnych 1 oraz 2 [18].



Rys. 2.11. Ilustracja pojęcia „obwód ziemnowpowrotny” [16]  
 $r$  – promień przewodu,  $b$  – odległość pomiędzy przewodami

Zagadnienie rozptyłu prądu w ziemi jest jednym z bardziej skomplikowanych zagadnień teorii pola elektromagnetycznego. Można je rozwiązać kilkoma sposobami, określonymi jako rozwiązanie Carlsona, rozwiązanie Rudenberga, czy też inne rozwiązania wykorzystujące bezpośrednio równania Maxwella [18]. Pole magnetyczne wytwarzane przez prąd płynący w przewodzie przenika przez ten przewód, a charakteryzująca to zjawisko indukcyjność nosi nazwę indukcyjności wewnętrznej przewodu. Powrót prądu przez ziemię oraz oddziaływanie pola wytwarzanego w przewodzie na ziemię i pola wytwarzanego w ziemi na przewód charakteryzuje łącznie indukcyjność zewnętrzna przewodu. Uwzględnienie częstotliwości i dodanie tych indukcyjności definiuje impedancję własną obwodu ziemnowpowrotnego. Stosunek napięcia indukowanego w obwodzie przebiegającym obok rozpatrywanego obwodu ziemnowpowrotnego do wywołującego go prądu określa impedancję wzajemną tych obwodów. W wyniku zastosowania skomplikowanego aparatu matematycznego (równanie różniczkowe cząstkowe pola elektromagnetycznego rozwiązywane za pomocą funkcji Bassela) otrzymuje

się przybliżone wzory na jednostkową impedancję własną obwodu ziemnopowrotnego oraz jednostkową impedancję wzajemną dwóch równoległych obwodów ziemnopowrotnych znajdujących się w odległości  $b$  od siebie. Mają one następującą postać [18, 33]:

– impedancja własna:

$$W_j = R' + 10^{-3} \cdot f + j4\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln \frac{b_n}{r_0} \quad \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (2.6)$$

– impedancja wzajemna  $\frac{\Omega}{\text{km}}$ :

$$M_j = 10^{-3} \cdot f + j4\pi \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln \frac{b_n}{b} \quad \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (2.7)$$

przy czym:

$R'$  – rezystancja jednostkowa przewodu;

$10^{-3} f$  – składnik interpretowany jako rezystancja przypadająca na przepływ prądów ziemi;

$b_n = 660 \cdot \sqrt{\frac{\rho_n}{f}}$  – składnik, któremu nadaje się czasami interpretację odległości rozważanego przewodu od fikcyjnego przewodu znajdującego się w ziemi;

$\rho_n = (100 \div 1500) \Omega \cdot \text{m}$  – rezystywność ziemi zależna od wilgotności i rodzaju gruntu;

$f$  – częstotliwość prądu płynącego w obwodzie;

$b$  – średnia odległość pomiędzy przewodami fazowymi;

$r_0$  – zastępczy promień przewodu.

Zastępczy promień przewodu  $r_0$  określa się jako promień rury o nieskończenie cienkiej ściance, która wywołuje taki sam strumień magnetyczny co przewód rzeczywisty o promieniu  $r$ , ale na zewnątrz. Oblicza się go dla najczęściej spotykanych linii stalowo–aluminiowych o kilku warstwach drutów aluminiowych np. AFL 6 jako  $r_0 = (0,80 \div 0,82) \cdot r$ ; dla przewodów z jedną warstwą drutów aluminiowych np. AFL 1,7 –  $r_0 = (0,35 \div 0,70) \cdot r$ ; dla linii wielodrutowych z materiałów niemagnetycznych bez rdzenia stalowego np. AL  $r_0 = (0,72 \div 0,77) \cdot r$ ; dla przewodów jednodrutowych wykonanych z materiałów niemagnetycznych  $r_0 = 0,78 \cdot r$ . Nieoznaczoność w tych zależnościach wynika z wpływu drutu stalowego. We wzorach (2.6) i (2.7) opisuje się obwód ziemnopowrotny jako całość. Nie jest możliwe określenie jaka część impedancji przypada na przepływ prądu przez przewód, a jaka na przepływ przez ziemię. Dlatego też w większości zagadnień praktycznych związanych z modelowaniem obwodów ziemnopowrotnych (także w modelowaniu linii elektroenergetycznych) ziemia traktowana jest jako bezimpedancyjna szyna, a cała impedancja przypisana jest do zlokalizowanego nad nią dwójnika.

### 3. Wzory do obliczania parametrów linii

Schematy zastępcze elementów sieci elektroenergetycznej są utworzone z impedancji i admitancji, których sposób połączenia i wartości wynikają z relacji matematycznych opisujących stan pracy elementów. Z powodu stałości, impedancje i admitancje te są nazywane parametrami danego elementu sieci. Uproszczenia do obliczeń parametrów wynikają z przyjęcia dwóch założeń:

- w sieci występują przebiegi o ustalonej częstotliwości znamionowej 50 Hz;
- elementy sieci mają charakterystyki liniowe, czyli są elementami liniowymi.

Dalszym założeniem, zwykle czynionym, jest symetria fazowa sieci trójfazowej, która umożliwia reprezentację jednofazową sieci trójfazowej. Założenia o symetrii i liniowości sieci umożliwiają stosowanie w obliczeniach przekształcenia sieci trójfazowej ze sprzężeniami elektromagnetycznymi pomiędzy obwodami fazowymi na trzy prostsze sieci składowych symetrycznych: zgodnej, przeciwnej i zerowej. Do obliczeń praktycznych przyjęto uproszczenie polegające na traktowaniu parametrów linii jako parametrów skupionych. Z analizy równań linii długiej wynika, że uproszczenie takie nie wpływa decydująco na zmniejszenie dokładności obliczeń.

#### 3.1. Obliczanie rezystancji linii

Przewód w linii o długości 1 kilometra wykazuje rezystancję:

$$R = R' \cdot l \quad (3.1)$$

Rezystancję jednostkową przewodu oblicza się z następującej zależności:

$$R' = \frac{1000}{\gamma \cdot S}, \quad \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (3.2)$$

gdzie:

$\gamma$  – przewodność właściwa materiału przewodowego w  $\left[ \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$ ;

$S$  – przekrój jednego przewodu linii w  $\text{mm}^2$ .

Wielkości  $\gamma$  i  $s$  są funkcjami temperatury, lecz w granicach spotykanych temperatur zmienność ich jest niewielka, więc może być pominięta. Przyjmuje się zwykle temperaturę  $20^\circ\text{C}$  jako miarodajną dla określenia  $\gamma$  i  $s$  [8]. W obliczeniach praktycznych można przyjmować następujące wartości przewodności właściwej  $\gamma$ :

- miedź miękka: druty  $57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ , linki  $56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ ;

- miedź twarda: druty  $55 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ , linki  $53 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ ;
- aluminium miękkie: druty  $35 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ , linki  $34 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ ;
- aluminium twarde: linki  $34,8 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$  [13].

Wartości te należy rozumieć jako odnoszące się do temperatury 20°C. W dokładniejszych obliczeniach można się posługiwać przeliczeniem rezystancji na dowolną temperaturę w jakiej pracuje przewód, według relacji:

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - 20)] \quad (3.3)$$

gdzie:

$R_{\vartheta}$  – rezystancja w rzeczywistej temperaturze,  $R_{20}$  – rezystancja w temperaturze 20°C,  $\alpha$  – współczynnik zmiany oporności,  $\vartheta$  – temperatura rzeczywista.

Przy czym współczynnik zmiany oporności można przyjąć dla obydwu wymienionych materiałów przewodowych  $\alpha = 0,004$ . Najwygodniej jest obliczać rezystancje na podstawie odpowiednich tablic, które podają wartości rezystancji przewodów (w  $[\frac{\Omega}{\text{km}}]$ ), zależnie od przekroju i typu przewodu (tab. 3.1.) [16].

Tab. 3.1. Rezystancje jednostkowe  $R'$  przewodów stalowo–aluminiowych [20]

Rodzaj przewodu	Przekrój znamionowy aluminium S	Przekrój obliczeniowy aluminium	Przekrój całego przewodu	Rezystancja jednostkowa w temp. 30 C
AFL	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Ω/km
AFL–6	35	34,35	40,08	0,852
AFL–6	50	48,25	56,29	0,606
AFL–1,7	50	47,71	75,54	0,614
AFL–6	70	66,58	78,14	0,440
AFL–1,7	70	61,28	97,03	0,478
AFL–6	95	90,05	105,0	0,325
AFL–1,7	95	84,82	134,3	0,345
AFL–6	120	122,6	143,5	0,239
AFL–1,25	120	120,6	217,6	0,243
AFL–6	150	148,9	174,3	0,197
AFL–6	185	183,8	215,5	0,159
AFL–1,25	185	165,7	300,0	0,177
AFL–1,25	240	238,6	432,0	0,123
AFL–6	240	236,1	276,2	0,124
AFL–6	300	294,9	344,4	0,099
AFL–4	300	305,4	374,4	0,096
AFL–4	350	349,2	428,1	0,084
AFL–8	400	407,6	460,4	0,072
AFL–8	525	519,5	586,9	0,056

### 3.2. Obliczanie reaktancji linii

Reaktancję jednostkową  $X'$  można określić wzorem:

$$X' = \omega \cdot L' \quad (3.4)$$

gdzie:

$\omega$  – pulsacja prądu przemiennego  $2\pi f$  w [1/s],

$L'$  – indukcyjność robocza jednostkowa w [H/km].

Bez szczegółowego wyprowadzania wzoru na indukcyjność fazową linii trójfazowej można indukcyjność  $L'$  wyznaczyć ze wzoru (3.5), po uprzednim zastąpieniu dwóch pozostałych przewodów fazowych jednym przewodem odległym od przewodu rozważanego o zastępczą odległość  $b_{sr}$ , równą średniej geometrycznej z odległości przewodu rozważanego do przewodów pozostałych.

$$L' = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{b_{sr}}{0,7788 \cdot r}$$

$$\text{lub } L' = 4,6 \cdot 10^{-4} \log \frac{b_{sr}}{0,7788 \cdot r} \quad (3.5)$$

gdzie:

$b_{sr}$  – zastępcza odległość między przewodami,  $r$  – promień przewodu.

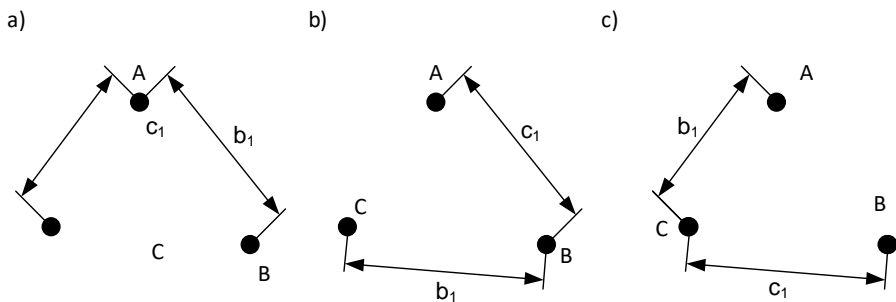
Przy takim przekształceniu uwzględnia się, że suma prądów fazowych w przewodach linii trójfazowej jest równa zeru w każdej chwili. Odległość średnia  $b_{sr}$  jest zależna od rozmieszczenia wzajemnego przewodów i od każdego z przewodów fazowych może być różna. Wzór ogólny na odległość  $b_{sr}$  dowolnego przewodu fazowego linii trójfazowej od przewodów pozostałych jest następujący:

$$b_{sr} = \sqrt{b_1 \cdot c_1} \quad (3.6)$$

gdzie:

$b_1$  – odległość przewodu fazy rozważanej do przewodu fazy opóźnionej o  $120^\circ$ ;

$c_1$  – odległość przewodu fazy rozważanej do przewodu fazy opóźnionej o  $240^\circ$  (rys. 3.1.).

