## POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY



Krzysztof KRÓL

## OPTYMALIZACJA ROZKŁADU NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO WOKÓŁ NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

Rozprawa doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Machczyński Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Budnik

POZNAŃ, 2019 r.

#### Streszczenie

Celem pracy było zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych do wyznaczania parametrów geometrycznych napowietrznej linii elektroenergetycznej, pozwalających na redukcję wartości natężenia trójwymiarowego pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz w określonym obszarze położonym w pobliżu linii elektroenergetycznej, przy wykorzystaniu technik modelowania pola elektrycznego oraz pola magnetycznego, w szczególności poprzez obliczenia numeryczne. Sformułowano hipotezę, że możliwa jest optymalizacja rozkładu 3-D natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych przy pomocy algorytmów heurystycznych.

Prezentowana w pracy optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonywana została przy pomocy algorytmu genetycznego GA i roju cząstek PSO w środowisku MATLAB. Algorytm genetyczny został przystosowany do obliczeń za pomocą funkcji GA, znajdującej się w programie. Algorytm roju cząstek PSO został zaimplementowany do wykonania optymalizacji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego za pomocą nowej, autorskiej funkcji napisanej w MATLAB-ie.

W opracowanym modelu symulacyjnym zwis przewodów linii opisano za pomocą krzywej łańcuchowej. Wykorzystano metodę ładunków symulacyjnych (CSM), metodę odbić zwierciadlanych oraz zasadę superpozycji. Uwzględniono także zmienny rozkład ładunków wzdłuż przewodów linii, a w obliczeniach pola magnetycznego prądy wzbudzone w przewodach odgromowych i w dodatkowych przewodach redukcyjnych.

Główne osiągnięcie autora rozprawy polega na opracowaniu środowiska komputerowego, dokonaniu częściowej weryfikacji wyników otrzymanych w procesie symulacji poprzez porównanie z wynikami pomiarów, przeprowadzenie optymalizacji parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, uwzględnieniu w procesie optymalizacji obecności przewodów redukcyjnych w linii elektroenergetycznej, optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w obszarze bliskiego występowania linii elektroenergetycznej i zabudowań na wysokościach większych od 2 metrów.

Zaprezentowane wnioski pozwalają na stwierdzenie, że postawiona teza rozprawy została udowodniona, a założone cele rozprawy zostały osiągnięte.

# Optimization of electric and magnetic field intensities in proximity of overhead power lines

#### Abstract

The purpose of the work was to use optimization algorithms to determine the geometric parameters of an overhead power line, allowing the reduction of the value of the intensity of the three-dimensional electric and magnetic field with a frequency of 50 Hz in a specific area near the power line while using techniques of electric field modeling and magnetic field modeling in particular by numerical calculations. The hypothesis was formulated that it is possible to optimize the 3-D distribution of the electric and magnetic field intensity in proximity of overhead power lines using heuristic algorithms.

Optimization of the electric and magnetic field distribution presented in the paper was performed by using the genetic algorithm GA and particle swarm algorithm PSO in the MATLAB environment. The genetic algorithm has been adapted for calculations using the GA function in the program. The PSO algorithm has been implemented to optimize the electric and magnetic field distribution using a new author's function written in MATLAB.

The conductor sag was approximated by a chain curve. The charge simulation method (CSM), the method of images and the superposition principle were used in the simulations. Variable charge distribution along the line conductors as well as currents induced in the ground conductors and in additional reduction conductors were also taken into account.

The main achievement of the author of the dissertation is the elaboration of a computer environment, partial verification of the results obtained in the simulation process by comparing with results of measurements, optimization the geometric parameters of an overhead power line, taking into account the presence of reducing conductors in the process of optimizing in the power line, optimization of the distribution of electric and magnetic field strength in the area of the near occurrence of the power line and buildings at heights greater than 2 meters.

The presented conclusions allow to formulate the statement that thesis has been proven and objectives have been met.

### Spis treści

1.	Wprowadzenie	8
	1.1. Wstęp	8
	1.2. Cel pracy	16
	1.3. Teza pracy	16
	1.4. Zakres pracy	16
2.	Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznej – zależności ogólne	18
	2.1. Metoda uproszczona	18
	2.1.1. Natężenie pola elektrycznego	19
	2.2. Metoda dokładna	27
	2.2.1Uwzględnienie zwisu przewodu	27
	2.2.1.1. Natężenie pola elektrycznego	29
	2.2.1.2. Natężenie pola magnetycznego	36
3.	Porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów dla wybranych linii	
	elektroenergetycznych	44
4.	Algorytmy optymalizacyjne	50
	4.1. Wprowadzenie	50
	4.2. Metoda gradientu prostego	51
	4.3. Metoda Newtona – Raphsona	52
	4.4. Algorytm genetyczny	52
	4.5. Algorytm roju cząstek	55
	4.6. Funkcja celu	57
5.	Metody redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznych	64

5.1. Zmiana kolejności faz w liniach dwutorowych64
5.2. Zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi linii elektroenergetycznych
5.3. Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego poprzez dobór parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznej
5.4. Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego na różnych wysokościach w miejscach bliskiej lokalizacji napowietrznej linii elektroenergetycznej i budynku
5.5. Optymalizacja wysokości zawieszenia dodatkowych przewodów redukcyjnych
5.6. Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego poprzez dobór parametrów geometrycznych linii oraz dodatkowych przewodów redukcyjnych
6. Wnioski i podsumowanie 124
Bibliografia

#### WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SYMBOLI

- a odległość między przewodami fazowymi, a osią słupa
- ar promień przewodu
- $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  wektory jednostkowe w układzie współrzędnych prostokątnych
- B wektor indukcji magnetycznej
- d rozpiętość przęsła
- dkl odległość między przewodami
- E wektor natężenia pola elektrycznego
- f-częstotliwość
- FN-siła zrywająca przewody
- Fz-zmodyfikowana funkcja celu
- G oznaczenie przewodów odgromowych linii elektroenergetycznej
- h wysokość przewodów w połowie rozpiętości przęsła linii elektroenergetycznej
- $H_L$ ,  $H_G$  wysokość zawieszenia przewodów fazowych oraz odgromowych na słupie
- Hav-średnia wysokość zawieszenia przewodu
- *H* wektor natężenia pola magnetycznego
- I fazor prądu sinusoidalnego
- |I| wartość skuteczna prądu
- $j = \sqrt{-1}$
- L-oznaczenie przewodów fazowych linii elektroenergetycznej

N(x', y', z') – punkt źródłowy

o – odległość między przewodami odgromowymi, a osią słupa

p – głębokość

P(x, y, z) – punkt obserwacji

- r współrzędna promieniowa punktu obserwacji
- r', r<sub>1</sub>' współrzędne promieniowe punktu źródłowego i jego odbicia zwierciadlanego

Rsi, RsiI, Rd, RdI – wektor odległości między punktem źródłowym i punktem obserwacji

- sobl przekrój obliczeniowy przewodu
- S-zwis przewodu
- *S*(*zd*) funkcja celu (wskaźnik jakości optymalizacji)
- T(zd) zbiór ograniczeń w optymalizacji
- T<sub>h</sub> współczynnik naprężeń mechanicznych w połowie rozpiętości przęsła

- *U* fazor napięcia sinusoidalnego
- V-potencjał skalarny
- w ciężar przewodu na jednostkę długości
- x, y, z współrzędne w układzie kartezjańskim
- *zd* zmienne decyzyjne
- ZD zbiór rozwiązań dopuszczalnych
- a współczynnik związany z mechanicznymi parametrami linii
- $\gamma$  konduktywność gruntu
- $\varepsilon_0$  przenikalność elektryczna próżni
- $\lambda$  gęstość liniowa ładunku
- $\mu_0$  przenikalność magnetyczna próżni
- $\sigma$  naprężenie przewodu w temperaturze montażu
- $\omega$  pulsacja

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$
$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{F}{m}$$

Pozostałe symbole i oznaczenia objaśniono w treści pracy.

#### 1. Wprowadzenie

#### **1.1. Wstęp**

W środowisku występują dwa rodzaje pola elektromagnetycznego (PEM): naturalne oraz sztuczne, które związane jest z działalnością człowieka. Szczególnie interesujące, ze względu na swą powszechność, są źródła pola elektromagnetycznego, takie jak układy wytwarzania, przesyłania i rozdziału energii elektrycznej oraz odbiorniki energii elektrycznej [20, 80].

Do przesyłania energii elektrycznej na dalekie odległości wykorzystuje się napowietrzne linie wysokich (WN) i najwyższych (NN) napięć 110 kV, 220 kV, 400 kV oraz 750 kV. Występujące w ich sąsiedztwie pole elektromagnetyczne o niskiej częstotliwości (50, 60 Hz) spełnia warunek quasi-stacjonarny. Oznacza to, że ładunki i prądy zmieniają się wolno w czasie, co pozwala pominąć efekty opóźnienia związane ze skończonym czasem propagacji fali elektromagnetycznej. Składową elektryczną i magnetyczną pola można wówczas rozpatrywać osobno [118].

Pola elektryczne i magnetyczne napowietrznych linii elektroenergetycznych mogą szkodliwie oddziaływać na organizmy żywe, wpływając na funkcje fizjologiczne jak: działanie układu nerwowo-mięśniowego, wydzielane gruczołowe, budowanie komórek i ich rozwój oraz wzrost, a także regenerację tkanek [50]. Pola elektromagnetycznego nie można całkowicie wyeliminować, lecz można je ograniczyć. Początkowo w podejmowanych pracach zastanawiano się nad bezpieczną wartością natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Dzięki pracy [51] w 1989 roku w wielu krajach powołano komitety regulacyjne i doradcze w celu zbadania szkodliwych wpływów pól elektromagnetycznych na ludzkie zdrowie. W Polsce pierwsze regulacje prawne zostały już wprowadzone w 1980 roku ustawą o ochronie środowiska [121] polegały na określeniu wprowadzonych do środowiska poziomów pól i elektromagnetycznych pochodzących ze źródeł promieniowania niejonizującego. W Dzienniku Ustaw z roku 1998 określono szczegółowe zasady ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska, dopuszczalne poziomy promieniowania, jakie mogą występować w środowisku oraz wymagania obowiązujące przy wykonywaniu pomiarów kontrolnych [122]. W 1999 roku Unia Europejska określiła maksymalne wartości pól elektromagnetycznych o częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz [140]. Jest to jedyny oficjalny akt Unii Europejskiej odnoszący się do kwestii oddziaływań pól elektromagnetycznych.

kolejnych latach dokonano obliczeń oraz W badań wpływu pola elektromagnetycznego na organizmy żywe. W artykułach [17, 18, 19, 120] opisano ryzyko wystąpienia białaczki, raka piersi, choroby Alzheimera, choroby Lou Gehriga, depresji, zaburzeń neuropsychologicznych i zmniejszenia zdolności reprodukcyjnych. Przeanalizowano pole magnetyczne pod przewodami o różnej konfiguracji. W pracy [89] przeprowadzono badania kliniczno-kontrolne, w których przedstawiono grupę zawodów szczególnie narażonych na ekspozycję pola elektromagnetycznego. Prawdopodobieństwo zachorowania na Alzheimera dla tej grupy jest największe. Badania wykonano na pacjentach zamieszkałych w Kalifornii. Artykuł [52, 88] przedstawia wpływ pola elektrycznego i magnetycznego na narządy ludzkie takie jak: mózg, serce, nerki i skórę, gdy są one poddane działaniom pól pochodzących od linii elektroenergetycznych 200 kV w różnych odległościach od osi linii. Dowiedziono, że wyniki liczbowe są zgodne z wynikami eksperymentu. W artykule [53] opisano, jak pole elektryczne i magnetyczne pochodzące od linii napowietrznej oddziałują na ciało zarodka. Aby osiągnąć ten cel, w symulacji wykorzystano cylindryczny model ciała ludzkiego.

Prace [61, 62] dotyczą wpływu pola elektromagnetycznego na rośliny i zwierzęta. Udowodniono w nich, że rośliny znajdujące się w rejonie oddziaływania PEM szybciej się rozwijają, są mocniejsze i wydają lepsze plony, natomiast u zwierząt obserwuje się negatywny wpływ PEM na pracę serca i przewodzenie impulsów w komórkach nerwowych. W przypadku zwierząt migrujących, takich jak ptaki czy owady, wykazano, że wykorzystują one pola elektromagnetyczne do orientacji w terenie.

Pola elektryczne i magnetyczne mogą negatywnie oddziaływać nie tylko na organizmy żywe. Przyczyniają się one również do zakłóceń łączności radiowej, telewizyjnej i telekomunikacyjnej. W artykułach [81-87] wykazano szkodliwe oddziaływanie natężenia pola magnetycznego wytwarzanego przez linie elektroenergetyczne na metalową infrastrukturę podziemną (metalowe rurociągi). Na długich metalowych obiektach liniowych, ułożonych w ziemi w pobliżu linii elektroenergetycznych, występuje zagrożenie związane z indukowaniem napięć. Długotrwałe oddziaływanie prądu przemiennego na rurociągi może powodować korozję w miejscach uszkodzenia powłoki izolacyjnej. Korozja wywołana prądem przemiennym

9

jest zagrożeniem dla rurociągów. W efekcie może prowadzić do rozszczelnienia rurociągu np. ropociągu, co może wywołać katastrofę ekologiczną.

W Rozporządzeniu Ministra Środowiska [8] określono maksymalne czasy przebywania ludzi w miejscach występowania linii elektroenergetycznych oraz dopuszczalne natężenie pola elektrycznego dla Polski, które wynosi: 10 kV/m dla obszarów dostępnych dla ludzi, a w miejscach ich zamieszkania 1 kV/m. Zaznaczono także, że wartość natężenia pola magnetycznego nie może przekraczać 60 A/m. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego należy wykonywać na wysokości 2 metrów nad powierzchnią ziemi lub nad innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie oraz w pobliżu obiektów budowlanych, w odległości nie mniejszej niż 1,6 metra od ścian tych budynków.

Tabela 1.1 przedstawia wyniki pomiarów wykonanych pod linią 220 kV [129]. Trasa linii przebiega z Krajnik do Glinek. W wielu miejscach stwierdzono kilkukrotnie przekroczenie dozwolonych wartości natężenia pola elektrycznego.

Miejsce występowania	Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego E max kV/m	Odległość linii od budynku m	
Mierzyn, ul. Modrzewiowa 1	2,7	15	
Bezrzecze, ul. Nowowiejska 39A	3,5	30	
Bezrzecze, ul. Koralowa 55	1,5	13	
Bezrzecze, ul. Diamentowa 35	2,0	20	

Tabela 1.1. Miejsca, na których stwierdzono przekroczenie dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii 220 kV na trasie Krajnik-Glinki [129].

W Polsce pierwsze rozważania na temat szkodliwości pól pochodzących od linii elektroenergetycznych przedstawiono w artykule [20]. Rozpatrywano w nim normy stosowane w odniesieniu do składowych pola elektromagnetycznego: elektryczną i magnetyczną, poziom zakłóceń radioelektrycznych oraz hałas.

Od pierwszego lipca 2016 roku obowiązuje nowe rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej [123], które zapobiega zagrożeniom pracowniczym na skutki oddziaływania pól elektromagnetycznych. Dotychczasowe regulacje prawne nie zostały zniesione, a niektóre istotne treści nowego dokumentu przywołują wcześniejsze akty prawne. Wyszczególniono w nim trzy strefy ochronne przebywania pracowników: do ośmiu godzin w strefie zagrożenia, poniżej ośmiu godzin w strefie zagrożenia (dopuszczalny czas maleje ze wzrostem natężenia pola), zakaz przebywania w strefie niebezpiecznej.

Tabela 1.2 przedstawia wartości graniczne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla stref ochronnych. Zmieniono metodykę prowadzenia pomiarów na bardziej szczegółową, z dostosowaniem do różnych źródeł pola elektromagnetycznego.

Strefa ochronna	Graniczne	Określenie	Graniczne natężenie	Określenie
	natężenie pola	według	pola magnetycznego	według
	elektrycznego	przepisu		przepisu
pośrednia	1 kV/m	IPNp-E	60 A/m	IPNP-H
zagrożenia	3,33 kV/m	IPNod-E	533,3 A/m	IPNod-H
niebezpieczna	20 kV/m	IPNog-E	3,2 kA/m	IPNog-H

Tabela 1.2. Wartości graniczne poszczególnych stref ochronnych [123].

Wartość natężenia pola magnetycznego napowietrznych linii elektroenergetycznych jest w głównej mierze uzależniona od wartości prądów płynących w przewodach fazowych, prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych, odległości pomiędzy przewodami lub wiązkami przewodów. Pole magnetyczne nie ulega zniekształceniom w pobliżu niemagnetycznych obiektów przewodzących. Rozkład natężenia pola elektrycznego zależy natomiast od warunków terenowych, kształtu słupów, rozmieszczenia przewodów, ich wysokości zawieszenia, odległości między nimi, ich średnicy, kolejności poszczególnych faz oraz wartości napięcia fazowego. Na wartość natężenia pola elektrycznego wpływają elementy otoczenia znajdujące się w pobliżu linii.

Trasy linii elektroenergetycznych projektuje się w taki sposób, aby omijały tereny zurbanizowane. Bardzo często zdarza się jednak, że nie ma alternatywnej trasy dla nowobudowanych linii elektroenergetycznych i muszą one przechodzić nad budynkami mieszkalnymi lub w ich pobliżu. Problem ten opisano w pracy [22]. W artykule [21] wykonano obliczenia wartości pola elektrycznego metodą ładunków symulacyjnych dla obiektu przemysłowego w sąsiedztwie linii 110 kV. W pracy [4] wykonano obliczenia i pomiary natężeń dla budynków mieszkalnych pod liniami elektroenergetycznymi w miejscowości Tebeesa w Algierii. Problem wykonywania pomiarów w pobliżu zabudowań oraz linii elektroenergetycznych prezentuje artykuł [67], który wprowadza nową metodę pomiaru rozkładu pola elektromagnetycznego. W pomiarach wyeliminowano błąd losowej zmiany w czasie wartości natężenia prądu oraz potencjału linii elektroenergetycznej, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia błędu pomiarów

natężenia pola elektrycznego i magnetycznego o kilkanaście procent. Prezentowana metoda jest wolna od błędów powodowanych naruszeniami symetrii faz.

Początkowo do obliczeń pola elektrycznego i magnetycznego wytworzonego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych wykorzystywano metodę uproszczoną, która zakłada, że przewody linii napowietrznej są prostoliniowe i równoległe do powierzchni ziemi. Przewody zawieszone są na jednej z trzech wybranych wysokości. Metoda ta jest mało dokładna i nie odzwierciedla faktycznego rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wzdłuż linii [31, 63, 64].

Pierwsza rozprawa na temat rozkładu natężenia pola elektrycznego pod linią elektroenergetyczną została zaprezentowana w 1948 roku w artykule [54]. Artykuł [55], który ukazał się w roku 1955, przedstawia metodę obliczania natężenia pola elektrycznego dla pojedynczego przewodu linii elektroenergetycznej. Ładunki rozłożone są równomiernie wzdłuż rozpatrywanego przewodnika; zastosowano metodę odbić zwierciadlanych.

Metoda odbić zwierciadlanych pochodzi z publikacji [56] z 1848 roku, w której autor udowadnia, że pole elektryczne nad płaszczyzną przewodzącą można obliczyć za pomocą ładunku i jego odbicia lustrzanego. W artykule [57] zaprezentowano przykład obliczania natężenia pola elektrycznego z wykorzystaniem tej metody dla pojedynczego prostoliniowego przewodnika linii elektroenergetycznej. Na tej podstawie w 1969 roku opublikowano pracę [58], w której dokonano obliczeń pola elektrycznego dla równoległych prostoliniowych przewodów linii elektroenergetycznej. Jest ona uznawana za klasyczną publikację na temat metody odbić zwierciadlanych.

W artykułach [59, 60] opracowano algorytm obliczeniowy do wyznaczania pola elektrycznego quasi-statycznego w otoczeniu linii przesyłowej. Algorytm ten pozwala na wyznaczenie w dowolnym punkcie obserwacji pola elektrycznego linii elektroenergetycznej o dowolnej konfiguracji prowadzenia przewodów na słupie.

Metoda ładunków symulacyjnych (CSM) jest powszechnie stosowana do analizy pola elektrycznego w układach wysokiego napięcia [26, 29, 40, 41, 42, 43, 65, 90]. Metoda ta powstała w 1969 roku do obliczania natężenia pola elektrycznego dla przewodu cylindrycznego [93]. W pracy [65] zaprezentowano obliczenia metodą CSM rozkładu natężenia pola elektrycznego (dwuwymiarowego oraz trójwymiarowego) linii elektroenergetycznych. W 1978 roku opublikowano pracę [95] na temat techniki optymalizacji prędkości obliczeń wykonanych metodą CSM. Idea metody CSM polega na zastąpieniu rzeczywistego rozkładu ładunków na przewodach linii elektroenergetycznej, skończoną liczbą dyskretnych ładunków symulacyjnych [93]. Usytuowanie oraz typ ładunków symulacyjnych są znane, a ich wartości należy wyznaczyć.

Dotychczasowe obliczenia natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonywano przeważnie w układzie dwuwymiarowym. Obliczanie natężeń w układzie trójwymiarowym pod linią wysokiego napięcia jest bardziej pracochłonne i zostało omówione w artykułach [23, 24, 25, 26, 27, 29, 92]. Pole magnetyczne wyznaczane jest z prawa Biota-Savarta z pominięciem indukowanych prądów w ziemi.

W nielicznych publikacjach autorzy uwzględniają zwis przewodów [9, 10, 11, 12, 28, 30, 73, 79, 91], pozwalający na odzwierciedlenie rzeczywistego rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Przewody są podzielone na *n* segmentów o równej długości. Kształt przewodu opisano wzorem krzywej łańcuchowej.

Do obliczeń natężenia pola magnetycznego linii elektroenergetycznej wysokich oraz najwyższych napięć należy brać pod uwagę prądy płynące w przewodach fazowych oraz w przewodach odgromowych. Metoda obliczania indukowanych prądów w ziemi oraz w przewodach odgromowych została zaczerpnięta z publikacji [13, 15, 16, 97, 101]. Wykorzystuje ona koncepcję zaproponowaną w artykule [66] dla prostych i wystarczająco dokładnych obliczeń impedancji linii. Obliczanie impedancji linii przesyłowych przedstawiono w publikacji [14, 98]. Przepływ prądu w gruncie można modelować za pomocą idealnej płaszczyzny przewodzącej, która znajduje się na fikcyjnej zespolonej głębokości poniżej powierzchni ziemi.

W artykułach [1, 2, 3] przedstawiono metodę elementów skończonych (MES) do obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego pod linią elektroenergetyczną.

W artykule [74] przedstawiono obliczenia natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii elektroenergetycznych najwyższych napięć. Pierwsza rozpatrywana linia o napięciu 800 kV, składa się z jednego toru prądowego posiadającego sześć przewodów w równych odległościach, zawieszonych na tej samej wysokości nad powierzchnią ziemi. Linia ta została zbudowana w Afryce Południowej. Druga linia o konfiguracji delta i napięciu znamionowym 1050 kV znajduje się we Włoszech. Posiada osiem wiązek w jednym torze prądowym. Trzecia rozpatrywana linia, o napięciu 1100 kV posiadająca dwa obwody po osiem wiązek każda, znajduje się w Japonii. Dodatkowo w artykule [74] zbadano również wpływ sekwencji faz na rozkład natężenia pola elektrycznego dla wielotorowych linii elektroenergetycznych. W artykule [75] dokonano symulacji rozkładu pola elektrycznego dla równoległych linii wysokiego napięcia w egipskiej sieci elektroenergetycznej. Przeanalizowano przypadki, w których pierwsze dwie linie mają napięcie 220 kV i tę samą konfigurację z dwoma torami prądowymi, natomiast trzecia linia o napięciu znamionowym 500 kV jest jednotorowa. Na wartość pola elektrycznego trzech linii wpływa zmiana kolejności faz dla każdej linii oraz odległości między nimi. Zmiany sekwencji kolejności faz linii dokonano tak, aby rozkład pola elektrycznego był jak najmniejszy.

W celu zmniejszenia natężeń pola elektrycznego i magnetycznego w pobliżu budynków mieszkalnych możliwe jest zastąpienie linii napowietrznej kablem w ziemi. Jest to rozwiązanie drogie i nie zawsze możliwe.

W artykułach [69, 77, 78] opisano sposób redukcji pola poprzez zmianę odległości między przewodami linii elektroenergetycznej. Kolejnym sposobem na zmniejszenie natężeń pola elektrycznego i magnetycznego jest zmiana kolejności faz (wyłącznie dla linii napowietrznej dwutorowej) [71, 72]. Innym rozwiązaniem jest stawianie wyższych słupów przy zachowaniu standardowych odległości między przewodami [34, 70]. Rozwiązanie polegające na zastosowaniu pod przewodami fazowymi przewodów redukcyjnych opisano w artykule [76].

W Holandii operator sieci TenneT [68] wykonał nowe konstrukcje linii wysokiego napięcia, w której przewody zawieszone są bliżej siebie, niż w tradycyjnych liniach energetycznych, co powoduje zmniejszenie wartości natężeń pól.

