

Marta Macher

Marek Kałuski

MODELOWANIE NUMERYCZNE ROZKŁADU POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO WOKÓŁ OBIEKTÓW NADAWCZYCH W ŚWIELE AKTUALNYCH PRZEPISÓW OCHRONY ŚRODOWISKA*

NUMERICAL MODELING OF EMF DISTRIBUTION AROUND TRANSMITTERS IN VIEW
OF THE LATEST ENVIRONMENTAL PROTECTION REGULATIONS

Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej, Instytut Łączności, Państwowy Instytut Badawczy, Wrocław

STRESZCZENIE

Prezentowane oprogramowanie, oparte na metodzie superpozycji, służy do obliczania rozkładu pola elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości 30 MHz–4 GHz, dla ustalonego zbioru punktów obserwacji, usytuowanych w sąsiedztwie układów antenowych/anten oraz do wizualizacji wyników obliczeń zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami środowiskowymi i przepisami BHP. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę pola elektromagnetycznego wokół obiektów nadawczych, założenia i metodyki stosowane przy modelowaniu rozkładu pola elektromagnetycznego, zwłaszcza metodą superpozycji, aktualne wymagania polskich przepisów ochrony środowiska w zakresie ochrony ludzi przed elektromagnetycznym, promieniowaniem niejonizującym oraz przykład obliczania rozkładu pola wokół stacji nadawczej o założonych parametrach. Med. Pr., 2007;58(1):49–56

Słowa kluczowe: ochrona środowiska, promieniowanie niejonizujące, pole bliskie, techniki modelowania numerycznego anten, narażenia elektromagnetyczne, normalizacja

ABSTRACT

The presented software, based on the superposition method, is used to calculate the distribution of electromagnetic field (EMF) within the frequency range of 30 MHz–4GHz for a fixed set of observation points located in the neighborhood of antenna systems and to visualize the results of calculations according to regulations on the environmental protection and occupational health and safety currently binding in Poland. A brief characteristic of the electromagnetic field around transmitters, objectives and methods used in EMF distribution modeling, especially with use of the superposition method are presented. Requirements to meet current Polish regulations on the environmental protection in terms of the human protection against nonionizing electromagnetic radiation as well as examples of calculations of EMF distribution around the transmitter with defined parameters are also discussed. Med Pr 2007;58(1):49–56

Key words: environmental protection, ionizing radiation, near field, techniques of numerical modeling of antennas, electromagnetic exposure, standardization

Adres autorów: Swojczycka 38,51-501 Wrocław, e-mail: m.macher@il.wroc.pl

Nadesłano: 1.12.2006

Zatwierdzono: 14.01.2007

WSTĘP

Obliczenia rozkładu pól elektromagnetycznych wokół obiektów nadawczych są w wielu przypadkach jedyną formą jego oszacowania. Dotyczy to w szczególności obiektów projektowanych, rozbudowywanych, ale obliczenia są także pomocne i często wręcz nieodzowne przy wykonywaniu pomiarów pól wokół obiektów istniejących. Wynika to z faktu, że w obszarze bliskim źródła (anteny) pole elektromagnetyczne ma strukturę bardzo złożoną, m.in. ze względu na to, że pola elektryczne i magnetyczne nie są monotonicznie malejące, jak to ma miejsce w obszarze dalekim. Rozkład pola elektroma-

gnetycznego (PEM) w obszarze bliskim charakteryzuje się występowaniem licznych enklaw i maksimum lokalnych, w których natężenia pól mają wartości wyższe aniżeli w obszarach sąsiednich lub bliższych anteny. Te enklawy np. w przypadku obiektu długofalowego mogą wystąpić kilkaset metrów od anteny, podczas gdy bliżej anteny pomiary mogą wykazywać wartości natężenia pola mniejsze od dopuszczalnych.

Niekwestionowane pierwszeństwo w prognozowaniu narażeń elektromagnetycznych ma zatem dozymetria numeryczna, to znaczy technika oparta na modelowaniu numerycznym (symulacji komputerowej) zjawisk promieniowania. Jak wspomniano wcześniej stosuje się ją najczęściej w celu określenia rozkładu pola elektromagnetycznego w bliskim sąsiedztwie źródeł pól.

* Praca wygłoszona podczas Warsztatów IMP 2006 – Ochrona przed PEM „Raporty o oddziaływaniu na środowisko planowanych instalacji wytwarzających pola elektromagnetyczne oraz sprawozdania z badań i pomiarów – podstawy i praktyka”, Łódź, 17–19 października 2006 r.