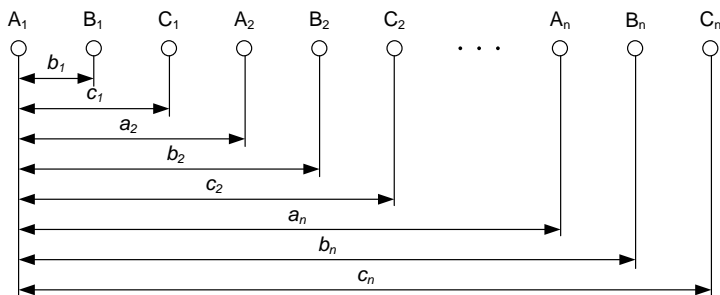


Rys. 3.1. Odległości przewodu fazy rozważanej do przewodu fazy opóźnionej o 120° ( $b_1$ ) i o 240° ( $c_1$ ): a) faza L1, b) faza L2, c) faza L3 [12]

Dla linii napowietrznej o liczbie  $n$  torów trójfazowych równoległych (rys. 3.2.) odległość średnią oblicza się ze wzoru:

$$b_{\text{sr}} = \frac{\sqrt{b_1 b_2 \dots b_n c_1 c_2 \dots c_n}}{a_2 a_3 \dots a_n} \quad (3.7)$$

w którym indeksy 1, 2, ...,  $n$  oznaczają kolejne tory od 1 do  $n$ -tego;  $a_2, a_3, \dots, a_n$  są odległościami przewodu fazy rozważanej do przewodu tej samej fazy, lecz kolejno w torze 2, 3, ...,  $n$ -tym; odległości  $b$  i  $c$  są zdefiniowane tak samo jak we wzorze (3.6).



Rys. 3.2. Odległości przewodu fazy L1 do przewodów pozostałych w obliczaniu  $b_{\text{sr}}$  dla przewodu tej fazy [19]

Indukcyjność jednostkową linii (zależność 3.5), przy czym oprócz zastąpienia  $b$  przez  $b_{\text{sr}}$  należy w miejsce promienia przewodu  $r$  podstawić tzw. promień zastępczy  $r_z$  wiązki, wyznacza się następująco:



$$r_z = \sqrt[m]{r \cdot a_{sr}^{m-1}} \quad (3.8)$$

gdzie:

$a_{sr}$  – średni geometryczny odstęp między przewodami tej samej wiązki:

$$a_{sr} = \sqrt[m]{a_1 \cdot a_2 \cdots a_m} \quad (3.9)$$

przy czym:

$m$  – liczba przewodów w wiązce;

$a_1, a_2, \dots, a_m$  – odległość między kolejnymi przewodami w wiązce (odległość przewodów w wiązce dwuprzewodowej wynosi 0,4 m) [13].

### 3.3. Obliczanie konduktancji linii

Konduktancję linii napowietrznych uwzględnia się rzadko, ponieważ związana jest ona ze stratami mocy czynnej małymi w stosunku do strat mocy czynnej na rezystancji podłużnej  $R$  i pomijalnymi w stosunku do mocy czynnej przepływającej przez linię [10, 11]. Wzory empiryczne do obliczenia napięcia krytycznego  $U_{kr}$  i strat ulotu  $\Delta P_{ul}$  oraz związanej z nimi konduktancji jednostkowej  $G'$  są następujące [8]:

- napięcie krytyczne:

$$U_{kr} = 48,9 \cdot m_p \cdot m_a \cdot \delta_a \cdot r \cdot \ln \frac{b_{sr}}{r} \quad (3.10)$$

- straty ulotu (strata mocy wg Peeka w [ $\frac{\text{kW}}{\text{km}}$ ]):

$$\Delta P_{ul} = \frac{2,41}{\delta_a} \cdot (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r}{b}} \cdot (U_f - U_{kr})^2 \cdot 10^{-6} \quad (3.11)$$

gdzie  $f = 50$  Hz i  $\delta_a = 1$ :

$$\Delta P_{ul} = 0,18 \cdot \sqrt{\frac{r}{b}} \cdot (U_f - U_{fkr})^2 \quad (3.12)$$

- konduktancja jednostkowa:

$$G' = \frac{\Delta P_{ul}}{U_f^2} \quad (3.13)$$

w których:

$m_p$  – współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu ( $m_p = 1$  dla drutu nowego, 0,93 – 0,98 dla starego drutu i 0,83 – 0,87 dla linek);  $m_a$  – współczynnik zależny od gęstości powietrza ( $m_a = 1$  dla pogody dobrej i 0,8 dla pogody złej);  $\delta_a$  – współczynnik zależny od ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza,  $\delta_a = \frac{0,302 \cdot p_a}{(273+t)}$ ;  $r$  – promień przewodu w cm;  $b_{sr}$  – średnia geometryczna z odległości pomiędzy przewodami fazowymi w cm;  $f$  – częstotliwość;  $U_f$  – napięcie fazowe robocze w [kV].

### 3.4. Obliczanie susceptancji pojemnościowej linii

Susceptancja pojemnościowa jednostkowa fazowa linii napowietrznej jest proporcjonalna do pojemności jednostkowej, co wyraża wzór:

$$B' = 2\pi \cdot f \cdot C' \quad \left[ \frac{S}{\text{km}} \right] \quad (3.14)$$

W związku z tym, że pojemności doziemne są małe w stosunku do pojemności międzyfazowych (wynoszą one 2÷3% wartości pojemności międzyfazowych), pojemność  $C'$  oblicza się zwykle z pominięciem pojemności doziemnych. Wtedy wzór na pojemność jednostkową fazową linii trójfazowej upraszcza się do postaci:

$$C' = \frac{10^{-6}}{18 \cdot \ln \frac{b_{sr}}{r}} \quad \text{lub} \quad C' = \frac{0,0242}{\log \frac{b_{sr}}{r}} \cdot 10^{-6} \quad (3.15)$$

w której:

$b_{sr}$  – średnia geometryczna odległość przewodu rozważanego do przewodów pozostałych (ta sama co w obliczeniach indukcyjności),  $r$  – promień przewodu.

Zależność pojemności  $C'$  od tych samych wielkości geometrycznych ( $b_{sr}$ ,  $r$ ) co indukcyjności  $L'$  sprawia, że pojemność ta ma własności symetrii dla przewodów fazowych takie same jak indukcyjność. Przeplatanie przewodów fazowych, symetryzujące indukcyjności fazowe, symetryzuje jednocześnie pojemności fazowe [22].

### 3.5. Obliczanie składowej zerowej impedancji linii

Impedancja zgodna i przeciwna linii są sobie równe i oblicza się je według wzorów z punktów 3.1 i 3.2. Równość ta wynika z symetrii linii oraz z faktu, że linia jest elementem statycznym. Impedancja zerowa natomiast w znacznym stopniu zależy od konstrukcji linii, m.in. od liczby przewodów odgromowych. Każdy słup linii WN jest uziemiony przez rezystancję ok. 10  $\Omega$ . Natomiast rozdzielnie są uziemione przez rezystancje bardzo małe, ok. 0,1  $\Omega$ . W ten sposób przewody odgromowe można traktować jako zamknięte pętle ziemnopowrotne, biegnące

równoległe do przewodów roboczych [7]. Składowa ta zależy także w dużym stopniu od konduktancji ziemi oraz liczby torów linii. Ponieważ uwzględnienie tych wszystkich czynników w obliczeniach jest dość kłopotliwe można orientacyjnie przyjmować rezystancję dla składowej symetrycznej zerowej równą:  $R_0 = (2 \div 4) \cdot R_1$ , a stosunek reaktancji indukcyjnej dla składowej symetrycznej zerowej do reaktancji dla składowej symetrycznej zgodnej zgodnie z tab. 3.2.

Tab. 3.2. Wartości reaktancji indukcyjnych dla składowej symetrycznej zerowej jednej fazy linii napowietrznych jednotorowych wyrażone jako wielokrotności reaktancji dla składowej zgodnej [12]

Napięcie znamionowe linii w kV	Rodzaj linii	$X_0/X_1$
110	Bez przewodów odgromowych	3,4
110	Z jednym przewodem odgromowym	3,2
110	Z dwoma przewodami odgromowymi	3,0
220		2,7

Dla linii napowietrznych dwutorowych przyjmuje się wartości 1,5 razy większe od wartości stosunków  $X_0/X_1$  podanych w tab. 3.2. Nowsza literatura podaje nieco inne wartości wielokrotności reaktancji (tab. 3.3.).

Tab. 3.3. Wartości reaktancji indukcyjnych dla składowej symetrycznej zerowej jednej fazy linii napowietrznych jedno- i dwutorowych wyrażone jako wielokrotności reaktancji dla składowej zgodnej [18]

Napięcie znamionowe linii w kV	Rodzaj linii	$X_0/X_1$
110	Jednotorowa bez przewodu odgromowego	3,4
110	Dwutorowa bez przewodu odgromowego	2,4
110	Jednotorowa z jednym przewodem odgromowym	2,9
220		2,0
110	Dwutorowa z dwoma przewodami odgromowymi	2,5
220		2,5
400	Jednotorowa z dwoma przewodami odgromowymi i dwoma przewodami w wiązce	2,2
400	Dwutorowa z dwoma przewodami odgromowymi i dwoma przewodami w wiązce	2,5

### 3.6. Przeplatanie przewodów fazowych linii

Indukcyjność robocza jednostkowa linii posiada określoną stałą wartość tylko w przypadku zastosowania symetrycznego pod względem magnetycznym układu przewodów. Układem symetrycznym pod względem magnetycznym jest linia, której przewody znajdują się w wierzchołkach trójkąta równobocznego. Układ płaski przewodów stanowi układ niesymetryczny pod względem magnetycznym. Dla takiej linii indukcyjności fazowe wynoszą:

$$L' = 4,6 \cdot \left( \log \frac{\sqrt{2} \cdot b_{sr}}{0,78 \cdot r} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.16)$$

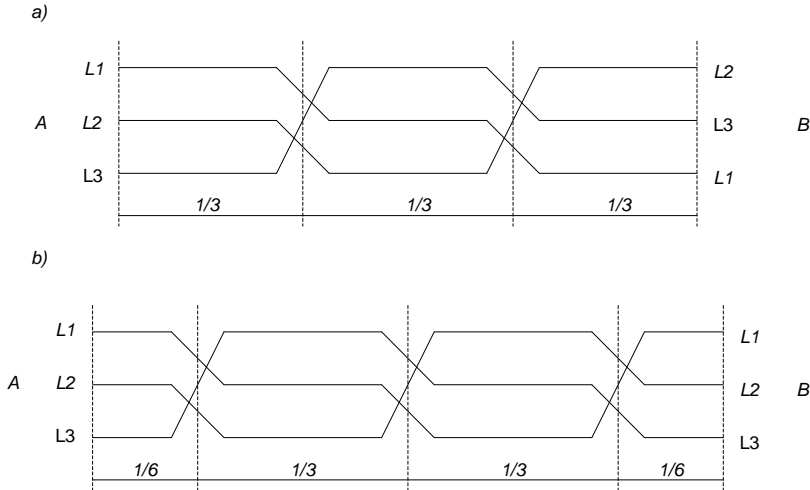
gdzie:

$$b_{sr} = \sqrt{b \cdot 2b} = \sqrt{2} \cdot b \text{ dla fazy L1;}$$

$$b_{sr} = \sqrt{b \cdot b} = b \text{ dla fazy L2;}$$

$$b_{sr} = \sqrt{b \cdot 2b} = \sqrt{2} \cdot b \text{ dla fazy L3.}$$

Jak widać z powyższych zależności przewody skrajne mają inną indukcyjność niż przewód środkowy [16]. Linia przesyłowa powinna być symetryczna pod względem magnetycznym, gdyż w przeciwnym przypadku wystąpią różne spadki i straty napięcia w poszczególnych przewodach fazowych, które są proporcjonalne do indukcyjności poszczególnych przewodów i w efekcie wystąpi asymetria napięć. Dla przywrócenia symetrii magnetycznej w liniach niesymetrycznych pod względem magnetycznym stosuje się tzw. przeplatanie przewodów. W tym celu odcinek linii zawarty między dwoma stacjami transformatorowymi dzieli się na  $n$  odcinków – sekcji, przy czym dla linii trójfazowej  $n$  musi być podzielne przez trzy. Najmniejsza liczba sekcji wynosi zatem trzy. Trzy sekcje tworzą jeden cykl przeplecenia przewodów. Zasadę przeplecenia podano na rys. 3.3a. Aby nie zmieniać kolejności faz przy wejściu do stacji transformatorowej B w stosunku do stacji wyjściowej, tworzy się dwie podsekcje dzieląc jedną z sekcji na dwie równe części, rys. 3.3b.