W pracy [36] przedstawiono optymalizację metodą ewolucji różnicowej (DE) wysokości zawieszenia przewodów linii elektroenergetycznej. W artykule [38] celem optymalizacji jest znalezienie takiego układu przewodów fazowych, aby wysokość słupa była minimalna, natomiast wartości pól magnetycznych i elektrycznych znajdowały się poniżej limitów określonych w normach krajowych. W artykułach [33, 34, 128] zaprezentowano optymalizację metodą algorytmu genetycznego parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznej, takich jak wysokość i odległości między przewodami fazowymi, w celu redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

W publikacji [5] autor zaprezentował sposób optymalizacji metodą ewolucji różnicowej natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii dwutorowej 400 kV znajdującej w Słowenii poprzez zmianę wysokości zawieszenia przewodów fazowych, odległości oraz kolejności faz.

Prace badawcze [35, 37] opisują redukcję natężenia pola elektrycznego i magnetycznego za pomocą algorytmu genetycznego (GA), który optymalizuje odległości między przewodami linii elektroenergetycznej. Do optymalizacji natężenia pola magnetycznego wykorzystano również algorytm roju cząstek (PSO) [32, 38]. Powyższe prace nie uwzględniają jednak istotnych parametrów linii, takich jak: zwis przewodów linii oraz prądów wzbudzanych w przewodach odgromowych. Zakładają one stały rozkład ładunków wzdłuż linii, a wyniki obliczeń dotyczą układu dwuwymiarowego.

Kluczowym problemem optymalizacji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznej jest uwzględnienie istotnych parametrów takich jak wysokość zawieszenia przewodów, minimalna wysokość przewodów w połowie rozpiętości przęsła, odległość przewodów od osi słupa, prądy wzbudzane w przewodach odgromowych, obecność dodatkowych przewodów redukcyjnych oraz siła zrywającą przewód.

Liczne prace publikowane w ostatnich latach świadczą, że tematyka jest aktualna i rozwojowa, co stanowiło inspirację do podjęcia problematyki związanej z optymalizacją natężenia pola elektrycznego i magnetycznego napowietrznych linii elektroenergetycznych w ramach niniejszej rozprawy.

Według normy PN-EN 50341 nowo budowane linie elektroenergetyczne muszą znajdować się w odległości 3 metrów od zabudowań, a jeżeli jest to niemożliwe, należy zachować odległość pionową od dachu budynku do przewodów linii.

Aby sprostać wymaganiom stawianym przez rozporządzenie Ministra Środowiska [8] należałoby zastanowić się nad sposobami redukcji natężeń pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu tych obiektów, a w szczególności uwzględnić ten fakt dla nowo projektowanych linii elektroenergetycznych.

W niniejszej pracy przeprowadzono optymalizację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią oraz na różnych wysokościach lokalizacji punktu obserwacji w obszarze bliskiego występowania napowietrznej linii elektroenergetycznej i budynku. Uwzględniono minimalne odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami linii elektroenergetycznych zgodnie z normą [124].

Optymalizacje wykonano przy pomocy algorytmu genetycznego GA i roju cząstek PSO w środowisku MATLAB. Algorytm genetyczny został przystosowany do obliczeń przy pomocy standardowej funkcji GA znajdującej się w programie, natomiast

algorytm roju cząstek został opracowany przez autora. Poprawność działania algorytmu PSO zweryfikowano przy pomocy algorytmu GA.

#### **1.2. Cel pracy**

Celem prowadzonych badań jest zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych do wyznaczania parametrów geometrycznych napowietrznej linii elektroenergetycznej, pozwalających na redukcję wartości natężenia trójwymiarowego pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz w określonym obszarze położonym w pobliżu linii elektroenergetycznej, przy wykorzystaniu technik modelowania pola elektrycznego oraz pola magnetycznego, w szczególności poprzez obliczenia numeryczne.

#### 1.3. Teza pracy

Praca ma udowodnić hipotezę badawczą, że możliwa jest optymalizacja rozkładu trójwymiarowego (3-D) natężeń pól: elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych przy pomocy algorytmów heurystycznych.

#### 1.4. Zakres pracy

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem w problematykę, dokonano przeglądu literatury dotyczącej tematu pracy. Omówiono możliwe zagrożenia wynikające z oddziaływania pola elektromagnetycznego na materię ożywioną. Podano bezpieczne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [8]. Przedstawiono przykładowe miejsca, w których wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały znacząco przekroczone. Rozdział ten zawiera cel, tezę pracy oraz jej zakres.

W drugim rozdziale przedstawiono metodę uproszczoną oraz dokładną obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego napowietrznej linii elektroenergetycznej. Zaprezentowano przykładowe wyniki symulacji rozkładu natężeń pola elektrycznego i magnetycznego pod linią elektroenergetyczną.

W kolejnym rozdziale porównano wyniki obliczeń z wynikami pomiarów wykonanymi pod rzeczywistymi liniami elektroenergetycznymi w celu weryfikacji

opracowanej metody. Wykonane obliczenia poprawnie odzwierciedlają rzeczywisty rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

W rozdziale czwartym omówiono algorytmy optymalizacyjne funkcji wielu zmiennych. Przedstawiono funkcję celu oraz wybrano parametry algorytmów genetycznego GA i roju cząstek PSO.

W rozdziale piątym zaprezentowane zostały metody redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią elektroenergetyczną i w jej bliskim sąsiedztwie. Dokonano optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego za pomocą algorytmów heurystycznych (GA i PSO) dla przykładowych linii elektroenergetycznych. Wykonano symulacje i optymalizacje dla linii wielotorowych. Uwzględniono dodatkowe przewody redukcyjne zawieszone pod przewodami fazowymi. Przeprowadzono optymalizację rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego na różnych wysokościach, w obszarze bliskiego występowania napowietrznej linii elektroenergetycznej i budynku.

W rozdziale szóstym przedstawiono podsumowanie pracy i nakreślono program dalszych badań.

Zakres pracy nie obejmuje linii elektroenergetycznych niskich napięć (do 1 kV) oraz średnich napięć (powyżej 15 kV, a mniejszych od 110 kV). Obliczenia wykonano dla pojedynczego przęsła linii, ponieważ w licznych publikacjach udowodniono, że pozostałe przęsła nie mają istotnego wpływu na wartości rozpatrywanego pola elektrycznego i magnetycznego pod linią elektroenergetyczną. W pracy przyjęto dodatkowo założenia: powierzchnia ziemi jest płaska, układ prądów i napięć linii w stanie ustalonym jest symetryczny, rozpatrywane układy są liniowe, wysokość słupów w przęśle jest identyczna.

# 2. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznej – zależności ogólne

#### 2.1. Metoda uproszczona

Stosowane powszechnie i opisane w licznych publikacjach modele i symulacje pozwalają w sposób przybliżony ocenić rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wytworzonego w sąsiedztwie linii elektroenergetycznej.

Najprostsza metoda zakłada, że dla nieskończenie długiego przewodu z ładunkiem liniowym, umieszczonego równolegle do powierzchni ziemi, rozkład (dwuwymiarowy) natężenia pola elektrycznego wyznacza się stosując metodę odbić zwierciadlanych oraz prawo Gaussa. W przypadku nieskończenie długiego przewodu z prądem rozkład (dwuwymiarowy) natężenia pola magnetycznego otrzymuje się z prawa przepływu.

Inna wersja metody uproszczonej pomija również zwis przewodów ale zakłada, że przewody linii elektroenergetycznych o skończonej długości są prostoliniowe, równoległe do powierzchni ziemi, co przedstawia rys. 2.1. Linią przerywaną zaznaczono rzeczywisty kształt linii. H jest maksymalną wysokością zawieszenia przewodu, h – minimalną wysokością przewodu w połowie rozpiętości rzeczywistego przęsła, S – zwisem przewodu, przy czym S = H - h. Ładunek wzdłuż przewodu jest stały, d – rozpiętość przęsła.



Rys. 2.1. Geometria przewodu linii napowietrznej w metodzie uproszczonej

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest obliczany dla jednej z trzech wybranych wysokości zawieszenia zastępczego przewodu prostoliniowego: maksymalnej wysokości linii, minimalnej wysokości w połowie rozpiętości przęsła lub wysokości średniej obliczanej z zależności [31, 63, 64]:

$$H_{av} = H - \frac{2S}{3} \tag{1}$$

#### 2.1.1. Natężenie pola elektrycznego

Pominięcie zwisu linii elektroenergetycznej pozwala oszacować w uproszczony sposób wartość natężenia pola elektrycznego. Natężenie i potencjał pola elektrycznego dla obszaru z > 0 wyznacza się, stosując metodę odbić zwierciadlanych, jak na rys. 2.2. Zakłada się, że ziemia jest idealnie płaska, środowisko w którym znajdują się ładunki rzeczywiste i fikcyjne jest jednorodne o przenikalności elektrycznej  $\varepsilon_0$  i nieograniczone.



Rys. 2.2. Geometria układu: przewód napowietrzny - odbicie zwierciadlane przewodu dla linii bez zwisu

Współrzędne x', y', z' odnoszą się do punktu źródłowego N(x', y', z') położonego na przewodzie linii, natomiast współrzędne x', y', - z' dotyczą odbicia zwierciadlanego w punkcie N'(x', y', - z'). Punkt obserwacji oznaczono jako P(x, y, z). Gęstość liniowa ładunku wynosi odpowiednio  $\lambda$  oraz - $\lambda$ . Wektor  $\mathbf{R}_d$  reprezentuje odległość punktu źródłowego do punktu obserwacji, natomiast wektor  $\mathbf{R}_{d1}$  odległość punktu źródłowego odbicia zwierciadlanego do punktu obserwacji.

Rozważa się następujące przypadki:

$$z_1 = H \tag{2}$$

$$z_1 = H_{av} = H - \frac{2S}{3}$$
 (3)

$$z_1 = h \tag{4}$$

Potencjał pola elektrycznego w przypadku pojedynczego przewodu dla z > 0 oblicza się ze wzoru [6, 9, 64, 143]:

$$\mathbf{V}(P) = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dl}{R_d} - \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dl'}{R_{d1}}$$
(5)

Przyjmuje się, że dla x' = x, y' = 0,  $z' = z_1 - a_r$ , gdzie  $a_r$  – promień zastępczy przewodu linii elektroenergetycznej

$$R_{d} = \sqrt{(y)^{2} + (z - z_{1} + a_{r})^{2}}$$
(6)

oraz:

$$R_{d1} = \sqrt{\left(y\right)^2 + \left(z + z_1 - a_r\right)^2} \tag{7}$$

Potencjał pola elektrycznego można opisać zależnością (8):

$$V = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0} \left[ I_1 - I_2 \right] \tag{8}$$

gdzie całki:

$$I_{1} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{dx'}{\sqrt{(y)^{2} + (z - z_{1} + a_{r})^{2}}}$$
(9)

$$I_{2} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \frac{dx'}{\sqrt{(y)^{2} + (z + z_{1} - a_{r})^{2}}}$$
(10)

Z równania (8) można wyznaczyć gęstość linową ładunku dla pojedynczego przewodu linii, o potencjale V:

$$\lambda = \frac{4V\pi\varepsilon_0}{I_1 - I_2} \tag{11}$$

Potencjał i gęstość ładunku  $\lambda$  wzdłuż rozpatrywanego przewodu nie zmieniają swojej wartości.

Natężenie pola elektrycznego dla przewodu linii bez zwisu przedstawia równanie [31, 63]:

$$\boldsymbol{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left[ \boldsymbol{I}_3 - \boldsymbol{I}_4 \right]$$
(12)

gdzie całki:

$$I_{3} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda \frac{(x-x')a_{x} + (y-y')a_{y} + (z-z')a_{z}}{\left(\sqrt{(x-x')^{2} + (y-y')^{2} + (z-z')^{2}}\right)^{3}} dx'$$
(13)

$$I_{4} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda \frac{(x-x')a_{x} + (y-y')a_{y} + (z+z')a_{z}}{\left(\sqrt{(x-x')^{2} + (y-y')^{2} + (z+z')^{2}}\right)^{3}} dx'$$
(14)

natomiast  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  – wektory jednostkowe w układzie współrzędnych prostokątnych.

Natężenie pola elektrycznego wytworzone układem przewodów rozpatrywanej linii elektroenergetycznej wyznacza się z zasady superpozycji.

W celu ilustracji metody uproszczonej wykonano przykładowe obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego dla linii jednotorowych o napięciu znamionowym: 110 kV, 220 kV, 400 kV. Tabela 2.1 przedstawia parametry linii [118, 124, 141, 142], rysunek 2.3 sylwetkę słupów, a tabela 2.2 prezentuje parametry przewodów dla rozpatrywanych linii elektroenergetycznych.

Przewód	Napięcie	Przekrój	Odległość	Wysokość H	Wysokość h	Średnia
	znamionowe	przewodu	przewodu	zawieszenia	w połowie	wysokość
		-	od osi linii	przewodu	rozpiętości	przewodu
				-	przęsła	$H_{av}$
	kV	mm <sup>2</sup>	m	m	m	m
			Linia 110 kV	7		
L1	110	240	-2,85	16,5	6,00	9,40
L2	110e <sup>j120</sup>	240	2,85	20,1	9,15	12,80
L3	110e <sup>-j120</sup>	240	3,65	16,5	6,00	9,40
Przewód	0	95	0,50	23,1	12,15	15,80
odgromowy						
			Linia 220 kV	7		
L1	220e <sup>-j120</sup>	525	-7,60	26,5	6,70	13,30
L2	220	525	0,00	26,5	6,70	13,30
L3	220e <sup>j120</sup>	525	7,60	26,5	6,70	13,30
Przewód odgromowy	0	70	-5,60	30,6	10,80	17,40
Przewód odgromowy	0	70	-5,60	30,6	10,80	17,40
	•		Linia 400 kV	T		1
L1	400e <sup>-j120</sup>	2x525	-10,3	26,5	7,80	14,03
L2	400	2x525	0,00	26,5	7,80	14,03
L3	400e <sup>j120</sup>	2x525	10,30	26,5	7,80	14,03
Przewód odgromowy	0	70	-8,20	30,6	13,70	19,33
Przewód odgromowy	0	70	8,20	30,6	13,70	19,33

Tabela 2.1. Parametry i konfiguracja rozpatrywanych linii elektroenergetycznych [118, 124, 141, 142].

Tabela 2.2. Parametry przewodów linii elektroenergetycznych [139].

Napięcie znamionowe	Typ przewodu	Przekrój znamionowy części Al	Obliczeniowa średnica przewodu	Obliczeniowa siła zrywająca	Ciężar przewodu	Długotrwała obciążalność prądowa
kV	-	mm <sup>2</sup>	mm	kN	kg/km	А
110	AFL6-240	240	21,7	84,6	974	634
220	AFL8-525	525	31,5	159,8	1977	1048
400	AFL8-525	525	31,5	159,8	1977	1048



Rys. 2.3. Sylwetki słupów 110 kV, 220 kV, 400kV

Obliczone profile poprzeczne natężenia pola elektrycznego pod liniami dla różnych wysokości zawieszenia przewodów w połowie długości przęsła (x = 0) przedstawiają rys. 2.4 - 2.6. Rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego przedstawiają rys. 2.7 - 2.9 dla wysokości zawieszenia przewodu z' = h. Natężenie pola elektrycznego wyznacza się w obszarze między słupami przęsła w pasie o szerokości  $y = \pm 25$  m od osi przęsła linii 110 kV i 220 kV, natomiast dla linii 400 kV  $y = \pm 50$  m.

Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi.



Rys. 2.4. Profil poprzeczny natężenia pola elektrycznego dla x = 0 i trzech wartości wysokości zawieszenia przewodów linii 110 kV



Rys. 2.5. Profil poprzeczny natężenia pola elektrycznego dla x = 0 i trzech wartości wysokości zawieszenia przewodów linii 220 kV



Rys. 2.6. Profil poprzeczny natężenia pola elektrycznego dla x = 0 i trzech wartości wysokości zawieszenia przewodów linii 400 kV



Rys. 2.7. Rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV



Rys. 2.8. Rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV



Rys. 2.9. Rozkład przestrzenny natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV

Rozpatrywana metoda uproszczona pozwala w szybki sposób oszacować wartość natężenia pola elektrycznego. Jest ona jednak mało precyzyjna i nie odzwierciedla rzeczywistego rozkładu natężenia pola elektrycznego pod linią elektroenergetyczną. Istotnym elementem jest wysokość, na której znajduje się rozpatrywany przewód linii elektroenergetycznej. Natężenie pola elektrycznego maleje wraz z zwiększaniem odległości punktu obserwacji P(x, y, z) od przewodu linii i przyjmuje stałą wartość dla y = const w obszarze między słupami.

Rozkład natężenia pola magnetycznego w metodzie uproszczonej oblicza się stosując prawo Biota - Savarta dla wysokości zawieszenia przewodu przedstawionych na rys. 2.1. Zakłada się, że środowisko jest nieograniczone, magnetycznie jednorodne. Jest to zagadnienie klasyczne i autor pozwolił sobie nie prezentować obliczeń.

#### 2.2. Metoda dokładna

#### 2.2.1. Uwzględnienie zwisu przewodu

Przewody linii elektroenergetycznych posiadają zwis, który zależy od indywidualnych cech linii oraz od ukształtowania terenu. W celu uwzględnienia zwisu

przewód znajdujący się między słupami przęsła o długości d dzieli się na n segmentów o takich samych długościach ( $s_1$ ,  $s_2$ , ...,  $s_{i-1}$ ,  $s_i$ ,  $s_{i+1}$ , ...  $s_n$ ) jak pokazano na rys. 2.10.



Rys. 2.10. Podział przewodu linii napowietrznej ze zwisem na n segmentów

Kształt przewodu linii elektroenergetycznej można opisać za pomocą równania krzywej łańcuchowej:

$$z(x) = h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x}{2\alpha}\right)$$
(15)

$$\alpha = \frac{T_h}{w} \tag{16}$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik związany z mechanicznymi parametrami linii,  $T_h$  – współczynnik naprężeń mechanicznych w połowie rozpiętości przęsła, w – ciężar przewodu na jednostkę długości. Jeżeli te współczynniki nie są znane, to  $\alpha$  można obliczyć w sposób iteracyjny z zależności [5, 6, 11, 12]:

$$H = h + 2\alpha \sinh^2 \left(\frac{d}{2\alpha}\right) \tag{17}$$

#### 2.2.1.1. Natężenie pola elektrycznego

Do obliczania natężenia trójwymiarowego pola elektrycznego wykorzystuje się metodę ładunków symulacyjnych (CSM) oraz metodę odbić zwierciadlanych. W metodzie CSM rzeczywisty rozkład ładunku na przewodzie linii elektroenergetycznej zostaje zastąpiony skończoną liczbą dyskretnych ładunków symulacyjnych. Należy przyjąć zasadę, że liczba ładunków symulacyjnych musi odpowiadać liczbie zdefiniowanych segmentów. Znane jest usytuowanie oraz typ ładunków symulacyjnych, należy jednak wyznaczyć ich wartość. Rozkład ładunków symulacyjnych o gęstości liniowej  $\lambda_i$  przedstawia rys. 2.11. Znany jest potencjał przewodu (fazor) [133, 135, 136].



Rys. 2.11. Rozkład ładunków symulacyjnych dla pojedynczego przewodu przęsła linii energetycznej ze zwisem

Implementacja metody ładunku symulacyjnego dla obliczania natężenia pola elektrycznego wymaga następujących czynności:

- opisu rozpatrywanego obiektu oraz powierzchni granicznych między ośrodkami o różnych przenikalnościach elektrycznych,
- wygenerowania ładunków symulacyjnych oraz punktów kolokacji,
- numerycznego rozwiązania liniowego układu równań,
- obliczenia natężenia pola elektrycznego.

Usytuowanie ładunków symulacyjnych ustala się na podstawie doświadczenia i obserwacji.

Potencjał wszystkich uziemionych elementów, takich jak kratownice słupów energetycznych, wsporniki lub ogrodzenia jest równy zero. Powierzchnia ziemi ma potencjał równy zero, jest idealnie płaska i jednorodna. Ściany budynków lub innych obiektów mają także potencjał zerowy. Pomija się wpływ pozostałych obiektów sąsiadujących oraz wpływ izolatorów zawieszonych na słupach linii. Pomija się również spadki napięć wzdłuż linii WN/NN oraz zjawisko ulotu.

Do obliczania natężenia trójwymiarowego pola elektrycznego wykorzystuje się również metodę odbić zwierciadlanych. Na rys. 2.12. przedstawiono *i*-ty segment przewodu z ładunkiem o gęstości  $\lambda_i$  i jego odbicie zwierciadlane. Współrzędne punktu obserwacji oznaczono jako P(x, y, z), natomiast współrzędne punktu źródłowego N(x', y', z'), a dla odbicia zwierciadlanego N'(x', y', -z'). Symbol *r'* oznacza współrzędną promieniową punktu źródłowego na krzywej  $C_{si}(r')$ , natomiast  $r_l'$  jest współrzędną promieniową punktu źródłowego na krzywej  $C_{sil}(r')$  dla odbicia zwierciadlanego, *r* oznacza współrzędną promieniową punktu obserwacji. Wektor **R**<sub>si</sub> reprezentuje odległość punktu źródłowego segmentu *i* do punktu obserwacji, natomiast wektor **R**<sub>sil</sub> odległość punktu źródłowego odbicia zwierciadlanego segmentu *i* do punktu obserwacji [131-133].



Rys. 2.12. Geometria układu: przewód napowietrzny - odbicie zwierciadlane przewodu

W rozpatrywanym przypadku potencjał pola elektrycznego w punkcie obserwacji P(x, y, z) przedstawia zależność:

$$V_{si}(P) = \int_{C_{si}(r')} \frac{\lambda_{si}}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dl'_{si}}{R_{si}} - \int_{C_{sil}(r')} \frac{\lambda_{si}}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dl'_{sil}}{R_{sil}}$$
(18)

Dla pojedynczego przewodu o *n* segmentach, potencjał punktu znajdującego się na każdym segmencie jest obliczany z zależności [7, 8, 9]:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_s \\ \vdots \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \begin{bmatrix} II_{11} - I2_{11} & II_{12} - I2_{12} & \cdots & II_{1n} - I2_{1n} \\ II_{21} - I2_{21} & II_{22} - I2_{22} & \cdots & II_{2n} - I2_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ II_{n1} - I2_{n1} & II_{n2} - I2_{n2} & \cdots & II_{nn} - I2_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \vdots \\ \lambda_{sn} \end{bmatrix}$$
(19)

przy czym potencjał każdego segmentu  $V_s$  = const; całki II i I2 mają następującą postać:

$$I1_{ij} = \int_{C_{si}} \frac{\cosh\left(\frac{x_j}{\alpha}\right) dx_j}{\sqrt{\left(x_i - x_j'\right)^2 + \left(y_i - y_j'\right)^2 + \left(z_i - h - 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x_j}{2\alpha}\right)\right)^2}}$$
(20)

$$I2_{ij} = \int_{C_{sil}} \frac{\cosh\left(\frac{x_j}{\alpha}\right) dx_j}{\sqrt{\left(x_i - x_j'\right)^2 + \left(y_i - y_j'\right)^2 + \left(z_i + h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x_j}{2\alpha}\right)\right)^2}}$$
(21)

Z równania (19) można wyznaczyć gęstość liniową ładunku dla poszczególnych segmentów pojedynczego przewodu:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \vdots \\ \lambda_{sn} \end{bmatrix} = 4\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} V_s \\ V_s \\ \vdots \\ V_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1_{11} - I2_{11} & I1_{12} - I2_{12} & \cdots & I1_{1n} - I2_{1n} \\ I1_{21} - I2_{21} & I1_{22} - I2_{22} & \cdots & I1_{2n} - I2_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I1_{n1} - I2_{n1} & I1_{n2} - I2_{n2} & \cdots & I1_{nn} - I2_{nn} \end{bmatrix}^{-1}$$
(22)

Natężenie pola elektrycznego dla pojedynczego przewodu w dowolnym punkcie obserwacji P(x, y, z) nad powierzchnią ziemi, otrzymuje się ze wzoru (23):

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{P}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left( \int_{C_{si}(\boldsymbol{r}')} \frac{\lambda_{si}(\boldsymbol{r}')}{R_{si}^2} d\boldsymbol{l}'_{si} - \int_{C_{si1}(\boldsymbol{r}')} \frac{\lambda_{si}(\boldsymbol{r}')}{R_{si1}^2} d\boldsymbol{l}'_{siI} \right)$$
(23)

$$\boldsymbol{R}_{si} = (x - x')\boldsymbol{a}_{x} + (y - y')\boldsymbol{a}_{y} + (z - z')\boldsymbol{a}_{z}$$
(24)

$$\boldsymbol{R}_{si1} = (x - x')\boldsymbol{a}_{x} + (y - y')\boldsymbol{a}_{y} + (z + z')\boldsymbol{a}_{z}$$
(25)

gdzie:  $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni,  $\lambda_{si}$  – gęstość liniowa ładunku symulacyjnego segmentu  $s_i$ ,  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  – wektory jednostkowe w układzie współrzędnych prostokątnych.