Profesjonalnie wykonane pomiary w otoczeniu istniejącego obiektu nadawczego lepiej oddają rzeczywistość elektromagnetyczną wokół niego, ponieważ pomiary wykonywane są w warunkach rzeczywistych pracy źródeł (stacji nadawczych), uwzględniają wpływ źródeł wtórnych, a w obliczeniach czynione są założenia, w których przyjmowane są najczęściej wartości maksymalne parametrów (maksymalne zyski, maksymalne dopuszczalne moce, maksymalne pochylenia anten, itp.). Obliczenia teoretyczne w zależności od metody mniej lub bardziej odwzorowują rozkład pola elektromagnetycznego w otoczeniu stacji nadawczej.

Polskie przepisy (1) zobowiązują inwestorów, operatorów i użytkowników źródeł pól elektromagnetycznych do przedstawiania raportów dotyczących zasięgów występowania obszarów o wartościach natężenia pola/gęstości mocy większych od dopuszczalnych w otoczeniu stacji nadawczych.

WYMAGANIA OBOWIĄZUJĄCYCH PRZEPISÓW

Z art. 135 ust. 1 ustawy Prawo ochrony środowiska (1) wynika, że jeżeli z postępowania w sprawie oceny oddziaływania na środowisko, z analizy porealizacyjnej albo z przeglądu ekologicznego wynika, że mimo zastosowania dostępnych rozwiązań technicznych, technologicznych i organizacyjnych nie mogą być dotrzymane standardy jakości środowiska poza terenem zakładu lub innego obiektu, to m.in. dla instalacji radiokomunikacyjnej tworzy się obszar ograniczonego użytkowania.

Dopuszczalne poziomy pole elektro-magnetycznych w środowisku określa rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. (2). Poniżej przytaczamy pełny tekst tabeli 2 wg załącznika nr 1 wymienionego w rozporządzeniu:

Miejscami niedostępnymi dla ludzi, w rozumieniu rozporządzenia, są te do których nie można dojść, h nie ma do nich dostępu lub on jest utrudniony, niemożliwy lub zabroniony. Miejscem niedostępnym może być wolna przestrzeń nad terenem otaczającym wieżę antenową, komin, itp.

Zasięg występowania promieniowania o wartościach dopuszczalnych, dla zakresu częstotliwości 0–300 000 MHz wyznacza się korzystając ze wzoru:

$$W = \left(\frac{H}{H_g} \right)^2 + \left(\frac{E}{E_g} \right)^2 + \frac{S}{S_g}$$

gdzie:

W – wartość wskaźnikowa zasięgu występowania pól elektromagnetycznych o wartościach wyższych od dopuszczalnych,

Tabela 2. Zakres częstotliwości pól elektromagnetycznych, dla których określa się parametry fizyczne charakteryzujące oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko, dla miejsc dostępnych dla ludności oraz dopuszczalne poziomy pole elektromagnetyczne, charakteryzowane przez dopuszczalne wartości parametrów fizycznych dla miejsc dostępnych dla ludności

	Parametr fizyczny Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego	Składowa elektryczna	Składowa magnetyczna	Gęstość mocy
	1	2	3	4
1	0 Hz	10 kV/m	2500 A/m	–
2	0 Hz–0,5 Hz	–	2500 A/m	–
3	0.5 Hz–50 Hz	10 kV/m	60 A/m	–
4	0.05 kHz–1 kHz	–	3/f A/m	–
5	1 kHz–3 MHz	20 V/m	3 A/m	–
6	3 MHz–300 MHz	7 V/m	–	–
7	300 MHz–300 GHz	7 V/m	–	0,1 W/m ²

Podane w kolumnach 2 i 3 wartości graniczne parametrów fizycznych charakteryzujących oddziaływanie pól elektromagnetycznych odpowiadają:

- wartościom skutecznym natężeń pól elektrycznych i magnetycznych o częstotliwości do 3 MHz, podanym z dokładnością do jednego miejsca znaczącego,
 - wartościom skutecznym natężeń pól elektrycznych i magnetycznych o częstotliwości od 3 MHz do 300 MHz, podanym z dokładnością do jednego miejsca znaczącego,
 - wartości średniej gęstości mocy dla pól elektromagnetycznych o częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz lub wartościom skutecznym dla pól elektrycznych o częstotliwościach z tego zakresu częstotliwości, podanej z dokładnością do jednego miejsca znaczącego po przecinku.
- f – częstotliwość w jednostkach podanych w kolumnie 1;
50 Hz – częstotliwość sieci elektroenergetycznej.