Rys. 3.3. Zasada przepletania przewodów: a) przeplecenie ze zmianą kolejności faz stacji B w stosunku do stacji A; b) przeplecenie ze zgodnością faz w stacji A oraz stacji B [13]

Indukcyjność przewodu fazy L1 wynosi:

$$\begin{aligned}
 L' &= 4,6 \cdot \frac{l}{3} \cdot \left( \log \frac{\sqrt{2} \cdot b_{\text{sr}}}{0,78 \cdot r} + \log \frac{b_{\text{sr}}}{0,78 \cdot r} + \log \frac{\sqrt{2} \cdot b_{\text{sr}}}{0,78 \cdot r} \right) \cdot 10^{-4} = \\
 &= 4,6 \cdot \frac{l}{3} \cdot \left( \log \frac{2 \cdot b_{\text{sr}}^3}{0,78^3 \cdot r^3} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

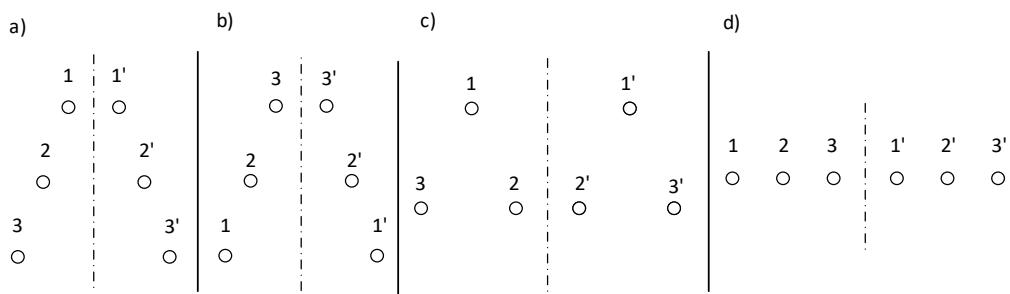
biorąc  $b_{\text{sr}} = \sqrt[3]{2 \cdot b^3} = 1,26 \cdot b$ , otrzymujemy:

$$L' = 4,6 \cdot \frac{l}{3} \cdot \left[ \log \left( \frac{\sqrt[3]{2 \cdot b_{\text{sr}}^3}}{0,78 \cdot r} \right)^3 \right] \cdot 10^{-4} = 4,6 \cdot l \cdot \left( \log \frac{1,26 \cdot b_{\text{sr}}}{0,78 \cdot r} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3.18)$$

Indukcyjność pozostałych faz (L2, L3) będzie taka sama jak dla fazy L1 [13]. W ten sposób otrzymuje się średni, jednostkowy strumień magnetyczny  $\varphi_{\text{sr}}$  jednokowy dla każdego przewodu fazowego.

W liniach dwutorowych, aby uzyskać symetryczny pod względem indukcyjnym układ zawieszenia przewodów należy rozmieścić je w ten sposób, że ich punkty zawieszenia wypadają w wierzchołkach sześcioboku foremnego, przy czym oba przewody tej samej fazy muszą zajmować położenie symetryczne względem środka sześcioboku. Przy każdym innym rozmieszczeniu przewodów ich wzajemne wpływy indukcyjne są różne i takie linie są niesymetryczne [8].

Aby otrzymać jednakowe indukcyjności przewodów fazowych w tych liniach należy zastosować w jednym z torów przeplecenia takie same jak dla linii jednotorowej, a w drugim torze – przeplecenia trzykrotnie częstsze [20].



Rys. 3.4. Przykłady rozmieszczenia na słupie przewodów linii dwutorowych: a) układ jodełkowy, b) układ odwrotny jodełkowy, c) układ dwutrójkątowy, d) układ płaski [8]

Na rys. 3.4. podano przykłady rozmieszczenia przewodów na słupie linii dwutorowej. Przy zawieszeniu przewodów w układzie jodełkowym (rys. 3.4. a) lub w układzie jodełkowym odwróconym należy przestrzegać zasady, aby przy przepleceniu przewody tych samych faz w obu torach umieszczać na tym samym poziomie. Przy zawieszeniu zaś przewodów w układzie płaskim lub dwutrójkątowym należy zachować symetrię przewodów tych samych faz obu torów względem pionowej osi słupa [13].

### 3.7. Obciążalność linii 110 kV

Istotnym parametrem związanym z projektowaniem i eksploatacją linii napowietrznych jest obciążalność. Typowe obciążalności linii napowietrznych 110 kV przedstawia tab. 3.4. Podane w tabeli wartości dotyczą długotrwałej obciążalności linii i są określone dla temperatury otoczenia 30°C w okresie letnim oraz 20°C w okresie zimowym, przy małych prędkościach wiatru (do 0,5 m/s).

Tab. 3.4. Dopuszczalna długotrwała obciążalność wybranych typów przewodów linii napowietrznych 110 kV [4]

Typ przewodów	Dla linii zaprojektowanych na temperaturę pracy przewodów					
	+40°C		+60°C		+80°C	
	Okres letni (IV – X)	Okres zimowy (XI– III)	Okres letni (IV – X)	Okres zimowy (XI– III)	Okres letni (IV – X)	Okres zimowy (XI– III)
AFL 6 – 120 mm <sup>2</sup>	205	405	350	475	410	475
AFLs 10 – 160 mm <sup>2</sup>	240	470	410	550	485	550
AFL 6 – 185 mm <sup>2</sup>	270	540	455	630	535	630
AFL 6 – 240 mm <sup>2</sup>	320	625	550	735	645	735
AFLs 10 – 240 mm <sup>2</sup>	310	605	530	710	620	710
AFLs 10 – 300 mm <sup>2</sup>	365	705	620	830	730	830
AFL 8 – 350 mm <sup>2</sup>	405	785	690	950	810	950
AFL 8 – 525 mm <sup>2</sup>	515	1030	875	1220	1030	1220

Dla niższych temperatur otoczenia lub większych prędkości wiatru, obciążalność linii wzrasta. Dopuszczalną obciążalność wybranych typów przewodów wysokotemperaturowych przedstawiono w tab. 3.5., natomiast porównanie długotrwałych obciążalności wybranych typów przewodów przedstawiono w tab. 3.6.

Tab. 3.5. Dopuszczalna długotrwała obciążalność wybranych typów przewodów wysokotemperaturowych [17]

	Pole przekroju [mm <sup>2</sup> ]	Pole przekroju AFL [mm <sup>2</sup> ]	Obciążalność w [A]			
			750°C	1000°C	1800°C	2000°C
ACCC/TW HAWK	310	240	745	915	1265	1330*
ACCC/TW DOVE	360	280	820	1010	1400	1470*
ACSS CARDINAL	483		1825 <sup>1)</sup>			
ACSR CARDINAL	483		995 <sup>2)</sup>			

\* – temperatura dopuszczalna krótkotrwale;  
<sup>1)</sup> obciążalność prądowa wyznaczona dla temperatury 25°C, temperatura przewodu 200°C;  
<sup>2)</sup> obciążalność prądowa wyznaczona dla temperatury 25°C, temperatura przewodu 75°C.

ACCC/TW (ang. *Aluminum Conductor Composite Core*) jest przewodem o konstrukcji mieszanej aluminiowo–kompozytowej, który wygląda prawie tak jak tradycyjny przewód AFLs. Dzięki profilowanym drutom aluminiowym i mniejszemu rdzeniowi przewód ACCC/TW o identycznej średnicy do przewodu AFL posiada o 20% większe pole przekroju i 25% większą wytrzymałość na zerwanie.

ACSS (ang. *Aluminum Conductor Steel Supported*) – aluminiowy przewód podtrzymywany stalą, który posiada zdolności radzenia sobie z pracą w wysokiej temperaturze. ACSS jest przewodem o konstrukcji mieszanej aluminiowo–stalowej, który wygląda tak jak tradycyjny przewód AFL. Różnica jest w twardości drutów aluminiowych. Druty aluminiowe używane do budowy konwencjonalnych przewodów AFL są twarde w czasie całego okresu ich pracy, podczas gdy druty aluminiowe używane do produkcji ACSS są w pełni wyżarzane – miękkie i nie są przystosowane do przenoszenia obciążeń mechanicznych, za co prawie całkowicie odpowiadają druty stalowe.



Tab. 3.6. Dopuszczalna długość wybranych typów przewodów – porównanie

Przewód AFL Przewód AFLs zamiennik ACCC/TW	Średnica	Pole przekroju całkowite	Pole prze- kroju AI	Rezystancja w 20°C	Obciążenie [A]			
	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>		40°C	60°C	80°C	180°C
AFL-6 120	15,65	143,50	122,00	0,2388	204/288	344/385	431/471	[/]
AFLs-10 160	15,60	177,04	161,18	0,1816	234/330	394/454	496/541	[/]
ACCC/TW 170	15,80	187,70	169,50	0,1652	247/349	416/479	523/571	824/847
AFL-6 185	19,20	215,50	184,70	0,1593	267/376	449/517	565/617	[/]
AFLs-10 240	19,10	261,49	237,26	0,1234	302/425	508/584	639/697	[/]
ACCC/TW 249	19,20	276,80	248,80	0,1126	317/446	532/613	670/731	1059/1089
ACCC/TW 254	19,37	281,80	253,80	0,1103	321/452	540/621	679/741	1073/1104
AFL-6 240	21,70	236,10	276,20	0,1240	313/441	526/605	662/723	[/]
AFLs-10 300	21,70	331,41	299,76	0,0976	352/496	593/682	746/814	[/]
ACCC/TW Oslo 310	22,40	378,00	317,70	0,0882	371/522	624/718	785/857	1246/1280
ACCC/TW 325	22,00	365,40	325,70	0,0860	377/531	635/730	799/871	1266/1301
AFL-8 350	26,10	402,90	356,70	0,0821	406/572	684/786	861/939	[/]
AFL-8 400	27,90	460,40	407,60	0,0718	443/624	746/858	939/1025	[/]
AFLs-10 525	27,80	558,57	508,77	0,0575	494/696	833/956	1049/1144	[/]
AFL-8 525	31,50	586,90	519,50	0,0564	519/730	874/1004	1101/1201	[/]

Przyjmowane obecnie wartości obciążalności długotrwałej przewodów linii napowietrznych są wyznaczone na podstawie pesymistycznych założeń co do warunków pogodowych tzn. temperatura otoczenia 30°C, prędkość wiatru 0,5 m/s, nasłonecznienie 1000 W/m<sup>2</sup>, kierunek wiatru 90°. W rzeczywistości warunki takie występują rzadko, dlatego przyjmując, że prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przy takich warunkach pogodowych jest nieduże oraz biorąc również pod uwagę informacje zawarte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej [10] oraz Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej [11], można dopuścić krótkotrwałą pracę linii z przeciążeniem do 20% (generalnie przyjmuje się, jako linie zagrożone przeciążeniem, te, które obciążające się powyżej 80%).

