

**INSTYTUT ENERGOELEKTRYKI
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

**Pomiarowa i obliczeniowa identyfikacja
rozkładu pól elektromagnetycznych
wytwarzanych przez wielotorowe, wielonapięciowe
linie elektroenergetyczne**

Rozprawa doktorska
mgr inż. Marcin Habrych

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Wróblewski

**Politechnika
Wrocławska**



Wrocław 2006

SPIS TREŚCI

Ważniejsze oznaczenia i skróty użyte w rozprawie.....	3
1. Wstęp.....	4
1.1. Wprowadzenie.....	4
1.2. Cel, zakres i teza rozprawy.....	8
2. Pola elektromagnetyczne w środowisku człowieka.....	11
2.1. Wielkości charakteryzujące pole elektromagnetyczne.....	11
2.2. Źródła pól elektromagnetycznych.....	15
2.3. Charakterystyka oddziaływania linii elektroenergetycznych na środowisko.....	17
2.4. Wpływ pola elektromagnetycznego na organizm człowieka.....	19
2.5. Normy, przepisy i zalecenia dotyczące ochrony przed wpływem pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz.....	22
3. Wielotorowe, wielonapięciowe linie wysokiego napięcia.....	27
3.1. System elektroenergetyczny Polski i Europy.....	27
3.2. Czterotorowa linia elektroenergetyczna W.N. relacji Plewiska – Ostrów.....	33
4. Metody obliczania pól elektromagnetycznych.....	37
4.1. Równania podstawowe opisujące pole elektromagnetyczne.....	37
4.2. Warunki graniczne.....	38
4.3. Metody rozwiązywania zagadnień brzegowych.....	39
4.3.1. Metoda rozdzielania zmiennych.....	39
4.3.2. Metoda przekształceń całkowitych.....	39
4.3.3. Metoda różnic skończonych.....	40
4.3.4. Metoda elementów skończonych.....	41
4.3.5. Wykorzystanie metody odbić zwierciadlanych i superpozycji w obliczeniach pola elektromagnetycznego pod liniami WN.....	43
5. Pomiarowa identyfikacja rozkładu pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii wysokiego napięcia.....	50
5.1. Metodyka prowadzenia pomiarów.....	50
5.2. Charakterystyka użytych mierników.....	52
5.3. Badanie rozkładów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 110 kV..	57
5.4. Badanie rozkładów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 220 kV..	67
5.5. Badanie rozkładów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 400 (380) kV.....	73
5.6. Podsumowanie wyników pomiarów.....	79

6. Komputerowa identyfikacja rozkładu pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii wysokiego napięcia.....	85
6.1. Przegląd istniejącego oprogramowania do obliczeń pola elektromagnetycznego.....	85
6.2. Program MAH.....	91
6.2.1. Bazy danych w programie.....	91
6.2.2. Moduł obliczania parametrów przęsła.....	93
6.2.3. Moduł obliczania natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.....	98
6.2.4. Weryfikacja opracowanych algorytmów obliczeniowych.....	101
7. Obliczenia rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami WN w programie MAH.....	115
7.1. Optymalizacja rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami 2-torowymi...	115
7.2. Optymalizacja rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami 4-torowymi...	120
7.3. Przykład obliczeń dopuszczalnego czasu przebywania pracowników w pobliżu linii WN podczas wykonywania prac pod napięciem.....	128
7.4. Wyznaczanie natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii.....	133
8. Podsumowanie rezultatów pracy.....	137
9. Wnioski końcowe.....	139
Bibliografia.....	141
Załącznik 1. Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami o napięciu 110 kV.....	147
1.1. Linia S-410 relacji GPZ Polkowice – GST-3 Rudna Główna.....	147
1.2. Linia S-400 relacji Polkowice – kopalnia Lubin Zachodni.....	148
1.3. Linia S-406 relacji Rudna Zachodnia – Komorniki.....	150
1.4. Linia S-125, S-126 relacji Pasikurówice – Wrocław.....	151
1.5. Czterotorowa linia relacji Urberach – Münster.....	156
Załącznik 2. Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami o napięciu 220 kV.....	160
2.1. Linia D-206 relacji Klecina – Świebodzice.....	160
Załącznik 3. Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami o napięciu 400 kV.....	168
3.1. Linia 4-0-03 relacji Pasikurówice – Ostrów.....	168
3.2. Czterotorowa linia relacji Urberach – GroBkrotzenburg (Niemcy)....	174

Ważniejsze oznaczenia i skróty użyte w rozprawie

B - indukcja magnetyczna

D - indukcja elektryczna

F - siła

E - natężenie pola elektrycznego

E_x, E_y - składowa pozioma i pionowa wektora natężenia pola elektrycznego

H - natężenie pola magnetycznego

H_x, H_y - składowa pozioma i pionowa wektora natężenia pola magnetycznego

I - natężenie prądu

J - gęstość prądu

$L1, L2, L3$ - oznaczenia faz linii

U - napięcie

P - macierz współczynników potencjalnych

PPN - praca pod napięciem

S - gęstość mocy

WN - wysokie napięcie

a - rozpiętość przęsła

a_p - rozpiętość przelomowa przęsła

f - częstotliwość sieci, zwis przewodu

g_p - ciężar jednostkowy przewodu

g_{p+s} - ciężar jednostkowy przewodu z sadzią

m - mimośród

u_x, u_y - wektory jednostkowe wzdłuż osi poziomej i pionowej

q - ładunek

t - temperatura

v - prędkość

y, h - wysokość

Φ - strumień indukcji magnetycznej

Ψ_w, Ψ_i - kąty (fazy) początkowe wektora napięcia i prądu

α - współczynnik wydłużenia cieplnego przewodu

β - współczynnik wydłużenia sprężystego przewodu

δ - naprężenie przewodu

ε - przenikalność elektryczna ośrodka

λ - długość fali

μ - przenikalność magnetyczna ośrodka

τ - gęstość liniowa ładunku

ω - pulsacja

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień z zakresu szeroko rozumianej elektroenergetyki, obejmujących oddziaływania pola elektromagnetycznego na środowisko, w tym na organizm człowieka. Jednym z ubocznych skutków rozwoju techniki jest bowiem wzrost intensywności szkodliwego oddziaływania sztucznych pól elektromagnetycznych w środowisku życia i pracy człowieka. Zależnie od charakteru pracy, czasu i sposobu użytkowania w życiu codziennym i zawodowym urządzeń elektrycznych, codzienna „dawka” pola elektromagnetycznego może być nadmiernie duża. Człowiek styka się bowiem w swoim środowisku z całym zakresem (tzw. widmem) częstotliwości pola elektromagnetycznego. Najczęściej narażony jest jednak na pola elektromagnetyczne o częstotliwości sieciowej (50 Hz), które występują wokół instalacji elektrycznych, domowych urządzeń elektrycznych, a także obiektów i urządzeń elektroenergetycznych i przemysłowych.

Elektrownie, linie przesyłowe najwyższych napięć, linie przesyłowo-rozdzielcze, a także stacje elektroenergetyczne składają się na tzw. system elektroenergetyczny, którego zadaniem jest wytworzenie energii elektrycznej oraz przesłanie jej z poszczególnych elektrowni do odbiorców. Eksploatacja tego systemu może być przyczyną występowania pewnych uciążliwości dla środowiska. Zaliczyć do nich można emisję do środowiska czynników szkodliwych, powstanie pewnej ilości odpadów, hałas, zakłócenia radioelektryczne, a przede wszystkim pole elektromagnetyczne [1].

Jednym z głównych źródeł pól elektromagnetycznych są powszechnie występujące w środowisku linie elektroenergetyczne. Na szczególną uwagę zasługują linie przesyłowe wysokiego napięcia, ze względu na ich powszechność w każdym praktycznie krajobrazie oraz na fakt generowania przez nie pól o znaczących wartościach.

Od kilkunastu lat w środkach masowego przekazu pojawiają się doniesienia o niekorzystnym oddziaływaniu pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez urządzenia elektroenergetyczne na organizm człowieka. Niestety, wiele z przekazywanych społeczeństwu informacji, w tej trudnej problematyce, jest nieprawdziwych, a głównym celem szeregu publikacji jest, jak się wydaje, chęć wywołania sensacji. Chociaż aktualna wiedza na temat efektów biologicznych występujących w ekspozycji polem elektromagnetycznym jest dość obszerna, to wyniki badań mechanizmu interakcji pole elektromagnetyczne – organizmy żywe są co najmniej skromne. Aktualnie realizowane programy badawcze, obejmujące przede wszystkim badania epidemiologiczne, dają nadzieję na uzyskanie interesujących i jednoznacznych wyników.

Rozwiązanie tych zagadnień nabiera coraz bardziej istotnego znaczenia ze względu na konieczność ciągłej rozbudowy systemu elektroenergetycznego, której nie można uniknąć, bowiem poważnym problemem, który występuje przy przesyłach prądu

przemienne są ograniczone zdolności przesyłowe linii w stosunku do potrzeb. O ważności i znaczeniu tego zagadnienia może świadczyć fakt, iż zwiększanie przepustowości istniejących linii było jednym z najważniejszych tematów omawianych podczas obrad CIGRE w 1998 roku [2]. Ze względu na ograniczenia przesyłowe Polska eksportuje dużo mniej energii elektrycznej, niż jej zdolność wytwórcza. Ogromne trudności z uzyskaniem zezwoleń pod budowę nowych linii na terenach gęsto zaludnionych powodują, że szuka się sposobów zwiększenia przesyłu istniejącymi liniami najwyższych napięć. Jednocześnie wzrasta presja na ograniczenie dopuszczalnych wartości pól elektrycznych i magnetycznych w otoczeniu istniejących i nowobudowanych linii przesyłowych. Intensywność występowania poszczególnych składowych pola elektromagnetycznego w środowisku jest kontrolowana i w niektórych przypadkach podlega ograniczeniom na tyle, na ile uzasadnia to obecny stan wiedzy dotyczącej oddziaływania pól elektromagnetycznych na człowieka, a także możliwości techniczne.

W niektórych sytuacjach, wobec wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną, korzystnym rozwiązaniem jest przebudowa istniejących linii napowietrznych na linie wielotorowe, wielonapięciowe. Linie takie eksploatowane są w Europie Zachodniej od wielu już lat. Natomiast w Polsce prace mające na celu przebudowę niektórych, najbardziej wyeksploatowanych linii 220 kV na układ czterotorowy, dwunapięciowy wchodzi dopiero w fazę przygotowania studialnego. Warto przy tym podkreślić, że przy przebudowie istniejących linii 220 kV na linie wielotorowe, dwunapięciowe wykorzystuje się trasę istniejącej linii, która wpisała się już w okoliczny krajobraz.

Obecnie budowany jest w Polsce pierwszy odcinek czterotorowej, dwunapięciowej linii (2x220 kV + 2x400 kV) o długości 36 kilometrów, która wykorzystuje trasę istniejącej linii 220 kV (Plewiska – Konin) [3]. Procedura lokalizacyjna tej linii została do chwili obecnej skutecznie oprotestowana przez mieszkańców gminy Kórnik, którzy założyli stowarzyszenie proekologiczne „LASEM 1000”. Z „obawy o swoje zdrowie i życie” walczą oni z inwestorem, którym są Polskie Sieci Elektroenergetyczne, o przesunięcie spornej linii jak najdalej od ich zabudowań. W społeczeństwie utrzymuje się bowiem przeświadczenie o szkodliwym oddziaływaniu pola elektromagnetycznego, generowanego przez linie wysokiego napięcia na organizm człowieka. Od 1979 roku, kiedy to pojawiła się pierwsza epidemiologiczna praca N. Wertheimera i E. Leepera [4], w której autorzy stwierdzili zwiększone ryzyko zachorowań na białaczkę u dzieci mieszkających w domach o wyższej od przeciętnej wartości natężenia pola magnetycznego, opublikowano prawie dwieście oryginalnych prac poświęconych badaniom i ocenie ryzyka zachorowania na nowotwory u osób narażonych na działanie pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz [5]. Wyniki badań nie są jednak jednoznaczne, gdyż zwiększone ryzyko zachorowań na nowotwory stwierdzono w niespełna 40 % analiz, przy braku potwierdzenia występowania takiego ryzyka w pozostałych 60 % badań. Jak widać nie ma dotychczas jednoznacznej odpowiedzi na pytanie,

czy pole elektromagnetyczne o częstotliwości sieciowej i poziomach natężeń emitowanych przez urządzenia elektryczne, lub system elektroenergetyczny wpływa negatywnie na zdrowie człowieka. Nie dziwi więc fakt, że badania w tym zakresie są nadal prowadzone w wielu placówkach naukowo-badawczych na świecie.

Mimo braku jednoznacznego poglądu odnośnie mechanizmów oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizmy żywe, z uwagi na istnienie potencjalnego zagrożenia środowiska naturalnego, wiele krajów, w tym także Polska, wprowadziło zalecenia lub przepisy ograniczające możliwość ekspozycji na pola elektromagnetyczne występujące w środowisku. W centrum uwagi znalazły się przy tym linie przesyłowe najwyższych napięć, jako obiekty obejmujące swym zasięgiem znaczne obszary terenu, na którym może przebywać wiele osób, nawet przez bardzo długi czas [6].

Wyznaczanie rozkładu i wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii wysokiego napięcia ma na celu stwierdzenie, czy analizowana linia spełnia wymagania norm i przepisów, przede wszystkim dotyczących ochrony środowiska. Rozkład pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii napowietrznych można określić poprzez:

- pomiary w obiektach rzeczywistych,
- badania modeli obiektów rzeczywistych,
- obliczenia.

Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych wykonuje się najczęściej przy sporządzaniu tzw. dokumentacji ekologicznej. Jednym z najważniejszych celów tych opracowań jest przeanalizowanie możliwości negatywnego oddziaływania na środowisko eksploatowanej linii napowietrznej wysokiego napięcia, w tym oddziaływania pola elektromagnetycznego. Konieczne jest więc wykonanie pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego i wyznaczenie największej spodziewanej jego wartości, która wystąpi przy najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonuje się przy określonych warunkach pracy linii (określone napięcie robocze, obciążenie i zwis linii), w których praktycznie nigdy nie należy spodziewać się maksymalnych wartości, zarówno natężenia pola elektrycznego E , natężenia pola magnetycznego H , jak i występowania obszaru ograniczonego użytkowania (wg [6] obszaru w którym $E > 1 \text{ kV/m}$ i), w którym zabroniona jest zabudowa mieszkaniowa [6]. Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wystąpią bowiem w sytuacji, w której odległości przewodów roboczych linii od ziemi będą najmniejsze oraz gdy obciążenie i napięcie linii przyjmie wartości maksymalne (dla linii 1 i 2-torowych). W przypadku linii o liczbie torów większej od 2, w których dolne tory mogą (w pewnych przypadkach) kompensować pole elektromagnetyczne generowane przez górne tory, dla zidentyfikowania wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego należy przeanalizować wszystkie przypadki wyłączeń jednego, lub nawet

kilku torów linii. W takiej sytuacji wartości zmierzone w określonych warunkach pracy linii należy przeliczyć, zgodnie z rozporządzeniem [6], na wartości maksymalne, co w przypadku linii wielotorowych staje się istotnym problemem. Do tego celu wykorzystuje się najczęściej specjalistyczne programy komputerowe służące do wyznaczania rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia.

Inną metodą wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego wokół linii i obiektów elektroenergetycznych jest badanie modeli obiektów rzeczywistych. Obecnie metoda ta, ze względu na jej pracochłonność, duże koszty i małą dokładność, jest rzadko stosowana.

Zastosowanie obliczeń (najczęściej z użyciem technik komputerowych) do wyznaczenia rozkładu pola elektromagnetycznego jest elementem niezbędnym przy projektowaniu i budowie napowietrznych linii wysokiego napięcia. Obliczenia są wykorzystywane również do identyfikacji rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu eksploatowanych linii. Służą one przede wszystkim do wyznaczenia wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz pasa obszaru ograniczonego użytkowania w którym natężenie pola elektrycznego przekracza wartość 1 kV/m. Obliczeniowe wyznaczenie pasa, w którym $E > 1$ kV/m, jest zagadnieniem skomplikowanym. Wymaga bowiem przeprowadzenia obliczeń praktycznie we wszystkich przęsłach linii przebiegających nad terenami, w których miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego dopuszcza realizację budownictwa mieszkalnego.

Na rynku dostępnych jest wiele programów do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia (np.: B-fast, Electrican, Resicalc, ACDCLINE, SPOT, ...). Są to jednak programy napisane kilka lat temu, które nie uwzględniają aktualnych wymagań technicznych i rynku. Większość z tych programów umożliwia obliczenie rozkładu pola elektromagnetycznego co najwyżej pod liniami dwutorowymi, natomiast w Polsce, jak już wcześniej wspomniano, w najbliższym czasie planuje się budowę linii czterotorowych, a na świecie eksploatowane są linie nawet sześciotorowe.

W ostatnim czasie pojawił się na polskim rynku program RPLN, przeznaczony do obliczania rozkładu pola pod czterotorowymi liniami wysokiego napięcia. Jego przydatność praktyczna nie jest jednak w pełni określona, gdyż nie został on dotychczas zweryfikowany wynikami badań empirycznych. Jak przyznają jego autorzy, model matematyczny, którym się posłużyli tworząc ten program w środowisku Windows, sprawdzili jedynie tym samym modelem, z tym tylko, że zapisanym w programie MathCad [7]. Program RPLN oparty jest na metodzie odbicia zwierciadlanego i superpozycji. W metodzie tej korzysta się z założenia, że przewód przedstawiony w postaci krzywej hiperbolicznej można zastąpić przewodem prostoliniowym nieskończenie długim, umieszczonym na wysokości odpowiadającej rzeczywistej wysokości przewodu w danym punkcie przęsła (co wprowadza błędy do obliczeń). Metoda odbicia lustrzanego i superpozycji nie uwzględnia również elementów

otoczenia (słupy elektroenergetyczne, drzewa, zabudowania, płoty), które wpływają na rozkład pola elektromagnetycznego. Wszystkie te uproszczenia powodują, że pole elektromagnetyczne jest w tej metodzie obliczane z pewnymi błędami. Nasuwa się więc pytanie, czy suma błędów pochodzących od dużej liczby przewodów (dla linii 4-6 torowych) nie będzie tak duża, że wykluczy to praktyczną przydatność tej metody w zastosowaniach do obliczeń natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami wielotorowymi, wielonapięciowymi.

1.2. Cel, zakres i teza rozprawy

Zasadniczym celem niniejszej pracy było opracowanie matematyczno-fizycznego modelu rozkładu pola elektroenergetycznego powstającego w otoczeniu wielotorowych, wielonapięciowych linii wysokiego napięcia oraz opartego na nim programu komputerowego, pozwalającego na oszacowanie narażenia na oddziaływanie tego pola ludności, przebywającej w pobliżu takich linii oraz pracowników wykonujących na nich prace pod napięciem. Weryfikację uzyskanych rezultatów obliczeń i symulacji oraz ocenę przydatności praktycznej opracowanego modelu i programu komputerowego przeprowadzono na podstawie wyników obszernych badań empirycznych przeprowadzonych w reprezentatywnych obiektach rzeczywistych. Dalszym celem pracy było też opracowanie praktycznych wniosków dotyczących wytycznych budowy wielotorowych, wielonapięciowych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na terenie Polski, w szczególności rozmieszczania przewodów fazowych na słupach, tak, by linie te nie powodowały przekroczenia maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, określonych w polskich przepisach. Celem pracy było również uzupełnienie braku w polskojęzycznej literaturze opracowań na temat technicznych możliwości przebudowy wyeksploatowanych linii wysokiego napięcia na nowe linie wielotorowe, wielonapięciowe wykorzystujące trasę istniejącej linii.

W oparciu o przeprowadzoną analizę literaturową zagadnień związanych z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego generowanego przez linie wysokiego napięcia na środowisko, po uwzględnieniu wyników wstępnych analiz wpływu konfiguracji przewodów w linii na rozkład pola elektromagnetycznego i rozpoznaniu potencjalnych możliwości symulacyjno-obliczeniowych, sformułowano następującą tezę pracy:

Istnieje możliwość i celowość opracowania matematyczno-fizycznego modelu rozkładu pola elektromagnetycznego powstającego w otoczeniu wielotorowych, wielonapięciowych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia oraz opartej na nim metody prognozowania i optymalizacji tego rozkładu.

Wykazanie prawdziwości tej tezy i osiągnięcie zamierzonego celu rozprawy wymagało realizacji następujących zadań i rozwiązania następujących problemów:

- a) przeglądu literatury z zakresu oddziaływania napowietrznych linii elektroenergetycznych najwyższych napięć na środowisko oraz zapoznania się z modelami matematycznymi rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych,
- b) przeglądu i oceny przydatności praktycznej poszczególnych programów komputerowych służących do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych,
- c) pomiarowej identyfikacji rozkładu pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii elektroenergetycznych eksploatowanych na terenie kraju oraz za granicą,
- d) opracowania modelu matematyczno-fizycznego, metody i programu komputerowego do wyznaczania rozkładu pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez wielotorowe, wielonapięciowe linie wysokiego napięcia,
- e) dokonania weryfikacji opracowanego programu komputerowego wynikami badań empirycznych pozwalających na ocenę jego wiarygodności, efektywności i przydatności praktycznej,
- f) wykonania obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod wielotorowymi liniami wysokiego napięcia w celu opracowania wytycznych projektowania słupów w aspekcie optymalizacji rozkładu pola elektromagnetycznego pod tego typu liniami.

Podczas realizacji zadań wynikających z celu rozprawy wykorzystano między innymi rezultaty analiz oraz wyniki przeprowadzonych przez autora badań opublikowane w materiałach konferencyjnych [8÷12] i czasopismach naukowo-technicznych [13÷18].

W **rozdziale 1**, stanowiącym wprowadzenie do rozprawy, określono problematykę pracy, uzasadniono wybór tematu, sformułowano tezę rozprawy i wymieniono najważniejsze zadania niezbędne do ich realizacji.

Rozdział 2 zawiera wielkości charakteryzujące pole elektromagnetyczne oraz charakterystykę oddziaływania linii elektroenergetycznych na środowisko. Skrótowo przedstawiono w nim również obecny stan wiedzy na temat skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka. Zaprezentowano obowiązujące w Polsce przepisy dotyczące ochrony przed wpływem pola elektromagnetycznego i porównano je z przepisami obowiązującymi w innych krajach oraz z zaleceniami różnych międzynarodowych organizacji zajmujących się tym zagadnieniem.

W **rozdziale 3** scharakteryzowano system elektroenergetyczny w Polsce i w Europie. Zaprezentowano również plany rozbudowy systemu elektroenergetycznego Polski oraz korzyści wynikające z przebudowy istniejących linii wysokiego napięcia na system wielotorowy, wielonapięciowy.

W **rozdziale 4** zaprezentowano metody rozwiązywania zagadnień brzegowych oraz podstawowe równania opisujące pole elektromagnetyczne. Szczegółowo opisano metodę

odbić zwierciadlanych i superpozycji, na której oparto program komputerowy MAH do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia, którego opracowanie było jednym z celów niniejszej pracy.

W **rozdziale 5** przedstawiono metodykę prowadzenia pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami elektroenergetycznymi, scharakteryzowano mierniki użyte podczas pomiarów oraz przedstawiono wyniki uzyskane z pomiarów pod liniami wysokiego napięcia eksploatowanymi na terenie kraju i Niemiec.

Rozdział 6 zawiera krytyczny przegląd dostępnych programów komputerowych do obliczeń natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami wysokiego napięcia. Przedstawiono w nim także, napisany w ramach niniejszej pracy, program MAH, który umożliwia identyfikację pola elektromagnetycznego pod wielotorowymi, wielonapięciowymi liniami WN oraz zamieszczono wyniki weryfikacji poprawności opracowanej metody obliczeniowej.

W **rozdziale 7** przedstawiono analizę wpływu wzajemnego usytuowania przewodów fazowych w wielotorowych liniach wysokiego napięcia na rozkład pola elektromagnetycznego. Opisano ideę wzajemnego usytuowania przewodów fazowych dla różnego typu linii w celu optymalizacji wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod tymi liniami. Wykonano również obliczenia pola elektromagnetycznego na jakie narażeni są pracownicy wykonujący prace pod napięciem na wielotorowych liniach wysokiego napięcia oraz określono warunki najbardziej niekorzystne pracy linii wielotorowych, w których należy identyfikować wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

W **rozdziale 8** zamieszczono podsumowanie pracy, w **rozdziale 9** zawarto wnioski końcowe rozprawy, a w **rozdziale 10** umieszczono wykaz literatury cytowanej w rozprawie.

Uzupełnieniem pracy są 3 załączniki zawierające wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych pod liniami elektroenergetycznymi o wszystkich możliwych poziomach napięć występujących w kraju, jak i pod dwoma liniami wielotorowymi (w tym pod linią wielotorową, wielonapięciową) eksploatowanymi na terenie Niemiec. Wyniki te stanowią cenny materiał empiryczny, który wykorzystano do weryfikacji przedstawionych w pracy ustaleń teoretycznych i który może być też użyteczny w innych analizach, także prowadzonych z innych punktów widzenia.

2. Pola elektromagnetyczne w środowisku człowieka

2.1. Wielkości charakteryzujące pole elektromagnetyczne

Wszystkie urządzenia elektryczne wytwarzają w swoim otoczeniu pola elektromagnetyczne, które powstają na skutek obecności napięcia (pole elektryczne – E [V/m]) oraz w wyniku przepływu prądu (pole magnetyczne – H [A/m]). Pole elektryczne jest opisywane przez siłę F działającą na nieruchomy ładunek q umieszczony w danym punkcie, czyli przez natężenie pola elektrycznego E

$$E = \frac{F}{q}, \quad (2.1)$$

a pole magnetyczne jest opisywane przez siłę działającą na ruchomy ładunek q znajdujący się w danym punkcie

$$F = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.2)$$

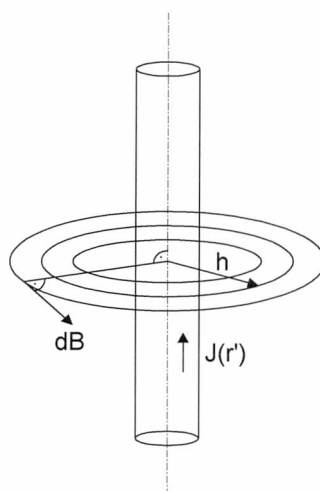
gdzie: $\mathbf{v}$ – prędkość ładunku q , $\mathbf{B}$ – wektor indukcji magnetycznej.

Pole magnetyczne składa się z dwóch wektorów: wektora indukcji magnetycznej $\mathbf{B}$ [T] oraz wektora natężenia pola magnetycznego $\mathbf{H}$. Wektory te zależą od prądów, które są źródłem pola. Prądy płynące w obiekcie materialnym dzieli się na związane i swobodne. Wektor $\mathbf{B}$ związany jest z prądem całkowitym (sumą prądów związanych i swobodnych), natomiast wektor $\mathbf{H}$ jedynie z prądem swobodnym. W przypadku próżni (a praktycznie również w powietrzu), w której nie ma ładunków związanych, istnieje pomiędzy tymi wektorami ścisły związek

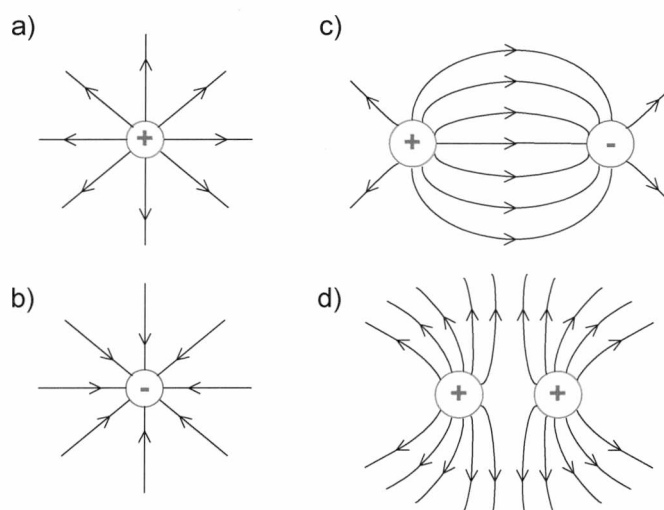
$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}, \quad (2.3)$$

gdzie μ_0 jest przenikalnością magnetyczną bezwzględną próżni, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$.

W celu wizualizacji pola elektromagnetycznego Faraday wprowadził pojęcie linii pola. Zbiór linii pola daje bowiem jego obraz. W przypadku pola magnetycznego, jego linie są ciągłe – są okręgami z ładunkiem lub przewodnikiem w środku i nie mają ani początku, ani końca (rys.2.1), w przeciwieństwie do linii pola elektrycznego (rys.2.2), które mają swój początek na elementach naładowanych ładunkiem dodatnim, a koniec na elementach z ładunkiem ujemnym.



Rys.2.1. Linie sił pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem



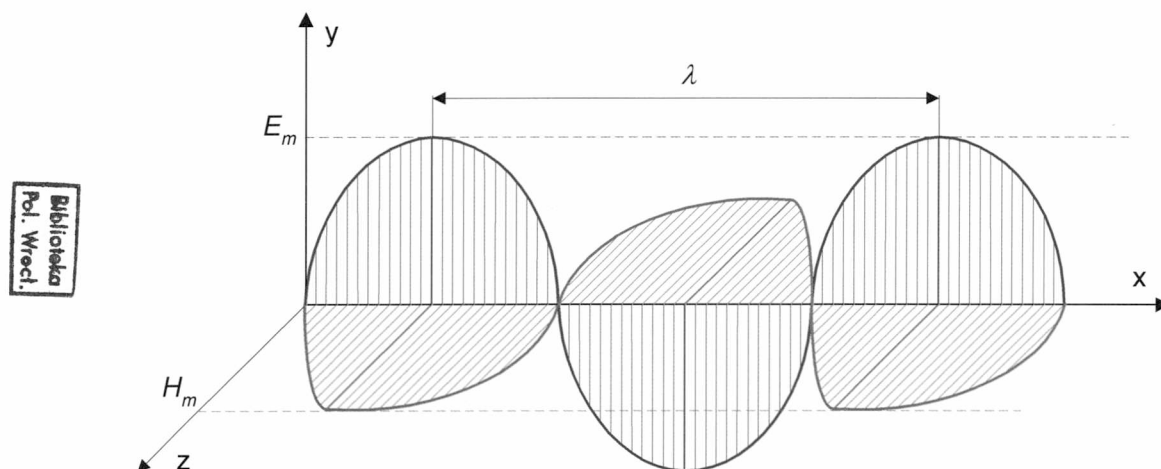
Rys.2.2. Obrazy pola elektrycznego: a) pojedynczego ładunku dodatniego; b) pojedynczego ładunku ujemnego; c) dwóch ładunków różnoimiennych; d) dwóch ładunków jedomiennych

Jak wcześniej stwierdzono źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne, a pola magnetycznego prądy elektryczne (poruszające się ładunki elektryczne). Istnieje również inny sposób wytwarzania tych pól. Michael Faraday jako pierwszy stwierdził, że zmienne pole magnetyczne powoduje powstanie pola elektrycznego – prawo indukcji Faradaya. Prawo to często zapisuje się korzystając z pojęcia strumienia magnetycznego (strumień magnetyczny to liczba linii indukcji magnetycznej przechodzących przez daną powierzchnię, a dokładnie iloczyn pola tej powierzchni i składowej wektora $\mathbf{B}$ prostopadłej do powierzchni). W postaci całkowitej strumień indukcji magnetycznej przechodzący przez powierzchnię S wynosi

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}, \quad (2.4)$$

gdzie $\mathbf{a}$ jest wektorem jednostkowym powierzchni S . Analogiczną definicję strumienia można przedstawić dla każdego wektora pola, np. elektrycznego.

Prawo Faradaya i uzupełnione przez Maxwella prawo Ampera (związek pomiędzy prądem i wytwarzanym przezeń polem magnetycznym uzupełniony o prąd przesunięcia, tj. prędkość zmian pola elektrycznego) pozwala zrozumieć powstawanie i rozprzestrzenianie się promieniowania magnetycznego. Jeżeli gdzieś w przestrzeni istnieje jedno z pól, np. magnetyczne, to gdy zacznie się ono zmieniać (maleć), spowoduje to powstanie pola elektrycznego, a zmniejszające się pole elektryczne spowoduje powstanie pola magnetycznego. Wielkość powstającego pola elektrycznego zależy od szybkości zmian pola magnetycznego. Maxwell udowodnił, że pola te oddziałują między sobą w ten sposób, że kiedy zanika pole, nowe pole jest wytwarzane nieco dalej. W pewnej odległości od źródła impuls ten przemieszcza się w przestrzeni ze skończoną prędkością równą prędkości światła i nazywany jest promieniowaniem elektromagnetycznym. Rozprzestrzeniające się z prędkością światła pola elektryczne i magnetyczne spełniają wszystkie warunki ruchu falowego. Jeżeli źródło promieniowania będzie miało charakter oscylacyjny, to wektory natężenia pola elektrycznego i magnetycznego będą się zmieniały w czasie (rys.2.3).



Rys.2.3. Obraz fali elektromagnetycznej; E_m , H_m – wartości maksymalne pola odpowiednio elektrycznego i magnetycznego, λ - długość fali

O fali można jednak mówić wtedy, gdy stosunek wektorów E i H jest stały i równy tzw. oporowi falowemu próżni (377Ω), a oba te wektory są wzajemnie prostopadłe. Te warunki są spełnione w pewnej odległości od źródła (dla promieniowania o częstotliwości 1 GHz fala elektromagnetyczna powstaje w odległości około 30 cm od źródła, dla promieniowania o częstotliwości 1 MHz fala elektromagnetyczna powstaje w odległości około 300 m od źródła, dla 1 kHz – 300 km, natomiast dla najczęściej występującego w naszym otoczeniu promieniowania 50 Hz w odległości około 6000 km od źródła). Obszar w otoczeniu źródła w zależności od charakteru pola dzieli się na:

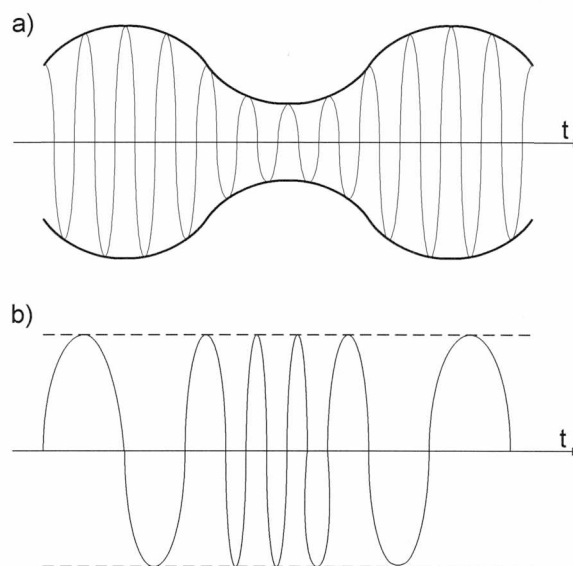
- pole bliskie (strefa bliska), które dzieli się na dwa podobszary: strefę indukcji, w której energia pola przepływa między polem a źródłem (nie ma promieniowania) i strefę bliską promieniowania (pola elektryczne i magnetyczne

nie tworzą fali). W zależności od wartości stosunku E/H można podzielić pole bliskie na pola wielkiej i małej (niekiedy również średniej) impedancji,

- pole dalekie (strefa promieniowania), gdzie pole elektryczne i magnetyczne tworzą falę elektromagnetyczną.

Przedstawiona na rys.2.3 fala elektromagnetyczna ma charakter ciągłej fali monochromatycznej, tzn. źródło pola drga nieprzerwanie ze stałą częstotliwością i amplitudą. W praktyce bardzo często stosowane są źródła wytwarzające falę modulowaną, czyli taką w której jeden z jej parametrów jest zmienny (rys.2.4). Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje modulacji:

- amplitudową – amplituda drgań źródła pola zmienia się okresowo (rys.2.4a). Rodzajem modulacji amplitudowej jest modulacja impulsowa (w ruchu oscylacyjnym źródła występują okresowe przerwy),
- częstotliwościową – okresowo zmienia się częstotliwość drgań źródła pola (rys.2.4b).



Rys.2.4. Rodzaje modulacji fali elektromagnetycznej: a) modulacja amplitudowa, b) modulacja częstotliwości

Z definicji pola elektrycznego i magnetycznego wynika, że jest w nich zmagazynowana energia, odpowiednio elektryczna i magnetyczna (dla pola elektromagnetycznego nazwać ją można energią elektromagnetyczną). Energia ta, po zadziałaniu impulsu zapoczątkowującego promieniowanie, rozprzestrzenia się razem z tym impulsem w postaci rozszerzającej się kuli ze środkiem w miejscu zadziałania impulsu. Stosunek energii do powierzchni tej kuli (czyli gęstość energii) jest jednym z najważniejszych parametrów opisujących promieniowanie elektromagnetyczne. Pozwala on ocenić jaka część energii wypromieniowanej przez źródło dociera do danego punktu w przestrzeni. Wielkością służącą do charakteryzowania rozchodzenia się energii elektromagnetycznej jest gęstość mocy S [W/m^2] wyrażana przez iloczyn wektorowy $\mathbf{E}$ i $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (2.5)$$

W przypadku gdy mamy do czynienia z falą elektromagnetyczną, iloczyn wektorowy redukuje się do iloczynu skalarnego:

$$S = E \cdot H \quad (2.6)$$

W związku z powyższym, w strefie promieniowania łatwo jest wyznaczyć wartość gęstości mocy znając wartość tylko jednego z pól, korzystając z faktu, że w tym obszarze stosunek wartości E do H jest stały ($E/H = 377 \Omega$):

$$S = 377 \Omega \cdot H \quad \text{lub} \quad S = \frac{E^2}{377 \Omega}. \quad (2.7)$$

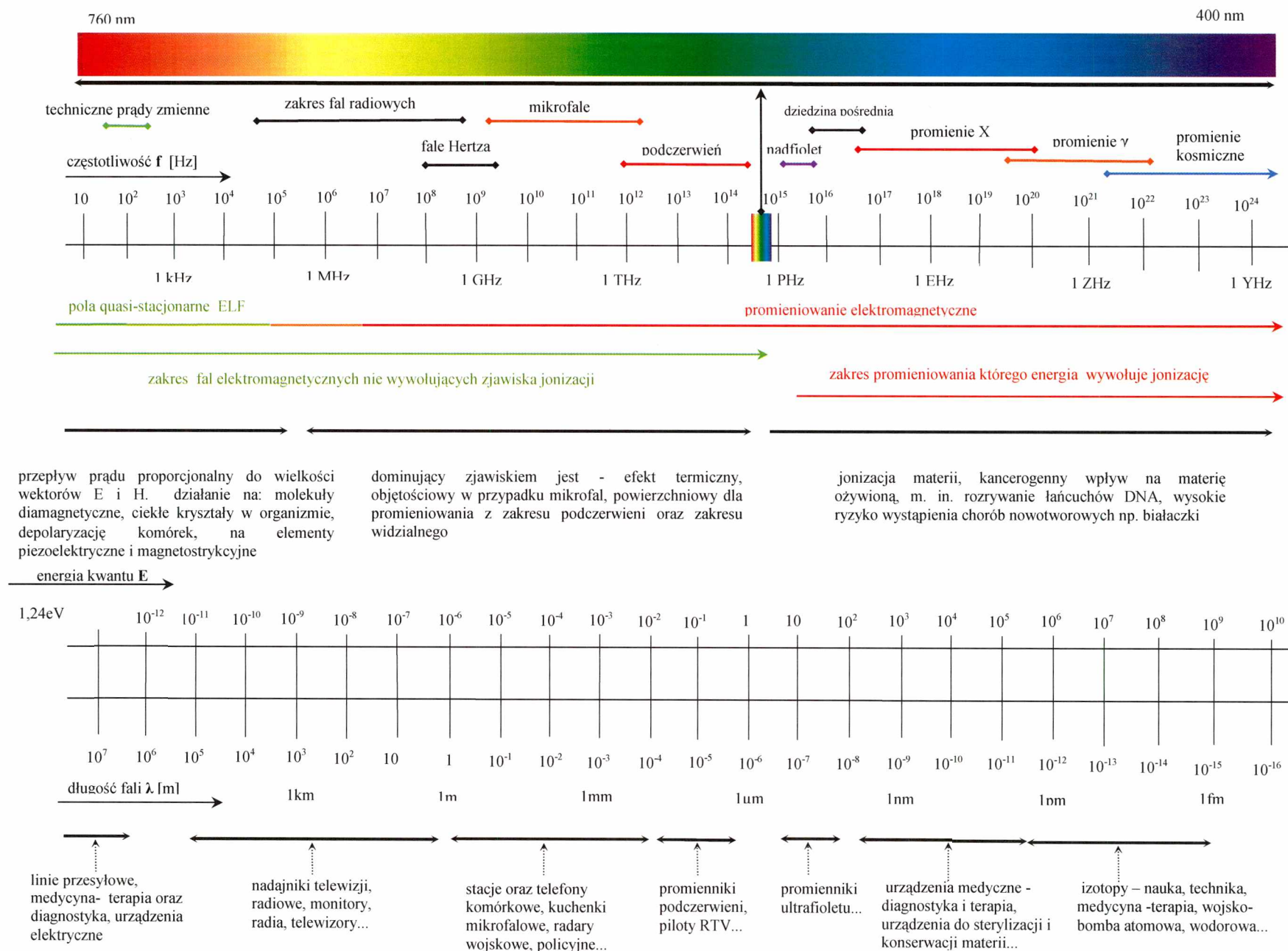
W polu bliskim nie ma takiej stałej zależności pomiędzy E i H , w związku z czym przy ocenie takich pól elektromagnetycznych konieczny jest pomiar obu jego składowych (pola elektrycznego i magnetycznego). Ma to miejsce dla pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz, występującego między innymi w otoczeniu linii wysokiego napięcia.

2.2. Źródła pól elektromagnetycznych

Pola elektromagnetyczne występujące w środowisku mogą oddziaływać na różne jego elementy, w tym na organizmy żywe. Mechanizm tych oddziaływań zależy od wielu czynników, przede wszystkim zaś od właściwości pola, które zmieniają się zależnie od jego częstotliwości [1].

Człowiek styka się w swoim środowisku z całym zakresem (tzw. widmem) częstotliwości pola elektromagnetycznego (rys 2.5). Należy zauważyć, że poza stałym polem magnetycznym Ziemi, wszystkie źródła pola elektromagnetycznego (np. linie przesyłowe, piece indukcyjne, nadajniki radiowe i telewizyjne, kuchnie mikrofalowe, urządzenia radarowe) są wytworem cywilizacji.

Interesujące, ze względu na swą powszechność, są przypadki powstawania pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz przy użytkowaniu energii elektrycznej, a w szczególności przypadki kiedy prądy i (lub) napięcia osiągają duże wartości. Prądy o dużych natężeniach występują przy takich procesach technologicznych jak spawanie, zgrzewanie, elektroliza. Z wysokimi napięciami można zetknąć się z kolei przy technice elektronowej czy filtrowaniu pyłów przemysłowych (elektrofiltry), a przede wszystkim przy przesyłach energii elektrycznej liniami napowietrznymi. Typowym przykładem źródła pola elektromagnetycznego, na które człowiek narażony jest najczęściej są instalacje elektroenergetyczne. Szczególne zainteresowanie budzą w tym względzie elektroenergetyczne linie napowietrzne wysokiego napięcia, gdyż stanowią źródło zarówno pola elektrycznego jak i składowej magnetycznej.



Rys.2.5. Widmo fal elektromagnetycznych [19]

Pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz mają całkowicie odmienny wpływ na środowisko niż pola o częstotliwościach wyższych, które przy częstotliwościach przekraczających 100 kHz rozchodzą się w przestrzeni w postaci fal elektromagnetycznych i nazywane są promieniowaniem elektromagnetycznym.

Pola elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości (powyżej 100 kHz) o znacznych wartościach generowane są przez urządzenia radiokomunikacyjne i radiolokacyjne. Występują one m.in. w otoczeniu radiowych i telewizyjnych anten nadawczych, a także anten stacji bazowych telefonii komórkowej. Generowanie i rozsył promieniowania elektromagnetycznego są w tym przypadku zamierzone.

Pola o częstotliwościach od 300 MHz do 300 GHz nazywane się promieniowaniem mikrofalowym. Promieniowanie to jest wytwarzane m.in. przez anteny nadajników radiowych i telewizyjnych, urządzenia radarowe, kuchnie mikrofalowe czy telefony komórkowe. Rozprzestrzenia się ono w otoczeniu bez większych trudności i może być pochłaniane przez ciało człowieka. Przy odpowiednio dużej energii tego promieniowania ciało człowieka ogrzewa się, a zjawisko to nosi nazwę efektu termicznego.

W przypadku pól elektromagnetycznych o częstotliwości do 10^{16} Hz można mówić o promieniowaniu niejonizującym, czyli rozchodzeniem się nierozdzielnie ze sobą związanych zmian pola elektrycznego i magnetycznego. Właściwości tego rodzaju pól, charakteryzowanych przez natężenie pola elektrycznego lub gęstość strumienia energii, sprawiają, że są one w stanie oddziaływać na obiekty fizyczne, nie powodując jonizacji materii. Natomiast pole elektromagnetyczne o częstotliwościach przekraczających 10^{16} Hz nazywa się promieniowaniem jonizującym, które oddziałując z materią powoduje powstanie w niej jonów. Naturalnymi źródłami promieniowania jonizującego jest promieniowanie kosmiczne oraz promieniowanie pochodzące od niektórych pierwiastków zawartych w skorupie ziemskiej, a sztucznymi źródłami promieniowania jonizującego jest przede wszystkim aparatura medyczna.

2.3. Charakterystyka oddziaływania linii elektroenergetycznych na środowisko

Linie napowietrzne wysokiego napięcia od wielu lat są powszechnym składnikiem otaczającego nas środowiska. Stanowią one jeden z głównych elementów systemu elektroenergetycznego, za pośrednictwem którego energia elektryczna dociera do poszczególnych odbiorców. Eksploatacja linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia może być jednak przyczyną występowania pewnych uciążliwości dla środowiska. Zaliczyć do nich można między innymi [1,20]:

- hałas,
- zakłócenia radioelektryczne,

- a przede wszystkim, pole elektromagnetyczne.

Czynna linia wysokiego napięcia stanowi źródło hałasu (szumu). Przebywając w pobliżu linii 110 kV, 220 kV lub 400 kV (szczególnie podczas deszczowej pogody) słyszymy charakterystyczne skwierczenie. Przyczyną tego efektu akustycznego jest ulot, czyli wyładowania niezupełne – przeskoki iskier elektrycznych, nie rozwijające się w pełne wyładowanie. Szczególnie intensywny ulot występuje w pobliżu słupów podporowych i na słupach, w których dochodzi do przeplatania przewodów, gdzie ze względów konstrukcyjnych konieczne jest stosowanie elementów o niedostatecznie gładkich krawędziach. Intensywność ulotu jest silnie związana z warunkami atmosferycznymi. Najintensywniejszy ulot obserwuje się podczas zamglenia i mżawki [21]. W przypadku stosowania w linii pojedynczych przewodów roboczych napięcie progowe ulotu zależy głównie od średnicy przewodu. Im średnica przewodu jest większa, tym łagodniejszy rozkład pola wokół niego i mniejszy ulot. Ponieważ jednak nie jest technicznie uzasadnione stosowanie odpowiednio dużych przekrojów, dlatego na liniach 400 kV i powyżej stosuje się przewody wiązkowe, wokół których pole elektryczne ma mniejsze natężenia. Ciekawostką jest także to, że ulot zależy też od wieku przewodów. Przewody nowe, świeżo wywieszone, mają intensywniejszy ulot ze względu na nieregularność powierzchni (chropowatość). Wraz z upływem czasu wyładowania niezupełne potęgają chemiczne oddziaływanie środowiska na przewody, powodując ich wygładzanie, przez co ulot staje się mniej intensywny.

Do negatywnych skutków ulotu należy zaliczyć również emitowanie zakłóceń radioelektrycznych, które mogą zakłócać odbiór audycji radiowych i telewizyjnych oraz pracę środków łączności i nawigacji. Należy jednak zaznaczyć, iż obecnie budowane linie nie są źródłem zakłóceń radioelektrycznych o istotnych poziomach.

Istotnym zjawiskiem towarzyszącym pracy linii elektroenergetycznych jest występowanie w ich otoczeniu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, które w niektórych sytuacjach mogą przyjmować znaczące wartości. Kontrowersje wobec obaw, że ekspozycja na działanie pól elektrycznych i magnetycznych stwarza biologiczne ryzyko dla ludzkiego zdrowia, spowodowały podjęcie szeroko zakrojonych badań przez wiele ośrodków naukowo-badawczych na całym świecie.

Przebieg tras linii wysokiego napięcia jest także w niektórych przypadkach krytykowany przez ornitologów, którzy dopatrują się w nich zagrożenia dla migracji ptaków. Szczególnie głośna była w kraju sprawa linii 400 kV Krosno – Lemieszany, która przebiega na długości około 9 kilometrów przez Jaśliski Park Krajobrazowy (Beskid Niski). Obszar ten zamieszkują 152 gatunki ptaków. Ornitolodzy zanotowali bardzo dużą liczbę przypadków śmiertelnych zderzeń ptaków z przewodami. W związku z tym, z inicjatywy ekologów i Polskich Sieci Elektroenergetycznych, zawieszono na przewodach odgromowych 141 sztuk atrap ptaków drapieżnych (w kolorach srebrnym i czerwonym) w odstępach od 50 do 200

metrów jedna od drugiej. Według opinii ornitologów rozmieszczenie takich atrap może zmniejszyć o 70 % liczbę śmiertelnych zderzeń ptaków z przewodami [21].

2.4. Wpływ pola elektromagnetycznego na organizm człowieka

W odniesieniu do pól elektromagnetycznych, których źródłem są między innymi linie napowietrzne najwyższych napięć, najczęściej stawianym pytaniem jest, czy przebywanie ludzi (głównie długotrwale) w pobliżu linii napowietrznej może mieć jakikolwiek wpływ na ich zdrowie. Pole elektryczne bezpośrednio pod linią wysokiego napięcia może przyjmować wartości do kilku kV/m, a w miejscach, gdzie mieszkają ludzie (kilkadziesiąt metrów od linii) jest z reguły znacznie słabsze niż 1 kV/m. W tych samych miejscach natężenie pola magnetycznego przyjmuje wartości od kilkunastu do kilkudziesięciu A/m, a w miejscach przebywania ludzi na ogół nie przekracza wartości 1 A/m. Wśród części ludzi przebywających blisko linii napowietrznych (np. zamieszkujących budynki zlokalizowane w sąsiedztwie linii) utrzymuje się przeświadczenie o szkodliwym oddziaływaniu wytwarzanego przez nie pola elektromagnetycznego na organizm człowieka. Nauka nie daje jednak jednoznacznych podstaw do stwierdzenia, że pola elektromagnetyczne o natężeniach występujących w otoczeniu układów przesyłowych mogą w zauważalny sposób wpłynąć na stan zdrowia przebywających tam ludzi. Wykazano, że pola elektryczne i magnetyczne bardzo niskich częstotliwości (50÷60 Hz) mogą powodować wystąpienie różnych zmian w organizmach żywych, ale zmiany takie pojawiają się tylko w ściśle określonych warunkach i po zadziałaniu pól o dużych intensywnościach, znacznie silniejszych niż te, z którymi można się zetknąć w pobliżu linii napowietrznych [5,22].

Od ponad 30 lat w laboratoriach na całym świecie wykonuje się bardzo wiele badań, w których różne preparaty biologiczne czy organizmy żywe (np. komórki roślinne i zwierzęce, hodowle tkankowe, rośliny, zwierzęta) umieszcza się w dobrze kontrolowanych polach elektrycznych lub magnetycznych o różnym natężeniu. Po określonym czasie bada się ewentualne zmiany w funkcjonowaniu tych organizmów. Prowadzi się także liczne badania medyczne i laboratoryjne ludzi pracujących w zasięgu silnych pól elektrycznych lub magnetycznych, a także wykonuje się obserwacje zdrowych ochotników poddanych działaniu takich pól. Osobną grupę stanowią badania epidemiologiczne, czyli ocena stanu zdrowia i zachorowalności (częstości występowania różnych chorób) w dużych grupach ludności lub pracowników poddanych działaniu pól elektromagnetycznych.

Wiedza o oddziaływaniu pól elektromagnetycznych na organizmy żywe i procesy życiowe stale się poszerza, przybywa nowych informacji biologicznych i medycznych. W miarę rozwoju tej wiedzy i powiększania bazy danych wyników badań naukowych zmieniają się też poglądy specjalistów na temat pożytecznych i szkodliwych skutków oddziaływania pól elektromagnetycznych na procesy życiowe. Bardziej wiarygodna staje się więc ocena

ewentualnego ryzyka zdrowotnego ludzi przebywających (zamieszkujących) w pobliżu linii napowietrznych. Literatura naukowa dotycząca skutków biologicznych oddziaływania pól elektrycznych i magnetycznych niskiej częstotliwości jest już w tej chwili bardzo bogata i liczy kilka tysięcy publikacji [1,5,22], jednak najciekawsze i jednocześnie najbardziej kontrowersyjne są wyniki badań epidemiologicznych [23,24].

W 1979 roku pojawiła się pierwsza epidemiologiczna praca N. Wertheimera i E. Leepera [25], w której autorzy stwierdzili zwiększone ryzyko zachorowań na białaczkę u dzieci mieszkających w domach o wyższej od przeciętnej wartości natężenia pola magnetycznego. Od początku zakwestionowano metodę badań, z jaką autorzy tej publikacji porównywali lokalizację domów dzieci zmarłych na białaczkę z położeniem domów dzieci z grupy kontrolnej. Jednak ta publikacja spowodowała, iż w wielu ośrodkach naukowo-badawczych zaczęto prowadzić badania zakrojone na szeroką skalę nad wpływem pola elektromagnetycznego na organizm człowieka.

Jednym z pierwszych wyników takich badań była informacja opublikowana przez Międzynarodową Organizację Zdrowia (WHO) w 1982 roku [26], w której podsumowaniu stwierdzono między innymi:

- badania eksperymentalne wykazują, że pola elektryczne (E) o natężeniach do 20 kV/m i pola magnetyczne (H) o natężeniach do 240 A/m (0,3 mT), występujące niezależnie lub razem nie stanowią niebezpieczeństwa dla zdrowia,
- pola elektryczne i magnetyczne wytwarzane przez systemy przesyłowe o napięciu 400 kV nie stanowią niebezpieczeństwa dla zdrowia ludzkiego.

Wykonywane badania, początkowo dotyczące skutków oddziaływania pól elektrycznych, zostały później skoncentrowane na efektach działania pól magnetycznych. Ewolucja taka zmieniła w istotny sposób zakres badań, ponieważ pola magnetyczne o znaczących wartościach mogą być wytwarzane nie tylko przez linie elektroenergetyczne wysokiego napięcia, lecz także przez wszelkie sieci, instalacje i odbiorniki elektryczne przewodzące prąd elektryczny. W kolejnych badaniach uwzględniono więc już wpływ wszelkich możliwych źródeł pól magnetycznych.

Poniżej przedstawiono w sposób syntetyczny wynikające z tych badań najistotniejsze wnioski i uogólnienia.

Narodowy Instytut Raka (NCI) w Stanach Zjednoczonych przedstawił wyniki badań wpływu pól magnetycznych o małych natężeniach (0,2...0,3 nT) na powstawanie chorób nowotworowych u dzieci [27], z których wynika, że:

- brak jest dowodu na istotny wzrost ryzyka zachorowań na raka u dzieci mieszkających w pobliżu linii elektroenergetycznych (ryzyko jest statystycznie nieistotne),

- brak jest dowodu na wzrost ryzyka zachorowań na raka ze wzrostem oddziaływania pola magnetycznego (nie ma zależności od dozy rozumianej jako iloczyn czasu i natężenia pola).

Prezentacja tych wyników spowodowała wiele uwag zarówno krytycznych jak i popierających. Wyniki podobnych badań w Instytucie Statystyki Medycznej i Dokumentacji Uniwersytetu w Mainz (Niemcy) wykazują [1], że istnieją pewne podstawy do stwierdzenia powiązań pomiędzy polem magnetycznym, a wzrostem zachorowań na raka u dzieci, ale ustalony wskaźnik wzrostu w Niemczech wynosi zaledwie 2...4 %.

Ciekawe wnioski dotyczące ewentualnych skutków zdrowotnych narażenia na działanie pól elektromagnetycznych wynikają z wieloletniego amerykańskiego programu EMF-RAPID. Po powołaniu komisji ekspertów, która dokonała przeglądu literatury, opracowano w 1999 roku EMF-RAPID Final Report [28]. W raporcie tym nie potwierdzono związku między polami magnetycznymi i ryzykiem zachorowań na raka oraz zalecono zaprzestanie finansowania badań nad oddziaływaniem biologicznym i ryzykiem zdrowotnym pól magnetycznych.

Bardzo podobne wnioski wynikają z Raportu Brytyjskiej Narodowej Rady Ochrony Radiacyjnej (UK NRPB), według której badania doświadczalne i epidemiologiczne nie dostarczyły wystarczających dowodów, że pola magnetyczne mogą być przyczyną nowotworów. Brytyjscy naukowcy stwierdzili jednak, że ciągła ekspozycja w polach magnetycznych o wartości ponad 0,4 mT może zwiększać ryzyko zachorowań na białaczkę u dzieci, ale ze względu na niewielką liczbę osób eksponowanych na takie pola dowody na potwierdzenie tej tezy nie są jednoznaczne[22].

Kontrowersje wokół oceny zwiększonego ryzyka zachorowania na białaczkę u dzieci mieszkających w zasięgu oddziaływania pól magnetycznych o częstotliwości sieciowej (50÷60 Hz) i natężeniach wyższych od przeciętnych zostały w dużym stopniu wyjaśnione przez dwie niezależne publikacje z ośrodków naukowych w USA i Szwecji, które ukazały się w latach 2000-2001. Zarówno praca Dr Andersa Ahlboma ze Sztokholmu [29], jak i grupy Dr Sandera Greenlanda z Los Angeles [30] stanowi syntezę wyników kilku dużych i dobrze znanych badań epidemiologicznych dzieci. W pierwszej z nich poddano analizie połączone wyniki 9 analiz epidemiologicznych prowadzonych równolegle z długoterminowymi pomiarami pól magnetycznych i uzyskano w ten sposób bardzo duży i wiarygodny materiał badawczy. W drugiej pracy poddano analizie połączone wyniki 15 badań epidemiologicznych, w których także dokonano pomiarów pól magnetycznych. W badaniach dr Ahlboma stwierdzono zależność zachorowania na białaczkę u dzieci przebywających w polach magnetycznych przekraczających poziom 0,33 A/m, dla których wielkość względnego ryzyka – Relative Risk (RR), określanego stosunkiem liczby przypadków obserwowanych do oczekiwanych wynosi 2. W badaniach amerykańskich podobną zależność (RR = 1,7) znaleziono dla zachorowań na białaczkę u dzieci zamieszkających w miejscach, w których

natężenie pola magnetycznego przekraczało 0,24 A/m. Wyniki obu prac są więc bardzo podobne i wskazują, że dzieci przebywające w polach magnetycznych o natężeniach przekraczających 0,33 A/m mają prawie dwukrotnie większe ryzyko zachorowania na białaczkę (ale nie na inne nowotwory, w tym nie na nowotwory mózgu).

Omówione powyżej syntezy badań epidemiologicznych u dzieci spotkały się z żywym zainteresowaniem i stanowią podstawę współczesnych poglądów na temat ryzyka zdrowotnego związanego z oddziaływaniem na dzieci pól magnetycznych. Prace te dotyczą wyłącznie dzieci i tylko ryzyka zachorowalności na białaczkę. W pracach tych nie ma natomiast żadnych danych, które pozwalałyby na wnioskowanie, że ten poziom natężenia pola magnetycznego stanowi uniwersalną „granice bezpieczeństwa” we wszystkich innych warunkach oddziaływania pól elektromagnetycznych na ludzi.

W monografii Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC) [31] pola magnetyczne o częstotliwości 50/60 Hz uznano jako czynnik przypuszczalnie rakotwórczy dla człowieka i zakwalifikowano je do grupy 2B w 4-stopniowej skali czynników rakotwórczych. Warto jednak wspomnieć, że w tej grupie, oprócz kawy, wymienionych jest jeszcze 230 innych czynników fizycznych i chemicznych. Według grupy naukowców IARC pole elektryczne 50/60 Hz jest czynnikiem niemożliwym do klasyfikacji jako rakotwórczy dla człowieka (grupa 3). Przy takiej klasyfikacji pól elektromagnetycznych jako czynników rakotwórczych podkreślano jednak ograniczony i niepełny charakter dowodów epidemiologicznych oraz słabe oparcie w wynikach badań doświadczalnych. Analogiczne wnioski wynikają również z wydanej w 2004 r. zbiorowej monografii Międzynarodowego Programu „Pola Elektromagnetyczne” przygotowywanego na zlecenie Międzynarodowej Organizacji Zdrowia (WHO) [22].

Podsumowując, w latach 1980-2005 pojawiło się około dwieście opisów oryginalnych badań epidemiologicznych poświęconych ryzyku zachorowania na nowotwory u osób narażonych na pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50/60 Hz. Wyniki tych badań jednak nie są jednoznaczne. W prawie 40 % analiz stwierdzono lepiej czy gorzej udokumentowane zwiększone ryzyko zachorowań na nowotwory, podczas gdy w 60 % badań takiego zjawiska nie potwierdzono [5].

2.5. Normy, przepisy i zalecenia dotyczące ochrony przed wpływem pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz

Brak jednoznacznej opinii wśród naukowców czy i jak pola elektromagnetyczne o częstotliwości sieciowej i o poziomach generowanych przez system elektroenergetyczny wpływają na organizm człowieka spowodowało, że wiele państw, w tym także Polska, zdecydowało się na wprowadzenie przepisów dotyczących ochrony przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na środowisko, w tym na organizm człowieka.

Przy ustalaniu wartości granicznych, powszechnie stosowaną zasadą jest podział populacji narażonej na dwie grupy. Pomimo często odmiennego nazewnictwa stosowanego do właściwego opisu obu grup, w rzeczywistości chodzi o dokonanie podziału na tzw. grupę narażoną w ekspozycji zawodowej (pracownicy) i środowiskowej (ludność). Podział ten jest słuszny, wynika on bowiem z odmiennych warunków narażenia na działanie pól w obu tych grupach (pracownicy – większe wartości działającego pola i stosunkowo krótki czas ekspozycji, natomiast ludność – mniejsze wartości działającego pola i zwykle dłuższy czas ekspozycji) [1].

Podstawowym, obowiązującym w Polsce aktem prawnym, określającym szczegółowe zasady ochrony przed wpływem pola elektromagnetycznego w ekspozycji środowiskowej o częstotliwości sieciowej, jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 roku [6]. Dotyczy ono między innymi problematyki ochrony przed polami wytwarzanymi przez elementy systemu elektroenergetycznego, w tym linie i stacje elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz określono w tym dokumencie przez wartości graniczne: natężenia pola elektrycznego E i natężenia pola magnetycznego H . Wartości graniczne natężenia pola elektrycznego E ustalone tym rozporządzeniem wynoszą:

- 10 kV/m w obszarach dostępnych dla ludzi,
- 1 kV/m w obszarach zabudowy mieszkaniowej,

natomiast poziom natężenia pola magnetycznego H w miejscach dostępnych dla ludzi powyższe rozporządzenie nakazuje ograniczyć do wartości nie większych niż 60 A/m.

W zakresie ochrony pracowników (ekspozycja zawodowa) przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych obowiązują w Polsce przepisy zawarte w rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 roku [32]. Przywołane rozporządzenie nakazuje, by w otoczeniu źródeł pól elektromagnetycznych wyznaczyć i oznakować, zgodnie z Polską Normą [33], zasięgi trzech stref ochronnych:

- niebezpiecznej – rozumianej jako obszar, w którym przebywanie pracowników jest zabronione (dozwolone wyłącznie w przypadku, gdy pracownik jest wyposażony w skutecznie działające środki ochrony indywidualnej),
- zagrożenia – rozumianej jako obszar, w którym dopuszczone jest przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach przez czas ograniczony, zależny od natężenia działającego pola,
- pośredniej – rozumianej jako obszar, w którym dopuszczone jest przebywanie pracowników w ciągu jednej zmiany roboczej,

natomiast obszar poza zasięgiem wymienionych stref ochronnych jest obszarem tzw. strefy bezpiecznej.

W celu zidentyfikowania i późniejszego oznakowania wymienionych w rozporządzeniu stref ochronnych wyróżnia się trzy graniczne wartości natężenia pola elektrycznego i natężenia pola magnetycznego, zestawione w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Graniczne wartości natężenia pola elektrycznego E i magnetycznego H rozdzielające wg [29] poszczególne strefy ochronne pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz

Granice stref: Wartości graniczne:	bezpiecznej /pośredniej	pośredniej /zagrożenia	zagrożenia /niebezpiecznej
E [kV/m]	5	10	20
H [A/m]	66,6	200	2000

Należy podkreślić, że w niektórych krajach nie wprowadzono przepisów nakazujących ograniczanie poziomów pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez napowietrzne linie przesyłowe. Uznano bowiem, że wyniki dotychczas przeprowadzonych badań nie pozwalają zaliczyć pól elektromagnetycznych występujących w ich pobliżu do czynników zagrażających zdrowiu, a tym bardziej życiu człowieka. W krajach, w których przepisy takie wprowadzono przy ich opracowywaniu opierano się przede wszystkim na oszacowaniach teoretycznych oraz wynikach wielu doświadczeń, w tym długotrwałych badań medycznych prowadzonych na bardzo dużych grupach ludzi. Istotne różnice w wynikach tych badań spowodowały jednak, że w przepisach różnych krajów wartości dopuszczalne poszczególnych składowych pola elektromagnetycznego nie są jednakowe. Przy wprowadzaniu przepisów dotyczących ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych kierowano się też zasadą, że czynnik, co do którego istnieją przypuszczenia, iż może być szkodliwy (np. pole elektromagnetyczne), należy ograniczać na tyle, na ile jest to możliwe bez ponoszenia przy tym nadmiernych kosztów.

Wartości dopuszczalne składowej elektrycznej pola, podawane w przepisach różnych krajów, są do siebie zbliżone. Ustalono bowiem w taki sposób, by przebywanie w polu elektrycznym nie było dla człowieka dokuczliwe oraz by prądy rozładowania, płynące w przypadku dotknięcia dużych obiektów przewodzących (np. samochodu), były niewielkie i nie powodowały znaczącego dyskomfortu. W przepisach kilku krajów, w tym polskich, natężenie pola elektrycznego o wartości nie przekraczającej 1 kV/m uważane jest za całkowicie bezpieczne, nawet w przypadku długotrwałego w nim przebywania. Przepisy obowiązujące w innych krajach, za całkowicie bezpieczną przyjmują wartość natężenia pola elektrycznego na poziomie 5 kV/m.

Przy ustalaniu wartości dopuszczalnych pola magnetycznego autorzy przepisów, norm i zaleceń obowiązujących w wielu krajach przyjęli zasadę, że działające na człowieka pole

magnetyczne nie może powodować powstawania w organizmie prądów większych niż naturalne prądy płynące w ciele człowieka (np. prądy pobudzenia komórek nerwowych czy mięśnia sercowego). Takie podejście sprawia, że za dopuszczalne przyjmowane są poziomy natężeń rzędu 100 A/m [34].