W przypadku, gdy linia elektroenergetyczna składa się z m przewodów (m > 1), ładunki wywołane na n segmentach każdego przewodu m są obliczane z zależności (26):

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_s \end{bmatrix}_1 \\ \begin{bmatrix} \lambda_s \end{bmatrix}_2 \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} \lambda_s \end{bmatrix}_m \end{bmatrix} = 4\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix}_1 \\ \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix}_2 \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{11} & \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{12} & \cdots & \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{1m} \\ \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{21} & \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{22} & \cdots & \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{m1} & \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{m2} & \cdots & \begin{bmatrix} P_s \end{bmatrix}_{mm} \end{bmatrix}^{-1}$$
(26)

Całkowite natężenie pola elektrycznego w punkcie obserwacji dla układu *m* przewodów można przedstawić wzorem (27) [10, 11, 45-49, 94, 96, 119]:

$$\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{P}) = \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left[ \boldsymbol{I}_{3j} - \boldsymbol{I}_{4j} \right]$$
(27)

gdzie:

$$\boldsymbol{I}_{3j} = \sum_{i=1}^{n} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{si}(r') \frac{\left[\left(x - x_{i}'\right)\boldsymbol{a}_{x} + \left(y - y_{i}'\right)\boldsymbol{a}_{y} + (z - z_{i}')\boldsymbol{a}_{z}\right] cosh\left(\frac{x_{i}'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{\left(x - x_{i}'\right)^{2} + \left(y - y_{i}'\right)^{2} + \left(z - z_{i}'\right)^{2}}\right)^{3}} dx_{i}'$$
(28)

$$I_{4j} = \sum_{i=1}^{n} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{si}(r') \frac{\left[\left(x - x_{i}'\right)\boldsymbol{a}_{x} + \left(y - y_{i}'\right)\boldsymbol{a}_{y} + \left(z + z_{i}'\right)\boldsymbol{a}_{z}\right] \cosh\left(\frac{x_{i}'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{\left(x - x_{i}'\right)^{2} + \left(y - y_{i}'\right)^{2} + \left(z + z_{i}'\right)^{2}}\right)^{3}} dx_{i}'$$
(29)

W celu zilustrowania przedstawionej metody przeprowadzono przykładowe obliczenia.

Tabela 2.1 przedstawia parametry linii 110 kV– typ słupa B2, 220 kV – typ słupa H52, 400 kV – typ słupa Y52. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Wyznacza się natężenie pola elektrycznego w obszarze między słupami przęsła w pasie o szerokości  $y = \pm 25$  m od osi przęsła linii 110 kV i 220 kV, natomiast dla linii 400 kV  $y = \pm 50$  m. Gęstość siatki numerycznej jest stała. Liczba punktów obliczeniowych zależy od szerokości pasa i długości przęsła linii. Dla linii 110 kV siatka obliczeniowa składa się z 15000 punktów, dla linii 220 kV z 20000 punktów, a dla linii 400 kV z 40000 punktów.

Rozkład trójwymiarowego (3-D) natężenia pola elektrycznego dla linii 110 kV przedstawia rys. 2.13. Maksymalna wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego wynosi  $E_{max} = 3353,83$  V/m i występuje w punkcie największego zwisu przewodów linii, dla y = - 5 m. Długość przęsła linii d = 300 metrów.



Rys. 2.13. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV

Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego dla linii 220 kV przedstawia rysunek 2.14. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego wynosi

 $E_{max} = 5035,75$  V/m i występuje w punkcie największego zwisu przewodów linii, dla  $y = \pm 8$  m. Długość przęsła linii d = 400 metrów.



Rys. 2.14. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV

Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego dla linii 400 kV przedstawia rysunek 2.15. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego wynosi  $E_{max} = 9512,88$  V/m i występuje w punkcie największego zwisu przewodów linii, dla  $y = \pm 25$  m. Długość przęsła linii d = 400 metrów.



Rys. 2.15. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV

Linie elektroenergetyczne najwyższych napięć zbudowane są przeważnie z wielowiązkowych przewodów stalowo-aluminiowych AFL-8 525 [39]. Budowę linii dwuwiązkowej przedstawia rysunek 2.16. Potencjały przewodów w poszczególnych wiązkach są takie same.



Rys. 2.16. Geometria linii jednotorowej wielowiązkowej 400 kV

Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego na wysokości 2 m dla linii wielowiązkowej 400 kV przedstawia rysunek 2.17. Maksymalna wartość natężenia elektrycznego wynosi  $E_{max} = 11549,81$  V/m i występuje w punkcie największego zwisu przewodów linii, dla  $y = \pm 25$  m. Długość przęsła linii d = 400 metrów.



Rys. 2.17. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV wielowiązkowej

Z obliczeń wynika, że stosowane przewody wielowiązkowe w liniach elektroenergetycznych powodują wzrost natężenia pola elektrycznego w rozpatrywanym punkcie obserwacji, a obniżenie natężenia pola elektrycznego w pobliżu wiązki.

Algorytmy obliczeniowe bazujące na trójwymiarowej zmodyfikowanej metodzie ładunków symulacyjnych i uwzględniające wpływ zwisu przewodów linii elektroenergetycznej na rozkład pola elektrycznego pozwalają uzyskać wyniki zbliżone do wartości rzeczywistych. Wartość natężenia pola elektrycznego dla linii ze zwisem rośnie wraz ze zmniejszaniem się wysokości przewodu nad powierzchnią ziemi. W punkcie maksymalnego zwisu przewodu natężenie osiąga maksimum.

#### 2.2.1.2. Natężenie pola magnetycznego

Przed wyznaczeniem rozkładu natężenia pola magnetycznego wytworzonego wokół linii elektroenergetycznej należy wyznaczyć impedancje własne oraz wzajemne wszystkich przewodów w układzie, co umożliwi wyznaczenie prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznej.

Do obliczania impedancji własnych i wzajemnych przewodów wykorzystuje się zmodyfikowaną metodę odbić zwierciadlanych, która pozwala zastąpić skomplikowaną metodę Carsona [100] stosowaną w teorii obwodów ziemnopowrotnych [94, 125].

Odbicie zwierciadlane następuje od fikcyjnej płaszczyzny przewodzącej, umieszczonej na głębokości p o wartości zespolonej (rys. 2.18). Wysokości zawieszenia rozpatrywanych przewodów k i l oznaczono symbolami  $H_k$ ,  $H_l$ , natomiast  $d_{kl}$  jest odległością między tymi przewodami.


Rys. 2.18. Geometria przewodów k i l w płaszczyźnie yz

Impedancję zespoloną własną przewodu k wyznacza się z zależności:

$$Z_{kk} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{2(H_k + p)}{a_{rk}}$$
(30)

gdzie:

 $H_k$  – wysokość zawieszenia przewodu odgromowego k, a<sub>r</sub> – promień przewodu k,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $\omega$  – pulsacja,  $j = \sqrt{-1}$ 

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\gamma}} \tag{31}$$

gdzie:

 $\gamma$  – konduktywność gruntu, f – częstotliwość.

Impedancję zespoloną wzajemną między prostoliniowymi przewodami k i l oblicza się ze wzoru:

$$Z_{kl} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{g_{kl}}{a_{kl}}$$
(32)

przy czym:

$$g_{kl} = \sqrt{(H_k + H_l + 2p)^2 + d_{kl}^2}$$
(33)

$$a_{kl} = \sqrt{\left(H_k - H_l\right)^2 + d_{kl}^2}$$
(34)

W przypadku impedancji zespolonej własnej i wzajemnej przewodów k i l, w układzie z większą liczbą przewodów niż 2 obliczenia wykonuje się w sposób analogiczny. Znając impedancje własne i wzajemne, liczbę przewodów odgromowych i fazowych, geometrię układu oraz fazory prądów roboczych można obliczyć fazory prądów w przewodach odgromowych.

Na rysunku 2.19, przedstawiono schematycznie, przykład linii składającej się z 3 przewodów roboczych oznaczonych  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  z fazorami prądów  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  oraz dwóch przewodów odgromowych oznaczonych  $G_1$ ,  $G_2$ . Zakłada się, ponadto, że znana jest geometria układu. Prądy (fazory) w przewodach odgromowych  $I_{G1}$ ,  $I_{G2}$  oblicza się z zależności (35):

$$\begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} Z_{G1G1} & Z_{G1G2} \\ Z_{G2G1} & Z_{G2G2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{G1L1} & Z_{G1L2} & Z_{G1L3} \\ Z_{G2L1} & Z_{G2L2} & Z_{G2L3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix}$$
(35)



Rys. 2.19. Przykład linii elektroenergetycznej wieloprzewodowej

W celu obliczenia natężenia pola magnetycznego w punkcie obserwacji P(x, y, z) wykorzystuje się prawo Biota-Savarta [97]:

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{P}) = \mu_0 \int_{C_{si}} \frac{I(l)(d\boldsymbol{l}'_{si} \times \boldsymbol{R}(l))}{4\pi |\boldsymbol{R}_{si}(l)|^2}$$
(36)

gdzie:

I(l) – fazor prądu,  $R_{si}(l)$  – odległości punktu obserwacji od punktu źródłowego, R(l) – wektor jednostkowy w kierunku  $R_{si}(l)$ . Na rysunku 2.20 przedstawiono fragment przewodnika o długości  $dl'_{si,,}$  przez który płynie prąd o natężeniu  $I(l'_{si})$ .



Rys. 2.20. Pole magnetyczne przewodu z prądem

Natężenie pola magnetycznego dla pojedynczego przewodu w dowolnym punkcie P(x, y, z) nad powierzchnią ziemi wyznacza się z zależności:

$$H(x, y, z) = \frac{I}{4\pi} \left[ \int_{-d/2}^{d/2} \frac{((x - x')\mathbf{a}_{x} + (y - y')\mathbf{a}_{y} + (z - z')\mathbf{a}_{z})\cosh\left(\frac{x'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{(x - x')^{2} + (y - y')^{2} + (z - z')^{2}}\right)^{3}} dx' \right]$$
(37)

Wypadkowe natężenie pola magnetycznego wytworzone przez układ *m* przewodów linii elektroenergetycznej jest równe sumie geometrycznej składowych *x*, *y*, *z* wektorów pola magnetycznego [35, 44, 125, 126]:

$$H_T = \sqrt{\sum_{j=1}^m H_{xj}^2 + \sum_{j=1}^m H_{yj}^2 + \sum_{j=1}^m H_{zj}^2}$$
(38)

Przykładowe obliczenia natężenia pola magnetycznego wykonano dla pojedynczego przęsła linii o napięciach znamionowych: 110 kV, 220 kV, 400 kV, przy założeniu, że układ prądów roboczych jest symetryczny. Prądy w przewodach fazowych zostały dobrane ze względu na wytrzymałość prądową przewodów AFL z danych katalogowych. Podczas obliczania natężenia pola magnetycznego uwzględnia się przewody odgromowe oraz prądy w nich wzbudzone.

Tabela 2.1 przedstawia parametry linii 110 kV – typ słupa B2, 220 kV – typ słupa H52, 400 kV – typ słupa Y52. Tabela 2.2 prezentuje parametry przewodów linii elektroenergetycznych. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi.

Poniżej przedstawiono rozkład trójwymiarowego natężenia pola magnetycznego pod linią 110 kV zawieszoną na słupie typu B2 przy założeniu, że prąd obciążenia linii wynosi 634 A. Prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym ma wartość  $|I_G| = 60,73$  A. Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego wynosi  $H_{max} = 21,17$  A/m w miejscu największego zwisu przewodów linii elektroenergetycznej, dla y = 0 m. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią elektroenergetyczną na obszarze między słupami przęsła w granicach dla  $y = \pm 25$  m pokazany jest na rys. 2.21. Długość przęsła linii d = 300 metrów.



Rys. 2.21. Natężenie 3-D pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z uwzględnieniem zwisu przewodów oraz prądów wzbudzonych w przewodzie odgromowym

Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią elektroenergetyczną 220 kV zawieszoną na słupach typu H52 obliczono przy założeniu, że prąd obciążenia wynosi 1048 A. Prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym ma wartość  $|I_{G1}| = |I_{G2}| = 77,49$  A. Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego wynosi  $H_{max} = 37,73$  A/m w miejscu największego zwisu przewodów linii elektroenergetycznej, dla y = 0 m. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią elektroenergetyczną na obszarze między słupami przęsła w granicach dla  $y = \pm 25$  m pokazany jest na rys. 2.22. Długość przęsła linii d = 400 metrów.



Rys. 2.22. Natężenie 3-D pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z uwzględnieniem zwisu przewodów oraz prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych

Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią 400 kV zawieszoną na słupie Y52 przy założeniu, że prąd obciążenia wynosi 2096 A. Prąd wzbudzony w przewodach odgromowych ma wartość  $|I_{GI}| = |I_{G2}| = 176,68$  A. Maksymalne natężenie pola magnetycznego wynosi  $H_{max} = 62,63$  A/m w miejscu największego zwisu przewodów linii elektroenergetycznej dla y = 0 m. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią elektroenergetyczną na obszarze między słupami przęsła w granicach dla  $y = \pm 50$  m pokazany jest na rys. 2.23. Długość przęsła linii d = 400 metrów.



Rys. 2.23. Natężenie 3-D pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV z uwzględnieniem zwisu przewodów oraz prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych

Dla linii elektroenergetycznej 400 kV wyposażonej w przewody wielowiązkowe rozkład natężenia pola magnetycznego na obszarze między słupami przęsła w granicach dla  $y = \pm 50$  m pokazany jest na rys. 2.24. Prąd obciążenia wynosi 2096 A. Prąd wzbudzony w przewodach odgromowych ma wartość  $|I_{GI}| = |I_{G2}| = 185,68$  A, natomiast maksymalne natężenie pola magnetycznego wynosi  $H_{max} = 129,99$ A/m w miejscu największego zwisu przewodów linii elektroenergetycznej dla y = 0 m.



Rys. 2.24. Natężenie pola magnetycznego pod przęsłem wielowiązkowej linii 400 kV z uwzględnieniem zwisu przewodów oraz prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych

W przedstawionym rozdziale dokonano obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego pod linią elektroenergetyczną za pomocą metody ładunków symulacyjnych i metody odbić zwierciadlanych. W obliczeniach uwzględnia się zwis przewodów oraz zmienną wartość ładunków symulacyjnych wzdłuż linii. Pole magnetyczne obliczane jest z uwzględnieniem obecności przewodów odgromowych oraz prądów w nich wzbudzonych. Wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii elektroenergetycznej ze zwisem rośnie wraz ze zmniejszaniem się wysokości przewodu nad powierzchnią ziemi. W punkcie maksymalnego zwisu przewodu natężenie osiąga maksimum.

Przedstawiona metoda umożliwia dokładną symulację trójwymiarowego rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego pod linią elektroenergetyczną.

W następnym rozdziale zostaną porównane wyniki obliczań rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego z pomiarami wykonanymi pod wybranymi liniami elektroenergetycznymi.

# 3. Porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów dla wybranych linii elektroenergetycznych

W celu weryfikacji opracowanych modeli symulacyjnych pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznych, wyniki symulacji (metodą dokładną), natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały porównane z wynikami pomiarów wykonanych pod rzeczywistymi liniami elektroenergetycznymi.

Pomiary wykonano dla linii jedno- i dwutorowej o napięciu znamionowym 110 kV, zawieszonej na słupach typu B2 oraz dla linii jednotorowej o napięciu znamionowym 220 kV. Geometrię słupów przedstawia rys. 3.1.



Rys. 3.1. Sylwetka słupów B2, H52 oraz słupa dwutorowego B2 [102]

Pomiary natężeń pola elektrycznego i magnetycznego wykonywano miernikiem E/H typu ESM-100. Urządzenie to dokonuje pomiarów wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w czasie rzeczywistym, niezależnie od jego kierunku. Realizuje pomiary sześciokanałowo (*Bx*, *By*, *Bz* oraz *Ex*, *Ey*, *Ez*), natomiast rozdzielczość miernika określona jest na poziomie 1 nT i 100 mV/m.

Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonano w miejscach największego zwisu przewodów linii w kierunku poprzecznym do osi linii dla wybranych typów linii elektroenergetycznych. Prądy w przewodach fazowych zostały uzyskane od głównego dyspozytora sieci energetycznych w Poznaniu.

Pierwszym obiektem badań była linia jednotorowa o napięciu znamionowym 110 kV znajdująca się w Poznaniu na ulicy Nadwarciańskiej, w odległości około pół kilometra od stacji GPZ w Czerwonaku. Przewody zawieszone są na słupie typu B2 (rys. 3.1). Następstwo napięć:  $U_1 = 110 \text{ e}^{\text{-j}120^\circ} \text{ kV}$ ,  $U_2 = 110 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 110 \text{ e}^{\text{-j}120^\circ} \text{ kV}$ .

Długość przęsła linii *d* wynosi 300 metrów, a prąd obciążenia podczas pomiarów był równy 235 A. Obliczony prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym wynosił  $|I_G| = 16,04$  A. W miejscu największego zwisu linii zmierzone wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego  $E_{maxpom.} = 2163,31$  V/m, a pola magnetycznego  $H_{maxpom} = 3,05$  A/m. Przewody fazowe  $L_1$ ,  $L_2$  w połowie rozpiętości przęsła mają wysokość 7 metrów, przewód  $L_3$  10 metrów, a przewód odgromowy 13 metrów. Obliczona maksymalna wartość natężenia pola wynosiła 2426,43 V/m, a pola magnetycznego 3,46 A/m.

Rysunki 3.2 i 3.3 przedstawiają porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów wykonanymi pod linią 110 kV. Pomiary i obliczenia wykonano na wysokości 2 metrów.



Rys. 3.2. Natężenie pola elektrycznego pod linią 110 kV - porównanie wyników pomiarów i obliczeń



Rys. 3.3. Natężenie pola magnetycznego pod linią 110 kV – porównanie wyników pomiarów i obliczeń

Kolejnym obiektem badań była linia dwutorowa o napięciu znamionowym 2 x 110 kV, zawieszona na słupie typu B2 (rys. 3.1) w pobliżu ulicy Chartowo w Poznaniu, w niewielkiej odległości od stacji GPZ Rataje. Następstwo napięć jest następujące:  $U_{11} = 110$  kV,  $U_{12} = 110 e^{-j120^{\circ}}$  kV,  $U_{13} = 110 e^{j120^{\circ}}$  kV,  $U_{21} = 110 e^{j120^{\circ}}$  kV,  $U_{22} = 110 e^{-j120^{\circ}}$  kV,  $U_{23} = 110$  kV. Długość przęsła linii *d* jest równa 300 metrów. Prąd obciążenia w trakcie pomiarów dla toru pierwszego wynosił 120 A, a dla toru drugiego 83 A. Obliczony prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym wynosił  $|I_G| = 1,21$  A. Pomiary wykonano na wysokości 2 metrów w miejscu największego zwisu linii, maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego  $E_{maxpom.} = 1129,04$  V/m, a pola magnetycznego  $H_{maxpom} = 1,18$  A/m. Przewody fazowe  $L_{11}$ ,  $L_{21}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{22}$  w połowie rozpiętości przęsła mają wysokość 9 metrów, przewody  $L_{13}$ , L23 11 metrów, a przewód odgromowy 13 metrów. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego 1,27 A/m.

Rysunki 3.4 i 3.5 przedstawiają porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów wykonanych pod linią 2 x 110 kV.



Rys. 3.4. Natężenie pola elektrycznego pod linią 110 kV dwutorową – porównanie wyników pomiarów i obliczeń



Rys. 3.5. Natężenie pola magnetycznego pod linią 110 kV dwutorową – porównanie wyników pomiarów i obliczeń

Trzecim obiektem badań była linia 220 kV jednotorowa zawieszona na słupie H52 (rys. 3.1) w Poznaniu na ulicy Nadwarciańskiej, w odległości około pół kilometra od stacji GPZ w Czerwonaku. Następstwo napięć jest następujące:  $U_{II} = 220$  kV,  $U_{I2} = 220 e^{-j120^{\circ}}$  kV,  $U_{I3} = 220 e^{j120^{\circ}}$  kV. Długość przęsła linii d = 400 metrów. Prąd obciążenia podczas pomiarów miał wartość 570 A. Obliczony prąd wzbudzony w przewodzie odgromowym wynosił  $|I_{GI}| \approx |I_{G2}| = 41,47$  A. Pomiary wykonano na wysokości 2 metrów w miejscu największego zwisu linii, maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego  $E_{maxpom.} = 3130$  V/m, a pola magnetycznego  $H_{maxpom} = 6,84$  A/m. Przewody fazowe  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  w połowie rozpiętości przęsła mają wysokość 8,7 metra, a przewody odgromowe 12,8 metra. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego 7,41 A/m. Na rysunkach 3.6 i 3.7 przedstawiono porównanie wyników obliczeń z rzeczywistymi pomiarami natężeń pól elektrycznego i magnetycznego w miejscu największego zwisu linii 220 kV.



Rys. 3.6. Natężenie pola elektrycznego pod linią 220 kV - porównanie wyników pomiarów i obliczeń



Rys. 3.7. Natężenie pola magnetycznego pod linią 220 kV – porównanie wyników pomiarów i obliczeń

Profile natężenia pola elektrycznego i magnetycznego obliczono w miejscach największego zwisu przewodów linii (x = 0). Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości z = 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi.

Wykonane symulacje w zadawalającym stopniu odzwierciedlają rzeczywisty rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Wyniki symulacji są zbliżone do wartości otrzymanych podczas pomiarów. Można przyjąć, że przedstawiona metoda dokładna obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest poprawna i pozwala zasymulować rzeczywisty rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych.

W dalszej części pracy zaprezentowane będą metody optymalizacji parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznej w celu redukcji wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w oparciu o opracowaną i zweryfikowaną pomiarowo metodę dokładną.

Do obliczeń przyjmowane będą wartości prądów w przewodach roboczych linii elektroenergetycznych o napięciu 110 kV i 220 kV jak podczas pomiarów, natomiast w przypadku pozostałych linii wykorzystano długotrwałą obciążalność prądową przewodów, podaną w katalogu [139].

## 4. Algorytmy optymalizacyjne

### 4.1. Wprowadzenie

Rozwój urbanizacji powoduje wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Linie elektroenergetyczne buduje się coraz bliżej zabudowań. Taka sytuacja wymusza wykorzystywanie wszystkich możliwych środków do redukcji pola elektrycznego i magnetycznego, wytwarzanych przez napowietrzne linie elektroenergetyczne. Jedną z wielu dostępnych metod redukcji pola elektrycznego i magnetycznego jest zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi. Minimalna odległość pomiędzy przewodami oraz inne parametry geometryczne linii elektroenergetycznej podane są w normie PN-EN 50341.

Podczas projektowania nowych linii elektroenergetycznych w bliskim sąsiedztwie budynków, zastosowanie standardowych słupów często nie pozwala na uzyskanie natężeń pól zgodnych z rozporządzeniem Ministra Środowiska [8] dla terenów zamieszkałych. Za pomocą algorytmów optymalizacyjnych można jednak dobrać właściwą konfigurację parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznej oraz przewodów redukcyjnych w celu uzyskania wartości pola elektrycznego i magnetycznego nie przekraczających dopuszczalnych granic.

W niniejszym rozdziale zostaną omówione algorytmy optymalizacyjne funkcji wielu zmiennych. Metody optymalizacyjne dzieli się na deterministyczne oraz stochastyczne. W skład metod deterministycznych wchodzą między innymi metody: gradientu prostego, najszybszego spadku, Newtona – Rapshona. Do metod stochastycznych należą na przykład: metoda Monte Carlo, algorytmy genetyczne i algorytm roju cząstek. Metody deterministyczne są czasochłonne, wymagają dużych mocy obliczeniowych i są mało dokładne [127].

W rozprawie optymalizację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznej wykonano za pomocą algorytmu genetycznego i roju cząstek. Poprawność działania algorytmu PSO zweryfikowano przy pomocy algorytmu GA.

50

#### 4.2. Metoda gradientu prostego

Podstawową metodą znajdowania ekstremum funkcji jest metoda gradientu prostego. Metoda ta jest intuicyjna i prosta, ponieważ wymaga rozwiązania pochodnych pierwszego rzędu. Polega ona na wybieraniu kierunku poszukiwań na podstawie znajomości gradientu funkcji celu, w punkcie osiągniętym w poprzednim kroku. Aby ją zastosować, muszą być spełnione następujące warunki:

- funkcja jest ściśle wypukła w badanej dziedzinie,
- funkcja jest funkcją ciągłą i różniczkowalną.

Do minimalizacji brana jest funkcja  $\theta(w)$ . Na początku wybierany jest punkt startowy *w*, który następnie wielokrotnie zmienia się w taki sposób, aby  $\theta(w)$  była jak najmniejsza. Proces ten powtarzany jest tak długo, aż zostanie znalezione minimum przez funkcję strat (błędu). Standardową metodę optymalizacji wyszukiwania liniowego definiujemy jako:

$$\mathbf{w}_{i+1} = \mathbf{w}_i + \mathbf{s}_i \tag{39}$$

$$\mathbf{s}_{i} = \boldsymbol{\alpha}_{i} \mathbf{p}_{i} \tag{40}$$

$$p_{i} = \frac{\delta\theta(w)}{\delta w_{i}}$$
(41)

dla iteracji i = 0, 1, ..., n. Parametr  $\alpha$  nazywany jest wskaźnikiem uczenia. Istotne jest, aby wybrać odpowiednią wartość tego parametru. Jeżeli  $\alpha$  będzie za duży, to optymalne rozwiązanie może zostać pominięte (algorytm zatrzyma się w minimum lokalnym, zamiast globalnym), natomiast jeżeli  $\alpha$  będzie zbyt mały, uzyskanie najlepszego rozwiązania zajmie za dużo czasu (liczba wykonanych iteracji jest bardzo duża do znalezienia optimum). Zazwyczaj wskaźnik uczenia przyjmuje wartości mniejsze od 0,1. Parametr  $p_i$  reprezentuje pochodną funkcji strat [103, 104, 105, 106, 107, 127]. Nie jest to efektywna metoda poszukiwań, dlatego często stosuje się inne metody optymalizacji.