Planując modernizację linii często dobiera się tak przewody nowszej generacji, aby nie było konieczności wymiany słupów. Możliwe jest stosowanie:

- AFLs10 160 zamiast AFL6 120;
- AFLs10 240 zamiast AFL6 185;
- AFLs10 300 zamiast AFL6 240.

Podobnie, w przypadku stosowania przewodów wysokotemperaturowych (HTLS) możliwy jest precyzyjny dobór „zamienników”, jednakże poglądy operatorów sieci na temat celowości stosowania przewodów tego typu nie są jednolite.

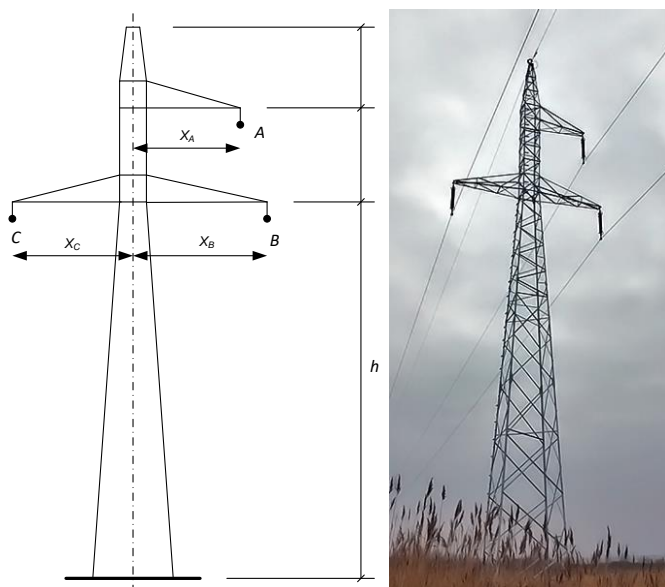
### **3.8. Charakterystyczne wymiary konstrukcji wsporczych**

Zaimplementowane w bazie danych (patrz rozdz. 5) algorytmy do wyznaczania parametrów jednostkowych przewodów linii napowietrznych zostały opracowane na podstawie omówionych w zależności. Kluczowym elementem jest właściwe odwzorowanie zawieszenia przewodów na konstrukcji wsporczej. Oprócz oczywistych parametrów takich jak typ przewodu, materiał z jakiego został wykonany oraz przekrój poprzeczny, należy podać współrzędne zawieszenia. W dalszej części rozdziału przedstawiono wybrane sylwetki słupów oraz charakterystyczne odległości. W uwagi na dużą różnorodność konstrukcji wsporczych ograniczono się do prezentacji typowego słupa jedno- i dwutorowego. W bazie danych odwzorowane zostały wszystkie sylwetki słupów występujące na terenie Polski. Wszystkie wymiary przechowywane w bazie danych służące do opisu parametrów technicznych poszczególnych serii słupów, opisane są zgodnie z rys. 3.5. ÷ rys. 3.8. Dane te, są niezbędne do wyliczenia parametrów elektrycznych linii. Za środek układu współrzędnych w każdym przypadku przyjmowano punkt przecięcia konstrukcji pionowej słupa z dolnym poprzecznikiem. W tab. 3.7. i tab. 3.8., oprócz symbolu serii słupa znajdują się symbole oznaczające zadanie, jakie spełniają słupy w linii.

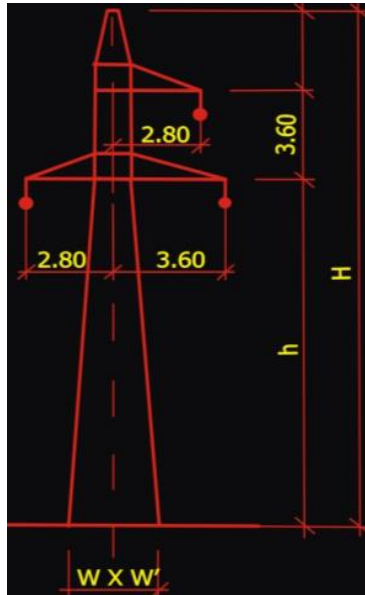
Można rozróżnić następujące rodzaje słupów:

- słupy przelotowe (P) – przeznaczone do podtrzymywania przewodów bez przejmowania naciągu lub przejmujące nieznaczny naciąg i ustawione na szlaku prostym;
- słupy narożne (N) – przeznaczone są do podtrzymywania przewodów i przejmowania wypadkowej siły naciągu wynikającej z kąta załomu, na którym słup jest ustawiony;
- słupy odporowe (O) – przeznaczone są do przejmowania naciągu, ustawione na szlaku prostym lub na załomie nie przekraczającym  $5^\circ$  i przeznaczone są do umiejscowienia zakłóceń mechanicznych;
- słupy odporowo–narożne (ON) – łączą cechy słupów odporowych i narożnych;
- słupy krańcowe (K) – przejmują jednostronnie naciąg przewodów i ustawione są na zakończeniu linii;
- słupy rozgałęźne (R) – są ustawione w punkcie rozgałęzienia linii;
- słupy przelotowe skrzyżowaniowe (PS);
- słupy mocne (M).

W tab. 3.7. i tab. 3.9. zawarte są także informacje na temat charakterystycznych odległości pomiędzy przewodami roboczymi i odgromowymi. W tab. 3.8. i tab. 3.10. umieszczone są informacje na temat wysokości  $h$  (rys. 3.5. i rys. 3.7.).



Rys. 3.5. Sylwetka słupa serii B2 – linia jednotorowa



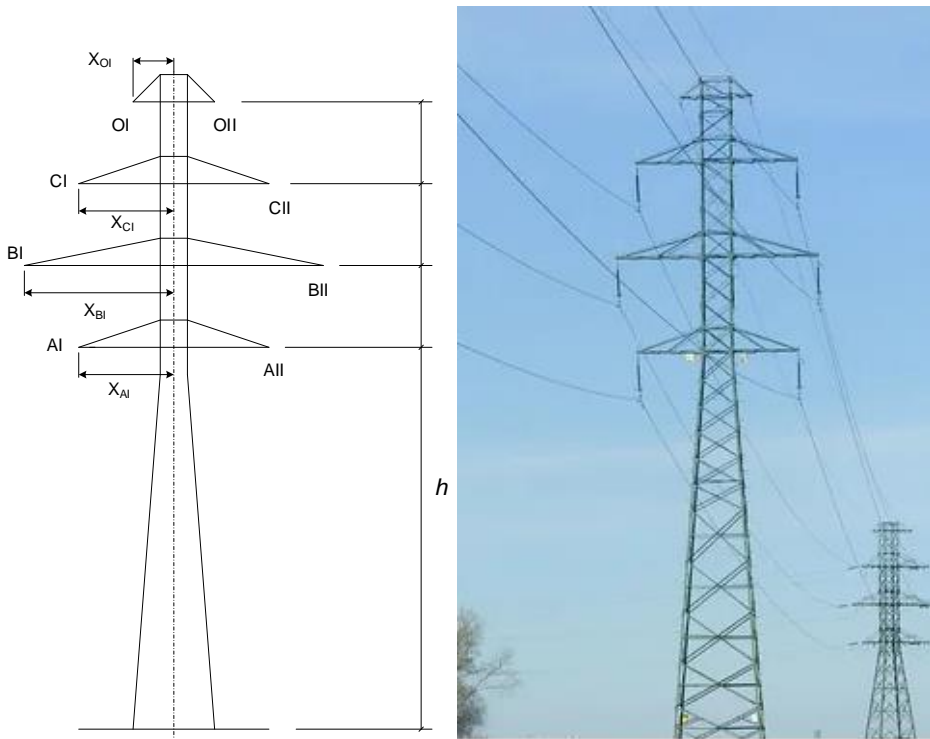
Rys. 3.6. Sylwetka słupa serii B2 (z przykładowymi wymiarami – odstępami w [m])

Tab. 3.7. Parametry techniczne dla serii słupów B2 (odległości w metrach)

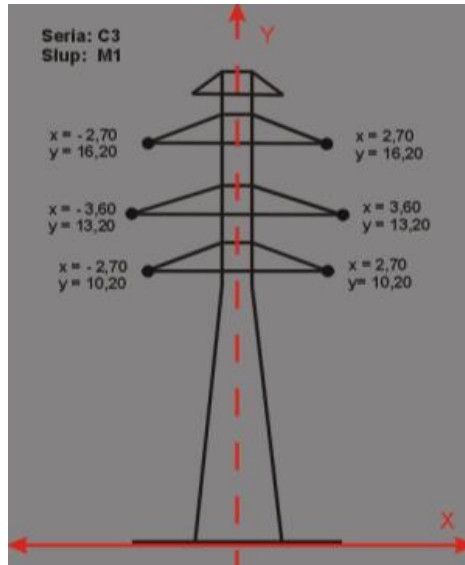
B2	Przewód roboczy						AFL-6 240			
	Przewód odgromowy						AFL-1,7 70			
	Liczba przewodów odgromowych						1			
	$X_A$	$Y_A$	$X_B$	$Y_B$	$X_C$	$Y_C$	$X_{OI}$	$Y_{OI}$	$X_{OII}$	$Y_{OII}$
P	2,8	3,6	3,6	0	-2,8	0	0	6,6	-	-
PS	2,8	3,9	3,6	0	-2,8	0	0	6,9	-	-
PL	2,5	7,8	2,5	3,9	2,5	0	0	10,8	-	-
N	4,2	3,9	5,0	0	-4,2	0	0	6,9	-	-
M3	0	3,6	3,0	0	-3,0	0	0	7,1	-	-
M6	0	3,6	2,5	0	-3,5	0	0	7,1	-	-
M9	0	3,6	1,9	0	-4,3	0	0	7,1	-	-

Tab. 3.8. Parametry techniczne dla serii słupów B2 (wysokość nad ziemią)

B2	P	PS	PL	N	M3	ML3	M6	M9
$h$ [m]	14	14	14	14	10	10	10	10
	16,5	16,5	16,5	16,5	12,5	12,5	12,5	12,5
	19	19	19	19	15	15	15	15
	24	24	24	24	20	20	20	20



Rys. 3.7. Sylwetka słupa C3 – linia dwutorowa



Rys. 3.8. Sylwetka słupa C3 (z przykładowymi wymiarami – odległości w metrach)

Tab. 3.9. Parametry techniczne dla serii słupów C3 (odległości w metrach)

C3	Przewód roboczy						AFL-8 350			
	Przewód odgromowy						AFL-1,7 95			
	Liczba przewodów odgromowych*						2			
	$X_{AI}$	$Y_{AI}$	$X_{BI}$	$Y_{BI}$	$X_{CI}$	$Y_{CI}$	$X_{OI}$	$Y_{OI}$	$X_{OII}$	$Y_{OII}$
P	-3,1	0	-3,9	3,3	-3,1	7,2	-1,5	9,9	1,5	9,9
PL	-4,0	0	-4,9	4,0	-4,0	8,0	-1,3	11,2	1,3	11,2
Pm	-2,57	0	-3,37	4,0	-2,57	8,0	-0,97	10,2	0,97	10,2
M1	-2,7	0	-3,6	3,0	-2,7	6,0	-1,6	9,2	1,6	9,2
M3	-3,4	0	-4,3	3,0	-2,0	6,2	-2,0	9,4	2,0	9,4

\* – tor II symetryczny względem osi Y

Tab. 3.10. Parametry techniczne dla serii słupów C3

C3	P	PL	Pm	M1	M3
h [m]	17	19	17	10,2	10,2
	19,5	21,5	19,5	12,7	12,7
	22	24	22	15,2	15,2

Parametry elektryczne linii elektroenergetycznych, przedstawione w tab. 3.11. i tab. 3.12. wyznaczone na podstawie topologii zawieszenia przewodów na konstrukcjach wsporczych, przy rezystywności gruntu  $\rho = 500 \Omega \cdot m$ .