Tabela 2.2. Najwyższe dopuszczalne w środowisku natężenie pola elektrycznego E i magnetycznego H wg przepisów różnych krajów oraz wg zaleceń organizacji międzynarodowych [34]

Kraj lub organizacja	E [kV/m]	Uwagi	H [A/m]	Uwagi
Wielka Brytania	12,3	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	1280	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
Australia	5,0	W miejscach lokalizacji budynków	80	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
	10,0	Na pozostałym obszarze	800	Przebywanie w polu krótkotrwale
Austria	5,0	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	80	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
	10,0	Przebywanie w polu krótkotrwale	800	Przebywanie w polu krótkotrwale
Niemcy	5,0	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	80	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
	10,0	Przebywanie w polu do 2 godz. dziennie	800	Przebywanie w polu do 2 godz. dziennie
Włochy	5,0	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	80	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
	10,0	Przebywanie w polu krótkotrwale	800	Przebywanie w polu krótkotrwale
Polska	1,0	Na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową	60	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
	10,0	W miejscach dostępnych dla ludzi		
CENELEC	10,0	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	512	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
IRPA	5,0	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	80	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych
	10,0	Przebywanie w polu do kilku godzin dziennie	800	Przebywanie w polu do kilku godzin dziennie
ICNIRP	10,0	Ochrona pracowników	400	Ochrona pracowników
Propozycja dla krajów Unii Europejskiej	5,0	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych	80	Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych

W tabeli 2.2 przedstawiono wartości graniczne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, obowiązujące dla narażenia środowiskowego w przepisach różnych krajów oraz zalecenia organizacji międzynarodowych.

Warto zwrócić uwagę na to, że obowiązujące w niektórych krajach przepisy, nakazujące zmniejszanie poziomów pól elektromagnetycznych do wartości dopuszczalnych lub wprowadzające ograniczenia w czasie przebywania ludzi w zasięgu pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz, powstały na podstawie zaleceń formułowanych przez wyspecjalizowane instytucje międzynarodowe, zajmujące się zagadnieniami ochrony przed promieniowaniem. Wzorem dla przepisów szeregu państw były zalecenia Międzynarodowego Towarzystwa Ochrony przed Promieniowaniem (IRPA), Międzynarodowej Komisji Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ICNIRP) oraz Europejskiego Komitetu Normalizacji Elektrotechnicznej (CENELEC).

Porównując wartości graniczne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego obowiązujące w Polsce i w innych krajach można stwierdzić, iż polskie przepisy należą do jednych z najbardziej rygorystycznych w Europie i na świecie.

Obecnie, po przygotowaniu projektu przepisów dotyczących ochrony przed polami i promieniowaniem elektromagnetycznym na stanowiskach pracy, międzynarodowe organizacje zajmujące się tym zagadnieniem przygotowują zalecenia dotyczące dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, które mają obowiązywać we wszystkich krajach Unii Europejskiej [34].

3. Wielotorowe, wielonapięciowe linie wysokiego napięcia

3.1. System elektroenergetyczny Polski i Europy

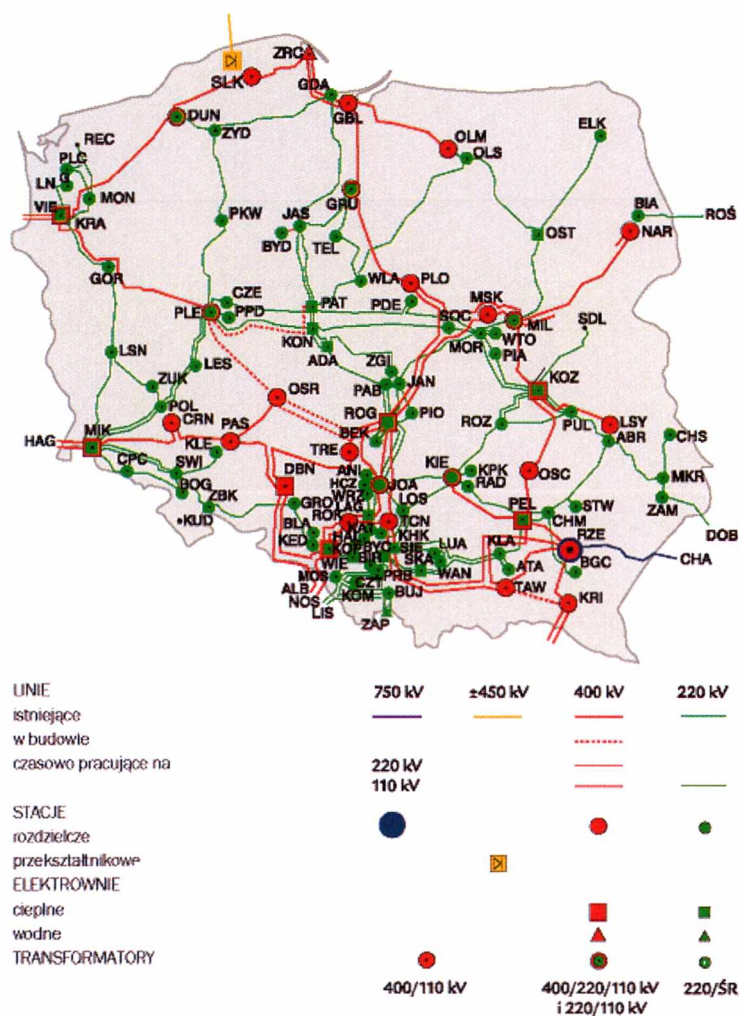
Przy obecnym zapotrzebowaniu na energię elektryczną i konieczności pokonania przy jej przesyłach dużych odległości, technicznie i ekonomicznie najbardziej uzasadniona jest w Polsce budowa linii przesyłowych o znormalizowanych napięciach 400 i 220 kV. Właścicielem tych linii są Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Operator S.A., natomiast linie o napięciu 110 kV, uznawane za linie przesyłowo-rozdzielcze, są własnością spółek dystrybucyjnych (Zakładów Energetycznych), które mają swoje siedziby w poszczególnych rejonach kraju. Aktualnie na majątek sieciowy PSE-Operatora S.A. składają się następujące obiekty [34]:

- linie energetyczne:
 - 1 linia o napięciu 750 kV o długości 114 km (aktualnie nie jest ona eksploatowana),
 - 65 linii o napięciu 400 kV o łącznej długości 4 832 km,
 - 165 linii o napięciu 220 kV o łącznej długości 7 895 km,
 - 14 linii o napięciu 110 kV o łącznej długości 34 km,
- stacje energetyczne:
 - 94 stacje energetyczne najwyższych napięć,
- transformatory:
 - 166 transformatorów.

Ich rozmieszczenie na terenie Polski ilustruje rysunek 3.1.

Podstawowymi parametrami linii, istotnymi dla sprawnego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, są m.in.: zdolność przesyłowa, napięcie (istotne z punktu widzenia strat przesyłu) oraz konstrukcja linii (linia jednotorowa, dwutorowa, dwie linie jednotorowe usytuowane obok siebie lub linia wielotorowa). Poważnym problemem, który występuje przy przesyłach prądu przemiennego są ograniczone zdolności przesyłowe linii w stosunku do potrzeb. Problem zwiększenia przepustowości istniejących linii był jednym z najważniejszych tematów omawianych podczas obrad CIGRE w 1998 roku [2]. Od kilku lat Polska posiada nadwyżkę mocy (liczoną jako różnicę między mocą dyspozycyjną, a zapotrzebowaniem na moc) (tabela 3.1), którą można wyeksportować [36÷38].

Linie przesyłowe 750 kV, 450 kV, 400 kV, 220 kV



Rys.3.1 Sieć przesyłowa najwyższych napięć w Polsce w 2004 roku [31]

Tabela 3.1. Zestawienie średniej mocy dyspozycyjnej, osiągalnej i zapotrzebowania na moc w latach 1997-2004 [36,37,38]

Rok	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Moc osiągalna [MW]	32698	32585	33278	33177	33386	33571	34804	34715
Średnia moc dyspozycyjna [MW]	24838	25384	25177	26635	26323	26873	27598	27977
Średnie zapotrzebowanie na moc [MW]	18758	18576	18326	18549	18586	18374	18913	19512

W 2002 roku eksport energii realizowany był w zakresie $80 \div 100\%$ wielkości maksymalnych limitów mocy przesyłowych przez granicę polską, umożliwiających bezpieczną pracę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, ze zmniejszeniem mocy w okresie nocnym i weekendy oraz latem. Wyniósł on 7068,3 GWh [36]. Natomiast w 2003 roku Polska zwiększyła eksport energii o 35 % w stosunku do poprzedniego roku. Dopiero w 2004 roku duża dynamika wzrostu eksportu została zahamowana i był on mniejszy w stosunku do roku poprzedniego. Stosunkowo duży wzrost eksportu energii w kilku ubiegłych latach oraz zapewnienie jego dalszego zwiększania, przy ograniczonych jak dotychczas zdolnościach przesyłowych granicznych linii elektroenergetycznych, musi wiązać się z koniecznością budowy nowych linii, lub przebudowy już istniejących, aby zagwarantować bezpieczeństwo Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.

Jednak silny sprzeciw społeczny przeciwko budowie nowych linii i wzrastająca presja na ograniczenie dopuszczalnych wartości pól elektromagnetycznych powoduje, iż procedury lokalizacyjne i budowa nowych linii elektroenergetycznych trwa wiele lat. Ogromne trudności z uzyskaniem zezwoleń pod budowę nowych linii na terenach gęsto zaludnionych powodują, że szuka się sposobów zwiększenia przesyłu istniejącymi liniami najwyższych napięć. W niektórych sytuacjach, wobec wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną, niezwykle korzystnym rozwiązaniem jest przebudowa napowietrznych linii elektroenergetycznych na:

- wielotorowe, wielonapięciowe linie wysokiego napięcia,
- linie prądu stałego [2,39],
- linie wielofazowe.

W praktyce najczęściej stosowana jest pierwsza opcja, tj. przebudowa istniejących linii na układy wielotorowe, wielonapięciowe. Linie takie eksploatowane są w Europie Zachodniej od wielu już lat. Natomiast w Polsce prace mające na celu przebudowę niektórych, najbardziej wyeksploatowanych linii 220 kV na układ czterotorowy, dwunapięciowy będą dopiero wchodzić w fazę przygotowania studialnego.

Pierwsza linia czterotorowa, dwunapięciowa (2×400 kV + 2×220 kV) w Polsce powinna zostać oddana do eksploatacji w drugiej połowie 2006 roku. Od wielu lat trwa budowa linii 400 kV łączącej stację Ostrów i stację Plewiska. W toku prowadzonych prac projektowych wypracowano koncepcję wykorzystania fragmentu trasy istniejącej linii 220 kV relacji Plewiska-Konin i budowę na odcinku 36 kilometrów, od Plewisk do Kromlic, czterotorowej linii (2×400 kV + 2×220 kV) [3]. Warto przy tym podkreślić, że przy przebudowie istniejących linii 220 kV na linie wielotorowe, dwunapięciowe wykorzystuje się trasę istniejącej linii, która wpisała się już w okoliczny krajobraz.

Zwiększanie liczby torów na jednym słupie linii kojarzy się zwykle z dużym wzrostem składowych natężenia pola elektromagnetycznego w otoczeniu przęsła linii. W rzeczywistości może być jednak odwrotnie i poprzez odpowiednie rozmieszczenie

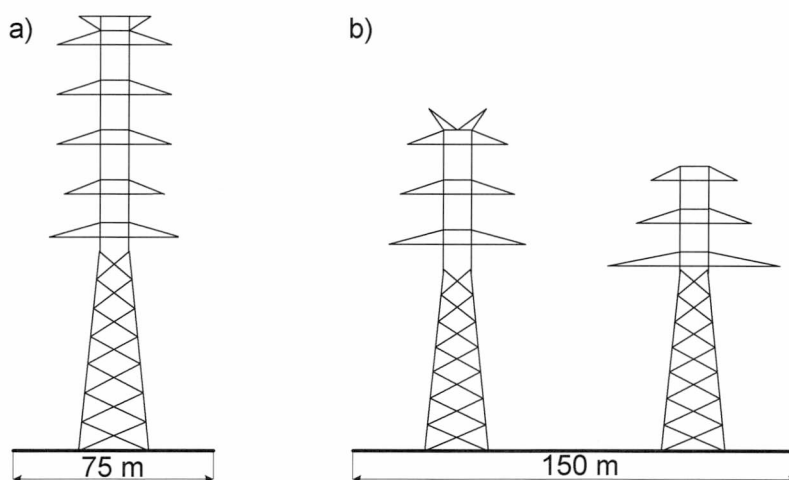
przewodów linii wielotorowej na słupie, możliwe jest zmniejszenie – w stosunku do rozwiązań tradycyjnych – natężenia pola elektromagnetycznego, co zostało udowodnione w rozdziałach 5 i 7 pracy. Linie wielotorowe, kilkunapięciowe wymagają również relatywnie najmniejszego terenu koniecznego pod ich budowę w stosunku do przesyłanych mocy. Zalety stosowania linii wielotorowej są następujące [1]:

- zmniejszenie jej uciążliwości dla środowiska,
- zmniejszenie obszaru zajmowanego przez linię,
- zmniejszenie materiałochłonności linii.

Oszacowania przeprowadzone przez Energoprojekt [40] wykazały, że dla założonego przesyłu mocy 4000 MW na odległość 180 km najmniejsza powierzchnia terenu zajmowanego przez fundamenty słupów wynosi:

- 150 ha dla linii o napięciu 110 kV,
- 37 ha dla linii o napięciu 220 kV,
- 7 ha dla linii o napięciu 400 kV.

Przy przesyśle dużej mocy, zapotrzebowanie na tak znaczne obszary terenu niezbędne do wybudowania linii o napięciu 220 kV, a szczególnie 110 kV, wynika z konieczności wykonania kilkunastu linii 110 kV lub kilku linii 220 kV, które w uzasadnionych przypadkach można zastąpić jedną dwutorową linią 400 kV. Natomiast budowa linii wielotorowych, kilkunapięciowych (np. 400 + 220 kV) może przyczynić się do znacznie oszczędniejszego zagospodarowania terenu, bowiem zajmowany obszar przez taką linię jest dużo mniejszy od terenu, jaki zajęłyby dwie linie dwutorowe 400 i 220 kV biegnące obok siebie (rys.3.2).



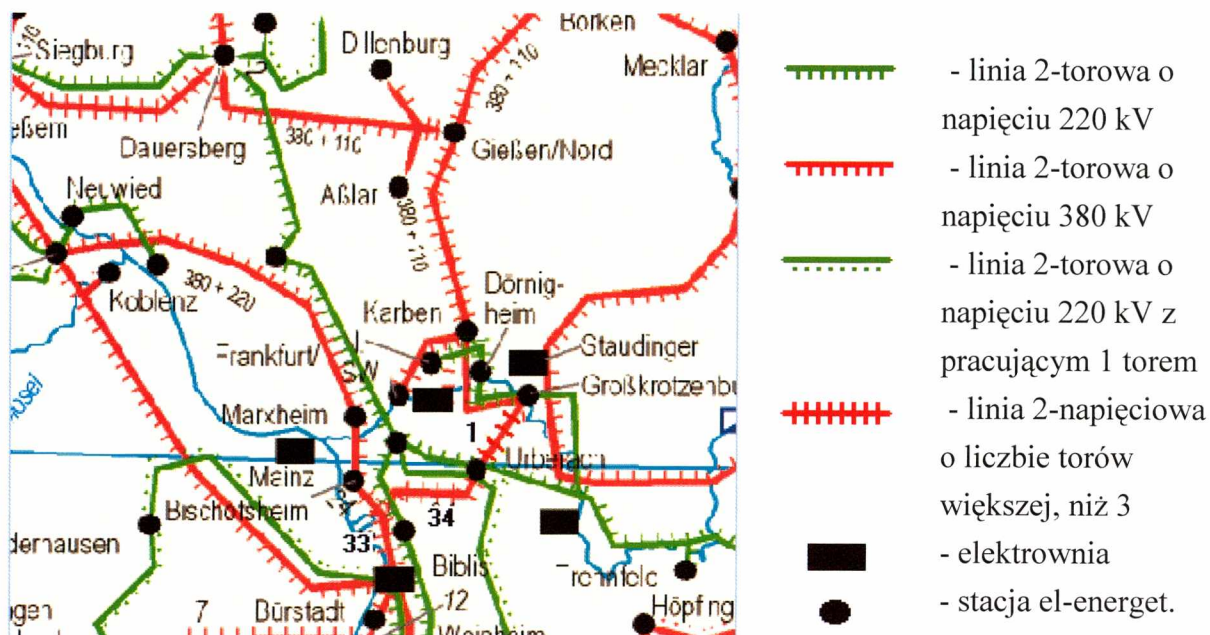
Rys.3.2. Teren zajmowany przez linie: a) jedną linię czterotorową, dwunapięciową 400+220 kV, b) jedną linię dwutorową 400 kV i jedną linię dwutorową 220 kV [1]

Konieczność rozbudowy infrastruktury elektroenergetycznej (między innymi linii przesyłowych najwyższych napięć) jest naturalną konsekwencją rozwoju każdego nowoczesnego kraju. Zobowiązania Polski dotyczące rozwoju infrastruktury linii

przesyłowych wynikają zarówno z naszego członkostwa w Unii Europejskiej, jak i z przynależności do międzynarodowej organizacji zrzeszającej operatorów sieci przesyłowych UCTE (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity), do której wstąpiliśmy w 1995 roku. UCTE jest stowarzyszeniem operatorów systemów przesyłowych zrzeszającym 23 kraje Europy. Jest ono odpowiedzialne za definiowanie i egzekwowanie wspólnych technicznych zasad niezawodnego funkcjonowania połączonych systemów elektroenergetycznych i koordynację pracy systemów elektroenergetycznych swoich członków. Główny cel działania UCTE to utrzymanie wysokiej jakości funkcjonowania systemu UCTE oraz zapewnienie stabilnych podstaw dla działania rynków energii elektrycznej w Europie i jego rozszerzania w sposób korzystny dla wszystkich uczestników rynku i odbiorców energii elektrycznej [41]. Członkostwo w tych strukturach gwarantuje z jednej strony zwiększenie elektroenergetycznego bezpieczeństwa Polski, z drugiej nakłada na nas obowiązek ciągłej modernizacji i rozbudowy istniejących, a także budowy nowych linii elektroenergetycznych.

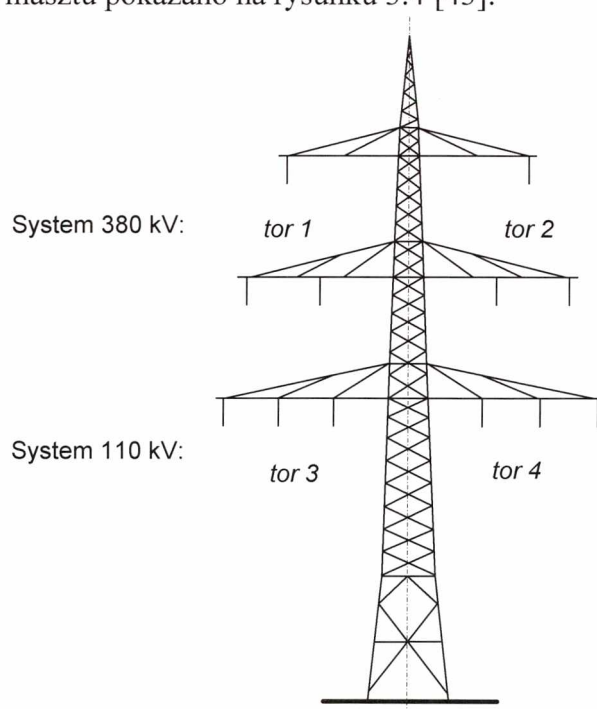
W Brukseli prognozuje się, że do 2020 r. zużycie energii elektrycznej na terenie Unii Europejskiej wzrośnie nawet o 40 % [42]. Polska musi bezwzględnie sprostać wynikającym z tego wyzwaniom. Oznacza to, że w pierwszym rzędzie należy zmniejszyć dystans jaki dzieli Polskę od krajów Europy Zachodniej, a nawet Czech (uwzględniając różnicę w powierzchni krajów). Długość linii najwyższego napięcia 400 kV w Republice Czeskiej wynosi 3442 km, jest to zaledwie o 30 % mniej niż u nas. Grecja posiada ogółem 11078 km linii o napięciu 220 kV, Polska natomiast 7895 km [38,41]. W przypadku linii 400 kV długości są do siebie zbliżone, należy jednak pamiętać, że powierzchnia Grecji stanowi mniej niż 50 % powierzchni naszego kraju. Podobne rezultaty daje zestawienie długości linii Polski i Hiszpanii, która przy zbliżonej liczbie mieszkańców i niewiele większym terytorium posiada trzykrotnie więcej linii przesyłowych 400 kV i ponad dwukrotnie więcej linii 220 kV.

Przywołanie Grecji i Hiszpanii jest nieprzypadkowe. Ze względu na ich późniejsze wstąpienie do struktur Unii Europejskiej oraz poziom rozwoju, to właśnie do nich najczęściej porównuje się Polskę. Porównanie gęstości i wielkości sieci elektroenergetycznych w Polsce, z tym, co jest w wiodących krajach UE, jest dla nas jeszcze mniej korzystne [41]. W dużej mierze są tam bowiem eksploatowane linie wielotorowe, wielonapięciowe o liczbie torów wynoszących 4, a nawet 6. Na rysunku 3.3 pokazano przykładowo fragment systemu elektroenergetycznego Niemiec. Linie oznaczone numerem 33 oraz 34 są liniami sześciotorowymi o napięciu 4×380 kV + 2×220 kV, natomiast linia nr 1 jest linią czterotorową o napięciu 2×380 kV + 2×220 kV. Między innymi pod tą linią (linią nr 1) w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zostały wykonane pomiary rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w kilku wybranych przekrojach poprzecznych linii, a wyniki pomiarów zostały umieszczone w rozdziale 5.



Rys.3.3. Fragment systemu elektroenergetycznego Niemiec

Rozbudowa bazy elektroenergetycznej prowadzi do zwiększenia stabilności i bezpieczeństwa stałych dostaw prądu do odbiorców na terenie Polski. Również kraje Europy Zachodniej, których infrastruktura energetyczna jest o wiele lepiej rozwinięta niż w Polsce nadal inwestują w jej rozwój. Przykładem tego mogą być Niemcy. Po dokładnych analizach stwierdzono, że ze względów technicznych i ekonomicznych najlepszym rozwiązaniem jest budowa na ich terytorium linii czterotorowych, dwunapięciowych $2 \times 380 \text{ kV} + 2 \times 110 \text{ kV}$, których sylwetkę masztu pokazano na rysunku 3.4 [43].

Rys.3.4. Sylwetka masztu czterotorowej linii wysokiego napięcia $2 \times 380 \text{ kV} + 2 \times 110 \text{ kV}$ [43]

Mimo wielu zalet linii wielotorowych, wielonapięciowych, należy jednak pamiętać, iż ich poszczególne tory nie są niezależne i wolno je eksploatować, gdy zapewnione jest ich rezerwowanie torami innych linii prowadzonych na osobnych słupach.

3.2. Czterotorowa linia elektroenergetyczna W.N. Plewiska - Ostrów

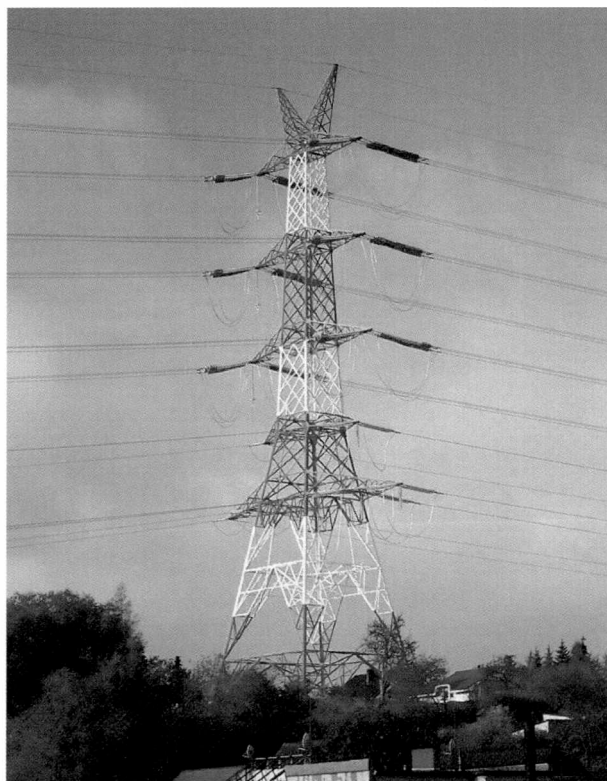
Budowa linii elektroenergetycznej 400 kV Ostrów – Plewiska jest jednym z najważniejszych zadań inwestycyjnych realizowanych w ostatnich latach przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA. Konieczność budowy tego połączenia wynika między innymi z potrzeby poprawy niezawodności i sprawności funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego [41]. Inwestycja ta ma też znaczenie lokalne: zapewni poprawę niezawodności zasilania regionu wielkopolskiego, w tym aglomeracji poznańskiej, i zachodniej części kraju. Jej realizacja pozwala na zamknięcie pierścienia linii 400 kV obejmującego swoim zasięgiem teren połowy kraju: od Warszawy przez Gdańsk, Szczecin, Poznań do Wrocławia. Powstały pierścień pozwoli także na lepsze wykorzystanie mocy czterech dużych elektrowni systemowych (Turów, Opole, Krajnik i Bełchatów) oraz umożliwi transfer energii z południa na północ kraju [41].

Budowana linia, jest linią bardzo nowoczesną. Aby zmniejszyć jej uciążliwość dla otoczenia, zastosowano między innymi następujące rozwiązania techniczne:

- potrójną wiązkę przewodów w celu zmniejszenia hałasu,
- na odcinku, gdzie linia jest dwunapięciowa ($2 \times 400 \text{ kV} + 2 \times 220 \text{ kV}$), tory 220 kV zawieszono niżej, zmniejszając w ten sposób wielkość wypadkowego pola elektromagnetycznego generowanego przez linię,
- na odcinkach przejścia linii przez lasy zastosowane będą tzw. "słupy nadleśne". Słupy te są wyższe od stosowanych na terenach otwartych, przewody wiszą w bezpiecznej odległości od wierzchołków drzew. Wycinka ogranicza się tylko do powierzchni niezbędnej dla posadowienia słupów.

Napowietrzna linia elektroenergetyczna Plewiska – Ostrów ma długość 146 km. Przebiega ona w całości przez teren województwa wielkopolskiego, przez obszar 19 gmin. Ze względu na zastosowane rozwiązania techniczne inwestycję tą można traktować jako dwa związane ze sobą odcinki. Do odcinka pierwszego można zaliczyć linię: od Ostrowa do skrzyżowania z istniejącą linią 220 kV Konin – Plewiska, w rejonie miejscowości Kromolice. Na tym odcinku rozpatrywana linia będzie linią dwutorową o napięciu 400 kV. Natomiast w drugim odcinku postanowiono wykorzystać trasę istniejącej linii dwutorowej o napięciu 220 kV Plewiska – Konin i Plewiska – Poznań Południe i wybudować pierwszą w Polsce linię dwunapięciową – dwa tory o napięciu 400 kV oraz dwa tory o napięciu 220 kV na jednym

słupie (rys.3.5). Przez okres przejściowy linia ta będzie pracować nawet jako linia trzynapięciowa, bowiem jeden z dolnych torów będzie torem o napięciu 110 kV.



Rys.3.5. Sylwetka słupa budowanej pod Poznaniem linii 4-torowej ($2 \times 400 \text{ kV} + 2 \times 220 \text{ kV}$)

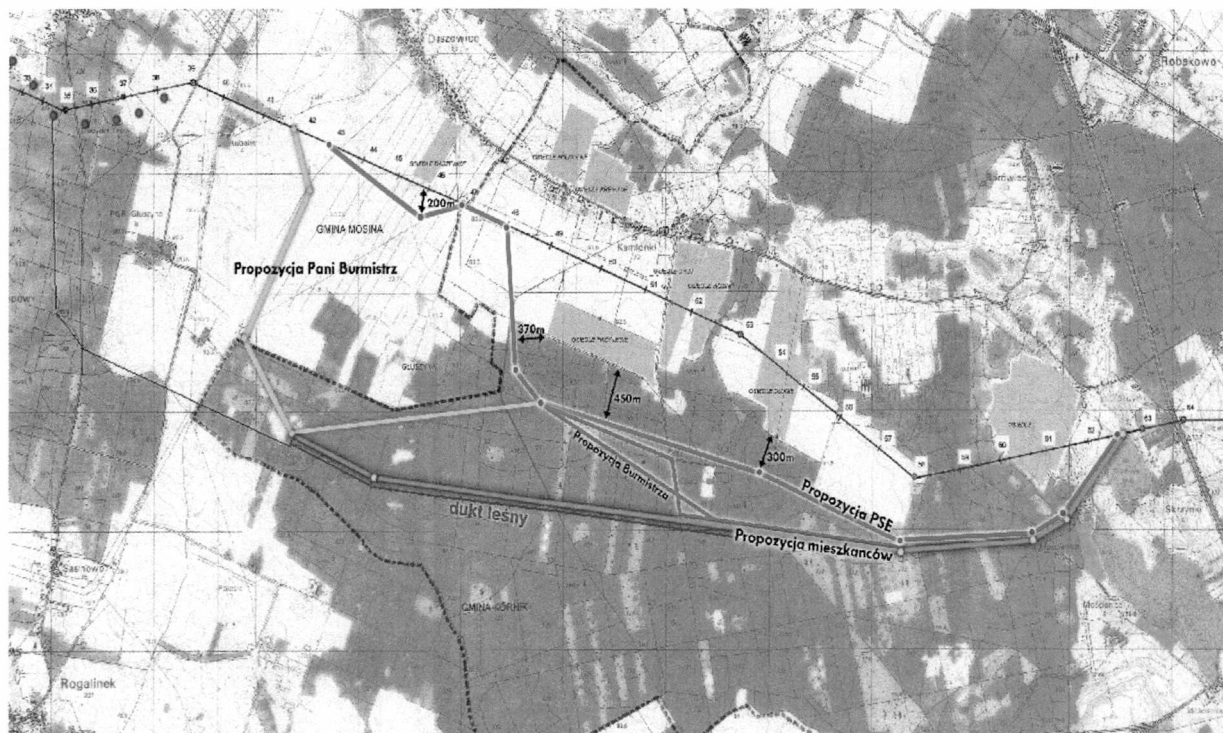
Ten etap budowy spotkał się z żywiołowym sprzeciwem ludności mieszkającej w jednej z gmin leżącej w bliskiej odległości od realizowanej inwestycji. Zawiazali oni stowarzyszenie proekologiczne „Lasem 1000”, które domaga się przesunięcia spornej linii jak najdalej od zabudowań mieszkańców. Inwestor otrzymał już pozwolenie na budowę na trasie starej linii, jednak na skutek protestów ludności odstąpił od realizacji projektu i zaproponował kilka alternatywnych tras jej przebiegu. Na rysunku 3.6 pokazano kilka tras linii zaproponowanych przez różne strony konfliktu.

Główne argumenty za przesunięciem linii, jakie wysuwało stowarzyszenie, to:

- obawa o życie i zdrowie mieszkańców wskutek generowania przez linię natężenia pola elektrycznego i magnetycznego o dużych wartościach,
- zniszczenie krajobrazu o dużych walorach estetycznych.

Najlepszym rozwiązaniem tego konfliktu, według stowarzyszenia, byłoby poprowadzenie kabla na tym odcinku terenu. Jednak kabel WN jest nie tylko od kilku do kilkunastu razy droższy od linii napowietrznej, ale nie rozwiązuje głównego problemu – ograniczenia natężenia pola magnetycznego. Pole magnetyczne nie zostanie bowiem stłumione przez ziemię, a wręcz przeciwnie – przyjmie ono w tym przypadku większe wartości, gdyż zależy ono odwrotnie proporcjonalnie od odległości punktu pomiarowego (obliczeniowego) od przewodów z prądem, a te będą mniejsze dla kabla zakopanego w ziemi

niż w przypadku linii napowietrznej. Natomiast budowa kabla prądu stałego wiązałaby się z budową dwóch stacji przekształtnikowych w odległości około 30 km. Jest to rozwiązanie nie do zaakceptowania przez inwestora, gdyż powoduje zbyt duży wzrost kosztów całej inwestycji.



Rys.3.6. Alternatywne trasy 4-torowej linii w gminie Kórnik proponowane przez różne strony konfliktu

Inwestor wiele razy organizował spotkania z naukowcami, którzy wyjaśniali wszystkie wątpliwości mieszkańców gminy Kórnik. Rozmowy nie przyniosły jednak kompromisu i do chwili obecnej (wrzesień 2006) nie ma decyzji co do ostatecznego przebiegu trasy linii na odcinku około 7 kilometrów, podczas gdy pozostała część linii została już zbudowana. Sprawa jeszcze bardziej skomplikowała się na przełomie roku 2005/2006, kiedy to powstało kolejne stowarzyszenie proekologiczne. Domagało się ono poprowadzenia linii tak, jak zostało to zapisane w Miejscowym Planie Zagospodarowania Przestrzennego gminy Kórnik, czyli po trasie starej linii. Można więc powiedzieć, że w tym momencie rozmowy cofnęły się o kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt miesięcy wstecz. Samorządowcy, mieszkańcy i PSE dały sobie czas na negocjacje do czerwca 2006 roku [44], te jednak nie przyniosły kompromisowego rozwiązania problemu i 27 czerwca 2006 roku inwestor zdecydował się poprowadzić strategiczną dla Polski linię starą trasą, na budowę której ma już pozwolenie. Ta decyzja została przez Stowarzyszenie zaskarżona do Wojewódzkiego Sądu Administracyjnego, które spodziewa się wyroków wstrzymujących rozpoczęcie procedurę budowy linii.

Konflikt ten ukazał ułomność przepisów dotyczących budowy obiektów wyższej użyteczności publicznej (w tym linii elektroenergetycznych). O stworzenie odpowiednich przepisów od wielu lat walczy wiele środowisk, w tym energetycy. Pozwoliłoby to rozwiązać wiele sporów inwestorów z ludnością.

4. Metody obliczania pól elektromagnetycznych

4.1. Równania podstawowe opisujące pole elektromagnetyczne

Pole elektromagnetyczne w środowisku nieruchomym względem źródeł pola elektrycznego i magnetycznego opisują następujące równania podstawowe:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (4.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (4.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (4.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad (4.4)$$

gdzie ρ jest gęstością objętościową ładunku, $\mathbf{J}$ – wektorem gęstości prądu, $\mathbf{D}$ – wektorem indukcji elektrycznej. Noszą one nazwę równań Maxwella i wskazują na fizyczną jedność zjawisk elektrycznych i magnetycznych oraz na to, że zmienne pole elektromagnetyczne nie zależy od wyboru układu współrzędnych. Oznacza to, że nie może istnieć taki układ współrzędnych, w którym znika pole elektromagnetyczne, natomiast mogą istnieć takie układy, w których znikają pola elektryczne lub magnetyczne.

Pole elektromagnetyczne można również przedstawić za pomocą równań różniczkowych cząstkowych, opisujących pole w pewnej, zdefiniowanej warunkami brzegowymi przestrzeni. Funkcje będące rozwiązaniem tych równań określają pole w każdym punkcie przestrzeni i na jej brzegu. Ponieważ istnieją liczne metody (analityczne i numeryczne) rozwiązywania tych równań, więc opis pola elektromagnetycznego przy ich użyciu jest bardziej uniwersalny niż opis wyrażeniami całkowymi. Rozpatrując pole elektromagnetyczne korzysta się z następujących równań różniczkowych cząstkowych:

- równania Laplace’a

$$\nabla^2 V = 0, \quad (4.5)$$

- równania Poissona

$$\nabla^2 V = -f, \quad (4.6)$$

- równań Helmholtza:

- jednorodnego

$$\nabla^2 V - k^2 V = 0, \quad (4.7)$$

- niejednorodnego (opisuje ustalone, sinusoidalnie zmienne pola wzbudzone przez źródła f)

$$\nabla^2 V - k^2 V = -f, \quad (4.8)$$

- równania przewodnictwa (dyfuzji, Fouriera)

$$\nabla^2 V = \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad (4.9)$$

- równania falowego

$$\nabla^2 V = \beta^2 \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad (4.10)$$

w których: V jest funkcją skalarną lub składową wektora, f jest funkcją opisującą przestrzenny rozkład źródeł wzbudzających pole, k^2 jest współczynnikiem, który może być rzeczywisty, urojony, lub zespolony, natomiast h^2 jest współczynnikiem rzeczywistym.

Podane równania różniczkowe cząstkowe są stosowane w obliczeniach:

- pól elektrostatycznych,
- pól magnetostatycznych,
- pól przepływowych,
- ustalonych harmonicznym pól elektromagnetycznych w przewodnikach i dielektrykach,
- nieustalonych pól elektromagnetycznych w przewodnikach i dielektrykach.

Równania te znajdują również zastosowanie w opisie pól termicznych, naprężeń mechanicznych, itp. Zalicza się je do równań: eliptycznych (4.5)-(4.8), parabolicznych (4.9) i hiperbolicznych (4.10).

4.2. Warunki graniczne

Aby określić pole w rozpatrywanym obszarze, należy rozwiązać odpowiednie równanie wewnątrz tego obszaru i spełnić pewne warunki. W przypadku ogólnym są to warunki graniczne. Przypadkiem szczególnym warunków granicznych są warunki początkowe i brzegowe. Warunki początkowe są to warunki stawiane poszukiwanej funkcji w rozpatrywanym obszarze dla $t = t_0$, natomiast warunki brzegowe są to warunki stawiane poszukiwanej funkcji na brzegu rozpatrywanego obszaru. Rozwiązując równanie eliptyczne uwzględnia się warunki brzegowe, natomiast rozwiązując równania paraboliczne i hiperboliczne – warunki graniczne (początkowe i brzegowe) [45].

Przy analizie pola elektromagnetycznego korzysta się z dwóch rodzajów zagadnień brzegowych: zagadnienie pierwszego i zagadnienie drugiego rodzaju. Zagadnienie brzegowe pierwszego rodzaju, noszące nazwę zagadnienia Dirichleta, polega na poszukiwaniu rozwiązania $u(M)$ równania różniczkowego cząstkowego w pewnym obszarze, które na brzegu tego równania spełnia warunek

$$u(P) = h(P), \quad (4.11)$$

gdzie $h(P)$ jest zadaną funkcją na brzegu obszaru. Zależność (4.11) wyraża warunek brzegowy pierwszego rodzaju, zwany również warunkiem Dirichleta.

Zagadnienie brzegowe drugiego rodzaju, nazywane także zagadnieniem Neumanna, polega na poszukiwaniu rozwiązania $u(M)$ równania różniczkowego cząstkowego w pewnym obszarze, które na brzegu tego obszaru spełnia warunek

$$\left. \frac{du}{dn} \right|_P = g(P), \quad (4.12)$$

gdzie $g(P)$ jest zadaną funkcją w punktach brzegu obszaru, a $\left. \frac{du}{dn} \right|_P$ oznacza pochodną funkcji u w kierunku normalnym do brzegu obszaru w punkcie P . Powyższe wyrażenie przedstawia warunek brzegowy drugiego rodzaju, nazywany także warunkiem Neumanna. Problematyka zagadnień brzegowych jest bardzo obszerna, dlatego w następnym podrozdziale zostały opisane jedynie najczęściej stosowane metody rozwiązywania zagadnień brzegowych.

4.3. Metody rozwiązywania zagadnień brzegowych

4.3.1 Metoda rozdzielania zmiennych

Przy stosowaniu metody rozdzielania zmiennych, zwanej również metodą Fouriera, przedstawia się rozwiązanie równania różniczkowego cząstkowego w postaci nieskończonego szeregu, na przykład [44]

$$u(x, y, z) = \sum_{n,m,k=1}^{\infty} A_{nmk} X_n(x) Y_m(y) Z_k(z). \quad (4.13)$$

Wyrazy $X_n(x)$, $Y_m(y)$, $Z_k(z)$ tego szeregu spełniają rozpatrywane równanie różniczkowe cząstkowe, natomiast A_{nmk} jest stałą. Podobnie rozwiązanie dwuwymiarowego zagadnienia brzegowego przedstawia się zazwyczaj w postaci szeregu podwójnego. W niektórych przypadkach można przyjąć rozwiązanie w prostszej postaci. Na przykład dla dwuwymiarowych zagadnień brzegowych dotyczących równania Laplace'a lub jednowymiarowego równania Helmholtza ($f = 0$) rozwiązanie przedstawia się w postaci szeregu pojedynczego [45]

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n X_n(x) Y_n(y). \quad (4.14)$$

4.3.2 Metoda przekształceń całkowych

W wielu przypadkach przedstawienie zagadnienia teorii pola elektromagnetycznego w postaci równania całkowego ułatwia jego rozwiązanie. Można je formułować biorąc pod

uwagę zarówno równoważność między zagadnieniem brzegowym dla równania różniczkowego, a równaniem całkowym, jak i wykorzystując rozważania fizyczne. Równania całkowe są stosowane do rozwiązywania zadań prostych (analizy) i odwrotnych (syntezy, identyfikacji). Ułatwiają one obliczenia pól w obszarach nieograniczonych [45].

Oznaczając funkcję zmiennej rzeczywistej x przez $f(x)$, przekształceniem całkowym (transformatą całkową) tej funkcji jest wyrażenie

$$F(s) = \int_a^{\infty} f(x)K(s,x)dx, \quad (4.15)$$

które funkcji $f(x)$ przyporządkowuje funkcję $F(s)$ zmiennej s . Funkcja $f(x)$ nazywana jest oryginałem, a funkcja $F(s)$ – transformatą.

Wyrażenie

$$f(x) = \int_b^{\infty} F(s)H(s,x)ds \quad (4.15)$$

przyporządkowujące funkcję $f(x)$ funkcji $F(s)$ nosi nazwę przekształcenia odwrotnego. Funkcje $K(s,x)$ oraz $H(s,x)$ nazywane są jądrami przekształceń całkowych.

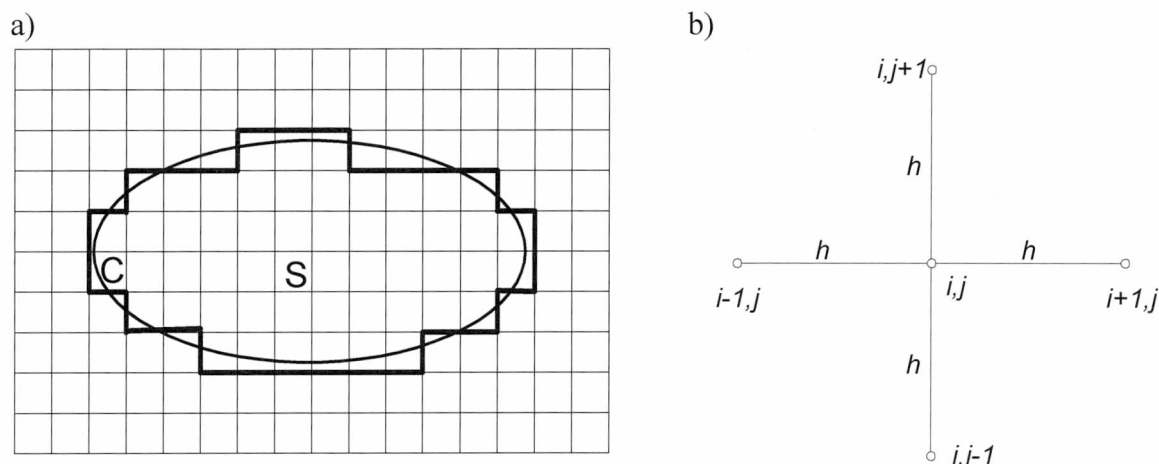
Stosując metodę przekształceń całkowych do rozwiązania równania różniczkowego, przekształca się wyraz po wyrazie w tym równaniu i po uwzględnieniu warunków brzegowych otrzymuje się równanie, z którego wyznacza się transformatę rozwiązania. Rozwiązanie zagadnienia otrzymuje się, znajdując przekształcenie odwrotne. W przypadku równań różniczkowych cząstkowych metodę przekształceń całkowych można stosować kilkakrotnie, w odniesieniu do każdej zmiennej.

4.3.3 Metoda różnic skończonych

W metodzie różnic skończonych zastępuje się pochodne przez ilorazy różnicowe, przechodząc w ten sposób od równań różniczkowych do równań różnicowych [45]. Zagadnienie brzegowe sprowadza się do układu liniowych równań algebraicznych, a po ich rozwiązaniu otrzymuje się przybliżone rozwiązanie problemu. Ideę tej metody łatwo można wyjaśnić na przykładzie zagadnienia dwuwymiarowego w układzie o współrzędnych prostokątnych. Na rysunku 4.1a przedstawiono regularną siatkę o skoku równym h . Węzły siatki są równe

$$x_i = x_0 + ih, \quad y_j = y_0 + jh \quad i,j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (4.16)$$

przy czym x_0, y_0 oznaczają współrzędne punktu odniesienia. Brzeg obszaru aproksymuje się linią łamaną, przechodzącą przez węzły siatki (rys.4.1b).



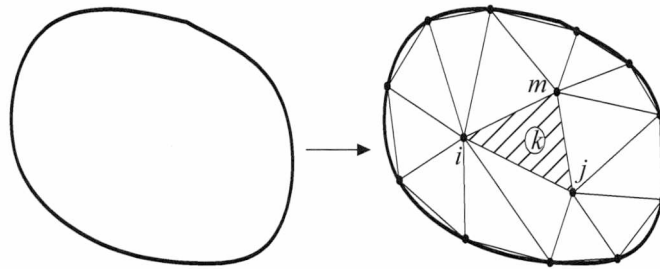
Rys.4.1 Rozpatrywany dwuwymiarowy obszar we współrzędnych prostokątnych

a) obszar pokryty siatką regularną, b) węzeł wewnętrzny obszaru

Rozpatrując węzeł wewnętrzny (x_i, y_i) obszaru, którego brzegiem jest linia łamana, oznacza się wartość funkcji $u(x, y)$ w tym węźle. Pochodne cząstkowe funkcji $u(x, y)$ zastępuje się przez ilorazy różnicowe. W rezultacie otrzymuje się układ równań algebraicznych, które po rozwiązaniu dają wartości funkcji u w węzłach wewnętrznych. Metoda różnic skończonych jest prostą metodą pod względem matematycznym, jej wadą natomiast jest stosunkowo mała dokładność i trudność oszacowania błędu.

4.3.4 Metoda elementów skończonych

Metoda elementów skończonych znajduje zastosowanie przy rozwiązywaniu zagadnień brzegowych dla równań różniczkowych typu eliptycznego, sprowadzając problem do układu równań algebraicznych, z których po rozwiązaniu otrzymuje się przybliżone rozwiązanie. Metoda ta pozwala również znaleźć przybliżone rozwiązanie równań różniczkowych cząstkowych typu parabolicznego, jednakże w tym przypadku problem sprowadza się do układu równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu [45]. W metodzie tej obszar S dzieli się na podobszary nazywane elementami skończonymi, lub wręcz elementami. Kształt tych elementów może być różny. Najczęściej stosowane są elementy w postaci trójkątów, które pozwalają uwzględnić najbardziej skomplikowany kształt brzegu obszaru (rys.4.2), choć dla prostych obszarów przybierają one kształt prostokątów.



Rys.4.2. Podział obszaru na elementy skończone o postaci trójkątów

Obszar elementu k oznacza się symbolem S_k ($k = 1, 2, \dots$). Funkcję $u(x, y)$ w elemencie S_k o wierzchołkach i, j, m aproksymuje się funkcją liniową

$$u^{(k)} = a + bx + cy, \quad (x, y) \in S_k, \quad (4.17)$$

gdzie a, b, c są stałymi.

Wyznaczając te stałe w zależności od wartości u_i, u_j, u_m funkcji u otrzymuje się równanie macierzowe

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_m \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

a po obliczeniu stałych a, b, c i po podstawieniu do równania (4.17) znajduje się

$$u^{(k)} = N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m, \quad (4.19)$$

gdzie

$$N_l = \frac{1}{2\Delta} (a_l + b_l x + c_l y), \quad l = i, j, m \quad (4.20)$$

przedstawia funkcję kształtu, przy czym Δ jest równe polu rozpatrywanego elementu.

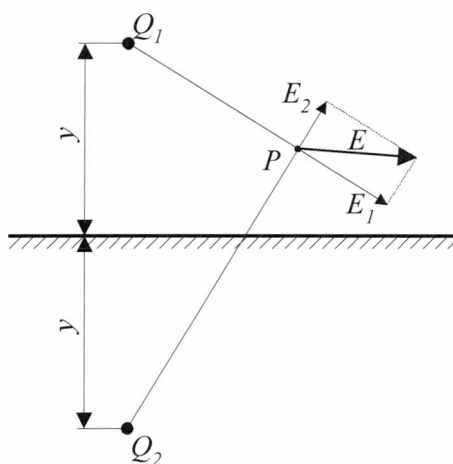
Funkcje kształtu zależą tylko od współrzędnych wierzchołków rozpatrywanego elementu. Przyjęta aproksymacja funkcji $u(x, y)$ zapewnia ciągłość funkcji aproksymowanej w całym obszarze S . Wynika to stąd, że funkcja aproksymowana zmienia się liniowo wzdłuż boków wspólnych dla dwóch różnych elementów.

Metoda ta jest stosowana w wielu programach komputerowych do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu maszyn i urządzeń elektrycznych (ANSYS, Maxwell QuickField, itp.).

4.3.5 Wykorzystanie metody odbić zwierciadlanych i superpozycji w obliczeniach pola elektromagnetycznego pod liniami WN

Metoda ta została w pracy szerzej opisana ze względu na fakt, iż program komputerowy MAH wykonany w ramach niniejszej pracy doktorskiej (punkt 6.2), został oparty na tej metodzie. Idea i wzory tej metody, przedstawiane w literaturze przedmiotowej w sposób bardzo ogólny [46,47,48], zostały w tym rozdziale rozpisane krok po kroku i dostosowane do sześciu torów linii wysokiego napięcia, których to symulację rozkładu pola elektromagnetycznego umożliwia program MAH.

Zasadę superpozycji w odniesieniu do wektora natężenia pola elektrycznego E można sformułować następująco: natężenie pola elektrycznego, wywołane w rozpatrywanym punkcie przestrzeni przez sumę ładunków elektrycznych, jest równe sumie geometrycznej poszczególnych natężeń pola, wywołanych w tym punkcie przez każdy ładunek oddzielnie. Pole elektryczne wokół przęsła jest więc sumą pól pochodzących od wszystkich przewodów linii. Gdy chcemy wyznaczyć pole elektryczne wytworzone przez ciała naładowane, które znajdują się w środowisku niejednorodnym, np. w pobliżu ziemi, stosujemy metodę odbicia lustrzanego (zwierciadlanego). W metodzie tej środowisko niejednorodne o różnych przenikalnościach elektrycznych, w których umieszczone są ciała naładowane, można zastąpić środowiskiem jednorodnym, wprowadzając odpowiednie ładunki fikcyjne (rys. 4.3).



Rys.4.3. Przewód linii i jego lustrzane odbicie; Q_1 – ładunek zgromadzony na przewodzie rzeczywistym, Q_2 – ładunek zgromadzony na wprowadzonym przewodzie fikcyjnym, P – punkt, w którym liczone jest natężenie pola elektrycznego, E_1 – natężenie pola elektrycznego od przewodu rzeczywistego, E_2 – natężenie pola elektrycznego od przewodu odbitego, E – wypadkowe natężenie pola elektrycznego, y – wysokość zawieszenia przewodu

Przy wprowadzaniu ładunków fikcyjnych musi być spełniony warunek równości składowych stycznych wektora natężenia pola elektrycznego i składowych normalnych wektora indukcji elektrycznej na granicy dwóch środowisk. Układ przewodów z

rozpatrywanego przęsła będzie, więc w obliczeniach pola składał się z przewodów rzeczywistych i odbitych względem poziomu $y = 0$.

W programach opartych na tej metodzie korzysta się również z założenia, że przewód przedstawiony w postaci parabolicznej jest zastąpiony przez przewód prostoliniowy nieskończenie długi, umieszczony na wysokości odpowiadającej rzeczywistej wysokości przewodu w danym punkcie przęsła.

Przy takim uproszczeniu wartość natężenia pola elektrycznego można obliczyć ze wzoru

$$E = \frac{\tau}{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r}, \quad (4.21)$$

w którym: τ - gęstość liniowa ładunku, ε_0 - przenikalność elektryczna próżni, $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m, r - odległość przewodu od punktu, w którym liczone jest natężenie pola.

Wzór ten jest podstawą do obliczeń natężenia pola elektrycznego E w przestrzeni wokół przęsła linii. Każdy przewód posiadający potencjał względem ziemi można scharakteryzować przy pomocy części rzeczywistej i urojonej napięcia oraz jego średnicy. Przewód taki ma pewien ładunek Q , którego określenie jest niezbędne do obliczenia pola elektrycznego [46,47]. Ładunek Q jest zdefiniowany przez napięcie i współczynniki potencjalne przewodu. Dla układu przewodów, z jakim mamy do czynienia w przęśle linii, wzór na ładunek przewodu można zapisać w postaci macierzowej

$$[Q] = [P]^{-1} \cdot [V]. \quad (4.22)$$

Powyższe równanie można rozbić na równania części rzeczywistej i urojonej ładunku przewodów

$$[Q_{Re}] = [P]^{-1} \cdot [V_{Re}], \quad (4.23)$$

$$[Q_{Im}] = [P]^{-1} \cdot [V_{Im}], \quad (4.24)$$

gdzie:

$[Q_{Re}]$ - macierz części rzeczywistych ładunków przewodów,

$[Q_{Im}]$ - macierz części urojonych ładunków przewodów;

$[V_{Re}]$ - macierz części rzeczywistych napięcia przewodów,

$[V_{Im}]$ - macierz części urojonych napięcia przewodów,

$[P]$ - macierz współczynników potencjalnych.

Macierz współczynników potencjalnych $[P]$ jest macierzą kwadratową symetryczną o rozmiarze równym liczbie przewodów roboczych i odgromowych w rozpatrywanym przęśle. Elementy macierzy $[P]$ są określone wzorami (4.25) i (4.26)

$$P_{aa} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln \left(\frac{4y_a}{d_a} \right), \quad (4.25)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \ln \left(\frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2} \right), \quad (4.26)$$

w których: x_a, y_b - współrzędne przewodu a, x_b, y_b - współrzędne przewodu b, P_{ab} - wzajemny współczynnik potencjalny przewodów a i b, y_a - wysokość przewodu nad ziemią, d_a - średnica przewodu w [m], P_{aa} - własny współczynnik potencjalny przewodu a,

Macierz potencjałów przewodów $[V]$ otrzymuje się przez przemnożenie wartości skutecznej napięcia międzyfazowego przez wartość $\sqrt{\frac{2}{3}}$ i rozdział na wartość rzeczywistą i urojoną, zgodnie z zależnościami

$$V_{Re} = U \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \cos(\omega t + \psi_u), \quad (4.27)$$

$$V_{Im} = U \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.28)$$

gdzie ψ_u – kąty (fazy) początkowe napięcia fazowego.

Ponieważ wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego nie zależy od czasu, dla uproszczenia zakłada się, że $t = 0$. Po dokonaniu obliczeń otrzymuje się macierze kolumnowe $[V_{Re}]$ i $[V_{Im}]$ o wielkości równej ilości przewodów w przęśle. Wektor natężenia pola elektrycznego w punkcie o współrzędnych x, y pochodzący od przewodu „a” można wyrazić wzorem

$$\mathbf{E}_a = \mathbf{u}_x \cdot E_{xa} + \mathbf{u}_y \cdot E_{ya}, \quad (4.29)$$

gdzie: $\mathbf{u}_x$ - wektor jednostkowy w osi poziomej, $\mathbf{u}_y$ - wektor jednostkowy w osi pionowej.

Wartości składowych pola elektrycznego E_x, E_y od przewodu a, w punkcie obliczeniowym P o współrzędnych (x, y) są określone wzorami

$$E_{xa} = \frac{(Q_{Re(a)} + Q_{Im(a)}) \cdot (x - x_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon [(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2]} - \frac{(Q_{Re(a)} + Q_{Im(a)}) \cdot (x - x_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon [(x_a - x)^2 + (y_a + y)^2]} \quad (4.30)$$

$$E_{ya} = \frac{(Q_{Re(a)} + Q_{Im(a)}) \cdot (y - y_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon [(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2]} - \frac{(Q_{Re(a)} + Q_{Im(a)}) \cdot (y + y_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon [(x_a - x)^2 + (y_a + y)^2]} \quad (4.31)$$

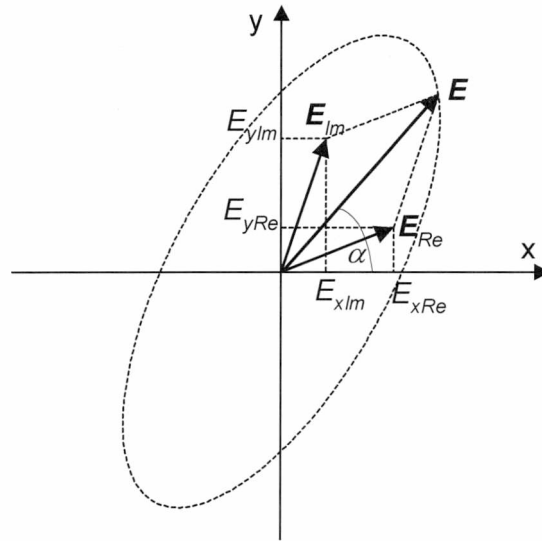
Poziome i pionowe składowe pola elektrycznego w punkcie P od wszystkich przewodów liczy się jako sumę pól

$$E_x = \sum_{k=1}^6 E_{xk} = E_{xRe} + jE_{xIm}, \quad (4.32)$$

$$E_y = \sum_{k=1}^6 E_{yk} = E_{yRe} + jE_{yIm}, \quad (4.33)$$

gdzie: E_{xRe} , E_{xIm} - część rzeczywista i urojona składowej poziomej pola pochodzącego od danego przewodu, E_{yRe} , E_{yIm} - część rzeczywista i urojona składowej pionowej pola pochodzącego od danego przewodu.

Zależności między powyższymi wielkościami zostały przedstawione na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Rozkład wektora pola elektrycznego w danym punkcie pod przesłem linii

Wektor natężenia pola E_α jest funkcją współrzędnych położenia punktu obliczeniowego $P(x,y)$ pod linią oraz czasu t . Wektor ten porusza się wokół osi swego zaczepienia, a jego geometryczny koniec porusza się po elipsie. Wartość wektora E_α określona jest wzorem [46]

$$E_\alpha = \sqrt{(E_{yIm} \sin \alpha + E_{xIm} \cos \alpha)^2 + (E_{yRe} \sin \alpha + E_{xRe} \cos \alpha)^2} \quad (4.34)$$

W celu wyznaczenia wartości maksymalnej i minimalnej natężenia pola elektrycznego, będącej jednocześnie najdłuższą i najkrótszą półosią elipsy pola w danym punkcie P, należy obliczyć pochodną natężenia pola po kącie α i przyrównać ją do zera [46]

$$dE_\alpha^2 / d\alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad 2 \cdot (E_{yIm} \sin \alpha + E_{xIm} \cos \alpha) \cdot (E_{yRe} \sin \alpha + E_{xRe} \cos \alpha) + 2 \cdot (E_{yRe} \sin \alpha + E_{xRe} \cos \alpha) \cdot (E_{yIm} \sin \alpha + E_{xIm} \cos \alpha) = 0 \quad (4.35)$$

Wyrażenie (4.35) można, po podzieleniu przez $\cos^2 \alpha$, zapisać jako równanie kwadratowe względem tangensa kąta α

$$\tan^2 \alpha (E_{yRe} \cdot E_{xRe} + E_{yIm} \cdot E_{xIm}) + \tan^2 \alpha (E_{yRe}^2 \cdot E_{xRe}^2 + E_{yIm}^2 \cdot E_{xIm}^2) - (E_{yRe} \cdot E_{xRe} + E_{yIm} \cdot E_{xIm}) = 0 \quad (4.36)$$

Rozwiązując to równanie otrzymuje się dwa kąty α_1 i α_2 . Odpowiadają one kątom odchylenia od poziomu wektora maksymalnej i minimalnej wartości natężenia pola elektrycznego w punkcie P . W celu obliczenia wartości największej i najmniejszej pola elektrycznego należy podstawić wyznaczone kąty do równania (4.34), co pozwala uzyskać natężenia pola $E_{\alpha 1}$ i $E_{\alpha 2}$.

Wartość chwilową pola elektrycznego w punkcie P można zapisać wzorem

$$E = E_{\alpha 1}^2 \cos^2(\omega t + \alpha_1) + E_{\alpha 2}^2 \cos^2(\omega t + \alpha_2), \quad (4.37)$$

natomiast wartość skuteczną tego pola elektrycznego oblicza się jako

$$E = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T E^2 dt}. \quad (4.38)$$

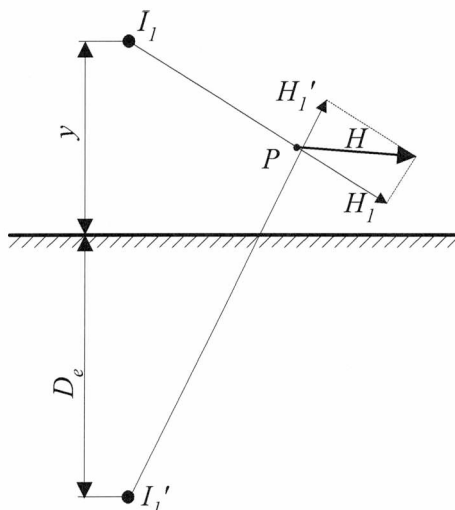
Po podstawieniu równania (4.37) do wzoru (4.38) i scałkowaniu go, otrzymuje się wyrażenie końcowe określające wartość skuteczną pola elektrycznego w punkcie $P(x,y)$

$$E = \sqrt{\frac{E_{\alpha 1}^2 + E_{\alpha 2}^2}{2}}. \quad (4.39)$$

Obliczenia natężenia pola magnetycznego są podobne do obliczeń pola elektrycznego, przedstawionych powyżej. Różnica występuje w metodzie odbicia lustrzanego, dla której przy obliczaniu pola elektrycznego przewody dodatkowe umieszcza się w odległości równej wysokości ich zawieszenia nad poziomem ziemi, a przy obliczeniach pola magnetycznego - w odległości D_e (dla $\rho = 100 \Omega m$ i $f = 50 \text{ Hz}$, $D_e = 933,4 \text{ m}$) (rys.4.5) obliczonej z zależności [46]

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (4.40)$$

gdzie: ρ - rezystywność gruntu, f - częstotliwość sieci.



Rys.4.5. Przewód linii i jego lustrzane odbicie; I_l – natężenie prądu w przewodzie rzeczywistym, I_l' – natężenie prądu w przewodzie fikcyjnym, P – punkt, w którym liczone jest natężenie pola magnetycznego, H_l – natężenie pola magnetycznego od przewodu rzeczywistego, H_l' – natężenie pola magnetycznego od przewodu odbitego, H – wypadkowe natężenie pola magnetycznego

W celu obliczenia natężenia pola magnetycznego zastępuje się przewód pręśłą, układający się według krzywej hiperbolicznej, przewodem prostoliniowym, nieskończenie długim, umieszczonym na odpowiedniej wysokości. Wartość natężenia pola magnetycznego od takiego przewodu oblicza się ze wzoru

$$H = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (4.41)$$

gdzie: H - natężenie pola magnetycznego, i - prąd płynący w przewodzie, r - odległość przewodu do punktu, w którym liczone jest natężenie pola.

Pole magnetyczne w punkcie o współrzędnych x, y pochodzące od przewodu a można wyrazić zależnością

$$\mathbf{H}_a = \mathbf{u}_x \cdot H_{xa} + \mathbf{u}_y \cdot H_{ya}, \quad (4.42)$$

w której: $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y$ - wektory jednostkowe w osi poziomej i pionowej, H_{xa}, H_{ya} - składowe poziome i pionowe pola magnetycznego określone przez wyrażenia

$$H_{xa} = \frac{(i_{Re(a)} + i_{Im(a)}) \cdot (y_a - y)}{2 \cdot \pi [(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2]} - \frac{(i_{Re(a)} + i_{Im(a)}) \cdot (y - D_e)}{2 \cdot \pi [(x_a - x)^2 + (y + D_e)^2]} \quad (4.43)$$

$$H_{ya} = \frac{(i_{Re(a)} + i_{Im(a)}) \cdot (x - x_a)}{2 \cdot \pi [(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2]} - \frac{(i_{Re(a)} + i_{Im(a)}) \cdot (x - x_a)}{2 \cdot \pi [(x_a - x)^2 + (y + D_e)^2]} \quad (4.44)$$

Aby uzyskać część rzeczywistą i urojoną wartości maksymalnej prądu, znając jego wartość skuteczną I , korzysta się ze wzorów [46]

$$i_{Re} = I \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi + \psi_i), \quad (4.45)$$

$$i_{Im} = I \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi + \psi_i), \quad (4.46)$$

w których: ψ_i – kąt (faza) początkowa prądu, φ – kąt przesunięcia fazowego między napięciem i prądem.

Dalsze postępowanie jest analogiczne jak dla pola elektrycznego. Oblicza się kolejno:

- składowe poziome i pionowe natężenia pola magnetycznego,
- wartości kątów α_1 i α_2 dla wartości maksymalnej i minimalnej natężenia pola magnetycznego w punkcie przez rozwiązanie równania kwadratowego,
- wartości największego i najmniejszego natężenia pola magnetycznego w punkcie P podstawiając otrzymane wartości α_1 i α_2 do wzoru (4.47)

$$H_\alpha = \sqrt{(H_{yIm} \sin \alpha + H_{xIm} \cos \alpha)^2 + (H_{yRe} \sin \alpha + H_{xRe} \cos \alpha)^2} \quad (4.47)$$

- wartość skuteczną pola magnetycznego

$$H = \sqrt{\frac{H_{\alpha 1}^2 + H_{\alpha 2}^2}{2}}. \quad (4.48)$$

Opisany algorytm został użyty w programie MAH (punkt 6.2) do obliczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w sąsiedztwie linii elektroenergetycznych o liczbie torów od 1 do 6.

5. Pomiarowa identyfikacja rozkładu pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii wysokiego napięcia

5.1. Metodyka prowadzenia pomiarów

Pomiary i obliczenia pól o częstotliwości 50 Hz, powstających między innymi wokół obiektów elektroenergetycznych (w tym w otoczeniu linii elektroenergetycznych), są zaliczane do badań w tak zwanym polu bliskim (rozdz. 2.1). W związku z tym obie składowe pola: elektryczną (E) i magnetyczną (H) można rozpatrywać (mierzyć lub obliczać) oddzielnie. Pola o większych częstotliwościach posiadają inne właściwości i oddzielne rozpatrywanie obu składowych nie jest możliwe. W celu przeanalizowania możliwości negatywnego oddziaływania linii elektroenergetycznych na środowisko sporządza się, w określonych przypadkach, jeden z następujących dokumentów:

- raport oddziaływania na środowisko,
- analizę porealizacyjną,
- ekspertyzę techniczną,
- przegląd ekologiczny.