#### 4.3. Metoda Newtona – Raphsona

Metoda ta jest bardzo skuteczna i posiada wiele zastosowań. Polega ona na iteracyjnej konstrukcji ciągu ( $x_n$ ) za pomocą następującej procedury: w każdym kroku konstrukcji funkcję f(x) zastępuje się przez jej liniowe przybliżenie  $l(x) = a_n x + b$  ze środkiem w punkcie  $x_n$  będącym aktualnym przybliżeniem, a jako następne przybliżenie  $x_{n+1}$  pierwiastka równania f(x) = 0, obiera się pierwiastek równania  $l_n(x) = 0$ .

Przyjmuje się, że dla różniczkowalnej funkcji f(x) jej liniowe przybliżenie ze środkiem w punkcie  $x_n$  dane jest wzorem:

$$l_n(x) = f(x_n) + f'(x_n)(x - x_n)$$
(42)

gdzie f' oznacza pochodną funkcji f(x). Ciąg kolejnych przybliżeń rozwiązania zadany jest przez wybór początkowej wartości  $x_0$  za pomocą rekurencyjnej formuły:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{1}{f'(x_n)} f(x_n)$$
(43)

Funkcja f musi spełniać warunek, tak aby ciąg iteracji był określony i zbieżny do pierwiastka równania f(x) = 0 [127].

#### 4.4. Algorytm genetyczny

Algorytm genetyczny (GA) należy do grupy algorytmów ewolucyjnych, bazujących na regułach ewolucji naturalnej, której podstawy opracował Karol Darwin w 1844 roku. Pierwsze wzmianki na temat wykorzystania algorytmu genetycznego pojawiły się w roku 1967 w artykule [108]. W pracy [109] wykorzystano metodę preselekcji polegającej na tym, że osobnik potomny zastępował swojego rodzica w celu utrzymania swojej populacji. Metoda ta została wykorzystana do pierwszych optymalizacji. W 1971 roku w pracy [110] wykonano optymalizację funkcji dwóch zmiennych przy zastosowaniu mechanizmów dominowania, krzyżowania, mutacji oraz reprodukcji. Rok później wykonano badania opisujące korelację między występowaniem krótkodystansowych sprzężeń, a tempem poprawy wyników. Sześć metod selekcji przedstawiono po raz pierwszy w rozprawie [111]. W 1983 roku zaproponowano użycie metody turniejowej do selekcji populacji. W pracy [112] wykazano wyższość wyboru losowego bez powtórzeń nad modelem wartości oczekiwanej. Badania wykonywane w późniejszych latach opierały się na badaniu mechanizmu skalowania funkcji celu.

Algorytm genetyczny posiada następujące cechy [108, 113]:

- prowadzi poszukiwania pośród populacji punktów,
- korzysta z funkcji celu,
- stosuje reguły wyboru typu probabilistycznego, a nie deterministycznego,
- przetwarza zakodowaną postać.

Algorytm genetyczny korzysta z następujących określeń używanych w genetyce:

- populacja zbiór osobników o określonej liczbie,
- osobnik populacji przedstawiciel populacji, w którym zakodowane są w postaci chromosomów zbiory parametrów rozwiązań, określane jako punkty przestrzeni poszukiwań,
- chromosomy uporządkowane ciągi genów,
- gen cecha, która stanowi pojedynczy element genotypu,
- genotyp zespół chromosomów danego osobnika,
- fenotyp zestaw wartości odpowiadających danemu genotypowi, czyli zbiór parametrów zadania (rozwiązanie, punkt przestrzeni poszukiwań),
- allel wartość cechy,
- locus miejsce położenia danego genu w chromosomie.

Ważnym pojęciem w algorytmach genetycznych jest funkcja przystosowania, która mówi o dopasowaniu danego osobnika w populacji. Funkcja ta jest istotna, gdyż pozwala ocenić stopień adaptacji poszczególnych osobników w populacji i na tej podstawie wybrać osobniki najlepiej przystosowane (czyli o największej wartości funkcji przypasowania). Ma ona duży wpływ na działanie algorytmu i musi być odpowiednio zdefiniowana. Im większa jest wartość funkcji, tym lepsza jakość chromosomów. Zakłada się, że funkcja przystosowania nie może przyjąć wartości ujemnych. Każda iteracja algorytmu genetycznego podlega ocenianiu adaptacji osobnika do danej populacji za pomocą funkcji przystosowania. Na tej podstawie tworzona jest nowa populacja osobników, stanowiących zbiór potencjalnych rozwiązań problemu. Kolejna nowa iteracja w algorytmie genetycznym nazywa się generacją.

Szukane parametry tworza populacje chromosomów, które poczatkowo składaja się z wybranych losowo liczb rzeczywistych w określonych zakresach. Dodatkowo w procesie inicjacji generowany jest wektor populacji, składający się z kilku zmiennych kontrolnych. Następnie funkcja celu jest obliczana dla każdej populacji z osobna, zgodnie z wzorem (27) i (37). Na podstawie obliczonych wartości funkcji przystosowania dokonuje się wyboru chromosomów, które będą brały udział w tworzeniu potomków do następnego pokolenia. Selekcja odbywa się za pomocą koła ruletki, gdzie każdemu chromosomowi przydziela się wycinek koła o wielkości proporcjonalnej do wartości funkcji przystosowania danego chromosomu. Im większa jest wartość funkcji, tym większy jest wycinek koła ruletki, natomiast całe koło odpowiada sumie wartości funkcji przystosowania wszystkich chromosomów rozważanej populacji. W rezultacie powstaje populacja rodzicielska. W operacji krzyżowania wybierane są chromosomy z populacji rodzicielskiej. Tworzone są pary w sposób losowy zgodnie z prawdopodobieństwem krzyżowania, które przyjmuje się w zakresie  $0.5 \le p_c \le 1$ . Następnie dla każdej pary losuje się pozycję genu (locus) w chromosomie, określającą tzw. punkt krzyżowania. Jeżeli chromosom każdego rodzica składa się z L genów, to punkt krzyżowania jest liczbą naturalną L - 1, czyli musi być wybrany w przedziale od 1 do L - 1. Natomiast podczas mutacji wartość wybranego losowo genu w chromosomie zmienia się na przeciwną. Prawdopodobieństwo mutacji przyjmuje się za bardzo małe w zakresie  $0 \le p_m \le 0,1$ . Należy zaznaczyć, że operator mutacji odgrywa rolę drugoplanową w stosunku do operatora krzyżowania. Oznacza to, że krzyżowanie w algorytmie genetycznym występuje zawsze, natomiast mutacja może nie występować. Jest to sytuacja analogiczna do świata organizmów żywych, gdzie mutacje zachodzą bardzo rzadko. Chromosomy otrzymane w wyniku działania operatorów genetycznych na chromosomy tymczasowej populacji rodzicielskiej wchodzą w skład nowej populacji. Populacja ta staje się tzw. populacją bieżącą dla danej iteracji algorytmu genetycznego. W każdej kolejnej iteracji oblicza się wartość funkcji przystosowania każdego z chromosomów w populacji bieżącej. Ponownie funkcja celu jest obliczana dla wszystkich osobników nowej generacji albo następuje przejście do kolejnego kroku algorytmu genetycznego, tzn. selekcji. W algorytmie genetycznym cała poprzednia populacja chromosomów zastępowana jest przez tak samo liczną, nową populację potomków. Ta procedura jest powtarzana do momentu osiągnięcia minimum funkcji algorytmu i podania wyniku o najlepszym przystosowaniu wartości [114]. Schemat blokowy działania GA przedstawia rys. 4.1.



Rys. 4.1. Ogólny schemat blokowy działania algorytmu genetycznego (GA)

#### 4.5. Algorytm roju cząstek

Inspiracją dla wielu technik obliczeniowych jest obserwacja funkcjonowania organizmów żywych. Metoda roju cząstek (PSO) naśladuje zachowanie osobników żyjących w stadach, które tworzą populacje. Osobniki żyjące w rojach oddziałują na siebie przy równoczesnym wpływie środowiska bytowania. Cząstki roju mają zdolność zapamiętywania swoich położeń, przystosowują się do środowiska w którym żyją i powracają do obszarów o sprzyjających właściwościach. Dzięki temu rój kieruje się zawsze do najlepszej pozycji. Po raz pierwszy algorytm roju cząstek został zaproponowany w roku 1995 w artykule [116]. Algorytm roju cząstek należy do algorytmów ewolucyjnych i ma wiele elementów wspólnych z algorytmem genetycznym oraz z programowaniem ewolucyjnym. PSO jest metodą metaheurystyczną, nie gradientową więc może optymalizować nieróżniczkowalne, a nawet nieciągłe funkcje.

Z tego powodu nadaje się do optymalizacji problemów dynamicznych lub z dynamicznie zmieniającą się dziedziną funkcji. Można ją zastosować do optymalizacji problemów nieregularnych. Cechuje się znacznym potencjałem rozwiązywania trudnych problemów optymalizacji z dużą ilością parametrów wejściowych. Metoda PSO ma następujące właściwości:

- bliskość cząstek umożliwia wykonanie szybszych obliczeń,
- jakość, która umożliwia ocenę oddziaływania z otoczeniem,
- zróżnicowanie reakcji,
- stabilność, gdyż warunkuje zachowania o umiarkowanej reakcji w otoczeniu,
- adaptację, która umożliwia zmianę w zachowaniu osobnika, jeśli wymusza to otoczenie.

W PSO wykorzystuje się współpracę i dzielenie się doświadczeniem ze wszystkimi osobnikami. Rój składa się z osobników, które nazywane są cząstkami lub agentami. W trakcie kolejnych kroków cząstki przemieszczają się do nowych położeń, symulując adaptację roju do środowiska, czyli poszukują optimum. Każda cząstka *c* jest opisana przez swoją pozycję  $X_c = (x_{c1}, x_{c2}, ..., x_{cm})$  oraz prędkość  $V_c = (v_{c1}, v_{c2}, ..., v_{cm})$ , a rozwiązanie funkcji danej wzorami (27) i (38) w *m* wymiarowej przestrzeni jest reprezentowane przez wektor  $X_c$ . Rój składa się z *n* cząstka roju przesuwa się do nowej pozycji, uwzględniając swoją poprzednią pozycję i poprzednią prędkość, a także swoją najlepszą pozycję znalezioną do tej pory  $P_c = (P_{c1}, P_{c2}, ..., P_{cm})$  oraz najlepszą pozycję znalezioną to tej pory  $P_c = (P_{c1}, P_{c2}, ..., P_{cm})$  oraz najlepszą pozycję znalezioną do tej pory  $P_c = (P_{c1}, P_{c2}, ..., P_{cm})$  oraz najlepszą pozycję znalezioną w całym roju  $G_c = (g_{c1}, g_{c2}, ..., g_{cm})$ . Liderem roju zostaje cząstka o najlepszym znanym położeniu. To własne doświadczenie w PSO nazywa się komponentem poznawczym. Prędkość każdej cząstki można obliczyć z wzoru [115]:

$$v_{cj}^{i} = wv_{cj}^{i-1} + c_1 r_1 (P_{cj} - x_{cj}^{i-1}) + c_2 r_2 (G_{cj} - x_{cj}^{i-1})$$
(44)

dla j = 1,..., m, gdzie: w jest współczynnikiem wagowym, określonym na poziomie *i*-tej cząstki,  $c_1$ ,  $c_2$  są współczynnikami uczenia,  $r_1$ ,  $r_2$  – liczbami losowymi z przedziału <0,1>. Pozycja cząstki wyznaczana jest ze wzoru [111]:

$$x_{cj}^{i} = x_{cj}^{i-1} + v_{cj}^{i}$$
(45)

Schemat blokowy działania algorytmu PSO przedstawia rys. 4.2.

W początkowej implementacji pozycja każdej szukanej zmiennej była losowana i sprawdzana z przyjętymi założeniami [115, 116].



Rys. 4.2. Ogólny schemat blokowy działania algorytmu roju cząstek (PSO)

#### 4.6. Funkcja celu

W niniejszej pracy optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznej realizowana jest przy pomocy algorytmu genetycznego GA oraz roju cząstek PSO w środowisku MATLAB. Algorytm genetyczny został przystosowany do obliczeń przy pomocy funkcji GA znajdującej się w programie, natomiast algorytm roju cząstek PSO został zaimplementowany do wykonania optymalizacji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego za pomocą nowej, autorskiej funkcji.

Z matematycznej strony problem optymalizacji polega na podaniu pewnych funkcji S(zd) zwanej funkcją celu, określonej na zbiorze dopuszczalnych rozwiązań ZD oraz znalezieniu takiego zd, że:

$$zd \in ZD, S(zd) < S(v), \forall v \in ZD$$
 (46)

Minimalizacji podlegać będzie funkcja *S*(*zd*) – określająca wartość natężenia pola elektrycznego oraz pola magnetycznego, które w postaci ogólnej można zapisać:

$$S(zd) = S(zd_1, zd_2, ..., zd_n)$$
(47)

gdzie:  $zd_1, zd_2, ..., zd_n$  – zmienne decyzyjne (w tym przypadku *n* oznacza liczbę rozpatrywanych parametrów linii takich jak: odległość między przewodami fazowymi, odległość między przewodami odgromowymi, a osią słupa, wysokość zawieszenia przewodów fazowych, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł, wysokości przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł), przy zbiorze ograniczeń *T*(*zd*):

$$\boldsymbol{T}(\boldsymbol{z}\boldsymbol{d}) = T\left[T_1(\boldsymbol{z}\boldsymbol{d}_1), T_2(\boldsymbol{z}\boldsymbol{d}_2), \dots, T_n(\boldsymbol{z}\boldsymbol{d}_n)\right]$$
(48)

w skład, którego wchodzą ograniczenia równościowe w liczbie q:

$$T_i(zd_1, zd_2, ..., zd_n) = 0, \qquad i=1, 2, ..., q$$
(49)

oraz ograniczenia nierównościowe w liczbie Q:

$$T_i(zd_1, zd_2, ..., zd_n) \le 0, \qquad j = q + 1, q + 2, ..., Q$$
 (50)

Ograniczeniami w procesie optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego są parametry geometryczne linii elektroenergetycznej oraz naprężenie przewodów.

Do ograniczeń można zaliczyć:

- odległość między przewodami fazowymi a,
- odległość między przewodami odgromowymi a osią słupa o,
- wysokość zawieszenia przewodów fazowych *H*<sub>L</sub>,
- wysokość zawieszenia przewodów odgromowych H<sub>G</sub>,
- wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł h<sub>L</sub>,
- wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł h<sub>G</sub>,
- siła zrywająca przewody *N*.

Wymienione parametry zostały ograniczone zgodnie z dopuszczalnymi wartościami mechanicznymi i elektrycznymi istniejących słupów energetycznych.

Przedstawiony problem sprowadza się do zadania optymalizacji bez ograniczeń, sformułowanego w postaci zmodyfikowanej funkcji kryterialnej  $F_z(o)$ ,  $S_z(o)$  rozbudowanej o tak zwaną funkcję kary:

$$S_{z}(zd) = S(zd) + \sum_{i=1}^{q} K_{i}(T_{i})^{2} M[T_{i}] + \sum_{j=q+1}^{Q} K_{j}(T_{j})^{2} N[T_{j}]$$
(51)

Wzór (51) poza funkcją celu zawiera jeszcze dwa dodatkowe składniki, pierwszy za naruszenie ograniczeń równościowych, drugi za naruszenie ograniczeń nierównościowych.

Gdy zbiór dopuszczalnych rozwiązań zostanie przekroczony w wyniku naruszenia ograniczeń równościowych, pierwszy składnik zwiększa lub zmniejsza wartość funkcji w zależności od tego czy mamy do czynienia z minimalizacją czy też maksymalizacją funkcji celu. Czynnik  $M[T_i]$  przyjmuje wartości:

$$M[T_i] = \begin{cases} 0 \text{ dla } T_i = 0 \text{ brak naruszeń ograniczeń} \\ 1 \text{ dla } T_i = 0 \text{ naruszenie ograniczeń} \end{cases}$$
(52)

To samo zadanie dotyczy drugiego składnika równania (51) w kontekście ograniczeń nierównościowych. Rozbudowany jest on o czynniki  $N[T_j]$ , który przyjmuje dwie wartości:

$$N[T_{j}] = \begin{cases} 0 & \text{dla } T_{j} \leq 0 \text{ brak naruszeń ograniczeń} \\ 1 & \text{dla } T_{j} > 0 \text{ naruszenie ograniczeń} \end{cases}$$
(53)

Czynniki *Ki* oraz *Kj* są to czynniki kary o wartości ujemnej w przypadku maksymalizacji, a dodatniej w przypadku minimalizacji funkcji celu. W pracy czynnik kary przyjęto jako dodatnie wartości, gdyż rozpatrywane jest zagadnienie redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Dla dużych wartości bezwzględnych czynników kar rozwiązanie problemu dąży do optymalnego rozwiązania problemu [145, 146].

Parametry algorytmów zostały dobrane na podstawie przeglądu literaturowego oraz wykonanych testowych optymalizacji dla linii 220 kV. Algorytmy GA i PSO miały dobrać poszukiwane parametry geometryczne linii elektroenergetycznej zgodnie z rys. 4.3 w taki sposób, by wartości skuteczne (rms) natężenia pola elektrycznego i magnetycznego były mniejsze od  $E_{max} < 1$  kV/m i  $H_{max} < 60$  A/m. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego wyznacza się w obszarze między słupami przęsła w pasie o szerokości  $y = \pm 25$  m od osi przęsła linii 220 kV.



Rys. 4.3. Parametry linii 220 kV

Testowe obliczenia wykonano poprzez zmianę współczynników algorytmów GA i PSO w kolejnych próbach dla pojedynczego przęsła linii elektroenergetycznej. Wybrano takie współczynniki algorytmu GA i PSO, przy których wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w obszarze między słupami przęsła w pasie o szerokości  $y = \pm 25$  m od osi przęsła linii elektroenergetyczną była najmniejsza.

Populacja w początkowych obliczeniach była niska i jednakowa w celu dobrania współczynnika krzyżowania i mutacji dla algorytmu genetycznego. Przedstawia to tabela 4.1. Po wybraniu najlepszych współczynników zwiększano liczbę populacji w celu uzyskania optymalnych wyników (tabela 4.2).

Dla algorytmu roju cząstek poszukiwano najlepszych współczynników przyśpieszenia i bezwładności (tabela 4.3). Wartość populacji została dobrana, jak podczas próby z algorytmem genetycznym, co pozwala na porównanie czasu działania obu algorytmów. W tabelach 4.1 - 4.3 wyróżniono kolorem czerwonym wyniki obliczeń oraz zestaw współczynników, które będą stosowane w dalszych optymalizacjach.

Poszukiwane parametry	Próba	Ι	П	III	IV	V	VI	VII
$h_L$	m	16,0	15,9	15,8	15,8	15,9	16,0	15,8
$H_L$	m	25,1	25,9	25,4	25,0	25,3	25,9	26,0
$h_G$	m	18,8	19,3	18,5	18,3	19,3	19,1	18,5
$H_G$	m	29,1	29,9	29,4	29,0	29,3	29,9	30,0
а	m	6,8	6,1	4,4	6,3	6,1	6,2	6,3
0	m	4,9	4,9	4,9	5,0	4,9	4,8	4,3
$E_{max}$	V/m	1037,1	953,8	1017,0	1035,4	953,9	959,6	1006,3
H <sub>max</sub>	A/m	8,8	8,2	6,4	8,6	8,2	8,2	8,5
$p_c$	-	0,9	0,9	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8
$p_m$	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
t <sub>obl</sub>	S	3078,3	6346,9	3116,9	4466,5	6075,2	3080,9	9657,0
Populacja	-	10						

Tabela 4.1. Dobór współczynników algorytmu genetycznego GA.

Poszukiwane parametry	Próba	I	II	III	IV
$S_L$	m	15,9	15,7	15,8	15,8
$H_L$	m	25,9	24,5	25,3	25,1
$S_G$	m	19,3	18,3	18,3	18,1
$H_G$	m	29,9	28,5	29,3	29,1
а	m	6,1	6	6,2	6,3
0	m	4,9	4,3	4,3	5
Emax	V/m	953,8	1035,3	952,9	964,5
$H_{max}$	A/m	8,2	8,3	8,2	8,5
$p_c$	-	0,9	0,9	0,9	0,9
$p_m$	-	0,1	0,1	0,1	0,1
t <sub>obl</sub>	S	7278,5	9666,9	9560,9	21599,9
Populacja	-	10	20	40	50

Tabela 4.2. Dobór populacji dla algorytmu genetycznego GA.

Tabela 4.3. Dobór współczynników algorytmu roju cząstek PSO.

Próba Poszukiwane parametry		Ι	Ш	Ш	IV
$S_L$	m	15,9	16,3	16,7	17,3
$H_L$	m	25,9	26,0	26,0	26,4
$S_G$	m	19,2	19,4	19,8	19,9
$H_G$	m	29,9	30,4	30,6	31,2
а	m	6,1	6,3	6,5	7,1
0	m	4,9	5,0	5,1	5,8
$E_{max}$	V/m	952,7	953,0	958,5	965,6
H <sub>max</sub>	A/m	8,2	8,6	8,8	9,1
<i>C</i> 1	-	1,2	1,5	0,8	0,4
<i>C</i> <sub>2</sub>	-	1,2	1,5	0,8	0,4
w	-	Rand[0,4.0,9]	Rand[0,5.0,9]	Rand[0,1.0,9]	Rand[0,6. 0,9]
t <sub>obl</sub>	S	3659,2	9666,9	9560,9	21599,9
Populacja	-	40,0	40,0	40,0	40,0

Do dalszych optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wybrano następujące parametry:

- algorytm genetyczny liczba populacji jest równa 40,  $p_c$  współczynnik krzyżowania wynosi 0,85, natomiast  $p_m$  współczynnik mutacji to 0,07,
- algorytm roju cząstek rój składa się z 40 cząstek, współczynniki c1, c2 – przyśpieszenia wynoszą 1,2, a w – współczynnik bezwładności maleje liniowo z 0,9 do 0,4.

# 5. Metody redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznych

Linie elektroenergetyczne często projektuje się z dala od terenów zamieszkiwanych przez ludzi, jednak ciągła urbanizacja powoduje zbliżanie się zabudowań do istniejących już linii. Może to skutkować przekroczeniem maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, które zostały określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska [8]. Sytuacje takie mają miejsce szczególnie w miastach lub na przedmieściach, gdzie rozwój budownictwa powoduje zainteresowanie gruntami w bezpośrednim sąsiedztwie linii elektroenergetycznych. Jednym z możliwych rozwiązań technicznych jest zastąpienie przewodów napowietrznych kablem podziemnym, jednak jest to operacja kosztowna i nie zawsze możliwa do realizacji [130].

W celu obniżenia wartości natężenia pola elektrycznego pod liniami elektroenergetycznymi wysokich i najwyższych napięć najczęściej stosuje się:

- odpowiedni dobór konstrukcyjny słupów i zwisów przewodów,
- uziemione elementy konstrukcyjne i naturalne ekrany,
- dokonywanie zamiany kolejności faz w liniach wielotorowych lub wielonapięciowych,
- montaż dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi.

Wartość natężenia pola magnetycznego ogranicza się poprzez:

- odpowiedni dobór konstrukcyjny słupów i zwisów przewodów,
- stosowanie pętli odmagnesowujących,
- stosowanie przewodów skręconych i przeplecionych,
- stosowanie linii wielotorowych lub wielonapięciowych,
- optymalny rozpływ prądów pomiędzy liniami [118].

## 5.1. Zmiana kolejności faz w liniach dwutorowych

Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego w przypadku linii dwutorowych można obniżyć za pomocą zmiany kolejności faz. Istnieje wiele możliwych konfiguracji. Zakładając, że przewody fazowe pierwszego toru są oznaczone jako  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  i  $L_{13}$ , natomiast drugi tor oznaczony jest  $L_{21}$ ,  $L_{22}$ ,  $L_{23}$ , zamiany faz wykonywane są w drugim

torze i mają następujące kombinacje:  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{21}L_{22}L_{23}$ ,  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{23}L_{22}L_{21}$ ,  $L_{11}L_{12}L_1 - L_{22}L_{21}L_{23}$ ,  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{23}L_{21}L_{22}$ ,  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{21}L_{23}L_{22}$  i  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{22}L_{23}L_{21}$ . Przy trzech lub więcej obwodach na liniach elektroenergetycznych liczba możliwych kombinacji wzrasta.

Przykładową symulację wykonano dla linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 110 kV – typ słupa O24. Geometrię słupa przedstawia rys. 5.1.