Tab. 3.11. Parametry elektryczne dla serii słupów B2

B2	Przewód roboczy					AFL-6 240			
	Przewód odgromowy					AFL-1,7 70			
	Liczba przewodów odgromowych					1			
	$R_1$	$R_2$	$R_0$	$X_1$	$X_2$	$X_0$	$R_{0M}$	$X_{0M}$	$B$
	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\mu S/km$
P	0,12	0,12	0,37	0,4	0,4	1,11	0	0	2,71
PS	0,12	0,12	0,37	0,4	0,4	1,11	0	0	2,7
PL	0,12	0,12	0,36	0,398	0,398	1,14	0	0	2,75
N	0,12	0,12	0,36	0,42	0,42	1,10	0	0	2,61
M3	0,12	0,12	0,37	0,4	0,4	1,12	0	0	2,74
M6	0,12	0,12	0,37	0,4	0,4	1,12	0	0	2,74
M9	0,12	0,12	0,37	0,4	0,4	1,12	0	0	2,73

Tab. 3.12. Parametry elektryczne dla serii słupów C3

C3	Przewód roboczy					AFL-8 350			
	Przewód odgromowy					AFL-1,7 95			
	Liczba przewodów odgromowych					2			
	$R_1$	$R_2$	$R_0$	$X_1$	$X_2$	$X_0$	$R_{0M}$	$X_{0M}$	$B$
	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\Omega/km$	$\mu S/km$
P	0,084	0,084	0,26	0,38	0,38	0,94	0,17	0,46	2,87
PL	0,084	0,084	0,25	0,39	0,39	0,96	0,17	0,54	2,82
Pm	0,084	0,084	0,25	0,39	0,39	0,95	0,17	0,497	2,82
M1	0,084	0,084	0,26	0,37	0,37	0,95	0,175	0,47	2,95
M3	0,084	0,084	0,26	0,37	0,37	0,96	0,175	0,45	2,93
M6	0,084	0,084	0,26	0,37	0,37	0,96	0,17	0,45	2,93

## 4. Wstęp do teorii baz danych

Baza danych to zbiór informacji zapisanych w odpowiednim formacie. Format zapisu danych pozwala na dostęp do danych. W zależności od zastosowania dane zapisywane są w różny sposób. Sposób zapisu danych ma wpływ na wydajność poszczególnych operacji (zapisu, odczytu, usunięcia i modyfikacji danych). Istnieje wiele rodzajów baz danych oraz ich definicji. Jednym z najbardziej popularnych jest relacyjna baza danych. Określenie relacyjna baza danych opisuje bazę danych, w której dane zapisane są w postaci tak zwanych krotek (wierszy). Krotki mają swoje atrybuty. Każda krotka zapisana jest w relacji (rys. 4.1.). Bazy danych różnią się między sobą implementacją. Różnią się także wersją języka SQL (ang. *Structured Query Language*), którą obsługują. Chociaż istnieje standard opisujący język SQL występują drobne różnice pomiędzy wersjami SQL obsługiwanym przez poszczególne bazy danych [6, 9].

PESEL	Imię	Nazwisko	Wykształcenie
72030400264	Adam	Kowalski	Podstawowe
65083104569	Marcin	Kowalski	Średnie
71123108664	Marcin	Dąbrowski	Wyższe
85041406333	Anna	Kowalska	Podstawowe
46111006545	Anna	Dąbrowska	Wyższe

The diagram includes the following labels and arrows:

- krotka rekord (wiersz)**: Points to the first row of the table.
- atrybut (kolumna)**: Points to the header row of the table.
- pole**: Points to the 'Wyższe' cell in the third row, fourth column.
- wartość**: Points to the 'Wyższe' cell in the third row, fourth column.

Rys. 4.1. Podstawowa struktura danych przedstawiana w postaci tabeli

Operacje w relacyjnych bazach danych oparte są o algebrę relacji. Dostęp do danych możliwy jest dzięki użyciu SQL. SQL to język charakterystyczny dla baz danych [1, 5].

W skrypcie, do modelowania linii WN wykorzystano system bazodanowy Access firmy Microsoft [38]. Microsoft Access jest narzędziem do tworzenia relacyjnych baz danych. Zbudowany jest z wielu obiektów połączonych ze sobą strukturalnie. Do tych obiektów zalicza się: tabele, kwerendy, formularze, raporty, makra, moduły. Tabele są jedynym obiektem służącym do przechowywania danych, natomiast kwerendy służą do modyfikowania tych danych lub łączenia pól z wielu tabel. Formularze i raporty są obiektami prezentującymi dane. Tabele służą do przechowywania danych, które można pobrać za pomocą kwerend i wyświetlić za pomocą raportu albo za pomocą formularza (rys. 4.2.).



ID Słupa	Seria	Rodzaj słupa	Typ słupa	Napiecie po	Rozpiętość f.	Liczba torów	Liczba przewodów odgrc	Długość łań
2178	A	P	-2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2179	A	P	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2180	A	P	+2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2181	A	P	+5,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2182	A	PS	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2183	A	PS	+2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2184	A	PS	+5,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2185	A	O	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2186	A	O	+2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2187	A	O	+5,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2188	A	ON	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2189	A	ON	+2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2190	A	ON	+5,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2191	A	K	-2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2192	A	K	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2193	A	K	+2,5 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2194	A	K	+5,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2195	A	KN	-4,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2196	A	KN	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2197	Ac	P	-3,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2198	Ac	P	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2199	Ac	P	+3,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2200	Ac	P	+6,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2201	Ac	P	+9,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2202	Ac	ONI	-3,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2203	Ac	ONI	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2204	Ac	ONI	+3,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2205	Ac	ONI	+6,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2206	Ac	ONI	+9,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2207	Ac	ONII	-3,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2208	Ac	ONII	+0,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n
2209	Ac	ONIII	+3,0 m	110,0 kV	300,0 m	1	2	1,5 n

Rys. 4.2. Struktura bazy danych Access

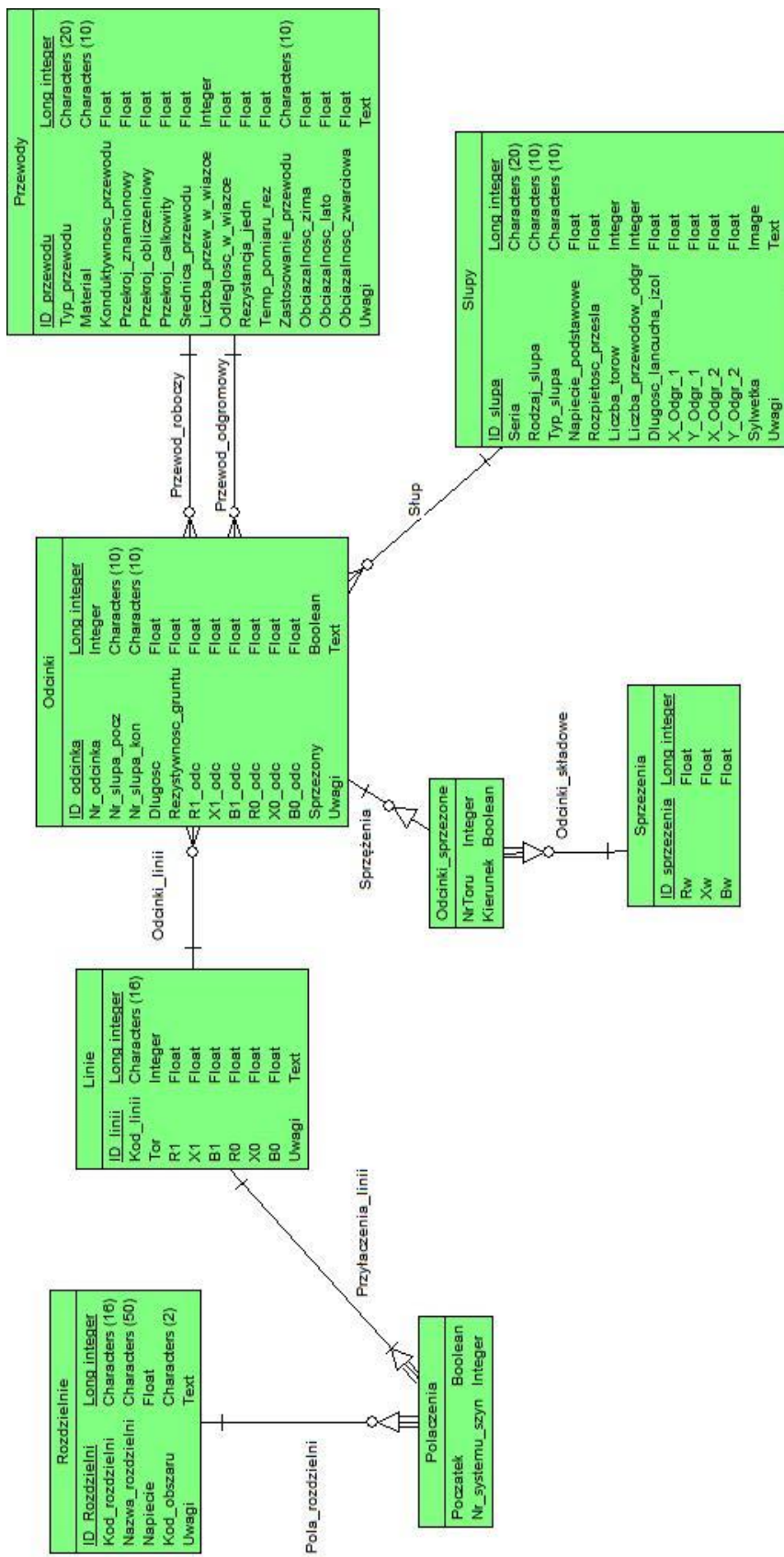
Należy zaznaczyć, że raporty i formularze korzystają z danych pochodzących bezpośrednio z tabel lub dane te, mogą być filtrowane przez kwerendy. Zdarzenia w formularzach i raportach (widoczne w widoku projekt) mogą być wywoływane przez makra lub procedury VBA (ang. *Visual Basic for Applications*) [23]. Zdarzenie jest to każda zmiana w stanie obiektu w Accessie. Przykładem są makra lub procedury VBA wywoływane w odpowiedzi na otwieranie okna formularza, zmiany danych w bieżącym rekordzie, czy indywidualnym formancie (obiekt w formularzu lub raporcie, który zawiera dane) lub wprowadzenie nowego wiersza za pośrednictwem formularza. Makro lub procedurę można zaprojektować tak, by przy wprowadzaniu danych reagowały na naciśnięcie przycisku. Korzystając z makr i modułów można zmieniać przebieg aplikacji: otwierać, filtrować i modyfikować dane w formularzach oraz raportach, wykonywać kwerendy i budować nowe tabele. Za pomocą VBA można stworzyć, zmodyfikować lub usunąć każdy obiekt w Accessie; manipulować danymi w bazie danych w każdym wierszu i kolumnie oraz definiować obsługę wyjątków.