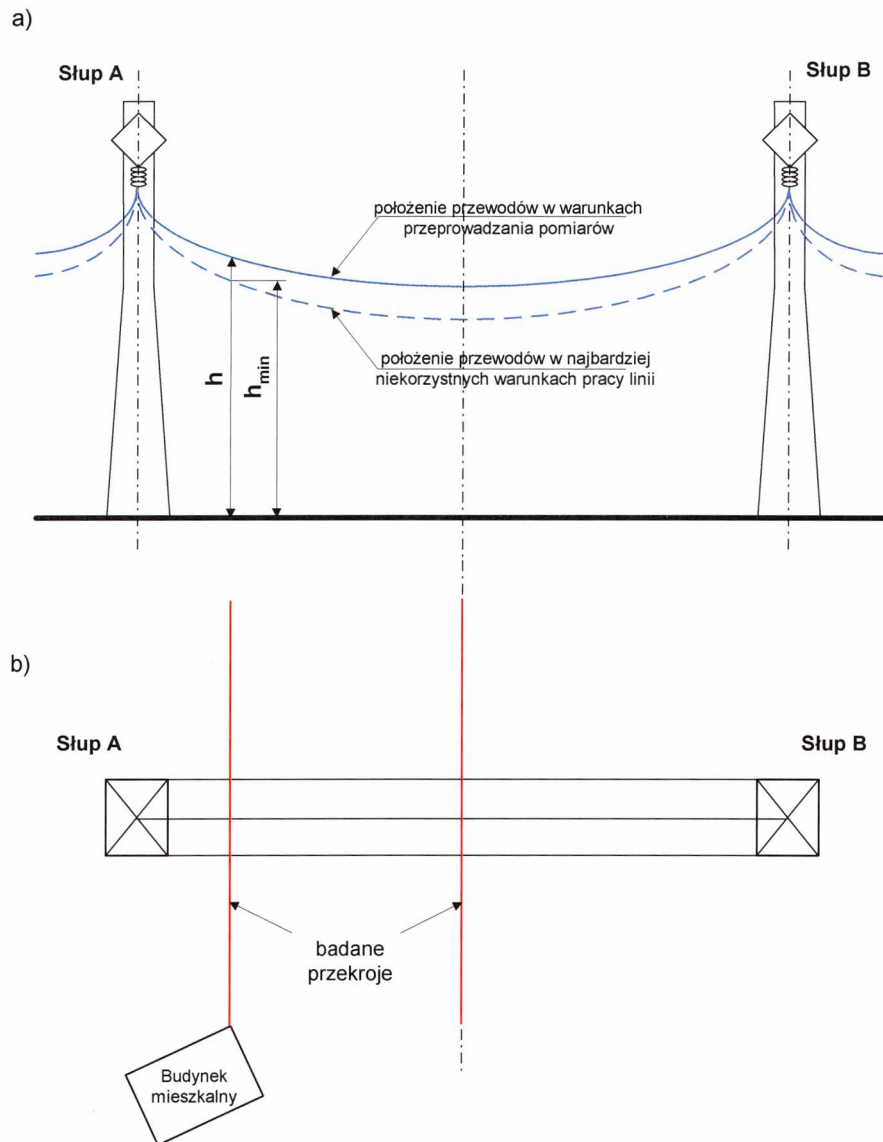
Jednym z najważniejszych celów sporządzania tych dokumentów jest analiza możliwości negatywnego oddziaływania na środowisko eksploatowanej linii napowietrznej wysokiego napięcia. W opracowaniach tych zwykle rozpatrywane są dwa aspekty: lokalizacyjny i techniczny.

Aspekt lokalizacyjny wymaga ustalenia, czy analizowana linia znajduje się w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego wraz z wyznaczoną „strefą ochronną”, natomiast aspekt techniczny polega na sprawdzeniu, czy analizowana linia spełnia wymagania aktualnych norm i przepisów, przede wszystkim dotyczących ochrony środowiska. W konsekwencji, w ramach wymienionych wyżej opracowań należy zidentyfikować wszystkie czynniki fizyczne wytwarzane i emitowane przez eksploatowaną linię elektroenergetyczną. Ich zidentyfikowanie stwarza podstawę do przeprowadzenia oceny oddziaływania na środowisko analizowanej instalacji, przede wszystkim zaś oceny potencjalnego niebezpieczeństwa dla ludzi i mienia, czy ewentualnego pogorszenia warunków zdrowotnych ludzi przebywających w jej sąsiedztwie. Oprócz zagrożeń związanych z sytuacjami awaryjnymi linia elektroenergetyczna wysokiego napięcia jest źródłem powstawania:

- pola elektrycznego,
- pola magnetycznego,
- hałasu,
- zakłóceń radioelektrycznych.

Tak więc w opracowaniach ekologicznych powinny znajdować się pomiary (lub obliczenia, gdy jest to projekt linii) rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią. Pomiary te (obliczenia) należy wykonywać w przekroju poprzecznym linii, w

którym odległość przewodów fazowych od ziemi jest najmniejsza. Dla przęsła o takich samych słupach elektroenergetycznych i przy płaskim obszarze pod linią, najmniejsza odległość przewodów fazowych od ziemi wystąpi w jego środku [48]. Gdy jeden z powyższych warunków nie zostanie spełniony (przęsło będzie pochyłe, lub nie będzie płaskiego ukształtowania terenu pod linią) to najmniejszą odległość przewodów fazowych od ziemi należy wyznaczyć korzystając z profilu przęsła. Jeżeli natomiast w pobliżu linii znajduje się zabudowa mieszkalna, to pomiary (obliczenia) natężenia obu składowych pola przeprowadza się również w tych przekrojach linii, w których zbliża się ona najbardziej do zabudowy mieszkalnej (rys.5.1).



Rys.5.1. Przekrój linii w którym identyfikowana jest wartość maksymalnego natężenia pola elektrycznego i magnetycznego; a) widok przęsła z boku, b) widok przęsła z góry; h – wysokość przewodu w danym punkcie pomiarowym, w chwili przeprowadzania pomiarów, h_{min} – minimalna wysokość przewodów w danym punkcie pomiarowym, która wystąpi przy ich największym zwisie

Jednym z problemów, na który napotykają autorzy dokumentacji ekologicznej jest zidentyfikowanie (zgodnie z wymogami [6]) spodziewanej wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii oraz określenie szerokości obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć wartość 1 kV/m. W tym celu wykonywane są pomiary (obliczenia) natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Trzeba jednak zauważyć, że pomiary te wykonuje się przy określonych warunkach pracy linii (określone napięcie robocze, obciążenie i zwis linii), w których praktycznie nigdy nie należy spodziewać się maksymalnych wartości, zarówno natężenia pola elektrycznego E , natężenia pola magnetycznego H , jak i szerokości obszaru, w którym $E > 1$ kV/m.

Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wystąpią bowiem w sytuacji, w której odległość przewodów roboczych linii od ziemi będzie najmniejsza oraz gdy obciążenie i napięcie linii przyjmie wartości maksymalne (dla linii 1 i 2-torowych). W przypadku linii o liczbie torów większej od 2, gdzie dolne tory mogą kompensować pole elektromagnetyczne generowane przez tory górne, aby móc zidentyfikować wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego należy przeanalizować wszystkie przypadki wyłączeń jednego, lub nawet kilku torów linii. W takiej sytuacji wartości zmierzone w określonych warunkach pracy linii należy przeliczyć, zgodnie z rozporządzeniem [6], na wartości maksymalne, co w przypadku linii wielotorowych staje się istotnym problemem. Do tego celu należy wykorzystać specjalistyczne programy komputerowe, których dla linii wielotorowych, wielonapięciowych brakuje na polskim rynku.

W ramach realizacji rozprawy dokonano pomiarów rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w wybranych przekrojach poprzecznych różnych typów linii. W niektórych przypadkach były to przekroje, w których odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza, w innych przypadkach przeprowadzono je w kilku różnych przekrojach (dla różnych odległości przewodów fazowych od ziemi), a czasami w przekrojach, gdzie pozwalały na to warunki pod linią (zadrzewienie, ukształtowanie terenu, itp.). Uzyskane wyniki pomiarów posłużyły następnie do weryfikacji opracowanego modelu matematycznego i opartego na nim programu komputerowego do obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia.

Zgodnie z [6] wszystkie pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w danym przekroju poprzecznym przeszła wykonano na wysokości 2 m.

5.2. Charakterystyka użytych przyrządów pomiarowych

Podstawowym przyrządem, którego użyto do pomiarów natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej (później przeliczonej na wartości natężenia pola magnetycznego) był EMDEX II. Stanowi on wraz z systemem LINDA (rys.5.2) oraz oprogramowaniem EMCALC™95 multifunkcyjny system mierzenia pola

elektromagnetycznego. System daje możliwość rejestracji pomiarów według dwóch kryteriów: czasu lub drogi. W pierwszym przypadku można dokonywać pomiaru z minimalnym czasem próbkowania 1,5 sekundy. W drugim przypadku pomiar z zastosowaniem koła LINDA pozwala na rejestrację pomiarów co 1 stopę (0,3048 m). Przyrząd posiada pamięć wewnętrzną 512Kb, a komunikacja z komputerem odbywa się za pomocą złącza równoległego. Wyniki pomiarów prezentowane są w postaci graficznej: wykresów (w funkcji czasu lub drogi), map przestrzennych lub konturowych. Rejestracji podlega również czas rozpoczęcia i zakończenia pomiaru. Dla systemu LINDA podczas pomiarów przy każdej zmianie kierunku poruszania się wprowadza się do pamięci kąt zmiany drogi, orientując go co 45 stopni lub według umieszczonego na kole LINDA kompasu.



Rys. 5.2. Miernik do pomiaru natężenia pola magnetycznego typu EMDEX II wraz z kołem LINDA

Przyrząd posiada wyświetlacz ciekłokrystaliczny, na którym wyświetlana jest bieżąca wartość indukcji magnetycznej w mT (militesle) lub mG (miligaussy). Jest ona wypadkową trzech zmierzonych wartości w trzech prostopadłych do siebie płaszczyznach X, Y, Z . Taki sposób pomiaru realizowany jest za pomocą trzech ustrojów pomiarowych umieszczonych w prostopadłych do siebie płaszczyznach. Przyrząd umożliwia przeprowadzenie analizy każdej składowej x, y, z oddzielnie, a wartość skuteczną indukcji magnetycznej B oblicza się ze wzoru

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (5.1)$$

gdzie B_x - indukcja w płaszczyźnie x , B_y - indukcja w płaszczyźnie y , B_z - indukcja w płaszczyźnie z .

Otrzymane wyniki pomiarów indukcji magnetycznej przelicza się na natężenie pola magnetycznego według zależności

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad (5.2)$$

gdzie μ - przenikalność magnetyczna środowiska.

W przypadku pomiaru natężenia pola elektrycznego, miernik EMDEX II umieszczany jest w sondzie znajdującej się na końcu specjalnego wysięgnika, który zapewnia eliminację zakłóceń badanego pola elektrycznego przez osobę wykonującą pomiary. Taka konstrukcja przyrządu podyktowana jest wymaganiami Polskiej Normy [49].

Do pomiarów rozkładu indukcji magnetycznej użyto również przyrządu typu HOLADAY HI-3627 o dokładności pomiarów $\pm 10\%$. Główną częścią tego analogowego miernika, przedstawionego na rysunku 5.3, jest sonda pomiarowa w kształcie kuli z przymocowaną rączką do jej trzymania. Zakres pracy miernika zawiera się w granicach od $0,01 \mu\text{T}$ do 2 T .



Rys. 5.3. Miernik do pomiaru indukcji pola magnetycznego typu HOLADAY HI-3627

Do pomiaru natężenia pola elektrycznego, oprócz miernika EMDEX II, wykorzystano także przyrząd TC-1 (rys.5.4), który składa się z sondy pomiarowej w kształcie kuli, dwuczęściowego wysięgnika oraz modułu odczytowego. Wynik pomiaru wyświetlany jest na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym w kV/m . Podobnie, jak w przyrządzie EMDEX II, dla

zapewnienia eliminacji zakłóceń badanego pola elektrycznego przez osobę wykonującą pomiary, również w tym przypadku czujnik pomiarowy znajduje się na dwumetrowym wysięgniku. Dla wygody użytkownika moduł odczytowy jest przymocowany do wysięgnika za pomocą zatrzasku.

Parametry miernika:

Zakres pomiarowy	do 20,0 kV/m
Rozdzielczość	0,01 kV/m
Dokładność	$\pm(2\%+0,02 \text{ kV/m})$
Łumienie sygnału 100 Hz	>25 dB
Łumienie wyższych harmoniczných	>40 dB
Zakres temperatur pracy	-10...+30 °C
Długość wysięgnika	2 x 1m
Średnica kuli czujnika	90 mm
Wymiary modułu pomiarowego	75x120x30 mm



Rys. 5.4. Miernik do pomiaru natężenia pola elektrycznego typu TC 1 WiGSoft

Pomiary wysokości przewodów linii napowietrznych od ziemi w danym przekroju pomiarowym wykonywane były przy użyciu przyrządu „SupaRule” 600E (rys.5.5). Zgodnie ze specyfikacją producenta przyrząd ten posiada możliwość pomiaru wysokości zawieszenia przewodów od 3 do 23 m przy dokładności $0,5\% \pm 2$ cyfry. Jego działanie polega na wysyłaniu ultradźwięków w kierunku przewodów i pomiarze czasu powrotu sygnału. Ponieważ prędkość dźwięku zmienia się w zależności od temperatury otoczenia, przyrząd

ma wbudowany czujnik, który monitoruje tę temperaturę. Po wykonaniu pomiarów wysokości przewodów w danym przekroju pomiarowym, w celu weryfikacji wskazań przyrządu, obliczano zwis przewodów w opracowanym programie komputerowym MAH (po jego pozytywnej weryfikacji) i porównywano wyniki otrzymane z obliczeń oraz pomiarów. Uzyskane wyniki obliczeń potwierdziły poprawność wskazań przyrządu.



Rys. 5.5. Miernik do pomiaru wysokości typu SupaRule - Model 600E

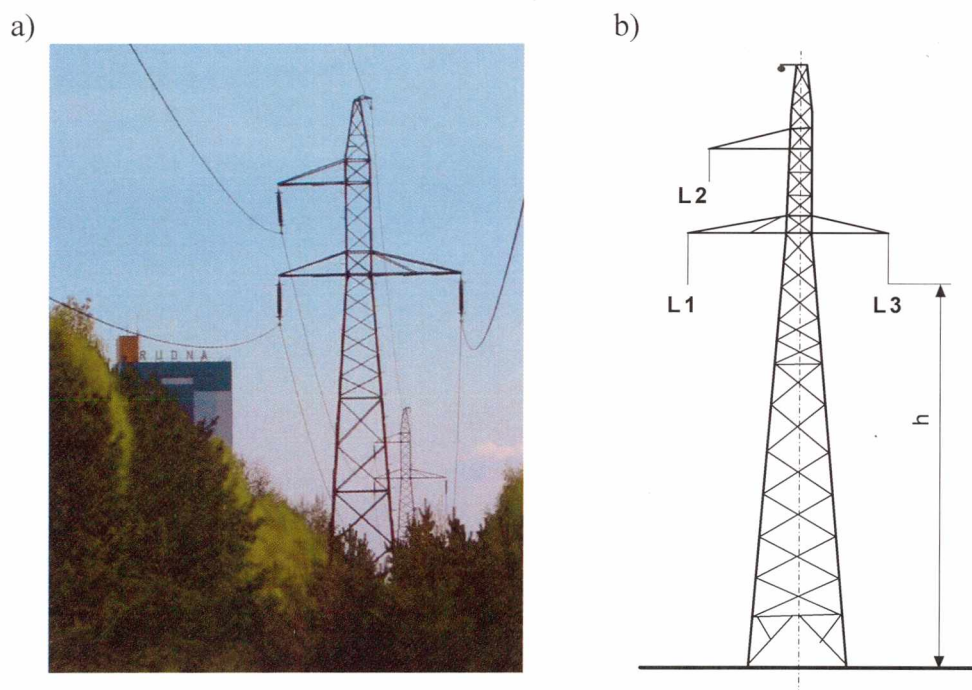
Dla weryfikacji opracowanego w pracy modelu matematyczno-fizycznego i opartego na nim programu komputerowego do obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia wynikami przeprowadzonych badań, niezbędna była również znajomość wartości natężenia prądu i napięcia roboczego linii w chwili wykonywania pomiarów. Dane te uzyskano w ramach nawiązanej współpracy z zakładami, które eksploatowały linie. Dla linii o napięciu 110 kV były to Zakłady Energetyczne, dla linii o napięciu 220 i 400 kV były to Polskie Sieci Elektroenergetyczne, natomiast dla linii eksploatowanych w Niemczech – firma RWE Energie.

5.3. Badanie rozkładów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 110 kV

Badania empiryczne rozkładów pól elektromagnetycznych przeprowadzono dla oceny stanu faktycznego ich rzeczywistych rozkładów w zależności od liczby torów i konfiguracji przewodów fazowych eksploatowanych linii wysokiego napięcia oraz w celu ich wykorzystania do weryfikacji poprawności i oceny użyteczności w praktyce opracowanego modelu i programu komputerowego. Pomiarami objęto linie WN o wszystkich możliwych konfiguracjach i poziomach napięć występujących na terenie kraju. Wobec dotychczasowego braku w kraju linii wielotorowych, wielonapięciowych, pomiary dla tego typu linii przeprowadzono na terenie Niemiec.

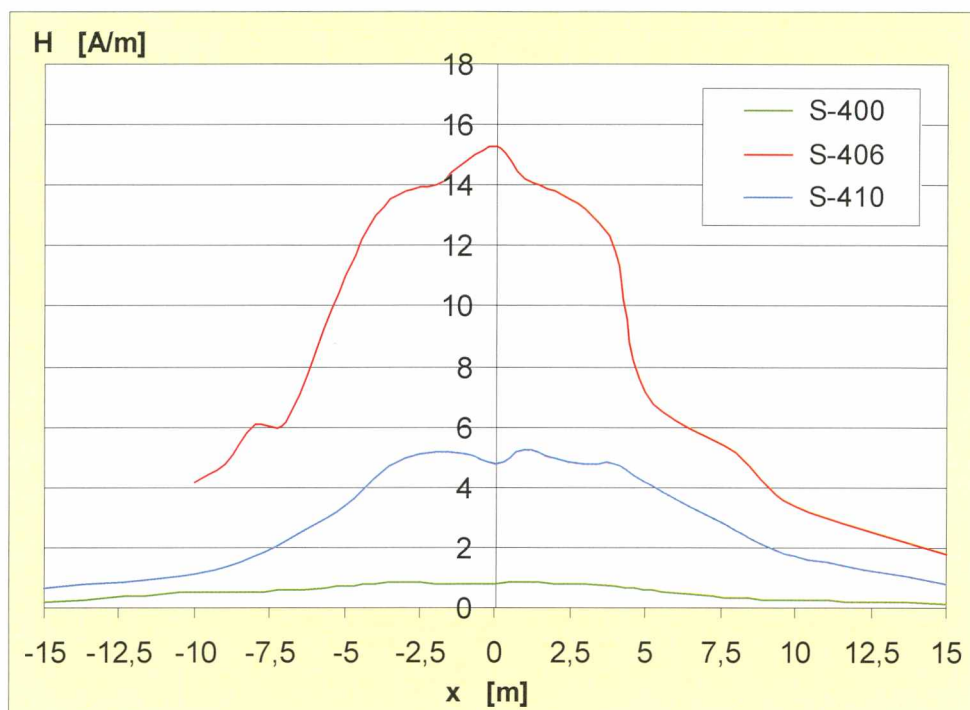
Przykładowe wyniki pomiarów rozkładów pól elektromagnetycznych pod jednotorowymi liniami o napięciu 110 kV i przewodach ułożonych w kształcie delta (rys.5.6) przedstawiono na rysunkach 5.7 i 5.8 w postaci wykresów $H = f(x)$ i $E = f(x)$.

Szczegółowe wyniki pomiarów, warunki ich wykonywania oraz charakterystyki poszczególnych linii zestawiono w punktach 1.1 ÷ 1.3 załącznika 1.

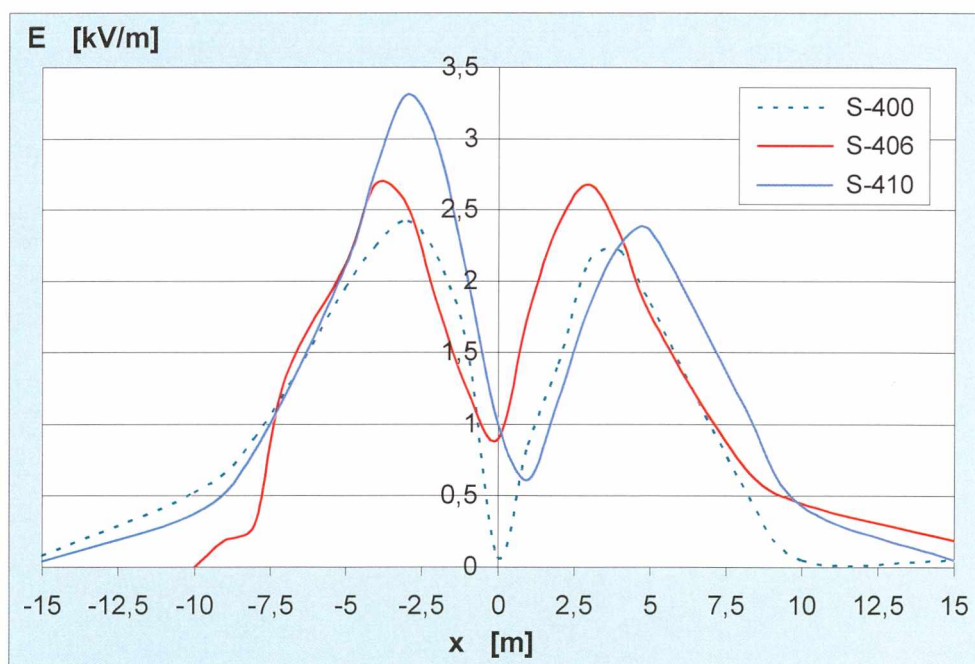


Rys. 5.6. Zdjęcie (a) oraz sylwetka słupa (b) badanych linii o napięciu 110 kV i przewodach ułożonych w kształcie delta

Wszystkie wykresy $E = f(x)$ i $H = f(x)$ zostały przedstawione na rysunkach w taki sposób, iż oś symetrii słupa elektroenergetycznego jest współrzędną $x = 0$, dodatnia strona osi wykresu odpowiada rozkładowi pola pod prawą stroną słupa elektroenergetycznego, natomiast ujemna strona charakterystyki odpowiada rozkładowi pola po lewej stronie słupa.



Rys. 5.7. Rozkład natężenia pola magnetycznego na wysokości 2 m w wybranych przekrojach poprzecznych pręseł w trzech liniach 110 kV o przewodach ułożonych w kształcie delty i obciążeniach prądami: 18 A (S-400), 380 A (S-406), 133 A (S-410)

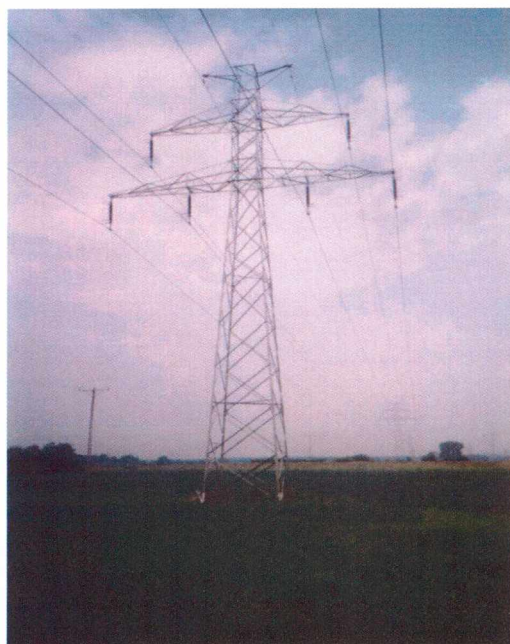


Rys. 5.8. Rozkład natężenia pola elektrycznego na wysokości 2 m w wybranych przekrojach poprzecznych pręseł w trzech liniach 110 kV (S-400, S-406, S-410) o przewodach ułożonych w kształcie delty

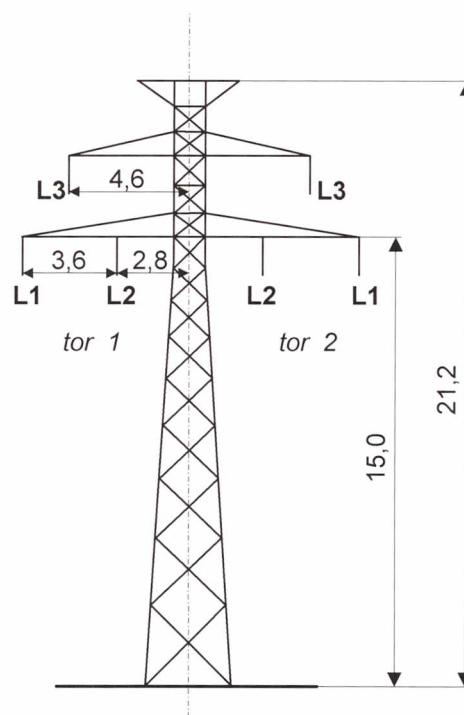
Jak wynika z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.7 i 5.8 charakterystyki natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, wyznaczone pomiarowo w wybranych przekrojach poprzecznych trzech jednotorowych linii o napięciu 110 kV i przewodach ułożonych w kształcie delta, są w każdym przypadku do siebie podobne. O ile wartości maksymalne pola magnetycznego istotnie się różnią (jest to spowodowane różnymi wartościami natężenia prądu elektrycznego linii w czasie wykonywania pomiarów oraz różnymi wysokościami przewodów fazowych nad ziemią), to wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego są do siebie zbliżone (napięcie linii we wszystkich przypadkach wynosiło około 110 kV, a niewielkie różnice wynikają jedynie z różnych odległości przewodów fazowych od ziemi).

Na rysunkach 5.10 ÷ 5.15 ukazano natomiast wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod dwutorową linią (S-125, S-126) relacji Pasikurovice – Wrocław o napięciu 110 kV i przewodach ułożonych w kształcie delta (rys.5.9). Szczegółowe wyniki pomiarów oraz warunki ich wykonywania zestawiono w punkcie 1.4 załącznika 1.

a)



b)



Rys. 5.9. Linia dwutorowa 110 kV S-125, S-126, relacji Pasikurovice – Wrocław; a – zdjęcie przedstawiające badaną linię, b – sylwetka słupa linii

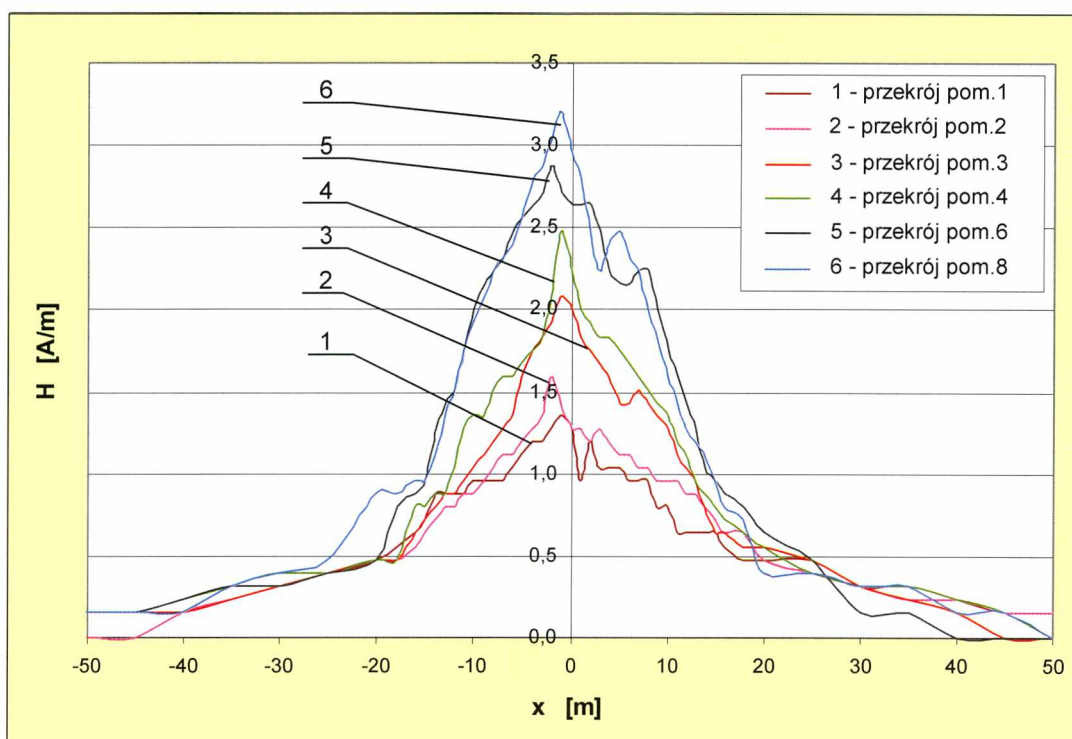
Ponieważ pomiar natężenia pola magnetycznego (indukcji magnetycznej) dokonano w dwojaki sposób – odczyt wartości z miernika oraz zapis automatyczny z wykorzystaniem koła LINDA, to oprócz wykresów $E = f(x)$ (rys. 5.12 i 5.13) i $H = f(x)$ (rys.5.11) umieszczono również wykres $B = f(x)$ z wybranego przekroju pomiarowego (rys.5.10).

Wykonanie pomiarów w kilku przekrojach pomiarowych (dla kilku odległości przewodów fazowych od ziemi), umożliwiło sporządzenie wykresów wartości maksymalnych

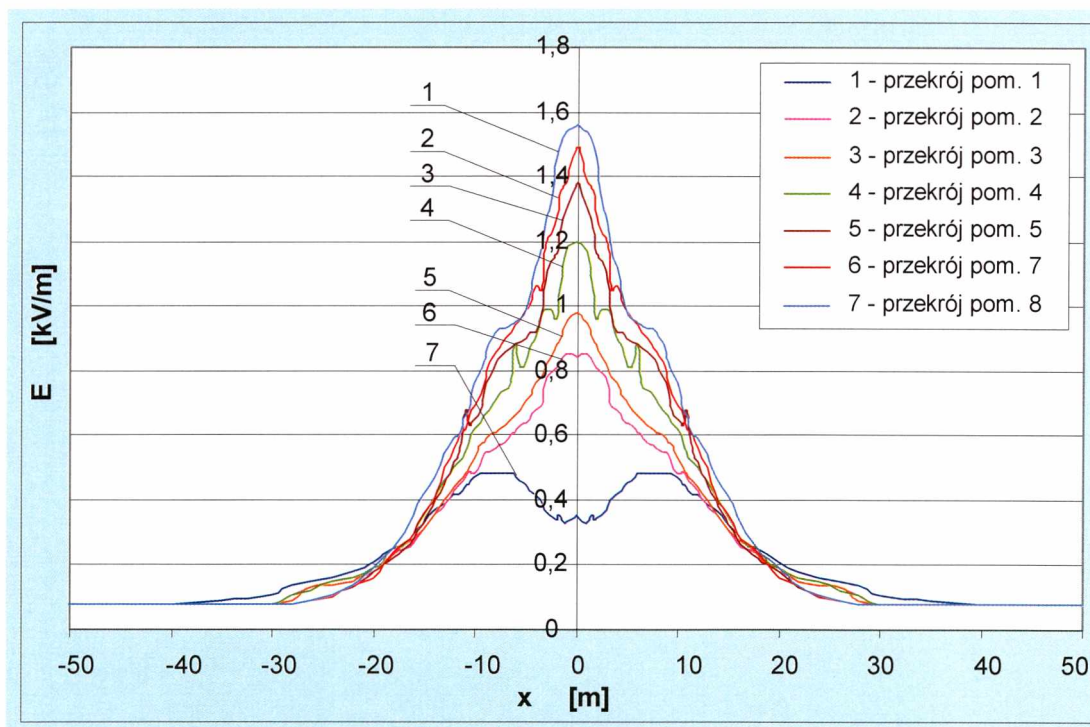
natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji odległość najniżej położonego przewodu od ziemi: $E_{max} = f(h)$ i $H_{max} = f(h)$ (rys.5.14 i 5.15). Wykresy takie bardzo często są sporządzane w dokumentacji ekologicznej linii (np. w przeglądach ekologicznych). Z wykresów tych można odczytać wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, dla danego obciążenia i napięcia linii, gdy przewody robocze znajdują się na najmniejszej, dopuszczalnej przepisami wysokości [71].



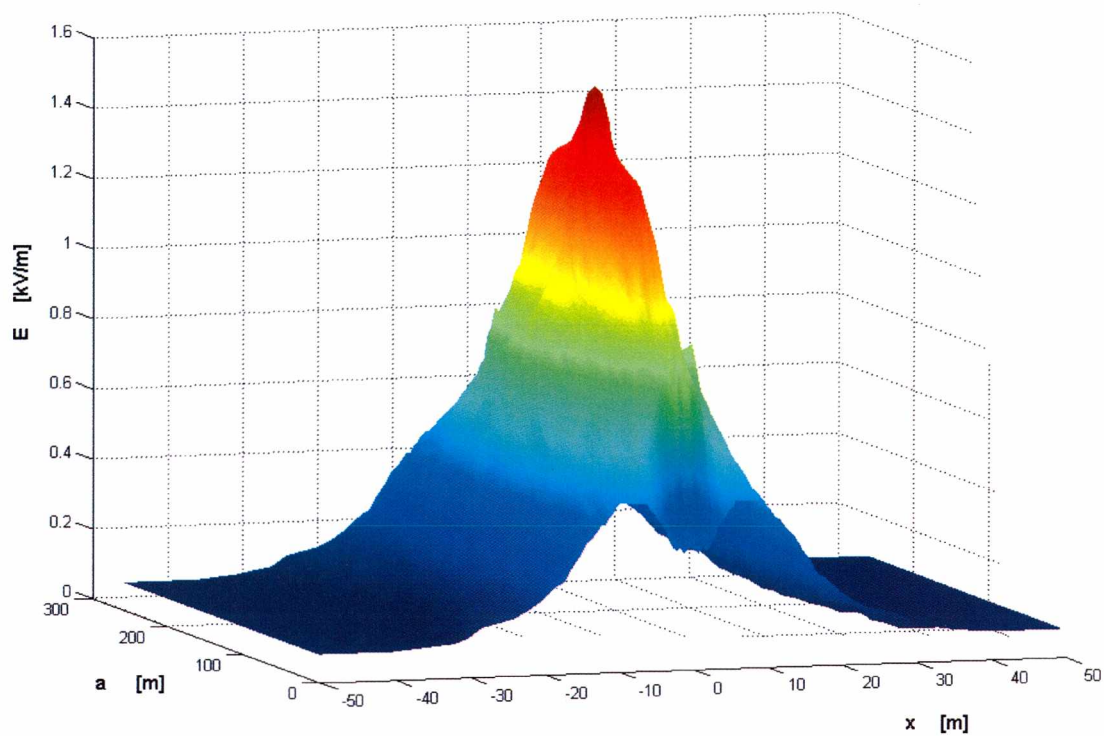
Rys.5.10. Rozkład indukcji magnetycznej w przekroju pomiarowym nr 7 pod dwutorową linią 110 kV: S-215, S-126 z przewodami ułożonymi w kształcie delty



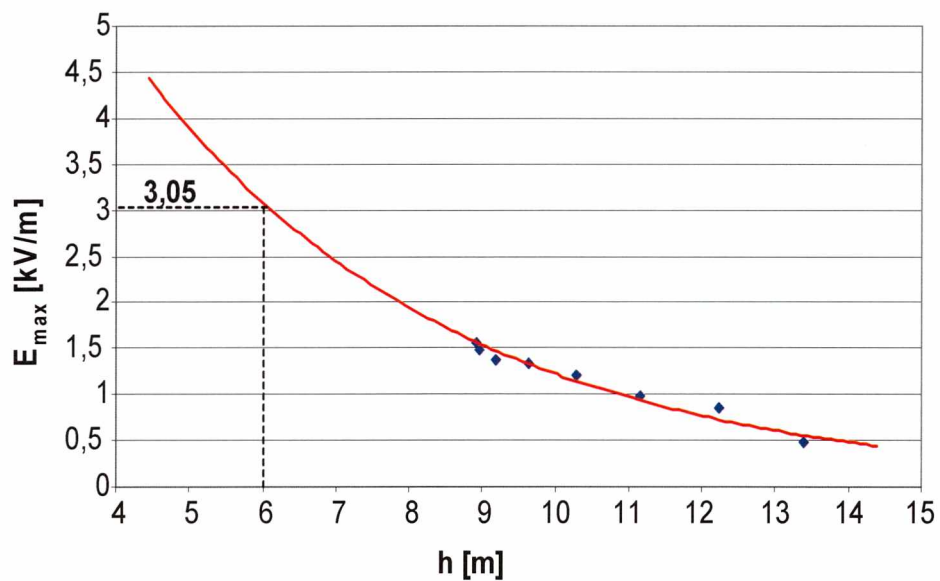
Rys.5.11. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod dwutorową linią 110 kV: S-215, S-126 o przewodach ułożonych w kształcie delta, w kolejnych przekrojach pomiarowych (zał. 1, tab. 1.5 ÷ 1.7)



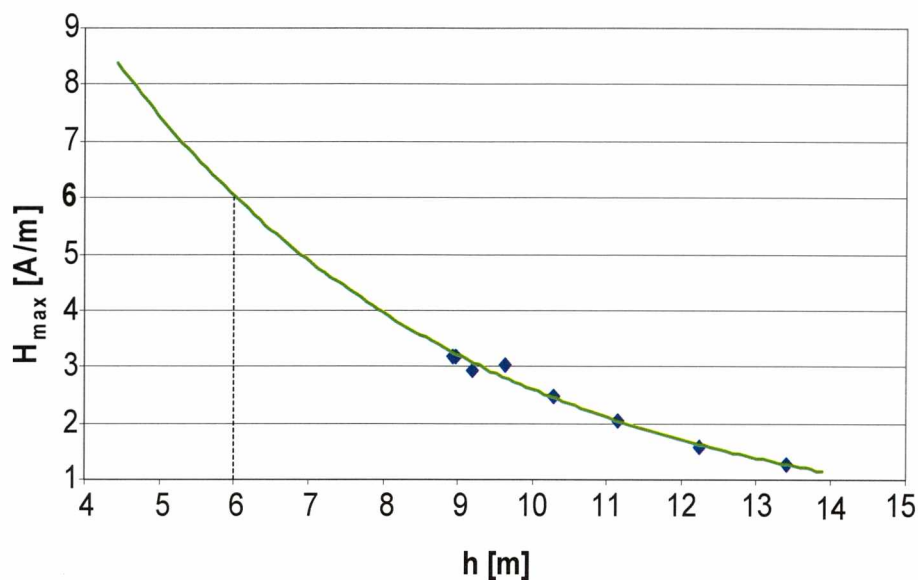
Rys.5.12. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod dwutorową linią 110 kV: S-215, S-126 o przewodach ułożonych w kształcie delta, w kolejnych przekrojach pomiarowych (zał. 1, tab. 1.5 ÷ 1.7)



Rys.5.13. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod przęsłem nr 5 –6 linii S-215 S-126



Rys.5.14. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego pod linią S-125 S-126 w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii

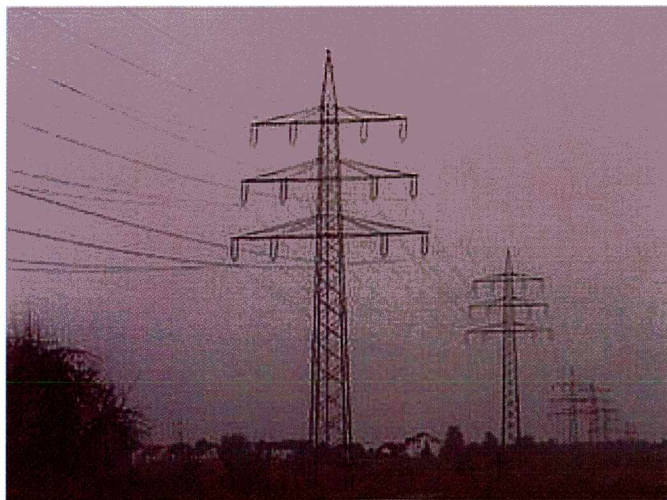


Rys.5.15. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola magnetycznego pod linią S-125 S-126 w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii

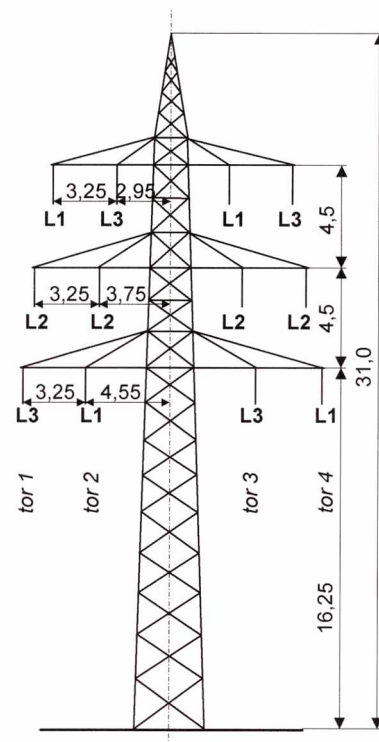
Jak wynika z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.10 ÷ 5.15 maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w kolejnych przekrojach pomiarowych linii wzrastają wraz ze zmniejszaniem się odległości przewodów fazowych od ziemi. Ponieważ przęsło linii, a także ukształtowanie terenu pod linią było płaskie, to największa wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wystąpiła w przekroju pomiarowym znajdującym się pośrodku przęsła. Wartości pola w tym miejscu były jednak dużo niższe od wartości dopuszczalnych przez polskie przepisy [6].

Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego, w wybranym przekroju pomiarowym, pod czterotorową linią 110 kV o pionowo ułożonych przewodach (rys. 5.16), przedstawiono na rysunkach 5.17 i 5.18 w postaci charakterystyk $H = f(x)$ i $E = f(x)$. Wyniki badań rozkładu pola elektromagnetycznego we wszystkich przekrojach pomiarowych, warunki ich wykonywania i charakterystykę linii znajdują się w punkcie 1.5 załącznika 1.

a)



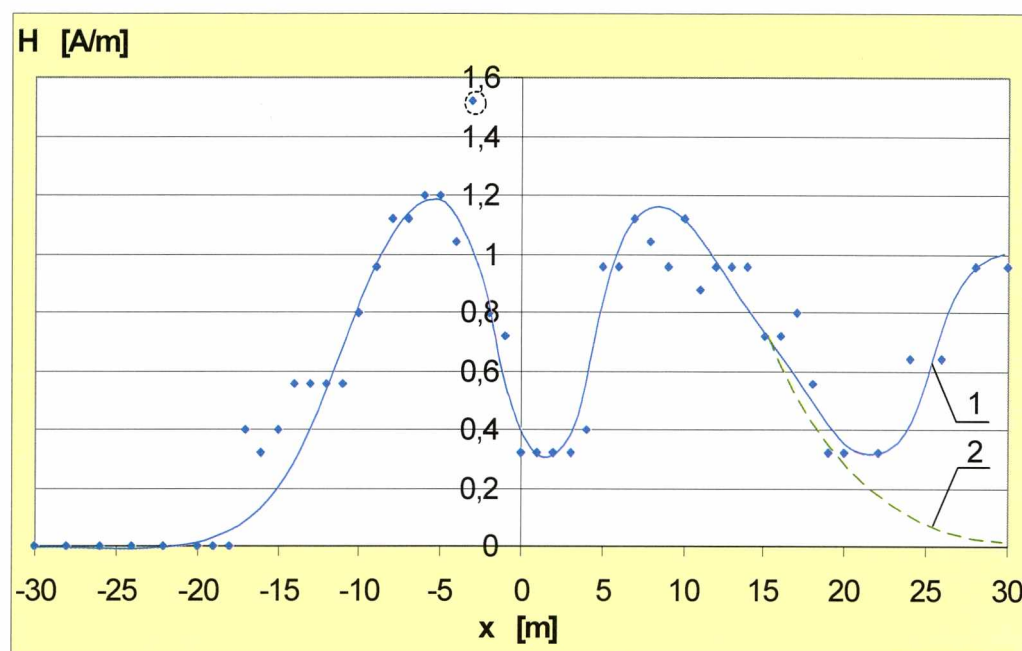
b)



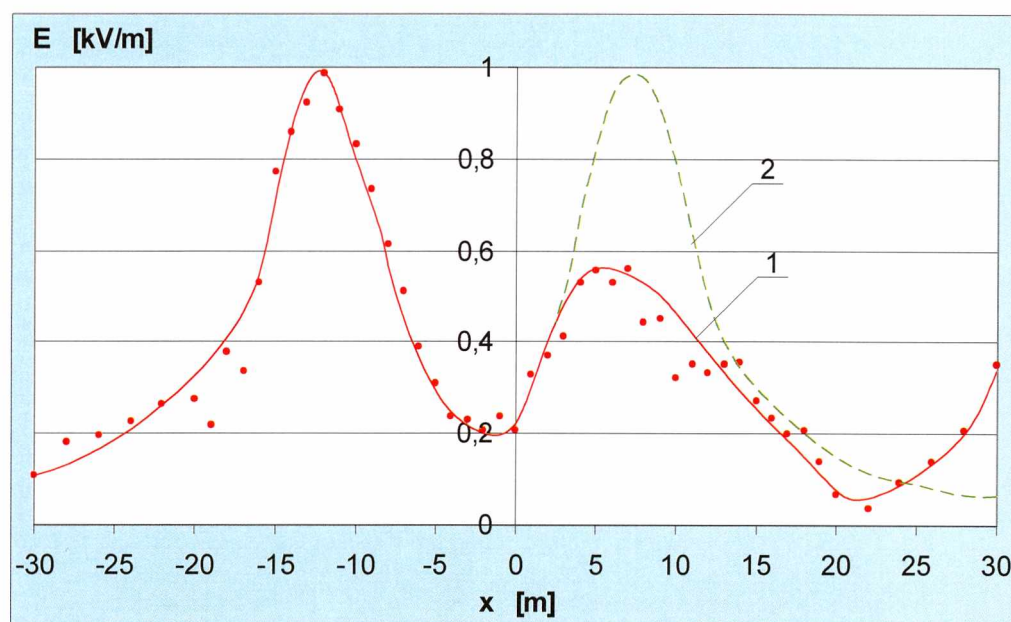
Rys. 5.16. 4-torowa linia 110 kV relacji Urberach – Münster (Niemcy); a – zdjęcie przedstawiające badaną linię, b – sylwetka słupa linii

W odległości 50 metrów od osi słupa (strona dodatnia) znajdowała się inna dwutorowa linia o napięciu 220 kV, która wpływała na wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Dlatego można przyjąć, iż pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w granicach $-30 \div 15$ m od osi słupa są w miarę poprawne (natężenia pola elektrycznego i magnetycznego są głównie generowane przez prądy i napięcia pochodzące od badanej linii - wpływ sąsiedniej linii na wyniki pomiarów jest niewielki), natomiast poza tym obszarem na wartość pola elektromagnetycznego wpływa również sąsiednia linia, co ilustrują rysunki 5.17 i 5.18.

Ponieważ geometryczny układ przewodów fazowych w linii (wzajemne usytuowanie przewodów tej samej fazy w torach) był symetryczny względem osi słupa oraz wartości napięć we wszystkich torach linii były zbliżone do siebie, to zmierzone natężenie pola elektrycznego powinno być symetryczne, względem współrzędnej $x = 0$. Pod przęsłem linii w niektórych miejscach znajdowało się jednak zadrzewienie. W tych miejscach składowa elektryczna pola uległa zmniejszeniu (rys. 5.18).



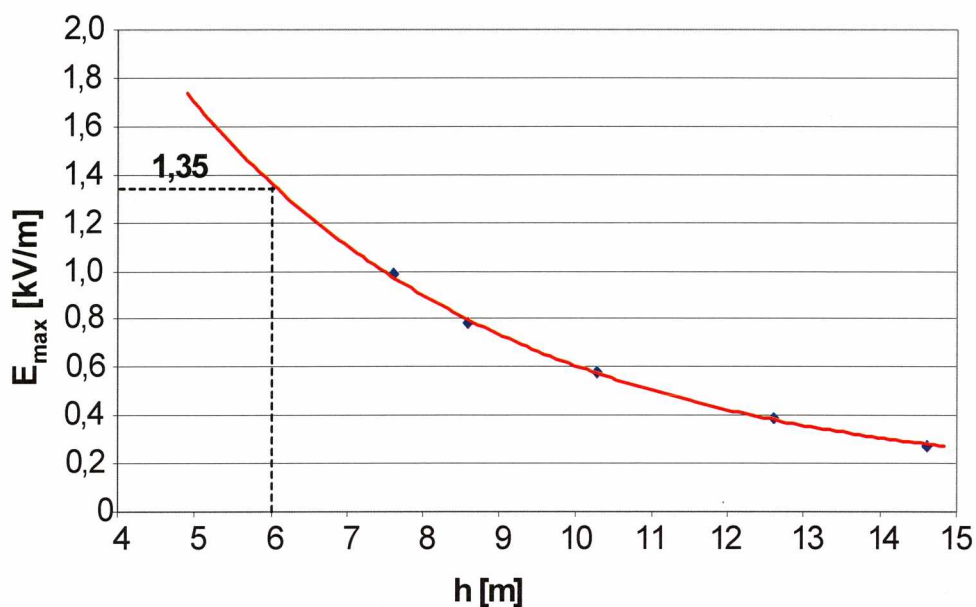
Rys.5.17. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod przesłem linii 4x100 kV w pionie pomiarowym nr 5; 1 – charakterystyka z pomiarów, 2 – charakterystyka spodziewana w przypadku braku oddziaływania sąsiedniej linii 220 kV



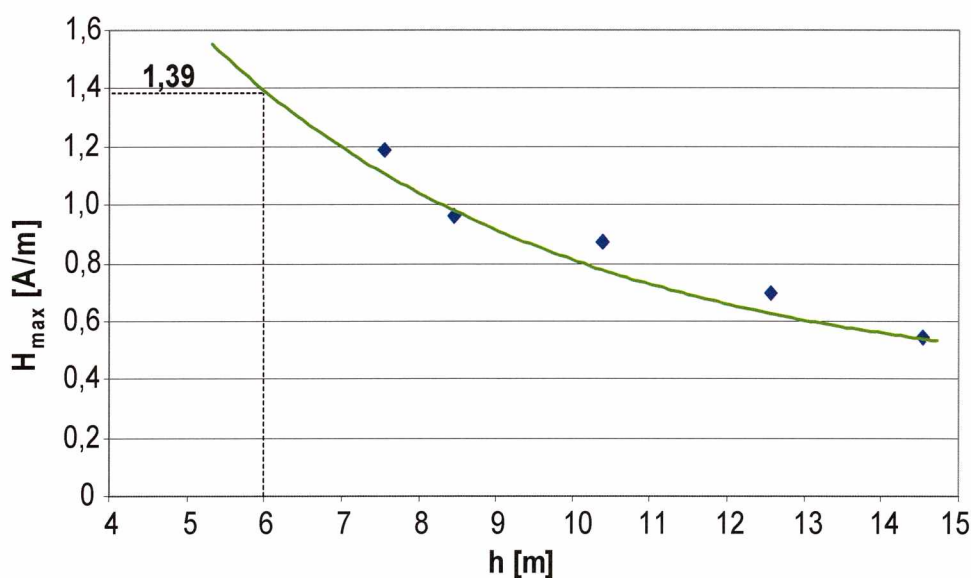
Rys.5.18. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod przesłem linii 4x100 kV w pionie pomiarowym nr 5; 1 – charakterystyka z pomiarów, 2 – charakterystyka spodziewana w przypadku braku oddziaływania linii sąsiedniej 220 kV i elementów zakłócających pole (krzaki, drzewa)

Pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego pod rozpatrywaną linią wykonano w 5 przekrojach pomiarowych linii (dla 5 odległości przewodów fazowych od ziemi). Umożliwiło to wykonanie wykresów wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i

magnetycznego w funkcji odległość najniżej położonego przewodu od ziemi: $E_{max} = f(h)$ i $H_{max} = f(h)$ (rys.5.19 i 5.20).



Rys.5.19. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego pod przęsłem linii 4x100 kV w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii



Rys.5.20. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola magnetycznego pod przęsłem linii 4x100 kV w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii

Jak wynika z wykresów umieszczonych na rysunkach 5.19 i 5.20 wartości maksymalne obu składowych pola przy badanym obciążeniu linii oraz najmniejszej, dopuszczalnej przepisami odległości przewodów od ziemi (6 m wg [71]) są dużo mniejsze od wartości granicznych, określonych w polskich przepisach [6].

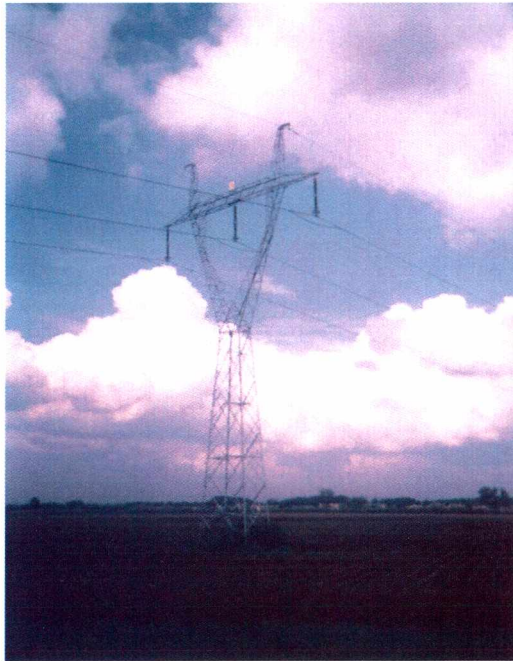
5.4. Badanie rozkładów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 220 kV

Wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 220 kV przedstawiono na rysunkach 5.23 ÷ 5.28 – dla jednorodowej linii D-205 relacji Klecina – Świebodzice o płaskim ułożeniu przewodów, której sylwetkę słupa pokazano na rysunku 5.21 oraz na rysunkach 5.29 i 5.30 – dla dwutorowej linii D-207, D-208 relacji Polkowice – Leszno Gronowo – Plewiska o przewodach ułożonych w kształcie delfy (rys.5.22).

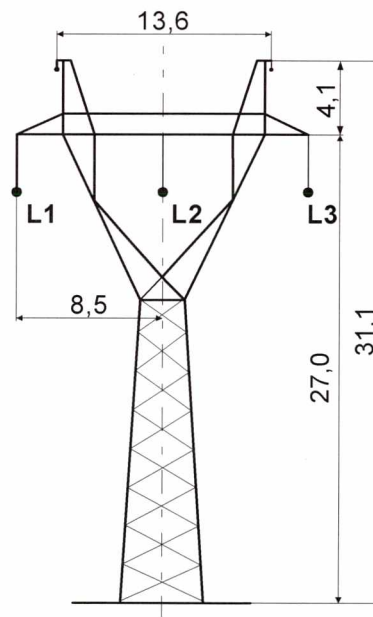
W przypadku linii jednorodowej pomiary rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonano w 11 poprzecznych przekrojach pomiarowych przęsła – dla 11 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi, natomiast dla linii dwutorowej, ze względu na ukształtowanie terenu oraz na drzewa rosnące pod linią, pomiary ograniczono do jednego, wybranego przekroju. Ponieważ w przypadku linii jednorodowej pomiar natężenia pola magnetycznego (indukcji magnetycznej) został wykonany na dwa sposoby – odczyt wartości z miernika oraz zapis automatyczny z wykorzystaniem koła LINDA, to oprócz wykresów $E = f(x)$ (rys.5.25 i 5.26) oraz $H = f(x)$ (rys.5.24) umieszczono również wykres $B = f(x)$ (rys.5.23) ze wszystkich przekrojów pomiarowych.

Tabele z zestawieniem wyników pomiarów w poszczególnych przekrojach, warunki pracy linii oraz ich charakterystyki umieszczone są w załączniku 2, w punktach 2.1 i 2.2.

a)

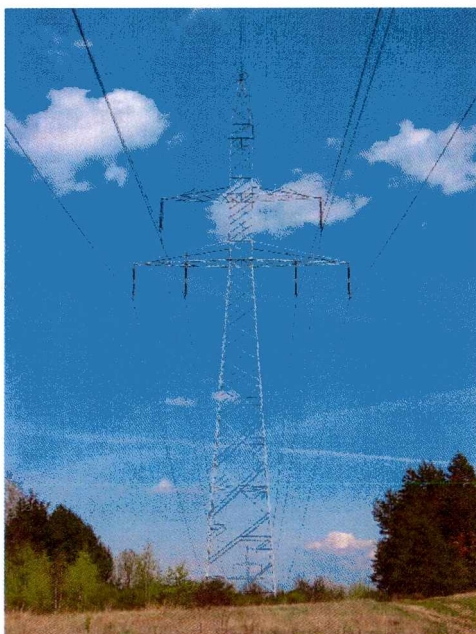


b)

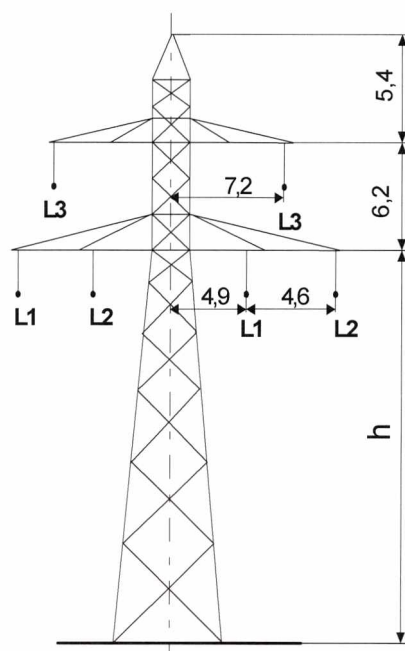


Rys. 5.21. Linia jednorodowa 220 kV D-205 relacji Klecina - Świebodzice; a – zdjęcie przedstawiające badaną linię, b – sylwetka słupa linii

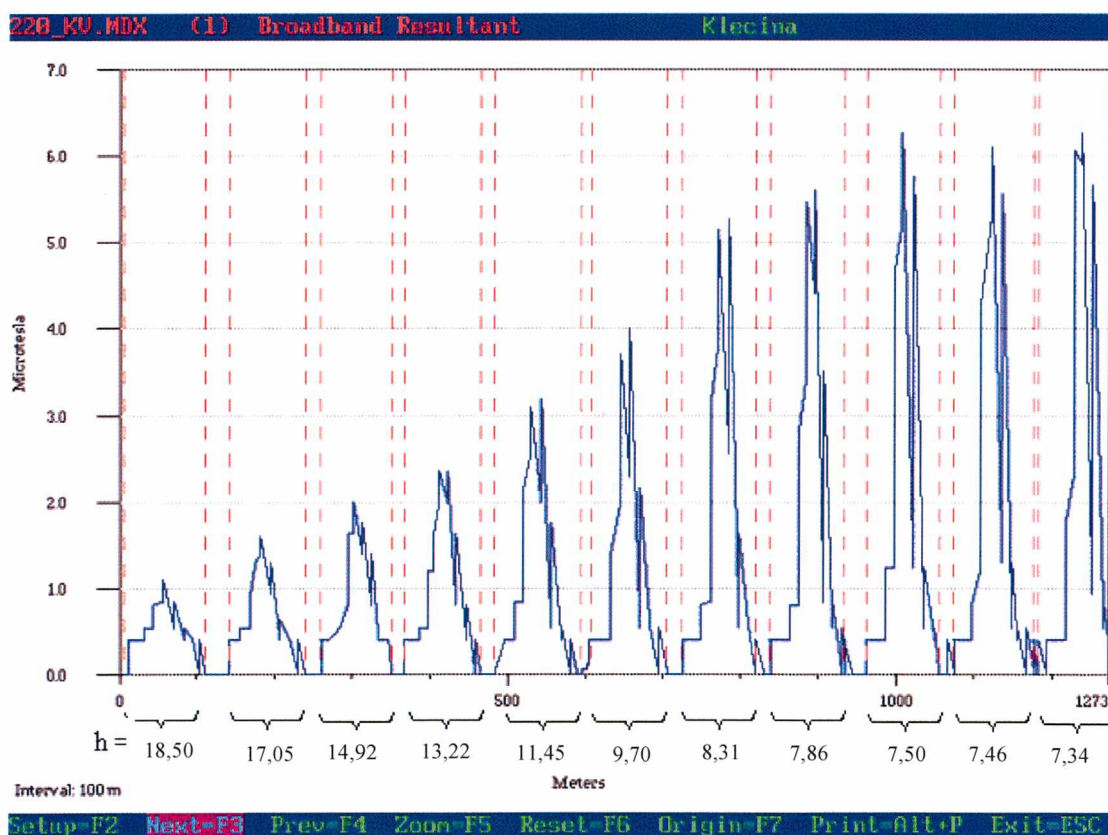
a)



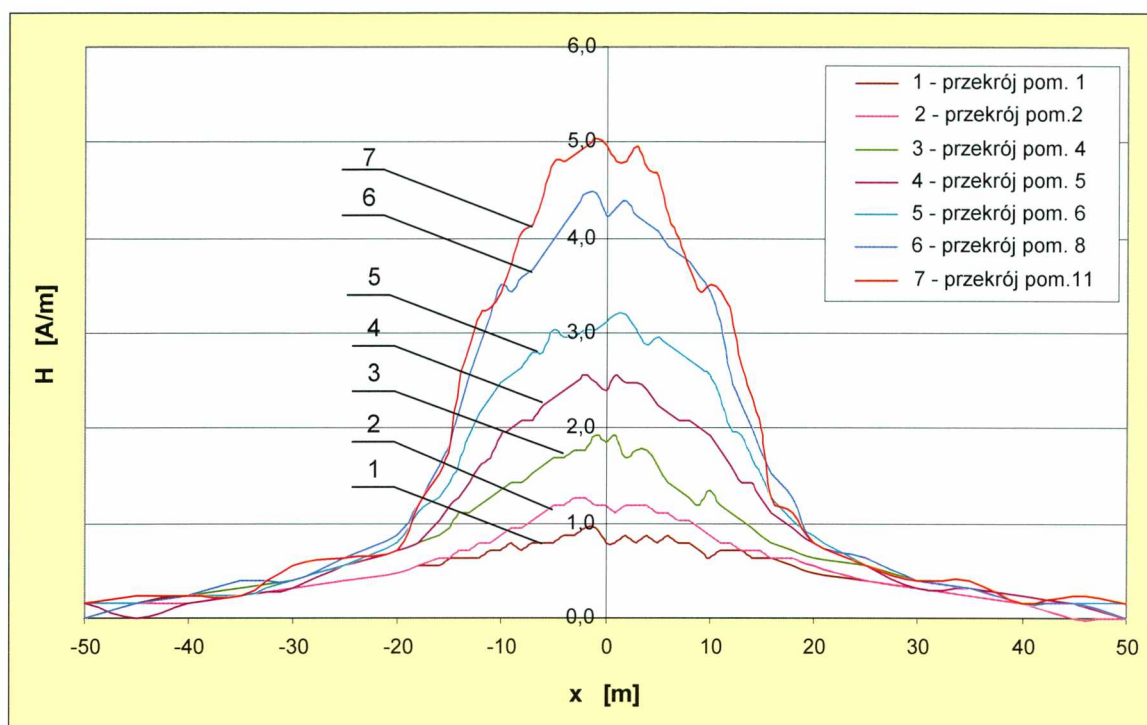
b)



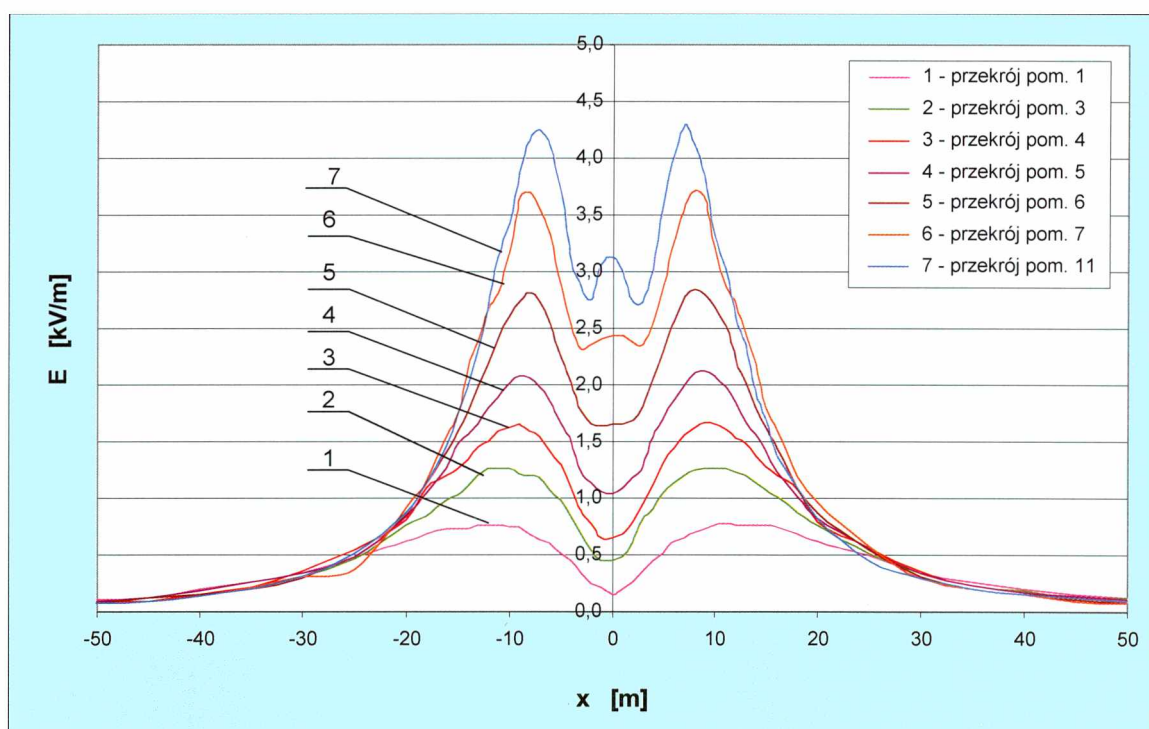
Rys. 5.22. Linia dwutorowa 220 kV: D-207, D-208, o przewodach ułożonych w kształcie delty, relacji Rudna Zachodnia – Komorniki; a – zdjęcie przedstawiające badaną linię, b – sylwetka słupa linii



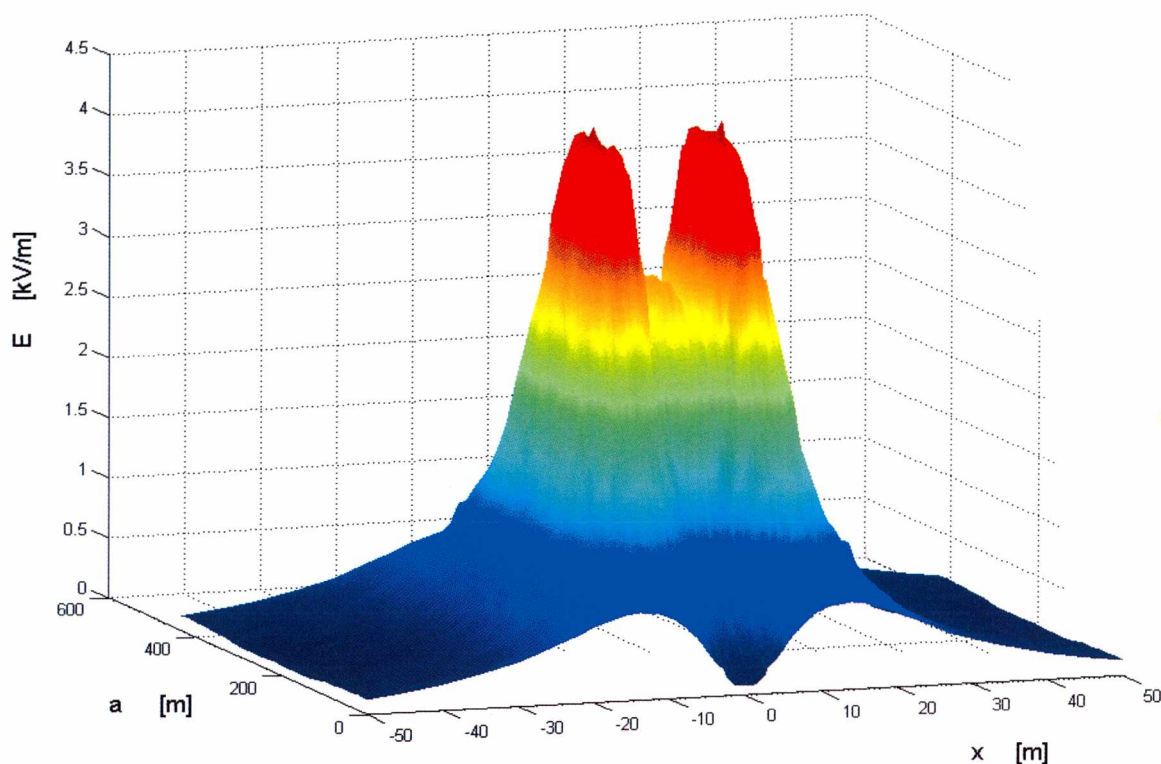
Rys.5.23. Rozkład indukcji magnetycznej pod jednotorową linią 220 kV D-205 w 11 przekrojach pomiarowych



Rys.5.24. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod jednotorową linią 220 kV D-205 w kolejnych przekrojach pomiarowych

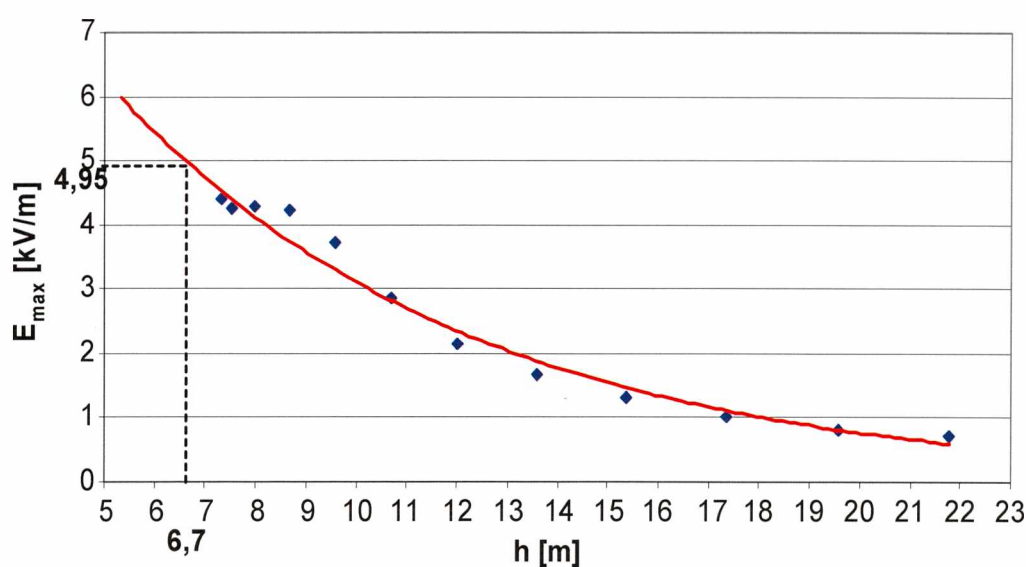


Rys.5.25. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod jednotorową linią 220 kV D-205 w kolejnych przekrojach pomiarowych

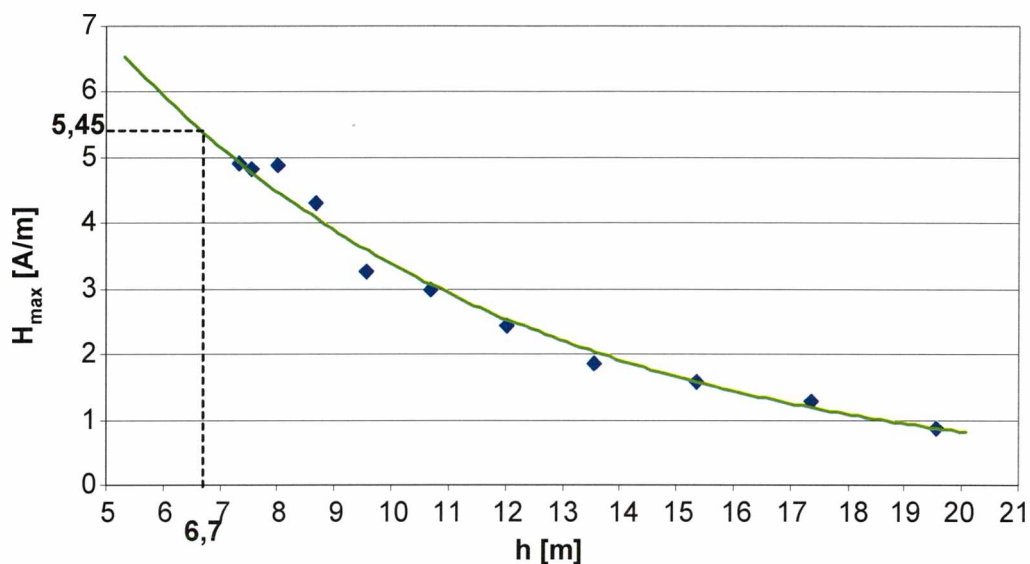


Rys.5.26. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod przęsłem nr 115 –116 linii D-205

Wykonanie pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod linią D-205 w kilku przekrojach pomiarowych (dla kilku odległości przewodów fazowych od ziemi), umożliwiło sporządzenie wykresów wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji odległość najniżej położonego przewodu od ziemi: $E_{max} = f(h)$ i $H_{max} = f(h)$ (rys.5.27 i 5.28).