Rys. 5.1. Słup typu O24, napięcie znamionowe 110 kV

Linia dwutorowa 110 kV zawieszona jest na słupie typu O24. Przewody fazowe wykonane są z AFL-6 240, natomiast przewody odgromowe 2 x AFL-1,7 50. Założono, że prąd obciążenia dla obu torów prądowych jest jednakowy i wynosi 634 A. Długość przęsła linii d = 300 metrów. Tabela 5.1 przedstawia obliczony prąd wzbudzony w przewodach odgromowych oraz wartości maksymalnych natężeń pola elektrycznego i magnetycznego dla następującej kolejności faz  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{23}L_{22}L_{21}$  przedstawia rys. 5.2, natomiast rys. 5.3 ilustruje rozkład natężenia dla kolejności faz  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{21}L_{23}L_{22}$ , gdzie wartość natężenia elektrycznego jest najmniejsza. Dla kolejności faz, gdzie natężenie pola elektrycznego było najmniejsze natężenia pola magnetycznego występuje dla kolejności faz, gdzie natężenie pola elektrycznego było największe, co ilustruje rys. 5.5. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości z = 2 m powyżej płaszczyzny ziemi.

Koleiność faz	Emax	$ I_{G1}  =  I_{G2} $	H <sub>max</sub>
	V/m	А	A/m
$L_{11}L_{12}L_{13} - L_{21}L_{22}L_{23}$	2325,82	87,96	12,77
$L_{11}L_{12}L_{13} - L_{23}L_{22}L_{21}$	2414,02	23,09	12,70
$L_{11}L_{12}L_{13} - L_{22}L_{21}L_{23}$	1858,48	81,58	13,33
$L_{11}L_{12}L_{13} - L_{23}L_{21}L_{22}$	2081,71	58,63	13,32
$L_{11}L_{12}L_{13} - L_{21}L_{23}L_{22}$	1806,37	73,48	13,65
$L_{11}L_{12}L_{13} - L_{22}L_{23}L_{21}$	2081,91	37,51	13,01

Tabela 5.1. Kolejność faz dla linii dwutorowej 110 kV, obliczony prąd w przewodach odgromowych, maksymalne natężenie pola elektrycznego i magnetycznego, które występuje w punkcie największego zwisu przewodów linii.



Rys. 5.2. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem dwutorowej linii 110 kV dla kolejności faz  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{23}L_{22}L_{21}$ 



Rys. 5.3. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem dwutorowej linii 110 kV dla kolejności faz  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{21}L_{23}L_{22}$ 



Rys. 5.4. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem dwutorowej linii 110 kV dla kolejności faz  $L_{11}L_{12}L_{13} - L_{22}L_{21}L_{23}$ 



Rys. 5.5. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem dwutorowej linii 110 kV dla kolejności faz*L*<sub>11</sub>*L*<sub>12</sub>*L*<sub>13</sub> – *L*<sub>23</sub>*L*<sub>22</sub>*L*<sub>21</sub>

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że zmiana kolejności faz nie wpływa jednocześnie na zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Wraz ze zmniejszaniem wartości natężenia pola elektrycznego wartość pola magnetycznego rośnie i na odwrót. Zamianę faz stosuje się w celu redukcji pola elektrycznego i jest to metoda często stosowana w energetyce. Natężenie pola magnetycznego mieści się na ogół w granicach normy 60 A/m.

# 5.2. Zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi linii elektroenergetycznych

Linie elektroenergetyczne wykonane według starych standardów mogą nie spełniać aktualnych warunków odnoszących się do dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego w miejscach zamieszkałych przez ludzi. Przesunięcie trasy linii energetycznej w celu usunięcia konfliktu z wielu powodów nie zawsze jest możliwe. Taka zmiana może być również bardzo kosztowna [2]. Jednym ze sposobów redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykorzystywanych przez operatorów sieci energetycznych jest zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych, zawieszonych pod przewodami fazowymi [76]. Przewody redukcyjne zawieszone są na izolatorach i mają potencjał ziemi. Odległości między przewodami fazowymi, a dodatkowymi przewodami redukcyjnymi przedstawiono w tabeli 5.2 [124].

Najwyższe napięcie sieci U	Minimalny odstęp w powietrzu między przewodami, a obiektami o potencjale ziemi		
kV	m		
123	1,15		
245	2,00		
420	3,20		

Tabela 5.2. Minimalne odstępy w powietrzu [124].

W Polsce takie rozwiązanie wprowadzono w okolicy Wałbrzycha, gdzie pod linią wysokiego napięcia 110 kV dodano dwa przewody redukcyjne. Linia ta biegnie bezpośrednio nad budynkami mieszkalnymi i użytkowymi [76].

Na potrzeby niniejszej pracy wykonano symulację dla następujących linii: 110 kV o typie słupa B2, 220 kV – słup H52, 400 kV – słup Y52.

Zastosowanie dwóch dodatkowych przewodów redukcyjnych AFL-1,7 70 dla linii 110 kV pozwoliło zredukować wartość natężenia pola elektrycznego z Emax = 3353,83 V/m do Emax = 1670,42 V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego zmniejszono z  $H_{max} = 17,06$  A/m do  $H_{max} = 4,96$  A/m. Rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawia rys. 5.6. Rysunek 5.7 ilustruje rozkład natężenia pola magnetycznego z uwzględnieniem wzbudzonych prądów w przewodzie odgromowym górnym  $|I_{GI}| = |I_{G2}| = 3,89$  A oraz w dodatkowych przewodach redukcyjnych pod przewodami fazowymi  $|I_{red1}| = |I_{red2}| = 18,22$  A. Przewody fazowe wykonane są z AFL-6 240, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_1 = 110 \text{ e}^{\text{j}120^\circ} \text{ kV}, U_2 = 110 \text{ kV}, U_3 = 110 \text{ e}^{\text{j}120^\circ} \text{ kV}.$  Długość przesła linii d = 300 metrów.Prąd w przewodach fazowych wynosi 235 A.



Rys. 5.6. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi



Rys. 5.7. Rozkład 3-D pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi

Symulacje wykonano również dla linii energetycznej 220 kV. Zastosowano pod każdym przewodem fazowym przewód redukcyjny AFL-1,7 70. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe 2 x AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_1 = 220 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{kV}$ ,  $U_2 = 220 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 220 \text{ e}^{j120^\circ} \text{kV}$ . Prąd w przewodach fazowych wynosi 570 A. Długość przęsła linii d = 400 metrów. Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania zredukowano natężenie pola elektrycznego z  $E_{max} = 5035,75$  V/m do

 $E_{max} = 1616,73$  V/m, natomiast natężenie pola magnetycznego zmniejszono z  $H_{max} = 20,03$  A/m do  $H_{max} = 17,93$  A/m. Rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawia rys. 5.8. Rysunek 5.9 ilustruje rozkład natężenia pola magnetycznego z uwzględnieniem wzbudzonych prądów w przewodach odgromowych  $|I_{GI}| = |I_{G2}| = 14,6$  A oraz w dodatkowych przewodach redukcyjnych  $|I_{redI}| = |I_{red2}| = |I_{red3}| = 72,91$  A.



Rys. 5.8. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi



Rys. 5.9. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi

Również dla linii energetycznej 400 kV dokonano obliczeń z zastosowaniem dodatkowych przewodów redukcyjnych AFL-1,7 70 zawieszonych pod każdym przewodem fazowym. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_I = 400 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{ kV}$ ,  $U_2 = 400 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 400 \text{ e}^{j120^\circ} \text{ kV}$ . Długość przęsła linii d = 400 metrów. Prąd w przewodach fazowych wynosi 2200 A. Dzięki zastosowaniu przewodów redukcyjnych zredukowano natężenie pola elektrycznego z  $E_{max} = 9512,88 \text{ V/m}$  do  $E_{max} = 4976,34 \text{ V/m}$ , natomiast natężenie pola magnetycznego zmniejszono z  $H_{max} = 78,72 \text{ A/m}$  do  $H_{max} = 61,86 \text{ A/m}$ . Rozkład natężenia pola elektrycznego przedstawia rys. 5.10, natomiast rys. 5.11 ilustruje rozkład natężenia pola magnetycznego z uwzględnieniem wzbudzonych prądów w przewodach odgromowych  $|I_{G1}| = |I_{G2}| = 198,98 \text{ A}$  oraz w dodatkowych przewodach redukcyjnych  $|I_{red2}| = |I_{red3}| = 197,77 \text{ A}.$ 



Rys. 5.10. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi


Rys. 5.11. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi

Zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych zawieszonych się pod przewodami roboczymi pozwala na zmniejszenie wartości powstałego pola elektrycznego i magnetycznego dla linii energetycznych o napięciu 110 kV i 220 kV. Natomiast dla linii elektroenergetycznej o napięciu 400 kV zmniejszeniu ulega tylko natężenie pola elektrycznego, natomiast pole magnetyczne zmniejsza się w niewielkim stopniu. Obliczenia przeprowadzono dla punktu obserwacji znajdującego się na wysokości z = 2 m nad powierzchnią ziemi.

## 5.3. Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego poprzez dobór parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznej

W literaturze rzadko porusza się problem optymalizacji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w doborze parametrów linii z uwzględnieniem zwisów przewodów oraz zmiennej wartości ładunków symulacyjnych wzdłuż linii. Zazwyczaj wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego nie przekraczają dozwolonych wartości w miejscach dostępnych dla ludzi, natomiast w miejscach przeznaczonych pod zabudowę natężenia te mogą odbiegać od wymagań stawianych w rozporządzeniu Ministra Środowiska [8].

W niniejszym rozdziale dokonano optymalizacji parametrów geometrycznych linii w celu zmniejszenia natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznej linii elektroenergetycznej wysokich i najwyższych napięć do wartości zgodnych z rozporządzeniem Ministra Środowiska [8] dla obszarów zamieszkanych przez ludzi. Wykorzystano do tego celu algorytmy: genetyczny GA oraz roju cząstek PSO. Obliczenia przeprowadzono w układzie trójwymiarowym metodą dokładną. Zaprezentowano wyniki optymalizacji dla wybranych typów linii elektroenergetycznych oraz porównano czas działania algorytmów.

Podczas wykonywanej optymalizacji uwzględniono siłę zrywającą dla poszczególnych przewodów linii elektroenergetycznej, która obliczana jest ze wzoru (54) [124, 138]:

$$FN = \sigma s_{obl} \tag{54}$$

gdzie:  $s_{obl}$  – przekrój obliczeniowy przewodu,  $\sigma$  – naprężenie w temperaturze montażu,

$$\sigma = \frac{d^2g}{8S} \tag{55}$$

natomiast: d – rozpiętość przęsła, S – zwis przewodów, g – współczynnik obciążenia mechanicznego gołego przewodu, który obliaczany jest z zależności (56):

$$g = \frac{G_p}{1000 \cdot s_{obl}} \tag{56}$$

gdzie:  $G_p$  – ciężar przewodu.

Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości z = 2 metry powyżej płaszczyzny ziemi. Naciąg przewodów fazowych oznaczono symbolem  $FN_L$ , przewodów odgromowych  $FN_G$ .

Gęstość siatki numerycznej jest stała. Liczba punktów obliczeniowych zależy od szerokości pasa i długości przęsła linii. Dla linii 110 kV siatka obliczeniowa składa się z 15000 punktów, dla linii 220 kV z 20000 punktów, a dla linii 400 kV z 40000 punktów.

Pierwszym obiektem, dla którego wykonano optymalizację, była linia 110 kV o słupie typu B2. Charakteryzuje się ona następującymi parametrami: odległość między przewodami fazowymi a osią słupa dla fazy *L1*, *L2* wynosi  $a_{L1, L2} = 2,8$  m, natomiast dla

fazy *L3 a<sub>L3</sub>* = 3,6 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych *L1*, *L3 H<sub>L1,L3</sub>* = 16,5 m, wysokość zawieszenia dla przewodu *L2 H<sub>L2</sub>* = 20,1 m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł dla fazy *L1*, *L3 h<sub>L1,L3</sub>* = 6 m, a dla fazy *L2 h<sub>L2</sub>* = 9,15 m, wysokość zawieszenia przewodu odgromowego  $H_G$  = 23,1 m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_G$  = 12,15 m. Geometrię linii przedstawia rys. 5.12. Przewody fazowe wykonane są z AFL-6 240, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_I$  = 110 e<sup>-j120°</sup> kV,  $U_2$  = 110 kV,  $U_3$  = 110 e<sup>j120°</sup> kV. Długość przęsła linii d = 300 metrów. Prąd w przewodach fazowych wynosi 235 A.



Rys. 5.12. Parametry linii 110 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w obszarze między słupami  $y = \pm 25$  metrów od osi przęsła. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 144]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} < 60$  A/m,
- $1 \text{ m} \le a \le 2,8 \text{ m},$
- 15 m  $\leq$   $H_{L1, L3} \leq$  16,5 m,
- 5,85 m  $\leq h_{L1, L3} \leq 13$  m,
- 19 m  $\leq$   $H_{L2} \leq$  20,1 m,
- 9,15 m  $\leq$   $h_{L2} \leq$  17 m,
- $2 \text{ m} \le o \le 3,65 \text{ m},$
- $22 \text{ m} \le H_G \le 23,1 \text{ m},$
- 12,15 m  $\leq h_G \leq$  20 m,

- $FN_L < 84,6 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 5.3. Trzecia kolumna w tabeli przedstawia katalogowe wartości dla słupa B2 przed optymalizacją, pozostałe dwie kolumny odnoszą się do optymalizacji wykonanych za pomocą algorytmu genetycznego (GA) i roju cząstek (PSO).

Poszukiwane parametry		Przed optymalizacją	Algorytm genetyczny GA	Algorytm roju cząstek PSO
$a_{L3}$	m	3,65	3,60	3,50
<i>a</i> <sub>L1,2</sub>	m	2,80	1,00	1,00
<i>h</i> <sub>L1,3</sub>	m	5,85	13,00	13,00
$h_{L2}$	m	9,15	16,62	16,61
$H_{L1, L3}$	m	16,50	16,00	16,00
$H_{L2}$	m	20,10	19,60	19,60
$h_G$	m	12,15	19,60	19,60
$H_G$	m	23,10	22,60	22,61
$FN_{L1, L3}$		13,92	50,96	50,96
$FN_{L2}$	kN	63,83	50,96	50,96
$FN_G$		37,14	47,68	47,68
E <sub>max</sub>	V/m	3353,82	758,12	757,71
$ I_G $	А	16,00	12,30	12,40
H <sub>max</sub>	A/m	8,52	2,20	2,18
t <sub>obl</sub>	S	-	9657,28	3789,23

Tabela 5.3. Porównanie wyników obliczeń dla jednotorowej linii elektroenergetycznej 110 kV.

Dzięki optymalizacji maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego została zredukowana z  $E_{max} = 3353,82$  V/m do  $E_{max} = 757,21$  V/m, natomiast wartość pola magnetycznego zmalała z  $H_{max} = 8,52$  A/m do  $H_{max} = 2,18$  A/m. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.13) i magnetycznego (rys. 5.14) po optymalizacji dla obu algorytmów był podobny.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu roju cząstek był trzykrotnie krótszy, niż przy zastosowaniu algorytmu genetycznego.



Rys. 5.13. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV po optymalizacji



Rys. 5.14. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV po optymalizacji

Kolejną optymalizację wykonano dla linii najwyższych napięć 220 kV. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe 2 x AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_I = 220 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{ kV}$ ,  $U_2 = 220 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 220 \text{ e}^{j120^\circ} \text{ kV}$ . Długość przęsła linii d = 400 metrów. Wybrany słup typu H52, na którym zawieszona jest linia, charakteryzuje się następującymi parametrami: odległość między przewodami fazowymi a = 7,6 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych  $H_L = 26,5$  m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_L = 6,7$  m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 30,6$  m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_G = 10,8$  m, odległość między przewodami odgromowymi, a osią słupa o = 5,6 m. Geometrię linii przedstawia rys. 5.15. Prąd w przewodach fazowych wynosi 570 A.



Rys. 5.15. Parametry linii 220 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w obszarze między słupami  $y = \pm 25$  metrów od osi przęsła. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 141]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} < 60$  A/m,
- 6 m  $\leq a \leq$  9 m,
- $18 \text{ m} \le H_L \le 26,5 \text{ m},$
- 6 m  $\leq$   $h_L \leq$  12 m,
- $4 \text{ m} \le o \le 7 \text{ m}$ ,
- $28 \text{ m} \le H_G \le 34 \text{ m},$
- $14 \text{ m} \le h_G \le 16 \text{ m},$
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 5.4. Trzecia kolumna w tabeli przedstawia katalogowe wartości dla słupa H52 przed optymalizacją, pozostałe dwie kolumny odnoszą się do optymalizacji wykonanych za pomocą algorytmu genetycznego i roju

cząstek. Dzięki optymalizacji wartość natężenia pola elektrycznego została zredukowana z  $E_{max} = 5035,75$  V/m do  $E_{max} = 696,7$  V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego zmalała z  $H_{max} = 20,1$  A/m do  $H_{max} = 6,4$  A/m. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.16) i magnetycznego (rys. 5.17) po optymalizacji dla obu algorytmów był podobny.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu roju cząstek był trzykrotnie krótszy, niż przy zastosowaniu algorytmu genetycznego.

Poszukiwane	parametry	Przed optymalizacją	Algorytm genetyczny GA	Algorytm roju cząstek PSO
0	m	5,60	4,30	4,50
а	m	7,60	6,20	6,00
$h_L$	m	6,70	14,00	13,90
$H_L$	m	26,50	24,10	24,00
$h_G$	m	10,80	19,10	18,90
$H_G$	m	30,60	27,90	28,00
$FN_L$	1-NI	19,80	37,80	37,80
$FN_G$	KIN	7,22	15,70	15,71
$E_{max}$	V/m	5035,75	696,70	688,60
$ I_{G1} pprox  I_{G2} $	А	41,47	28,40	28,30
H <sub>max</sub>	A/m	20,10	6,40	6,30
t <sub>obl</sub>	S	-	9560,90	3543,50

Tabela 5.4. Porównanie wyników obliczeń dla jednotorowej linii elektroenergetycznej 220 kV.



Rys. 5.16. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV po optymalizacji



Rys. 5.17. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV po optymalizacji

Trzecim obiektem, dla którego wykonano optymalizację, była linia 400 kV zawieszona na słupie typu Y52. Charakteryzuje się on następującymi parametrami: odległość między przewodami fazowymi, a osią słupa wynosi a = 10,3 m, odległość przewodów odgromowych od osi słupa o = 8,2 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych  $H_L = 26,5$  m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_L = 7,8$  m, wysokość zawieszenia przewodu odgromowego  $H_G = 30,6$  m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_G = 13,7$  m. Geometrię linii przedstawia rys. 5.18. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_1 = 400 \text{ e}^{\text{j}120^\circ} \text{ kV}$ ,  $U_2 = 400 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 400 \text{ e}^{\text{j}120^\circ} \text{ kV}$ . Długość przęsła linii d = 400 metrów. Prąd w przewodach fazowych wynosi 2096 A.



Rys. 5.18. Parametry linii 400 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w obszarze między słupami  $y = \pm 50$  metrów od osi przęsła. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 142]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} < 60 \text{ A/m},$
- $3,5 \text{ m} \le a \le 9 \text{ m},$
- 24,5 m  $\leq$   $H_L \leq$  26,5 m,
- 7,8 m  $\leq$   $h_L \leq$  20,5 m,
- $3 \text{ m} \le o \le 8,2 \text{ m},$
- 29 m  $\leq$  *H*<sub>*G*</sub>  $\leq$  30,6 m,
- 23,5 m  $\leq$   $h_G \leq$  27,5 m,
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 5.5. Trzecia kolumna w tabeli przedstawia katalogowe wartości dla słupa Y52 przed optymalizacją, pozostałe dwie kolumny odnoszą się do optymalizacji wykonanych za pomocą algorytmu genetycznego i roju cząstek. W wyniku optymalizacji wartość natężenia pola elektrycznego została zredukowana z  $E_{max} = 9512,88$  V/m do  $E_{max} = 949,92$  V/m, natomiast wartość natężenia

pola magnetycznego zmalała z  $H_{max} = 62,63$  A/m do  $H_{max} = 6,26$  A/m. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.19) i magnetycznego (rys. 5.20) po optymalizacji dla obu algorytmów był podobny.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu roju cząstek był trzykrotnie krótszy niż przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego.

Poszukiwane parametry		Przed	Algorytm	Algorytm roju
		optymalizacją	genetyczny GA	cząstek PSO
0	m	8,20	3,36	3,35
а	m	10,30	3,50	3,50
$h_L$	m	7,80	20,08	20,09
$H_L$	m	26,50	23,42	23,45
$h_G$	m	13,70	27,32	27,30
$H_G$	m	30,60	30,58	30,60
$FN_L$	kN	20,41	114,25	113,57
$FN_G$		8,46	43,87	43,82
$E_{max}$	V/m	9512,88	943,60	949,92
$ I_{G1}  \approx  I_{G2} $	А	176,68	32,36	32,34
H <sub>max</sub>	A/m	62,63	6,29	6,26
$t_{obl}$	S	-	9652,21	3654,54

Tabela 5.5. Porównanie wyników obliczeń.



Rys. 5.19. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV po optymalizacji



Rys. 5.20. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 400 kV po optymalizacji

Optymalizację natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonano również dla linii dwutorowych o napięciach znamionowych 110 kV, 220 kV i 400 kV.

Pierwszym obiektem, dla którego wykonano symulację, była linia dwutorowa 110 kV zawieszona na słupie O24. Charakteryzuje się ona następującymi parametrami: odległości między przewodami fazowymi a osią słupa wynoszą  $a_1 = 3$  m,

 $a_2 = 3,8$  m,  $a_3 = 3$ m, odległość przewodów odgromowych od osi słupa o = 1,8 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych  $H_{L1} = 16$  m,  $H_{L2} = 19$  m,  $H_{L3} = 22$  m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_{L1} = 6$ m,  $h_{L2} = 8$  m,  $h_{L3} = 10$  m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 24,7$  m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_G = 12$  m. Geometrię linii przedstawia rys. 5.21. Przewody fazowe wykonane są z AFL-6 240, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 50. Następstwo napięć:  $U_{11} = 110$  kV,  $U_{21} = 110$  e<sup>-j120°</sup> kV,  $U_{31} = 110$  e<sup>j120°</sup> kV,  $U_{12} = 110$  e<sup>-j120°</sup> kV,  $U_{22} = 110$  kV,  $U_{32} = 110$  e<sup>j120°</sup> kV. Długość przęsła linii d = 400 metrów. Prąd w przewodach fazowych wynosi 634 A.



Rys. 5.21. Parametry linii dwutorowej 110 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w obszarze między słupami  $y = \pm 25$  metrów od osi przęsła. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 144]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m},$
- $H_{max} < 60$  A/m,
- $3 \text{ m} \le a_1 \le 5 \text{ m}$ ,
- $3 \text{ m} \le a_2 \le 6 \text{ m}$ ,
- $3 \text{ m} \leq a_3 \leq 5 \text{ m}$ ,
- $22 \text{ m} \le H_{L3} \le 24 \text{ m},$
- $18 \text{ m} \le H_{L2} \le 20 \text{ m},$

- $14 \text{ m} \le H_{Ll} \le 16 \text{ m},$
- $10 \text{ m} \le h_{L3} \le 14 \text{ m},$
- 8 m  $\leq$   $h_{L2} \leq$  12 m,
- 6 m  $\leq$   $h_{Ll} \leq$  10 m,
- $2 \text{ m} \le o \le 4 \text{ m}$ ,
- $20 \text{ m} \le H_G \le 26 \text{ m},$
- $14 \text{ m} \le h_G \le 16 \text{ m},$
- $FN_L < 84,6 \text{ kN},$
- $FN_G < 40,1$  kN.

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 5.6. Trzecia kolumna w tabeli przedstawia katalogowe wartości dla słupa O24 przed optymalizacją, pozostałe dwie kolumny odnoszą się do optymalizacji wykonanych za pomocą algorytmu genetycznego i roju cząstek. Za pomocą optymalizacji wartość natężenia pola elektrycznego została zredukowana z  $E_{max} = 9512,88$  V/m do  $E_{max} = 696,7$  V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego zmalała z  $H_{max} = 20,1$  A/m do  $H_{max} = 6,4$  A/m. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.22) i magnetycznego (rys. 5.23) po optymalizacji dla obu algorytmów był podobny.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu roju cząstek był trzykrotnie krótszy, niż w przypadku algorytmu genetycznego.