Oprócz funkcji bazodanowych do przechowywania i ewidencji parametrów linii, opracowane zostały procedury do wyznaczania parametrów jednostkowych fragmentów linii na podstawie sylwetek słupów i przewodów roboczych i odgronowych. Szczegółowy opis bazy danych zostanie przedstawiony w rozdz. 5.

## **5. Przykład wykorzystania bazy danych do ewidencji parametrów linii elektroenergetycznych**

### **5.1. Projekt bazy danych**

Na podstawie wieloletnich doświadczeń autora, opracowany został projekt bazy danych do wyznaczania parametrów linii WN. Baza danych składa się z wielu tabel połączonych ze sobą różnymi relacjami: jeden do jednego, jeden do wielu oraz wiele do wielu. Opisywana baza danych ma przechowywać nie tylko parametry słupów i przewodów, ale także topologię analizowanej sieci, czyli rozdzielnie i linie sieci wysokich i najwyższych napięć. Strukturę stworzonej bazy danych przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Struktura bazy danych zaprezentowana w programie Power Designer [39]

## 5.2. Opis aplikacji bazodanowej

Ekranem startowym opisywanej bazy danych jest formularz Rozdzielnie (rys. 5.2.). Z tego poziomu można dokonywać przeglądu wprowadzonych już rozdzielni, dodawać je do bazy lub usuwać. Prezentowane są: Nazwa kodowa rozdzielni, Nazwa długa (pełna), poziom napięcia, Obszar (w opisywanym przypadku jest to obszar 3, czyli Katowice) oraz Oddział (np. Opole, Będzin itp. – pole to jest polem opcjonalnym). Z poziomu tego formularza można dodać nową rozdzielnię (pojawi się podformularz widoczny na rys. 5.3.) lub usunąć rozdzielnię już istniejącą.

Nazwa kodowa	Nazwa długa	Napięcie	Obszar	Oddział/Właściciel
KAD1	KĄDZIELÓW-110	110,0 kV	3	
KAL1	KALWARIA-110	110,0 kV	3	
KAM1	KAMIENIEC-110	110,0 kV	3	
KAR1	KAROL-110	110,0 kV	3	
KAT1	KATOWICE-110	110,0 kV	3	
KAT2	KATOWICE-220	220,0 kV	3	
KAW1	KAWODRZA-110	110,0 kV	3	
KAZ1	KAZIMIERZ-110	110,0 kV	3	
KBO1	KOP.BOBREK-110	110,0 kV	3	
KCE1	KLUCZNIKOWICE-110	110,0 kV	3	
KDN1	KIEDRZYŃ-110	110,0 kV	3	
KDR1	KĘDZIERZ-110	110,0 kV	3	
KED1	KĘDZIERZYN-110	110,0 kV	3	
KED2	KĘDZIERZYN-220	220,0 kV	3	
KET1	KĘTY-110	110,0 kV	3	
KHA1	KOP.HALEMBA-110	110,0 kV	3	
KLA1	KLIKOWA-110	110,0 kV	3	
KLA2	KLIKOWA-220	220,0 kV	3	
KLC1	KLUCZE-110	110,0 kV	3	

Rys. 5.2 Ekran początkowy – Lista Rozdzielni

**KAD1 - KĄDZIELÓW-110**

**Dane rozdzielni:**

Nazwa kodowa	KAD1
Nazwa długa	KĄDZIELÓW-110
Napięcie	110,0 kV
Obszar	Katowice
Oddział	

Uwagi:

Rys. 5.3. Formularz edycyjny – Rozdzielnia

Kolejną możliwością bazy danych jest prezentacja wprowadzonych już linii 110 kV (rys. 5.4.). Pojawia się lista linii posortowana według kodu, prezentowane są ponadto: rozdzielnia będąca węzłem początkowym oraz rozdzielnia będąca węzłem końcowym. Uzyskujemy również informację o liczbie torów (w przypadku odcinków wielotorowych). Zastosowany mechanizm podwójnego kliknięcia zarówno w nazwę rozdzielni jak i nazwę linii przenosi użytkownika do szczegółowego opisu wybranego obiektu. Tak jak w przypadku rozdzielni, również dla linii istnieje możliwość dodania nowego obiektu – przycisk **Dodaj linię**, w przypadku usuwania – przycisk **Usuń linię**.

**Lista Linii** Znajdź linię:

Nazwa kodowa	Rozdz. pocz.	Rozdz. kon.	Tor
S407	KĄDZIELÓW-110	ŁAGISZA-110	1
S111	ANIOŁÓW-220	ANDRYCHÓW-110	1
S112	ALEKSANDROWICE-110	ALWERNIA-110	1

Rys. 5.4. Formularz Lista Linii

Sposób definiowania parametrów nowej linii został przedstawiony na rys. 5.5. Należy podać nazwę kodową linii, liczbę torów, węzeł początkowy i końcowy oraz wprowadzić podział na odcinki. Liczba odcinków definiowana przez użytkownika zależy od budowy konkretnej linii – typ słupa, rodzaj przewodu roboczego i odgromowego. Użytkownik może wprowadzać odcinki przeszło po przeszło lub grupować kilka przeszła w jeden odcinek. Dalsze obliczenia parametrów elektrycznych przeprowadzane są dla całego odcinka linii.

### S407

**Dane linii:**

Nazwa kodowa:

Tor:

Długość linii:

**Topologia**

Rozdzielnia	Początek?	Nr systemu szyn
KAD1 - KĄDZIELÓW-110	Tak	1
LAG1 - ŁAGISZA-110	Nie	1

**Parametry elektryczne:**

R1:  Rj:

X1:  Xj:

B1/2:

R0:

X0:

B0/2:

Uwagi:

**Odcinki linii:**

Nr odcinka	Długość	Nr Słupa pocz.	Nr Słupa kon.	Słup	Przewod_roboczy	Przewod_odgromowy	Sprzężony?
1	8,000 km	BR	25	B2	AFL-6 240	AFL-1,7 50	Nie
2	6,000 km	25	38	S120	AFL-6 240	AFL-1,7 70	Nie
3	14,800 km	38	BR	S24	AFL-6 120	AFL-1,7 50	Nie
*							Nie

Rys. 5.5. Formularz do edycji parametrów linii z podziałem na odcinki

Definicję nowego odcinka można przeprowadzić na podformularzu widocznym na rys. 5.5. (Odcinki linii). Należy podać długość odcinka (numer odcinka generowany jest automatycznie), numer słupa początkowego i końcowego, typ słupa (wybierany z listy rozwijanej) oraz typ przewodu roboczego i odgromowego (również wybierany z listy rozwijanej). W tym miejscu można również zdefiniować czy w obliczeniach będą uwzględniane sprzężenia magnetyczne.

### Odcinek nr 1 linii: S407

**Dane odcinka:**

Długość:

Nr Słupa pocz.:

Nr Słupa kon.:

Słup:

Przewod\_roboczy:

Przewod\_odgromowy:

Rezystywność gruntu:

**Parametry elektryczne:**

R1:  Rj:

X1:  Xj:

B1/2:

R0:

X0:

B0/2:

Uwagi:

Odcinek Sprzężony?

Rys. 5.6. Formularz – edycja parametrów odcinka

Po zdefiniowaniu parametrów odcinka można przystąpić do wyznaczania jego wielkości elektrycznych. W tym celu wybieramy przycisk *Parametry* odcinka (rys. 5.5.) – pojawia się formularz widoczny na rys. 5.6. Teraz na podstawie wprowadzonych informacji (słup, przewody) można obliczyć parametry elektryczne analizowanego odcinka. Po naciśnięciu przycisku *Oblicz parametry* następuje wywołanie wewnętrznych algorytmów wyznaczania parametrów linii 110 kV na podstawie m.in. geometrii przewodów na słupie oraz parametrów geometrycznych przewodów. Do bazy danych zwracane są wyliczone parametry. Należy podkreślić, że w przypadku susceptancji posługujemy się połową wartości całkowitej. Edycję parametrów przewodu można dokonać na formularzu przedstawionym na rys. 5.7.

**16/421 32** Znajdź przewód

**Dane przewodu:**

Typ przewodu:

Materiał:

Konduktywność:

Przekrój znamionowy:

Przekrój obliczeniowy:

Przekrój całkowity:

Średnica:

Liczba przewodów w wiązce:

Rezystancja jedn.:

Temperatura pomiaru rezyst.:

Zastosowanie przewodu:

**Obciążalności:**

Obciążalność zimowa:

Obciążalność letnia:

Obciążalność zwarciowa:

Uwagi:

Rys. 5.7. Formularz – Edycja parametrów przewodu

Jak wspomniano wcześniej, definicja odcinków z podziałem na słupy i przewody polega na wybieraniu tych obiektów z listy rozwijanej (katalog słupów i przewodów przygotowany na podstawie dokumentacji i dokumentów normatywnych [14, 15]). W przypadku braku słupa lub przewodu (brak informacji katalogowej), użytkownik może wprowadzić te informacje samodzielnie. Na rys. 5.8. i rys. 5.9. przedstawiono formularz opisujący wymagane parametry sylwetek wsporczych słupów, jedno- i dwutorowych. Przy czym, dla wyróżnienia typu słupa (jedno- i dwutorowy) prezentowane są one na innym tle.

**A P -2,5** Znajdź słup:

**Dane słupa:**

Seria:   
 Rodzaj słupa:   
 Typ słupa:   
 Napięcie podstawowe:   
 Rozpiętość przęsła:   
 Liczba torów:   
 Liczba przewodów odgromowych:   
 Długość łańcucha izolatorów:

**Przewody odgromowe:**

Tor 1: X   
 Y   
 Tor 2: X   
 Y

Uwagi:

**Sylwetka słupa:**

**Geometria Słupa:**

Nr_toru	Faza L1: X	Y	Faza L2: X	Y	Faza L3: X	Y
1	-4,30 m	13,80 m	0,00 m	13,80 m	4,30 m	13,80 m

Rys. 5.8. Formularz – edycja parametrów słupa (słup jednotorowy)

**OS24 P 0** Znajdź słup:

**Dane słupa:**

Seria:   
 Rodzaj słupa:   
 Typ słupa:   
 Napięcie podstawowe:   
 Rozpiętość przęsła:   
 Liczba torów:   
 Liczba przewodów odgromowych:   
 Długość łańcucha izolatorów:

**Przewody odgromowe:**

Tor 1: X   
 Y   
 Tor 2: X   
 Y

Uwagi:

**Sylwetka słupa:**

**Geometria Słupa:**

Nr_toru	Faza L1: X	Y	Faza L2: X	Y	Faza L3: X	Y
1	-3,50 m	18,00 m	-4,30 m	15,00 m	-3,50 m	
2	3,50 m	18,00 m	4,30 m	15,00 m	3,50 m	

Rys. 5.9. Formularz – edycja parametrów słupa (słup dwutorowy)