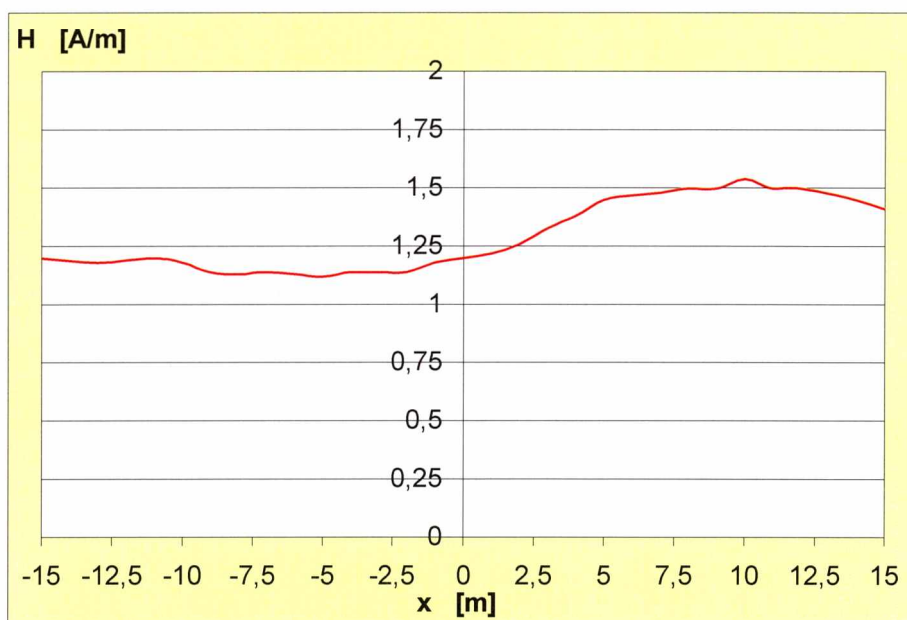


Rys.5.27. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego pod jednotorową linią 220 kV D-205 w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii

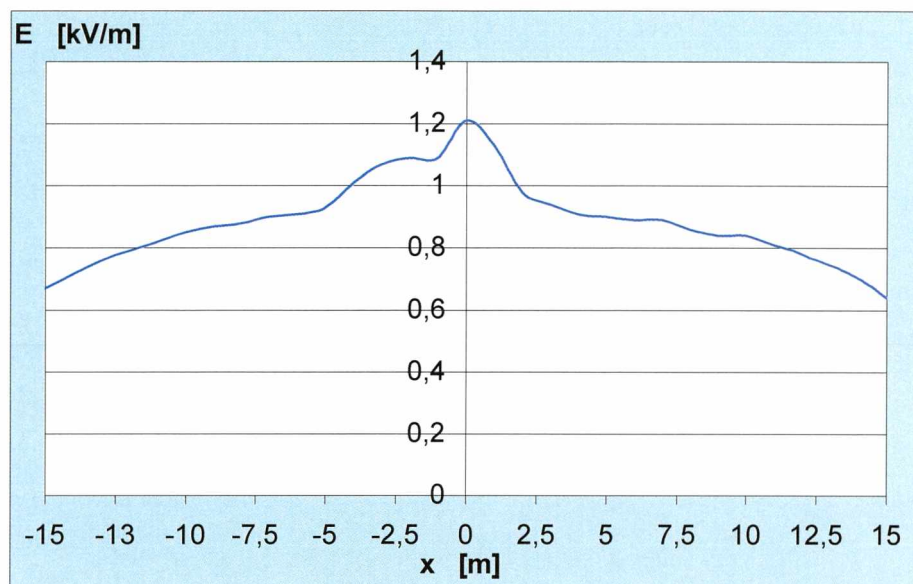


Rys.5.28. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola magnetycznego pod jednotorową linią 220 kV D-205 w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii

Na rysunkach 5.29 i 5.30 przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod dwutorową linią o napięciu 220 kV, której sylwetkę przedstawiono na rysunku 5.22.



Rys. 5.29. Rozkład natężenia pola magnetycznego na wysokości 2 m w wybranym przekroju poprzecznym przęsła



Rys. 5.30. Rozkład natężenia pola elektrycznego na wysokości 2 m w wybranym przekroju poprzecznym przęsła

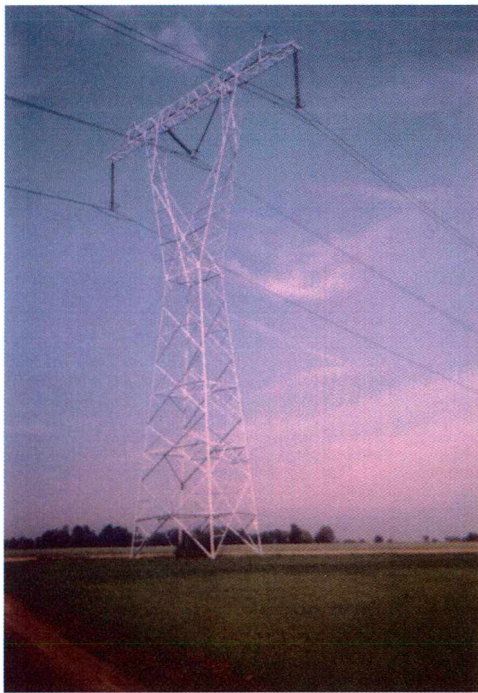
Jak wynika z wykresów przedstawionych na rysunkach 5.23 ÷ 5.30 również w tym przypadku, podobnie jak dla linii 110 kV, wartości maksymalne zarówno natężenia pola elektrycznego jak i magnetycznego są dużo mniejsze od wartości granicznych określonych w polskich przepisach [6]. Są one jednak większe od wartości uzyskanych pod wielotorowymi (2 i 4-torowymi) liniami o napięciu 110 kV (rozdział 5.3 pracy).

5.5. Badanie rozkładów pól elektromagnetycznych pod liniami o napięciu 400 (380) kV

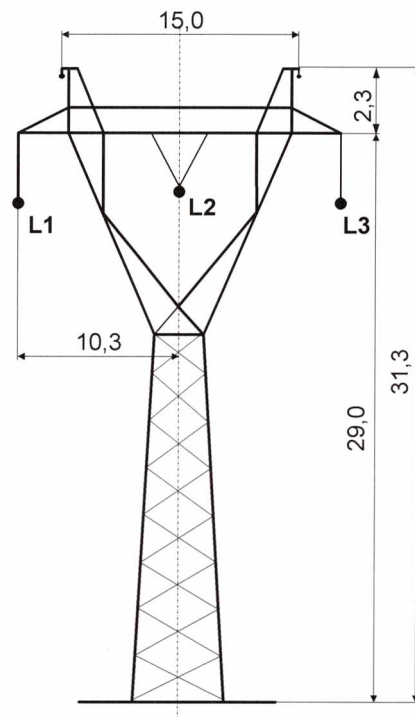
Przykładowe wyniki pomiarów rozkładów pól elektromagnetycznych, przeprowadzonych w 11 przekrojach pomiarowych pod jednotorową linią o napięciu 400 kV o płaskim ułożeniu przewodów (rys.5.31), przedstawiono w postaci wykresów $B = f(x)$ (rys.5.32), $H = f(x)$ (rys.5.33), $E = f(x)$ (rys.5.34 i 5.35) oraz $E_{max} = f(h)$ i $H_{max} = f(h)$ (rys.5.36 i 5.37).

Szczegółowe wyniki pomiarów, warunki ich wykonywania oraz charakterystykę linii zestawiono w załączniku 3.

a)



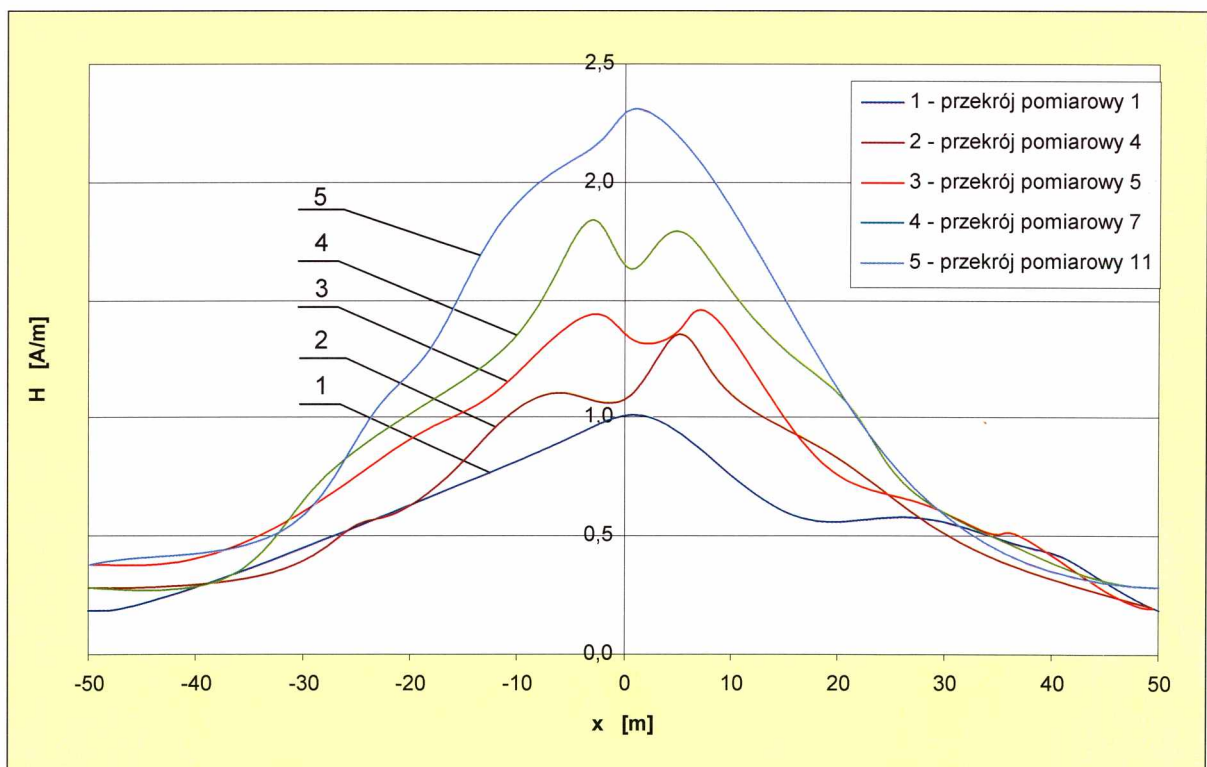
b)



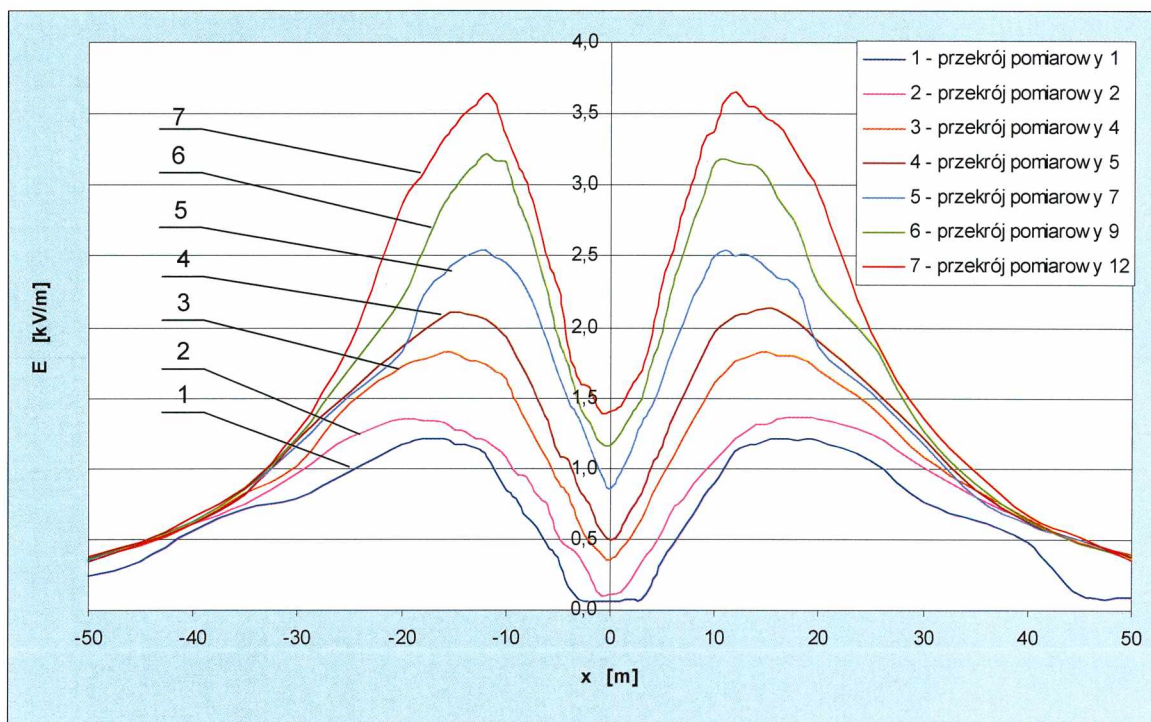
Rys. 5.31. Linia 400 kV (4-0-03) o płaskim ułożeniu przewodów, relacji Pasikurówce - Ostrów; a – zdjęcie linii, b – sylwetka słupa linii



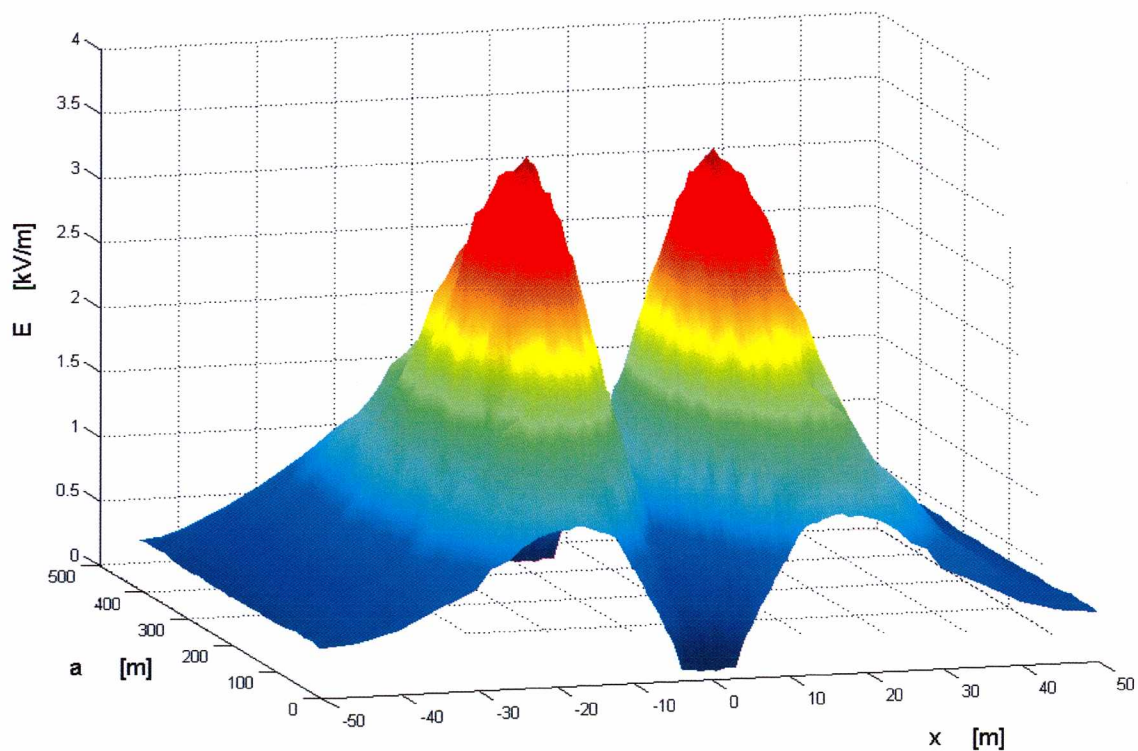
Rys.5.32. Rozkład indukcji magnetycznej pod jednotorową linią 400 kV (4-0-03) w przekroju pomiarowym nr 11



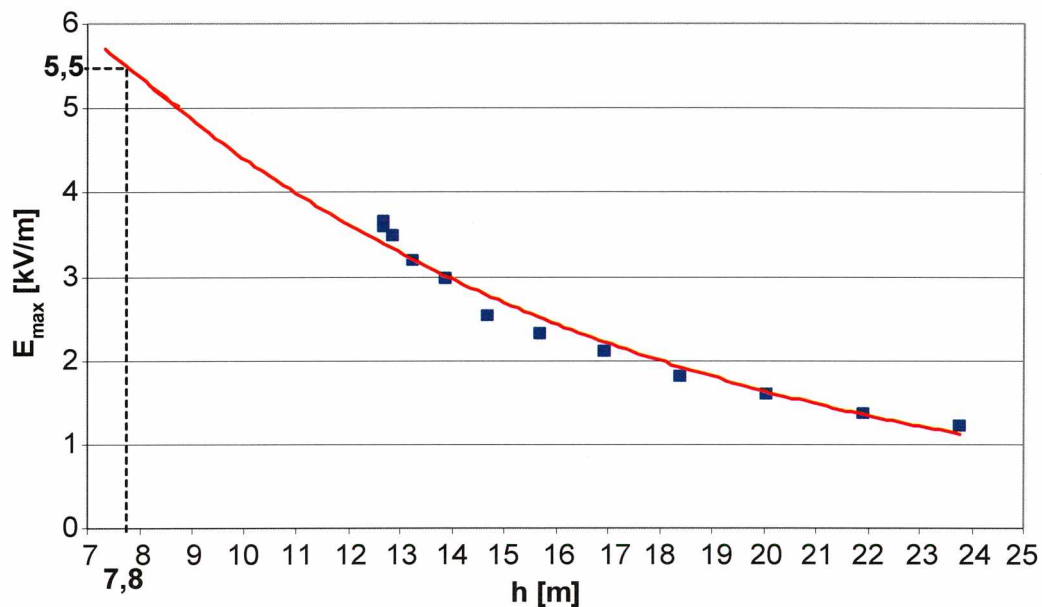
Rys.5.33. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod jednotorową linią 400 kV (4-0-03) w kolejnych przekrojach pomiarowych



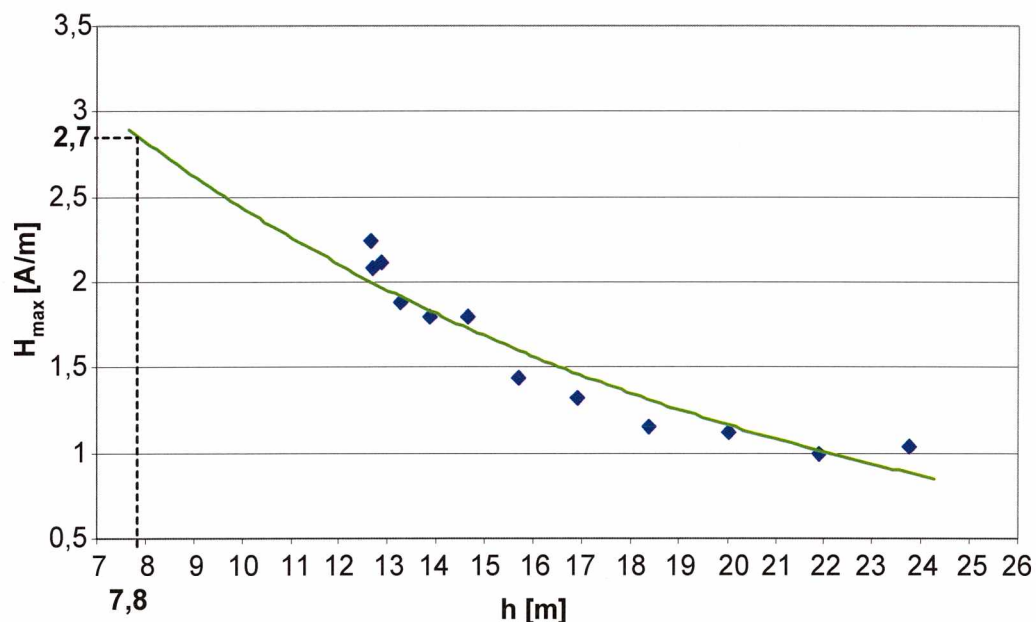
Rys.5.34. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod jednotorową linią 400 kV (4-0-03) w kolejnych przekrojach pomiarowych



Rys.5.35. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod przesłem nr 9–10 jednotorowej linii 400 kV (4-0-03)



Rys.5.36. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego pod jednotorową linią 400 kV (4-0-03) w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii



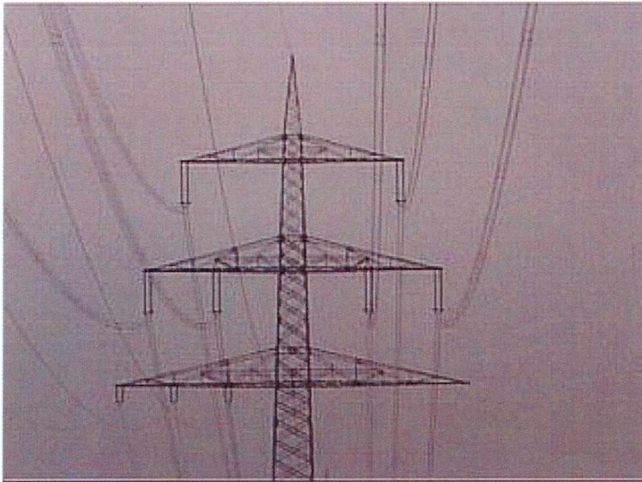
Rys.5.37. Rozkład wartości maksymalnej natężenia pola magnetycznego pod jednotorową linią 400 kV (4-0-03) w funkcji wysokości zawieszenia najniższego przewodu linii

Porównując wartości maksymalne składowych pola elektromagnetycznego uzyskane w kolejnych przekrojach pomiarowych pod jednotorową linią 400 kV o płaskim ułożeniu przewodów, z podobną linią (również jednotorową o takiej samej konfiguracji przewodów roboczych) o napięciu 220 kV (punkt 5.4 pracy), należy stwierdzić, iż wartości pola uzyskane pod linią o napięciu 220 kV są większe od pola zmierzonego pod linią 400 kV. Jest to spowodowane większą odległością przewodów fazowych od ziemi w linii 400 kV. Jednak szerokość obszaru ograniczonego użytkowania terenu pod linią 400 kV (pasa terenu w

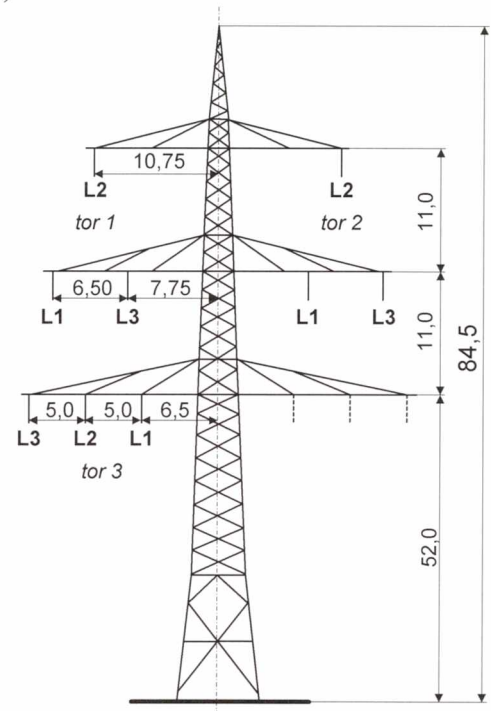
którym $E \geq 1$ kV/m) dla linii o napięciu 400 kV dochodzi aż do 70 m, podczas gdy dla linii 220 kV wynosi około 40 m.

Linia relacji Urberach – GroBkrotzenburg (Niemcy), pod którą przeprowadzono pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego, a której sylwetkę słupa pokazano na rysunku 5.38, jest czterotorową linią o napięciu 2×380 kV + 2×110 kV. Dwa górne tory o napięciu 380 kV są ułożone w kształcie delty, natomiast tory dolne o napięciu znamionowym 110 kV posiadają płaskie ułożenie przewodów. Należy zwrócić uwagę, iż jeden z torów linii 110 kV (po prawej stronie osi słupa) nie został „obsadzony” przewodami.

a)

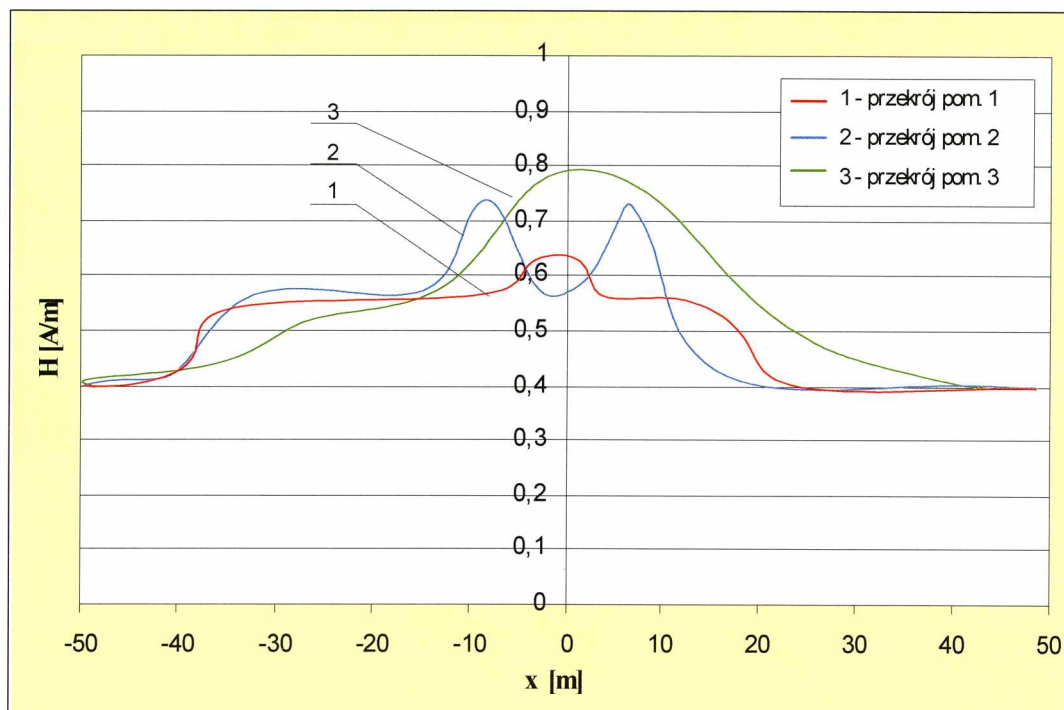


b)

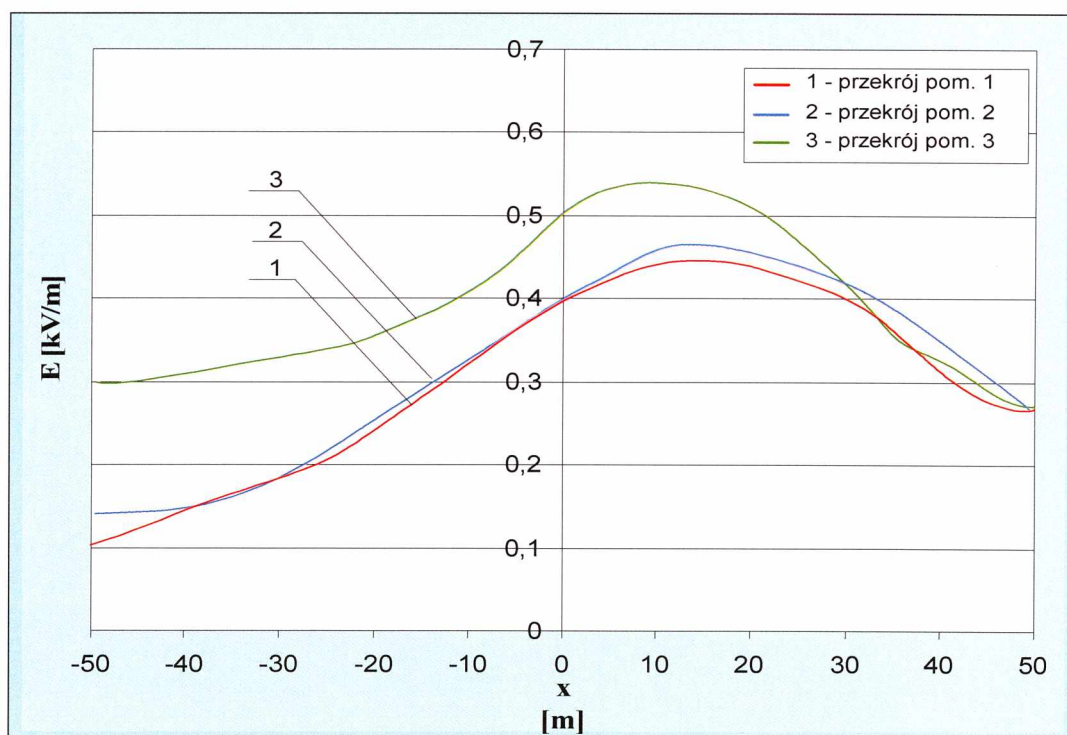


Rys. 5.38. 4-torowa linia 2×380 kV + 2×110 kV relacji Urberach – GroBkrotzenburg (Niemcy); a – zdjęcie linii, b – sylwetka słupa linii

Na rysunkach 5.39 i 5.40 przedstawiono przykładowo wyniki pomiarów, z trzech przekrojów pomiarowych, w postaci wykresów $H = f(x)$ i $E = f(x)$. Tabele z wynikami pomiarów oraz warunki w jakich wykonywano pomiary umieszczono w punkcie 3.2 załącznika 3.



Rys.5.39. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod 4-torową linią 2x380 + 2x110 kV w kolejnych przekrojach pomiarowych



Rys.5.40. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod 4-torową linią 2x380 + 2x110 kV w kolejnych przekrojach pomiarowych

Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, uzyskane w kolejnych przekrojach pomiarowych pod 4-torową linią 2x380 + 2x110 kV (rys.5.39 i 5.40) są dużo mniejsze od wyników uzyskanych nawet pod jednotorowymi liniami o napięciu 110 kV (punkt 5.3 pracy). Wynika to z dużej wysokości słupów linii wielotorowych,

wielonapięciowych (sięgających nawet 99 m), a tym samym dużej odległości przewodów fazowych od ziemi, wynoszących kilkanaście, a w niektórych przypadkach nawet kilkadziesiąt metrów.

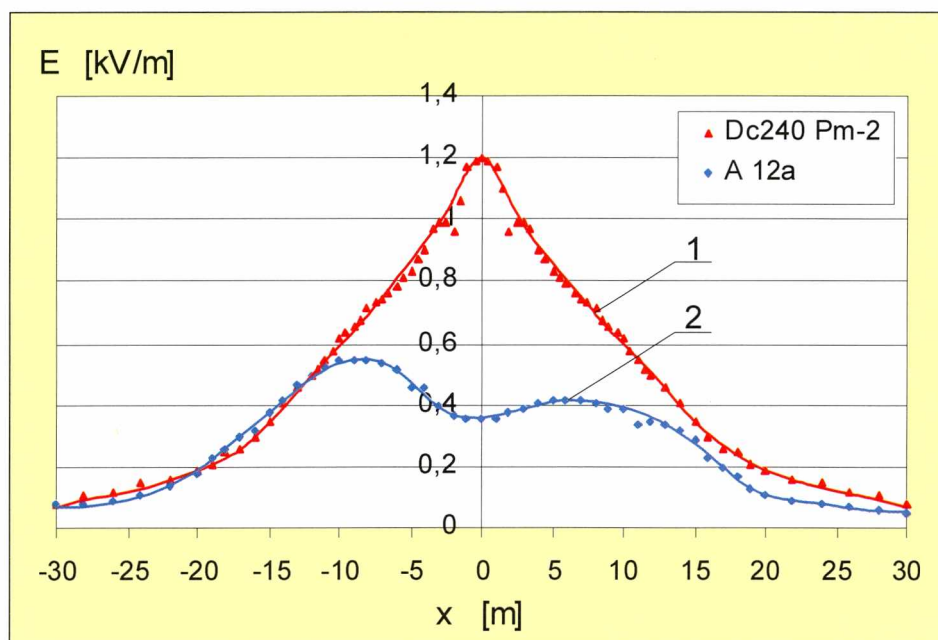
5.6. Podsumowanie wyników pomiarów

Wszystkie pomiary zostały wykonane zgodnie z polskimi przepisami i normami [6] oraz zasadami wiedzy technicznej zawartej w literaturze przedmiotowej [1,48,53].

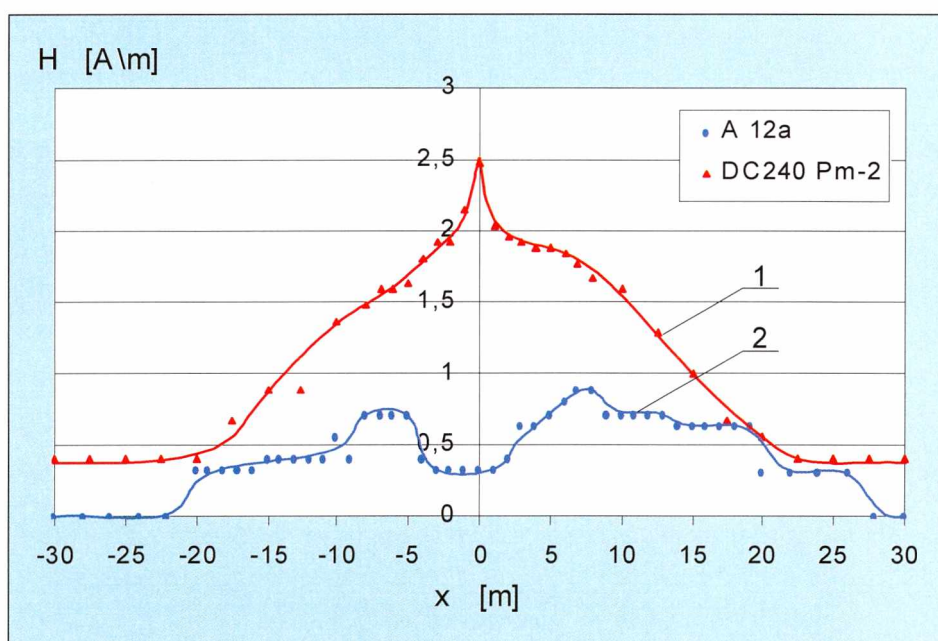
Pomiary rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane pod liniami najwyższych napięć o wszystkich poziomach napięć linii (110 kV, 220 kV oraz 400 (380) kV) eksploatowanych w Polsce i na terenie Niemiec. Wykonano je również dla różnych konfiguracji przewodów – dla linii o płaskim i pionowym ułożeniu przewodów, a także dla linii o przewodach ułożonych w kształcie delty. Liczba torów linii, pod którymi wykonano badania zawiera się od 1 do 4. Tak bogate wyniki pomiarów pozwalają na jednoznaczną weryfikację programu komputerowego MAH, napisanego w ramach niniejszej pracy doktorskiej (punkt 6.2) oraz na porównanie rozkładów rozpatrywanych pól pod różnymi typami linii i wyciągnięcie stosownych wniosków.

Jak wynika z pomiarów, wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, pod żadną z badanych linii (również pod liniami wielotorowymi, o liczbie torów większej od 2, eksploatowanych w Niemczech) nie przekraczają wartości dopuszczalnych przez polskie przepisy [6]. Należy jednak zauważyć, iż wartości składowych pola elektromagnetycznego zmierzone w danych warunkach pracy linii nie są jeszcze przeliczone na wartości, które wystąpią w warunkach najbardziej niekorzystnych (co należy wykonać zgodnie z rozporządzeniem [6], sporządzając dokumentację techniczną z pomiarów), bowiem tylko w tym przypadku pomiary mogą posłużyć do weryfikacji modelu matematycznego i opartego na nim programu komputerowego, za pomocą którego będą możliwe takie przeliczenia.

Zwiększanie liczby torów na jednym słupie linii kojarzy się zwykle ze wzrostem natężenia składowych pola elektromagnetycznego w otoczeniu przęsła linii. W rzeczywistości może być jednak odwrotnie i poprzez odpowiednie rozmieszczenie przewodów linii wielotorowej na słupie, możliwe jest zmniejszenie – w stosunku do rozwiązań tradycyjnych – natężenia pola elektromagnetycznego. Aby udowodnić tą tezę porównano wartości natężenia pola elektrycznego (rys.5.41) i magnetycznego (rys.5.42) zmierzone pod dwiema różnymi liniami o napięciu 110 kV – linią 4-torową o pionowym ułożeniu przewodów, eksploatowaną na terenie Niemiec i linią 2-torową o przewodach ułożonych w kształcie delty, eksploatowaną na terenie Polski.



Rys.5.41. Rozkłady natężenia pola elektrycznego w przekroju poprzecznym linii o napięciu 110 kV, 1 – linii 2-torowej, przy wysokości przewodów od ziemi $h = 10,29$ m, 2 – linii 4-torowej, przy wysokości przewodów od ziemi $h = 10,35$ m

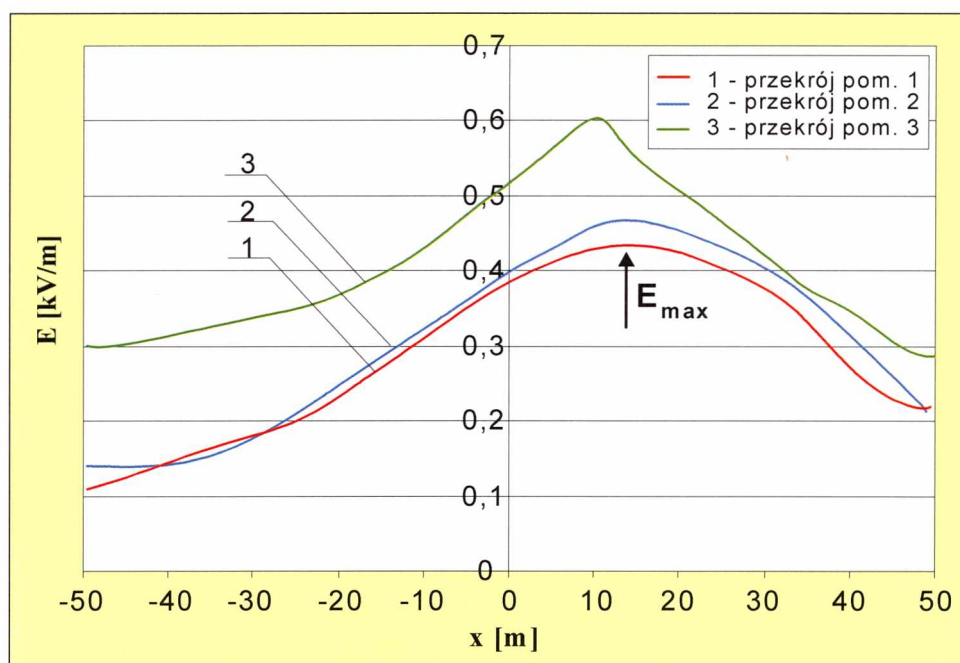


Rys.5.42. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w przekroju poprzecznym linii o napięciu 110 kV, 1 – linii 2-torowej, przy wysokości przewodów od ziemi $h = 10,29$ m, 2 – linii 4-torowej, przy wysokości przewodów od ziemi $h = 10,35$ m

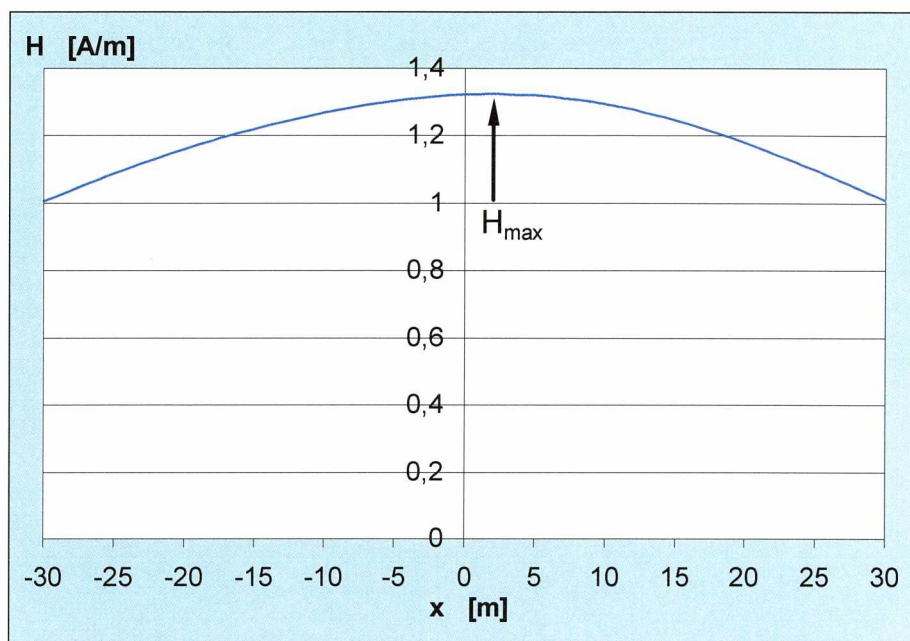
Z charakterystyk przedstawionych na rysunkach 5.41 i 5.42 wynika, że natężenie pola elektrycznego i magnetycznego, dla takich samych odległości przewodów fazowych od ziemi, jest niższe pod linią 4-torową, niż pod linią 2-torową. Jest to spowodowane konstrukcją słupa linii oraz odpowiednim rozłożeniem faz, które zapewniają kompensowanie się natężenia pola

elektrycznego i magnetycznego. Wprawdzie natężenie prądu w poszczególnych torach obu linii było różne, ale ich algebraiczne sumy były niemal identyczne (suma prądów w linii 4-torowej stanowi 1,08 sumy prądów linii 2-torowej), gdy tymczasem maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego dla linii 4-torowej jest prawie trzykrotnie mniejsza niż w linii 2-torowej.

Jeszcze lepiej zjawisko kompensacji pola elektromagnetycznego pod wielotorowymi liniami wysokiego napięcia ilustrują wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego (rys.5.43) pod 4-torową linią 2x380 + 2x110 kV, która pracowała jako linia 3-torowa. Ponieważ natężenia prądów w torze 1 i w torze 2 systemu 380 kV podczas pomiarów różniły się znacznie, to wyniki pomiarów w kontekście ukazania kompensacji pola magnetycznego, nie są w pełni miarodajne. W związku z tym przeprowadzono symulacje rozkładu pola magnetycznego w programie B-Fast dostępnego on-line na stronie internetowej <http://www.enertech.net/bfast/bfast.html> [52], który umożliwia przeprowadzenie symulacji rozkładu indukcji magnetycznej dla linii o maksymalnej liczbie torów równej 3. Zasymulowano przykładowo takie same prądy robocze dla toru 1 oraz toru 2 – $I_r = 800$ A, natomiast w systemie 110 kV zasymulowano przepływ prądu o natężeniu $I_r = 200$ A. Wyniki symulacji w formie wykresu $H = f(x)$ pokazano na rysunku 5.44.



Rys.5.43. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod 4-torową linią 2x380 + 2x110 kV, która pracowała jako linia 3-torowa, w kolejnych przekrojach pomiarowych



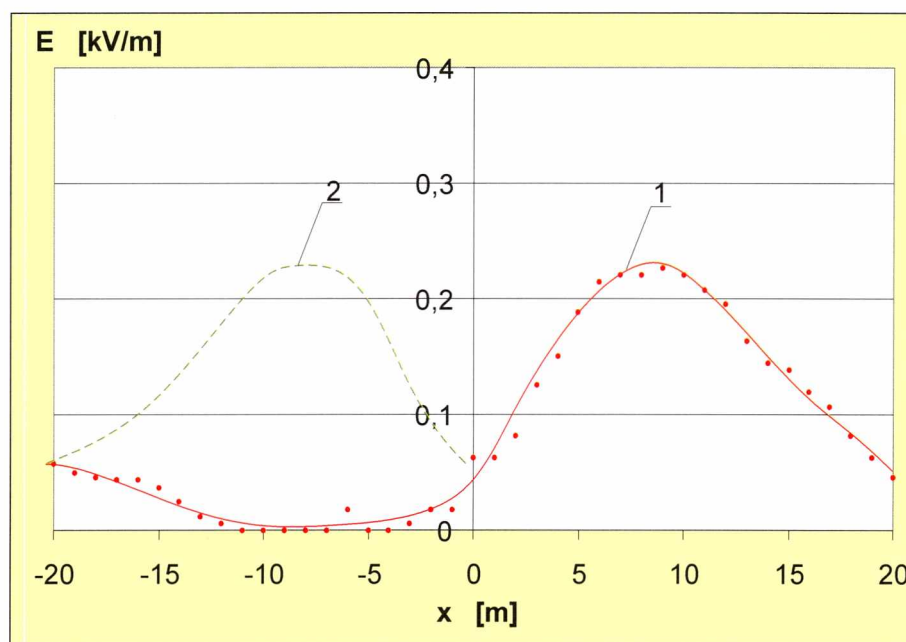
Rys.5.44. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod 4-torową linią 2x380 + 2x110 kV, która pracowała jako linia 3-torowa (wysokość przewodów – $h_{110} = 30$ m)

Z rysunków 5.43 i 5.44 wynika, że natężenie pola elektrycznego i magnetycznego osiąga maksimum po dodatniej stronie przekroju poprzecznego linii, gdzie znajduje się tylko jeden obciążony tor (380 kV). Po ujemnej stronie przekroju linii, gdzie znajdują się dwa obciążone systemy - 380 kV oraz 110 kV, a algebraiczna suma prądu jest większa o 200 A od strony dodatniej, natężenie pola elektrycznego i magnetycznego w punkcie pod linią zostaje skompensowane i osiąga wartości mniejsze od kilku procent w przypadku pola magnetycznego, do nawet kilkudziesięciu procent w przypadku pola elektrycznego (dla takiej samej odległości od osi linii).

Stwierdzenie występowania zjawiska kompensowania się pola elektromagnetycznego pod wielotorowymi liniami wysokiego napięcia spowodowało, iż należy inaczej podchodzić do przeliczania wartości zmierzonych składowych pola elektromagnetycznych na tzw. wartości maksymalne, które wystąpią przy warunkach najbardziej niekorzystnych. Do tej pory uważano [13], iż wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wystąpią w sytuacji, w której odległość przewodów roboczych linii od ziemi będzie najmniejsza oraz gdy obciążenie i napięcie linii przyjmie wartości maksymalne. To stwierdzenie jest prawdziwe dla linii 1 i 2-torowych. Jednak w przypadku linii o liczbie torów większej od 2, gdzie najczęściej dolne tory kompensują pole elektromagnetyczne generowane przez tory górne, aby móc zidentyfikować wartość maksymalną natężenie pola elektrycznego i magnetycznego należy przeanalizować wszystkie przypadki wyłączeń jednego, lub nawet kilku torów linii, co udowodniono w punkcie 7.4 pracy.

Jak wynika z wyników symulacji, przedstawionych między innymi na rysunku 5.45, drzewa i krzewy rosnące pod liniami wysokiego napięcia mają duży wpływ na rozkład

natężenia pola elektrycznego – obniżają istotnie jego wartość. W analizowanym przekroju poprzecznym linii 4x110 kV na odcinku $x = -3 \div -15$ m, znajdowały się krzaki o wysokości około $0,8 \div 2,0$ m. Ponieważ geometryczny układ przewodów fazowych w linii (wzajemne usytuowanie przewodów tej samej fazy w torach) był symetryczny względem osi słupa oraz wartości napięć we wszystkich torach linii były zbliżone do siebie, to zmierzone natężenie pola elektrycznego powinno być symetryczne względem współrzędnej $x = 0$ (przy braku wpływu elementów otoczenia). Jak widać na rysunku 5.44, wartość natężenia pola elektrycznego znacznie się obniża, a nawet spada do zera w miejscu, gdzie występują krzaki. Linia przerywaną na charakterystyce zaznaczono spodziewany rozkład pola elektrycznego w przypadku braku elementów zakłócających pole.



Rys.5.45 Rozkład natężenia pola elektrycznego pod przesłem linii 4x100 kV; 1 – charakterystyka z pomiarów, 2 – charakterystyka spodziewana w przypadku braku elementów zakłócających pole (krzewów)

W przypadku krzaków niskich, obniżone w miejscu (na szerokości) ich występowania natężenie pola elektrycznego ponownie wzrasta za nimi do wartości która występuje w przypadku braku elementów zakłócających pole, począwszy od miejsca, w którym kończy się występowanie krzewów. Natomiast drzewa o stosunkowo dużej wysokości (porównywalnej do wysokości masztów linii) bardzo dobrze ekranują natężenie pola elektrycznego [10], sprowadzając go do wartości bliskich zera, przy czym natężenie to nie odbudowuje się (nie rośnie) w miejscach za drzewami. Mogą więc one stanowić dobry ekran chroniący przed oddziaływaniem tego pola, w szczególności w przypadkach przekroczenia jego wartości dopuszczalnych.

Analizując wyniki rozkładu pola elektromagnetycznego uzyskane z pomiarów na terenie Polski i Niemiec, można dojść do wniosku, iż linie wysokiego napięcia generują pole elektromagnetyczne o natężeniach nie przekraczających wartości granicznych określonych w polskich przepisach, które należą do jednych z najbardziej rygorystycznych na świecie. Nie ma przy tym znaczenia, czy są to linie jedno, dwu, czy czterotorowe. Zdarza się, iż linie wielotorowe generują pole elektromagnetyczne o mniejszych wartościach natężeń pola niż linie jedno, czy dwutorowe [54÷56]. Wpływają na ten efekt dwa parametry:

- odpowiednie rozmieszczenie przewodów tej samej fazy na słupach linii wielotorowych powoduje, iż dochodzi w tych liniach do kompensowania się pola elektromagnetycznego,
- słupy wielotorowych linii są bardzo wysokie (dla budowanej czterotorowej linii Plewiska-Ostrów wynosić będą około 50 i 75 m, a dla linii sześciotorowych, eksploatowanych na terenie Europy Zachodniej, bardzo często wynoszą one 99 m). Ponieważ pole elektromagnetyczne mierzone w danym punkcie jest odwrotnie proporcjonalne do odległości od źródła pola, to przy odpowiednio wysokich słupach wielotorowych linii elektroenergetycznych, pole pod linią przyjmuje wartości porównywalne z uzyskiwanymi pod tradycyjnymi liniami jedno, czy dwutorowymi.

Nieuzasadnione są więc protesty i obawy ludności, która w związku z przebudową linii na układy wielotorowe, wielonapięciowe spodziewa się znaczącego wzrostu pola elektromagnetycznego generowanego przez te linie, a tym samym wzrostu zagrożenia dla ich zdrowia i życia.

6. Komputerowa identyfikacja rozkładu pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii wysokiego napięcia

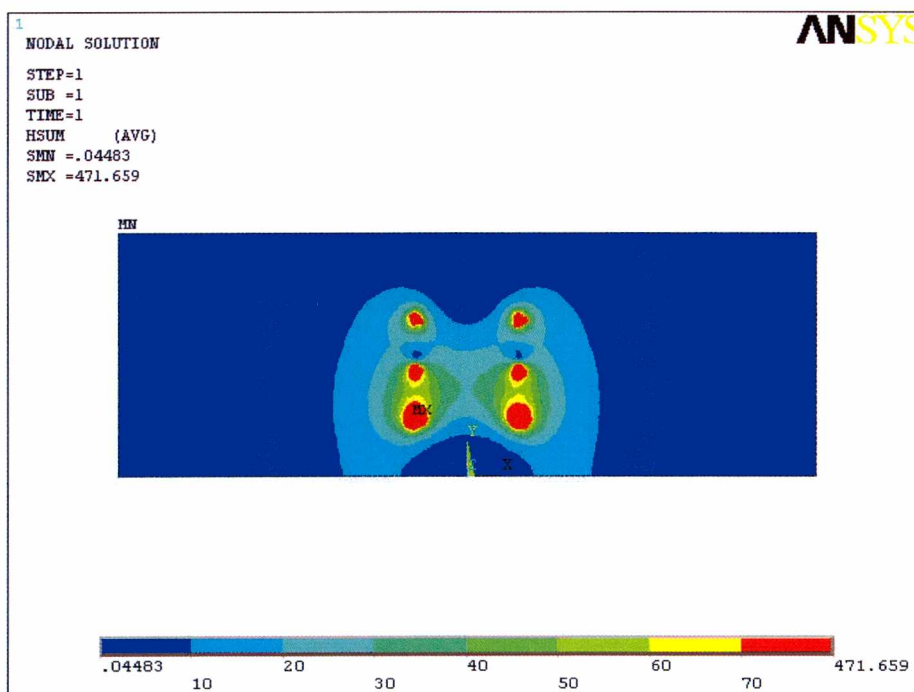
6.1. Przegląd istniejącego oprogramowania do obliczeń pola elektromagnetycznego

Powszechność sprzętu komputerowego, obecność języków programowania wyższego poziomu oraz duża prędkość obliczeń spowodowały powstanie szeregu programów do obliczeń rozkładu pól elektromagnetycznych wokół urządzeń i instalacji elektrycznych, w tym także pod przęsłami linii wysokiego napięcia. Służą one do wyznaczania wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zarówno dla linii już istniejących, jak i projektowanych. Z tego powodu głównymi użytkownikami takiego oprogramowania są biura projektowe, firmy zajmujące się budową linii elektroenergetycznych, jednostki eksploatacyjne oraz ośrodki naukowo – badawcze. Z powodu stosunkowo wąskiego kręgu odbiorców tego typu oprogramowania jego źródłem są najczęściej ośrodki badawcze związane z elektroenergetyką i elektrotechniką lub wydzielone zespoły wyżej wymienionych jednostek. Dlatego powstające programy są bardzo zróżnicowane pod względem obsługi i przystosowane do konkretnych działań, które określa przyszły użytkownik. Użyte w nich algorytmy do obliczania natężenia pola są jednak podobne, niekiedy wręcz takie same. Najważniejszym kryterium stanowiącym o różnicach między programami jest sposób rozwiązywania problemu gromadzenia danych oraz prezentacji i zachowywania uzyskanych wyników.

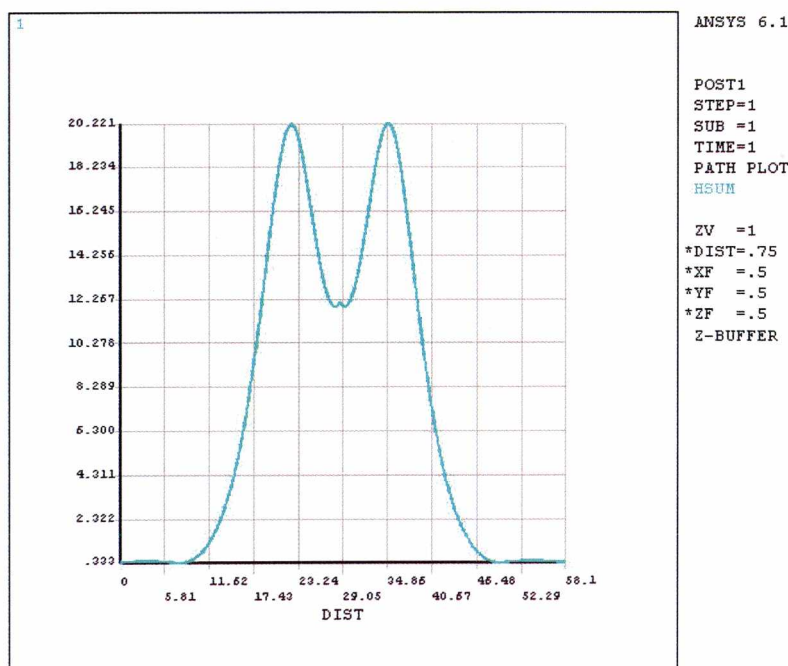
Dużą grupę programów do obliczeń pola elektromagnetycznego wokół urządzeń i instalacji elektrycznych stanowią programy oparte na Metodzie Elementów Skończonych (ANSYS, QuickField, Maxwell, Flux itp.), którą szerzej opisano w rozdziale 4.3.4 pracy. W większości przypadków programy oparte na tej metodzie wykorzystywane są do obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego w maszynach i urządzeniach elektroenergetycznych. Umożliwiają one również obliczenie rozkładu pola pod liniami wysokiego napięcia, w tym pola zniekształconego, czyli powstającego gdy w pobliżu linii znajdują się elementy obce (drzewa, krzewy, budynki). Programy oparte na Metodzie Elementów Skończonych są jednak bardzo rozbudowane i jednocześnie skomplikowane. Symulacja rozkładu pola elektromagnetycznego trwa w tych programach na ogół od kilkudziesięciu minut do nawet kilku godzin. Proces symulacji składa się z następujących kroków:

1. Definiowanie problemu, na który składa się:
 - budowa modelu geometrycznego, czyli wykonanie rysunku zawierającego przewody linii oraz ewentualnie obiekty zniekształcające natężenie pola elektrycznego (domy, drzewa, krzewy, itp.),

- zdefiniowanie własności materiałowych, czyli określenie przenikalności magnetycznej i elektrycznej elementów modelu, ich konduktywności, rozszerzalności cieplnej, itp.,
 - definiowanie warunków granicznych i źródeł pól, czyli określenie przede wszystkim potencjałów i gęstości prądów w poszczególnych elementach modelu.
2. Podział modelu geometrycznego na elementy skończone poprzez generowanie siatki. Obecnie prawie wszystkie programy posiadają moduł automatycznego generowania siatki i same dobierają kształty oraz rozmiary elementów skończonych. Ten etap symulacji w komputerach przeciętnej klasy może trwać nawet kilka godzin, gdy zostanie dobrana zbyt gęsta siatka.
 3. Rozwiązywanie problemu. W oparciu o zdefiniowany model geometryczny, jego własności materiałowe i źródła pola, program automatycznie w kolejnych iteracjach rozwiązuje zadany problem.
 4. Interpretacja wyników. Ten etap symulacji nie jest etapem łatwym, bowiem najczęściej wynikami symulacji są kolorowe mapy wskazujące intensywność natężenia pola w danym miejscu (rys.6.1), które bardzo często nic nam nie mówią. Dlatego aby znaleźć rozkład pola na danej wysokości nad ziemią definiuje się punkty, lub proste, w których szuka się wartości natężenia pola magnetycznego lub elektrycznego (rys.6.2).



Rys.6.1. Przykładowy rozkład natężenia pola magnetycznego w postaci mapy kolorów pod dwutorową linią wysokiego napięcia o pionowym ułożeniu przewodów, wykonany w programie ANSYS



Rys.6.2. Przykładowy rozkład natężenia pola magnetycznego pod dwutorową linią wysokiego napięcia na wysokości $h = 2$ m nad ziemią, wykonany w programie ANSYS

Stopień skomplikowania programów opartych na Metodzie Elementów Skończonych, ich wysoka cena, a także długi czas trwania symulacji sprawiają, iż niechętnie wykorzystuje się je do obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia.

Większość programów służących do obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu jedno i dwutorowych linii wysokiego napięcia oparta jest na metodzie odbicia zwierciadlanego i superpozycji. Posiadają one dużą przejrzystość obsługi dzięki jasnemu i czytelnemu menu. Łatwość wprowadzania parametrów elektroenergetycznych linii i krótki czas symulacji (nie przekraczający kilku minut) sprawiają, że biura projektowe oraz instytucje zajmujące się obliczaniem rozkładu pola elektromagnetycznego pod przęsłami linii napowietrznych korzystają w większości z programów opartych na tej metodzie. Na rynku dostępnych jest wiele tego typu programów do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia (np.: B-fast, Electrican, Resicalc, ACDCLINE, SPOT, Pole, RPLN...).

Programy Pole i Electrican są bardzo podobne do siebie pod względem obsługi – nie posiadają wbudowanych baz danych, a wszystkie parametry linii potrzebne do obliczeń wprowadza się metodą „krok po kroku” dla każdego przewodu linii, lub wczytuje się z wcześniej utworzonego pliku. Wyniki obliczeń podawane są, dla jednej wprowadzonej wysokości zawieszenia przewodów, w formie wykresowej lub tabelarycznej.

Program SPOT jest rozbudowanym programem, w którym znajdują się bazy danych słupów, izolatorów i przewodów elektroenergetycznych. Bazy te można dowolnie edytować i uzupełniać. W programie tym podaje się między innymi współrzędne zawieszenia przewodów

na słupach w danym przęśle, długość przęsła oraz naprężenie przewodów i dzięki temu analizowane jest całe przęsło, a nie jeden jego przekrój poprzeczny. Brak możliwości wykonania symulacji rozkładu pola elektromagnetycznego dla wybranej wysokości zawieszenia przewodów jest jednak bardzo kłopotliwy i w związku z tym program ten jest rzadko wykorzystywany w praktyce.

B-fast jest programem dostępnym on-line na stronie internetowej <http://www.enertech.net/bfast/bfast.html>. Umożliwia on obliczenie rozkładu indukcji magnetycznej w otoczeniu linii elektroenergetycznej. Ponieważ polskie przepisy [6] nakazują identyfikować rozkład natężenia pola magnetycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych, więc uzyskane z symulacji wyniki należy przeliczyć na natężenie pola magnetycznego.

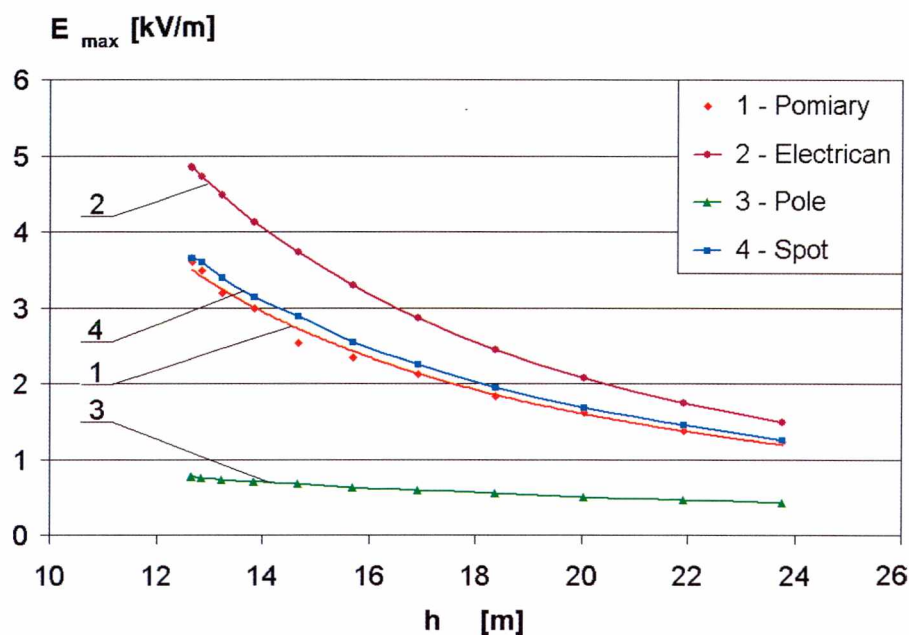
Program Resicalc, podobnie jak B-fast, umożliwia obliczenie jedynie rozkładu indukcji magnetycznej (nie można zbadać rozkładu natężenia pola elektrycznego), tak więc wyniki symulacji należy także i w tym przypadku przeliczyć na natężenie pola magnetycznego. Wbudowane bazy danych w tym programie umożliwiają obliczenie rozkładu indukcji magnetycznej nie tylko pod napowietrznymi liniami wysokiego napięcia, ale i w różnego typu obiektach elektroenergetycznych (np. na stacjach elektroenergetycznych). Wyniki symulacji podawane są w formie wykresu w wybranym przekroju lub obszarze.