Poszukiwane parametry		Przed	Algorytm	Algorytm roju
		optymalizacją	genetyczny GA	cząstek PSO
0	m	1,80	2,82	2,78
$a_1$	m	3,00	4,99	5,00
<i>a</i> <sub>2</sub>	m	3,80	5,79	5,80
<i>a</i> <sub>3</sub>	m	3,00	4,99	5,00
$h_{L1}$	m	6,00	9,49	9,47
$h_{L2}$	m	8,00	11,51	11,46
h <sub>L3</sub>	m	10,00	13,43	13,45
$H_{Ll}$	m	16,00	16,04	16,00
$H_{L2}$	m	19,00	19,01	19,00
H <sub>L3</sub>	m	22,00	22,05	22,00
$h_G$	m	12,00	15,99	16,00
$H_G$	m	24,70	24,72	24,70
FN <sub>L1</sub>		15,98	24,48	24,48
$FN_{L2}$	kN	14,53	21,28	21,20
FN <sub>L3</sub>		13,32	18,61	18,61
$FN_G$	-	22,35	8,00	8,00
$E_{max}$	V/m	2414,02	841,25	839,81
$ I_{G1} \approx  I_{G2} $	А	24,86	19,58	19,55
H <sub>max</sub>	A/m	12,70	6,79	6,77
t <sub>obl</sub>	S	-	10548,63	4561,59

Tabela 5	5.6.	Porównanie	e wvników	obliczeń	dla dwu	torowei linii	elektroenergetvczne	i 110 kV.
								, ~



Rys. 5.22. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem dwutorowej linii 110 kV po optymalizacji



Rys. 5.23. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem dwutorowej linii 110 kV po optymalizacji

Kolejnym obiektem, dla którego wykonano symulację, była linia dwutorowa 220 kV zawieszona na słupie M52. Charakteryzuje się ona następującymi parametrami: odległości między przewodami fazowymi a osią słupa wynoszą następująco  $a_1 = 9,5$  m,  $a_2 = 4,9$  m,  $a_3 = 7,2$  m, odległość przewodów odgromowych od osi słupa o = 4,6 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych  $H_{Ll, L2} = 26,5$  m,  $H_{L3} = 32,7$  m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_{Ll, L2} = 6,7$  m,  $h_{L3} = 8,7$  m, wysokość

zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 38,1$  m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_G = 10,7$  m. Geometrię linii przedstawia rys. 5.24. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_{11} = 220$  kV,  $U_{21} = 220$  e<sup>-j120°</sup> kV,  $U_{31} = 220$  e<sup>j120°</sup> kV,  $U_{12} = 220$  e<sup>j120°</sup> kV,  $U_{22} = 220$  e<sup>-j120°</sup> kV,  $U_{32} = 220$  kV. Długość przęsła linii d = 400 metrów. Prąd w przewodach fazowych wynosi 1100 A.



Rys. 5.24. Parametry linii dwutorowej 220 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w obszarze między słupami  $y = \pm 25$  metrów od osi przęsła. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 141]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} < 60 \text{ A/m},$
- $4 \text{ m} \le a_1 \le 6 \text{ m}$ ,
- 9 m  $\leq a_2 \leq 11$  m,
- 6 m  $\leq a_3 \leq$  9 m,
- 18 m  $\leq$  *H*<sub>*L*1, *L*2</sub>  $\leq$  26,5 m,
- 28,5 m  $\leq$   $H_{L3} \leq$  32,7 m,
- 6,7 m  $\leq$   $h_{L1, L2} \leq$  18 m,
- 8,7 m  $\leq$   $h_{L3} \leq$  20 m,
- $4 \text{ m} \le o \le 7 \text{ m}$ ,
- 36 m  $\leq$   $H_G \leq$  40 m,

- 10,7 m  $\leq$   $h_G \leq$  22 m,
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 5.7. Trzecia kolumna w tabeli przedstawia katalogowe wartości dla słupa M52 przed optymalizacją, pozostałe dwie kolumny odnoszą się do optymalizacji wykonanych za pomocą algorytmu genetycznego i roju cząstek. W wyniku optymalizacji wartość natężenia pola elektrycznego została zredukowana z  $E_{max}$  = 3670,10 V/m do  $E_{max}$  = 611,61 V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego zmalała z  $H_{max}$  = 18,72 A/m do  $H_{max}$  = 4,07 A/m. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.25) i magnetycznego (rys. 5.26) po optymalizacji dla obu algorytmów był podobny.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu roju cząstek był trzykrotnie krótszy, niż przy zastosowaniu algorytmu genetycznego.

Poszukiwane parametry		Przed	Algorytm	Algorytm roju
		optymalizacją	genetyczny GA	cząstek PSO
0	m	4.60	4,83	4,85
$a_1$	m	4,90	5,39	5,40
$a_2$	m	9,50	10,01	10,00
<i>a</i> 3	m	7,20	7,72	7,70
$h_{L1, L2}$	m	6,70	18,00	17,99
h <sub>L3</sub>	m	8,70	20,00	19,99
$H_{L1, L2}$	m	26,50	26,01	26,00
$H_{L3}$	m	32,70	32,01	32,00
$h_G$	m	10,70	22,00	21,99
$H_G$	m	38,10	37,63	37,60
$FN_{L1, L2}$		19,27	63,59	63,49
$FN_{L3}$	kN	15,89	31,79	31,53
$FN_G$		32,14	50,43	50,36
$E_{max}$	V/m	3670,10	615,28	611,61
$ I_{G1}  pprox  I_{G2} $	А	44,29	33,86	33,94
$H_{max}$	A/m	18,72	4,15	4,07
$t_{obl}$	S	-	9658,21	3672,32

Tabela 5.7. Porównanie wyników obliczeń dla dwutorowej linii elektroenergetycznej 220 kV.



Rys. 5.25. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem dwutorowej linii 220 kV po optymalizacji



Rys. 5.26. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem dwutorowej linii 220 kV po optymalizacji

Ostatnim obiektem, dla którego wykonano symulację, była linia dwutorowa wielowiązkowa 400 kV zawieszona na słupie Z52. Charakteryzuje się ona następującymi parametrami: odległości między przewodami fazowymi a osią słupa wynoszą a = 8,45 m, odległość przewodów odgromowych od osi słupa o = 4,6 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych  $H_{LI} = 32$  m,  $H_{L2} = 41,2$  m,  $H_{L3} = 50,4$  m, wysokość przewodów

fazowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_{L1} = 7,8$  m,  $h_{L2} = 10,6$  m,  $h_{L3} = 13,4$  m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 55,4$  m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł  $h_G = 16,2$  m. Geometrię linii przedstawia rys. 5.27. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_{11} = 400e^{-j120^\circ}$  kV,  $U_{21} = 400$  kV,  $U_{31} = 400 e^{j120^\circ}$  kV,  $U_{12} = 400$  e<sup>j120°</sup> kV,  $U_{22} = 400$  kV,  $U_{32} = 400$  e<sup>-j120°</sup> kV. Długość przęsła linii d = 400 metrów. Prąd w przewodach fazowych wynosi 2096 A.



Rys. 5.27. Parametry linii dwutorowej 400 kV

Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczono w obszarze między słupami  $y = \pm 50$  metrów od osi przęsła. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 142]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m},$
- $H_{max} < 60 \text{ A/m},$
- $6 \text{ m} \le a \le 9 \text{ m},$
- $32 \text{ m} \le H_{Ll} \le 38 \text{ m},$
- 40 m  $\leq$  *H*<sub>*L*2</sub>  $\leq$  42m,
- 45 m  $\leq H_{L3} \leq$  51 m,
- $7 \text{ m} \le h_{Ll} \le 35 \text{ m},$
- $36 \text{ m} \le h_{L2} \le 38 \text{ m},$
- 39 m  $\leq h_{L3} \leq 41$  m,

- $4 \text{ m} \le o \le 7 \text{ m}$ ,
- 49 m  $\leq$   $H_G \leq$  56 m,
- 42 m  $\leq h_G \leq$  44 m,
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Wyniki obliczeń przedstawia tabela 5.8. Trzecia kolumna w tabeli przedstawia katalogowe wartości dla słupa Z52 przed optymalizacją, pozostałe dwie kolumny odnoszą się do optymalizacji wykonanych za pomocą algorytmu genetycznego i roju cząstek. Za pomocą optymalizacji wartość natężenia pola elektrycznego została zredukowana z  $E_{max} = 12370,43$  V/m do  $E_{max} = 880,29$  V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego zmalała z  $H_{max} = 40,5$  A/m do  $H_{max} = 4,63$  A/m. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.28) i magnetycznego (rys. 5.29) po optymalizacji dla obu algorytmów był podobny.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu roju cząstek był trzykrotnie krótszy, niż przy użyciu algorytmu genetycznego.

Poszukiwane parametry		Przed	Algorytm	Algorytm roju
1 OSZUKI walie p	arametry	optymalizacją	genetyczny GA	cząstek PSO
0	m	4,60	3,51	3,52
а	m	8,45	6,32	6,30
h <sub>L1</sub>	m	7,80	34,16	34,12
$h_{L2}$	m	10,60	37,11	37,14
h <sub>L3</sub>	m	13,40	40,19	40,11
$H_{L1}$	m	32,00	37,21	37,14
$H_{L2}$	m	41,20	41,15	41,18
H <sub>L3</sub>	m	50,40	45,16	45,11
h <sub>G</sub>	m	16,20	43,19	43,12
$H_G$	m	55,40	49,22	49,18
FN <sub>L1</sub>		15,76	125,11	126,35
FN <sub>L2</sub>	kN	12,47	94,45	94,45
FN <sub>L3</sub>	KI V	10,31	76,78	76,31
$FN_G$		9,73	17,43	17,59
Emax	V/m	12370,43	889,34	880,29
$ I_{G1}  pprox  I_{G2} $	А	173,77	48,21	47,91
H <sub>max</sub>	A/m	40,50	4,74	4,63
t <sub>obl</sub>	S	-	10562,41	4569,63

Tabela 5.8. Porównanie wyników obliczeń dla dwutorowej linii elektroenergetycznej 400 kV.



Rys. 5.28. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem dwutorowej linii 400 kV po optymalizacji



Rys. 5.29. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem dwutorowej linii 400 kV po optymalizacji

W rozdziale 5.3 wykonano optymalizację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego linii elektroenergetycznych wysokich oraz najwyższych napięć przy pomocy algorytmu genetycznego GA i roju cząstek PSO. Wartość natężenia pola elektrycznego po optymalizacji jest trzykrotnie mniejsza niż przed optymalizacją. Otrzymane rezultaty optymalizacji obu algorytmów są zbliżone, ale algorytm PSO pozwala uzyskać wynik w czasie trzykrotnie krótszym niż AG, ponieważ cząstki roju pamiętają informację o gradiencie położenia w poszukiwanej przestrzeni.

## 5.4. Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego na różnych wysokościach w miejscach bliskiej lokalizacji napowietrznej linii elektroenergetycznej i budynku

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska [8] pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego należy wykonywać na wysokości 2 metrów od powierzchni ziemi lub nad innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie, zwłaszcza: dachami spełniającymi rolę tarasów, tarasami, balkonami, podestami. Powyższe wymagania wydają się oczywiste i wynikają z wieloletniej praktyki pomiarowej.

Niestety, w wielu przypadkach przepisy nie precyzują miejsc wykonywania pomiarów kontrolnych w sąsiedztwie napowietrznych linii elektroenergetycznych. W szczególności problem ten dotyczy miejsc lokalizacji zabudowy mieszkaniowej lub terenów przeznaczonych pod tę zabudowę. W przypadku zabudowy mieszkaniowej należałoby zidentyfikować granicę obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego przekracza 1 kV/m.

Rysunek 5.30 przedstawia budynek mieszkalny o wysokości 6 m, który znajduje się w pobliżu linii elektroenergetycznej. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego obliczono dla różnych wysokości z (1 - 6 metrów) na przedniej ścianie budynku, w odległości y od 1 metra do 25 metrów od osi przęsła dla linii 110 kV i 220 kV. Dla linii 400 kV odległość y od osi przęsła wynosi od 1 metra do 50 metrów.



Rys. 5.30. Układ linia elektroenergetyczna-budynek mieszkalny

Obliczenia wykonano dla napowietrznej linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 110 kV, zawieszonej na słupie B2. Geometrię omawianej linii przedstawiono na rys. 5.12. Prąd w przewodach fazowych wynosi 235 A. Rozkład dla x = 0 natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją dla różnych wysokości przedstawia rys. 5.31, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego przed optymalizacją przedstawiono na rys. 5.32.



Rys. 5.31. Profil rozkładu natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 110 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach przed optymalizacją



Rys. 5.32. Profil rozkładu natężenia pola magnetycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 110 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach przed optymalizacją

Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego w rozpatrywanym przypadku wynosiła  $E_{max} = 43059,99$  V/m i została obliczona na wysokości 6 metrów, w odległości 4,8 metra od osi linii, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła  $H_{max} = 38,52$  A/m, w odległości około 4,8 metra. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra

Środowiska [8], natężenie pola elektrycznego nie może przekraczać 1 kV/m w miejscu zamieszkania, a natężenie pola magnetycznego musi być mniejsze, niż 60 A/m.

Na wysokości 6 metrów wartość pola elektrycznego była 43 razy większa od maksymalnej dopuszczalnej wartości, a wartość natężenia pola magnetycznego była 2-krotnie większa.

Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 144]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} < 60 \text{ A/m},$
- $1 \text{ m} \le a \le 2,8 \text{ m},$
- $15 \text{ m} \le H_{L1, L3} \le 16,5 \text{ m},$
- 5,85 m  $\leq h_{L1, L3} \leq 13$  m,
- 19 m  $\leq$   $H_{L2} \leq$  20,10 m,
- 9,15 m  $\leq$   $h_{L2} \leq$  17 m,
- $2 \text{ m} \le o \le 3,65 \text{ m},$
- 22 m  $\leq$   $H_G \leq$  23,1 m,
- 12,15 m  $\leq h_G \leq$  20 m,
- $FN_L < 84,6 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Tabela 5.8 przedstawia parametry geometryczne linii przed i po optymalizacji. Dla wysokość z = 6 m i w odległości 1 metra od osi linii maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego obliczona przy użyciu algorytmu roju cząstek (PSO) wynosiła  $E_{max} = 999,27$  V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła  $H_{max} = 2,36$  A/m (obliczony prąd wzbudzony w przewodach odgromowych wynosi  $|I_G| = 9,99$  A). Rezultaty symulacji przedstawiono w tabeli 5.9 (x = 0).

Poszukiwar	ne parametry	Przed optymalizacją	Algorytm roju cząstek PSO
0	m	2,80	1,20
а	m	3,60	3,18
<i>h</i> <sub><i>L</i>1, <i>L</i>3</sub>	m	5,85	13,50
$H_{L1}$	m	16,50	16,50
$h_{L2}$	m	9,15	16,50
<i>H</i> <sub>L2, L3</sub>	m	20,10	19,50
$h_G$	m	12,15	19,50
$H_G$	m	23,10	22,50
$E_{max}$	V/m	43059,99	999,27
$ I_G $	А	16,04	9,99
H <sub>max</sub>	A/m	38,52	2,36
FN <sub>L1, L3</sub>		13,92	50,96
$FN_{L2}$	kN	63,83	50,96
$FN_G$		37,14	47,68

Tabela 5.9. Porównanie wyników obliczeń dla linii elektroenergetycznej 110 kV.

Należy zaznaczyć, że rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego (rys. 5.33) i magnetycznego (rys. 5.34) po optymalizacji jest dla algorytmów PSO i GA podobny.



Rys. 5.33. Profil rozkładu natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 110 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach po optymalizacji



Rys. 5.34. Profil rozkładu natężenia pola magnetycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 110 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach po optymalizacji

Kolejne obliczenia wykonano dla napowietrznej linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 220 kV, zawieszonej na słupie H52. Geometrię linii przedstawiono na rys. 5.15. Prąd w przewodach fazowych wynosi 570 A. Rozkład natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją dla różnych wysokości przedstawiono na rys. 5.35, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego ilustruje na rys. 5.36.



Rys. 5.35. Profil rozkładu natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 220 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach przed optymalizacją



Rys. 5.36. Profil rozkładu natężenia pola magnetycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 220 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach przed optymalizacją

Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego w rozpatrywanej przestrzeni wynosiła  $E_{max} = 30306,6$  V/m i została obliczona na wysokości 6 metrów i w odległości 10 m od osi linii, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła  $H_{max} = 128$  A/m, w odległości około 10 metrów. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [8], natężenie pola elektrycznego nie może przekraczać 1 kV/m w miejscu zamieszkania, natomiast natężenie pola magnetycznego musi być mniejsze od 60 A/m.

Na wysokości 6 metrów wartość natężenia pola elektrycznego była 30 razy większa od maksymalnej dopuszczalnej wartości, a wartość natężenie pola magnetycznego była dwukrotnie większa.

Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 141]:

- $E_{max} < 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} < 60 \text{ A/m}$ ,
- $6 \text{ m} \le a \le 9 \text{ m}$ ,
- $18 \text{ m} \le H_L \le 26,5 \text{ m},$
- 17 m  $\leq h_L \leq$  19 m,
- $4 \text{ m} \le o \le 7 \text{ m}$ ,
- $28 \text{ m} \le H_G \le 34 \text{ m}$ ,
- $21 \text{ m} \le h_G \le 23 \text{ m},$
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1 \text{ kN}.$

Tabela 5.10 przedstawia parametry linii przed i po optymalizacji. Dla wysokość z = 6 m i w odległości 1 metra od osi linii maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego obliczona przy użyciu algorytmu roju cząstek (PSO) wynosiła  $E_{max} = 867,1$  V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego  $H_{max} = 9,6$  A/m (obliczony prąd wzbudzony w przewodach odgromowych jest równy  $|I_{GI}| \approx |I_{G2}| = 62,1$  A). Rezultaty symulacji przedstawiono w tabeli 5.9 dla x = 0.

Poszukiwane parametry		Przed optymalizacją	Algorytm roju cząstek PSO
0	m	5,60	4,20
a	m	7,60	6,00
$h_L$	m	6,70	18,90
$H_L$	m	26,50	26,00
$h_G$	m	10,80	22,90
$H_G$	m	30,60	30,00
$E_{max}$	V/m	30306,6	867,10
$ I_{G1}  pprox  I_{G2} $	А	118,10	62,10
H <sub>max</sub>	A/m	128,00	9,60
$FN_L$	1-N	19,80	53,74
$FN_G$	KIN	7,22	20,14

Tabela 5.10. Porównanie wyników obliczeń dla linii elektroenergetycznej 220 kV.

Rozkład natężenia pola elektrycznego (rys. 5.37) i magnetycznego (rys. 5.38) dla obu metod optymalizacyjnych jest podobny.



Rys. 5.37. Profil rozkładu natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 220 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach po optymalizacji



odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach po optymalizacji

Obliczenia wykonano także dla napowietrznej linii elektroenergetycznej wielowiązkowej o napięciu znamionowym 400 kV, zawieszonej na słupie Y52. Geometrię linii przedstawia rys. 5.19. Prąd w przewodach fazowych wynosi 2096 A. Rozkład natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją dla różnych wysokości przedstawia rys. 5.39, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego jest widoczny na rys. 5.40.



Rys. 5.39. Profil rozkładu natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 400 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach przed optymalizacją



Rys. 5.40. Profil rozkładu natężenia pola magnetycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 400 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach przed optymalizacją

Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego w rozpatrywanej przestrzeni wynosiła  $E_{max} = 65853,8$  V/m i została obliczona na wysokości 6 metrów w odległości 25 m od osi linii, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła  $H_{max} = 128$  A/m. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [8], natężenie pola elektrycznego nie może przekraczać 1 kV/m w miejscu zamieszkania, zaś natężenie pola magnetycznego musi być mniejsze od 60 A/m.

Na wysokości 6 metrów wartość natężenia pola elektrycznego była o 30 razy większa od maksymalnej dopuszczalnej wartości, a wartość natężenie pola magnetycznego była dwukrotnie większa.

Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 142]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m}$ ,
- $6 \text{ m} \le a \le 9 \text{ m}$ ,
- $18 \text{ m} \le H_L \le 26,5 \text{ m},$
- $6 \text{ m} \le h_L \le 19 \text{ m},$
- $4 \text{ m} \le o \le 7 \text{ m}$ ,
- $28 \text{ m} \le H_G \le 34 \text{ m}$ ,
- $21 \text{ m} \le h_G \le 23 \text{ m},$

- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G < 51,1$  kN.

Tabela 5.11 przedstawia parametry linii 400 kV przed i po optymalizacji. Dla wysokość z = 6 m i w odległości 1 metra od osi linii maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego obliczona przy użyciu algorytmu roju cząstek (PSO) wynosiła  $E_{max} = 923,59$  V/m, natomiast wartość natężenia pola magnetycznego wynosiła  $H_{max} = 11,97$  A/m (obliczony prąd wzbudzony w przewodach odgromowych jest równy  $|I_{G1}| \approx |I_{G2}| = 98,65$  A). Rezultaty symulacji przedstawiono w tabeli 5.10 dla x = 0.

Poszukiwane	parametry	Przed optymalizacją	Algorytm roju cząstek PSO
0	m	8,20	3,35
а	m	10,30	3,50
$h_L$	m	7,80	18,90
$H_L$	m	19,00	26,00
$h_G$	m	10,30	22,90
$H_G$	m	24,60	30,00
Emax	V/m	65853,80	923,59
$ I_{G1}  pprox  I_{G2} $	А	185,68	98,65
H <sub>max</sub>	A/m	196,69	11,97
FNL	kN	34,07	53,74
$FN_G$	kN	8,46	20,14

Tabela 5.11. Porównanie wyników obliczeń dla linii elektroenergetycznej 400 kV.

Rozkład natężenia pola elektrycznego (rys. 5.41) i magnetycznego (rys. 5.42) dla obu metod optymalizacyjnych jest podobny.



Rys. 5.41. Profil rozkładu natężenia pola elektrycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 400 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach po optymalizacji



Rys. 5.42. Profil rozkładu natężenia pola magnetycznego w pobliżu linii elektroenergetycznej 400 kV jako funkcja odległości między linią elektroenergetyczną i punktem obserwacji umieszczonym na różnych wysokościach po optymalizacji

W rozdziale 5.4 wykonano analizę rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod napowietrzną linii elektroenergetyczną dla różnych wysokości na przedniej ścianie budynku. Wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zwiększają się wraz ze wzrostem wysokości od powierzchni ziemi. W celu redukcji wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zastosowano algorytm roju cząstek PSO. Parametrami modyfikowanymi podczas obliczeń były wyłącznie wielkości opisujące geometrię linii elektroenergetycznej. Wartości maksymalne natężeń pól zostały znacząco zredukowane poniżej progów wyszczególnionych w rozporządzeniu Ministra Środowiska [8].

## 5.5. Optymalizacja wysokości zawieszenia dodatkowych przewodów redukcyjnych

Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występujące istniejącymi liniami elektroenergetycznymi można zmniejszyć poprzez pod zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych zawieszonych poniżej przewodów fazowych. Przyjęcie odległości podanej w tabeli 5.2 pomiędzy dodatkowymi przewodami redukcyjnymi, a przewodami fazowymi może nie przynieść pozytywnych rezultatów [76]. Na potrzeby niniejszej pracy wykonano optymalizację rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji wysokości zawieszenia H<sub>red</sub> oraz wysokości w połowie rozpiętości przęsła dodatkowych przewodów redukcyjnych  $h_{red}$ . Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Liczba punktów pomiarowych zależy od wartości napięcia linii elektroenergetycznej (110 kV - 15000 punktów, 220 kV - 20000 punktów, 400 kV - 40000 punktów). Otrzymane wyniki z symulacji porównano z wynikami uzyskanymi w rozdziale 5.2. Naciąg przewodów fazowych oznaczono symbolem  $FN_L$ , przewodów odgromowych  $FN_G$ , natomiast dodatkowych przewodów redukcyjnych FN<sub>red</sub>. Obliczony prąd wzbudzony w dodatkowych przewodach redukcyjnych oznaczono symbolem *I<sub>red</sub>*.

Obliczenia przeprowadzono dla linii 110 kV zawieszonej na słupie B2, wyposażonej w dodatkowe przewody redukcyjne (*red1*, *red2*), jak przedstawia to rys. 5.43.



Rys. 5.43. Szukana lokalizacja przewodów redukcyjnych dla linii elektroenergetycznej 110 kV

Odległości między przewodami fazowymi wynoszą  $a_{L1,L2} = 3,8$  m oraz  $a_{L3} = 2,8$  m. Wysokości zawieszenia przewodów fazowych to  $H_{Ll, L2} = 17,5$  m,  $H_{L3} = 20,1$  m, wysokość przewodów fazowych w miejscu największego zwisu  $h_{Ll, L2} = 14,5$  m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 23,1$  m, wysokość przewodów odgromowych w miejscu największego zwisu  $h_G = 13.8$  m, natomiast odległość między przewodem odgromowym, a osią słupa wynosi 0,5 metra. Jako wartość prądu 235 w przewodach fazowych przyjęto Α. Następstwo napięć:  $U_1 = 110 \, {\rm e}^{{
m j}120^\circ} \, {
m kV}, \ U_2 = 110 \, {
m kV}, \ U_3 = 110 \, {
m e}^{{
m j}120^\circ} \, {
m kV}.$  Długość przęsła linii d = 300 metrów.

Optymalizację wykonano stosując algorytm PSO dla następujących założeń [8, 124, 139]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m},$
- $12 \text{ m} \le H_{red1, red2} \le 14 \text{ m},$
- 6 m  $\leq$   $h_{red1, red2} \leq$  9 m,
- $FN_{red1, red2} < 51,1 \text{ kN}.$

Wyniki optymalizacji przedstawia tabela 5.12. Najlepsze wyniki optymalizacji zostały wyróżnione kolorem czerwonym. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola
elektrycznego po optymalizacji PSO przedstawia rys. 5.44, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego rys. 5.45. Trójwymiarowy rozkład natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją z dodatkowymi przewodami odgromowymi przedstawia rys. 5.6, a dla pola magnetycznego rys. 5.7.