H, E, S – zmierzone lub wyznaczone wartości wypadkowe, odpowiednio natężeń pól magnetycznych, elektrycznych oraz gęstości mocy w poszczególnych zakresach częstotliwości, podanych w kolumnie 1 tabeli 1 i kolumnie 1 tabeli 2 załącznika nr 1 do rozporządzenia (2),

H_g , E_g , S_g – dopuszczalne poziomy, odpowiednio natężeń pól magnetycznych, pól elektrycznych oraz gęstości mocy pola w poszczególnych zakresach częstotliwości, podanych w kolumnach 2, 3 i 4 tabeli 1 i tabeli 2 załącznika nr 1 do rozporządzenia (2).

Odległość od wytwarzającej pola elektromagnetyczne instalacji, dla której wartość $W = 1$ określa granicę występowania pola elektromagnetycznego o wartości dopuszczalnej. Odległości, dla których $W < 1$, określają obszar, na którym nie występują pola elektromagnetyczne o poziomach wyższych od dopuszczalnych.

Zasady ochrony osób przebywających w polach elektromagnetycznych o częstotliwościach pracy wystę-

pujących na terenie stacji nadawczych, regulują odrębne przepisy (3).

METODY MODELOWANIA ROZKŁADU POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Dokumenty europejskie i międzynarodowe rekomendują kilka zaawansowanych technik „rygorystycznego” modelowania numerycznego, jako skuteczne narzędzia prognozowania narażeń elektromagnetycznych w ogóle i narażeń powodowanych przez urządzenia telefonii komórkowej w szczególności.

Najważniejsze z nich to:

1. Metoda momentów (MOM).
2. Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD).
3. Metoda superpozycji.

Dwie z tych technik, znane pod skrótami MOM i FDTD, mają wyjątkowo mocno ugruntowaną pozycję i są szczególnie chętnie stosowane.

METODA MOMENTÓW

Metoda ta polega – bardzo ogólnie rzecz ujmując – na rozwiązaniu tzw. metodą momentów (MOM – Method of Moments) równań różniczkowo-całkowych, stanowiących model matematyczny badanego układu (anten lub układu anten stacji bazowej albo całego terminala ruchomego). Technikę tę często łączy się z koncepcją tzw. modelowania siatkowego (wire-grid modeling).

Współcześnie stosowana numeryczna analiza własności impedancyjnych i polowych anten i systemów antenowych jest oparta właśnie na metodzie momentów, stworzonej i rozwiniętej przez Harringtona (4). Ponieważ szczegółowa prezentacja tej metody zajęłaby zbyt wiele miejsca, ograniczymy się do poglądowego, skrótego przedstawienia jej zasadniczych elementów.

W metodzie momentów przyjmuje się następujące założenia:

- sieć tworząca antenę (system antenowy) składa się z przewodników prostoliniowych, doskonale przewodzących lub o znanej stratności. Jeżeli przewodnik nie jest prostoliniowy, to zastępuje się go układem złożonym z kilku prostoliniowych przewodników (wielokątem) o końcach wzajemnie z sobą połączonych;
- długości przewodników są wielokrotnie mniejsze niż długość fali λ . Jeżeli ten warunek nie jest spełniony, to przewodniki dzieli się na taką ilość segmentów (o końcach wzajemnie nakładających się na siebie), przy której warunek jest spełniony. To oznacza, że rozpatrywana sieć przewodników jest traktowana jako N

elementowy zbiór segmentów (odcinków), o długościach wielokrotnie mniejszych od długości fali λ ;

- stosunek długości każdego przewodnika l do jego średnicy d jest co najmniej kilka razy większy od jedności, $l/d \gg 1$;

■ ustalony jest (dowolny) układ odniesienia Oxyz. W tym układzie są określone współrzędne początku i współrzędne końca każdego segmentu, wchodzącego w skład sieci. To z kolei oznacza, że segmenty są traktowane jako elementy o charakterze wektorowym;

- zadany jest zbiór określający miejsca zasilania sieci i wielkości napięć w tych miejscach;

■ zadany jest zbiór opisujący miejsca wtrąconych, skupionych obciążeń sieci (rezystancji i reaktancji) i wartości zespolonych obciążeń w tych miejscach.