Większość z opisanych programów nie uwzględnia aktualnych wymagań technicznych i rynku, i umożliwia obliczenie rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami co najwyżej dwutorowymi.

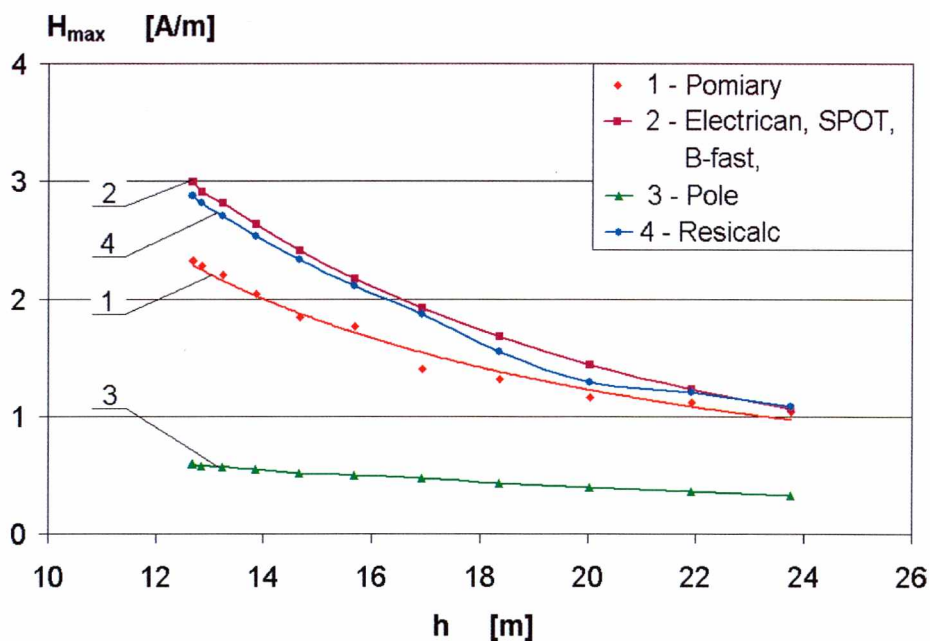
W ostatnim czasie pojawił się na polskim rynku program RPLN, mający umożliwiać obliczanie rozkładu pola pod czterotorowymi liniami wysokiego napięcia, jednak jego przydatność praktyczna nie została jeszcze w pełni wykazana, gdyż nie został on dotychczas zweryfikowany wynikami badań empirycznych pola pod wielotorowymi liniami wysokiego napięcia i jak napisali jego autorzy [7] – model matematyczny, którym się posłużyli tworząc ten program w środowisku Windows, sprawdzili tylko obliczeniowo z użyciem tego samego modelu, z tym tylko że zaimplementowanego w programie MathCad.

W celu porównania i praktycznej oceny przydatności praktycznej niektórych z wymienionych programów przeprowadzono w nich symulację rozkładu pola elektromagnetycznego, a następnie uzyskane w ten sposób wyniki porównano z pomiarami wykonanymi na obiekcie rzeczywistym, którym było przęsło jednotorowej linii o napięciu 400 kV. Wyniki pomiarów pod tą linią oraz warunki pracy linii podczas wykonywania pomiarów przedstawiono w rozdziale 5.5 i załączniku 3. Symulacje komputerowe rozkładu pola elektromagnetycznego zostały wykonane przy uwzględnieniu takich samych konfiguracji przewodów i warunków pracy linii, jak podczas pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Wynikami pomiarów i symulacji były charakterystyki $E = f(x)$ oraz $H = f(x)$ dla różnych odległości przewodów fazowych od ziemi. W celu porównania rozkładu natężenia pola

elektrycznego i magnetycznego uzyskanego z pomiarów i z symulacji komputerowych, odczytano z wykresów $E = f(x)$ oraz $H = f(x)$ wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla danych wysokości przewodów fazowych nad ziemią i wykreślono charakterystyki $E_{max} = f(h)$ (rys.6.3) oraz $H_{max} = f(h)$ (rys.6.4).



Rys.6.3. Rozkłady wartości maksymalnej E_{max} natężenia pola elektrycznego w funkcji odległości od ziemi h przewodów fazowych linii 400 kV otrzymane metodą pomiarową i obliczeniową



Rys.6.4. Rozkłady wartości maksymalnej H_{max} natężenia pola magnetycznego w funkcji odległości od ziemi h przewodów fazowych linii 400 kV otrzymane metodą pomiarową i obliczeniową

Jak wynika z rysunków 6.3 i 6.4 charakterystyki uzyskane z symulacji komputerowych oraz pomiarów mają podobny kształt. Wykresy $E = f(x)$ oraz $H = f(x)$, na podstawie których wykreślono charakterystyki $E_{max} = f(h)$ oraz $H_{max} = f(h)$, również mają zbliżone do siebie przebiegi.

Traktując wartości zmierzone jako poprawne, błędy obliczeń natężenia pola elektrycznego ΔE i magnetycznego ΔH metodą symulacji komputerowych można wyznaczyć korzystając z zależności

$$\Delta E = \frac{|E_s - E_{zm}|}{E_{zm}} \cdot 100, \quad (6.1)$$

$$\Delta H = \frac{|H_s - H_{zm}|}{H_{zm}} \cdot 100, \quad (6.2)$$

w których: E_{zm} , H_{zm} – wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego (dla danej wysokości przewodów fazowych nad ziemią) uzyskane z pomiarów; E_s , H_s – wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego (dla danej wysokości przewodów fazowych nad ziemią) uzyskane z symulacji. Uważa się, że wystarczająca dla praktyki dokładność oszacowań tych wielkości jest zapewniona, gdy są one wyznaczone z błędami nie większymi od 30 % [67,68,69]. Ta relatywnie niezbyt duża dokładność tych oszacowań jest między innymi następstwem tego, że już sama metoda pomiaru rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia jest obarczona licznymi błędami, na które składają się:

- błędy przyrządów pomiarowych do pomiaru natężenia pola elektrycznego i magnetycznego - wzorce pola elektromagnetycznego, na których kalibrowane są przyrządy pomiarowe mają dokładność rzędu $5 \div 10$ % [67,68],
- błędy pomiaru (obliczeń) wysokości przewodów fazowych linii nad ziemią,
- błędy wynikające z ukształtowania terenu – teren nigdy nie jest całkowicie płaski pod przęsłem linii, co sprawia, że pomiar wykonywany na wysokości 2 m nad ziemią jest faktycznie wykonywany na różnych wysokościach w stosunku do jednego punktu odniesienia,
- błąd pomiaru wynikający z obecności mierzącego, a także różnych przedmiotów pod przęsłem linii, które zniekształcają rozkład pola elektromagnetycznego,
- błędy wynikające ze zmienności obciążenia linii – prądy i napięcia podawane przez jednostki eksploatujące linie, które są przyjmowane do obliczeń, nie są wartościami rzeczywistymi prądu i napięcia w chwili wykonywania pomiarów tylko są na ogół przyjmowane jako średnie 15-minutowe.

Z charakterystyk przedstawionych na rysunkach 6.3 i 6.4 wynika, że najmniej dokładnymi są wyniki symulacji z zastosowaniem programu Pole. Błąd względny obliczeń w tym programie dochodzi do 80 %. Wyklucza to przydatność tego programu do szacowania

rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia. Symulacje rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w innych programach zapewniają zadawalającą dla praktyki dokładność oszacowań rozpatrywanych wielkości. Błąd tych oszacowań dla linii jedno i dwutorowych zawiera się w granicach od kilku, do około 30 %.

Nasuwa się jednak pytanie, czy suma błędów pochodzących od dużej liczby przewodów (dla linii 4-6 torowych) nie spowoduje, że pole elektromagnetyczne obliczone tą metodą będzie w znacznym stopniu odbiegać od pola zmierzonego w warunkach rzeczywistych. Dlatego w ramach niniejszej pracy wykonano pomiary pod liniami wysokiego napięcia (1-4 torowymi), skonstruowano model matematyczny rozkładu pola elektroenergetycznego w otoczeniu wielotorowych, wielonapięciowych linii wysokiego napięcia, napisano program komputerowy i zweryfikowano wyniki symulacji pomiarami.

6.2. Program MAH

6.2.1. Bazy danych w programie

Opracowany w ramach pracy doktorskiej program MAH umożliwia wykonywanie obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia o liczbie torów od 1 do 6. Program ten oparty jest na metodzie odbicia zwierciadlanego i superpozycji i oprócz algorytmów do obliczania:

- zwisu przewodów (zarówno dla przęsła płaskiego, jak i pochylego),
- natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w przekroju poprzecznym linii, na dowolnej wysokości od ziemi,

zawiera bazy danych:

- słupów elektroenergetycznych,
- izolatorów,
- przewodów roboczych i odgromowych linii,

co pozwala na dużą oszczędność czasu przy wykonywaniu obliczeń i sprawia, że program MAH jest programem kompletnym i wysoko funkcjonalnym.

Program MAH napisany został przy użyciu programu Delphi 6.0 bazującego na języku programowania Object Pascal i umożliwiającego programowanie obiektowe. Program przystosowany jest do współpracy z komputerami typu PC z zainstalowanym systemem operacyjnym Windows 9x/NT/ME/2K/XP. Ze względu na efektywne wykorzystanie edytora wyników zaleca się, by częstotliwość taktowania procesora nie była mniejsza niż 600 Mz, a pamięć RAM wynosiła co najmniej 128 MB.

Bazy danych w programie oparto na bibliotece Database [57]. W każdej z baz danych możliwe jest dodawanie nowego oraz edycja i usunięcie istniejącego rekordu.

Baza danych słupów elektroenergetycznych, którą pokazano na rysunku 6.5, zawiera współrzędne zawieszenia przewodów linii kratowych o napięciu 110, 220 i 400 kV [58,59,60]

eksploatowanych na terenie Polski oraz nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych linii napowietrznych najwyższych napięć [43,61,62] eksploatowanych w kraju i za granicą (w tym konstrukcje stalowo-rurowe oraz konstrukcje słupów linii wielotorowych, wielonapięciowych wysokiego napięcia).

Baza danych - słupy

Seria słupa / Un [kV]

U45PB	750
B2M9	110
SL24P	110
B2ML3	110
B2P	110
S120N150	110
S12P	110
A12PIPS	110
A120N150	110
A120N120	110
SB0120P	110
S24P	110
S240N150	110
H52P	220
H52PS	220
Y25P	400
Y25PT	400
PETITJEAN	220
W/G20	4x400 + 2x220
D24P	110

Napięcie znamionowe 4x400 + 2x220 [kV]

Ilość torów 6

Współrzędne zawieszenia przewodów:

- odgromowych

X'1	0	X'2	0	X'3	
Y'1	20	Y'1	40	Y'3	

- roboczych

Tor 1

X1	-16	X2	-12	X3	-8
Y1	12	Y2	12	Y3	12

Tor 2

X4	8	X5	12	X6	16
Y4	12	Y5	12	Y7	12

Tor 3

X7	-8	X8	-16	X9	-12
Y7	17	Y8	17	Y9	23

Tor 4

X10	8	X11	16	X12	12
Y10	17	Y11	17	Y12	23

Tor 5

X13	-6	X14	-14	X15	-10
Y13	29	Y14	29	Y15	35

Tor 6

X16	6	X17	14	X18	10
Y16	29	Y17	29	Y18	35

Dodaj rekord
Modyfikuj rekord
Usuń rekord

Rys.6.5. Baza danych słupów elektroenergetycznych w programie MAH

Baza danych izolatorów, którą pokazano na rysunku 6.6, zawiera wszystkie typy powszechnie eksploatowanych izolatorów w napowietrznych liniach wysokiego napięcia o napięciu 110, 220 i 400 kV z podaniem ich długości.

Baza danych - izolatory

Typ izolatora / Un [kV]

ŁP	110
ŁP2	110
ŁPV	110
ŁP	220
ŁP2	220
ŁPV	220
ŁPY	400
ŁP	400
ŁP2	400
ŁPV	400
ŁPY	220

Napięcie znamionowe 220 [kV]

Typ zawieszenia ŁP

Długość izolatora 2,4 [m]

Dodaj rekord
Modyfikuj rekord
Usuń rekord

Rys.6.6. Baza danych izolatorów w programie MAH

Najważniejszą bazą danych w programie jest baza zawierająca dane przewodów roboczych i odgromowych (rys.6.7) wykorzystywanych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Zawarte w niej dane (średnica obliczeniowa, współczynniki wydłużenia cieplnego i sprężystego, ciężar jednostkowy przewodu oraz obciążalność długotrwała przewodów) wykorzystywane są w modułach do obliczania zwisu przewodów oraz rozkładu pola elektromagnetycznego. W bazie zestawiono dane klasycznych przewodów stalowo-aluminiowych, eksploatowanych na całym świecie od wielu lat, jak również dane nowoczesnych przewodów kompaktowych, w tym przewodów elektroenergetycznych z przewodami światłowodowymi [63].

Baza danych - przewody

Typ przewodu

- ALF-6 120
- ALF-6 240
- AFL-6 400
- ALF-8 525
- AFL-6 350 A1/S2A
- AFL-1,7 70
- AFL-1,7 95
- AFL-6 120
- AFL-6 240
- O/FL 70
- O/FL 95

Dodaj rekord

Modyfikuj rekord

Usuń rekord

Typ przewodu ALF-8 525

Średnica obliczeniowa 31,5 [mm]

Współczynnik wydłużenia cieplnego 1,94E-5 [1/°C]

Współczynnik wydłużenia sprężystego 1,403E-5 [mm2/N]

Ciężar jednostkowy przewodu 0,03293 [N/(m*mm2)]

Ciężar jednostkowy przewodu z sadią 0,05235 [N/(m*mm2)]

Obciążalność długotrwała przewodu 1220 [A]

Opis przewodu Roboczy

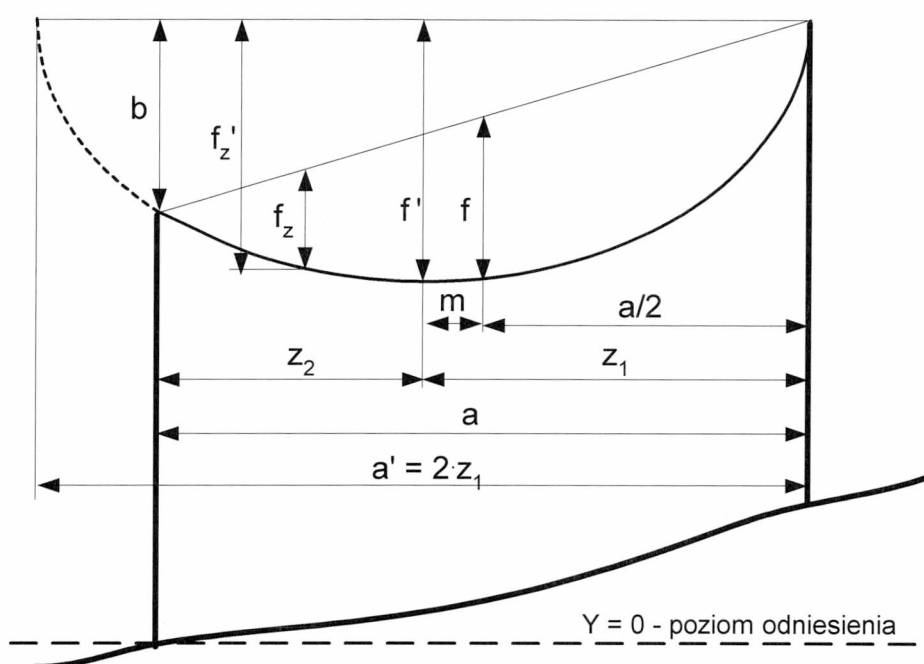
Rys.6.7. Baza danych przewodów roboczych i odgromowych w programie MAH

6.2.2. Moduł obliczania parametrów przęsła

Obliczenia parametrów przęsła (wyznaczanie współrzędnych położenia przewodów w przęsle) jest często niezbędnym elementem przy wyznaczaniu najbardziej niekorzystnych warunków pracy linii, dla których wykonuje się obliczenia natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Na rynku można spotkać katalogi zwisów i naprężeń przewodów dla danych przewodów i różnych długości przęsła. Jednak najczęściej znajdują się tam dane dla przęsła płaskiego, gdy w praktyce takie przęsła występują bardzo rzadko. Aby więc program MAH mógł być narzędziem w pełni przydatnym do obliczeń pola elektromagnetycznego we wszystkich rodzajach przęseł, w programie zamieszczono moduł, w którym można obliczyć

wysokość przewodów nad ziemią zarówno dla przęsła płaskiego, jak i pochyłego. Algorytm obliczania naprężenia δ i zwisu f przewodu [64,65,66] wykorzystanego w programie przedstawiono poniżej.

Przewód linii napowietrznej zawieszony na konstrukcjach wsporczych zwisa według krzywej łańcuchowej (rys. 6.8). Jest to krzywa, której matematycznym odzwierciedleniem są funkcje hiperboliczne, kłopotliwe przy praktycznym stosowaniu. Z tego powodu krzywą zwisania przewodu odwzorowuje się najczęściej za pomocą paraboli. Takie odwzorowanie jest wystarczająco dokładne w przypadku przęseł o rozpiętościach do około 400...600 metrów [65], czyli praktycznie biorąc, wszystkich przęseł stosowanych przy budowie linii napowietrznych.



Rys.6.8. Schemat zwisania przewodu elektroenergetycznego według krzywej łańcuchowej w przęśle pochyłym oraz jego parametry charakterystyczne przyjmowane w obliczeniach naprężenia δ i zwisu przewodu f ; objaśnienia parametrów w tekście

Określenie współrzędnych położenia przewodów wymaga znajomości naprężeń i zwisów w różnych warunkach klimatycznych (w różnych stanach zwisania przewodów). Obliczenie tych naprężeń umożliwia równanie stanów. Równanie to jest zależnością wiążącą trzy parametry: temperaturę T , ciężar jednostkowy g i naprężenie δ . Rozważa się dwa różne stany przewodu:

1. stan 0 (wyjściowy), zdefiniowany parametrami T_0 , g_0 , δ_0 ;
2. stan 1 (obliczeniowy), zdefiniowany parametrami T , g , δ .

W stanie wyjściowym muszą być znane wszystkie trzy parametry przewodu. Za punkt wyjściowy przyjmuje się stan „mróz” lub „sadz” i dla tego stanu przyjmuje się naprężenie

wyjściowe δ_0 . O tym, w którym stanie wystąpią największe naprężenia, a więc który z nich będzie stanem wyjściowym, decyduje rozpiętość przełomowa a_p .

Rozpiętość przełomowa, definiowana jako rozpiętość, przy której wyrównują się naprężenia obliczone dla stanu wyjściowego „mróz” z naprężeniami obliczonymi dla stanu wyjściowego „sadz”, wyraża się ona wzorem

$$a_p = \delta_0 \sqrt{\frac{480 \cdot \alpha}{g_{p+s}^2 - g_p^2}} \quad (6.3)$$

w którym: α - współczynnik wydłużenia cieplnego przewodu, g_p - ciężar jednostkowy przewodu, g_{p+s} - ciężar jednostkowy przewodu z sadzią.

W zależności od relacji pomiędzy długością przęsła a oraz jego rozpiętością krytyczną a_p za punkt wyjściowy (stan 0) przyjmuje się:

- gdy $a < a_p$ - warunek wyjściowy „mróz”:
 $g_0 = g_p, \quad T_0 = -25 \text{ }^\circ\text{C},$
- gdy $a > a_p$ - warunek wyjściowy „sadz”:
 $g_0 = g_{p+s}, \quad T_0 = -5 \text{ }^\circ\text{C}.$

Wartość naprężenia wyjściowego δ_0 dla przewodów roboczych i odgromowych jest zadawana w trakcie użytkowania programu. Jest to wartość podawana w paszporcie każdej eksploatowanej i projektowanej linii.

Dla stanu obliczeniowego (stan 1) należy podać temperaturę T , przy której chcemy obliczyć zwis przewodu, natomiast ciężar jednostkowy przewodów g_p , ciężar jednostkowy przewodów z sadzią g_{p+s} , współczynnik wydłużenia cieplnego przewodu α , współczynnik wydłużenia sprężystego β i średnicę przewodu d program pobiera automatycznie z bazy danych przewodu, po wybraniu typu analizowanego przewodu. W celu wyznaczenia zwisu przewodu w zadanej temperaturze T , należy najpierw obliczyć naprężenie δ przewodu w tych warunkach.

Krzywą zwisania przewodu można z wystarczającą dokładnością, przedstawić za pomocą paraboli [65]. Wtedy równanie stanów, z którego wyznacza się naprężenie, ma postać

$$\delta^2(\delta + A) = B \quad (6.4)$$

przy czym:

$$A = \frac{a^2 g_0^2}{24 \beta \delta_0^2} \frac{\alpha}{\beta} (T - T_0) - \delta_0 \quad (6.5)$$

$$B = \frac{a^2 g^2}{24 \beta} \quad (6.6)$$

Odpowiednio do rozpiętości przełomowej a_p (wzór 6.3) ustala się stan wyjściowy (wielkości z indeksem 0) oraz stan obliczeniowy (indeks 1). Po wyznaczeniu

współczynników A i B równanie stanów można szybko rozwiązać metodą iteracyjną. Pierwsze przybliżenie tego rozwiązania określa wzór

$$\delta_{(0)} = \sqrt{\frac{B}{|A|}}, \quad (6.7)$$

natomiast kolejne przybliżenia oblicza się ze wzoru

$$\delta_{(k+1)} = \delta_{(k)} - \frac{\delta_{(k)}^3 + A\delta_{(k)}^2 - B}{\delta_{(k)}[3\delta_{(k)} + 2A]}. \quad (6.8)$$

Metoda ta jest bardzo szybko zbieżna i doskonale nadaje się do wykorzystania w programie komputerowym. Po kilku iteracjach znajduje się szukaną wartość naprężenia δ , która jest punktem wyjścia do dalszych obliczeń.

Program MAH umożliwia obliczenie wysokości przewodów w dowolnym punkcie przęsła zarówno dla przęseł płaskich, jak i pochyłych. Przęsło pochyłe zostało w nim potraktowane jako przedłużone przęsło płaskie. Zwisający przewód w przęśle pochyłym można traktować tak, jakby to był wycinek większego przęsła poziomego o rozpiętości a' (rys.6.8). Środek tego umyślnego przęsła jest w najniższym punkcie zwisania przewodu. Jest on jednak ruchomy po zmianie rozpiętości tego przęsła.

W pierwszym etapie należy obliczyć mimośród m w przęśle pochyłym

$$m = \frac{\delta b}{ag}. \quad (6.9)$$

Znając wartość m można obliczyć wartości z_1 i z_2 (rys.6.8.) korzystając z zależności

$$z_1 = \frac{a}{2} - m \quad (6.10)$$

$$z_2 = \frac{a}{2} + m \quad (6.11)$$

Opierając się na znajomości z_1 i z_2 oblicza się zwis f' w przęśle uzupełnionym, a następnie, na podstawie geometrycznych zależności, oblicza się wszelkie potrzebne wielkości charakterystyczne dla przęsła pochyłego:

- zwis w środku przęsła uzupełnionego (według [65] tylko dla przęseł pochyłych, dla których $\frac{b}{a} \leq 0,1$)

$$f' = \frac{a^2 g}{8\delta}, \quad (6.12)$$

- zwis w dowolnym punkcie przęsła uzupełnionego

$$f'_z = f' \left(1 - \frac{4 \left(\frac{a}{2} - z \right)^2}{a^2} \right), \quad (6.13)$$

- zwis w dowolnym punkcie przęsła pochyłego

$$f_z = f'_z - \frac{b}{a'}(a - z). \quad (6.14)$$

Znając zwis f_z w dowolnym punkcie rozpiętości przęsła można obliczyć wysokość przewodu h nad poziomem ziemi w przyjętym układzie odniesienia, który zastosowano w programie komputerowym MAH (rys.6.9).

Zwis

Analizowany przewód: ALF-8 525

Napężenie przewodu: 100 [N/mm²]

Temperatura obliczeniowa: 60 [°C]

Wysokość Y1: 22 [m]

Wysokość Y2: 25 [m]

Rozpiętość przęsła a: 350 [m]

Punkt obliczeniowy Z: 10 [m]

Wyniki obliczeń

Zwis f_z w punkcie Z: 3,98 [m]

Wysokość h przewodu nad poziomem odniesienia: 21,02 [m]

Rozpiętość przetomowa: 237,12 [m]

Napężenie rzeczywiste przewodu: 52,66 [N/mm²]

Rys.6.9. Moduł obliczania zwisu i wysokości przewodu w dowolnym miejscu przęsła w programie MAH

Jak widać na rysunku 6.9, w celu wyznaczenia zwisu f_z i wysokości h przewodu nad poziomem odniesienia w dowolnym miejscu przęsła należy wybrać z bazy danych analizowany przewód oraz podać następujące wartości: początkowe napężenie przewodu (wartość dostępna w paszportach linii), wysokości zawieszenia przewodów na słupie, rozpiętość przęsła, temperaturę obliczeniową i punkt w którym zamierza się obliczyć

wysokość przewodu. Po wprowadzeniu wszystkich parametrów i naciśnięciu przycisku oblicz, w module pojawia się okno z wynikami, w którym znajdują się wartości: rozpiętości przełomowej, zwisu i wysokości przewodu nad ziemią w danym punkcie oraz naprężenia przewodu w podanej temperaturze.

Dostępność specjalistycznych przyrządów pomiarowych do wyznaczania wysokości przewodów nad ziemią w warunkach rzeczywistych sprawia, iż aktualnie zwis przewodu wyznacza się najczęściej na etapie projektowania linii. W tym przypadku zwis oblicza się dla granicznej temperatury roboczej przewodu (zalecaną wartością tej temperatury jest 60 °C [71]). Wyznaczenie zwisu w danych warunkach pracy linii jest zagadnieniem bardziej skomplikowanym, gdyż wymaga znajomości aktualnej temperatury przewodu, która jest zależna między innymi od warunków atmosferycznych (temperatury otoczenia, prędkości wiatru i nasłonecznienia) oraz od obciążenia prądowego linii. Obliczenie temperatury przewodu w danych warunkach pracy linii stwarza więc zwykle duże trudności. W celu ich eliminacji został w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej opracowany (z moim udziałem) program komputerowy TEMP umożliwiający jej obliczanie [82]. Model matematyczny z tego programu posłużył do opracowania, wchodzącego w skład programu MAH, modułu do obliczania temperatury przewodu, co zwiększyło stopień uniwersalności programu MAH. Weryfikacja empiryczna wykazała w pełni poprawność i przydatność praktyczną tego modułu. Temperaturę przewodu T_p oblicza się w nim z zależności

$$T_p = I^2 RS + T_o, \quad (6.15)$$

w której I – natężenie prądu linii, R – rezystancja jednostkowa przewodu linii (odczytywana z tablic), S – współczynnik oporu cieplnego warstw izolacyjnych przewodnika (stały dla danego przekroju przewodu – odczytywany z tablic), T_o – temperatura otoczenia.

Żmudność i pracochłonność przedstawionych obliczeń była dodatkowym argumentem za dołączeniem tych algorytmów do programu MAH, które w połączeniu z bazą danych konstrukcji wsporczych i zawieszonych przewodów, w znacznym stopniu upraszczają wyznaczanie natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół przebiegu linii wysokiego napięcia w warunkach najbardziej niekorzystnych.

6.2.3. Moduł obliczania natężenia pola elektrycznego i magnetycznego

Głównym elementem programu MAH jest moduł do obliczania natężenia pola elektrycznego i magnetycznego (rys.6.10) w otoczeniu wielotorowych (wielonapięciowych) linii wysokiego napięcia. Umożliwia on wykonywanie obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia, o liczbie torów od 1 do 6. Program ten oparty jest na metodzie odbicia zwierciadlanego i superpozycji, która została szerzej opisana w punkcie 4.3.5 pracy.

E.H - x,y,z

Dane Wejściowe | Pole elektryczne | Pole magnetyczne

Przewody odgromowe

	X [m]	Y [m]	U [kV]	I [A]	Typ przewodu
1:	-13	63.31	0	0	AFL-1,7 70
2:	13	63.31	0	0	AFL-1,7 70
3:			0	0	

Dane opcjonalne

Wysokość obliczeniowa: 2 [m]
 Częstotliwość sieci: 50 [Hz]
 Rezystywność gruntu: 100 [Ω /m]
 Przenikalność elektryczna środowiska: 8.85E-12 [F/m]
 Zakres osi od: -50 do 50 [m]

Ilość torów: 4

Tor 1

	X [m]	Y [m]	U [kV]	I [A]	i [°]	u [°]	Typ przewodu	Liczba przewodów na fazę
L1:	-13.75	34	245	1220	0	0	ALF-8 525	1
L2:	-9.05	34	245	1220	0	0		
L3:	-4.55	34	245	1220	0	0		

Tor 2

	X [m]	Y [m]	U [kV]	I [A]	i [°]	u [°]	Typ przewodu	Liczba przewodów na fazę
L1:	4.55	34	245	1220	0	0	ALF-8 525	1
L2:	9.05	34	245	1220	0	0		
L3:	13.75	34	245	1220	0	0		

Tor 3

	X [m]	Y [m]	U [kV]	I [A]	i [°]	u [°]	Typ przewodu	Liczba przewodów na fazę
L1:	-5.52	50.87	420	2850	0	0	AFL-6 350 A1/S2A	3

OBLICZ
 Cancel
 Zapisz
 Odczytaj

Rys.6.10. Widok modułu programu MAH do obliczania natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod wielotorowymi, wielonapięciowymi liniami wysokiego napięcia

W module tym znajdują się trzy zakładki:

- dane wejściowe,
- pole elektryczne,
- pole magnetyczne.

Zakładkę dane wejściowe można podzielić na trzy główne części, w których można wyróżnić:

- dane opcjonalne – znajdują się tam wartości, które są zazwyczaj stałe dla wszystkich symulacji – wysokość obliczeniowa (równa 2 m wg [6]), częstotliwość sieci (50 Hz), przenikalność elektryczna środowiska ($\epsilon = 8,85$ pF), rezystywność gruntu (100 Ω m), zakres osi w przekroju poprzecznym pręśla (od -50 do 50 m). Dane te można w miarę potrzeb zmieniać, lecz aby skrócić czas symulacji do minimum, każdorazowo po uruchomieniu programu zawsze są wpisane powyższe wartości;
- część, w której znajdują się dane przewodów odgromowych – ich współrzędne, typy przewodów oraz ewentualnie wartość prądu i napięcia tych przewodów;

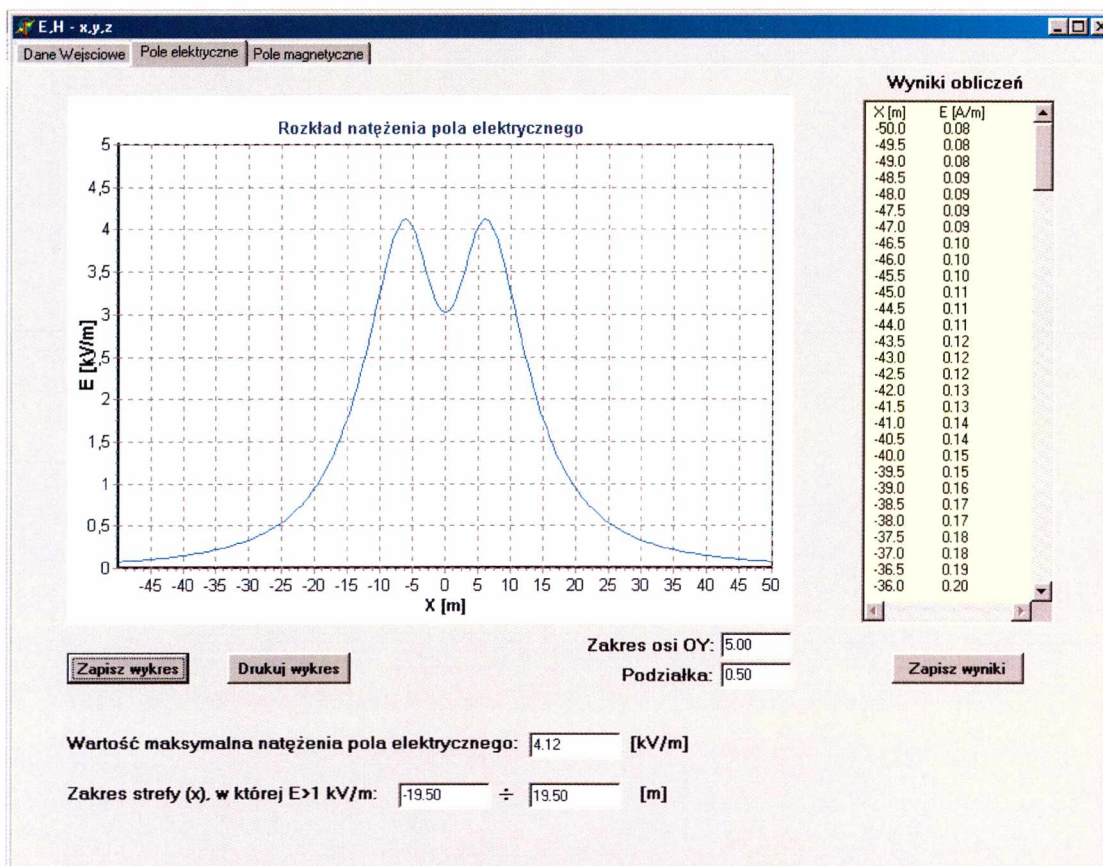
- okna do wprowadzania danych przewodów w kolejnych torach linii – w zależności od liczby torów, którą wybiera się w jednym z okienek programu, pojawiają się okna, w które należy wpisać:
 - współrzędne przewodów w danym torze,
 - wartość napięcia oraz natężenia prądu roboczego,
 - wybrać z bazy danych typ przewodu.

Można także sterować kątami początkowymi prądu i napięcia (ψ_u , ψ_i) – dzięki czemu w programie można również symulować rozkład pola elektromagnetycznego pod wielofazowymi liniami wysokiego napięcia.

Na rozkład natężenia pola elektrycznego ma również wpływ liczba przewodów oraz długość odstępniaka w przypadku stosowania wiązki przewodów, co również zostało uwzględnione w programie (wiele programów nie uwzględnia tego parametru, co jest jednym ze źródeł błędów obliczeniowych).

Po wprowadzeniu wszystkich danych i naciśnięciu przycisku „OBLICZ”, w zakładkach „pole elektryczne” (rys.6.11) i „pole magnetyczne” pojawiają się wyniki symulacji, które prezentowane są w postaci tabelarycznej oraz w postaci wykresu. Zarówno tabelę z wynikami, jak i wykres można zapisać i wkleić do dowolnego programu, np. Word, Excell.

Najczęściej w dokumentacji ekologicznej wymaga się załączenia wykresów z obliczeń i podania wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego oraz pola magnetycznego, a także szerokości pasa, w którym $E \geq 1$ kV. W tym celu, aby ułatwić analizę wyników, wszystkie te dane zostały wyszukane i wyświetlone w specjalnych okienkach znajdujących się pod wykresem (rys.6.9).



Rys.6.9. Widok zakładki modułu programu MAH do obliczania natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod wielotorowymi, wielonapięciowymi liniami wysokiego napięcia

Wszystkie parametry przesła wprowadzone do zakładki „dane wejściowe” można zapisywać i odczytywać z pliku, co dodatkowo usprawnia i wprowadza oszczędność czasu w przeprowadzaniu symulacji.

6.2.4. Weryfikacja opracowanych algorytmów obliczeniowych

Nieodzownym elementem wszystkich rozważań teoretycznych, opartych na modelach matematyczno-fizycznych, jest konieczność ich weryfikacji. Najlepsza jest oczywiście weryfikacja empiryczna, czyli porównanie wartości obliczonych według danego modelu z wartościami z pomiarów wykonanych na obiektach rzeczywistych. Ponieważ nie zawsze jest to możliwe, często wartości obliczone porównuje się z wyznaczonymi metodami teoretycznymi wartościami wzorcowymi, uważanymi za poprawne.

W przypadku modelu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, który wykorzystano w programie MAH, wykonano, przedstawioną w niniejszym rozdziale pracy, jego weryfikację empiryczną pomiarami przeprowadzonymi pod liniami wysokiego napięcia eksploatowanymi na terenie Polski oraz na terenie Niemiec. Moduł do obliczania parametrów przesła linii (zwisu oraz naprężenia przewodów w danej temperaturze oraz rozpiętości

przełomowej) zweryfikowano natomiast poprzez porównanie wartości obliczonych z wartościami zawartymi w tablicach zwisów i naprężeń [64].

W tabelach 6.1÷6.4 porównano obliczone w programie MAH wartości parametrów przęsła, z wartościami zestawionymi w tablicach oraz oszacowano błędy obliczeń, dla trzech różnych przewodów elektroenergetycznych. Błędy obliczeń zwisu Δf , naprężenia $\Delta \delta$ i rozpiętości przełomowej Δa_p w programie wyznaczono korzystając z zależności

$$\Delta f = \frac{|f_{obl} - f_T|}{f_T} \cdot 100, \quad (6.16)$$

$$\Delta \delta = \frac{|\delta_{obl} - \delta_T|}{\delta_T} \cdot 100, \quad (6.17)$$

$$\Delta a_p = \frac{|a_{pobl} - a_{pT}|}{a_{pT}} \cdot 100, \quad (6.18)$$

w których: f_T , δ_T , a_{pT} – wartości tabelaryczne, traktowane jako wartości poprawne, f_{obl} , δ_{obl} , a_{pobl} – wartości obliczone w programie.

Tabela 6.1. Weryfikacja obliczeń zwisu i naprężenia w programie MAH dla przewodu typu AFL-6 120 mm²

Dane wejściowe			Obliczenia w programie		Wartości z tabel		Błędy	
T [°C]	a [m]	δ_0 [N/mm ²]	f_{obl} [m]	δ_{obl} [N/mm ²]	f_T [m]	δ_T [N/mm ²]	Δf [%]	$\Delta \delta$ [%]
-25	200	63,8	5,56	31,0	5,60	31,1	0,7	0,3
0	200	98,1	3,27	52,4	3,29	53,0	0,6	1,1
20	200	107,9	3,33	51,8	3,34	52,2	0,3	0,8
40	200	117,7	3,46	49,9	3,46	50,3	0	0,8
40	100	107,9	1,14	37,9	1,13	38,6	0,9	1,8
40	250	98,1	6,80	39,7	6,82	39,9	0,3	0,5
40	300	88,3	10,90	35,6	10,94	35,8	0,4	0,6
40	400	63,8	26,60	26,0	26,75	26,0	0,6	0
-25	100	88,3	0,49	88,3	0,49	88,3	0	0
0	200	88,3	3,90	44,2	3,92	44,4	0,5	0,5
20	300	88,3	10,34	37,6	10,39	37,8	0,5	0,5
40	400	88,3	19,19	36,0	19,28	36,1	0,5	0,3

Tabela 6.2. Weryfikacja obliczeń zwisu i naprężenia w programie MAH dla przewodu typu AFL-6 240 mm²

Dane wejściowe			Obliczenia w programie		Wartości z tabel		Błędy	
T [°C]	a [m]	δ_0 [N/mm ²]	f_{obl} [m]	δ_{obl} [N/mm ²]	f_T [m]	δ_T [N/mm ²]	Δf [%]	$\Delta \delta$ [%]
-25	300	63,8	10,53	36,8	10,60	36,9	0,7	0,3
0	300	98,1	6,58	59,0	6,61	59,3	0,5	0,5
20	300	107,9	6,48	59,8	6,50	60,2	0,3	0,7
40	300	117,7	6,53	59,4	6,54	59,8	0,2	0,7
40	100	107,9	1,14	37,9	1,13	38,6	0,9	1,8
40	200	98,1	3,72	46,3	3,72	46,8	0,0	1,1
40	350	88,3	11,97	44,1	12,01	44,3	0,3	0,5
40	400	63,8	21,31	32,4	21,42	32,5	0,5	0,3
-25	100	98,1	0,44	98,1	0,44	98,1	0	0
0	200	98,1	2,58	66,9	2,59	67,2	0,4	0,4
20	300	98,1	7,30	53,1	7,33	53,5	0,4	0,7
40	400	98,1	13,92	49,6	13,97	49,8	0,4	0,4

Tabela 6.3. Weryfikacja obliczeń zwisu i naprężenia w programie MAH dla przewodu typu AFL-8 525 mm²

Dane wejściowe			Obliczenia w programie		Wartości z tabel		Błędy	
T [°C]	a [m]	δ_0 [N/mm ²]	f_{obl} [m]	δ_{obl} [N/mm ²]	f_T [m]	δ_T [N/mm ²]	Δf [%]	$\Delta \delta$ [%]
-25	400	63,8	15,14	43,5	14,90	43,3	1,6	0,5
0	400	98,1	9,71	67,8	9,54	67,6	1,8	0,3
20	400	107,9	9,55	69,0	9,37	68,7	1,9	0,4
40	400	93,2	12,11	54,4	11,93	54,1	1,5	0,6
40	250	107,9	4,40	58,2	4,32	58,3	1,9	0,2
40	300	98,1	6,74	54,9	6,63	54,6	1,7	0,5
40	400	88,3	12,76	51,6	12,58	51,3	1,4	0,6
40	500	63,8	26,59	38,7	26,26	38,4	1,3	0,8
-25	200	98,1	1,67	98,1	1,64	98,1	1,8	0,0
0	300	98,1	5,17	71,4	5,08	71,4	1,8	0,0
20	400	98,1	10,61	61,9	10,46	61,7	1,4	0,3
40	500	98,1	17,55	58,6	17,32	58,2	1,3	0,7

Tabela 6.4. Weryfikacja obliczeń wartości przełomowej w programie MAH dla różnych typów przewodów

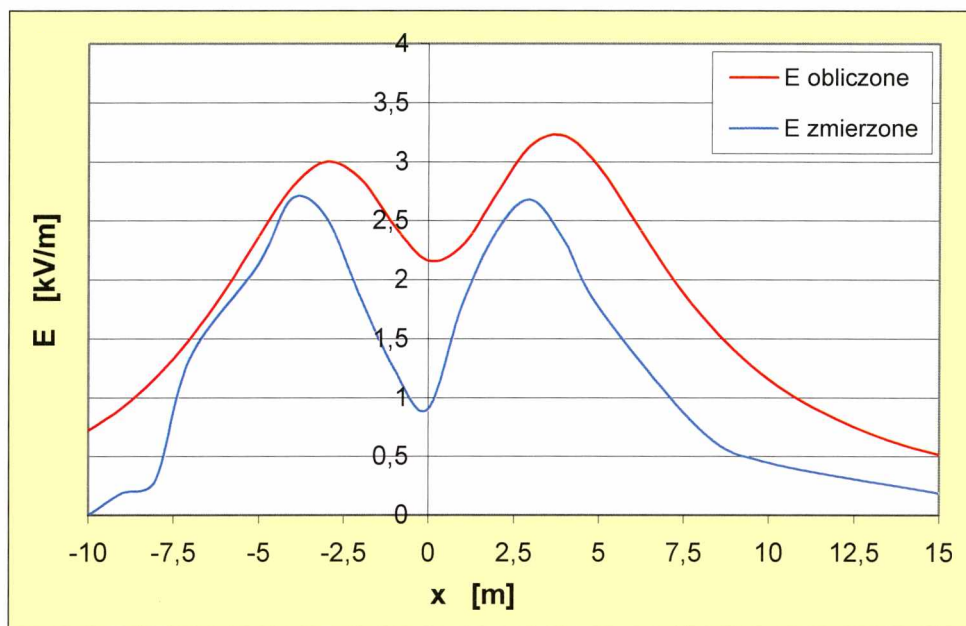
Typ przewodu	δ_0 [N/mm ²]	a_{pobl} [m]	a_{pT} [m]	Δa_p [%]
AFL-6 120 mm ²	78,5	97,68	97,19	0,5
	88,3	109,87	109,34	0,5
	98,1	122,07	121,40	0,6
	107,9	134,26	133,63	0,5
AFL-6 240 mm ²	78,5	132,17	131,62	0,4
	88,3	148,67	148,07	0,4
	98,1	165,17	164,52	0,4
	107,9	181,67	180,97	0,4
AFL-8 525 mm ²	78,5	186,14	185,77	0,2
	88,3	209,38	208,99	0,2
	98,1	232,62	232,21	0,2
	107,9	255,86	257,99	0,8

Jak wynika z porównania wartości parametrów pręśla wyznaczonych przy pomocy programu komputerowego z wartościami zawartymi w tablicach zwisów i naprężeń przewodów [64], błędy obliczeń nie przekroczyły 2 %. Tak małe błędy obliczeń są dowodem na to, że program został napisany prawidłowo. Możliwe jest więc wyznaczanie za pomocą programu MAH wysokości przewodów w każdym punkcie pręśla płaskiego, jak i pochyłego z wystarczającą dla obliczeń praktycznych dokładnością.

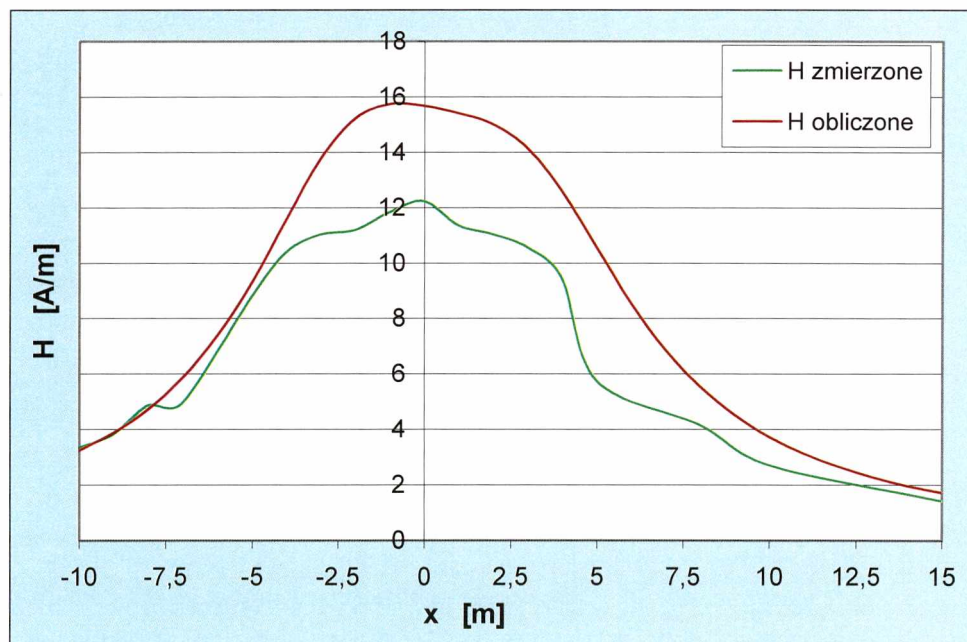
Moduł do obliczania rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w programie MAH został zweryfikowany poprzez porównanie wartości otrzymanych z symulacji komputerowych z wynikami pomiarów rozkładów pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia, przedstawionymi w rozdziale 5. We wszystkich przypadkach symulacje komputerowe rozkładu pola elektromagnetycznego zostały wykonane przy uwzględnieniu takich samych konfiguracji przewodów i warunków pracy linii, jak podczas pomiarów na obiektach rzeczywistych. Poniżej, ze względu na swoją obszerność, na rysunkach 6.10 ÷ 6.21 przedstawiono jedynie przykładowe wyniki weryfikacji modelu. W przypadku linii, dla których badania rozkładu pola elektromagnetycznego przeprowadzono tylko w jednym przekroju pomiarowym, wyniki weryfikacji przedstawione są w postaci wykresów $E = f(x)$ i $H = f(x)$ wyznaczonych obliczeniowo i pomiarowo. Natomiast dla linii, pod którymi przeprowadzono pomiary pola w kilku pasach pomiarowych, oprócz wspomnianych wykresów dla jednego, wybranego przekroju, w tabelach 6.5 ÷ 6.9 zestawiono

również wyniki obliczeń wartości maksymalnych pola dla wszystkich przekrojów pomiarowych linii. W oparciu o wzory 6.1 i 6.2 obliczono również błędy wyznaczenia maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w programie MAH.

Na rysunkach 6.10 ÷ 6.15 oraz w tabelach 6.5 i 6.6 przedstawiono zestawienie porównawcze natężeń pól elektrycznego E i magnetycznego H , dla linii o napięciu 110 kV, dla których wyniki pomiarów przedstawiono w rozdziale 5.3 i załączniku 1.



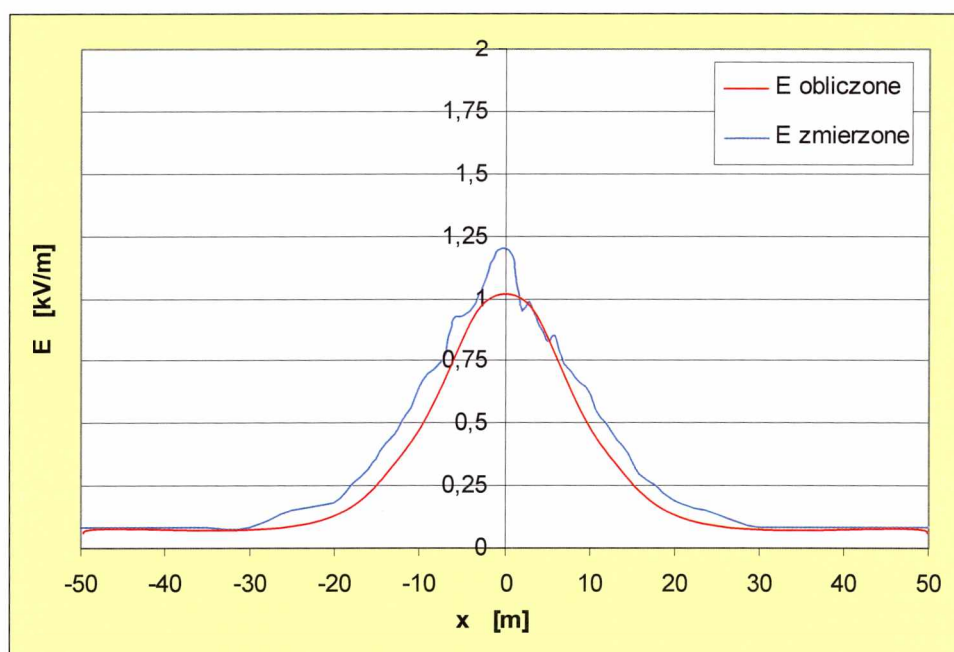
Rys.6.10. Rozkłady natężeń pola elektrycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla jednotorowej linii S-406 o napięciu 110 kV



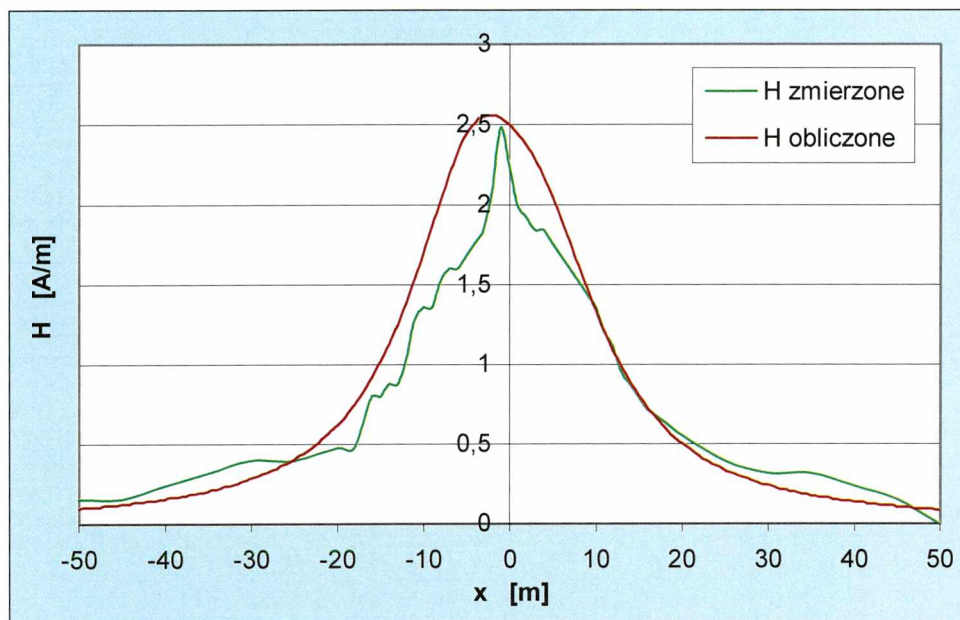
Rys.6.11. Rozkłady natężeń pola magnetycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla jednotorowej linii S-406 o napięciu 110 kV

Tabela 6.5. Weryfikacja wyników obliczeń wartości maksymalnych natężeń pól elektrycznego i magnetycznego otrzymanych z programu MAH wynikami pomiarów tych pól dla dwutorowej linii S-125, S-126 o napięciu 110 kV

h [m]	$E_{\max \text{ obl}}$ [kV/m]	$E_{\max \text{ zm}}$ [kV/m]	ΔE [%]	$H_{\max \text{ obl}}$ [A/m]	$H_{\max \text{ zm}}$ [A/m]	ΔH [%]
13,40	0,62	0,48	29,2	1,30	1,36	4,4
12,24	0,69	0,85	18,8	1,57	1,60	1,9
11,16	0,89	0,98	9,2	1,98	2,08	4,8
10,29	1,02	1,20	15,0	2,56	2,48	3,2
9,64	1,20	1,34	10,4	3,01	2,96	1,7
9,20	1,31	1,38	5,1	3,30	2,88	14,6
8,98	1,38	1,49	7,4	3,30	3,12	5,8
8,94	1,39	1,56	10,9	3,34	3,20	4,4



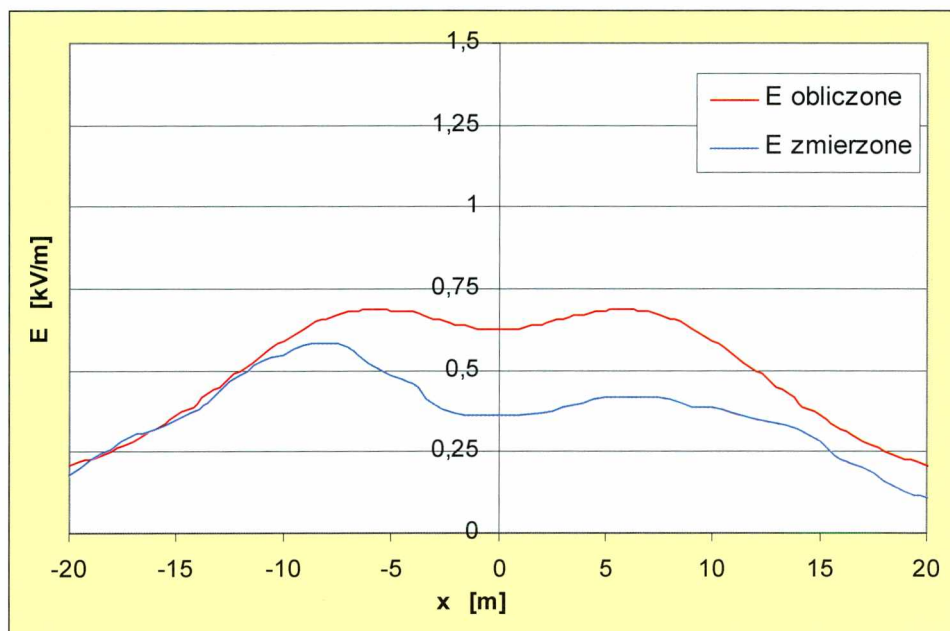
Rys.6.12. Rozkłady natężeń pola elektrycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla dwutorowej linii S-125, S-126 o napięciu 110 kV



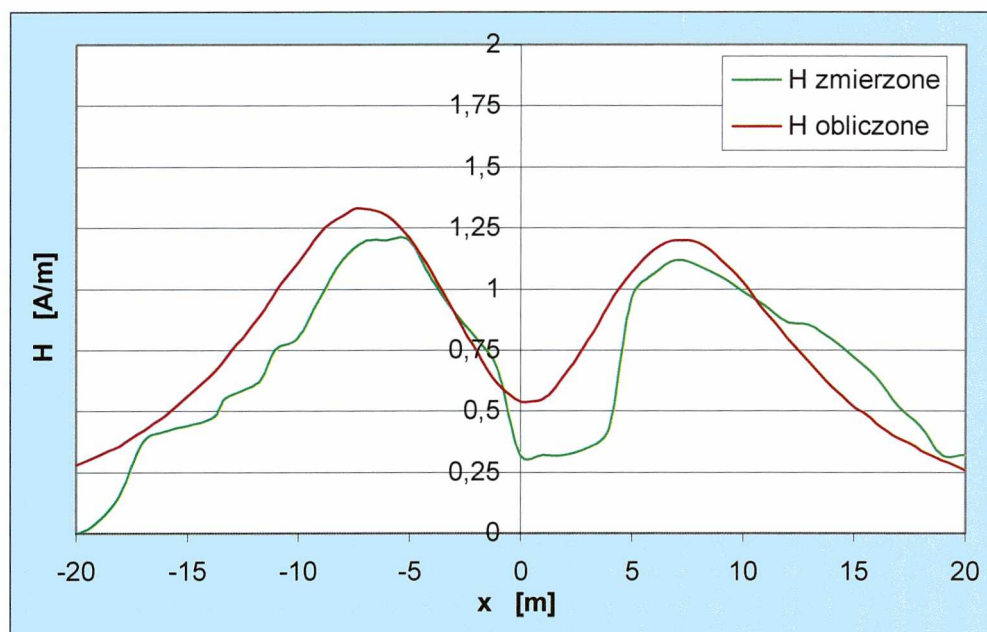
Rys.6.13. Rozkłady natężeń pola magnetycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla dwutorowej linii S-125, S-126 o napięciu 110 kV

Tabela 6.6. Weryfikacja wyników obliczeń wartości maksymalnych natężeń pól elektrycznego i magnetycznego otrzymanych z programu MAH wynikami pomiarów tych pól dla czterotorowej linii 110 kV relacji Urberach – Münster (Niemcy)

h [m]	$E_{\max \text{ obl}}$ [kV/m]	$E_{\max \text{ zm}}$ [kV/m]	ΔE [%]	$H_{\max \text{ obl}}$ [A/m]	$H_{\max \text{ zm}}$ [A/m]	ΔH [%]
14,70	0,34	0,28	21,4	0,39	0,56	30,3
12,60	0,47	0,39	20,5	0,53	0,72	26,4
10,35	0,69	0,58	19,0	0,71	0,88	19,3
8,56	0,99	0,79	25,3	1,01	0,96	5,2
7,65	1,24	0,99	25,3	1,20	1,33	9,8



Rys.6.14. Rozkłady natężeń pola elektrycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla czterotorowej linii 110 kV relacji Urberach – Münster (Niemcy)



Rys.6.15. Rozkłady natężeń pola magnetycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla czterotorowej linii 110 kV relacji Urberach – Münster (Niemcy)

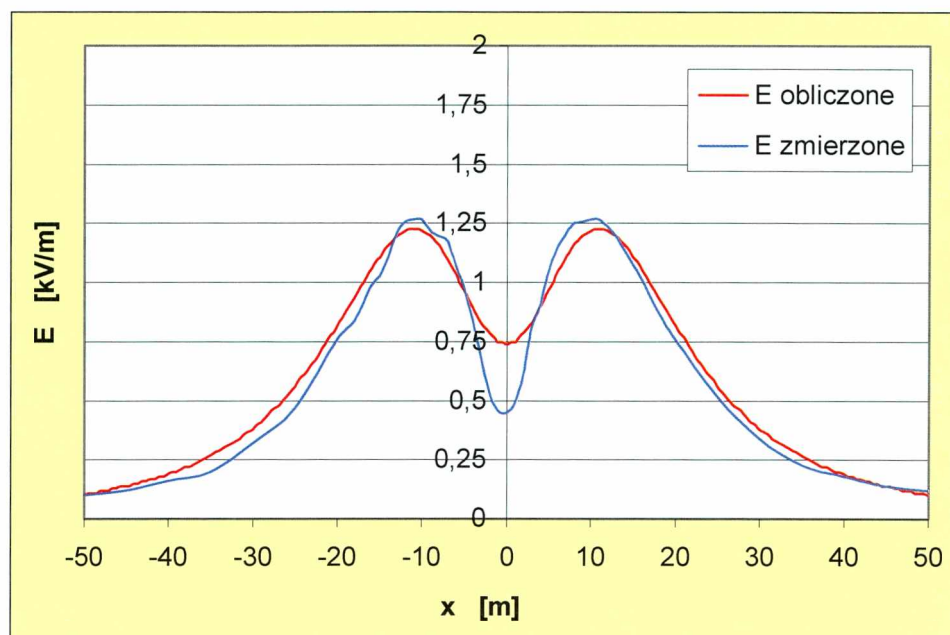
Jak wynika z wykresów umieszczonych na rysunkach 6.10 ÷ 6.15 oraz wyników zawartych w tabelach 6.5 i 6.6, charakterystyki wyznaczone pomiarowo i obliczeniowo mają taki sam kształt, a błędy obliczeń wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, oszacowane na podstawie wzorów 6.1 i 6.2 są znacznie mniejsze od dopuszczalnej wartości granicznej równej 30 %. Tylko w jednym przypadku (tab. 6.6) błąd obliczeń wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego nieznacznie przekroczył 30 %

(30,3 %). Nie jest to jednak spowodowane błędami lub uproszczeniami przyjętymi w modelu matematycznym pola elektromagnetycznego, tylko wpływem sąsiedniej linii o napięciu 220 kV, której trasa była oddalona o około 50 m od badanej linii. W pozostałych przekrojach pomiarowych tej linii błędy obliczeń zawierają się w dopuszczalnych granicach.

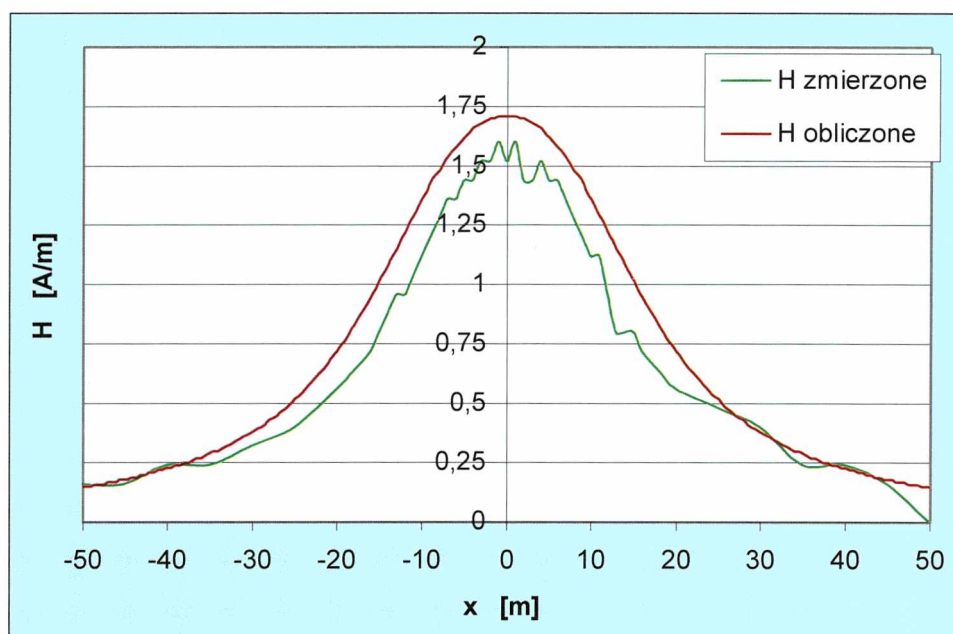
Weryfikację modelu dla jednotorowej linii o napięciu znamionowym 220 kV, przedstawionej w rozdziale 5.4 i załączniku 2, ukazano na rysunkach 6.16 i 6.17. Ponieważ pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego pod tą linią przeprowadzono w 11 poprzecznych przekrojach pomiarowych przesła – dla 11 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi, to w tabeli 6.7 zestawiono wartości maksymalne natężeń pola elektrycznego i magnetycznego wyznaczonego pomiarowo i obliczeniowo w każdym z przekrojów oraz błędy ich obliczeń.

Tabela 6.7. Weryfikacja wyników obliczeń wartości maksymalnych natężeń pól elektrycznego i magnetycznego otrzymanych z programu MAH wynikami pomiarów tych pól dla jednotorowej linii 220 kV

h [m]	$E_{\max \text{ obl}}$ [kV/m]	$E_{\max \text{ zm}}$ [kV/m]	ΔE [%]	$H_{\max \text{ obl}}$ [A/m]	$H_{\max \text{ zm}}$ [A/m]	ΔH [%]
18,50	0,81	0,77	5,2	1,15	0,96	19,8
17,05	0,96	1,01	5,0	1,35	1,28	5,5
14,92	1,23	1,27	3,1	1,71	1,60	6,9
13,22	1,54	1,67	7,8	2,11	1,92	9,9
11,45	2,02	2,13	5,2	2,68	2,56	4,7
9,70	2,68	2,84	5,6	3,44	3,20	7,5
8,31	3,52	3,72	5,4	4,32	4,24	1,9
7,86	3,92	4,16	5,8	4,72	4,48	5,4
7,50	4,19	4,25	1,4	5,24	4,96	5,6
7,46	4,24	4,27	0,7	5,29	4,88	8,4
7,34	4,35	4,29	1,4	5,4	5,04	7,1



Rys.6.16. Rozkłady natężeń pola elektrycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla jednotorowej linii 220 kV



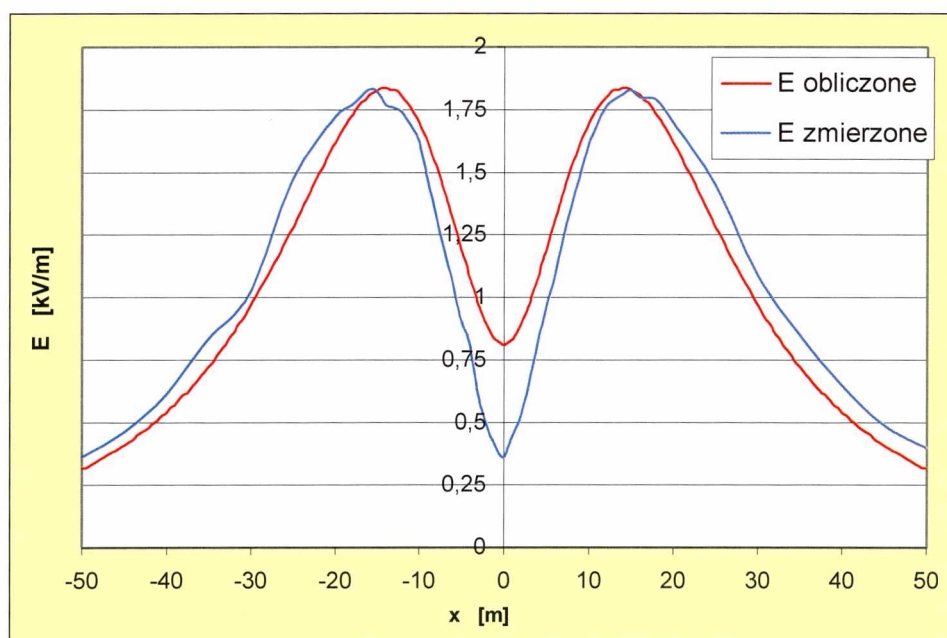
Rys.6.17. Rozkłady natężeń pola magnetycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla jednotorowej linii 220 kV

Jak wynika z porównania wartości przedstawionych w tabeli 6.7 oraz wykresów umieszczonych na rysunkach 6.16 i 6.17 charakterystyki wyznaczone pomiarowo i obliczeniowo pod linią 220 kV mają taki sam kształt (prawie się pokrywają), a błędy obliczeń wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego tylko w 1 przypadku na 22 przekraczają 10 %, natomiast w pozostałych przypadkach błędy te wynoszą jedynie kilka procent.