$E_{max\ przed}$ optymalizacją	E <sub>max po</sub> optymalizacji	$ I_G $	$ I_{red1}  pprox$ $ I_{red2} $	$H_{maxprzed}$ optymalizacją	Hmax po optymalizacji	$H_{red}$	h <sub>red</sub>	FN <sub>red</sub>
V/m	V/m	A	А	A/m	A/m	m	m	kN
	937,78	16,74	0,78		4,98	13,00	9,00	35,76
	939,19	19,28	3,11		4,99	13,86	9,00	29,43
	938,63	18,3	2,09	4,96	5,01	13,52	9,00	31,65
1261.01	938,68	18,19	2,04		5,02	13,48	9,00	31,93
	938,19	20,64	1,81		5,00	13,35	9,00	32,88
1301,91	938,18	17,48	1,37		5,01	13,25	9,00	33,66
	938,17	17,48	1,34		5,03	13,24	9,00	33,74
	938,17	17,47	1,33		5,04	13,23	9,00	33,82
	938,17	17,47	1,33		5,04	13,23	9,00	33,82
	938,17	17,47	1,33		5,04	13,23	9,00	33,82

Tabela 5.12. Wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu PSO.



Rys. 5.44. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji



Rys. 5.45. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji

Optymalizację wykonano również dla linii 220 kV, zawieszonej na słupie H52 z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi, co przedstawia rys. 5.46.



Rys. 5.46. Szukana lokalizacja przewodów redukcyjnych dla linii elektroenergetycznej 220 kV

Odległości między przewodami fazowymi określono jako a = 7,6 m, wysokości zawieszenie przewodów fazowych  $H_L = 26,5$  m, wysokość przewodów fazowych w miejscu największego zwisu  $h_L = 10,7$  m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 30,6$  m, wysokość przewodów odgromowych w miejscu największego zwisu  $h_G = 13,8$  m, natomiast odległość między przewodami odgromowymi a osią słupa o = 5,6 m. Natężenie prądu w przewodach fazowych wynosi 570 A.

Następstwo napięć:  $U_1 = 220 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{ kV}$ ,  $U_2 = 220 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 220 \text{ e}^{j120^\circ} \text{ kV}$ . Długość przęsła linii d = 400 metrów.

Optymalizację wykonano stosując algorytm PSO dla następujących założeń [8, 124, 139]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m},$
- 22,5 m  $\leq$   $H_{red} \leq$  24,5 m,
- 6,7 m  $\leq$   $h_{red} \leq$  8,7 m,
- $FN_{red} < 51,1 \text{ kN}.$

Wyniki optymalizacji przedstawia tabela 5.13. Najlepsze wyniki optymalizacji zostały wyróżnione kolorem czerwonym. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego po optymalizacji przedstawia rys. 5.47, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego rys. 5.48. Trójwymiarowy rozkład natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją z dodatkowymi przewodami odgromowymi przedstawia rys. 5.8, a dla pola magnetycznego rys. 5.9.

$E_{max \ przed}$ optymalizacją	E <sub>max po</sub> optymalizacji	$ I_{G1}  \approx  I_{G2} $	$ I_{red1} pprox$ $ I_{red2} pprox  I_{red3} $	$H_{max\ przed}$ optymalizacją	H <sub>max po</sub> optymalizacji	$H_{red}$	h <sub>red</sub>	FN <sub>red</sub>
V/m	V/m	А	А	A/m	A/m	m	m	kN
	873,59		31,29	17,93	10,12	22,5	7,7	9,67
	855,29		33,80		10,18	23,29	7,97	9,34
	848,15	13,86	33,16		10,13	23,02	7,77	9,38
	849,93		32,63		10,13	22,91	7,83	9,49
1616,73	849,92		33,16		10,12	23,02	7,83	9,42
	850,55		32,83		10,14	22,97	7,84	9,45
	847,61		32,76		10,14	22,95	7,75	9,41
	848,60		32,79		10,14	22,96	7,78	9,42
	847,11		32,79		10,12	22,96	7,73	9,39
	847,58		32,74		10,15	22,94	7,74	9,41

Tabela 5.13. Wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu PSO dla linii elektroenergetycznej 220 kV.



Rys. 5.47. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji



Rys. 5.48. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji

Ponadto obliczenia wykonano dla linii wielowiązkowej 400 kV zawieszonej na słupie Y52, wyposażonej w dodatkowe przewody redukcyjne. Geometrię linii przedstawia rys. 5.49. Odległość między przewodami fazowymi wynosi a = 10,3 m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych  $H_L = 26,5$  m, wysokość przewodów fazowych w miejscu największego zwisu  $h_L = 14,5$  m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych  $H_G = 30,6$  m, wysokość przewodów odgromowych w miejscu największego zwisu  $h_G = 13,8$  m, odległość między przewodami odgromowymi a osią słupa o = 8,2 m. Wartość natężenia prądu w przewodach fazowych przyjęto 2096 A. Następstwo napięć:  $U_1 = 400 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{ kV}, U_2 = 400 \text{ kV},$  $U_3 = 400 \text{ e}^{j120^\circ} \text{ kV}.$  Długość przesła linii d = 400 metrów.



Rys. 5.49. Szukana lokalizacja zawieszenia dodatkowych przewodów redukcyjnych dla linii elektroenergetycznej jednotorowej wielowiązkowej 400 kV

Optymalizację wykonano stosując algorytm PSO dla następujących założeń [8, 124, 139]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m},$
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m},$
- 20,5 m  $\leq$   $H_{red} \leq$  24,5 m,
- 9,85 m  $\leq$   $h_{red} \leq$  12 m,
- $FN_{red} < 51,1 \text{ kN}.$

Wyniki optymalizacji przedstawia tabela 5.14. Najlepsze wyniki optymalizacji zostały wyróżnione kolorem czerwonym. Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego po optymalizacji przedstawia rys. 5.50, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego rys. 5.51. Trójwymiarowy rozkład natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją z dodatkowymi przewodami odgromowymi przedstawia rys. 5.10, a dla pola magnetycznego rys. 5.11.

$E_{max\ przed}$ optymalizacją	$E_{max\ po}$ optymalizacji	$ I_{G1}  pprox  I_{G2} $	$ert I_{red1} ert pprox ert$ $ert I_{red2} ert pprox ert$ $ert I_{red3} ert$	$H_{max\ przed}$ optymalizacją	$H_{max \; po}$ optymalizacji	$H_{red}$	h <sub>red</sub>	FN <sub>red</sub>
V/m	V/m	А	А	A/m	A/m	m	m	kN
	950,93		308,21	62,99	19,35	23,47	12,00	12,47
	950,06	185,68	308,31		19,39	23,46	11,74	12,21
	949,41		308,95		19,36	23,50	11,88	12,31
	949,45		309,20		19,36	23,42	11,88	12,40
6273 34	950,53		308,96		19,32	23,49	12,06	12,52
0273,34	949,42		308,97		19,29	23,48	11,80	12,25
	949,57		303,60		19,36	23,36	11,84	12,42
	949,46		299,85		19,38	23,26	11,75	12,43
	949,43		298,70		19,40	23,23	11,69	12,40
	949,29		308,96		19,25	23,49	11,68	12,11

Tabela 5.14. Wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu PSO dla linii elektroenergetycznej jednotorowej wielowiązkowej 400 kV.



Rys. 5.50. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem wielowiązkowej linii 400 kV jednotorowej z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji



Rys. 5.51. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem wielowiązkowej linii 400 kV jednotorowej z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji

Z przeprowadzonych w rozdziale 5.5 optymalizacji wynika, że można znaleźć taką wysokość zawieszenia przewodów redukcyjnych, która pozwoli na ograniczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod rozpatrywaną linią elektroenergetyczną do wymaganych wartości zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska [8]. Takie rozwiązanie może być stosowane dla istniejących linii elektroenergetycznych.

## 5.6. Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego poprzez dobór parametrów geometrycznych linii oraz dodatkowych przewodów redukcyjnych

W niniejszej rozprawie dokonano optymalizacji parametrów geometrycznych linii elektroenergetycznych z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi, umieszczonymi pod przewodami fazowymi. Optymalizacja wykonana za pomocą algorytmu roju cząstek PSO miała na celu dobrać parametry geometryczne linii tak, aby natężenie pola elektrycznego i magnetycznego było jak najmniejsze. Rozkład pól wyznaczono w obszarze między słupami przęsła w odległości  $y = \pm 25$  m od osi przęsła linii 110 kV i 220 kV, natomiast dla linii 400 kV  $y = \pm 50$  m. Punkt obserwacji P(x, y, z) znajduje się na wysokości z = 2 metrów powyżej płaszczyzny ziemi. Obiektem, dla którego wykonano optymalizację, była linia 110 kV, zawieszona na słupie typu B2 (rys. 5.43). Przewody fazowe wykonane są z AFL-6 240, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_I = 110 e^{-j120^\circ} kV$ ,  $U_2 = 110 kV$ ,  $U_3 = 110 e^{j120^\circ} kV$ . Długość przęsła linii d = 300 metrów. Natężenie prądu w przewodach fazowych wynosi 235 A. Tabela 5.15 przedstawia parametry linii po optymalizacji. Dodatkowe przewody redukcyjne zawieszono na wysokości  $H_{red}$ , natomiast minimalna ich wysokość w połowie rozpiętości przęsła oznaczono jako  $h_{red}$ . Naciąg przewodów fazowych oznaczono symbolem  $FN_{Ll, L2, L3}$ , przewodów odgromowych  $FN_G$ , natomiast dodatkowych przewodów redukcyjnych  $FN_{red}$ . Obliczony prąd wzbudzony w dodatkowych przewodach redukcyjnych oznaczono symbolem  $I_{red}$ .

Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 144, 147]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m},$
- $2 \text{ m} \le a_{L3} \le 3 \text{ m}$ ,
- $1 \text{ m} \le a_{L1, L2} \le 2 \text{ m},$
- 13 m  $\leq$   $H_{L1, L2} \leq$  16 m,
- 9 m  $\leq h_{L1, L2} \leq 13$  m,
- $18 \text{ m} \le H_{L3} \le 20 \text{ m},$
- 16 m  $\le$   $h_{L3} \le$  18 m,
- $0,5 \text{ m} \le o \le 1 \text{ m},$
- $22 \text{ m} \le H_G \le 26 \text{ m},$
- $16 \text{ m} \le h_G \le 20 \text{ m},$
- $H_{L1, L2} 1,54 \text{ m} \le H_{red} \le H_{L1, L2} 1,15 \text{ m},$
- $h_{L1, L2} 1,54 \text{ m} \le h_{red} \le h_{L1, L2} 1,15 \text{ m},$
- $FN_L < 84,6 \text{ kN},$
- $FN_{G}$ ,  $FN_{red} < 51,1$  kN.

Poszukiwane parametry geom	Poszukiwane parametry geometryczne linii		
a <sub>L3</sub>	m	2,58	
<i>a</i> <sub>L1, L2</sub>	m	1,85	
0	m	0,50	
$h_{L1, L2}$	m	13,00	
h <sub>L3</sub>	m	16,60	
$H_{L1, L2}$	m	16,00	
$H_{L3}$	m	19,60	
$h_G$	m	19,60	
$H_G$	m	23,20	
h <sub>red</sub>	m	11,46	
H <sub>red</sub>	m	14,46	
FN <sub>L1, L2</sub>		50,96	
$FN_{L3}$	1-NI	50,96	
$FN_G$	KIN	30,84	
FN <sub>red</sub>		47,68	
E <sub>max</sub>	V/m	693,88	
	А	5,49	
Ired	A	7,78	
H <sub>max</sub>	A/m	0,32	

Tabela 5.15.	Wyniki	optymali	zacji za	pomocą	algorytmu	PSO	dla linii	elektroenerge	etycznej	110 kV.
--------------	--------	----------	----------	--------	-----------	-----	-----------	---------------	----------	---------

Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego po optymalizacji przedstawia rys. 5.52, natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego przedstawiono na rys. 5.53.



Rys. 5.52. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji



Rys. 5.53. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 110 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji

W dalszej kolejności dokonano optymalizacji parametrów geometrycznych linii 220 kV (typ słupa H52 - rys. 5.46), z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi, zawieszonymi pod przewodami fazowymi. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe 2 x AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_I = 220 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{ kV}$ ,  $U_2 = 220 \text{ kV}$ ,  $U_3 = 220 \text{ e}^{j120^\circ} \text{ kV}$ . Natężenie prądu w przewodach fazowych wynosi 570 A. Długość przęsła linii d = 400 metrów. Tabela 5.16 przedstawia parametry linii po optymalizacji. Dodatkowe przewody redukcyjne zawieszono na wysokości  $H_{red}$ , natomiast minimalną ich wysokość w połowie rozpiętości przęsła oznaczono jako  $h_{red}$ . Naciąg przewodów fazowych oznaczono symbolem  $FN_{LI, L2, L3}$ , przewodów odgromowych  $FN_G$ , natomiast dodatkowych przewodów redukcyjnych  $FN_{red}$ . Obliczony prąd wzbudzony w dodatkowych przewodach redukcyjnych oznaczono symbolem  $I_{red}$ .

Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 141, 147]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m},$
- 6 m  $\leq a \leq$  9 m,
- 22 m  $\leq H_L \leq$  26,5 m,
- $16 \text{ m} \le h_L \le 19 \text{ m},$
- $5 \text{ m} \le o \le 8 \text{ m}$ ,
- $28 \text{ m} \le H_G \le 34 \text{ m}$ ,
- $20 \text{ m} \le h_G \le 24 \text{ m}$ ,
- $H_L 2,51 \text{ m} \le H_{red} \le H_L 2 \text{ m},$
- $h_L 2,51 \text{ m} \le h_{red} \le h_L 2 \text{ m},$
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G$ ,  $FN_{red} < 51,1$  kN.

Poszukiwane parametry geom	etryczne linii	Wartości po optymalizacji
0	m	4,50
а	m	6,00
$h_L$	m	18,90
$H_L$	m	26,00
$h_G$	m	22,90
$H_G$	m	30,00
h <sub>red</sub>	m	16,90
$H_{red}$	m	24,00
$FN_L$		53,89
$FN_G$	kN	19,87
FN <sub>red</sub>		20,24
$E_{max}$	V/m	486,37
$ I_{G1} pprox  I_{G2} $	А	13,32
$ I_{red1} pprox  I_{red2} pprox  I_{red3} $	A	32,14
H <sub>max</sub>	A/m	3,71

Tabela 5.16. Wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu PSO dla linii elektroenergetycznej 220 kV.

Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego po optymalizacji przedstawia rys. 5.54., natomiast rozkład natężenia pola magnetycznego rys. 5.55.



Rys. 5.54. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji



Rys. 5.55. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem jednotorowej linii 220 kV z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji

Dokonano również optymalizacji parametrów geometrycznych dla linii wielowiązkowej 400 kV na słupie Y52 (rys. 5.49) z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi, zawieszonymi pod przewodami fazowymi. Przewody fazowe wykonane są z AFL-8 525, natomiast przewody odgromowe AFL-1,7 70. Następstwo napięć:  $U_1 = 400 \text{ e}^{-j120^\circ} \text{ kV}, U_2 = 400 \text{ kV}, U_3 = 400 \text{ e}^{j120^\circ} \text{ kV}.$  Długość przęsła linii d = 400 metrów. Natężenie prądu w przewodach fazowych wynosi 2096 A. Tabela 5.17 przedstawia

parametry linii po optymalizacji. Dodatkowe przewody redukcyjne zawieszono na wysokości  $H_{red}$ , natomiast minimalna ich wysokość w połowie rozpiętości przęsła oznaczono jako  $h_{red}$ . Naciąg przewodów fazowych oznaczono symbolem  $FN_{Ll, 12}$  L3, przewodów odgromowych  $FN_G$ , natomiast dodatkowych przewodów redukcyjnych  $FN_{red}$ . Obliczony prąd wzbudzony w dodatkowych przewodach redukcyjnych oznaczono symbolem  $I_{red}$ .

Optymalizację wykonano dla następujących założeń [8, 124, 139, 142, 147]:

- $E_{max} \leq 1 \text{ kV/m}$ ,
- $H_{max} \leq 60 \text{ A/m},$
- 6 m  $\leq a \leq$  9 m,
- $22 \text{ m} \le H_L \le 26 \text{ m},$
- $16 \text{ m} \le h_L \le 19 \text{ m},$
- $3 \text{ m} \le o \le 5 \text{ m}$ ,
- $28 \text{ m} \le H_G \le 30 \text{ m},$
- 20 m  $\le$   $h_G \le$  26 m,
- $H_L 3,95 \text{ m} \le H_{red} \le H_L 3,2 \text{ m},$
- $h_L 3,95 \text{ m} \le h_{red} \le h_L 3,2 \text{ m},$
- $FN_L < 159,8 \text{ kN},$
- $FN_G$ ,  $FN_{red} < 51,1$  kN.

Poszukiwane parametry geome	Wartości po optymalizacji	
0	m	4,81
а	m	6,00
$h_L$	m	20,00
$H_L$	m	24,00
$h_G$	m	25,90
$H_G$	m	28,90
h <sub>red</sub>	m	16,80
H <sub>red</sub>	m	20,80
$FN_L$		53,89
$FN_G$	kN	19,87
FN <sub>red</sub>		20,24
Emax	V/m	671,63
$ I_{GI} pprox  I_{G2} $	А	70,15
$ I_{red1} pprox  I_{red2} pprox  I_{red3} $	A	3,95
H <sub>max</sub>	A/m	5,22

Tabela 5.17. Wyniki optymalizacji za pomocą algorytmu PSO dla linii elektroenergetycznej 400 kV.

Rozkład trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego po optymalizacji przedstawia rys. 5.56, natomiast rozkład natężenie pola magnetycznego rys. 5.57.



Rys. 5.56. Rozkład 3-D natężenia pola elektrycznego pod przęsłem wielowiązkowej linii 400 kV jednotorowej z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji



Rys. 5.57. Rozkład 3-D natężenia pola magnetycznego pod przęsłem wielowiązkowej linii 400 kV jednotorowej z dodatkowymi przewodami redukcyjnymi po optymalizacji

W rozdziale 5.6 dokonano optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami elektroenergetycznymi z uwzględnieniem dodatkowych przewodów redukcyjnych zawieszonych pod przewodami fazowymi. Poszukiwanymi parametrami i podczas symulacji były parametry geometryczne linii. Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii elektroenergetycznych przed optymalizacją wyposażoną w dodatkowe przewody redukcyjne zawieszone na izolatorach pod przewodami fazowymi przedstawiono w rozdziale 5.2 (rys. 5.6 – 5.11). Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego dla linii 110 kV została zredukowana z  $E_{max} = 1670,42$  V/m do  $E_{max} = 693,88$  V/m, dla linii 220 kV z  $E_{max} = 1616,73$  V/m do  $E_{max} = 486, 37$  V/m, a dla linii 400 kV z  $E_{max} = 4976,34$  V/m do  $E_{max} = 671,63$  V/m. Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego dla linii 110 kV została zredukowana z  $H_{max} = 4,96$  V/m do  $H_{max} = 0,32$  V/m, dla linii 220 kV z  $H_{max} = 17,93$  V/m do  $H_{max} = 3,71$  V/m, a dla linii 400 kV z  $H_{max} = 61,86$  V/m do  $H_{max} = 5,22$  V/m.

Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały zredukowane poniżej wymaganych progów wyszczególnionych w rozporządzeniu Ministra Środowiska dla miejsc zamieszkiwanych przez ludzi [8].

## 6. Wnioski i podsumowanie

Celem pracy było zastosowanie algorytmów optymalizacyjnych do wyznaczania parametrów geometrycznych napowietrznych linii elektroenergetycznych WN/NN, które pozwalają na redukcję wartości natężenia trójwymiarowego pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz, w obszarze między słupami przęsła przy wykorzystaniu technik modelowania pola elektrycznego oraz pola magnetycznego.

Stosowane dotychczas modele oraz symulacje pozwalają ocenić rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w sposób przybliżony. Jedną z metod powszechnie stosowanych i opisanych w licznych publikacjach jest metoda uproszczona, która zakłada, że przewody linii elektroenergetycznych są prostoliniowe, równoległe do powierzchni ziemi. Rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest obliczany dla jednej z trzech wybranych wysokości zawieszenia przewodów: maksymalnej wysokości zawieszenia linii, minimalnej wysokości w połowie rozpiętości przęsła lub na średniej wysokości.

Metoda dokładna wykorzystywana w pracy do obliczeń rozkładu trójwymiarowego natężenia pola elektrycznego uwzględnia zwis przewodów, zmienny rozkład ładunków symulacyjnych wzdłuż przewodów linii, a w przypadku pola magnetycznego prądy indukowane w przewodach odgromowych oraz dodatkowych przewodach redukcyjnych. Przewód linii elektroenergetycznej o kształcie krzywej łańcuchowej rozpatruje się jako układ *n* segmentów o jednakowych długościach. Przy wykorzystaniu zasady superpozycji, otrzymane rezultaty symulacji pozwalają uzyskać zbliżony do rzeczywistego rozkład natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych.

Proponowany w pracy sposób optymalizacji pozwoli, zgodnie z przyjętymi ograniczeniami mechanicznymi oraz elektrycznymi, znaleźć parametry geometryczne linii elektroenergetycznych, takie jak: odległości między przewodami fazowymi oraz przewodami odgromowymi, odległości przewodów od osi linii, wysokości zawieszenia przewodów fazowych oraz przewodów odgromowych, wysokości przewodów fazowych oraz wysokości przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł, w taki sposób, aby uzyskać wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w określonym obszarze w pobliżu linii elektroenergetycznej zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska [8].

Algorytmy stosowane w procesie optymalizacji modelu symulacyjnego powinny szybko operować w wielowymiarowej przestrzeni oraz skutecznie poszukiwać najlepszych rozwiązań przy ograniczonej liczbie symulacji.

Prezentowana w pracy optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonywana została przy pomocy algorytmu genetycznego GA i roju cząstek PSO w środowisku MATLAB. Algorytm genetyczny został przystosowany do obliczeń za pomocą funkcji GA, znajdującą się w programie. Algorytm roju cząstek PSO został zaimplementowany do wykonania optymalizacji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego za pomocą nowej, autorskiej funkcji napisanej w MATLAB-ie.

Wyniki optymalizacji dla obu rozpatrywanych algorytmów są podobne, jednakże algorytm PSO pozwala uzyskać wynik w czasie trzykrotnie krótszym, niż algorytm GA.

Heurystyczne algorytmy optymalizacyjne mogą być przydatnym narzędziem inżynierskim (projektowanie) oraz naukowym do oceny wpływu innych czynników na rozkład pola elektromagnetycznego i magnetycznego, m. in. dodatkowych przewodów ekranujących, zmiany kolejności faz lub zastosowania przewodów wiązkowych.

Zastosowanie dodatkowych przewodów redukcyjnych pod przewodami fazowymi linii elektroenergetycznych pozwala zredukować wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Poprzez dobór odpowiednich wysokości zawieszenia przewodów redukcyjnych można obniżyć wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego do wartości zgodnych z rozporządzeniem Ministra Środowiska [8] dla miejsc zamieszkanych przez ludzi. Takie rozwiązanie można wdrożyć dla istniejących już linii elektroenergetycznych.

Podczas projektowania linii elektroenergetycznych należy brać pod uwagę, że natężenie pola elektrycznego i magnetycznego wzrasta z wysokością usytuowania punktu obserwacji. Należy zatem rozpatrywać wartość tych pól w miejscach bezpośredniego sąsiedztwa linii elektroenergetycznej i zabudowań mieszkalnych na wysokościach większych od 2 metrów.

Główne osiągnięcie autora rozprawy polega na:

 opracowaniu środowiska komputerowego (w tym autorska implementacja PSO zweryfikowana algorytmem genetycznym GA), które może być uniwersalnym narzędziem do badania trójwymiarowego rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w układzie napowietrznych linii elektroenergetycznych,

- dokonaniu częściowej weryfikacji wyników otrzymanych w procesie symulacji poprzez porównanie z wynikami pomiarów,
- uwzględnieniu w procesie optymalizacji obecności przewodów redukcyjnych w linii elektroenergetycznej,
- optymalizacji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w obszarze bliskiego występowania linii elektroenergetycznej i zabudowań na wysokościach większych od 2 metrów,
- uwzględnieniu w obliczeniach natężenia pola magnetycznego linii elektroenergetycznych prądów wzbudzonych w przewodach odgromowych oraz przewodach redukcyjnych.

Przedstawione wnioski pozwalają na stwierdzenie, że postawiona teza rozprawy – mówiąca, że możliwa jest optymalizacja rozkładu trójwymiarowego (3-D) natężeń pól: elektrycznego i magnetycznego wokół napowietrznych linii elektroenergetycznych przy pomocy algorytmów heurystycznych – została udowodniona, a założone cele rozprawy zostały osiągnięte.

Należy podkreślić, że opracowana metoda może być wykorzystywana również jako narzędzie wspomagania procesu projektowania linii elektroenergetycznych.

Obliczenia wykonano na maszynie Intel Core I7-6820HK z czterema rdzeniami o ośmiu wątkach z szybkością 2,7 GHz oraz z 16 GB pamięci RAM.

W dalszych pracach badawczych przewiduje się uwzględnienie:

- aspektu ekonomicznego w procesie optymalizacji,
- wpływu temperatury na zwis przewodów,
- minimalizacji strat energii przesyłanej napowietrznymi liniami WN/NN.