Dla tak skonfigurowanej sieci, na podstawie ścisłych równań elektrodynamiki, odpowiednio przekształconych na układy równań algebraicznych, wyznacza się:

- rozkład prądów w sieci:

$$I_m = \text{Real}(I_m) + j \text{Imag}(I_m) = |I_m| e^{j \mu m}, m = 1, 2, \dots, N,$$

- wartości impedancji wejściowych, w miejscach zasilania sieci $W_{l_z}(x_{l_z}, y_{l_z}, z_{l_z})$:

$$Z_{l_z} = R_{l_z} + j X_{l_z}, l = 1, 2, \dots, L,$$

gdzie:

I_m – zespolona wartość prądu,

$W_{l_z}(x_{l_z}, y_{l_z}, z_{l_z})$ – zbiór określający miejsca zasilania sieci,

Z_{l_z} – wartości impedancji wejściowych w miejscach zasilania (miejscach wtrąconych, skupionych obciążeń sieci, czyli rezystancji i reaktancji oraz wartości zespolonych obciążeń w tych miejscach).

Należy zwrócić uwagę na to, że jeżeli zbiór opisujący konfigurację sieci został zbudowany i dla niego został wyznaczony rozkład prądów, to w obliczeniach związanych z rozkładem PEM w otoczeniu sieci musi być stosowany ten układ odniesienia Oxyz, który był przyjęty w toku obliczania rozkładu prądów.

Metoda różnic skończonych w domenie czasu (FDTD)

Istota tej metody, tzn. FDTD (Finite Difference Time Domain), sprowadza się do zbudowania dyskretnego modelu analizowanego obiektu (obiektów) i rozwiązania metodą różnic skończonych równań Maxwella, opisujących model w dziedzinie czasu. Dyskretny model obiektu tworzą małe elementy objętościowe zwane voxelami, przy czym jednorodnemu obszarowi każdego z nich przypisuje się parametry elektryczne medium, które dany voxel reprezentuje. Technika FDTD jest od kilku lat stosowana z dobrym skutkiem do prognozo-

wania i oceny narażeń elektromagnetycznych, np. w telefonii komórkowej.

W kraju wiele placówek badawczych posiada oprogramowanie własne lub zakupione do modelowania rozkładu PEM tą metodą.

Metoda superpozycji

Rozwiązanie problemów praktycznych, w przypadku, gdy układy antenowe mają niepowtarzalne geometrie, wymagają zastosowania procedur obliczeń numerycznych i wykorzystania stosownych programów na odpowiednio dużych i szybkich komputerach.

Założenia tej metody, będące podstawą budowy algorytmów narzędzia numerycznego, przedstawionych w następnym rozdziale, są oparte na teorii elektromagnetyzmu.

A. Zakłada się, że każdy punkt obserwacji znajduje się:

- w obszarze dalekim względem każdej jednostki antenowej wchodzącej w skład układu antenowego,
- w obszarze bliskim względem układu antenowego jako całości.

B. Zakłada się, że ziemia w otoczeniu układu antenowego jest płaska i jednorodna elektrycznie, i że znane są jej parametry elektryczne: względna przenikalność elektryczna ϵ_r i konduktywność σ .

C. Układ antenowy składa się z jednakowych jednostek antenowych.

D. Każda jednostka antenowa Q_{ij} , wchodząca w skład układu antenowego jest zastąpiona przez fikcyjny dipol D_{rij} , którego:

- środek Q_{rij} pokrywa się ze środkiem symetrii jednostki antenowej Q_{ij} ,
- wektor równoległy do jego osi V_{rij} , jest równy wektorowi V_{ij} przypisanemu jednostce antenowej,
- zysk energetyczny względem dipola półfalowego G_r jest równy zyskowi energetycznemu jednostki antenowej G_p ,
- zespolone charakterystyki promieniowania dipola $F_{rh}(x)$ i $F_{rv}(x)$ są odpowiednio równe charakterystykom jednostki antenowej $F_h(x)$ i $F_v(x)$.

MODELE NUMERYCZNE UKŁADÓW ANTENOWYCH

W celach obliczeniowych budowane są dwa modele numeryczne dotyczące parametrów układu antenowego:

- model geometrii,
 - model parametrów funkcjonalnych,
- a także

- numeryczna baza danych opisująca własności kierunkowe anten i jednostek antenowych wchodzących w skład układów antenowych,

- model zbiorów punktów obserwacji.

Model geometrii budowany jest na podstawie przyjętego dowolnie układu odniesienia $Oxyz$, w którym początek O znajduje się na powierzchni płaskiej ziemi.