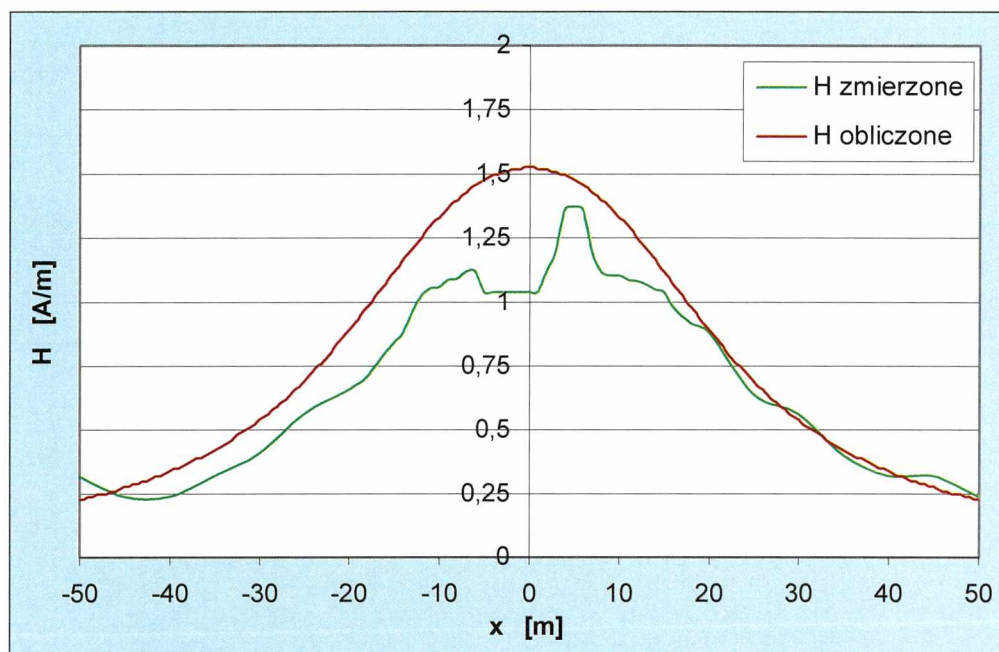
Na rysunkach 6.18 ÷ 6.21 oraz w tabelach 6.8 i 6.9 zestawiono porównanie natężenia pola elektrycznego E i magnetycznego H wyznaczone pomiarowo oraz obliczeniowo, dla jednotorowej linii o napięciu 400 kV oraz dla czterotorowej linii (pracującej jako linia trzytorowa) 2x380 kV + 110 kV. Wyniki pomiarów dla tych linii przedstawiono w rozdziale 5.5 i załączniku 3.

Tabela 6.8. Weryfikacja wyników obliczeń wartości maksymalnych natężeń pól elektrycznego i magnetycznego otrzymanych z programu MAH wynikami pomiarów tych pól dla jednotorowej linii 400 kV

h [m]	$E_{\max \text{ obl}}$ [kV/m]	$E_{\max \text{ zm}}$ [kV/m]	ΔE [%]	$H_{\max \text{ obl}}$ [A/m]	$H_{\max \text{ zm}}$ [A/m]	ΔH [%]
25,00	1,14	1,22	6,6	1,00	1,04	3,8
23,16	1,33	1,37	2,9	1,14	1,12	1,8
21,27	1,56	1,62	3,7	1,32	1,12	17,9
19,61	1,84	1,83	0,5	1,53	1,36	12,5
18,16	2,18	2,13	2,3	1,69	1,44	17,4
16,92	2,44	2,34	4,3	1,96	1,76	11,4
15,90	2,73	2,54	7,5	2,13	1,84	15,8
15,09	3,01	3,00	0,3	2,30	2,08	10,6
14,48	3,24	3,18	1,9	2,47	2,16	14,4
14,09	3,41	3,52	3,1	2,56	2,24	14,3
13,91	3,48	3,6	3,3	2,58	2,32	11,2
13,86	3,56	3,66	2,7	2,62	2,32	12,9



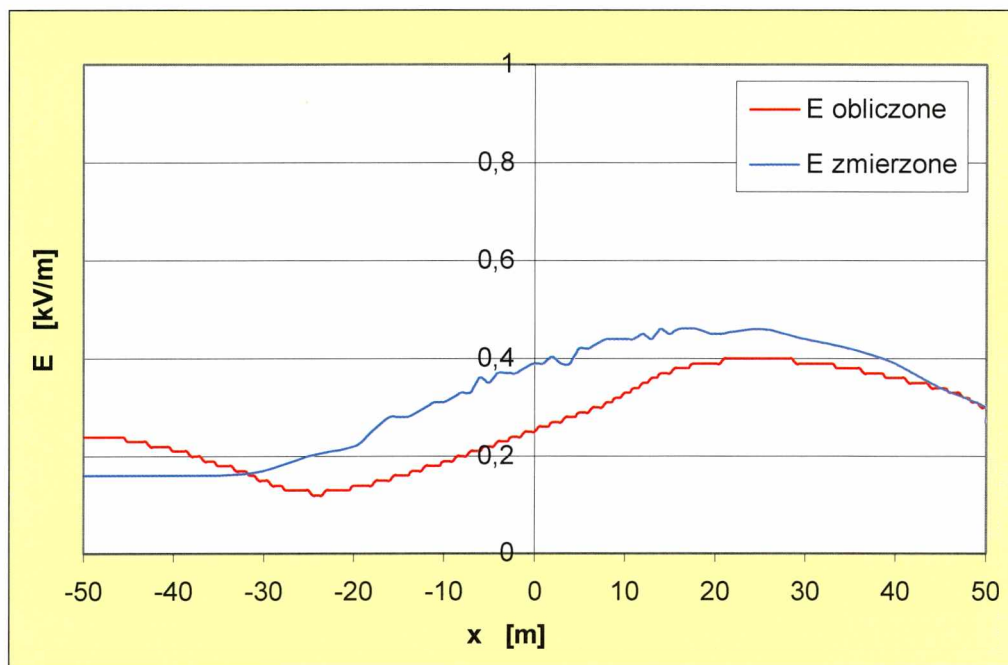
Rys.6.18. Rozkłady natężeń pola elektrycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla jednotorowej linii 400 kV



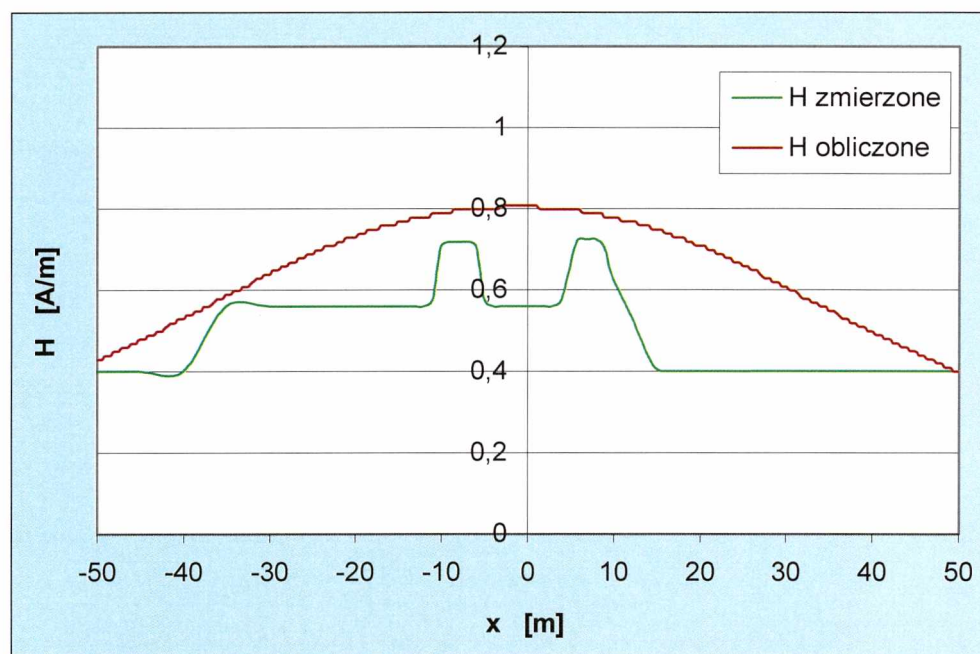
Rys.6.19. Rozkłady natężeń pola magnetycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla jednotorowej linii 400 kV

Tabela 6.9. Weryfikacja wyników obliczeń wartości maksymalnych natężeń pól elektrycznego i magnetycznego otrzymanych z programu MAH wynikami pomiarów tych pól dla trzytorowej linii 2x380 kV + 110 kV

h [m]	$E_{\max \text{ obl}}$ [kV/m]	$E_{\max \text{ zm}}$ [kV/m]	ΔE [%]	$H_{\max \text{ obl}}$ [A/m]	$H_{\max \text{ zm}}$ [A/m]	ΔH [%]
31,80	0,36	0,44	18,2	0,75	0,64	17,2
29,80	0,40	0,46	13,0	0,81	0,72	12,5
27,30	0,46	0,53	13,2	0,88	0,80	10,0



Rys.6.20. Rozkłady natężeń pola elektrycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla trzytorowej linii 2x380 kV + 110 kV

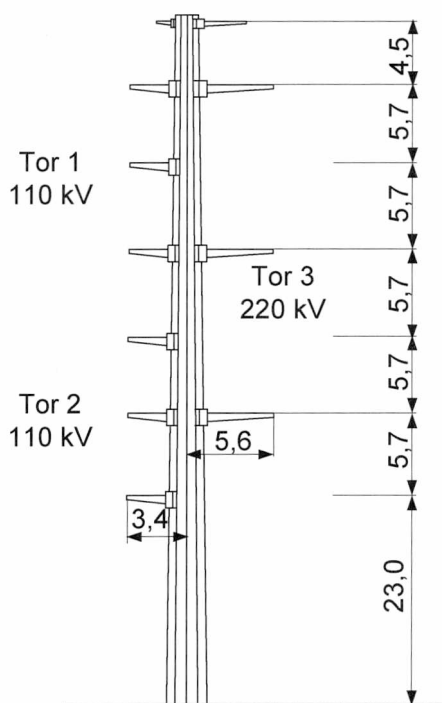


Rys.6.21. Rozkłady natężeń pola magnetycznego wyznaczone obliczeniowo i pomiarowo dla trzytorowej linii 2x380 kV + 110 kV

Jak wynika z analizy wartości zestawionych w tabeli 6.8 i 6.9 oraz wykresów umieszczonych na rysunkach 6.18 ÷ 6.21, podobnie jak we wszystkich wcześniej analizowanych przypadkach, również w tym wypadku charakterystyki wyznaczone pomiarowo i obliczeniowo mają podobny kształt, natomiast błędy obliczeń wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego nie przekraczają 30 % (są mniejsze nawet niż 20 %).

Przeprowadzona weryfikacja modelu matematycznego rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia, w tym pod wielotorowymi, wielonapięciowymi liniami, wykazała zadawalające ze względów praktycznych odwzorowanie rozpatrywanych zjawisk. We wszystkich przypadkach kształty charakterystyk wyznaczonych pomiarowo i obliczeniowo były bardzo do siebie zbliżone, natomiast błędy obliczeń wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego nie przekraczały wartości 30 %, przyjętej za granicnie dopuszczalną i tylko w jednym przypadku nieznacznie przekroczyły tę wartość (z przyczyn niezależnych od modelu matematycznego).

O wadze i aktualności poruszonego w pracy problemu może świadczyć fakt, iż zaraz po pozytywnej weryfikacji modeli użytych w programie, program MAH posłużył do obliczenia rozkładów pola elektromagnetycznego pod pierwszymi wielotorowymi, wielonapięciowymi liniami wysokiego napięcia projektowanymi na terenie Polski. Rozkłady te wykorzystano w opracowaniu „Raportów oddziaływania na środowisko” projektowanych linii, które są niezbędne wg ustawy o ochronie środowiska [70] do uzyskania pozwoleń na budowę inwestycji, jakimi są linie wysokiego napięcia o napięciu powyżej 110 kV. Jedną z linii, pod którą przeprowadzono obliczenia rozkładu pola elektromagnetycznego do powyższych opracowań, była linia 2x400 kV + 2x220 kV relacji Plewiska – Ostrów, którą szerzej opisano w rozdziale 3.2 pracy. Drugą z analizowanych linii była linia o napięciu 220 kV relacji Świebodzice – Klecina, która w związku z budową dużej fabryki pod Wrocławiem jest obecnie modernizowana na odcinku kilku kilometrów. W trakcie prac projektowych wypracowano koncepcję, aby w kilku przęsłach linii 220 kV umieścić nowoczesne trzytorowe (1x220 kV + 2x110 kV) słupy stalowo-rurowe (rys.6.23).



Rys.6.23. Sylwetka słupa trzytorowego linii 1x220 kV + 2x110 kV typu R_{220/110/110} K

7. Obliczenia rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami WN w programie MAH

7.1. Optymalizacja rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami 2-torowymi

Na rozkład oraz wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii mają między innymi wpływ następujące parametry [1]:

- napięcie robocze oraz natężenie prądu linii,
- wysokość zawieszenia przewodów fazowych linii nad ziemią,
- średnica przewodów, a w przypadku przewodów wiązkowych również odstęp przewodów w wiązce oraz odstęp między przewodami różnych faz lub wiązkami przewodów,
- geometryczny układ przewodów fazowych, a w liniach wielotorowych – wzajemne usytuowanie przewodów (lub wiązek) tej samej fazy w różnych torach.

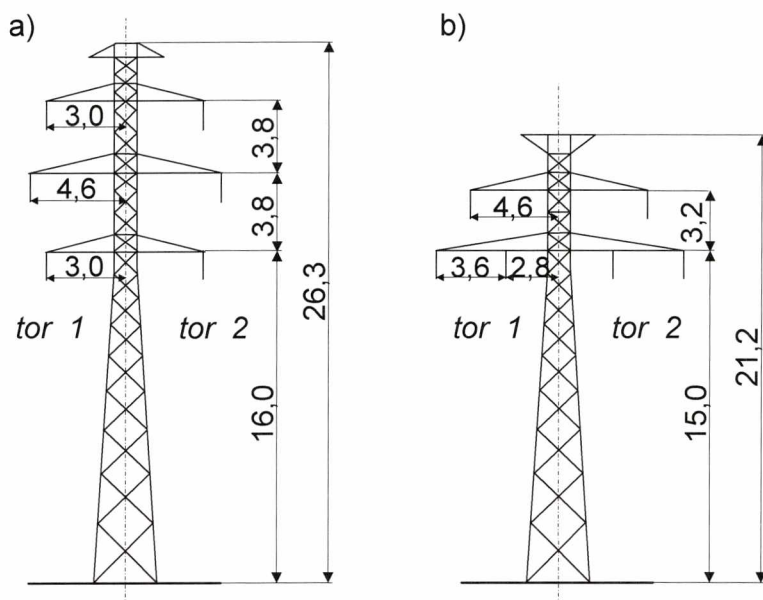
Utrzymuje się pogląd, iż największy wpływ na rozkład oraz wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii mają dwa pierwsze z wyżej wymienionych parametrów, natomiast wpływ pozostałych parametrów jest niewielki.

W celu weryfikacji prawdziwości powyższych stwierdzeń, wykonano symulacje komputerowe oraz pomiary rozkładów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla różnych konfiguracji i parametrów linii wielotorowych. W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe wyniki symulacji dla linii dwutorowych o napięciu znamionowym 110 kV.

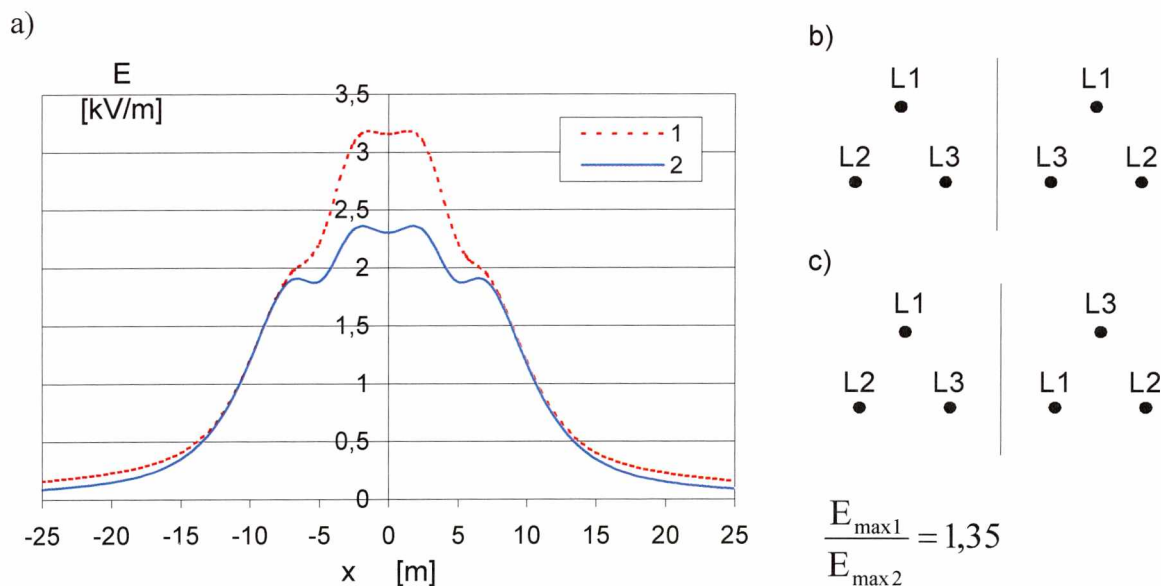
Prezentowane obliczenia, które zostały wykonane w programie MAH, wykonano dla linii o pionowym układzie przewodów, dla słupów linii typu OS24 P (rys.7.1a), oraz dla przewodów ułożonych w kształcie delty, dla słupów linii typu Dc₂₄₀ Pm-2 (rys.7.1b).

Aby zasymulować warunki najbardziej niekorzystne, w obliczeniach przyjęto:

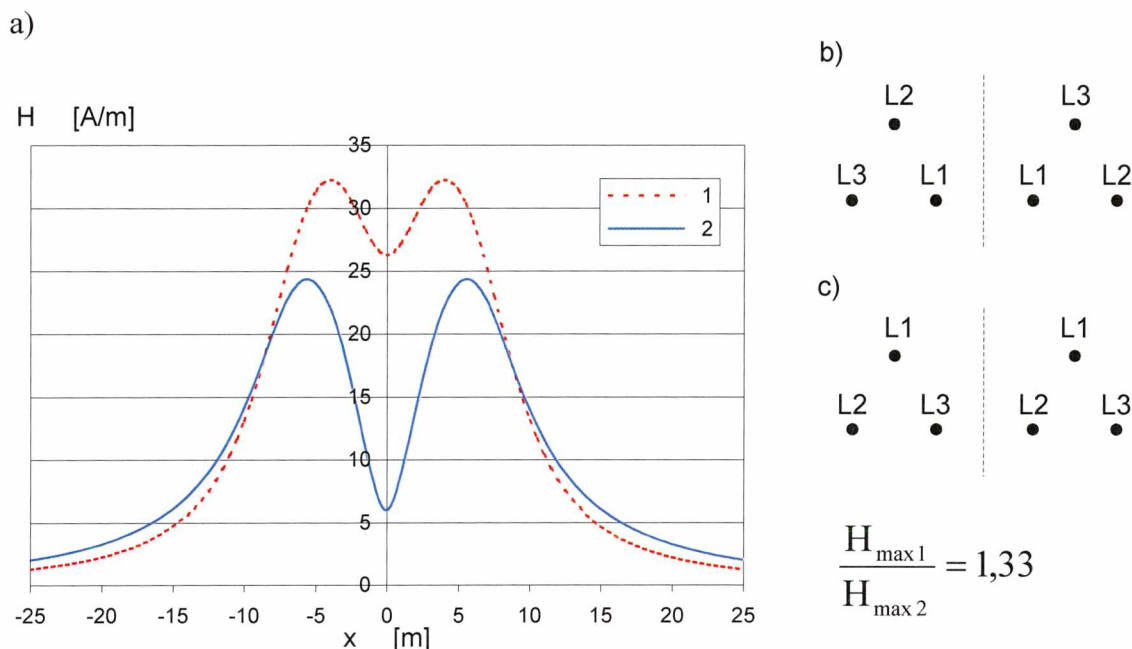
- najniższą, dopuszczalną dla linii 110 kV odległość przewodów fazowych od ziemi, która wynosi $h_{min} = 6,0$ m [70],
- wysokość nad ziemią dla której wykonywano obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego $h_p = 2$ m [6],
- najwyższe, dopuszczalne napięcie sieci $U_d = 123$ kV [71],
- prąd maksymalny linii $I_m = 600$ A.

Rys.7.1. Sylwetki masztów linii 110 kV: a) typu OS24 P, b) typu Dc₂₄₀ Pm-2

Dla obu typów badanych linii wykonano po 36 symulacji rozkładu pola elektromagnetycznego – dla wszystkich możliwych kombinacji usytuowania przewodów fazowych. Przykładowe wyniki obliczeń dla linii typu Dc₂₄₀ Pm-2, w których otrzymano największą i najmniejszą wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, przedstawiono na rysunkach 7.2 i 7.3.



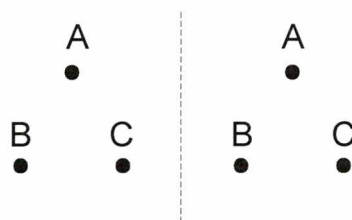
Rys.7.2. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 110 kV, o słupach typu Dc₂₄₀ Pm-2, na rozkład natężenia pola elektrycznego: a) rozkład najbardziej niekorzystny (1) i rozkład optymalny (2), b) przykładowe usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 1, c) przykładowe usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 2



Rys.7.3. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 110 kV, o słupach typu Dc₂₄₀ Pm-2, na rozkład natężenia pola magnetycznego: a) rozkład najbardziej niekorzystny (1) i rozkład optymalny (2), b) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 1, c) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 2

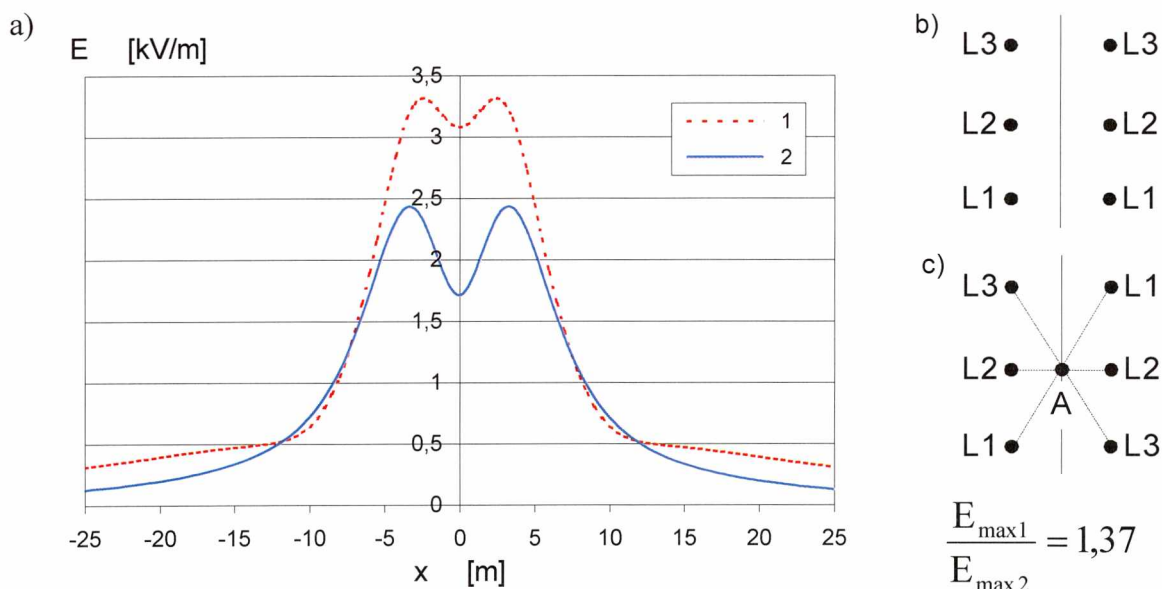
Jak wynika z rysunków 7.2 i 7.3, optymalny rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego uzyskuje się przy niesymetrycznym, względem osi słupa linii, usytuowaniu przewodów tych samych faz, natomiast przy ich symetrycznym usytuowaniu, tj. gdy przewody tych samych faz posiadają swój „obraz” względem osi słupa, natężenie pola elektrycznego jest większe od optymalnego o kilkadziesiąt procent – sięga 35 %.

Optymalny rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią (rys.7.3) uzyskuje się dla innego usytuowania przewodów fazowych, niż w przypadku rozkładu natężenia pola elektrycznego (rys.7.2). Jednak usytuowanie przewodów fazowych z rysunku 7.3c można uznać za rozmieszczenie optymalne dla przewodów ułożonych w kształcie delta. Maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego jest wtedy najmniejsza, a rozkład natężenia pola elektrycznego, spośród przeanalizowanych wszystkich możliwych przypadków rozmieszczenia przewodów, jest bliski rozkładowi optymalnemu. Optymalne rozkłady pola elektromagnetycznego uzyskano w 6 przypadkach usytuowania przewodów w linii. Metodę rozmieszczania przewodów fazowych w dwutorowej linii o przewodach ułożonych w kształcie delta, tak by uzyskać pod linią optymalny rozkład pola elektromagnetycznego zaprezentowano na rysunku 7.4. Obierając za punkty A,B,C numery faz (np. A-L1, B-L3, C-L2) i oznaczając je w linii według klucza z rysunku 7.4 otrzymuje się optymalne rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią.

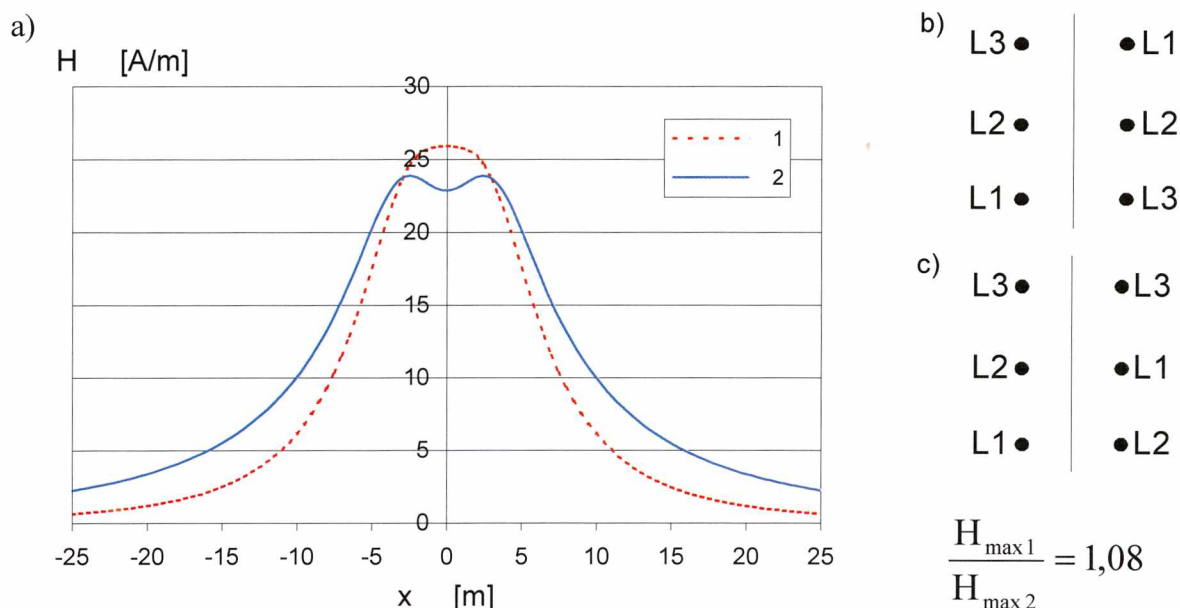


Rys.7.4. Schemat rozmieszczania faz na słupie dwutorowej linii o przewodach ułożonych w kształcie delta, zapewniający optymalny rozkład pola elektromagnetycznego pod linią

Wpływ usytuowania przewodów w linii dwutorowej typu OS24 P (rys.7.1a), o pionowym rozmieszczeniu przewodów, na rozkłady pola elektrycznego oraz magnetycznego jest przedstawiony na rysunkach 7.5 i 7.6. Podobnie, jak przy ułożeniu przewodów w kształcie delta, również w tym przypadku najbardziej niekorzystny rozkład natężenia pola elektrycznego występuje przy symetrycznym usytuowaniu przewodów względem osi słupa (rys.7.5), natomiast wpływ wzajemnego usytuowania przewodów na wartość natężenia pola magnetycznego jest niewielki – wartość maksymalna natężenia pola zmienia się jedynie o około 8 % (rys.7.6). Przy projektowaniu linii wielotorowej o pionowym układzie przewodów, należy mieć więc na uwadze przede wszystkim optymalizację natężenia pola elektrycznego – którego rozkład jest optymalny przy symetrycznym rozmieszczeniu przewodów tej samej fazy względem punktu leżącego w geometrycznym środku układu przewodów (punkt A – rys.7.5c).

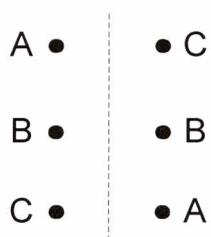


Rys. 7.5. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 110 kV, o słupach typu OS24 P, na rozkład natężenia pola elektrycznego: a) rozkład najbardziej niekorzystny (1) i rozkład optymalny (2), b) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 1, c) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 2



Rys. 7.6. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 110 kV, o słupach typu OS24 P, na rozkład natężenia pola magnetycznego: a) rozkład najbardziej niekorzystny (1) i rozkład optymalny (2), b) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 1, c) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 2

Również w tym przypadku optymalny rozkład pola elektromagnetycznego uzyskano dla 6 różnych konfiguracji rozmieszczenia faz przewodów na słupie linii. Dlatego również i tu podano klucz, w jaki sposób należy umieszczać fazy w dwutorowej linii o pionowym ułożeniu przewodów, by uzyskać pod linią optymalny rozkład pola elektromagnetycznego (rys.7.7). Podobnie jak poprzednio, obierając za punkty A,B,C numery faz (np. A-L1, B-L3, C-L2) i oznaczając je w linii według klucza z rysunku 7.7 otrzymuje się optymalne rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią.



Rys.7.7. Schemat rozmieszczania faz na słupie dwutorowej linii o pionowo ułożonych przewodach, zapewniający optymalny rozkład pola elektromagnetycznego pod linią

O istotności problemu, jakim jest zmniejszanie wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami wysokiego napięcia może świadczyć fakt, iż prace w tym temacie prowadzi wiele komitetów badawczych [72]. Przykładem wyników takich badań może być najnowsza publikacja komitetu badawczego pracującego w ramach organizacji CIGRE [73], w której autorzy zamieścili między innymi wyniki badań wpływu:

- odległości przewodów fazowych między sobą,

- wysokości przewodów nad ziemią,
- liczby przewodów w wiązce,
- odstępów przewodów w wiązce,
- przekrojów przewodów

na rozkład i wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod liniami wysokiego napięcia. W swoich badaniach nie uwzględnili oni natomiast wzajemnego rozmieszczenia przewodów tej samej fazy w wielotorowych liniach wysokiego napięcia.

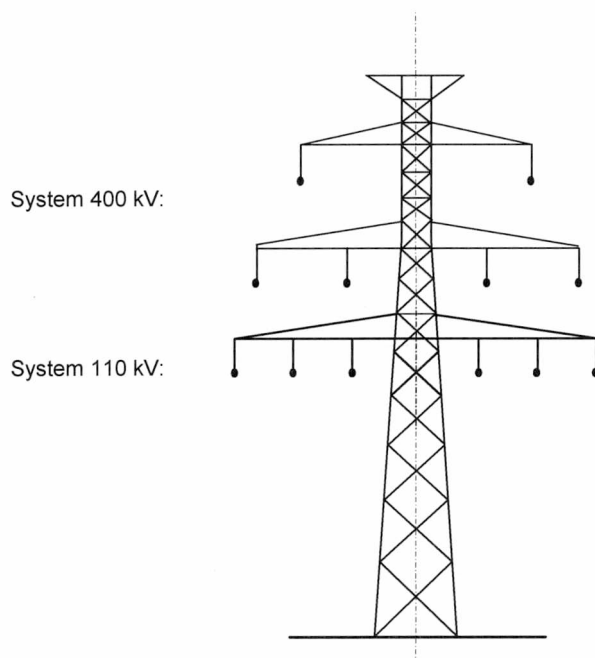
Celowe jest prowadzenie dalszych prac zmierzających do lepszego poznania rozpatrywanych zjawisk, szczególnie w liniach wielotorowych (o liczbie torów większej niż 2), wielonapięciowych.

7.2. Optymalizacja rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami 4-torowymi

Jak wykazano w analizach przeprowadzonych w rozdziale 7.1, wpływ rozmieszczenia przewodów tej samej fazy w liniach dwutorowych na wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest duży (w niektórych przypadkach różnica w wartościach maksymalnych pola wynosi ponad 30 %). W Polsce biura projektowe nie zawsze przeprowadzają optymalizację rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami WN i w związku z tym wybierają konfiguracje faz, które nie zawsze są optymalne ze względu na zjawisko generowania pola elektromagnetycznego przez wielotorowe linie wysokiego napięcia. Dlatego ważnym zadaniem jest przeprowadzenie obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod wielotorowymi liniami WN i wskazanie optymalnych konfiguracji linii.

W tym rozdziale przedstawiono wyniki badań rozkładu pola elektromagnetycznego pod trzema najczęściej spotykanymi w eksploatacji typami linii czterotorowych. Badania te należy traktować jako początek dalszych prac naukowych doktoranta w tym temacie (optymalizacje będą rozszerzone o nietypowe, czterotorowe linie wysokiego napięcia spotykane sporadycznie w praktyce oraz o linie sześciotorowe).

Pierwszym z rozpatrywanych typów linii czterotorowych, dla którego przeprowadzono obliczenia, jest linia 2x400 kV + 2x110 kV, pokazana na rysunku 7.8. Łączy ona w sobie funkcję linii przesyłowej oraz przesyłowo-rozdzielczej. Ten typ linii, według prognoz [43] ma być najczęstszym typem linii wielotorowych budowanych w Niemczech.



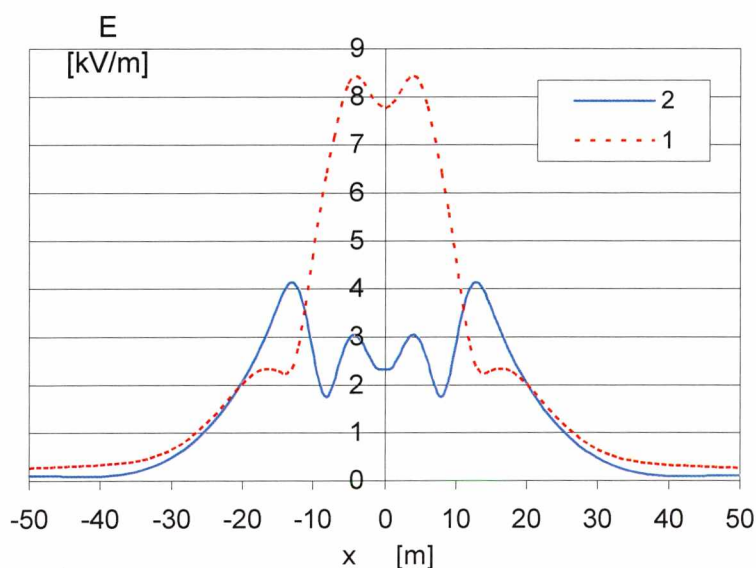
Rys.7.8. Sylwetka masztu czterotorowej linii wysokiego napięcia 2x400 kV + 2x110 kV

Dla tego typu linii wykonano **1296** symulacji rozkładu pola elektromagnetycznego – dla wszystkich możliwych kombinacji usytuowania przewodów fazowych. Przykładowe wyniki obliczeń, w których otrzymano największą i najmniejszą wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, przedstawiono na rysunkach 7.9 i 7.10.

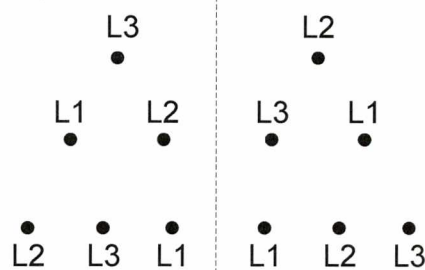
W obliczeniach tych, wykonanych w programie MAH, przyjęto następujące warunki pracy linii:

- najniższą, dopuszczalną dla linii 110 kV odległość przewodów fazowych od ziemi, która wynosi $h_{min} = 6,0$ m [71],
- wysokość nad ziemią dla której wykonywano obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego $h_p = 2$ m [6],
- najwyższe, dopuszczalne napięcie sieci $U_{d110} = 123$ kV, $U_{d400} = 420$ kV [71],
- prąd maksymalny linii $I_{m110} = 600$ A, $I_{m400} = 1200$ A.

a)



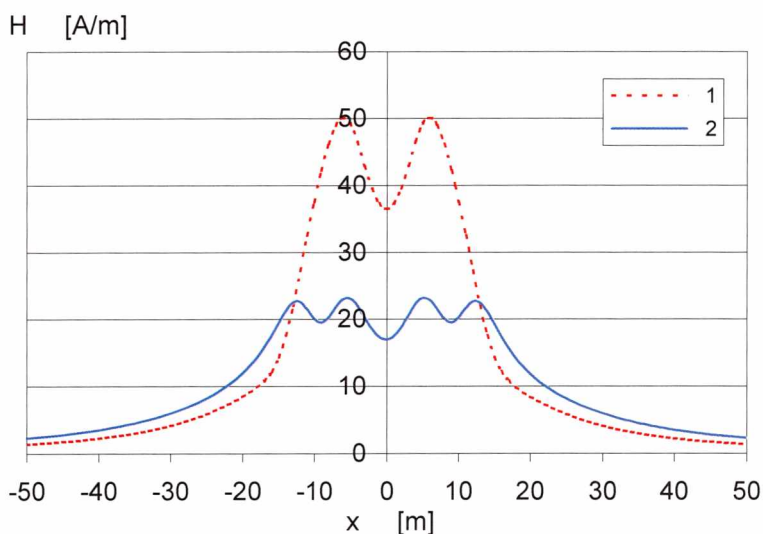
b)



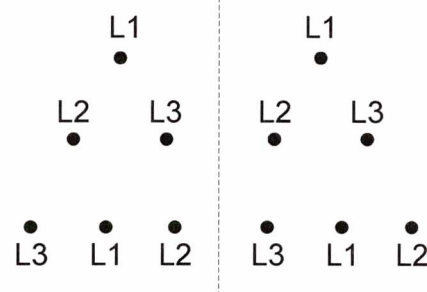
$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = 2,03$$

Rys.7.9. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 2x400 + 2x110 kV, na rozkład natężenia pola elektrycznego: a) rozkład najbardziej niekorzystny (1) i rozkład optymalny (2), b) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 2

a)



b)



$$\frac{H_{\max 1}}{H_{\max 2}} = 2,29$$

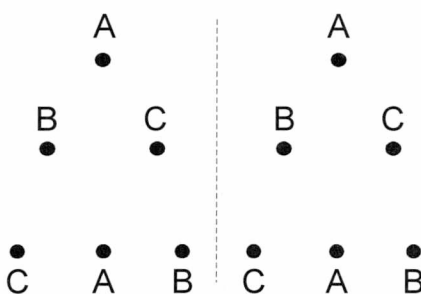
Rys.7.10. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 2x400 + 2x110 kV, na rozkład natężenia pola magnetycznego: a) rozkład najbardziej niekorzystny (1) i rozkład optymalny (2), b) usytuowanie przewodów fazowych dla rozkładu 2

Jak wynika z wykresów umieszczonych na rysunkach 7.9 i 7.10, wpływ wzajemnego rozmieszczenia przewodów tych samych faz na wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest bardzo duży – stosunki wartości maksymalnych przy rozkładzie najbardziej niekorzystnym i optymalnym wynoszą odpowiednio 2,03 dla pola elektrycznego i 2,29 dla pola magnetycznego. Optymalny rozkład natężenia pola

magnetycznego (rys.7.9) uzyskuje się dla innego usytuowania przewodów fazowych, niż w przypadku rozkładu natężenia pola elektrycznego (rys.7.10). Jednak usytuowanie przewodów fazowych z rysunku 7.10 można uznać za rozmieszczenie optymalne dla tego typu linii – maksymalna wartość natężenia pola magnetycznego jest wtedy najmniejsza, a rozkład natężenia pola elektrycznego jest bliski rozkładowi optymalnemu.

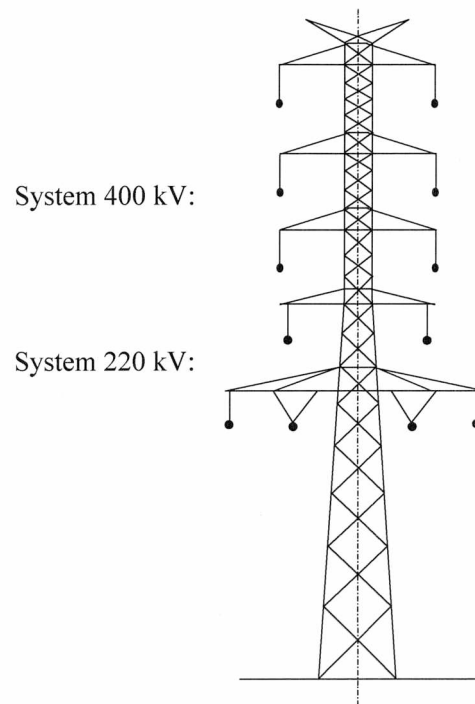
Należy zwrócić uwagę, iż rozmieszczenie faz dla rozkładu najbardziej optymalnego, w systemie 400 kV, który jest skonfigurowany w postaci podwójnej delty, jest taki sam, jak przy rozmieszczeniu optymalnym faz w linii dwutorowej (rys.7.3c). Oznacza to, że poszukiwania optymalnego rozkładu pola elektromagnetycznego w liniach czterotorowych można znacznie ograniczyć – przy skonfigurowaniu optymalnym wyższych torów linii (traktując ją jako linię dwutorową), można zmieniać jedynie konfiguracje dolnych torów.

Rozkłady optymalne pola elektromagnetycznego uzyskano dla kilku ułożeń przewodów fazowych linii. Ich systematykę zaprezentowano na rysunku 7.11. Postępując podobnie jak przy liniach dwutorowych, z uwzględnieniem klucza zaprezentowanego na rysunku 7.11, można rozmieścić fazy linii uzyskując przy tym optymalny rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią.



Rys.7.11. Schemat rozmieszczania faz na słupie linii z rysunku 7.6, zapewniający optymalny rozkład pola elektromagnetycznego pod linią

Kolejnym z rozpatrywanych typów słupa czterotorowej linii, dla którego przeprowadzono obliczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w celu znalezienia optymalnego rozmieszczenia przewodów fazowych, jest słup linii 2x400 kV + 2x220 kV, pokazany na rysunku 7.12. Konstrukcja ta jest wykorzystana w budowanej na terenie Polski czterotorowej linii Plewiska-Ostrów. Dwa górne tory systemu 400 kV posiadają pionowe ułożenie przewodów, natomiast dwa dolne tory systemu 220 kV są ułożone w kształcie delty.



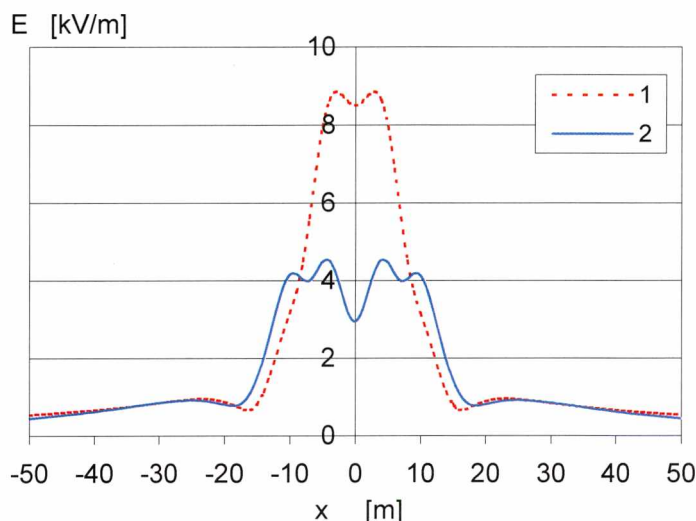
Rys.7.12. Sylwetka czterotorowej linii 2x400 kV + 2x220 kV

Dla rozpatrywanego typu linii wykonano również **1296** symulacji rozkładu pola elektromagnetycznego – dla wszystkich możliwych kombinacji usytuowania przewodów fazowych. W obliczeniach, które zostały wykonane w programie MAH, przyjęto następujące warunki pracy linii:

- najniższą, dopuszczalną dla linii 220 kV odległość przewodów fazowych od ziemi, która wynosi $h_{min} = 6,5$ m [71],
- wysokość nad ziemią dla której wykonywano obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego $h_p = 2$ m [6],
- najwyższe, dopuszczalne napięcie sieci $U_{d220} = 245$ kV, $U_{d400} = 420$ kV [71],
- prąd maksymalny linii $I_{m220} = 1220$ A, $I_{m400} = 2400$ A.

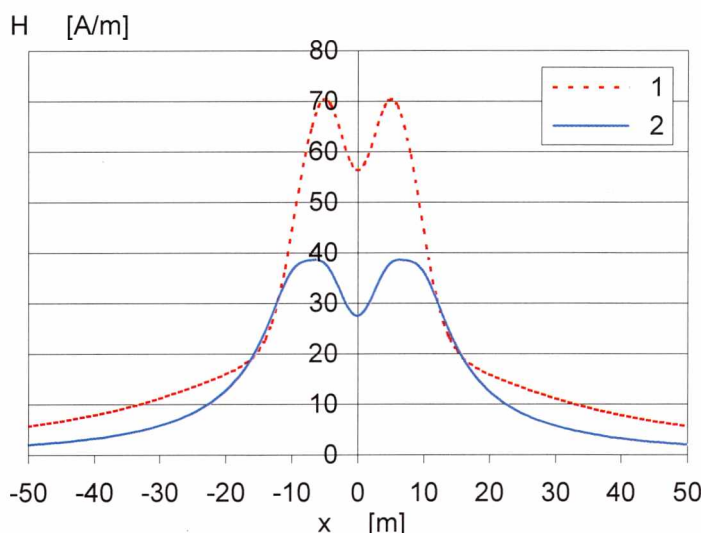
Przykładowe wyniki obliczeń, w których otrzymano największą i najmniejszą wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, przedstawiono na rysunku 7.13.

a)

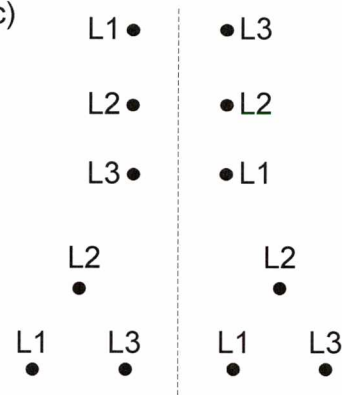


$$\frac{E_{\max 1}}{E_{\max 2}} = 1,95$$

b)



c)



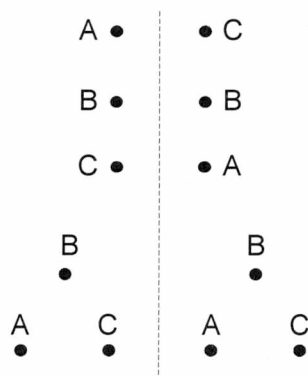
$$\frac{H_{\max 1}}{H_{\max 2}} = 1,83$$

Rys.7.13. Ilustracja wpływu usytuowania przewodów fazowych linii 2x400 + 2x220 kV, na rozkład natężenia pola elektrycznego (a) i magnetycznego (b) (1 – rozkład najbardziej niekorzystny, 2 – rozkład optymalny); (c) – usytuowanie przewodów fazowych dla optymalnego rozkładu

Jak wynika z rysunku 7.13, również i w tym przypadku wpływ wzajemnego rozmieszczenia przewodów tych samych faz na wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego jest bardzo duży – stosunki wartości maksymalnych przy rozkładzie najbardziej niekorzystnym i optymalnym wynoszą odpowiednio 1,95 dla pola elektrycznego i 1,83 dla pola magnetycznego. Rozmieszczenie przewodów fazowych z rysunku 7.13c można uznać za rozmieszczenie optymalne dla tego typu linii – maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego jest wtedy najmniejsza, a rozkład natężenia pola magnetycznego jest bliski rozkładowi optymalnemu.

Systematykę ułożeń przewodów fazowych linii, dla których uzyskano optymalne rozkłady pola elektromagnetycznego, zaprezentowano na rysunku 7.14. Postępując podobnie jak w poprzednich przypadkach, rozmieszczając przewody zgodnie z rysunkiem 7.14,

uzyskuje się optymalny rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią.

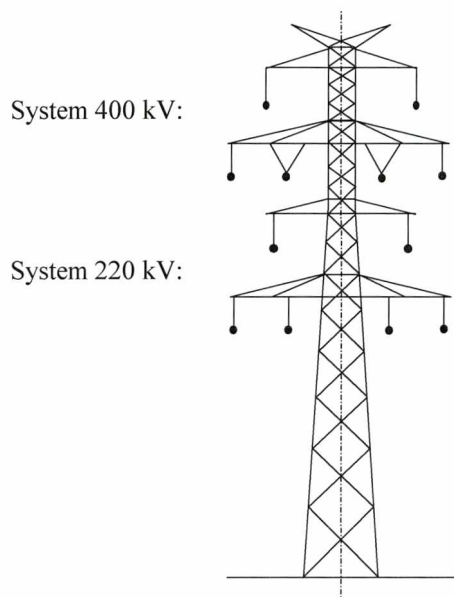


Rys.7.14. Schemat rozmieszczania faz na słupie linii z rysunku 7.12, zapewniający optymalny rozkład pola elektromagnetycznego pod linią

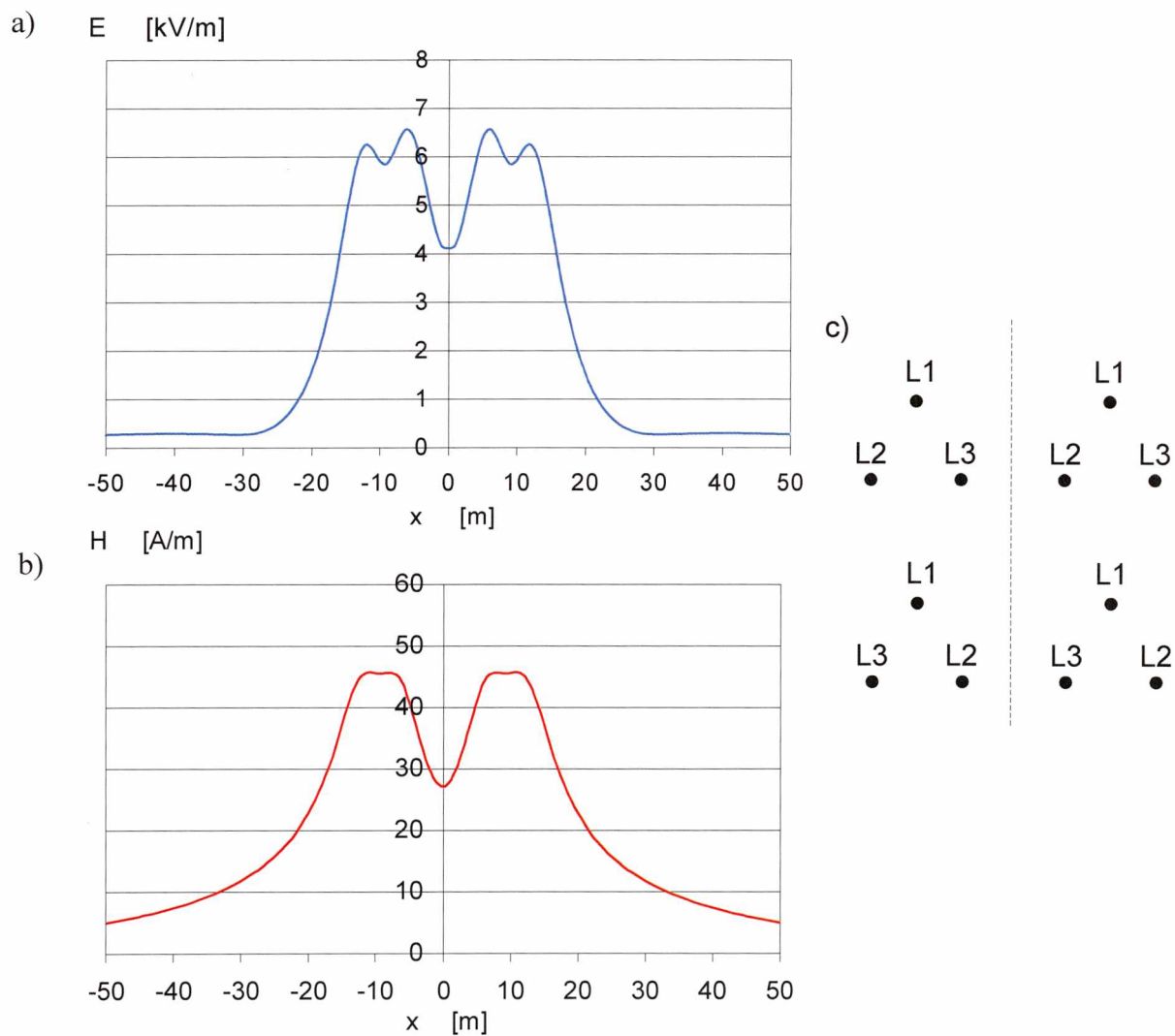
Również w tym przypadku, podobnie jak dla linii czterotorowej rozpatrywanej poprzednio, rozmieszczenie faz w systemie 400 kV (dwa górne torry o pionowym ułożeniu przewodów) dla rozkładu najbardziej optymalnego, jest takie same, jak przy rozmieszczeniu optymalnym faz w linii dwutorowej o pionowym ułożeniu przewodów (rys.7.7). Potwierdza to wcześniejszy wniosek, iż poszukiwania optymalnego rozkładu pola elektromagnetycznego w liniach czterotorowych można znacznie ograniczyć – po skonfigurowaniu optymalnym dwóch wyższych torów linii (traktując linię jako dwutorową), należy zmieniać jedynie konfiguracje dolnych torów.

Ostatnim z rozpatrywanych typów słupów czterotorowej linii, dla którego przeprowadzono obliczenia rozkładu pola elektromagnetycznego w celu znalezienia optymalnego rozmieszczenia przewodów fazowych, jest słup linii 2x400 kV + 2x220 kV, pokazany na rysunku 7.15. Konstrukcję taką rozważano wykorzystać w budowanej na terenie Polski czterotorowej linii Plewiska-Ostrów (ostatecznie z niej zrezygnowano). Dwa górne torry systemu 400 kV, jak również dwa dolne torry systemu 220 kV posiadają konfigurację przewodów ułożonych w kształcie delty.

Dla przedstawionego typu linii, w poszukiwaniu optymalnego rozkładu pola elektromagnetycznego, przeprowadzono symulacje komputerowe po skonfigurowaniu optymalnym dwóch wyższych torów linii (traktując linię jako dwutorową), według klucza z rysunku 7.4, a następnie zmieniano jedynie konfiguracje dolnych torów. Przykładowe wyniki obliczeń, w których otrzymano najmniejszą wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, przedstawiono na rysunku 7.16. Do obliczeń, które zostały wykonane w programie MAH, przyjęto takie same warunki pracy linii, jak dla linii z rysunku 7.12.

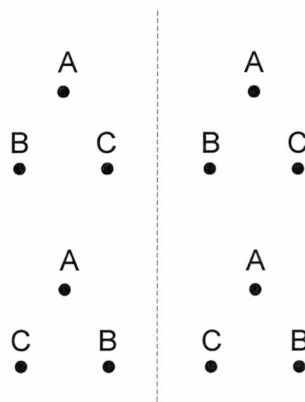


Rys.7.15. Sylwetka czterotorowej linii 2x400 kV + 2x220 kV



Rys.7.16. Optymalne usytuowanie przewodów fazowych linii 2x400 + 2x220 kV (c), ze względu na rozkład natężenia pola elektrycznego (a) i magnetycznego (b)

Sposób rozmieszczenia przewodów, przy których uzyskano optymalne rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego zaprezentowano na rysunku 7.17.



Rys.7.17. Schemat rozmieszczania faz na słupie linii z rysunku 7.15, zapewniający optymalny rozkład pola elektromagnetycznego pod linią

Rezultaty przeprowadzonych analiz wykazały, że odpowiednie rozmieszczenie przewodów fazowych na słupach linii elektroenergetycznej ma duży wpływ na rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią. Przy odpowiednio zaprojektowanej konstrukcji słupa wielotorowej linii WN może dochodzić do kompensowania się pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii. Projektując słupy elektroenergetyczne wielotorowych linii elektroenergetycznych, z uwzględnieniem przedstawionych w pracy wytycznych, można odpowiednio kształtować rozkład pola pod tymi liniami.

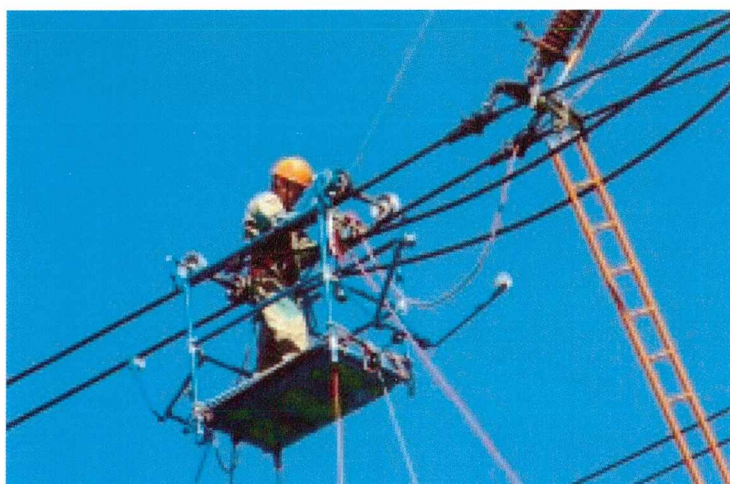
W projektowaniu nowych oraz modernizacji istniejących linii elektroenergetycznych należy zwracać na ten aspekt większą niż dotychczas uwagę, gdyż wiele eksploatowanych obecnie w kraju linii nie posiada optymalnie skonfigurowanych przewodów. Najlepszym przykładem może być dwutorowa linia S-125, S-126 o napięciu 110 kV, opisana w rozdziale 5.3 pracy, pod którą wykonywano pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego. **Rozmieszczenie faz w tej linii jest, z punktu widzenia optymalizacji pola elektromagnetycznego pod linią, najbardziej niekorzystne z pośród wszystkich możliwych rozmieszczeń (przewody tych samych faz w obu torach linii posiadają swój „obraz” względem osi słupa).**

7.3. Przykład obliczeń dopuszczalnego czasu przebywania pracowników w pobliżu linii WN podczas wykonywania prac pod napięciem

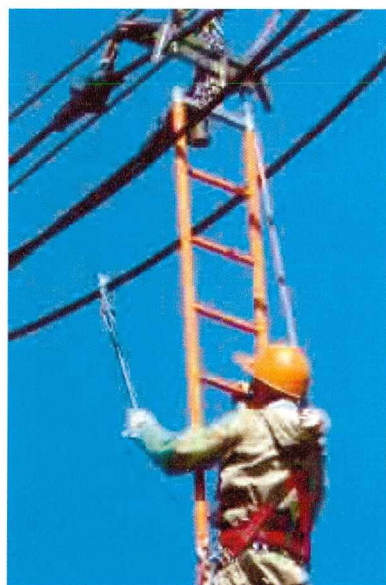
Technika prac pod napięciem (PPN) jest obecnie stosowana w eksploatacji urządzeń elektrycznych na wszystkich poziomach napięć. Zasadniczym celem jej stosowania jest obniżenie kosztów związanych z niedostarczeniem energii elektrycznej [74].

Już w połowie lat 80 ubiegłego wieku rozpoczęto w Polsce opracowywać technologie do prac pod napięciem na liniach najwyższych napięć. Głównym powodem opracowania techniki PPN była wysoka awaryjność szklanych izolatorów kołpakowych [75]. Do prac pod napięciem na liniach 400 kV opracowano 14 technologii, z czego 11 dotyczyło wymiany izolatorów i po jednej: pracy w przeszle linii, usuwania obcych przedmiotów i uszczelniania izolatorów aparatury stacyjnej. Z 11 technologii wymiany izolatorów, 7 dotyczy słupów przelotowych, pozostałe słupów mocnych. Do ciekawszych prac wykonywanych pod napięciem można zaliczyć prace wykonywane z wózków jezdnych umieszczonych na przewodach roboczych linii (rys.7.18a).

a)



b)



Rys.7.18. Technika prac pod napięciem: a) praca z wózków jezdnych umieszczonych na przewodach roboczych linii, b) przejmowanie potencjału linii przez pracownika

Technika prac pod napięciem wykorzystuje trzy schematy możliwości napraw sieci:

- odizolowanie montera posiadającego potencjał ziemi od urządzenia pod napięciem,
- odizolowania montera posiadającego potencjał urządzenia od ziemi i innych potencjałów (rys.7.18b),
- odizolowanie montera zarówno od ziemi, jak i urządzenia pod napięciem.

Te schematy pozwoliły na ukształtowanie powszechnie znanych metod pracy pod napięciem:

- w kontakcie, kiedy pracownik styka się z urządzeniami pod napięciem za pośrednictwem odzieży izolacyjnej,
- z odległości, kiedy pracownik wykonuje manipulacje za pomocą drążków izolacyjnych,
- na potencjale, kiedy pracownik pozostaje na potencjale urządzenia i może się z nim stykać bezpośrednio.

Istnieją również techniki będące kombinacją wymienionych metod.

Bezpieczeństwo pracowników wykonujących prace przy urządzeniach elektroenergetycznych zależy od zagrożeń występujących w miejscu pracy. Zasadnicze problemy przy zapewnieniu bezpieczeństwa pracy w technice PPN polegają na [76]:

- zabezpieczeniu pracownika przed porażeniem,
- niedopuszczeniu do zwarcia elementów o różnych potencjałach,
- niedopuszczeniu do rozwarcia obwodów pod obciążeniem.

Ponadto dużym problemem przy PPN na liniach wysokiego napięcia jest przebywanie pracowników w silnym polu elektrycznym i magnetycznym.

Problem oddziaływania na pracowników pola elektrycznego został rozwiązany poprzez stosowanie przez pracowników środków ochrony osobistej w postaci odpowiednich kombinezonów lub spodni i kurtek. Stosowane ubiory wykonane są z dzianiny lub tkaniny z udziałem nici metalowych (przeważnie srebrnych) tworzących siatkę. Dzięki tej siatce ubiór taki stanowi swojego rodzaju klatkę Faradaya. Ubiory te pozwalają na obniżenie natężenia pola elektrycznego do bezpiecznych poziomów, nie są jednak skuteczne w zakresie ochrony pracownika przed wpływem pola magnetycznego [77].

Aktualnie w zakresie ochrony pracowników przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych obowiązują zapisy z dnia 29 listopada 2002 roku, w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [32]. W myśl tych przepisów, w zależności od natężenia pola i jego częstotliwości, wyróżnia się trzy strefy ochronne.

Dla pól magnetycznych o częstotliwości $0,5 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$ za strefę niebezpieczną uważa się obszar, w którym natężenie pola magnetycznego przekracza wartość $2\,000 \text{ A/m}$. W strefie tej przebywanie pracowników jest zabronione (dozwolone wyłącznie w przypadku wyposażenia pracownika w skutecznie działające środki ochrony indywidualnej, które jak już wspomniano, nie są skuteczne dla składowej magnetycznej pola). Za strefę zagrożenia uważa się natomiast obszar, w którym natężenie pola magnetycznego H zawiera się w granicach $200 \text{ A/m} < H < 2\,000 \text{ A/m}$, przy czym dopuszczalne narażenie na wpływ pól magnetycznych w tej strefie określone jest wartością dozy D , określonej zależnością

$$D = H^2 \cdot t, \quad (7.1)$$

w której: H - natężenie pola magnetycznego działające na pracownika w czasie t [godz]. Dla pól tej strefy doza D nie może przekraczać wartości $0,32 \text{ (kA/m)}^2 \cdot t$, przy czym gdy ekspozycja o działaniu miejscowym dotyczy wyłącznie kończyn, dopuszcza się zwiększone ich narażenie na pola magnetyczne o natężeniach 5 razy większych od dopuszczalnych dla całego ciała, z równoczesnym dopuszczeniem dozy dla kończyn 25 razy większej od dozy dla całego ciała. Z określonej przez przepisy dozy i znanej wartości natężenia pola

magnetycznego (najczęściej obliczonego) wyznacza się dopuszczalny czas pracy pracownika w obszarze oddziaływania pola magnetycznego [78].

Strefę pośrednią stanowi natomiast obszar, w którym natężenie pola magnetycznego H zawiera się w granicach: $66,6 \text{ A/m} < H < 200 \text{ A/m}$. W strefie tej dopuszczone jest przebywanie pracowników w ciągu jednej ośmiogodzinnej zmiany roboczej.

Ponieważ prace pod napięciem są zaliczane według [79] do prac wykonywanych w warunkach szczególnego zagrożenia zdrowia i życia ludzkiego, to osoby je wykonujące muszą posiadać odpowiednie kwalifikacje, a poleceniodawca, który prowadzi eksploatację urządzeń i instalacji, ma obowiązek wydania na te prace tzw. polecenia pisemnego.

Polecenie wykonania pracy powinno w szczególności uwzględniać:

- zakres, rodzaj, miejsce, termin i czas pracy,
- środki i warunki do bezpiecznego wykonywania pracy,
- liczbę pracowników skierowanych do pracy i pracowników odpowiedzialnych za organizację i wykonanie pracy,
- planowane przerwy w pracy.

Poleceniodawca planując przeprowadzenie prac pod napięciem na wielotorowej linii wysokiego napięcia, wpisując czas pracy musi wziąć pod uwagę narażenie pracowników na pole elektromagnetyczne generowane przez linię. Jego składową magnetyczną (składową elektryczną można pominąć, jeżeli pracownik jest wyposażony w środki ochrony osobistej w postaci kombinezonów) można wyliczyć korzystając z programu MAH. Znając przybliżone wartości natężenia pola magnetycznego oddziałującego na różne części ciała pracownika, ze wzoru 7.1 należy obliczyć maksymalny czas pracy i wpisać go do polecenia wykonania pracy.

Obliczenie wartości natężenia pola magnetycznego na jakie będzie narażony pracownik jest bardzo trudne. Zależy ono bowiem mocno od dwóch parametrów: natężenia prądu linii i odległości pracownika od przewodów linii. Oba te parametry są zmienne w czasie i dlatego precyzyjne wyznaczenie dopuszczalnego czasu pracy jest niemożliwe. Można go jedynie oszacować z pewnym, dość dużym zazwyczaj błędem.