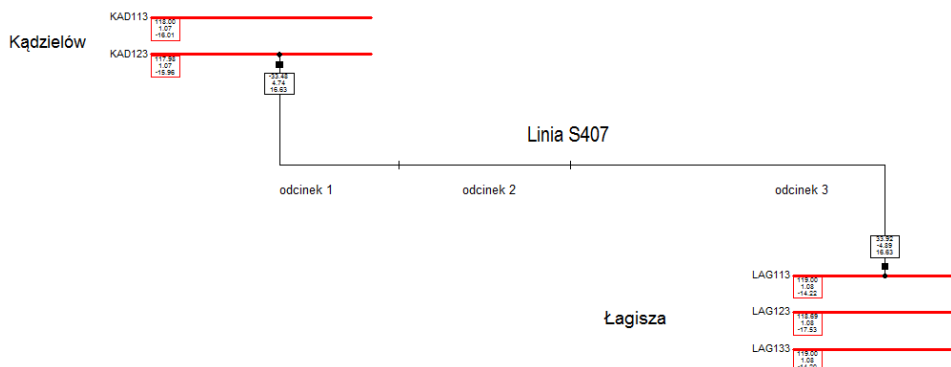
## 6. Przykład wykorzystania narzędzi komercyjnych do modelowania linii elektroenergetycznych

Wyniki modelowania linii z wykorzystaniem baz danych porównano z dedykowanym programem do prowadzenia obliczeń energetycznych PowerFactory (PF) firmy DigSilent [34]. Rozwój oprogramowania DigSilent (ang. *DIGital SIMulator for Electrical NeTwork*) rozpoczął się w roku 1979, od tego czasu wyznaczył on standardy i trendy w modelowaniu, analizie i symulacji SEE. PowerFactory jest funkcjonalnym i rozbudowanym narzędziem stosowanym przy modelowaniu elementów składowych SEE jak również do prowadzenia złożonych obliczeń i symulacji. Projektowanie, budowa i sterowanie pracą systemu elektroenergetycznego staje się coraz bardziej skomplikowane ze względu na rozległość sieci i rozproszenie generacji, przez to zwiększają się wymagania w stosunku do narzędzi programistycznych w zakresie jakości danych, elastyczności i łatwości obsługi. Zaletą tego narzędzia jest możliwość analizy zjawisk elektromechanicznych i elektromagnetycznych, prowadzenia obliczeń rozptyłu mocy, obliczeń zwarciovych, doboru zabezpieczeń i wielu innych. Dzięki swojej funkcjonalności znalazł również wdrożenia na rynku polskim. Posiada możliwości modelowania różnych obiektów energetycznych takich jak generatory, transformatory, linie elektroenergetyczne itd., można również skorzystać z szerokiej biblioteki programu elementów dodatkowych. PowerFactory może być wykorzystywany jako samodzielny system symulacyjny, jak również być zintegrowany z innymi programami do analizy sieci elektroenergetycznej. Najważniejsze funkcje obsługiwane przez PF:

- analiza zwarć,
- analiza bilansu mocy,
- analiza harmonicznych,
- badania stabilności,
- symulacje zabezpieczeń i ich koordynacja,
- obliczenia ekonomiczne i niezawodnościowe,
- modelowanie układów przesyłowych.

Ta ostatnia funkcjonalność programu PF została wykorzystana w celu porównania otrzymanych z bazy danych wyników. W celu porównania wyznaczonych parametrów linii 110 kV, w obu programach (PF i Baza danych) zamodelowano ten sam odcinek linii napowietrznej 110 kV relacji Kądziałów – Łągisza o długości 28,8 km. Linia została testowo podzielona na trzy pododcinki. Sposób modelowania (program PF) oraz wprowadzone parametry sylwetek słupów, przewodów roboczych i odgromowych zostały przedstawione na rys. 6.1. ÷ rys. 6.10.

Pierwszym krokiem pozwalającym na odwzorowanie modelu matematycznego linii WN jest wskazanie jej lokalizacji pomiędzy istniejącymi węzłami sieci (pomiędzy rozdzielniami). Analizowana linia w układzie topologicznym została przedstawiona na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Analizowana linia w układzie topologicznym z podziałem na odcinki

Jeżeli zachodzi potrzeba podziału linii na odcinki np. w celu definicji sprzężeń magnetycznych pomiędzy torami linii dwutorowej, należy określić ich liczbę oraz długość (rys. 6.2).

Name		Odcinek 1	
Type		1 Kraj\B2_P_0	
Line		1 Kraj\Linia S407	
Terminals of Line			
Terminal i		1 Kraj\KAD123\Cub_1	
Terminal j		1 Kraj\LAG113\Cub_1	
Topology		Resulting Values	
Start of Section	0. km	Rated Current	1. kA
Length	8. km	Pos. Seq. Impedance, Z1	3.394479 Ohm
Derating Factor	1.	Pos. Seq. Impedance, Angle	72.88149 deg
Type of Line	Tower Type	Pos. Seq. Resistance, R1	0.9991616 Ohm
		Pos. Seq. Reactance, X1	3.244097 Ohm
		Zero Seq. Resistance, R0	3.121221 Ohm
		Zero Seq. Reactance, X0	8.814665 Ohm
		Earth-Fault Current, Ice	2.577772 A

Rys. 6.2. Parametry odcinka 1 – dane wprowadzane przez użytkownika oraz obliczone przez program PF

Kolejnym krokiem wyznaczania parametrów elektrycznych linii jest określenie szczegółowej budowy przewodów roboczych i odgromowych. Przykład definicji przewodów roboczych i odgromowych dla linii S407 zamieszczono na rys. 6.3. Należy podać typ przewodów oraz przekroje poprzeczne. W tym miejscu można także określić liczbę torów linii oraz liczbę przewodów odgromowych.

The screenshot shows a software interface for defining line parameters. The fields are as follows:

- Name: B2 P 0
- Nominal Frequency: 50 Hz
- Number of Earth Wires: 1
- Number of Line Circuits: 1
- Transposition: circuit wise
- Input Mode: Geometrical Parameter (selected)
- Earth Conductivity: 100 uS/cm

Below these fields are two tables:

**Types of Earth Conductors:**

	Conductor Types TypCon	
▶ Earth Conductor 1	AFL-1.7 50	

**Conductor Types of Line Circuits:**

	Conductor Types TypCon	Num. of Phases	Transposition	
▶ Circuit 1	AFL-6 240	3	<input checked="" type="checkbox"/>	

Rys. 6.3. Definicja przewodów roboczych i odgromowych dla linii S407 (odcinek 1)

Na rys. 6.4. i rys. 6.5. przedstawiony został przebieg odwzorowania parametrów przewodów roboczych i odgromowych analizowanej linii dla odcinka 1. Na podstawie szczegółowych informacji o przewodach, program obliczy jednostkowe parametry elektryczne linii. W tym celu należy zdefiniować: napięcie znamionowe linii, liczbę przewodów w wiązce, konstrukcję pojedynczego przewodu, promień przewodu oraz rezystancję przewodu w temperaturze 20°C. Do obliczenia reaktancji i susceptancji linii, oprócz geometrycznej budowy przewodów roboczych i odgromowych potrzebna jest znajomość topologii zawieszenia ich na konstrukcji wsporczej. Przykład sposobu definicji konstrukcji wsporczej dla odcinka 1 z odpowiednimi odległościami przedstawiono na rys. 6.6. i rys. 6.7. Konwencję opisu konstrukcji wsporczych omówiona została w rozdz. 3.8.

Name	AFL-1.7 50	
Nominal Voltage	110.	kV
Nominal Current	1.	kA
Number of Subconductors	1	$\frac{+}{-}$
Conductor Model		
	<input checked="" type="radio"/> Solid Conductor	
	<input type="radio"/> Tubular Conductor	
[Sub-)Conductor		
DC-Resistance (20°C)	0.614	Ohm/km
GMR (Equivalent Radius)	4.38	mm
Outer Radius	5.625	mm

Rys. 6.4. Parametry przewodów odgromowych dla linii S407 (odcinek 1)

Name	AFL-6 240	
Nominal Voltage	110.	kV
Nominal Current	1.	kA
Number of Subconductors	1	$\frac{+}{-}$
Conductor Model		
	<input checked="" type="radio"/> Solid Conductor	
	<input type="radio"/> Tubular Conductor	
[Sub-)Conductor		
DC-Resistance (20°C)	0.1246	Ohm/km
GMR (Equivalent Radius)	8.45	mm
Outer Radius	10.85	mm

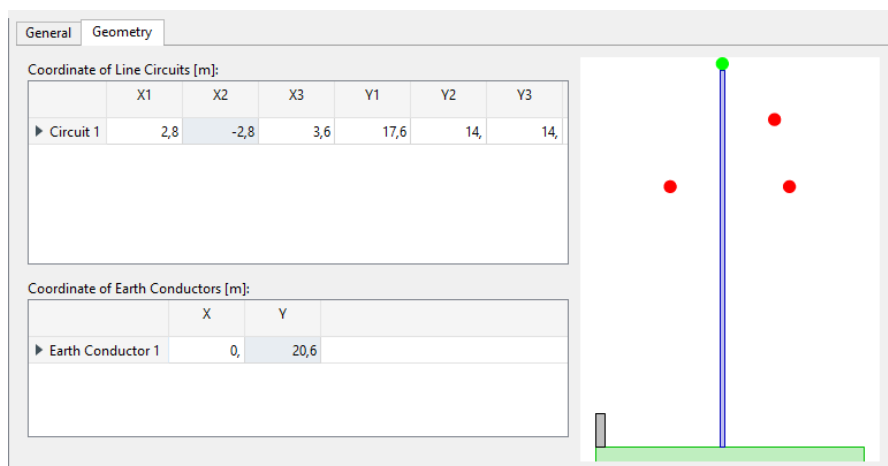
Rys. 6.5. Opis przewodów roboczych dla odcinka 1

Coordinate of Earth Conductors [m]:		
	X	Y
▶ Earth Conductor 1	0,	20,6

Coordinate of Line Circuits [m]:						
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
▶ Circuit 1	2,8	-2,8	3,6	17,6	14,	14,

Rys. 6.6. Opis konstrukcji wsporczey dla odcinka 1



Rys. 6.7. Opis konstrukcji wsporczey dla odcinka 1 – geometria zawieszenia przewodów na konstrukcji słupa

Po wprowadzeniu wszystkich niezbędnych danych dotyczących konstrukcji wsporczych oraz przewodów roboczych i odgromowych, program oblicza wszystkie elementy macierzy impedancyjnej i admitancyjnej, zarówno dla składowej zgodnej, przeciwnej jak i zerowej (rys. 6.8.). Przykład wyznaczonych wielkości elektrycznych dla odcinka 2 i 3 przedstawiono na rys. 6.9. i rys. 6.10.

a)

	1:R(0)	2:R(1)	3:R(2)
1:R(0)	3.90828e-01	-5.36423e-03	1.74491e-02
1:X(0)	1.10183e+00	-4.69584e-03	-3.82887e-03
2:R(1)	1.74491e-02	1.25553e-01	2.17631e-02
2:X(1)	-3.82887e-03	4.05471e-01	-1.10124e-02
3:R(2)	-5.36423e-03	-2.11855e-02	1.25553e-01
3:X(2)	-4.69584e-03	-1.10908e-02	4.05471e-01

b)

	1:G(0)	2:G(1)	3:G(2)
1:G(0)	0.00000e+00	4.55531e-02	-4.55531e-02
1:B(0)	1.69122e+00	-1.44341e-02	-1.44341e-02
2:G(1)	-4.55531e-02	-1.11022e-16	-1.53086e-01
2:B(1)	-1.44341e-02	2.84300e+00	8.19600e-02
3:G(2)	4.55531e-02	1.53086e-01	1.11022e-16
3:B(2)	-1.44341e-02	8.19600e-02	2.84300e+00

Rys. 6.8. Wyznaczone w programie PF macierze: a) impedancji ( $R+jX$ ) [ $\Omega/\text{km}$ ], b) admitancji ( $G+jB$ ) [ $\mu\text{S}/\text{km}$ ]

The screenshot shows the configuration for 'Odcinek 2' in the PF program. The 'Name' field is 'Odcinek 2', 'Type' is 'Equipment Type Library\S120\_PS\_0', and 'Line' is '1 Kraj\Linia S407'. The 'Terminals of Line' section shows 'Terminal i' as '1 Kraj\KAD123\Cub\_1' and 'Terminal j' as '1 Kraj\LAG113\Cub\_1'. The 'Topology' section shows 'Start of Section' as 8 km, 'Length' as 6 km, and 'Derating Factor' as 1. The 'Type of Line' is 'Tower Type'. The 'Resulting Values' section lists: Rated Current (1 kA), Pos. Seq. Impedance, Z1 (2.495221 Ohm), Pos. Seq. Impedance, Angle (72.53513 deg), Pos. Seq. Resistance, R1 (0.7488682 Ohm), Pos. Seq. Reactance, X1 (2.380194 Ohm), Zero Seq. Resistance, R0 (2.260831 Ohm), Zero Seq. Reactance, X0 (6.381791 Ohm), and Earth-Fault Current, Ice (1.867135 A).