Przy budowie modeli stosuje się numerację pięter i numerację jednostek antenowych w piętrach. Zarówno jednostka antenowa, jak i środek symetrii jej ekranu oznaczony symbolem Q_{ij} , gdzie i oraz j oznaczają odpowiednio numer piętra i numer jednostki antenowej w piętrze.

Model geometrii układu antenowego, w układzie odniesienia $Oxyz$ zawiera następujące dane:

- przestrzenne rozmieszczenie środków symetrii ekranów $Q_{ij}(x,y,z)$;
- jednostkowe wektory prostopadłe do płaszczyzn ekranów \bar{N}_{ij} ;
- jednostkowe wektory równoległe do osi dipoli w panelach \bar{V}_{ij} .

Model parametrów funkcjonalnych opisuje następujące dane:

- częstotliwości robocze układu $FREQ1, FREQ2, \dots$;
- wartości mocy P_{ij} , odprowadzających do paneli Q_{ij} ;
- wartości kątów fazowych napięć PH_{ij} , zasilających panele Q_{ij} .

Baza danych, opisująca własności kierunkowe jednostek antenowych, tworzona jest dla dyskretnych częstotliwości f_1, f_2, \dots, f_N ich pasma roboczego. Zawiera ona, dla każdej częstotliwości f_i , następujące parametry:

- zysk energetyczny względem dipola półfalowego G_p ,
- zespolone charakterystyki promieniowania w obu głównych płaszczyznach odniesienia (horyzontalnej (h) i wertykalnej (v)):

$$F_h(x) = a_h(x) \exp[jb_h(x)]$$

$$F_v(x) = a_v(x) \exp[jb_v(x)]$$

Funkcje $a_h(x)$ i $a_v(x)$ oznaczają charakterystyki amplitudowe, a funkcje $b_h(x)$ i $b_v(x)$ charakterystyki fazowe. Są one wyznaczone na podstawie wyników obliczeń numerycznych opartych na metodzie momentów, przy wykorzystaniu szczegółowej dokumentacji konstrukcyjnej jednostki antenowej.

Każda z tych czterech funkcji jest zapisana w zbiorze bazy w postaci czterech zbiorów współczynników wielomianów trygonometrycznych o postaci:

$$\{a_0, a_1, \dots, a_{12}; b_1, b_2, \dots, b_{12}\} \quad [1]$$

Podczas obliczania rozkładu PEM, funkcje $q(x)$, odpowiadającą $a_h(x)$, $b_h(x)$, $a_v(x)$ i $b_v(x)$, tworzy się na podstawie wzoru:

$$q(x) = \sum_{k=0}^{12} a_i \cos(kx) + \sum_{k=1}^{12} b_i \sin(kx) \quad [2]$$

Na ogół częstotliwości robocze układu antenowego $f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_{sm}$ nie są równe częstotliwościom f_1, f_2, \dots, f_N , dla których w bazie danych są opisane charakterystyki $F_h(x)$ i $F_v(x)$. W takich przypadkach, dla częstotliwości f_{sk} , charakterystyki $F_h(x)$ i $F_v(x)$ wyznacza się na drodze interpolacji liniowej.

Model zbiorów punktów obserwacji umożliwia obliczenia dla następujących wariantów:

- punkty położone na łuku okręgu;
- punkty położone na odcinku dowolnej prostej;
- punkty usytuowane na siatce prostopadłościennych;
- punkty, których lokalizacja jest określona dowolnie (dyskretny rozkład punktów obserwacji).

METODYKA OBLICZANIA SKŁADOWYCH POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Do prezentacji techniki obliczania rozkładu PEM w otoczeniu układu antenowego, przedstawiono podstawowe elementy, na których ta technika jest oparta.

Zdefiniowano:

- punkty, płaszczyzny, wektory;
- wektory pola elektromagnetycznego skojarzone z falą bezpośrednią i z falą odbitą od ziemi;
- wypadkowe pole elektromagnetyczne nad ziemią o skończonej konduktywności dla pojedynczej jednostki antenowej;
- wypadkowe pole elektromagnetyczne dla układu antenowego.