## Bibliografia

- Razavipour S.S., Jahangiri M., Sadeghipoor H., Electrical Field around the Overhead Transmission Lines, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, 2012, s. 530-533.
- [2] Tupsie S., Isaramongkolrak A., Paolaor P., Analysis of Electromagnetic Field Effects Using FEM for Transmission Lines Transposition, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 53, 2009, s. 870-874.
- [3] Das H., Gogoi K., Chatterjee S., Analysis of the Effect of Electric Field due to High Voltage Transmission Lines on Humans, Proceeding of the 1st conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), 10-11 Jan, 2015, Itanagar. s. 1-5.
- [4] Dib Djalel, Mordjaoui Mourad, Study of the influence high-voltage power lines on environment and human health (case study: The electromagnetic pollution in Tebessa city, Algeria), Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2014, s. 1-8.
- [5] Deželak K., Štumberger G., Jakl F., Arrangements of Overhead Power Line Conductors Related to the Electromagnetic Field Limits, Modern Electric Power Systems 2010, s. 13.2-13.8.
- [6] Jamal E. Ehtaiba, Electric Fields Intensity Around the new 400 kV Power Transmission Lines in Libya, 6th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing, Cairo, Egypt, Dec 29-31, 2007, s. 390-398.
- [7] Skomudek W., Szpindler P., Rozkład składowych pola elektromagnetycznego wokół przewodów linii napowietrznych wysokich napięć wykonanych na słupach pełnościennych, Pomiary Automatyka Kontrola, 2013, s. 216-221.
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów, Dz.U. nr 192, poz. 1883 (14 listopada 2003).
- [9] Fernandez C., Soibelzon H., The surface electric field of catenary high voltage overhead transmission lines, J. EMC and Power System, 2015, s. 22-26.
- [10] Dein A. Z., Effect of the variation of the charge distribution along multi-overhead transmission lines' conductors on the calculation method of ground surface electric field, Electrical Power and Energy Systems, 2013, s. 255-264.
- [11] Dein A. Z., Parameters affecting the charge distribution along overhead transmission lines' conductors and their resulting electric field, Electrical Power and Energy Systems, 2014, s. 198-210.

- [12] Amiri R, Hadi H, Marich M., The influence of sag in the electric field calculation around high voltage overhead transmission lines. In: Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City, Missouri USA, 2006, s. 206–209.
- [13] Książkiewicz M., Passive loop coordinates optimization for mitigation of magnetic field value in the proximity of a power line, Computer Applications in Electrical Engineering, 2015, s. 77-87.
- [14] Deri A., The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multilayer earth return, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions of Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, 1981, s. 3686-3693.
- [15] Budnik K., Machczyński W., Szymanderski J., Electric field induced by current in overhead conductor, Elektryka, 2014, s. 35-42.
- [16] M. Peric, S. Aleksic, Electromagnetic field distribution in vicinity of power lines above real earth, Annals of the University of Craiova - Electrical Engineering Series, no. 34, 2010, s. 1-6.
- [17] Akinlolu P., Kazeem A., Assessment of Human Exposure to Magnetic Field from Overhead High Voltage Transmission Lines in a City in South Western Nigeria, American Journal of Engineering Research, 2015, s. 154-1662.
- [18] Hossam-Eldin A., Mokhtar W, Ali E. M., Effect of Electromagnetic Fields from Power Lines on Metallic Objects and Human Bodies, Electrical Engineering Department, International Journal of Electromagnetics and Applications, 2012, s. 151-158.
- [19] Khalid A. M, Investigate and study the Effect of Electromagnetic Radiations Emitted from 400 kV High Voltage Transmission Lines on Human Health, Tikrit Journal of Pure Science, 2013, s. 135-139.
- [20] Koreleski K., Oddziaływanie napowietrznych linii energetycznych na środowisko człowieka. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, 2005, Z. 2, s. 47-60.
- [21] Olesz M. Lokalizacja obiektów budowlanych w sąsiedztwie linii 110 kV, XXXVIII Konferencja Naukowo - Techniczna Gdańskie Dni Elektryki 2013, s. 27-30.
- [22] Bober D.: Rozkład pól elektromagnetycznych wokół napowietrznych linii przesyłowych. Materiały I Seminarium Doktorantów, Nałęczów, 2001, s. 11-20.
- [23] Dein A. Z., Magnetic Field Calculation under EHV Transmission Lines for More Realistic Cases, 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Amman, Jordan, 2008, s. 1-6.
- [24] Modrić T., Vujević S., Lovri D., 3D Computation of the Power Lines Magnetic Field, Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 41, 2015, s. 1-9.
- [25] Dein A. Z., Effect of the variation of the charge distribution along multi-overhead transmission lines' conductors on the calculation method of ground surface electric field, Electrical Power and Energy Systems 51, 2013, s. 255-264.

- [26] Dein A. Z., Parameters affecting the charge distribution along overhead transmission lines' conductors and their resulting electric field, Electric Power Systems Research 108, 2014, s. 198-210.
- [27] Modrić T., Vujević S., Lovri D., 3D Computation of the Overhead Power Lines Electric Field, Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 53, 2017, s. 17–28.
- [28] Budnik K., Machczyński W., Magnetic field mitigation from sagging power lines using a sagging passive loop, Elektryka, 2013, Z. 1, s. 29-41.
- [29] Nowak W., Tarko R., Komputerowa analiza pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej wytwarzanego przez linie i stacje elektroenergetyczne, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG, Nr 25, 2008, s. 111- 114.
- [30] Vujević S., Lovrić D., Segmentation of overhead power line conductors for 3D electric and magnetic field computation, 10th International Conference on Applied Electromagnetics, 2011, s. 1-5.
- [31] Deželak K., Štumberger G., Jakl F, Emissions of electromagnetic fields caused by sagged overhead power lines, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 3, 2011, s. 29-32.
- [32] Salameh M. S. H. Al, Nejdawi I. M., Alani O. A., Using the nonlinear particle swarm optimization (PSO) algorithm to reduce the magnetic fields from overhead high voltage transmission lines, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2010, s. 18-31.
- [33] Ranković A., Mijailović V., Rozgić D., Ćetenović D., Optimization of Electric and Magnetic Field Emissions Produced by Independent Parallel Overhead Power Lines, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 14, 2017, s.199-216.
- [34] Deželak K., Štumberger G., Jakl F., Optimization Based Reduction of the Electromagnetic Field Emissions caused by the Overhead Lines, Electrical Review, Vol. 87, no. 3, 2011, s. 33-36.
- [35] Dein A. Z., Optimal Arrangement of Egyptian Overhead Transmission Lines' Conductors Using Genetic Algorithm, Electrical Engineering, 2013, s. 1049-1059.
- [36] Deželak K., Štumberger G., Jakl F., Arrangements of overhead power line conductors determined by differential evolution, Electric Power Systems Research, Vol. 81, Issue 12, December 2011, s. 2164-2170.
- [37] Salameh M. S. H., Hassouna M. A. S., Arranging overhead power transmission line conductors using swarm intelligence technique to minimize electromagnetic fields, Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 26, 2010, s. 213-236.
- [38] Deželak K., Štumberger G., Jakl F., Reduction of Electric and Magnetic Field Emissions caused by Overhead Power Lines, Renewable Energy and Power Quality Journal, Vol.1, No.8, 2010, s. 407-410.

- [39] Qi Li, Rowland S. M., Shuttleworth R., On Calculating Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, Issue 1, 2015, s. 43-52.
- [40] Yildrim H., Kalanderli O., Calculation of Electric Field Induced Currents on Human Body Standing Under a high Voltage Transmission Line by Using Charge Simulation Method, Inter. Conf. Bio. Eng, Istanbul, Turkey, 1998 s. 75-77.
- [41] Samy M. M., Electric field mitigation under extra high voltage power lines, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, s. 54-62.
- [42] Sayed A. Word, Samy M. Ghania, Essam M., Three-Dimensional Electric Field Calculation and Measurements inside High Voltage Substations, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2011, s. 219-222.
- [43] Samy M., Optimum Number of Grounded Shield Wires underneath Extra High Voltage Direct Current Transmission Lines, Innovative Systems Design and Engineering, 2014, s. 39-49.
- [44] Bravo J. C., Pino-López J. C., Cruz P., A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019, s. 1-20.
- [45] Salas S. S., Fonseca A. G., Guerra F. A., Multi-Objective Optimization of Electromagnetic Fields from Urban Overhead Power Lines, Institute of Technology for Development Curitiba, 2014 s. 1-6.
- [46] Canova A., Freschi F., Repetto M., Tartaglia M., Description of power lines by equivalent source system, Emerald Group Publishing Limited, 2005, s. 863-906.
- [47] Carvalho Resende P., Lobato Campos G., Guimarães dos Santos M., Case study of magnetic fields in overhead transmission lines operating at steady state, Engevista, Vol. 20, n.1, 2018, s. 53-68.
- [48] Wafa T., Amel O., Abdessalem B., Experimental and theoretical modelling of the electric and magnetic fields behaviour in the vicinity of high-voltage power lines, Global Journal of Computer Sciences: Theory and Research, Vol. 07, No. 2, 2017, s. 68-76.
- [49] Djekidel R., Bessedik S. A., Hadjadj A., Electric field modeling and analysis of EHV power line using improved calculation method, Electronics and Energetics, Vol. 31, No. 3, 2018, s. 425-445.
- [50] Grandolfo M., Michaelson S. M., Rindi A., Biological effects and dosimetry of static and ELF electromagnetic fields, New York and London: Plenum Press, 1985.
- [51] Grandolfo M., Vecchia P., Existing safety standards for high voltage transmission lines, New York and London: Plenum Press, 1989.

- [52] Fereidouni, A., Vahidi B., Shishehgar, F., Hosseini Mehr T., Tahmasbi M., Human body modeling in the vicinity of high voltage transmission lines, Science International (Lahore), 26(3), 2014, s. 1017-1031.
- [53] Fereidouni, A., Vahidi, B., Shishehgar F., Induced current calculation in embryo due to high voltage transmission line, Science International (Lahore), 27(3), 2015, s. 1855-1859.
- [54] Temoshok M., Relative Surface voltage Gradients of Grouped Conductors, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 67, 1948, s. 1583-1591.
- [55] Adams G. E., Voltage Gradients on High-Voltage Transmission Lines, Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 74, 1955, s. 5-11.
- [56] Thomson W., Reprint of papers on electrostatics and magnetism, Macmillan & Company, 1872.
- [57] Hammond P., Electric and magnetic images, Proceedings of the IEE Part C: Monographs, Vol. 107, 1960, s. 306-313.
- [58] Sarma M. P. and Janischewskyj W., Electrostatic Field of a System of Parallel Cylindrical Conductors, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions of Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, 1969, s. 1069-1079.
- [59] Baron B., Pole elektryczne przesyłowej linii trójfazowej 400 kV, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Zeszyty Naukowe Elektryka, Z. 64, Gliwice 1979, s. 71-78.
- [60] Baron B., Pole elektryczne linii przesyłowych trójfazowych najwyższych napięć, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Zeszyty Naukowe Elektryka, Z.73, 1980, s. 118-126.
- [61] Rochalska M., Wpływ pól elektromagnetycznych na organizmy żywe: rośliny, ptaki i zwierzęta. Medycyna Pracy, Vol. 58, Nr l, 2007, s. 37-48.
- [62] Rochalska M., Wpływ pól elektromagnetycznych na florę i faunę. Medycyna Pracy, Vol. 60, Nr 1, 2009, s. 43-50.
- [63] Kanya Kumari M., Rajesh Kumar O., Nambudiri P. V.V., Srinivasan K.N., Computation of electrical environmental effects of transmission lines, Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, Vol. 2, 1999, s. 160 – 163.
- [64] Lee J. J. Young-Seek Ch., Hyun-Kyo J., Calculation of Electric/Magnetic field under Power Transmission Line with Periodic Analysis, Dip Effect and Method of Image, International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Daejeon, 2017, s. 757-758.
- [65] Singer H., Steinbigler H., Weiss P., A charge simulation method for calculating high voltage fields, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions of Power Apparatus and Systems, Vol. 93, 1974, s. 1660-1668.

- [66] Gary C., Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes. EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches - Série B, no. 3/4, 1976, s. 5-20.
- [67] Wróblewski Z., Sztafrowski D., Gumiela J., Analiza rozkładu pola elektromagnetycznego pod linią elektroenergetyczną w rzeczywistych warunkach terenowych wolna od błędów wnoszonych przez wahania prądów, Instytut Elektrotechniki, Vol. 272, 2016, s. 179-183.
- [68] Transmission & Distribution World Magazine, TenneT Presents New Innovative Pylon Design, Apr 24, 2008.
- [69] Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A., Technical Solutions to Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines, 2003, June, Institute of Electrical and Electronics Engineers Power Tech Conference, Bologna, Italy, s. 1-6.
- [70] Said I., Hussain H. B., Computation of magnetic field from quadruple tower transmission lines in Malaysia, Universities Power Engineering Conference, UPEC 43rd, 2008, s. 1-5.
- [71] Mimos E. I, Tsanakas D. K., Tzinevrakis A. E., Solutions for high voltage transmission in suburban regions regarding the electric and magnetic fields, Hawaii, USA, 2008, Automation Congress, WAC, 2008, s. 1 – 6.
- [72] Deltuva R., Lukočius R., Electric and magnetic field of different transpositions of overhead power line, Archives of Electrical Engineering, Vol. 66, 2017, s. 595-605.
- [73] Mamishev, A.V., Nevels, R.D., Russell, B.D. Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery, 11(3), 1996, s. 1571-1576.
- [74] Radwan R. M., Samy M. M. and Akef S., Claculations of Electric Fields Underneath Ultra High Voltage Transmission Lines, Proceeding of the 17th Middele East Power Conference, 16 -18 Dec., Mansura, Egypt, 2015, s. 1-5.
- [75] Samy M. M., Emam A. M., Computation of electric fields around parallel HV and EHV overhead transmission lines in Egyptian power network, In Proceedings of the International Conference on Environment and Electrical Engineering and Institute of Electrical and Electronics Engineers Industrial and Commercial Power Systems Europe, Milan, Italy, 2017, s. 1 – 5.
- [76] Gumiela J., Sztafrowski, Application of additional grounded wires in high voltage overhead power lines to reduce the intensity of electric field generated by phase wires, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94 Nr 3, 2018, s. 159-161.
- [77] Kokoruš M., Delić S., Mujezinović A., Muratović M., Čaršimamović A., Analysis of the possible solutions for the reduction of electric and magnetic fields near 400 kV overhead transmission lines, WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 181, 2018, s. 225-236.

- [78] Ahmadi H., Mohseni S., Shayegani, Electromagnetic fields near transmission lines - problems and solutions, Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng., Vol. 7, No. 2, 2017, s. 181-188.
- [79] Casaca J. F.G., Evaluation of electromagnetic fields produced by overhead transmission lines, Técnico Lisboa, 2015, s. 1-8.
- [80] Kucowski J., Ludyn D., Przekwas M., Energetyka, a ochrona środowiska, Wyd. Nauk.-Techniczne, Warszawa, 1993.
- [81] Sokólski W., Machczyński W., Rozwadowski J., Oddziaływanie indukcyjne linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi, Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, Zakopane, Polska, 2006, s. 1-6.
- [82] Machczyński W., Oddziaływania elektromagnetyczne na obwody ziemnopowrotne - rurociągi podziemne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1998.
- [83] Machczyński W., Markiewicz M., Sokólski W., Oddziaływanie linii przesyłowych W.N., Rurociągi (Polish Pipeline Journal), Nr 2-3, 1999, s. 11.
- [84] Lukstaedt M., Machczyński W., Oddziaływanie obwodów elektroenergetycznych na rurociągi podziemne, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 99, Poznań/Kiekrz, 12-14 kwietnia 1999, s. 99-102.
- [85] Machczyński W., Sokólski W., Oddziaływanie indukcyjne linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi - część I, Ochrona przed Korozją, Nr 8, 2005, s. 267.
- [86] Rynkowski A., Zarys metodyki i przykłady obliczeń oraz oceny oddziaływania indukcyjnego linii napowietrznych 400 kV na gazociągi przesyłowe, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 56, 2017, s. 83-87.
- [87] Serwiński R., Matus H., Problemy z oddziaływaniem linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na gazociągi w dobrej izolacji, Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, 15-17.06.2016, s. 75-87.
- [88] Johansen C., Electromagnetic fields and health effects-epidemiologic studies of cancer, diseases of the central nervous system and arrhythmia related heart disease, Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, Vol. 30, Supplement 1, 2004, s. 1-30.
- [89] Sobel E., Dunn M., Davanipour Z., Qian Z., Chui H. C., Elevated risk of Alzheimer's disease among workers with likely electromagnetic field exposure, Neurology, Vol. 47, 1996, s. 1477-1481.
- [90] King R. W. P., Fields and Currents in the Organs of the Human Body When Exposed to Power Lines and VLF Transmitters, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 45, 1998, s. 520–530.
- [91] Zeńczak M., Estimation of electric and magnetic field intensities under power transmission lines in real country conditions. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 7, 2008, s. 174–177.

- [92] Małyszko O., Zeńczak M., Electric and magnetic fields near new power transmission lines, Elektryka, Zeszyt 3-4, 2012, s. 111-116.
- [93] Abou-Seada M. S. and Nasser E., Digital Computer Calculation of the Potential and its Gradient of a Twin Cylindrical Conductor, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, 1969, s. 1802-1814.
- [94] Sunde E.D., Earth conduction effects in transmission system, New York, Dover 1968.
- [95] Yializis A., Kuffel E., Alexander s. H., An Optimized Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, 1978, s. 2434-2440.
- [96] Machczyński W., Zastosowanie "charge simulation method" /CSM/ w analizie zagadnień uziomowych, XII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Wisła, 1989, s. 278-286.
- [97] Budnik K., Machczyński W., Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines, European Transactions on Electrical Power ETPE, Vol. 16, 2006, s. 345-364.
- [98] Gary C., Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes. EDF Bulletin de la Direction des Études et Recherches
  Série B, 1976, No. 3/4, s. 5-20.
- [99] Deri A., Tevan G., Semlyen A., Castanheira A., The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, No. 100, s. 3686-3693.
- [100] Wang Y. J., Liu S. J., A Review of Methods for Calculation of Frequency-dependent Impedance of Overhead Power Transmission Lines. IEEE vol. 25, No. 6, 2001, s. 329-338.
- [101] Viet H., Vu Phan Tu, Tlusty J., Analysis of series impedance matrix models and induced magnetic field of transmission lines above lossy ground, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery, 2018, s. 214-221.
- [102] http://www.elektroinstalacje.info/articles.php?article\_id = 13 (30.01.2018, godzina 11:00).
- [103] Nocedal J. and Wright S. J., Numerical Optimization, 2nd ed. Springer, 2006.
- [104] Bertsekas D. P. and Tsitsiklis J.N., Neuro-dynamic programming, Athena Scientific, 1996.
- [105] Lu H., Jesmanowicz A., Li Sh., Hyde J., Momentum-weighted conjugate gradient descent algorithm for gradient coil optimization. Magn Reson Med., vol. 51, s.158–164, 2004
- [106] Wong E. C., Jesmanowicz A., Hyde J. S., Coil optimization for MRI by conjugate gradient descent, Magn. Reson. Med., Vol. 21, 1991, s. 39–48.
- [107] Stachurski A., Wierzbicki A. P., Podstawy optymalizacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001.

- [108] Goldberg D. E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie, Wydawnictwo-Naukowo-Techniczne – Warszawa, 2003.
- [109] Cavicchio D. J., Adaptive search using simulated evolution, Unpublished doctoral dissertation University of Michigan, Ann Arbor, 1970.
- [110] Hollstein R. B., Artificial genetic adaptation in computer control systems, University of Michigan, 1971.
- [111] Brindle A., Genetic algorithms for function optimization, University of Alberta, Department of Computer Science, 1971.
- [112] Booker L. B., Intelligent behavior as an adaptation to the task environment, Technical Report No. 243, Ann Arbor, University of Michigan, Logic of Computers Group, Dissertation Abstracts International, 43(2), 469B, 1982.
- [113] Rutkowski L, Metody i techniki sztucznej inteligencji, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- [114] Sławomir W., Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [115] Foryś P., Numerical optimization with particle swarms, Proc. of 10th International Conference on Numerical Methods in Continuum Mechanics, Zilina, August 23–26, 2005, (CD-ROM).
- [116] Kennedy J., Eberhart R.C., Particle Swarm Optimization, Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Piscataway, 1995, s. 1942-1948.
- [117] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, Dziennik Ustaw nr 62, poz. 627, 2001 (z późniejszymi zmianami).
- [118] Zeńczak M., Analiza pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych i wybranych urządzeń elektroenergetycznych, Napędy i Sterowanie Nr 9, 2001, s. 150-155.
- [119] Milutinov M., Electric and magnetic field in vicinity of overhead multi-line power system, Conference on Modern Power System (MPS), Cluj - Napoca, Romania, 2008, s. 313-316
- [120] Tourab W., Babouri A., Measurement and Modeling of Personal Exposure to the electric and magnetic fields in the vicinity of high voltage power lines, Safety and Health at Work 7, 2016, s. 102-110.
- [121] Dziennik Ustaw nr 3, poz. 6, 1980 (z późniejszymi zmianami), Ustawa o ochronie i kształtowaniu środowiska.
- [122] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 11 sierpnia 1998 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska, dopuszczalnych poziomów promieniowania, jakie

mogą występować w środowisku, oraz wymagań obowiązujących przy wykonywaniu pomiarów kontrolnych promieniowania, Dziennik Ustaw nr 107, poz. 676, 1998.

- [123] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne.
- [124] PN-EN 50341-1:2013-03 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne.
- [125] Krakowski M. Obwody ziemnopowrotne. WNT, Warszawa 1979.
- [126] Ranković A., Novel multi-objective optimization method of electric and magnetic field emissions from double-circuit overhead power line, European Transactions on Electrical Power, Vol. 27, No. 2, s. 2243, 2017.
- [127] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J., Metody numeryczne, Warszawa, WNT 1998.
- [128] Djekidel R., Abdelghani C., Abdelchafik H., Efficiency of some optimization approaches with the charge simulation method for calculating the electric field under extra high voltage power lines, The Institution of Engineering and Technology, 2017, Vol. 11, No. 17, s. 4167-4174.
- [129] https://www.wios.szczecin.pl/bip/files/421D9B98F07B4322BC3C5309844354C9/Rejestr %202017.pdf (30.01.2018, godzina 11:00).
- [130] Papliński P., Śmietanka H., Wańkowicz J., Oddziaływanie pola elektromagnetycznego w pobliżu słupów kablowych na środowisko ogólnie dostępne, Przegląd Elektrotechniczny, R. 94, Nr 10, s. 13-17, 2018.
- [131] Król K., Machczyński W., Optimization of electric and magnetic field intensities in proximity of power lines using Genetic and Particle Swarm Algorithms, Archives of Electrical Engineering, 2018, Vol.67, s. 829-843.
- [132] Król K., Budnik K., Jarek P., Calculation of electric and magnetic field intensity under power line with taking into account conductor sag, ITM Web of Conferences, 2018, vol. 19 s. 1-2.
- [133] Król K., Machczyński W., Optymalizacja natężenia pola elektrycznego linii elektroenergetycznej z wykorzystaniem algorytmu genetycznego i roju cząstek, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 2018, No. 93, s. 265-277.
- [134] Król K., Budnik K., Jarek P., Obliczanie natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego pod linią energetyczną z uwzględnieniem zwisu przewodów, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 2018, No. 93, s. 265-277.
- [135] Król K., Symulacja 3-wymiarowego natężenia pola elektrycznego linii elektroenergetycznej, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 2017, s. 245-254.
- [136] Król K., Natężenie pola elektrycznego przewodu linii napowietrznej z uwzględnieniem zwisu, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 2016, No. 85, s. 117-126.

- [137] Król K., Machczyński W., Budnik K., Szymenderski J., Redukcja natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu napowietrznej linii elektroenergetycznej, Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, 2019, No. 97, s. 49-62.
- [138] Niebrzydowski J., Sieci elektroenergetyczne, Białystok, 2000.
- [139] Katalog firmy Eltrim przewody do linii napowietrznych, Ruszkowo, 2017.
- [140] Zalecenie Rady z 12 lipca 1999 r. w sprawie ograniczania ekspozycji ludności w polach elektromagnetycznych (0 Hz do 300 GHz) 1999/519/EC.
- [141] Katalog słupów i fundamentów linii 220 kV. Praca zbiorowa, BSiPE Energoprojekt Kraków S.A., Kraków, 1995.
- [142] Katalog słupów i fundamentów linii 400 i 750 kV. Praca zbiorowa, BSiPE Energoprojekt Kraków S.A., Kraków, 1995.
- [143] Elghaffar A., Elbaset Adel A., Mathematical calculation of electromagnetic Field In High Voltage Substation, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2016, No. 14, s.139-146.
- [144] Katalog słupów 110 kV, Enprom, 2018.
- [145] Banach J., Molisz W., Seidler J., Metody rozwiązywania zadań optymalizacji, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
- [146] Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977.
- [147] Katalog izolatorów kompozytowych produkcji FCI Furukawa Composite Insulator Ltd., ELTEL Networks Olsztyn, 2003.