Rys. 6.9. Parametry odcinka 2 – dane wprowadzane przez użytkownika oraz obliczone przez program PF

Name:

Type:

Line:

Terminals of Line

Terminal i:

Terminal j:

Topology

Start of Section: 14. km

Length:  km

Derating Factor:

Type of Line: Tower Type

Resulting Values

Rated Current: 1. kA

Pos. Seq. Impedance, Z1: 7.212003 Ohm

Pos. Seq. Impedance, Angle: 60.59064 deg

Pos. Seq. Resistance, R1: 3.541425 Ohm

Pos. Seq. Reactance, X1: 6.282619 Ohm

Zero Seq. Resistance, R0: 6.928617 Ohm

Zero Seq. Reactance, X0: 15.51443 Ohm

Earth-Fault Current, Ice: 4.518809 A

Rys. 6.10. Parametry odcinka 3 – dane wprowadzane przez użytkownika oraz obliczone przez program PF

a)

Index	Z1 Ohm	phiz1 deg	R1 Ohm	X1 Ohm	R0 Ohm	X0 Ohm	B1 uS
1.	3.394479	72.88149	0.99916	3.24409	3.12122	8.81466	22.74399
2.	2.495221	72.53513	0.74886	2.38019	2.26083	6.38179	17.4164
3.	7.212003	60.59064	3.54142	6.28261	6.92861	15.51443	40.11256

b)

Nr odcinka	R1	X1	R0	X0	B1
1	0,992 Ω	3,299 Ω	3,012 Ω	8,896 Ω	10,990 μS
2	0,744 Ω	2,421 Ω	2,261 Ω	6,408 Ω	8,429 μS
3	3,534 Ω	6,383 Ω	7,799 Ω	17,893 Ω	19,409 μS

Rys. 6.11. Zestawienie obliczonych programem PowerFactory i w bazie danych parametrów linii S407 z podziałem na odcinki: a) program PowerFactory; b) baza danych

Porównanie obliczonych parametrów przy użyciu dwóch różnych narzędzi komputerowych daje wyniki bardzo zbliżone (rys. 6.11.). W powyższym zestawieniu, jedynym parametrem znacznie różniącym się w obu tabelach jest susceptancja. Jednak PF podaje całkowitą wartość susceptancji linii, baza danych podaje połowę susceptancji (np. dla odcinka 1:  $22,74 \mu S \approx 2 \cdot 10,99 \mu S$ ). Wynika to z odmiennego sposobu odwzorowania gałęzi poprzecznych w modelu matematycznym linii.

## 7. Podsumowanie

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

- zapewnienie wyprowadzenia energii elektrycznej z dużych elektrowni,
- dostawa energii elektrycznej do dużych odbiorów,
- zapewnienie równowagi współpracy między dużymi jednostkami wytwórczymi,
- wymiana międzynarodowa, w tym sprzedaż energii elektrycznej za granicę.

Podstawowym zadaniem sieci rozdzielczej o napięciu znamionowym 110 kV i SN, jest niezawodne dostarczanie energii elektrycznej o odpowiedniej jakości do odbiorców końcowych, co wiąże się z utrzymaniem parametrów jakości dostarczanej energii elektrycznej w odpowiednich granicach. Sieć przesyłową tworzą linie przesyłowe – głównie są to linie napowietrzne – oraz transformatory sprzęgające sieci 400 kV i 220 kV ze sobą, jak również transformatory NN/110 kV. Struktura tych sieci oraz ich zdolności przesyłowe są silnie skorelowane z rozmieszczeniem i wielkością jednostek wytwórczych, a także z sumarycznym szczytowym zapotrzebowaniem na moc w KSE.

Mając na uwadze duże znaczenie linii WN, obliczania parametrów tych linii jest kluczowym problemem, zarówno o znaczeniu teoretycznym jak i praktycznym. Poprawne i zgodne z rzeczywistością wyznaczenie parametrów linii napowietrznych jest sprawą kluczową z punktu widzenia wszystkich prowadzonych obliczeń energetycznych.

Analizy zwarciove, czy analizy rozptyłów mocy mogą prowadzić do wyciągnięcia błędnych wniosków, jeżeli podstawą obliczeń będzie niewłaściwie zbudowany model matematyczny linii. Może to prowadzić np. do doboru zbyt małego lub zbyt dużego przekroju przewodów, wprowadzania zbędnych inwestycji w infrastrukturę linii. W dokumencie przedstawiono rys historyczny dotyczący analizowanego zagadnienia, następnie przedstawiono fizyczną interpretację parametrów linii elektroenergetycznych, a także opisano wzory służące do obliczeń inżynierskich i wzory dokładne. W rozdziałach teoretycznych nie zagłębiano się w trudne zagadnienia dotyczące pola elektrycznego i magnetycznego, które mają wpływ na teorię obliczania parametrów (zagadnienia tzw. obwodów ziemnopowrotnych), ponieważ trudno byłoby taką teorię omówić w tak krótkim opracowaniu. W ramach niniejszego skryptu nie były również rozważane modele matematyczne wielotorowych i wielonapięciowych linii napowietrznych WN.



Osobnym problemem jest wykorzystanie narzędzi komputerowych do wyznaczania parametrów linii elektroenergetycznych. Napisanie i wdrożenie programu, który będzie spełniał oczekiwania zamawiającego wiąże się z bardzo dobrą znajomością teorii baz danych i języków programowania oraz teorii sieci elektroenergetycznych.

## Literatura

1. Aleksander M., Kusleika R.: *Access 2019 PL. Biblia*. Wydawnictwo Wiley, 2019.
2. Bolkowski S.: *Podstawy elektrotechniki*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1990.
3. Centrum Informacji o Rynku Energii – CIRE, 2022.
4. Dołęga W.: *Obciążalność termiczna napowietrznych linii elektroenergetycznych 400, 220 i 110 kV*. *Elektroenergetyka* 1/2016.
5. Domka P.: *Bazy danych i systemy baz danych*. WSIP Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2013.
6. Elmasri R., Navathe S.: *Wprowadzenie do systemów baz danych*. Helion, Warszawa 2019.
7. Flaga A., Flaga Ł.: *Aerodynamika napowietrznych linii elektroenergetycznych z uwzględnieniem innych wpływów środowiskowych*. Wydawnictwo Politechnika Krakowska, Kraków 2020.
8. Handke A., Mitkowski E., Stiller J.: *Sieci elektroenergetyczne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1978.
9. Hoberman S.: *Data Modeling Made Simple*. Technics Publications LLC, 2012.
10. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej PSE SA, <https://www.pse.pl/>, dostęp on-line: lipiec 2022.
11. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, PGE Dystrybucja S.A. <https://pgedystrybucja.pl/>, dostęp on-line: maj 2022.
12. Kacejko P., Machowski J., Pijarski P., Smolarczyk A.: *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2022.
13. Kahl T.: *Sieci elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 1984.
14. Katalog słupów i fundamentów linii 110 kV. Tom I., Energoprojekt Kraków, Poznań 1998.
15. Katalog słupów i fundamentów linii 110 kV. Tom II, Energoprojekt Kraków, Poznań 1998.
16. Kinsner K., Serwin A., Sobierajski M., Wilczyński A.: *Sieci elektroenergetyczne*. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1993.
17. Knych T.: *Dobór materiału i opracowanie konstrukcji wysokotemperaturowych przewodów elektroenergetycznych ze stopów AlZr*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2010.
18. Kosztaluk R., Flisowski Z.: *Metody analizy układów przewodów-ziemia*. Przegląd Elektrotechniczny nr 10/2001, SIGMA NOT Sp. z.o.o.
19. Kremens Z., Sobierajski M.: *Analiza systemów elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa 1996.
20. Kujszczyk S.: *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. Tom I*, PWN, Warszawa 1990.

21. Markiewicz H.: *Urządzenia elektroenergetyczne*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
22. Marzecki J.: *Elektroenergetyczne sieci terenowe. Wybrane zagadnienia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018.
23. McGrath M.: *Visual Basic in easy steps*. Wydawnictwo In Easy Steps Limited, 2019.
24. Mendera Z., Szojda L.: *Projektowanie stalowych słupów linii elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
25. PN-EN 50341-1:2013 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
26. PN-EN 50397-1:2007 (U) Przewody elektroenergetyczne w osłonie do linii napowietrznych oraz sprzęt do nich na napięcie znamionowe przemiennego wyższe od 1 kV i nieprzekraczające 36 kV. Część 1: Przewody w osłonie.
27. PN-EN 50423-1:2007 "Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV do 45 kV włącznie.
28. PN-EN 50423-1:2007 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV do 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
29. PN-IEC 1089:1994 Przewody gołe okrągłe o skręcie regularnym do linii napowietrznych
30. PN-IEC 1089:1994/A1:2000 Przewody gołe okrągłe o skręcie regularnym do linii napowietrznych
31. PN-IEC 1089:1994/Ap1:1999 Przewody gołe okrągłe o skręcie regularnym do linii napowietrznych
32. Polskie Sieci Elektroenergetyczne – strona Operatora Systemu Przesyłowego [www.pse.pl/](http://www.pse.pl/), dostęp on-line: wrzesień 2022.
33. *Poradnik Inżyniera Elektryka Tom I*, WNT, Warszawa 2022.
34. Power Factory – dokumentacja techniczna programu firmy DigSilnet.
35. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowego warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz. U. Nr 93, poz. 623 z dnia 29 maja 2007 r.
36. Wancierz M., Miller P.: *Problematyka wyznaczania i ewidencji parametrów linii WN z wykorzystaniem baz danych*. Electrical Engineering, No. 74, Poznań 2013.
37. [www.entsa.pl](http://www.entsa.pl) – ENSTA – Rozwiązania dla energetyki – katalog przewodów, dostęp on-line: maj 2022.
38. [www.microsoft.com](http://www.microsoft.com) – strona firmy Microsoft (twórca relacyjnej bazy danych ACCESS), dostęp on-line: czerwiec 2022.
39. [www.powerdesigner.biz](http://www.powerdesigner.biz) – strona firmy PowerDesigner (twórca narzędzi typu CASE (ang. *Computer Aided System Engineering*) do modelowania systemów baz danych, dostęp on-line: czerwiec 2022.