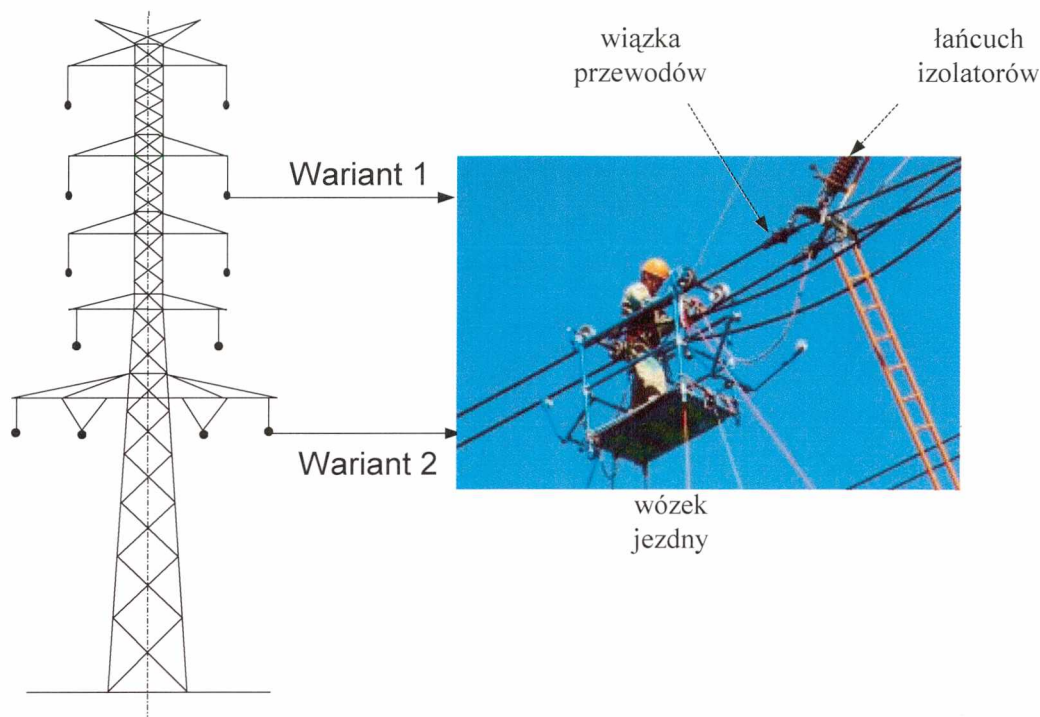
Poniżej przedstawiono oszacowanie maksymalnego czasu pracy pracowników na czterotorowej linii $2 \times 400 \text{ kV} + 2 \times 220 \text{ kV}$ (rys.7.19), którzy podczas wykonywania prac znajdują się na wózku jezdny, podwieszonym na przewodach roboczych linii w taki sposób, że przewody robocze linii są na wysokości pasa pracowników. Oszacowanie dopuszczalnego czasu osób wykonujących PPN wykonano dla dwóch wariantów:

- wariant 1 – praca przy środkowym izolatorze systemu 400 kV,
- wariant 2 – praca przy zewnętrznym izolatorze systemu 220 kV.

Ponieważ prądy linii są zmienne w szerokich granicach, do symulacji posłużono się dwoma stanami pracy linii:

- stan 1 – linia obciążona prądami maksymalnymi linii ($I_{m220} = 1220\text{ A}$, $I_{m400} = 2400\text{ A}$),
- stan 2 – linia obciążona połową wartości prądów maksymalnych linii ($I_{m220} = 610\text{ A}$, $I_{m400} = 1200\text{ A}$).

W tabeli 7.1 zestawiono wyniki obliczeń wartości natężenia pola magnetycznego, przeprowadzone w programie MAH, na które są narażeni pracownicy. W oparciu o te dane wyznaczono także dopuszczalny czas ich pracy.



Rys.7.19. Rozpatrywane warianty pracy pracowników pod napięciem w celu wyznaczenia dopuszczalnego czasu ich trwania

Tabela 7.1. Zestawienie wyników symulacji i obliczonych na ich podstawie dopuszczalnych czasów pracy pracowników w rozpatrywanych miejscach

	Wariant 1				Wariant 2			
	H [A/m]		t_{dop} [min]		H [A/m]		t_{dop} [min]	
	Stan 1	Stan 2	Stan 1	Stan 2	Stan 1	Stan 2	Stan 1	Stan 2
Głowa	683	341	Praca zabroniona	5,3	381	187	Praca zabroniona	10,3
Piersi	1317	658			722	355		
Pas/Ręce	3807	1903			2780	1368		
Nogi	1057	525			516	254		

Jak wynika z wyników zebranych w tabeli 7.1 praca pod napięciem na rozważanej wielotorowej, wielonapięciowej linii wysokiego napięcia w rozpatrywanej technologii (wózek jezdny zawieszony na przewodach, które są na wysokości pasa pracownika) jest zabroniona w przypadku maksymalnego (dopuszczalnego) obciążenia wszystkich torów linii, natomiast w przypadku obciążenia połową wartości prądów maksymalnych linii – praca jest możliwa zaledwie przez kilka minut. Dlatego dla tego przypadku powinna być zastosowana inna technologia prac (np. wózek zawieszony poniżej przewodów, a pracownik wykonuje czynności za pomocą odpowiednich narzędzi), która pozwoli na zwiększenie odległości pomiędzy częściami czynnymi będącymi pod napięciem i pracownikiem, a tym samym na zmniejszenie pola magnetycznego na jakie będzie narażony pracownik.

Wyniki obliczeń dotyczących ekspozycji w polach magnetycznych przy pracach pod napięciem, analiza technologii tych prac oraz wyniki pomiarów przeprowadzone na obiektach rzeczywistych [74] pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- podczas realizacji prac pod napięciem, przy znacznych obciążeniach torów prądowych, monter może znaleźć się w polu magnetycznym o wartościach odpowiadających strefie zagrożenia i strefie niebezpiecznej;
- możliwe jest obliczeniowe określenie w opracowanym programie MAH wartości ekspozycji na pole magnetyczne pracowników, wykonujących w różnych technologiach prace pod napięciem na liniach najwyższych napięć, a tym samym wyznaczenie ich dopuszczalnego czasu pracy wg [32].

7.4. Wyznaczanie natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii

Program komputerowy MAH może być wykorzystany także do wyznaczania największych spodziewanych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, które wystąpią w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii.

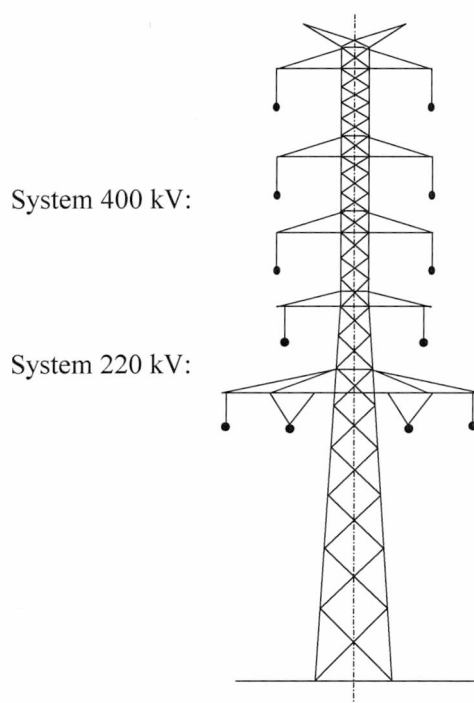
Wyznaczenie pola elektromagnetycznego w tych warunkach jest elementem niezbędnym w każdym opracowaniu ekologicznym, zarówno dla linii projektowanych jak i eksploatowanych. Protokoły z pomiarów pola powinny bowiem zawierać przeliczenia wartości zmierzonych w danych warunkach pracy linii na wartości maksymalne.

Powszechnie uważa się, iż wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wystąpią w sytuacji, w której odległość przewodów roboczych linii od ziemi będzie najmniejsza oraz gdy obciążenie i napięcie linii przyjmie wartości maksymalne. Jest to jednak prawdą jedynie dla linii 1 i 2-torowych. W przypadku linii o liczbie torów większej od 2, gdzie dolne tory, w większości przypadków, kompensują pole elektromagnetyczne generowane przez górne tory, aby móc zidentyfikować wartość maksymalną natężeń pola

elektrycznego i magnetycznego należy przeanalizować przypadki wyłączenia jednego, lub nawet kilku torów linii.

W celu udowodnienia powyższego stwierdzenia przeprowadzono symulacje rozkładu pola elektromagnetycznego pod czterotorową, dwunapięciową linią 2x400 kV + 2x220 kV (rys.7.20). Prezentowane obliczenia, które zostały wykonane w programie MAH, wykonano dla kilku wariantów pracy linii:

- wariant 1 – wszystkie tory linii są załączone,
- wariant 2 – jeden z torów systemu 220 kV jest wyłączony,
- wariant 3 – jeden z torów systemu 400 kV jest wyłączony,
- wariant 4 – oba tory systemu 220 kV są wyłączone,
- wariant 5 – oba tory systemu 400 kV są wyłączone.



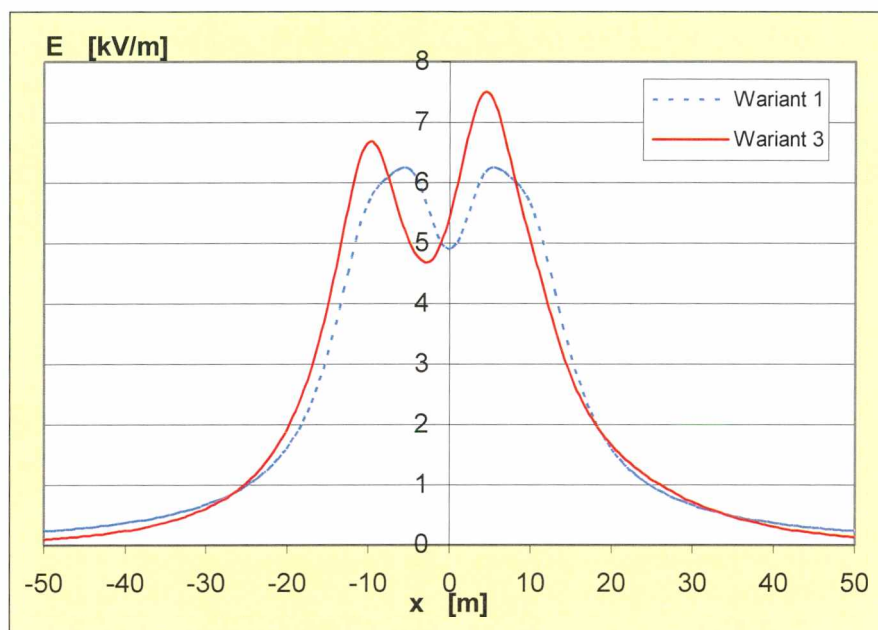
Rys.7.20. Sylwetka słupa linii 2x400 + 2x220 kV

Przy wykonywaniu obliczeń założono następujące warunki pracy linii:

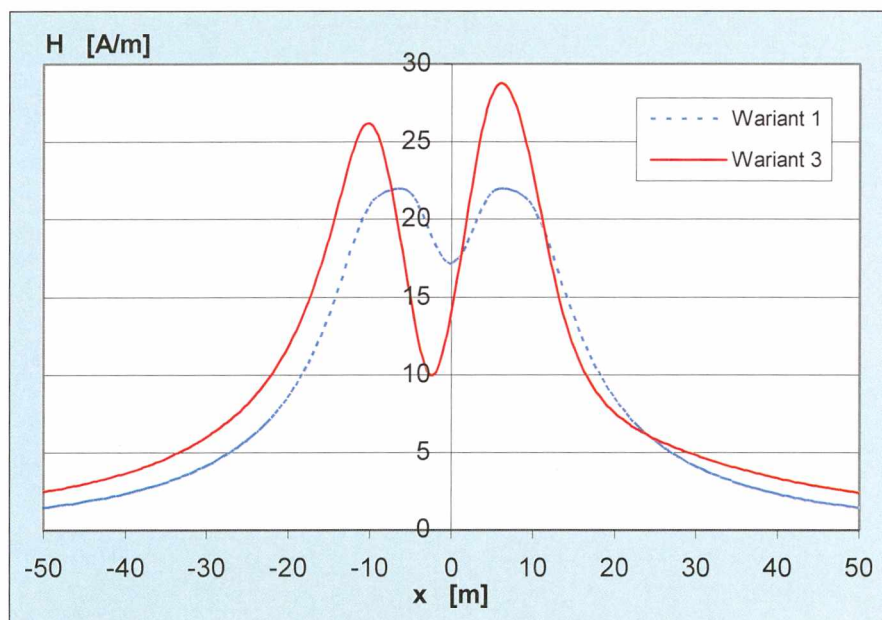
- najwyższe, dopuszczalne napięcie sieci: 400 kV - $U_d = 420$ kV, 220 kV - $U_d = 245$ kV [71],
- prąd maksymalny linii 400 kV - $I_m = 2850$ A, a linii 220 kV - $I_m = 1220$ A,
- najniższa, dopuszczalna dla linii 220 kV odległość przewodów fazowych od ziemi $h_{min} = 6,5$ m [71],
- wysokość nad ziemią dla której wykonywano obliczenia rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego $h_p = 2$ m [6].

Wyniki obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego pod rozpatrywaną linią, dla wybranych wariantów jej pracy, przedstawiono w postaci wykresów $E = f(x)$ i $H = f(x)$

(rys.7.71 i 7.22), a wartości maksymalne pola uzyskane we wszystkich rozpatrywanych przypadkach pracy linii zestawiono w tabeli 7.2.



Rys.7.21. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią 2x400 + 2x220 kV dla wybranych wariantów jej pracy



Rys.7.22. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią 2x400 + 2x220 kV dla wybranych wariantów jej pracy

Tabela 7.2. Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występujące we wszystkich rozpatrywanych wariantach pracy linii

Wariant pracy linii:	1	2	3	4	5
E [kV/m]	6,27	5,79	7,51	1,09	4,21
H [A/m]	22,0	28,9	28,9	10,9	27,8

Analiza wyników symulacji uzasadnia stwierdzenie, iż warunki najbardziej niekorzystne pracy wielotorowej linii wysokiego napięcia, w których identyfikuje się największe wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, nie muszą wystąpić w sytuacji, w której obciążenie i napięcie wszystkich torów linii przyjmie wartości maksymalne (jak to ma miejsce dla linii 1 i 2-torowych). W rozpatrywanym przypadku wystąpiły one bowiem dla wariantu 3 – gdy jeden z górnych torów systemu 400 kV był wyłączony. Należy zwrócić uwagę, iż wartości maksymalne natężenia pola magnetycznego dla wariantów 2, 3 i 5 pracy linii są do siebie zbliżone. Dlatego przy określaniu warunków najbardziej niekorzystnych należy przeanalizować wszystkie możliwe przypadki pracy linii, gdyż przy innym rozmieszczeniu faz linii, mogą one wystąpić dla innego przypadku jej pracy.

8. Podsumowanie rezultatów pracy

Zakończenie prac nad rozprawą doktorską „*Pomiarowa i obliczeniowa identyfikacja rozkładu pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez wielotorowe, wielonapięciowe linie elektroenergetyczne*” zbiegło się z końcowym etapem budowy na terenie Polski pierwszej czterotorowej, dwunapięciowej linii wysokiego napięcia. Rozprawa ta miała między innymi za zadanie rozwiązać wiele problemów naukowo-technicznych na jakie natknęli się projektanci, inwestorzy i osoby związane z budową tej inwestycji oraz przyszłych przedsięwzięć związanych z przebudową istniejących linii wysokiego napięcia na układ czterotorowy, dwunapięciowy.

Brak w polskiej literaturze wytycznych dotyczących technicznych możliwości przebudowy wyeksploatowanych linii wysokiego napięcia na nowe linie wielotorowe, wielonapięciowe, wykorzystujące w całości trasę istniejącej linii, brak na rynku polskim nowoczesnych programów komputerowych do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego pod wielotorowymi, wielonapięciowymi liniami wysokiego napięcia oraz aktualność tego problemu było kluczowym powodem do zajęcia się tym tematem.

Za wymierne efekty pracy doktorskiej można uznać:

- opracowanie matematyczno-fizycznego modelu rozkładu pola elektroenergetycznego w otoczeniu wielotorowych, wielonapięciowych linii wysokiego napięcia opartego na metodzie odbicia zwierciadlanego i superpozycji;
- opracowanie, w oparciu o powyższy model, programu komputerowego oraz wykonanie jego weryfikacji wynikami badań empirycznych, które pozwoliły na ocenę jego wiarygodności, efektywności i przydatności praktycznej;
- udowodnienie, iż ze wzrostem liczby torów na słupie linii nie musi się wiązać wzrost natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią. W liniach wielotorowych może bowiem dochodzić do kompensowania się pola, a jego składowe mogą, w niektórych przypadkach, przyjmować wartości niższe od występujących w typowych liniach jedno i dwutorowych eksploatowanych na terenie Polski i dużo niższe od wartości granicznych, określonych w polskich przepisach;
- opracowanie wytycznych obliczania wartości maksymalnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w warunkach najbardziej niekorzystnych w otoczeniu wielotorowych linii WN (udowodniono, iż warunki najbardziej niekorzystne, występujące dla linii 1 i 2-torowych, tj. sytuacja, w której odległość przewodów roboczych linii od ziemi jest najmniejsza oraz gdy obciążenie i napięcie linii przyjmie wartości maksymalne, nie muszą być warunkami najbardziej niekorzystnymi dla linii wielotorowych. W przypadku linii o liczbie torów większej od 2, gdzie dolne tory kompensują pole elektromagnetyczne generowane przez tory górne, dla zidentyfikowania wartości maksymalnej

natężenia pola elektrycznego i magnetycznego należy przeanalizować wszystkie przypadki wyłączeń jednego, lub nawet kilku torów linii);

- opracowanie wytycznych projektowania słupów wielotorowych linii WN w aspekcie optymalizacji rozkładu pola elektromagnetycznego pod tego typu liniami (wskazanie sposobu rozłożenia przewodów tych samych faz w różnych torach dla linii dwutorowych i dla trzech najczęściej spotykanych w praktyce typów linii czterotorowych).

9. Wnioski końcowe

1. Uzyskane rezultaty analiz i obliczeń w pełni dowodzą prawdziwości postawionej tezy rozprawy.
2. Wykonane w rozprawie obliczenia rozkładu pól elektromagnetycznych pod liniami wysokiego napięcia oraz ich empiryczna weryfikacja dowiodły, iż stworzony model matematyczno-fizyczny rozkładu pola elektromagnetycznego, oparty na metodzie odbicia zwierciadlanego i superpozycji, może być wykorzystany do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu wielotorowych, wielonapięciowych linii wysokiego napięcia. Zastosowane w tym modelu uproszczenia nie powodują wzrostu błędu obliczeń wraz ze wzrostem liczby analizowanych torów linii. Maksymalny błąd obliczeń nie przekracza wartości 30 %, którą uznaje się jako wartość dopuszczalną błędu wyznaczenia pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia.
3. Opracowany program MAH umożliwia obliczanie rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego na dowolnej wysokości, w otoczeniu wielotorowych wielonapięciowych linii wysokiego napięcia, o liczbie torów od 1 do 6, czyli dla wszystkich typów linii eksploatowanych w Polsce i na świecie. Stanowi on efektywne narzędzie obliczeniowe umożliwiające zastąpienie kłopotliwych i czasochłonnych obliczeń w programach opartych na metodzie elementów skończonych, szybką i dokładną symulacją rozpatrywanych zjawisk. Umożliwia on również wyznaczanie ekspozycji na jakie narażeni są pracownicy wykonujący prace pod napięciem na liniach wysokiego napięcia oraz wyznaczanie, na tej podstawie, dopuszczalnych czasów ich pracy.
4. Wartości maksymalne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla linii 1 i 2-torowych, wyznaczone na potrzeby opracowań ekologicznych, występują w sytuacji, w której odległość przewodów roboczych linii od ziemi jest najmniejsza oraz gdy obciążenie i napięcie linii przyjmuje wartości maksymalne. W pracy udowodniono, że dla linii o liczbie torów większej od 2, gdzie dolne tory kompensują pole elektromagnetyczne generowane przez tory górne, dla zidentyfikowania wartości maksymalnej natężenia pola elektrycznego i magnetycznego należy przeanalizować wszystkie przypadki wyłączeń jednego, lub nawet kilku torów linii.
5. Analiza wszystkich możliwych wariantów konfiguracji przewodów w dwutorowych liniach wysokiego napięcia wykazała, że rozmieszczenie przewodów fazowych na słupach linii elektroenergetycznej ma duży wpływ na rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią. Przy rozkładzie najbardziej niekorzystnym wartości natężenia pola są w niektórych wypadkach o ponad 30 % większe niż przy rozkładzie optymalnym. W liniach wielotorowych, w zależności od rozmieszczenia

przewodów tych samych faz w różnych torach linii, w niektórych przypadkach, różnica wartości pola elektromagnetycznego przy rozkładzie najbardziej niekorzystnym i optymalnym sięga ponad 100 %. W projektowaniu nowych oraz modernizacji istniejących linii elektroenergetycznych należy więc zwracać na ten aspekt większą niż dotychczas uwagę, gdyż wiele eksploatowanych obecnie w kraju linii nie posiada optymalnie skonfigurowanych przewodów.

6. Przeprowadzone analizy wykazały, że projektując wielotorową konstrukcję słupa napowietrznej linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia zgodnie ze wskazówkami zawartymi w pracy doktorskiej, dotyczącymi sposobu rozmieszczenia przewodów, można zapewnić minimalizację wypadkowego pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii poprzez wykorzystanie zjawiska kompensowania się pól pochodzących od poszczególnych przewodów linii
7. Zwiększenie liczby torów w liniach elektroenergetycznych nie zawsze prowadzi do zwiększenia wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, a w wielu przypadkach przyjmuje ono wartości mniejsze od rozwiązań klasycznych (linii 1 lub 2-torowych eksploatowanych na terenie Polski) i dużo mniejsze od wartości granicznych, określonych w polskich przepisach.

Bibliografia

- [1] Szuba M. i inni: Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka. Informator – wydanie 3. Biuro Konsultingowo-Inżynierskie “EKO-MARK”. Wrocław 2005.
- [2] Orzechowski A.: Analiza pól elektromagnetycznych i prądów jonowych linii prądu przemiennego przebudowanych na linie prądu stałego. Rozprawa doktorska na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2002.
- [3] Komorowska I., Różycki S.: Prognoza skutków wpływu ustaleń miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego Gminy Kórnik na środowisko przyrodnicze w zakresie odnoszącym się do dwunapięciowej, elektroenergetycznej linii napowietrznej 220/400 kV stanowiącej fragment linii 400 kV Plewiska-Ostrów. Praca niepublikowana, Instytut Energetyki, Warszawa 2000.
- [4] Wertheimer N., Leeper E.: Electrical wiring configuration and childhood cancer, *American Journal Epidemiology*, 1979, vol 109, No 22, 273-284.
- [5] Szmigielski S., Sobiczewska E., Szuba M.: Współczesne poglądy na ryzyko nowotworowe pól magnetycznych 50 Hz w świetle wyników międzynarodowych programów naukowych, XX Szkoła Jesienna PTBR, Zakopane, 18-22 października 2004.
- [6] Rozporządzenie Ministra Środowiska, z dnia 30 października 2003 roku w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. *Dziennik Ustaw* nr 192, poz. 1883, 2003.
- [7] Galoch J., Wira A.: Pole elektromagnetyczne linii wielotorowych i wielofazowych. VII Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć – IW 2004. Poznań-Będlewo, 26-28 maja 2004.
- [8] Habrych M., Wróblewski Z., Szuba M., Jaworski M.: Analiza porównawcza metod obliczeniowych i pomiarowych rozkładu pola elektromagnetycznego dla potrzeb sporządzania dokumentacji ekologicznej. XIV Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Elektryczne” ELSAF 2003, Wrocław 2003.
- [9] Habrych M., Wróblewski Z.: Tendencje w budowie wielotorowych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia w aspekcie oddziaływania pola elektromagnetycznego na środowisko. V Konferencja Naukowo-Techniczna: Elektroenergetyczne Sieci Rozdzielcze, SIECI 2004, Wrocław, 15-17 września 2004.
- [10] Habrych M., Wróblewski Z.: Wpływ otoczenia na rozkład pola elektrycznego pod liniami wysokiego napięcia. XX Szkoła Jesienna PTBR, Zakopane, 18-22 października 2004.
- [11] Habrych M., Wróblewski Z.: Sterowanie rozkładem pola elektromagnetycznego pod wielotorową linią wysokiego napięcia, przez zmianę usytuowania przewodów. V Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna – Postępy w Elektrotechnice Stosowanej PES-5, Kościelisko, 20-24 czerwca 2005.

- [12] Habrych M., Wróblewski Z.: Analiza możliwości i celowości stosowania programów komputerowych w obliczeniach rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia. XV Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Elektryczne” ELSAF 2005, Wrocław 2005.
- [13] Habrych M., Wróblewski Z., Szuba M.: Określanie rozkładów pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia na potrzeby ekspertyz ekologicznych. *Energetyka* nr 12, 2003.
- [14] Habrych M., Wróblewski Z.: Ocena przydatności obliczeniowej metody wyznaczania rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami WN. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 5, 2004.
- [15] Habrych M., Wróblewski Z.: Kompensowanie się pól elektromagnetycznych w otoczeniu wielotorowych linii wysokiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny* nr 7-8, 2004.
- [16] Habrych M., Wróblewski Z.: Electromagnetic field in the surroundings of multi-circuit high voltage lines. *European Transaction on Electrical Power*, (w druku).
- [17] Habrych M., Wróblewski Z.: Wpływ wzajemnego usytuowania przewodów fazowych w wielotorowych liniach wysokiego napięcia na rozkład pola elektromagnetycznego. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, 2005.
- [18] Habrych M., Szuba M., Jaworski M.: Wzajemna odległość pomiędzy budynkami mieszkalnymi a liniami napowietrznymi wysokiego, średniego i niskiego napięcia różnych typów w aspekcie oddziaływania pola magnetycznego. *ElektroInfo* nr 3, 2005.
- [19] Szafronowski D., Łukaszewicz M.: Pole elektromagnetyczne leczy, czy zabija. *Aura* (w druku).
- [20] Mikołajczyk J.: Ulot elektryczny. Laboratoryjne badania hałasu i zakłóceń radioelektrycznych. VII Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć – IW 2004. Poznań-Będlewo, 26-28 maja 2004.
- [21] <http://jastrzab.lhs.pl/>
- [22] Jaworski M., Szuba M., Wróblewski Z.: Analiza oddziaływania czynników fizycznych i chemicznych związanych z budową i eksploatacją linii elektroenergetycznych 400 kV na środowisko. Raport Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej serii SPR nr 9/2005.
- [23] Souques M., Lambrozo J., Plante M. Electromagnetic fields and health. *Electra* No 192, October 2000 – 2000 Cigre Session.
- [24] Draper G., Vincent T., Kroll M., Swanson J.: Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *BMJ*, Volume 330, June 2005.
- [25] Wertheimer N., Leeper E.: Electrical wiring configuration and childhood cancer, *American Journal Epidemiology*, 1979, vol 109, No 22, 273-284.

- [26] Biological Effects of Electric and Magnetic Fields at Power Frequencies. WHO Regional Publications. European Series No. 10, 1982.
- [27] NCI Dismisses Leukaemia Risk for Children Living Near Power Lines. Measured Magnetic Fields Stir Debate. Microwave News, July/August 1997.
- [28] National Institute of Environmental Health Sciences. 1998 Working Group Report (EMF RAPID): assessment of health effects from exposure to power line frequency electric and magnetic field. NIH Publication Nr 98-3981, 1998.
- [29] Ahlbom A.: A pooled analysis of magnetic field and childhood leukaemia. British Journal of Cancer, vol. 83, no. 5, pp. 692-698, 2000.
- [30] Greenland S.: An evaluation of the possible risks from electric and magnetic fields (EMFs) from power lines, internal wiring, electrical occupations and appliances. California EMF Program, Department of Health Services, State of California, Los Angeles, pp. 1-236, 2001.
- [31] International Agency for Research on Cancer (IARC): Static and extremely-low-frequency (ELF) electric and magnetic field. Monograph. No 80, IARC Lyon, 2002.
- [32] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej, z dnia 29 listopada 2002 roku w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dziennik Ustaw nr 217, poz. 1833, 2002.
- [33] PN-74/T-06260. Źródła promieniowania elektromagnetycznego. Znaki ostrzegawcze.
- [34] Informator PSE: Połączenie 400 kV stacji 400/110 kV Pasikurovice z istniejącą linią 220 kV Świebodzice – Klecina. Wyd. Biuro Konsultingowo-Inżynierskie „EKO-MARK”, 2005.
- [35] www.pse.pl
- [36] Robocze sprawozdanie z pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (informacje techniczne) w 2002 r. Praca niepublikowana, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Warszawa 2003.
- [37] Krajowy System Elektroenergetyczny (informacje techniczne) w 2003 r. Praca niepublikowana, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Warszawa 2004.
- [38] Krajowy System Elektroenergetyczny (informacje techniczne) w 2004 r. Praca niepublikowana, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, Warszawa 2005.
- [39] Pluta W.: Oddziaływanie linii wysokiego napięcia prądu stałego na środowisko. Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 1994.
- [40] Wskaźniki techniczne elektrowni, stacji i linii elektroenergetycznych zaprojektowanych przez Energoprojekt. Praca niepublikowana.
- [41] www.nowaliniapoznan.pl
- [42] Niklewicz K.: Europa boi się ciemności. Gazeta Wyborcza nr 282, str. 25, 2003.12.04.

- [43] Pohlmann H., Dornemann Ch.: Aspekte der elektrischen Beeinflussung bei der Verlegung von Leiterseilen in der Nahe vonin Betrieb befindlichen Freileitungen. SAG nergieversorgungslosungen GmbH.
- [44] Katalog – Budowa linii elektroenergetycznej 2x400 kV + 2x220 kV na terenie gminy Kórnik. Wydawca – PSE-Operator S.A. Warszawa, 2006.
- [45] Krakowski M.: Elektrotechnika teoretyczna. Tom 2 – pole elektromagnetyczne. PWN, Warszawa, 1995.
- [46] Electrostatic and Electromagnetic Effects of Ultra High Voltage Transmission Lines. EPRI-802 Project 566, Final Raport, June 1978.
- [47] Jaszczyk B., Łukaniszyn M., Przytulski A.: Zbiór zadań z teorii pola elektromagnetycznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2000.
- [48] Mosiński F., Wira A.: Ekologiczne problemy przesyłu i użytkowania energii elektrycznej. Wydawnictwo PŁ, Łódź 1999.
- [49] PN-IEC 833:1997 – Pomiary pól elektrycznych częstotliwości przemysłowej.
- [50] DIN 48203, Drähte und Seile für Leitungen, Aluminium-Stahl-Seile Technische Lieferbedingungen, Deutsche Norm, Dezember 1987.
- [51] DIN 48204, Leitungsseile, Aluminium-Stahl-Seile, Deutsche Norm, April 1987.
- [52] <http://www.enertech.net/bfast/bfast.html>
- [53] Teresiak Z., Wandzel B., Teresiak Z.: Miernictwo pól elektromagnetycznych 50 hz w środowisku i na stanowiskach pracy. XVIII Szkoła Jesienna PTBR – Oddziaływanie biologiczne, ryzyko zdrowotne i ochrona przed polami elektromagnetycznymi. Zakopane, 2000.
- [54] Hoeffelman J., Decat G., Lilien J-L., Delaigle A., Govaerts.: Assesment of electric and magnetic field levels in the vicinity of the HV overhead power lines in Belgium. 21, rue d’Artois, F-75008 Paris, Session Cigre, 2004.
- [55] Mustafa F., Mustafa E., Hal A.,... Consideration of magnetic field levels in designing transmission lines and substations for residentially crowded Areas in Egipt. 21, rue d’Artois, F-75008 Paris, Session Cigre, 2004.
- [56] Arabani M.P., Porkar B., Porkar S. The influence of conductor sag on distribution of transmission line magnetic field. 21, rue d’Artois, F-75008 Paris, Session Cigre, 2004.
- [57] Reisdorph Kent: Delhi 6 – dla każdego. Wydawnictwo Helion, Gliwice 2001.
- [58] Katalog słupów i fundamentów linii 110 kV. Zestawienie podstawowych rozwiązań technicznych słupów i fundamentów linii 110 kV. Tom I i II. Poznań, 1998.
- [59] Katalog słupów i fundamentów linii 220 kV. BSiPE Energoprojekt Kraków 1995.
- [60] Katalog słupów i fundamentów linii 400 i 750 kV. BSiPE Energoprojekt Kraków 1995.
- [61] Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne w liniach napowietrznych najwyższych napięć. Słupy rurowe. Energoprojekt Poznań.

- [62] Argasińska H.: Elektroenergetyczne linie napowietrzne wysokich napięć. Energetyka 4/2003 – przedruk z Cigre 2002.
- [63] Grobicki J., Germata M.: Przewody i kable elektroenergetyczne. WNT, Warszawa, 2000.
- [64] Album tablic zwisów i naprężeń. KRT-066, Energoprojekt Kraków, Kraków 1974.
- [65] Baran J.: Poradnik Inżyniera Elektryka. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1999.
- [66] Kinsner K., Serwin A., Sobierajski M., Wilczyński A.: Sieci elektroenergetyczne. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 1993.
- [67] Trzaska H.: Pomiarы pól elektromagnetycznych do celów ochrony pracy i ochrony środowiska. Monografia, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1996.
- [68] Bieńkowski P.: Ekspozycja na pola elektromagnetyczne na stanowiskach pracy i w środowisku – aspekty techniczne i metrologiczne. XX Szkoła Jesienna PTBR, Zakopane, 18-22 października 2004.
- [69] Papliński P., Czarnecki Z.: Niepewność wyników pomiarów pola elektrycznego i magnetycznego. Konferencja naukowo-techniczna Pola elektromagnetyczne 50 Hz a energetyka i środowisko. Szczyrk, listopad 1998.
- [70] Ustawa z dnia 18 maja 2005 o zmianie ustawy – Prawo Ochrony Środowiska oraz niektórych innych ustaw. Dz. U. Nr 113, poz.954.
- [71] PN-EN 50341-1. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne.
- [72] Piłatowicz A.: Zagadnienia pól elektromagnetycznych w pracach Cigre. Konferencja naukowo-techniczna - Pola elektromagnetyczne 50 Hz w środowisku człowieka. Poznań 27-29 października 2003.
- [73] Gallego A.: The influence of line configuration on environment impacts of electrical origin. Electra, no. 221 – August 2005.
- [74] Wandzel B.: Bezpieczeństwo pracy na liniach najwyższych napięć w technice PPN. Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna – Elektroenergetyka dziś i jutro, Problemy eksploatacyjne. Szklarska Poręba, listopad 1997.
- [75] Dudek B.: Schematy i metody prac pod napięciem. www.ppn.pl
- [76] Dudek B.: Zagrożenia elektryczne i elektromagnetyczne. www.ppn.pl
- [77] Dudek B. Indywidualne środki ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz. II Konferencja Naukowo – Techniczna – Pola elektromagnetyczne a energetyka i środowisko. Bielsko-Biała, listopad 1994.
- [78] Szuba M., Jaworski M.: Praca w polu elektromagnetycznym. XV Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Elektryczne” ELSAF 2005, Wrocław 2005.

- [79] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 17.09.1999 w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach i instalacjach energetycznych. Dz. U. Nr 80 z 1999 r., poz. 912.
- [80] Nowacki T., Nadolny Z.: Analiza pola elektrycznego i magnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości w aspekcie oddziaływania na monterów w czasie wykonywania prac pod napięciem metodą na wysokim potencjale na linii 220 kV. VII Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć – IW 2004. Poznań-Będlewo, 26-28 maja 2004.
- [81] Danielski L., Jabłoński W.: Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach wysokiego napięcia. Materiały szkoleniowe. Wrocław, 2004.
- [82] Rychter J.: Analiza wpływu cieplnych warunków pracy przewodów linii napowietrznych wysokiego napięcia na rozkład pola elektromagnetycznego w sąsiedztwie linii. Praca magisterska, Wrocław 2006.

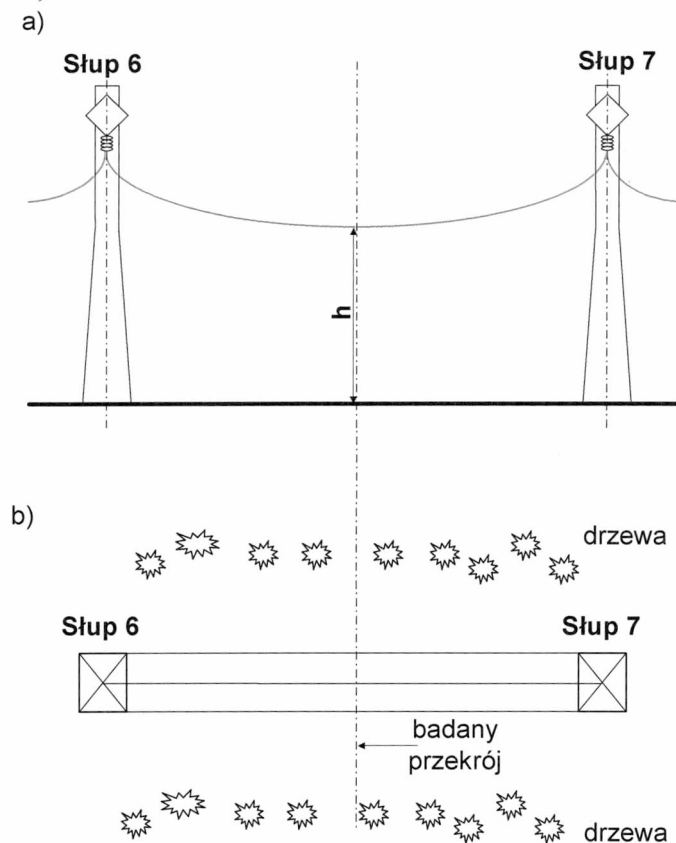
ZAŁĄCZNIKI

Załącznik 1. Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami o napięciu 110 kV

1.1. Linia S-410 relacji GPZ Polkowice – GST-3 Rudna Główna

Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod jednotorową linią S-410 relacji GPZ Polkowice – GST-3 Rudna Główna zostały wykonane w przęśle nr 6 – 7, którego długość jest równa 235 m.

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, linia była obciążona prądem roboczym $I_r = 133\text{ A}$, natomiast napięcie robocze linii wynosiło $U_r = 115\text{ kV}$. Zmierzone wysokości przewodów od ziemi wyniosły odpowiednio $h_1 = 5,21\text{ m}$, $h_2 = 5,79\text{ m}$, $h_3 = 8,83\text{ m}$. Na przewody fazowe zastosowano przewód typu AFL-6 240, natomiast na przewód odgromowy AFL-6 120. Pomiary wykonano w przekroju poprzecznym linii znajdującym się w środku przęsła (rys.1.1) (w tym miejscu odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza), a pas pomiarowy zawierał się w granicach: $-15 \div 15\text{ m}$ ze względu na drzewa rosnące poza tym obszarem. Szczegółowe wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1.1,



Rys. 1.1. Profil linii S-410 w miejscu wykonywania pomiarów a) widok z boku, b) widok z góry

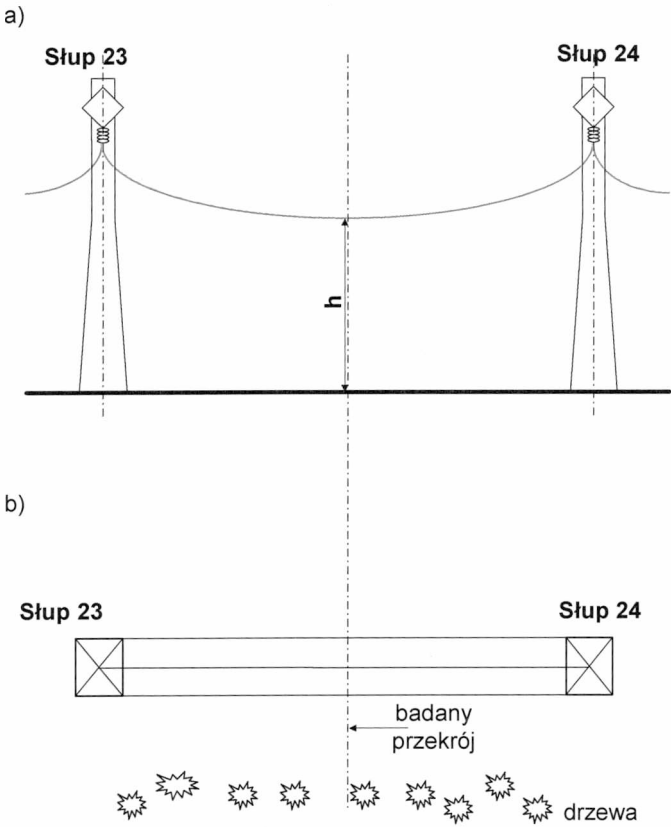
Tabela 1.1. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią S-410 (d przy wartości x w tabeli oznacza występowanie drzew w tym miejscu)

x [m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
15 d	1,0	0,80	0,05
10	2,2	1,76	0,43
8	3,2	2,56	1,17
5	5,2	4,16	2,36
4	6,0	4,80	2,26
3	6,0	4,80	1,82
2	6,2	4,96	1,17
1	6,6	5,28	0,61
0	6,0	4,80	1,01
-1	6,4	5,12	2,04
-2	6,5	5,20	2,97
-3	6,2	4,96	3,31
-4	5,4	4,32	2,79
-5	4,2	3,36	2,11
-8	2,2	1,76	0,81
-10 d	1,4	1,12	0,37
-15 d	0,8	0,64	0,04

1.2. Linia S-400 relacji Polkowice – kopalnia Lubin Zachodni

Linia S-400 relacji GPZ Polkowice – kopalnia Lubin Zachodni, jest linią jednotorową o przewodach ułożonych w kształcie delta. Całkowita długość linii wynosi 8,1 km. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane w przęśle nr 23 - 24, którego długość jest równa 274 m.

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 23,3$ °C, linia była obciążona prądem roboczym $I_r = 18$ A, natomiast napięcie robocze linii wynosiło $U_r = 115$ kV. Zmierzone wysokości przewodów od ziemi wyniosły odpowiednio $h_1 = 6,29$ m, $h_2 = 5,88$ m, $h_3 = 8,31$ m. Na przewody fazowe zastosowano przewód typu AFL-6 185, natomiast na przewód odgromowy AFL-1,7 70. Pomiary wykonano w przekroju poprzecznym linii znajdującym się w środku przęsła (rys.1.2) (w tym miejscu odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza), a pas pomiarowy zawierał się w granicach: $-15 \div 15$ m ze względu na drzewa rosnące poza tym obszarem. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1.2.



Rys. 1.2. Profil linii S-400 w miejscu wykonywania pomiarów

Tabela 1.2. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią S-400
(d przy wartości x w tabeli oznacza występowanie drzew w tym miejscu)

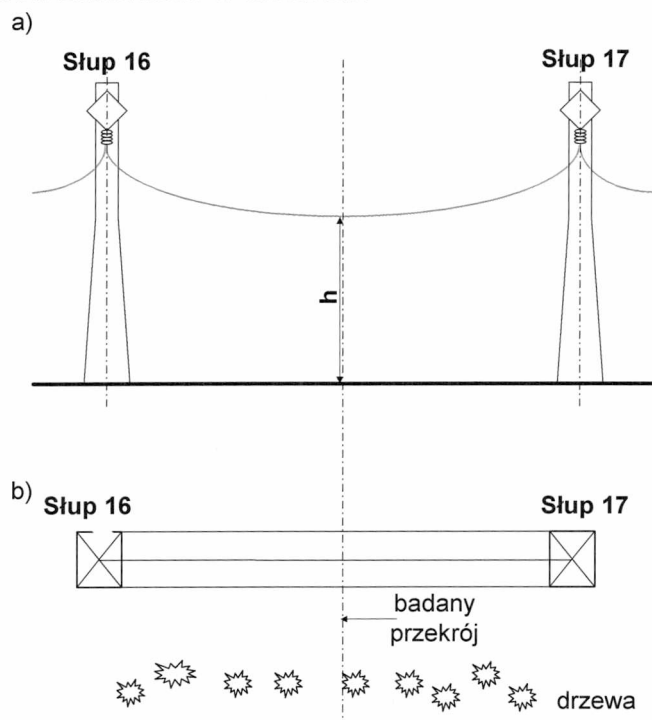
x [m]	B [μT]	H [A/m]	E [kV/m]
15	0,19	0,15	0,08
10	0,50	0,40	0,52
8	0,54	0,43	0,90
5	0,74	0,59	1,96
4	0,81	0,65	2,25
3	0,84	0,67	2,43
2	0,82	0,66	2,18
1	0,80	0,64	1,55
0	0,80	0,64	0,07
-1	0,86	0,69	0,85
-2	0,80	0,64	1,42
-3	0,82	0,66	2,14
-4	0,72	0,58	2,22
-5	0,62	0,50	1,85
-8	0,32	0,26	0,59
-10 d	0,24	0,19	0,05
-15 d	0,11	0,09	0,05

1.3. Linia S-406 relacji Rudna Zachodnia – Komorniki

Linia S-406 relacji Rudna Zachodnia – Komorniki, podobnie jak dwie wcześniejsze linie, jest linią jednotorową o przewodach ułożonych w kształcie delty. Pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego wykonano w przęśle nr 16 – 17, którego długość jest równa 288 m.

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 27,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, linia była obciążona prądem roboczym $I_r = 380\text{ A}$, natomiast napięcie robocze linii wynosiło $U_r = 115\text{ kV}$. Zmierzone wysokości przewodów od ziemi wyniosły odpowiednio $h_1 = 5,44\text{ m}$, $h_2 = 5,39\text{ m}$, $h_3 = 8,28\text{ m}$. Na przewody fazowe zastosowano przewód AFL-6 120, a na przewód odgromowy AFL-1,7 50.

Również w tym przypadku pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego wykonano w przekroju poprzecznym linii znajdującym się w środku przęsła (rys.1.3) (w tym miejscu odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza), a pas pomiarowy zawierał się w granicach: $-10 \div 15\text{ m}$ ze względu na drzewa rosnące poza tym obszarem oraz na uskok terenu. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1.3.



Rys. 1.3. Profil linii S-406 w miejscu wykonywania pomiarów a) widok z boku, b) widok z góry

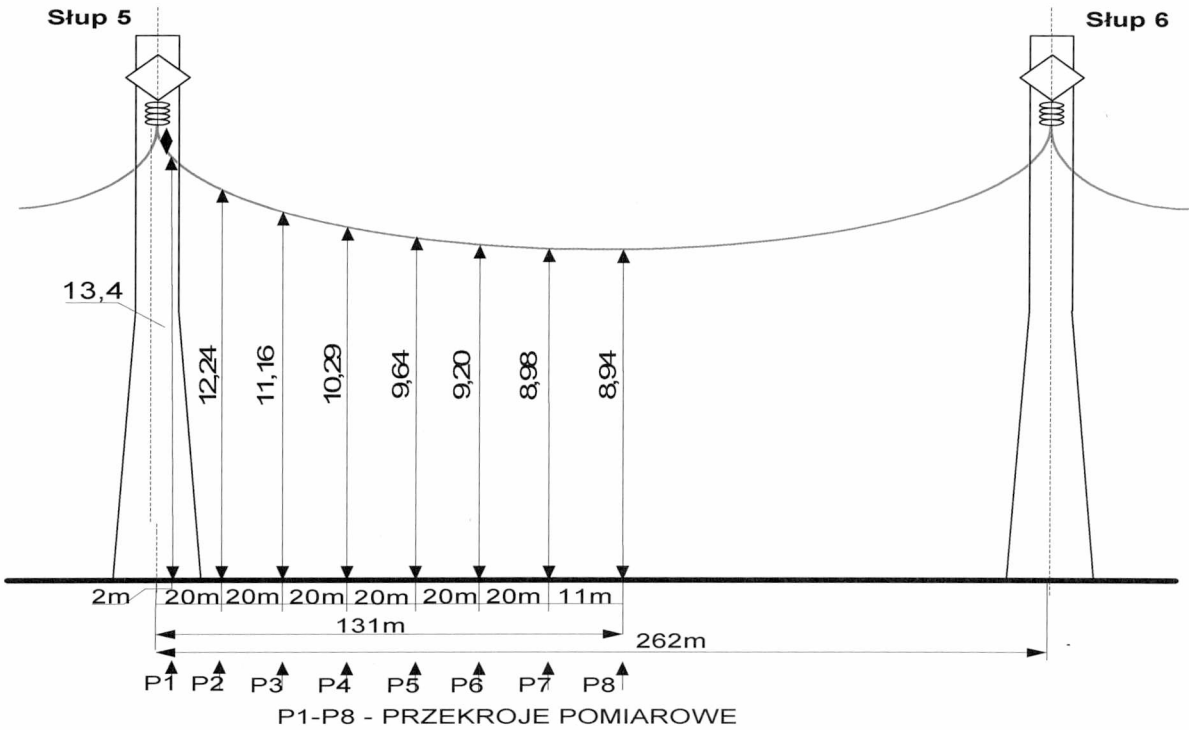
Tabela 1.3. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią S-406
(d przy wartości x w tabeli oznacza występowanie drzew w tym miejscu)

x [m]	B [μT]	H [A/m]	E [kV/m]
15	1,78	1,42	0,19
10	3,4	2,72	0,45
8	5,2	4,16	0,73
5	7,2	5,76	1,77
4	11,8	9,44	2,33
3	13,2	10,56	2,68
2	13,8	11,04	2,41
1	14,2	11,36	1,78
0	15,3	12,24	0,90
-1	14,8	11,84	1,24
-2	14,0	11,20	1,85
-3	13,8	11,04	2,53
-4	13,0	10,40	2,69
-5	11,0	8,80	2,13
-7	6,2	4,96	1,33
-8	6,1	4,88	0,30
-9	4,8	3,84	0,19
-10 d	4,2	3,36	0

1.4. Linia S-125, S-126 relacji Pasikurovice - Wrocław

Linia S-125, S-126 relacji Pasikurovice – Wrocław, jest dwutorową linią o przewodach ułożonych w kształcie delty. Na przewody fazowe zastosowano przewód typu AFL-6 240, natomiast na przewody odgromowe AFL-1,7 50. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane w przęśle nr 5 – 6, którego długość jest równa 262 m. Wykonano je w 8 poprzecznych przekrojach pomiarowych przęsła – dla 8 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi (rys.1.4). Pomiary rozpoczęto od 2 metrów od pierwszego słupa, a skończono na przekroju pomiarowym, który znajdował się pośrodku przęsła (tam odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza).

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. W tabeli 1.4 zestawiono odległości przewodów od ziemi dla danego przekroju pomiarowego, obciążenie i napięcie obu torów w chwili wykonywania pomiarów. Każdy pas pomiarowy zawierał się w granicach: $-50 \div 50\text{ m}$. Pod linią nie znajdowały się żadne przedmioty obce mogące zniekształcić rozkład pola elektromagnetycznego (drzewa, krzewy, płoty itp.), a ukształtowanie terenu było płaskie.



Rys. 1.4. Profil linii S-125 S-126 w miejscu wykonywania pomiarów - widok z boku

Tabela.1.4. Odległość przewodów fazowych od ziemi w danym przekroju pomiarowym, natężenie prądu i napięcie linii w chwili wykonywania pomiarów.

Pion pomiarowy:	S-125			S-126		
	h [m]	U _r [kV]	I _r [A]	h [m]	U _r [kV]	I _r [A]
1	13,40/13,42/16,60	116,8	232	13,49/13,44/16,65	117,3	189
2	12,24/12,26/15,43	116,8	232	12,38/12,35/15,49	117,3	189
3	11,16/11,17/14,37	116,8	232	11,21/11,19/14,40	117,3	189
4	10,29/10,33/13,53	116,8	273	10,26/10,34/13,57	117,3	201
5	9,64/9,63/12,88	116,8	273	9,68/9,69/12,91	117,3	201
6	9,17/9,20/12,45	116,8	273	9,26/9,24/12,51	117,3	201
7	8,96/8,98/12,19	116,8	259	8,98/8,99/12,24	117,3	199
8	8,94/8,95/12,15	116,8	259	8,97/8,97/12,19	117,3	199

Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego dla poszczególnych poprzecznych przekrojów pomiarowych zestawiono w tabelach 1.5 ÷ 1.7.

Tabela 1.5. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią S-125 S-126 dla przekrojów pomiarowych 1,2,3

x [m]	Przekrój pomiarowy 1			Przekrój pomiarowy 2			Przekrój pomiarowy 3		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,2	0,16	0,07	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08
-45	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08
-40	0,3	0,24	0,08	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08
-35	0,4	0,32	0,09	0,3	0,24	0,08	0,3	0,24	0,08
-30	0,5	0,40	0,10	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08
-25	0,5	0,40	0,15	0,5	0,40	0,13	0,5	0,40	0,13
-20	0,6	0,48	0,20	0,6	0,48	0,17	0,6	0,48	0,20
-18	0,7	0,56	0,25	0,6	0,48	0,21	0,6	0,48	0,22
-16	0,8	0,64	0,29	0,7	0,56	0,26	0,8	0,64	0,29
-15	0,9	0,72	0,34	0,8	0,64	0,30	0,9	0,72	0,31
-14	1,1	0,88	0,37	0,9	0,72	0,35	1,0	0,80	0,36
-13	1,1	0,88	0,38	1,0	0,80	0,38	1,1	0,88	0,41
-12	1,1	0,88	0,41	1,0	0,80	0,44	1,1	0,88	0,45
-11	1,1	0,88	0,43	1,1	0,88	0,46	1,2	0,96	0,47
-10	1,2	0,96	0,46	1,1	0,88	0,47	1,3	1,04	0,52
-9	1,2	0,96	0,47	1,2	0,96	0,53	1,4	1,12	0,58
-8	1,2	0,96	0,48	1,3	1,04	0,56	1,5	1,20	0,60
-7	1,2	0,96	0,48	1,4	1,12	0,58	1,6	1,28	0,62
-6	1,3	1,04	0,47	1,4	1,12	0,60	1,7	1,36	0,66
-5	1,4	1,12	0,46	1,5	1,20	0,65	2,0	1,60	0,70
-4	1,5	1,20	0,43	1,6	1,28	0,68	2,2	1,76	0,76
-3	1,5	1,20	0,36	1,7	1,36	0,77	2,3	1,84	0,80
-2	1,6	1,28	0,34	2,0	1,60	0,80	2,4	1,92	0,88
-1	1,7	1,36	0,33	1,8	1,44	0,84	2,6	2,08	0,95
0	1,6	1,28	0,35	1,6	1,28	0,84	2,5	2,00	0,98
1	1,2	0,96	0,33	1,6	1,28	0,85	2,3	1,84	0,95
2	1,5	1,20	0,34	1,5	1,20	0,81	2,2	1,76	0,88
3	1,3	1,04	0,37	1,6	1,28	0,76	2,1	1,68	0,81
4	1,3	1,04	0,42	1,5	1,20	0,68	2,0	1,60	0,76
5	1,3	1,04	0,45	1,4	1,12	0,64	1,8	1,44	0,71
6	1,2	0,96	0,46	1,4	1,12	0,61	1,8	1,44	0,66
7	1,2	0,96	0,48	1,3	1,04	0,58	1,9	1,52	0,63
8	1,2	0,96	0,48	1,3	1,04	0,56	1,8	1,44	0,61
9	1,0	0,80	0,48	1,2	0,96	0,54	1,7	1,36	0,58
10	1,0	0,80	0,47	1,2	0,96	0,48	1,6	1,28	0,53
11	0,8	0,64	0,44	1,2	0,96	0,47	1,4	1,12	0,48
12	0,8	0,64	0,42	1,1	0,88	0,43	1,3	1,04	0,44
13	0,8	0,64	0,39	1,1	0,88	0,38	1,2	0,96	0,40
14	0,8	0,64	0,37	1,0	0,80	0,36	1,0	0,80	0,36
15	0,8	0,64	0,33	0,9	0,72	0,31	0,8	0,64	0,31
16	0,7	0,56	0,30	0,8	0,64	0,27	0,8	0,64	0,28
18	0,6	0,48	0,26	0,8	0,64	0,23	0,7	0,56	0,23
20	0,6	0,48	0,23	0,6	0,48	0,18	0,7	0,56	0,19
25	0,6	0,48	0,16	0,5	0,40	0,12	0,6	0,48	0,14
30	0,4	0,32	0,11	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08
35	0,4	0,32	0,09	0,3	0,24	0,08	0,3	0,24	0,08
40	0,3	0,24	0,08	0,3	0,24	0,08	0,2	0,16	0,08
45	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08
50	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08

Tabela 1.6. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią S-125
S-126 dla przekrojów pomiarowych 4,5,6

x [m]	Przekrój pomiarowy 4			Przekrój pomiarowy 5			Przekrój pomiarowy 6		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08
-45	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08
-40	0,3	0,24	0,08	0,2	0,16	0,08	0,3	0,24	0,08
-35	0,4	0,32	0,08	0,3	0,24	0,08	0,4	0,32	0,08
-30	0,5	0,40	0,08	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08
-25	0,5	0,40	0,15	0,5	0,40	0,11	0,5	0,40	0,10
-20	0,6	0,48	0,18	0,6	0,48	0,18	0,6	0,48	0,19
-18	0,6	0,48	0,26	1,0	0,80	0,25	1,0	0,80	0,23
-16	1,0	0,80	0,32	1,2	0,96	0,32	1,1	0,88	0,28
-15	1,0	0,80	0,36	1,3	1,04	0,35	1,2	0,96	0,35
-14	1,1	0,88	0,42	1,4	1,12	0,42	1,6	1,28	0,36
-13	1,1	0,88	0,46	1,5	1,20	0,48	1,8	1,44	0,40
-12	1,3	1,04	0,51	1,7	1,36	0,54	1,9	1,52	0,42
-11	1,6	1,28	0,56	1,8	1,44	0,60	2,2	1,76	0,54
-10	1,7	1,36	0,64	1,9	1,52	0,68	2,5	2,00	0,62
-9	1,7	1,36	0,70	2,0	1,60	0,74	2,7	2,16	0,73
-8	1,9	1,52	0,73	2,2	1,76	0,76	2,8	2,24	0,78
-7	2,0	1,60	0,77	2,4	1,92	0,83	2,9	2,32	0,84
-6	2,0	1,60	0,92	2,8	2,24	0,85	3,1	2,48	0,87
-5	2,1	1,68	0,93	3,0	2,40	0,89	3,2	2,56	0,89
-4	2,2	1,76	0,95	3,2	2,56	0,94	3,3	2,64	0,92
-3	2,3	1,84	1,02	3,4	2,72	1,07	3,4	2,72	0,98
-2	2,6	2,08	1,09	3,7	2,96	1,20	3,6	2,88	1,14
-1	3,1	2,48	1,19	3,5	2,80	1,33	3,4	2,72	1,24
0	2,8	2,24	1,20	3,4	2,72	1,34	3,3	2,64	1,38
1	2,5	2,00	1,17	3,3	2,64	1,31	3,3	2,64	1,30
2	2,4	1,92	0,96	2,9	2,32	1,15	3,3	2,64	1,16
3	2,3	1,84	0,99	3,2	2,56	1,03	3,1	2,48	1,07
4	2,3	1,84	0,90	2,8	2,24	0,93	2,8	2,24	0,92
5	2,2	1,76	0,83	2,7	2,16	0,88	2,7	2,16	0,90
6	2,1	1,68	0,85	2,6	2,08	0,84	2,7	2,16	0,88
7	2,0	1,60	0,74	2,5	2,00	0,81	2,8	2,24	0,86
8	1,9	1,52	0,71	2,3	1,84	0,77	2,8	2,24	0,82
9	1,8	1,44	0,66	2,2	1,76	0,72	2,5	2,00	0,74
10	1,7	1,36	0,62	2,2	1,76	0,62	2,2	1,76	0,65
11	1,5	1,20	0,55	1,9	1,52	0,56	2,0	1,60	0,68
12	1,4	1,12	0,50	1,7	1,36	0,50	1,8	1,44	0,52
13	1,2	0,96	0,46	1,5	1,20	0,46	1,6	1,28	0,45
14	1,1	0,88	0,41	1,3	1,04	0,40	1,3	1,04	0,40
15	1,0	0,80	0,35	1,2	0,96	0,35	1,2	0,96	0,33
16	0,9	0,72	0,30	1,0	0,80	0,29	1,1	0,88	0,28
18	0,8	0,64	0,25	0,9	0,72	0,23	1,0	0,80	0,22
20	0,7	0,56	0,19	0,8	0,64	0,17	0,8	0,64	0,18
25	0,5	0,40	0,14	0,5	0,40	0,13	0,6	0,48	0,11
30	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08	0,2	0,16	0,08
35	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08	0,2	0,16	0,08
40	0,3	0,24	0,08	0,3	0,24	0,08	0	0	0,08
45	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08
50	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08

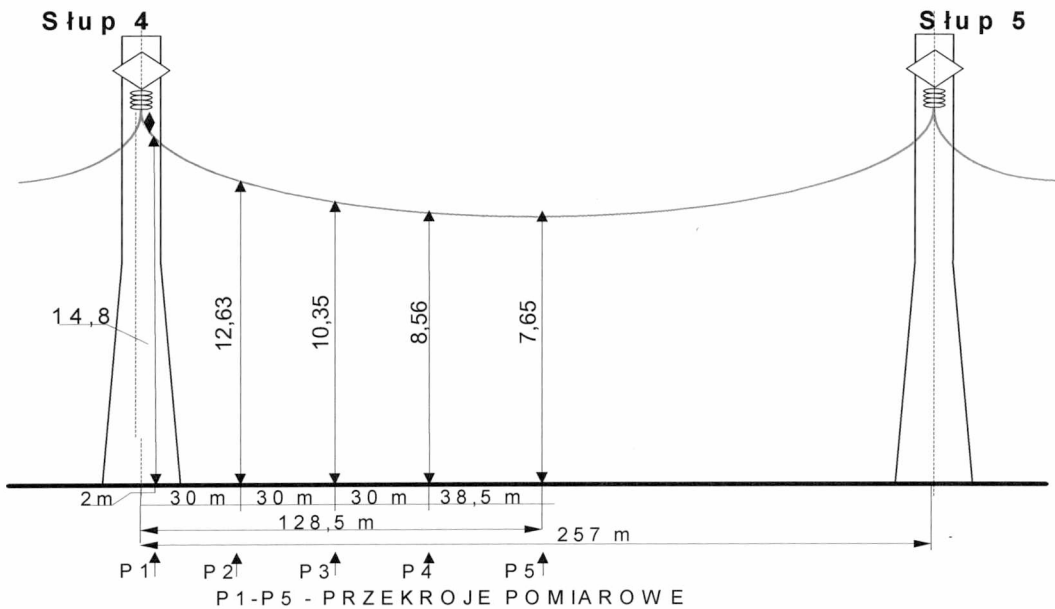
Tabela 1.7. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią S-125 S-126 dla przekrojów pomiarowych 7,8

x [m]	Przekrój pomiarowy 7			Przekrój pomiarowy 8		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08
-45	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08
-40	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08
-35	0,2	0,16	0,08	0,4	0,32	0,08
-30	0,4	0,32	0,08	0,5	0,40	0,08
-25	0,5	0,40	0,10	0,6	0,48	0,09
-20	0,6	0,48	0,14	1,1	0,88	0,17
-18	0,9	0,72	0,20	1,1	0,88	0,25
-16	1,0	0,80	0,27	1,2	0,96	0,38
-15	1,1	0,88	0,36	1,2	0,96	0,43
-14	1,3	1,04	0,42	1,4	1,12	0,47
-13	1,6	1,28	0,56	1,7	1,36	0,56
-12	1,8	1,44	0,60	1,9	1,52	0,60
-11	1,9	1,52	0,66	2,2	1,76	0,68
-10	2,1	1,68	0,73	2,4	1,92	0,80
-9	2,4	1,92	0,83	2,6	2,08	0,89
-8	2,5	2,00	0,85	2,8	2,24	0,93
-7	2,6	2,08	0,91	2,9	2,32	0,94
-6	2,8	2,24	0,96	3,0	2,40	0,96
-5	3,0	2,40	1,01	3,2	2,56	1,03
-4	3,5	2,80	1,02	3,5	2,80	1,18
-3	3,7	2,96	1,09	3,6	2,88	1,32
-2	3,9	3,12	1,22	3,8	3,04	1,48
-1	3,8	3,04	1,36	4,0	3,20	1,55
0	3,7	2,96	1,49	3,7	2,96	1,56
1	3,5	2,80	1,38	3,5	2,80	1,54
2	3,6	2,88	1,28	3,1	2,48	1,46
3	3,4	2,72	1,19	2,8	2,24	1,25
4	3,2	2,56	1,06	3,0	2,40	1,12
5	3,1	2,48	0,99	3,1	2,48	0,99
6	3,1	2,48	0,94	2,9	2,32	0,95
7	2,9	2,32	0,90	2,8	2,24	0,93
8	2,7	2,16	0,86	2,5	2,00	0,92
9	2,7	2,16	0,76	2,3	1,84	0,83
10	2,6	2,08	0,69	2,0	1,60	0,76
11	2,3	1,84	0,62	1,8	1,44	0,66
12	1,9	1,52	0,56	1,6	1,28	0,59
13	1,6	1,28	0,50	1,5	1,20	0,54
14	1,4	1,12	0,41	1,4	1,12	0,47
15	1,3	1,04	0,36	1,2	0,96	0,42
16	1,3	1,04	0,30	1,0	0,80	0,35
18	1,0	0,80	0,24	0,9	0,72	0,25
20	0,9	0,72	0,16	0,5	0,40	0,19
25	0,5	0,40	0,10	0,5	0,40	0,10
30	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08
35	0,4	0,32	0,08	0,4	0,32	0,08
40	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08
45	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,08
50	0	0	0,08	0	0	0,08

1.5. Czterotorowa linia rałacji Urberach - Münster

Linia rałacji Urberach – Münster (Niemcy) jest czterotorową linią 110 kV o pionowo ułożonych przewodach. Na przewody fazowe zastosowano przewód typu Al/St 185/30mm², natomiast na przewód odgromowy Al/St 185/30mm² [50,51]. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane w przęśle nr 4 – 5, którego długość jest równa 257 m. Wykonano je w 5 poprzecznych przekrojach pomiarowych przęśla – dla 5 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi (rys.1.5). Pomiary rozpoczęto od 2 metrów od pierwszego słupa, a skończono na przekroju pomiarowym, który znajdował się pośrodku przęśla (tam odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza).

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. W tabeli 1.8 zestawiono odległości przewodów od ziemi dla danego przekroju pomiarowego, natomiast w tabeli 1.9 obciążenie i napięcie torów w chwili wykonywania pomiarów.



Rys.1.5. Profil linii w miejscu wykonywania pomiarów - widok z boku

Tabela 1.8. Wysokość zawieszenia przewodów w kolejnych przekrojach poprzecznych przęśla

Przekrój pomiarowy	Tor 1			Tor 2			Tor 3			Tor 4		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	23,68	19,18	14,68	14,68	19,18	23,68	23,69	19,19	14,69	14,69	19,19	23,69
2	21,63	17,13	12,63	12,63	17,13	21,63	21,64	17,14	12,64	12,64	17,14	21,64
3	19,35	14,85	10,35	10,35	14,85	19,35	19,36	14,86	10,36	10,36	14,86	19,36
4	17,56	13,06	8,56	8,56	13,06	17,56	17,57	13,07	8,57	8,57	13,07	17,57
5	16,65	12,15	7,65	7,65	12,15	16,65	16,66	12,16	7,66	7,66	12,16	16,66

Tabela 1.9. Napięcie robocze oraz natężenie prądu w poszczególnych torach linii podczas wykonywania pomiarów

Przekrój pomiarowy	T [°C]	Tor 1		Tor 2		Tor 3		Tor 4	
		U _{rob} [kV]	I _{rob} [A]	U _{rob} [kV]	I _{rob} [A]	U _{rob} [kV]	I _{rob} [A]	U _{rob} [kV]	I _{rob} [A]
1,2	6,0	107,1	190	109,1	190	108,1	182	107,1	182
3	5,8	107,2	132	109,2	132	108,2	123	107,1	123
4	5,7	107,0	133	109,1	133	108,1	125	107,1	125
5	5,6	107,0	130	109,1	130	108,1	121	107,1	121

Każdy przekrój pomiarowy zawierał się w granicach: $-30 \div 30$ m. Pod przęsłem w niektórych miejscach znajdowały się krzewy i drzewka, które zniekształcały rozkład natężenia pola elektrycznego. W odległości 50 metrów od osi słupa (strona dodatnia) znajdowała się również inna linia, która wpływała na wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Dlatego można przyjąć, iż pomiary natężenia pola w granicach $-30 \div 15$ m są w miarę poprawne i generowane przez prądy i napięcia pochodzące od badanej linii (wpływ sąsiedniej linii na pomiary jest niewielki), natomiast poza tym obszarem na wartość pola elektromagnetycznego wpływa również druga linia.

Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego dla poszczególnych poprzecznych przekrojów pomiarowych zestawiono w tabelach 1.10 i 1.11.

Tabela 1.10. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla przekrojów pomiarowych 1,2,3

x [m]	Przekrój pomiarowy 1			Przekrój pomiarowy 2			Przekrój pomiarowy 3		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-30	0	0	0,05	0	0	0,09	0	0	0,08
-26	0	0	0,05	0	0	0,13	0	0	0,09
-24	0	0	0,06	0	0	0,15	0	0	0,11
-22	0	0	0,06	0	0	0,18	0	0	0,14
-20	0	0	0,06	0	0	0,19	0,4	0,32	0,18
-19	0	0	0,05	0,4	0,32	0,22	0,4	0,32	0,23
-18	0,4	0,32	0,05	0,4	0,32	0,23	0,4	0,32	0,26
-17	0,4	0,32	0,04	0,4	0,32	0,24	0,4	0,32	0,30
-16	0,4	0,32	0,04	0,4	0,32	0,25	0,4	0,32	0,32
-15	0,4	0,32	0,04	0,5	0,40	0,25	0,5	0,40	0,38
-14	0,4	0,32	0,03	0,5	0,40	0,24	0,5	0,40	0,42
-13	0,4	0,32	0,01	0,5	0,40	0,22	0,5	0,40	0,47
-12	0,5	0,40	0,01	0,5	0,40	0,20	0,5	0,40	0,50
-11	0,5	0,40	0	0,5	0,40	0,13	0,5	0,40	0,53
-10	0,5	0,40	0	0,5	0,40	0,13	0,7	0,56	0,55
-9	0,5	0,40	0	0,5	0,40	0,09	0,5	0,40	0,58
-8	0,5	0,40	0	0,5	0,40	0,08	0,9	0,72	0,55
-7	0,6	0,48	0	0,5	0,40	0,04	0,9	0,72	0,54
-6	0,7	0,56	0,02	0,5	0,40	0,08	0,9	0,72	0,52
-5	0,7	0,56	0	0,5	0,40	0,09	0,9	0,72	0,35
-4	0,6	0,48	0	0,5	0,40	0,14	0,5	0,40	0,46
-3	0,7	0,56	0,01	0,5	0,40	0,16	0,4	0,32	0,40
-2	0,5	0,40	0,02	0,5	0,40	0,20	0,4	0,32	0,37
-1	0,5	0,40	0,02	0,5	0,40	0,24	0,4	0,32	0,36
0	0,5	0,40	0,06	0,8	0,64	0,27	0,4	0,32	0,36
1	0,5	0,40	0,06	0,9	0,72	0,28	0,4	0,32	0,36
2	0,5	0,40	0,08	0,9	0,72	0,30	0,5	0,40	0,37
3	0,5	0,40	0,13	0,9	0,72	0,31	0,8	0,64	0,39
4	0,7	0,56	0,15	0,9	0,72	0,35	0,8	0,64	0,40
5	0,7	0,56	0,19	0,9	0,72	0,39	0,9	0,72	0,42
6	0,6	0,48	0,22	0,8	0,64	0,33	1,0	0,80	0,42
7	0,6	0,48	0,25	0,9	0,72	0,30	1,1	0,88	0,42
8	0,6	0,48	0,28	0,9	0,72	0,29	1,1	0,88	0,41
9	0,6	0,48	0,25	0,8	0,64	0,28	0,9	0,72	0,39
10	0,6	0,48	0,22	0,9	0,72	0,28	0,9	0,72	0,39
11	0,6	0,48	0,21	0,8	0,64	0,25	0,9	0,72	0,34
12	0,6	0,48	0,20	0,8	0,64	0,22	0,9	0,72	0,35
13	0,6	0,48	0,16	0,8	0,64	0,20	0,9	0,72	0,34
14	0,6	0,48	0,15	0,8	0,64	0,16	0,8	0,64	0,32
15	0,6	0,48	0,14	0,8	0,64	0,11	0,8	0,64	0,28
16	0,7	0,56	0,12	0,8	0,64	0,09	0,8	0,64	0,23
17	0,7	0,56	0,11	0,8	0,64	0,07	0,8	0,64	0,20
18	0,8	0,64	0,08	0,8	0,64	0,07	0,8	0,64	0,16
19	0,8	0,64	0,06	0,8	0,64	0,07	0,8	0,64	0,13
20	0,8	0,64	0,10	0,8	0,64	0,11	0,8	0,64	0,11
22	0,8	0,64	0,16	0,8	0,64	0,16	0,8	0,64	0,09
24	1,2	0,96	0,25	0,8	0,64	0,26	0,8	0,64	0,08
26	1,2	0,96	0,35	0,8	0,64	0,40	0,9	0,72	0,10
30	1,8	1,44	0,77	0,8	0,64	0,72	1,3	1,04	0,22

Tabela 1.11. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla przekrojów pomiarowych 4 i 5

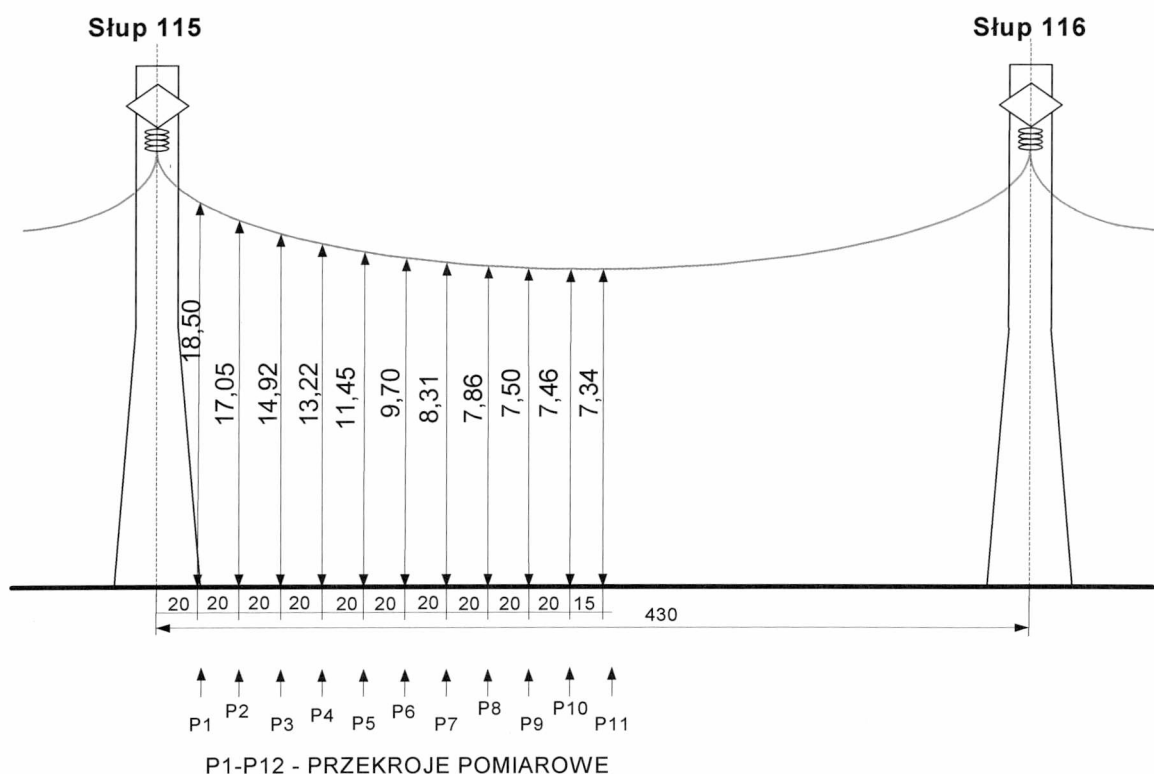
x [m]	Przekrój pomiarowy 4			Przekrój pomiarowy 5		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-30	0	0	0,13	0	0	0,11
-26	0	0	0,16	0	0	0,20
-24	0	0	0,17	0	0	0,23
-22	0	0	0,19	0	0	0,27
-20	0	0	0,27	0	0	0,28
-19	0,4	0,32	0,31	0	0	0,22
-18	0,4	0,32	0,35	0	0	0,38
-17	0,4	0,32	0,40	0,5	0,40	0,34
-16	0,4	0,32	0,47	0,4	0,32	0,53
-15	0,5	0,40	0,54	0,5	0,40	0,77
-14	0,6	0,48	0,61	0,7	0,56	0,86
-13	0,6	0,48	0,67	0,7	0,56	0,92
-12	0,6	0,48	0,72	0,7	0,56	0,99
-11	0,6	0,48	0,78	0,7	0,56	0,91
-10	0,7	0,56	0,72	1,0	0,80	0,83
-9	0,9	0,72	0,70	1,2	0,96	0,73
-8	1,2	0,96	0,64	1,4	1,12	0,61
-7	1,2	0,96	0,61	1,4	1,12	0,51
-6	1,1	0,88	0,52	1,5	1,20	0,39
-5	1,0	0,80	0,44	1,5	1,20	0,31
-4	0,9	0,72	0,38	1,3	1,04	0,24
-3	0,6	0,48	0,37	1,9	1,52	0,23
-2	0,5	0,40	0,30	1,0	0,80	0,21
-1	0,5	0,40	0,30	0,9	0,72	0,24
0	0,5	0,40	0,28	0,4	0,32	0,21
1	0,5	0,40	0,27	0,4	0,32	0,33
2	0,5	0,40	0,30	0,4	0,32	0,37
3	0,7	0,56	0,32	0,4	0,32	0,41
4	0,8	0,64	0,32	0,5	0,40	0,53
5	0,9	0,72	0,30	1,2	0,96	0,56
6	1,1	0,88	0,27	1,2	0,96	0,53
7	1,2	0,96	0,26	1,4	1,12	0,56
8	1,2	0,96	0,25	1,3	1,04	0,44
9	1,2	0,96	0,25	1,2	0,96	0,45
10	1,2	0,96	0,27	1,4	1,12	0,32
11	1,0	0,80	0,30	1,1	0,88	0,35
12	1,0	0,80	0,32	1,2	0,96	0,34
13	1,0	0,80	0,28	1,2	0,96	0,35
14	1,0	0,80	0,23	1,2	0,96	0,36
15	0,9	0,72	0,21	0,9	0,72	0,27
16	0,9	0,72	0,17	0,9	0,72	0,23
17	0,9	0,72	0,13	1,0	0,80	0,20
18	0,8	0,64	0,11	0,7	0,56	0,21
19	0,8	0,64	0,09	0,4	0,32	0,14
20	0,8	0,64	0,09	0,4	0,32	0,07
22	0,8	0,64	0,09	0,4	0,32	0,04
24	0,9	0,72	0,13	0,8	0,64	0,09
26	0,9	0,72	0,18	0,8	0,64	0,14
30	1,3	1,04	0,36	1,2	0,96	0,35

Załącznik 2. Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami o napięciu 220 kV

2.1. Linia D-206 relacji Klecina - Świebodzice

Linia D-205 relacji Klecina - Świebodzice jest linią jednotorową 220 kV o płaskim ułożeniu przewodów. Na przewody fazowe zastosowano przewód typu AFL-8 525, natomiast na przewody odgromowe AFL-1,7 70. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane w przęśle nr 115 – 116 tej linii, którego długość jest równa 430 m. Wykonano je w 11 poprzecznych przekrojach pomiarowych przęsła – dla 11 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi (rys.2.1). Pomiary zakończono na przekroju pomiarowym, który znajdował się pośrodku przęsła linii (tam odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza).

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. W tabeli 2.1 zestawiono odległości przewodów od ziemi dla danego przekroju pomiarowego, obciążenie i napięcie linii w chwili wykonywania pomiarów. Każdy poprzeczny przekrój pomiarowy zawierał się w granicach: $-50 \div 50$ m. Pod linią nie znajdowały się żadne przedmioty obce mogące zniekształcić rozkład pola elektromagnetycznego (drzewa, krzewy, płoty itp.), a ukształtowanie terenu było płaskie.



Rys. 2.1. Profil linii D-205 w miejscu wykonywania pomiarów - widok z boku

Tabela 2.1. Odległość przewodów fazowych od ziemi w danym przekroju pomiarowym, prąd i napięcie linii w chwili wykonywania pomiarów.

Pion pomiarowy:	D-205		
	h [m]	U _r [kV]	I _r [A]
1	18,52/18,50/18,54	232,0	163
2	17,05/17,06/17,08	232,0	163
3	14,92/14,98/14,95	232,0	163
4	13,22/13,29/13,29	232,0	163
5	11,48/11,45/11,50	232,0	163
6	9,70/9,82/9,76	232,0	163
7	8,31/8,32/8,36	232,0	171
8	7,88/7,86/7,89	232,0	171
9	7,50/7,56/7,56	232,0	171
10	7,46/7,46/7,48	232,0	171
11	7,34/7,36/7,38	232,0	171

Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego dla poszczególnych przekrojów pomiarowych zestawiono w tabelach 2.2 ÷ 2.5.

Tabela 2.2. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią D-205 dla przekrojów pomiarowych 1,2,3

x [m]	Przekrój pomiarowy 1			Przekrój pomiarowy 2			Przekrój pomiarowy 3		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0	0	0,11	0,2	0,16	0,11	0,2	0,16	0,10
-45	0,2	0,16	0,12	0,2	0,16	0,13	0,2	0,16	0,12
-40	0,3	0,24	0,20	0,2	0,16	0,16	0,3	0,24	0,16
-35	0,3	0,24	0,26	0,3	0,24	0,23	0,3	0,24	0,20
-30	0,4	0,32	0,35	0,4	0,32	0,32	0,4	0,32	0,32
-25	0,5	0,40	0,48	0,5	0,40	0,42	0,5	0,40	0,47
-20	0,6	0,48	0,62	0,6	0,48	0,62	0,7	0,56	0,76
-18	0,7	0,56	0,68	0,7	0,56	0,70	0,8	0,64	0,84
-16	0,7	0,56	0,73	0,8	0,64	0,82	0,9	0,72	0,99
-15	0,8	0,64	0,73	0,8	0,64	0,86	1,0	0,80	1,03
-14	0,8	0,64	0,74	0,9	0,72	0,90	1,1	0,88	1,11
-13	0,8	0,64	0,76	0,9	0,72	0,94	1,2	0,96	1,21
-12	0,8	0,64	0,77	1,0	0,80	0,97	1,2	0,96	1,26
-11	0,9	0,72	0,76	1,0	0,80	0,99	1,3	1,04	1,27
-10	0,9	0,72	0,75	1,1	0,88	0,99	1,4	1,12	1,27
-9	1,0	0,80	0,75	1,2	0,96	0,98	1,5	1,20	1,22
-8	0,9	0,72	0,69	1,2	0,96	0,97	1,6	1,28	1,20
-7	1,0	0,80	0,64	1,3	1,04	0,92	1,7	1,36	1,18
-6	1,0	0,80	0,61	1,4	1,12	0,86	1,7	1,36	1,08
-5	1,0	0,80	0,52	1,5	1,20	0,81	1,8	1,44	0,98
-4	1,1	0,88	0,45	1,5	1,20	0,69	1,8	1,44	0,85
-3	1,1	0,88	0,34	1,6	1,28	0,61	1,9	1,52	0,69
-2	1,2	0,96	0,25	1,6	1,28	0,48	1,9	1,52	0,54
-1	1,2	0,96	0,22	1,5	1,20	0,36	2,0	1,60	0,46
0	1,0	0,80	0,16	1,5	1,20	0,29	1,9	1,52	0,45
1	1,0	0,80	0,21	1,4	1,12	0,28	2,0	1,60	0,49
2	1,1	0,88	0,26	1,5	1,20	0,35	1,8	1,44	0,61
3	1,0	0,80	0,36	1,5	1,20	0,46	1,8	1,44	0,81
4	1,1	0,88	0,46	1,5	1,20	0,58	1,9	1,52	0,90
5	1,0	0,80	0,52	1,4	1,12	0,66	1,8	1,44	1,04
6	1,1	0,88	0,62	1,4	1,12	0,75	1,8	1,44	1,14
7	1,0	0,80	0,66	1,3	1,04	0,84	1,7	1,36	1,20
8	1,0	0,80	0,71	1,3	1,04	0,90	1,6	1,28	1,25
9	0,9	0,72	0,74	1,2	0,96	0,96	1,5	1,20	1,26
10	0,8	0,64	0,76	1,1	0,88	0,99	1,4	1,12	1,27
11	0,9	0,72	0,78	1,0	0,80	1,01	1,4	1,12	1,27
12	0,9	0,72	0,77	1,0	0,80	0,98	1,2	0,96	1,24
13	0,9	0,72	0,77	0,9	0,72	0,96	1,0	0,80	1,20
14	0,8	0,64	0,76	0,9	0,72	0,91	1,0	0,80	1,14
15	0,8	0,64	0,76	0,9	0,72	0,86	1,0	0,80	1,08
16	0,8	0,64	0,75	0,8	0,64	0,83	0,9	0,72	1,02
18	0,7	0,56	0,68	0,8	0,64	0,73	0,8	0,64	0,88
20	0,6	0,48	0,63	0,7	0,56	0,63	0,7	0,56	0,76
25	0,5	0,40	0,50	0,5	0,40	0,49	0,6	0,48	0,52
30	0,4	0,32	0,35	0,4	0,32	0,33	0,5	0,40	0,34
35	0,3	0,24	0,26	0,3	0,24	0,25	0,3	0,24	0,23
40	0,2	0,16	0,21	0,2	0,16	0,18	0,3	0,24	0,18
45	0	0	0,16	0	0	0,14	0,2	0,16	0,14
50	0	0	0,13	0	0	0,12	0	0	0,12

Tabela 2.3. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią D-205 dla przekrojów pomiarowych 4,5,6

x [m]	Przekrój pomiarowy 4			Przekrój pomiarowy 5			Przekrój pomiarowy 6		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0	0	0,09	0,2	0,16	0,10	0,2	0,16	0,08
-45	0,2	0,16	0,10	0	0	0,13	0,2	0,16	0,12
-40	0,3	0,24	0,16	0,2	0,16	0,18	0,3	0,24	0,16
-35	0,4	0,32	0,22	0,3	0,24	0,26	0,3	0,24	0,20
-30	0,5	0,40	0,36	0,4	0,32	0,35	0,5	0,40	0,30
-25	0,7	0,56	0,55	0,7	0,56	0,48	0,7	0,56	0,52
-20	0,9	0,72	0,82	0,9	0,72	0,85	1,0	0,80	0,86
-18	1,0	0,80	1,10	1,0	0,80	1,04	1,4	1,12	1,12
-16	1,1	0,88	1,20	1,3	1,04	1,26	1,6	1,28	1,41
-15	1,2	0,96	1,26	1,5	1,20	1,48	1,8	1,44	1,60
-14	1,4	1,12	1,35	1,6	1,28	1,56	2,0	1,60	1,76
-13	1,4	1,12	1,45	1,8	1,44	1,65	2,4	1,92	1,98
-12	1,5	1,20	1,50	2,0	1,60	1,80	2,7	2,16	2,18
-11	1,6	1,28	1,59	2,1	1,68	1,89	2,9	2,32	2,41
-10	1,7	1,36	1,63	2,4	1,92	2,02	3,1	2,48	2,61
-9	1,8	1,44	1,65	2,5	2,00	2,08	3,2	2,56	2,74
-8	1,8	1,44	1,60	2,6	2,08	2,06	3,3	2,64	2,81
-7	1,9	1,52	1,55	2,6	2,08	1,98	3,5	2,80	2,74
-6	2,0	1,60	1,42	2,8	2,24	1,86	3,5	2,80	2,55
-5	2,1	1,68	1,30	2,9	2,32	1,66	3,8	3,04	2,24
-4	2,1	1,68	1,09	3,0	2,40	1,50	3,7	2,96	2,01
-3	2,2	1,76	0,89	3,1	2,48	1,23	3,7	2,96	1,76
-2	2,2	1,76	0,78	3,2	2,56	1,14	3,8	3,04	1,66
-1	2,4	1,92	0,66	3,1	2,48	1,06	3,8	3,04	1,64
0	2,3	1,84	0,65	3,0	2,40	1,05	3,9	3,12	1,65
1	2,4	1,92	0,68	3,2	2,56	1,09	4,0	3,20	1,65
2	2,1	1,68	0,80	3,1	2,48	1,18	4,0	3,20	1,68
3	2,2	1,76	0,95	3,1	2,48	1,28	3,8	3,04	1,82
4	2,2	1,76	1,13	3,0	2,40	1,54	3,6	2,88	2,06
5	2,0	1,60	1,32	2,8	2,24	1,70	3,7	2,96	2,30
6	1,8	1,44	1,46	2,7	2,16	1,87	3,6	2,88	2,58
7	1,7	1,36	1,56	2,6	2,08	2,00	3,5	2,80	2,78
8	1,6	1,28	1,63	2,6	2,08	2,11	3,4	2,72	2,84
9	1,5	1,20	1,67	2,5	2,00	2,13	3,3	2,64	2,80
10	1,7	1,36	1,65	2,4	1,92	2,08	3,2	2,56	2,69
11	1,5	1,20	1,61	2,2	1,76	1,98	2,9	2,32	2,51
12	1,4	1,12	1,53	2,0	1,60	1,84	2,5	2,00	2,22
13	1,3	1,04	1,48	1,8	1,44	1,67	2,4	1,92	2,01
14	1,2	0,96	1,37	1,8	1,44	1,57	2,1	1,68	1,80
15	1,1	0,88	1,28	1,6	1,28	1,42	1,9	1,52	1,62
16	1,0	0,80	1,20	1,4	1,12	1,23	1,6	1,28	1,43
18	0,9	0,72	1,08	1,2	0,96	1,02	1,3	1,04	1,10
20	0,8	0,64	0,80	1,0	0,80	0,83	1,1	0,88	0,88
25	0,7	0,56	0,56	0,7	0,56	0,57	0,7	0,56	0,54
30	0,5	0,40	0,36	0,4	0,32	0,34	0,5	0,40	0,32
35	0,4	0,32	0,24	0,4	0,32	0,24	0,4	0,32	0,21
40	0,3	0,24	0,17	0,3	0,24	0,17	0,2	0,16	0,15
45	0,2	0,16	0,12	0,2	0,16	0,14	0,2	0,16	0,11
50	0,2	0,16	0,10	0	0	0,11	0,2	0,16	0,09

Tabela 2.4. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią D-205 dla przekrojów pomiarowych 7,8,9

x [m]	Przekrój pomiarowy 7			Przekrój pomiarowy 8			Przekrój pomiarowy 9		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08
-45	0,2	0,16	0,09	0,2	0,16	0,09	0,3	0,24	0,11
-40	0,3	0,24	0,14	0,3	0,24	0,14	0,4	0,32	0,17
-35	0,4	0,32	0,22	0,5	0,40	0,18	0,4	0,32	0,19
-30	0,6	0,48	0,32	0,5	0,40	0,28	0,6	0,48	0,28
-25	0,8	0,64	0,38	0,8	0,64	0,39	0,7	0,56	0,53
-20	1,0	0,80	0,92	1,1	0,88	0,83	1,1	0,88	0,99
-18	1,5	1,20	1,16	1,5	1,20	0,99	1,4	1,12	1,22
-16	1,8	1,44	1,55	2,0	1,60	1,55	1,9	1,52	1,66
-15	2,2	1,76	1,75	2,3	1,84	1,69	2,2	1,76	1,89
-14	2,5	2,00	2,16	2,7	2,16	2,03	2,9	2,32	2,26
-13	3,1	2,48	2,39	3,2	2,56	2,45	3,4	2,72	2,63
-12	3,4	2,72	2,65	3,6	2,88	2,93	3,9	3,12	2,90
-11	3,8	3,04	2,82	4,0	3,20	3,01	4,2	3,36	3,22
-10	4,2	3,36	3,18	4,4	3,52	3,52	4,5	3,60	3,74
-9	4,3	3,44	3,65	4,3	3,44	3,95	4,8	3,84	4,01
-8	4,5	3,60	3,70	4,5	3,60	4,13	5,1	4,08	4,19
-7	4,8	3,84	3,55	4,6	3,68	4,10	5,4	4,32	4,23
-6	5,0	4,00	3,33	4,8	3,84	3,80	5,4	4,32	3,99
-5	5,2	4,16	2,86	5,0	4,00	3,29	5,9	4,72	3,28
-4	5,1	4,08	2,52	5,2	4,16	2,83	5,8	4,64	2,89
-3	5,2	4,16	2,31	5,4	4,32	2,65	5,8	4,64	2,69
-2	5,3	4,24	2,36	5,6	4,48	2,58	5,9	4,72	2,85
-1	5,3	4,24	2,41	5,6	4,48	2,70	6,2	4,96	3,04
0	5,1	4,08	2,44	5,3	4,24	2,79	6,2	4,96	3,05
1	5,2	4,16	2,44	5,4	4,32	2,73	6,1	4,88	3,00
2	5,3	4,24	2,38	5,5	4,40	2,60	6,2	4,96	2,90
3	5,2	4,16	2,36	5,3	4,24	2,63	6,0	4,80	2,77
4	5,1	4,08	2,56	5,2	4,16	2,82	6,0	4,80	2,95
5	5,1	4,08	2,88	5,1	4,08	3,32	5,8	4,64	3,26
6	4,8	3,84	3,30	4,9	3,92	3,83	5,2	4,16	3,92
7	4,6	3,68	3,59	4,8	3,84	4,11	5,0	4,00	4,25
8	4,4	3,52	3,72	4,7	3,76	4,16	4,8	3,84	4,25
9	4,3	3,44	3,64	4,5	3,60	4,00	4,7	3,76	4,09
10	4,1	3,28	3,20	4,3	3,44	3,57	4,6	3,68	3,77
11	3,8	3,04	2,86	3,9	3,12	3,05	4,2	3,36	3,26
12	3,2	2,56	2,70	3,2	2,56	2,99	3,8	3,04	2,92
13	2,6	2,08	2,43	2,8	2,24	2,49	3,1	2,48	2,66
14	2,4	1,92	2,18	2,5	2,00	2,08	2,6	2,08	2,34
15	2,1	1,68	1,79	2,2	1,76	1,72	2,1	1,68	1,92
16	1,8	1,44	1,59	1,9	1,52	1,57	1,8	1,44	1,69
18	1,4	1,12	1,19	1,6	1,28	1,14	1,4	1,12	1,21
20	1,1	0,88	0,97	1,0	0,80	0,86	1,2	0,96	0,95
25	0,7	0,56	0,58	0,8	0,64	0,46	0,7	0,56	0,52
30	0,5	0,40	0,30	0,5	0,40	0,29	0,5	0,40	0,30
35	0,4	0,32	0,20	0,4	0,32	0,19	0,4	0,32	0,22
40	0,3	0,24	0,15	0,2	0,16	0,13	0,2	0,16	0,16
45	0,3	0,24	0,10	0,2	0,16	0,11	0,2	0,16	0,10
50	0,2	0,16	0,08	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08

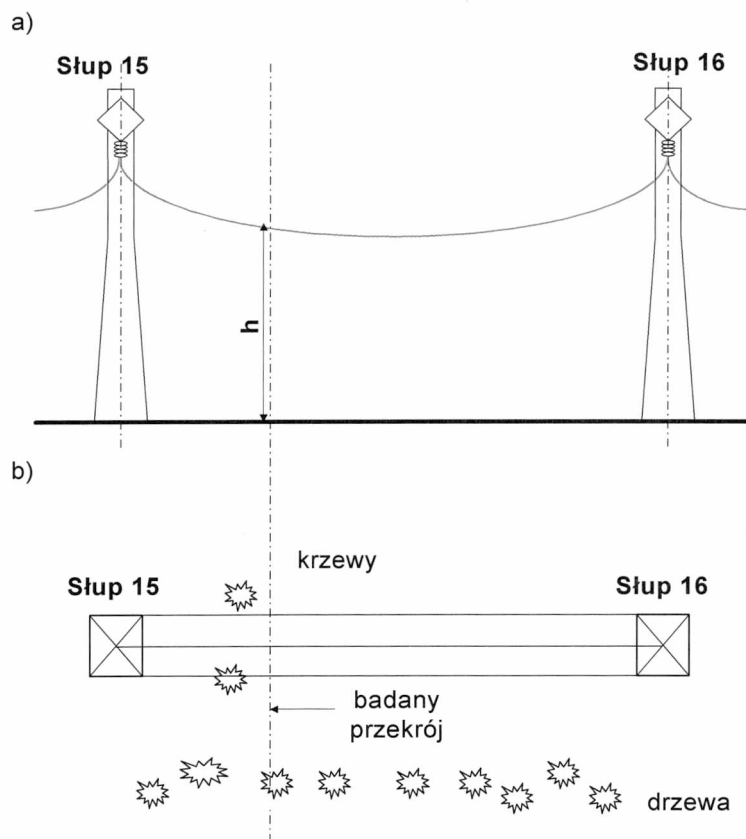
Tabela 2.5. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią D-205 dla przekrojów pomiarowych 10,11

x [m]	Przekrój pomiarowy 10			Przekrój pomiarowy 11		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0	0	0,08	0,2	0,16	0,08
-45	0,2	0,16	0,09	0,3	0,24	0,10
-40	0,2	0,16	0,12	0,3	0,24	0,14
-35	0,4	0,32	0,19	0,3	0,24	0,21
-30	0,6	0,48	0,25	0,7	0,56	0,32
-25	0,8	0,64	0,46	0,8	0,64	0,52
-20	1,0	0,80	0,87	0,9	0,72	0,88
-18	1,4	1,12	1,16	1,5	1,20	1,13
-16	2,0	1,60	1,56	1,9	1,52	1,45
-15	2,2	1,76	1,64	2,3	1,84	1,73
-14	3,0	2,40	2,06	3,1	2,48	1,99
-13	3,6	2,88	2,39	3,6	2,88	2,29
-12	3,9	3,12	2,88	4,0	3,20	2,67
-11	4,2	3,36	3,19	4,1	3,28	3,12
-10	4,6	3,68	3,76	4,3	3,44	3,42
-9	4,8	3,84	4,09	4,7	3,76	3,88
-8	5,0	4,00	4,26	5,1	4,08	4,16
-7	5,2	4,16	4,06	5,2	4,16	4,25
-6	5,5	4,40	3,73	5,6	4,48	4,11
-5	5,9	4,72	3,19	6,0	4,80	3,69
-4	6,0	4,80	2,82	6,0	4,80	3,09
-3	6,0	4,80	2,76	6,1	4,88	2,86
-2	6,0	4,80	2,93	6,2	4,96	2,75
-1	6,1	4,88	3,08	6,3	5,04	3,06
0	6,1	4,88	3,10	6,2	4,96	3,13
1	6,0	4,80	3,10	6,0	4,80	3,00
2	6,1	4,88	2,89	6,0	4,80	2,73
3	6,0	4,80	2,73	6,2	4,96	2,74
4	6,0	4,80	2,80	5,9	4,72	3,01
5	5,9	4,72	3,22	5,8	4,64	3,58
6	5,0	4,00	3,76	5,3	4,24	4,04
7	5,0	4,00	4,10	5,0	4,00	4,29
8	4,7	3,76	4,27	4,6	3,68	4,11
9	4,6	3,68	4,12	4,3	3,44	3,85
10	4,6	3,68	3,81	4,4	3,52	3,33
11	4,3	3,44	3,26	4,3	3,44	3,02
12	3,9	3,12	2,85	4,0	3,20	2,59
13	3,2	2,56	2,43	3,3	2,64	2,36
14	2,7	2,16	2,10	2,9	2,32	1,96
15	2,3	1,84	1,67	2,5	2,00	1,71
16	1,7	1,36	1,55	1,6	1,28	1,38
18	1,5	1,20	1,12	1,4	1,12	1,09
20	1,2	0,96	0,85	1,0	0,80	0,83
25	0,6	0,48	0,49	0,7	0,56	0,46
30	0,5	0,40	0,26	0,5	0,40	0,29
35	0,4	0,32	0,19	0,5	0,40	0,21
40	0,3	0,24	0,13	0,2	0,16	0,15
45	0,3	0,24	0,10	0,3	0,24	0,12
50	0,2	0,16	0,08	0,2	0,16	0,09

2.2. Linia D-207, D-208 relacji Polkowice – Leszno Gronowo – Plewiska

Linia D-207, D-208 relacji Polkowice – Leszno Gronowo – Plewiska jest dwutorową linią o przewodach ułożonych w kształcie delty. Całkowita długość linii wynosi 116,5 km. Pomiary zostały wykonane w przęśle nr 15 – 16, którego długość jest równa 455 m.

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 27,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, linia była obciążona prądem roboczym $I_{r1} = 180\text{ A}$ (D-207) oraz $I_{r2} = 320\text{ A}$ (D-208), natomiast napięcie robocze obu torów linii wynosiło $U_r = 225\text{ kV}$. Zmierzone wysokości przewodów od ziemi wyniosły odpowiednio $h_1 = 16,73\text{ m}$, $h_2 = 16,70\text{ m}$, $h_3 = 22,90\text{ m}$ (D-207) oraz $h_1 = 16,72\text{ m}$, $h_2 = 16,65\text{ m}$, $h_3 = 22,85\text{ m}$ (D-208). Na przewody fazowe zastosowano przewód typu AFL-8 400, natomiast na przewód odgromowy AFL-1,7 70. Pomiary wykonano w przekroju poprzecznym linii znajdującym się 155 m od słupa nr 16 (rys.2.2) (ze względu na ukształtowanie terenu w tym miejscu odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza), a pas pomiarowy zawierał się w granicach: $-20 \div 20\text{ m}$ ze względu na drzewa rosnące poza tym obszarem oraz na uskok terenu. Wyniki pomiarów w tym pasie zestawiono w tabeli 2.6.



Rys. 2.2. Profil linii D-207 D-208 w miejscu wykonywania pomiarów a) widok z boku, b) widok z góry

Tabela 2.6. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią D-207, D-208

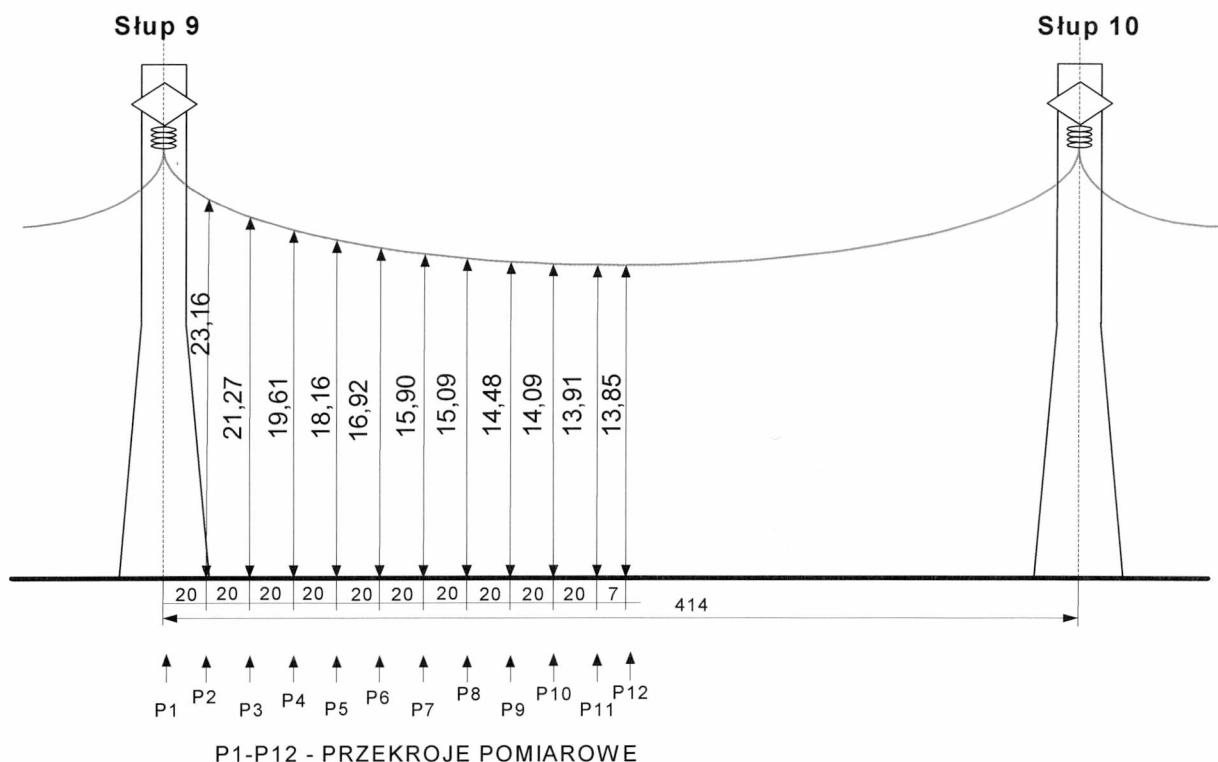
x [m]	B [μT]	H [A/m]	E [kV/m]
20	1,46	1,17	0,18
15	1,76	1,41	0,64
12	1,88	1,50	0,78
11	1,88	1,50	0,81
10	1,92	1,54	0,84
9	1,88	1,50	0,84
8	1,87	1,50	0,86
7	1,85	1,48	0,89
6	1,84	1,47	0,89
5	1,81	1,45	0,9
4	1,72	1,38	0,91
3	1,66	1,33	0,94
2	1,58	1,26	0,98
1	1,52	1,22	1,13
0	1,5	1,20	1,21
-1	1,48	1,18	1,09
-2	1,42	1,14	1,09
-3	1,42	1,14	1,07
-4	1,42	1,14	1,01
-5	1,4	1,12	0,93
-6	1,41	1,13	0,91
-7	1,42	1,14	0,9
-8	1,41	1,13	0,88
-9	1,42	1,14	0,87
-10	1,48	1,18	0,85
-11	1,5	1,20	0,82
-13	1,48	1,18	0,76
-15	1,5	1,20	0,67
-17	1,51	1,21	0,59
-20	1,52	1,22	0,43

Załącznik 3. Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego pod liniami o napięciu 400 kV

3.1. Linia 4-0-03 relacji Pasikurówice - Ostrów

Linia 4-0-03 relacji Pasikurówice - Ostrów jest linią jednotorową o płaskim ułożeniu przewodów. Na przewody fazowe zastosowano przewód typu 2xAFL-8 525, natomiast na przewody odgromowe AFL-1,7 70. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane w przęśle nr 9 – 10, którego długość jest równa 414 m. Wykonano je w 12 poprzecznych przekrojach pomiarowych przęsła – dla 12 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi (rys.3.1). Ostatnim badanym przekrojem pomiarowym był przekrój, który znajdował się pośrodku przęsła (tam odległość przewodów fazowych od ziemi była najmniejsza).

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 24,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. W tabeli 3.1 zestawiono odległości przewodów od ziemi dla danego przekroju pomiarowego, obciążenie i napięcie linii w chwili wykonywania pomiarów. Każdy pas pomiarowy zawierał się w granicach: $-50 \div 50\text{ m}$. Pod linią nie znajdowały się żadne przedmioty obce mogące zniekształcić rozkład pola elektromagnetycznego (drzewa, krzewy, płoty itp.), a ukształtowanie terenu było płaskie.



Rys.3.1. Profil linii 4-0-03 relacji Pasikurówice - Ostrów w miejscu wykonywania pomiarów - widok z boku

Tabela 3.1. Odległość przewodów fazowych od ziemi w danym przekroju pomiarowym, prąd i napięcie linii w chwili wykonywania pomiarów.

Pion pomiarowy:	4-0-03		
	h [m]	U _r [kV]	I _r [A]
1	25,00/26,35/25,12	407,0	217,2
2	23,21/24,56/23,16	407,0	217,2
3	21,30/22,51/21,27	407,0	217,2
4	19,71/20,96/19,61	407,0	217,2
5	18,22/19,56/18,16	407,0	217,2
6	16,99/18,31/16,92	407,0	217,2
7	15,93/17,34/15,90	406,5	214,5
8	15,12/16,43/15,09	406,5	214,5
9	14,53/15,84/14,48	406,5	214,5
10	14,13/15,46/14,09	406,5	214,5
11	13,95/15,23/13,91	406,5	214,5
12	13,88/15,17/13,86	406,5	214,5

Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego dla poszczególnych przekrojów pomiarowych zestawiono w tabelach 3.2 ÷ 3.5.

Tabela 3.2. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią 4-0-03 dla przekrojów pomiarowych 1,2,3

x [m]	Przekrój pomiarowy 1			Przekrój pomiarowy 2			Przekrój pomiarowy 3		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,2	0,16	0,24	0,2	0,16	0,36	0,3	0,24	0,36
-45	0,3	0,24	0,34	0,3	0,24	0,46	0,4	0,32	0,48
-40	0,4	0,32	0,56	0,4	0,32	0,61	0,5	0,40	0,52
-35	0,5	0,40	0,71	0,6	0,48	0,76	0,6	0,48	0,78
-30	0,6	0,48	0,79	0,6	0,48	0,97	0,6	0,48	1,01
-25	0,7	0,56	0,98	0,5	0,40	1,23	0,8	0,64	1,25
-20	0,8	0,64	1,18	0,7	0,56	1,36	0,8	0,64	1,51
-18	0,8	0,64	1,21	0,8	0,64	1,34	0,8	0,64	1,55
-16	0,8	0,64	1,22	0,8	0,64	1,33	0,9	0,72	1,59
-15	0,9	0,72	1,18	0,9	0,72	1,28	0,9	0,72	1,62
-14	0,8	0,64	1,17	0,8	0,64	1,26	0,9	0,72	1,60
-13	0,9	0,72	1,15	0,8	0,64	1,22	1,1	0,88	1,56
-12	0,9	0,72	1,11	0,8	0,64	1,20	1,2	0,96	1,54
-11	1,0	0,80	0,99	0,9	0,72	1,15	1,3	1,04	1,51
-10	1,1	0,88	0,86	0,9	0,72	1,08	1,3	1,04	1,47
-9	1,0	0,80	0,79	1,0	0,80	0,97	1,4	1,12	1,34
-8	1,0	0,80	0,66	1,0	0,80	0,94	1,3	1,04	1,22
-7	1,1	0,88	0,59	1,1	0,88	0,82	1,3	1,04	1,09
-6	1,1	0,88	0,46	1,2	0,96	0,74	1,4	1,12	0,99
-5	1,0	0,80	0,37	1,1	0,88	0,53	1,4	1,12	0,86
-4	1,2	0,96	0,17	1,2	0,96	0,45	1,3	1,04	0,72
-3	1,1	0,88	0,08	1,2	0,96	0,38	1,3	1,04	0,59
-2	1,2	0,96	0,07	1,3	1,04	0,25	1,2	0,96	0,42
-1	1,3	1,04	0,07	1,2	0,96	0,12	1,3	1,04	0,30
0	1,3	1,04	0,07	1,3	1,04	0,12	1,3	1,04	0,26
1	1,3	1,04	0,06	1,2	0,96	0,13	1,4	1,12	0,32
2	1,2	0,96	0,08	1,2	0,96	0,22	1,3	1,04	0,43
3	1,1	0,88	0,08	1,3	1,04	0,35	1,3	1,04	0,58
4	1,2	0,96	0,18	1,4	1,12	0,44	1,3	1,04	0,70
5	1,1	0,88	0,34	1,3	1,04	0,56	1,3	1,04	0,85
6	1,0	0,80	0,46	1,2	0,96	0,72	1,2	0,96	0,97
7	1,1	0,88	0,58	1,3	1,04	0,79	1,3	1,04	1,11
8	0,9	0,72	0,68	1,3	1,04	0,90	1,3	1,04	1,23
9	1,0	0,80	0,80	1,2	0,96	0,99	1,4	1,12	1,33
10	1,0	0,80	0,89	1,3	1,04	1,06	1,4	1,12	1,45
11	0,9	0,72	1,01	1,2	0,96	1,14	1,2	0,96	1,50
12	0,9	0,72	1,12	1,2	0,96	1,21	1,1	0,88	1,54
13	0,8	0,64	1,16	1,2	0,96	1,26	1,1	0,88	1,57
14	0,8	0,64	1,17	1,1	0,88	1,31	1,2	0,96	1,59
15	0,7	0,56	1,20	1,2	0,96	1,32	1,2	0,96	1,60
16	0,7	0,56	1,22	1,1	0,88	1,36	1,1	0,88	1,62
18	0,8	0,64	1,20	1,1	0,88	1,37	0,9	0,72	1,58
20	0,8	0,64	1,20	1,1	0,88	1,36	0,8	0,64	1,54
25	0,7	0,56	1,06	0,9	0,72	1,25	0,8	0,64	1,28
30	0,7	0,56	0,77	0,8	0,64	1,01	0,6	0,48	1,04
35	0,6	0,48	0,64	0,5	0,40	0,81	0,5	0,40	0,79
40	0,6	0,48	0,49	0,4	0,32	0,64	0,4	0,32	0,56
45	0,4	0,32	0,12	0,2	0,16	0,50	0,4	0,32	0,50
50	0,2	0,16	0,09	0,2	0,16	0,40	0,2	0,16	0,39

Tabela 3.3. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią 4-0-03 dla przekrojów pomiarowych 4,5,6

x [m]	Przekrój pomiarowy 4			Przekrój pomiarowy 5			Przekrój pomiarowy 6		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,4	0,32	0,36	0,5	0,40	0,35	0,4	0,32	0,32
-45	0,3	0,24	0,46	0,5	0,40	0,47	0,4	0,32	0,45
-40	0,3	0,24	0,61	0,5	0,40	0,61	0,5	0,40	0,60
-35	0,4	0,32	0,83	0,6	0,48	0,82	0,4	0,32	0,75
-30	0,4	0,32	1,02	0,8	0,64	1,20	0,5	0,40	1,12
-25	0,7	0,56	1,47	0,9	0,72	1,54	0,7	0,56	1,44
-20	0,8	0,64	1,72	1,2	0,96	1,87	1,0	0,80	1,65
-18	0,8	0,64	1,77	1,3	1,04	1,98	1,3	1,04	1,93
-16	1,0	0,80	1,83	1,3	1,04	2,08	1,3	1,04	2,19
-15	1,0	0,80	1,82	1,3	1,04	2,11	1,3	1,04	2,25
-14	1,1	0,88	1,77	1,3	1,04	2,10	1,3	1,04	2,27
-13	1,2	0,96	1,76	1,3	1,04	2,08	1,4	1,12	2,33
-12	1,3	1,04	1,74	1,4	1,12	2,06	1,3	1,04	2,32
-11	1,3	1,04	1,69	1,4	1,12	2,01	1,4	1,12	2,27
-10	1,3	1,04	1,63	1,4	1,12	1,93	1,4	1,12	2,19
-9	1,2	0,96	1,47	1,5	1,20	1,79	1,5	1,20	2,06
-8	1,3	1,04	1,33	1,6	1,28	1,66	1,5	1,20	1,97
-7	1,4	1,12	1,19	1,6	1,28	1,49	1,6	1,28	1,76
-6	1,4	1,12	1,06	1,7	1,36	1,34	1,7	1,36	1,67
-5	1,3	1,04	0,91	1,7	1,36	1,11	1,7	1,36	1,45
-4	1,2	0,96	0,82	1,8	1,44	1,06	1,8	1,44	1,34
-3	1,3	1,04	0,61	1,7	1,36	0,86	1,7	1,36	1,13
-2	1,3	1,04	0,49	1,8	1,44	0,75	1,8	1,44	0,98
-1	1,3	1,04	0,41	1,8	1,44	0,58	1,8	1,44	0,77
0	1,3	1,04	0,36	1,7	1,36	0,50	1,8	1,44	0,67
1	1,3	1,04	0,44	1,6	1,28	0,56	1,9	1,52	0,76
2	1,4	1,12	0,52	1,6	1,28	0,71	2,0	1,60	0,93
3	1,5	1,20	0,65	1,6	1,28	0,83	2,2	1,76	1,01
4	1,7	1,36	0,82	1,7	1,36	1,02	2,1	1,68	1,30
5	1,6	1,28	0,96	1,6	1,28	1,16	2,0	1,60	1,46
6	1,7	1,36	1,08	1,6	1,28	1,37	2,1	1,68	1,63
7	1,5	1,20	1,23	1,7	1,36	1,52	2,0	1,60	1,78
8	1,4	1,12	1,36	1,8	1,44	1,68	2,0	1,60	1,94
9	1,3	1,04	1,48	1,7	1,36	1,83	1,9	1,52	2,08
10	1,3	1,04	1,61	1,5	1,20	1,97	1,8	1,44	2,21
11	1,3	1,04	1,69	1,5	1,20	2,03	1,8	1,44	2,25
12	1,4	1,12	1,76	1,4	1,12	2,08	1,8	1,44	2,31
13	1,3	1,04	1,79	1,4	1,12	2,09	1,9	1,52	2,34
14	1,3	1,04	1,81	1,3	1,04	2,12	1,7	1,36	2,26
15	1,3	1,04	1,83	1,2	0,96	2,13	1,7	1,36	2,25
16	1,2	0,96	1,80	1,1	0,88	2,12	1,7	1,36	2,22
18	1,0	0,80	1,79	1,2	0,96	2,03	1,4	1,12	1,99
20	1,1	0,88	1,70	1,0	0,80	1,91	1,4	1,12	1,62
25	0,8	0,64	1,45	0,8	0,64	1,58	0,9	0,72	1,42
30	0,7	0,56	1,09	0,8	0,64	1,22	0,9	0,72	1,13
35	0,5	0,40	0,85	0,4	0,32	0,86	0,6	0,48	0,79
40	0,4	0,32	0,65	0,4	0,32	0,63	0,5	0,40	0,62
45	0,4	0,32	0,49	0,4	0,32	0,50	0,4	0,32	0,47
50	0,3	0,24	0,40	0,4	0,32	0,38	0,4	0,32	0,37

Tabela 3.4. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią 4-0-03 dla przekrojów pomiarowych 7,8,9

x [m]	Przekrój pomiarowy 7			Przekrój pomiarowy 8			Przekrój pomiarowy 9		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,4	0,32	0,36	0,4	0,32	0,36	0,4	0,32	0,37
-45	0,4	0,32	0,48	0,4	0,32	0,46	0,4	0,32	0,48
-40	0,5	0,40	0,63	0,5	0,40	0,67	0,5	0,40	0,63
-35	0,6	0,48	0,86	0,6	0,48	0,93	0,5	0,40	0,85
-30	0,6	0,48	1,16	0,6	0,48	1,21	0,9	0,72	1,21
-25	1,1	0,88	1,52	0,9	0,72	1,71	1,1	0,88	1,71
-20	1,4	1,12	1,83	1,3	1,04	2,46	1,4	1,12	2,21
-18	1,4	1,12	2,23	1,5	1,20	2,69	1,3	1,04	2,54
-16	1,3	1,04	2,38	1,6	1,28	2,88	1,6	1,28	2,88
-15	1,4	1,12	2,45	1,6	1,28	2,94	1,7	1,36	2,98
-14	1,5	1,20	2,51	1,7	1,36	2,96	1,6	1,28	3,08
-13	1,6	1,28	2,53	1,8	1,44	2,98	1,7	1,36	3,15
-12	1,6	1,28	2,54	1,9	1,52	2,99	1,8	1,44	3,22
-11	1,6	1,28	2,49	2,0	1,60	2,96	2,1	1,68	3,17
-10	1,6	1,28	2,45	1,8	1,44	2,89	2,1	1,68	3,16
-9	1,7	1,36	2,38	2,0	1,60	2,74	2,2	1,76	2,91
-8	1,7	1,36	2,26	2,1	1,68	2,56	2,3	1,84	2,74
-7	1,8	1,44	2,09	2,2	1,76	2,27	2,3	1,84	2,49
-6	1,9	1,52	1,89	2,3	1,84	2,17	2,4	1,92	2,24
-5	2,0	1,60	1,66	2,2	1,76	1,98	2,3	1,84	1,92
-4	2,3	1,84	1,48	2,6	2,08	1,76	2,3	1,84	1,73
-3	2,2	1,76	1,36	2,4	1,92	1,54	2,4	1,92	1,46
-2	2,3	1,84	1,16	2,5	2,00	1,31	2,4	1,92	1,33
-1	2,0	1,60	0,99	2,6	2,08	1,16	2,4	1,92	1,19
0	2,0	1,60	0,86	2,6	2,08	1,06	2,5	2,00	1,16
1	1,9	1,52	0,97	2,6	2,08	1,13	2,6	2,08	1,25
2	2,0	1,60	1,12	2,5	2,00	1,27	2,7	2,16	1,38
3	2,2	1,76	1,31	2,4	1,92	1,50	2,6	2,08	1,50
4	2,2	1,76	1,44	2,3	1,84	1,70	2,5	2,00	1,75
5	2,1	1,68	1,64	2,3	1,84	1,94	2,5	2,00	1,97
6	2,0	1,60	1,85	2,3	1,84	2,14	2,6	2,08	2,30
7	2,0	1,60	2,03	2,2	1,76	2,32	2,5	2,00	2,53
8	2,0	1,60	2,22	2,1	1,68	2,56	2,2	1,76	2,76
9	2,1	1,68	2,35	2,0	1,60	2,70	2,2	1,76	2,94
10	2,0	1,60	2,50	2,0	1,60	2,87	2,3	1,84	3,16
11	1,9	1,52	2,54	2,0	1,60	2,98	2,3	1,84	3,18
12	1,8	1,44	2,50	1,9	1,52	3,00	2,2	1,76	3,16
13	1,7	1,36	2,52	1,7	1,36	2,97	2,2	1,76	3,15
14	1,7	1,36	2,48	1,5	1,20	2,90	2,0	1,60	3,13
15	1,7	1,36	2,42	1,3	1,04	2,89	1,8	1,44	3,05
16	1,6	1,28	2,35	1,3	1,04	2,85	1,7	1,36	2,92
18	1,6	1,28	2,27	1,4	1,12	2,65	1,4	1,12	2,68
20	1,5	1,20	1,87	1,2	0,96	2,48	1,3	1,04	2,30
25	0,8	0,64	1,55	0,8	0,64	1,92	0,8	0,64	1,89
30	0,7	0,56	1,18	0,6	0,48	1,24	0,8	0,64	1,26
35	0,4	0,32	0,81	0,6	0,48	0,90	0,6	0,48	0,90
40	0,4	0,32	0,61	0,5	0,40	0,65	0,6	0,48	0,64
45	0,4	0,32	0,50	0,5	0,40	0,49	0,5	0,40	0,47
50	0,4	0,32	0,37	0,4	0,32	0,38	0,5	0,40	0,37

Tabela 3.5. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego pod linią 4-0-03 dla przekrojów pomiarowych 10,11,12

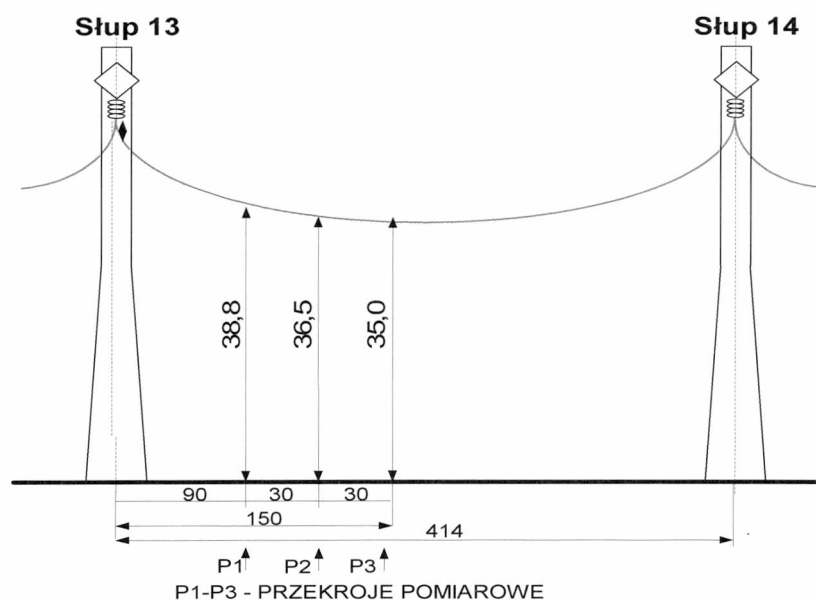
x [m]	Przekrój pomiarowy 10			Przekrój pomiarowy 11			Przekrój pomiarowy 12		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,4	0,32	0,37	0,5	0,40	0,35	0,3	0,24	0,38
-45	0,4	0,32	0,41	0,5	0,40	0,46	0,4	0,32	0,48
-40	0,5	0,40	0,62	0,5	0,40	0,63	0,5	0,40	0,66
-35	0,5	0,40	0,87	0,5	0,40	0,87	0,6	0,48	0,87
-30	0,5	0,40	1,22	0,6	0,48	1,24	0,6	0,48	1,27
-25	0,8	0,64	1,83	1,1	0,88	1,69	0,8	0,64	1,89
-20	1,5	1,20	2,51	1,4	1,12	2,66	1,3	1,04	2,87
-18	1,6	1,28	2,88	1,5	1,20	3,11	1,4	1,12	3,09
-16	1,5	1,20	3,14	1,9	1,52	3,32	1,5	1,20	3,34
-15	1,6	1,28	3,24	2,0	1,60	3,42	1,6	1,28	3,42
-14	1,7	1,36	3,43	2,2	1,76	3,45	1,6	1,28	3,51
-13	1,8	1,44	3,50	2,1	1,68	3,51	1,6	1,28	3,56
-12	2,1	1,68	3,54	2,2	1,76	3,64	1,8	1,44	3,64
-11	2,2	1,76	3,48	2,4	1,92	3,48	2,2	1,76	3,57
-10	2,3	1,84	3,35	2,5	2,00	3,31	2,1	1,68	3,34
-9	2,2	1,76	3,24	2,4	1,92	3,04	2,0	1,60	3,16
-8	2,2	1,76	3,04	2,3	1,84	2,89	2,0	1,60	3,01
-7	2,4	1,92	2,81	2,4	1,92	2,76	2,1	1,68	2,75
-6	2,5	2,00	2,61	2,6	2,08	2,36	2,1	1,68	2,47
-5	2,6	2,08	2,29	2,6	2,08	2,07	2,2	1,76	2,26
-4	2,6	2,08	2,14	2,6	2,08	1,83	2,3	1,84	1,84
-3	2,7	2,16	1,85	2,6	2,08	1,58	2,4	1,92	1,62
-2	2,6	2,08	1,57	2,7	2,16	1,47	2,5	2,00	1,57
-1	2,7	2,16	1,46	2,6	2,08	1,38	2,7	2,16	1,41
0	2,7	2,16	1,33	2,7	2,16	1,30	2,9	2,32	1,40
1	2,7	2,16	1,43	2,9	2,32	1,42	2,8	2,24	1,45
2	2,6	2,08	1,54	2,8	2,24	1,51	2,7	2,16	1,58
3	2,7	2,16	1,78	2,7	2,16	1,63	2,9	2,32	1,70
4	2,7	2,16	2,08	2,6	2,08	1,89	2,7	2,16	1,96
5	2,6	2,08	2,25	2,5	2,00	2,13	2,6	2,08	2,32
6	2,6	2,08	2,53	2,6	2,08	2,42	2,6	2,08	2,54
7	2,7	2,16	2,71	2,6	2,08	2,84	2,6	2,08	2,84
8	2,8	2,24	2,96	2,5	2,00	2,93	2,6	2,08	3,05
9	2,7	2,16	3,20	2,4	1,92	3,12	2,6	2,08	3,32
10	2,5	2,00	3,30	2,3	1,84	3,34	2,6	2,08	3,40
11	2,4	1,92	3,42	2,2	1,76	3,49	2,6	2,08	3,60
12	2,3	1,84	3,49	2,2	1,76	3,60	2,7	2,16	3,66
13	2,2	1,76	3,52	2,1	1,68	3,54	2,8	2,24	3,57
14	2,2	1,76	3,46	2,0	1,60	3,49	2,5	2,00	3,54
15	2,0	1,60	3,30	1,9	1,52	3,48	2,3	1,84	3,46
16	1,8	1,44	3,21	1,7	1,36	3,39	2,2	1,76	3,43
18	1,7	1,36	2,95	1,6	1,28	3,16	1,8	1,44	3,19
20	1,6	1,28	2,58	1,3	1,04	2,78	1,7	1,36	2,94
25	1,3	1,04	1,78	1,1	0,88	1,89	1,3	1,04	1,97
30	0,8	0,64	1,28	0,8	0,64	1,33	1,0	0,80	1,35
35	0,6	0,48	0,90	0,4	0,32	0,92	0,8	0,64	0,98
40	0,6	0,48	0,65	0,4	0,32	0,67	0,6	0,48	0,68
45	0,5	0,40	0,48	0,4	0,32	0,48	0,5	0,40	0,52
50	0,5	0,40	0,37	0,4	0,32	0,37	0,5	0,40	0,36

3.2. Czterotorowa linia relacji Urberach – GroBkrotzenburg (Niemcy)

Linia relacji Urberach – GroBkrotzenburg (Niemcy), pod którą przeprowadzono pomiary rozkładu pola elektromagnetycznego, jest czterotorową linią o napięciu 2x380 kV + 2x110 kV. Twa górne tory o napięciu 380 kV są ułożone w kształcie delty, natomiast tory dolne o napięciu znamionowym 110 kV posiadają płaskie ułożenie przewodów. Jednak jeden z torów systemu 110 kV (po prawej stronie osi słupa) nie został jeszcze „obsadzony” przewodami, w związku z tym, linia pracowała jako linia 3-torowa 2x380 kV + 110 kV. Dla torów o napięciu 380 kV zastosowano przewody typu 4xAl/St 265/35, dla toru o napięciu 110 kV przewód Al/St 265/35, natomiast na przewód odgromowy Al/St 265/35mm² [50,51].

Podczas wykonywania pomiarów temperatura otoczenia wynosiła $T = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego zostały wykonane w przęśle nr 13 – 14, którego długość jest równa 414 m. Wykonano je w 3 poprzecznych przekrojach pomiarowych przęsła – dla 3 różnych odległości przewodów fazowych od ziemi (rys.3.2). Każdy przekrój pomiarowy zawierał się w granicach: $-50 \div 50\text{ m}$. Pod linią nie znajdowały się żadne przedmioty obce mogące zniekształcić rozkład pola elektromagnetycznego (drzewa, krzewy, płoty itp.), a ukształtowanie terenu było płaskie.

W tabeli 3.6 zestawiono odległości przewodów od ziemi dla danego przekroju pomiarowego, natomiast w tabeli 3.7 obciążenie i napięcie poszczególnych torów w chwili wykonywania pomiarów.



Rys.3.2. Profil linii w miejscu wykonywania pomiarów - widok z boku

Tabela 3.6. Wysokość zawieszenia przewodów w kolejnych przekrojach poprzecznych przęsła

Przekrój pomiarowy	Tor 1			Tor 2			Tor 3		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	40,6	51,6	40,6	40,7	51,7	40,7	31,8	31,8	31,8
2	38,6	49,6	38,6	38,7	49,6	38,7	29,8	29,8	29,8
3	36,1	47,1	36,1	36,2	47,2	36,2	27,3	27,3	27,3

Tabela 3.7. Napięcie robocze oraz natężenie prądu w poszczególnych torach linii

Tor 1		Tor 2		Tor 3	
U [kV]	I [A]	U [kV]	I [A]	U [kV]	I [A]
385,0	531	385,5	367	109,1	66

Wyniki pomiarów rozkładu pola elektromagnetycznego dla poszczególnych przekrojów pomiarowych zestawiono w tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego dla przekrojów pomiarowych 1,2,3

x [m]	Przekrój pomiarowy 1			Przekrój pomiarowy 2			Przekrój pomiarowy 3		
	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]	B [μ T]	H [A/m]	E [kV/m]
-50	0,5	0,40	0,11	0,5	0,40	0,16	0,5	0,40	0,30
-45	0,5	0,40	0,15	0,5	0,40	0,16	0,5	0,40	0,30
-40	0,5	0,40	0,17	0,5	0,40	0,16	0,5	0,40	0,35
-35	0,7	0,56	0,17	0,7	0,56	0,17	0,5	0,40	0,27
-30	0,7	0,56	0,18	0,7	0,56	0,20	0,7	0,56	0,27
-25	0,7	0,56	0,23	0,7	0,56	0,22	0,7	0,56	0,30
-20	0,7	0,56	0,25	0,7	0,56	0,25	0,7	0,56	0,35
-18	0,7	0,56	0,27	0,7	0,56	0,28	0,7	0,56	0,38
-16	0,7	0,56	0,28	0,7	0,56	0,28	0,7	0,56	0,40
-15	0,7	0,56	0,30	0,7	0,56	0,28	0,7	0,56	0,40
-14	0,7	0,56	0,30	0,7	0,56	0,29	0,7	0,56	0,40
-13	0,7	0,56	0,30	0,7	0,56	0,30	0,7	0,56	0,40
-12	0,7	0,56	0,31	0,7	0,56	0,31	0,7	0,56	0,42
-11	0,7	0,56	0,31	0,7	0,56	0,31	0,7	0,56	0,42
-10	0,7	0,56	0,34	0,9	0,72	0,32	0,7	0,56	0,44
-9	0,7	0,56	0,34	0,9	0,72	0,33	0,7	0,56	0,44
-8	0,7	0,56	0,35	0,9	0,72	0,33	0,7	0,56	0,46
-7	0,7	0,56	0,34	0,9	0,72	0,36	0,9	0,72	0,48
-6	0,7	0,56	0,34	0,9	0,72	0,35	0,9	0,72	0,50
-5	0,7	0,56	0,35	0,7	0,56	0,37	0,9	0,72	0,51
-4	0,8	0,64	0,37	0,7	0,56	0,37	0,7	0,56	0,49
-3	0,8	0,64	0,37	0,7	0,56	0,37	1,0	0,80	0,51
-2	0,8	0,64	0,38	0,7	0,56	0,38	0,7	0,56	0,51
-1	0,8	0,64	0,38	0,7	0,56	0,39	0,7	0,56	0,51
0	0,8	0,64	0,40	0,7	0,56	0,39	0,9	0,72	0,51
1	0,8	0,64	0,40	0,7	0,56	0,34	1,0	0,80	0,50
2	0,8	0,64	0,40	0,7	0,56	0,39	0,9	0,72	0,51
3	0,8	0,64	0,40	0,7	0,56	0,39	0,7	0,56	0,52
4	0,7	0,56	0,41	0,7	0,56	0,42	0,7	0,56	0,53
5	0,7	0,56	0,42	0,9	0,72	0,42	0,9	0,72	0,53
6	0,7	0,56	0,41	0,7	0,56	0,43	1,0	0,80	0,53
7	0,7	0,56	0,42	0,9	0,72	0,44	0,9	0,72	0,53
8	0,7	0,56	0,44	0,7	0,56	0,44	0,9	0,72	0,51
9	0,7	0,56	0,43	0,9	0,72	0,44	0,9	0,72	0,52
10	0,7	0,56	0,43	0,7	0,56	0,44	0,9	0,72	0,51
11	0,7	0,56	0,43	0,7	0,56	0,45	0,9	0,72	0,53
12	0,7	0,56	0,39	0,7	0,56	0,44	0,9	0,72	0,53
13	0,7	0,56	0,44	0,7	0,56	0,46	0,9	0,72	0,53
14	0,7	0,56	0,42	0,5	0,40	0,45	0,9	0,72	0,53
15	0,7	0,56	0,44	0,5	0,40	0,46	0,9	0,72	0,52
16	0,7	0,56	0,44	0,5	0,40	0,46	0,9	0,72	0,52
18	0,7	0,56	0,43	0,5	0,40	0,45	0,7	0,56	0,51
20	0,5	0,40	0,44	0,5	0,40	0,46	0,5	0,40	0,50
25	0,5	0,40	0,42	0,5	0,40	0,44	0,5	0,40	0,46
30	0,5	0,40	0,40	0,5	0,40	0,42	0,5	0,40	0,39
35	0,5	0,40	0,37	0,5	0,40	0,39	0,5	0,40	0,35
40	0,5	0,40	0,28	0,5	0,40	0,34	0,5	0,40	0,34
45	0,5	0,40	0,27	0,5	0,40	0,30	0,5	0,40	0,29
50	0,5	0,40	0,27	0,5	0,40	0,27	0,5	0,40	0,27