Punkty, płaszczyzny, wektory

Niech w układzie odniesienia $Oxyz$:

- $Q_{ij}(X_q, Y_q, Z_q)$ oznacza położenie środka dipola Q_{rij} ;
- $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ oznacza położenie punktu obserwacji, w którym wyznaczamy wartość natężenia PEM;
- $Q_{ij\theta}(X_q, Y_q, 0)$ i $P_{0\theta}(X_0, Y_0, 0)$ oznaczają rzuty odpowiednio punktów Q_{ij} i P_0 na płaszczyznę Oxy ;
- $Q_{ijm}(X_q, Y_q, -Z_q)$ i $P_{0m}(X_0, Y_0, -Z_0)$ oznaczają punkty symetryczne odpowiednio do punktów Q_{ij} i P_0 względem płaszczyzny Oxy ;
- Π_H i Π_V oznaczają płaszczyzny przechodzące przez punkt Q_{ij} , odpowiednio horyzontalną i wertykalną, prostopadłą do wektora \overline{V}_{ij} ;

- Π_p oznacza płaszczyznę propagacji, tj. płaszczyznę wertykalną przechodzącą przez punkty Q_{ij} i P_0 ;

- Π_R oznacza płaszczyznę przechodzącą przez punkty Q_{ij} i P_0 , równoległą do wektora \overline{V}_{ij} ;

- Π_0 oznacza płaszczyznę wertykalną przechodzącą przez oś Oz i punkt P_0 ;

- Φ oznacza kąt między osią Ox i płaszczyzną Π_0 , odkładany w kierunku przeciwnym do obrotu wskazówek zegara;

- $\xi \{\cos\Phi, \sin\Phi, 0\}$, $\eta \{-\sin\Phi, \cos\Phi, 0\}$, $\zeta \{0, 0, 1\}$ oznaczają wektory jednostkowe, odpowiednio równoległe do płaszczyzn Π_0 i Oxy , prostopadłe do płaszczyzny Π_0 i równoległe do osi Oz . Układ $P_0\xi\eta\zeta$, związany z punktem obserwacji P_0 , jest układem trzech wzajemnie prostopadłych wektorów ξ , η i ζ , pomocny przy obliczaniu natężenia pola w punkcie P_0 dla całego układu antenowego;

- φ_d i Θ_d oznaczają kąty między odpowiednio płaszczyznami Π_V , Π_p i Π_H , Π_R , przy czym kąt φ_d jest odkładany tak samo, jak kąt Φ ;

- wielkości R_d i R_r oznaczają odpowiednio wektory $\overline{Q}_{ij}P_0$ i $\overline{Q}_{ijm}P_0$ a symbole R_d i R_r odpowiednio moduły tych wektorów;

- Θ_r oznaczają kąt między wektorem $\overline{Q}_{ij}P_{0m}$ i kierunkiem przeciwnym do kierunku osi Oz ;

- $\alpha \{\cos\varphi_d, \sin\varphi_d, 0\}$ i $\gamma \{-\sin\varphi_d, \cos\varphi_d, 0\}$ oznaczają wektory jednostkowe, odpowiednio równoległe i prostopadłe do płaszczyzny propagacji Π_p . Układ $P_0\alpha\gamma\zeta$, związany z punktem P_0 , jest układem trzech wzajemnie prostopadłych wektorów α , γ , ζ , potrzebnym do wyznaczenia natężenia pola w punkcie P_0 dla fali bezpośredniej i fali odbitej od ziemi;

- $\beta = 2\pi/\lambda$, gdzie λ oznacza długość fali w wolnej przestrzeni;

- symbole $[\overline{ab}]$ i (\overline{ab}) oznaczają odpowiednio iloczyn wektorowy i iloczyn skalarny wektorów \overline{a} i \overline{b} .

Sformalizowany opis wektorów pola elektromagnetycznego skojarzonych z falą bezpośrednią i z falą odbitą od ziemi

Niech \overline{e}_{dij} i \overline{e}_{rij} oznaczają jednostkowe wektory równoległe do wektorów elektrycznych pola elektromagnetycznego \overline{E}_{dij} i \overline{E}_{rij} , generowanego przez dipol D_{rij} w punkcie obserwacji P_0 , skojarzonych odpowiednio z falą bezpośrednią (d) i z falą odbitą od ziemi (r).

Biorąc po uwagę definicje wektorów \overline{V}_{ij} , \overline{R}_d i \overline{R}_r można pokazać, że wektory

$$\begin{aligned} \overline{W}_{dij} &= [[\overline{V}_{ij} \overline{R}_d] \overline{R}_d], \\ \overline{W}_{rij} &= -[[\overline{V}_{ij} \overline{R}_r] \overline{R}_r] \end{aligned} \quad [3,4]$$

są zgodnie równoległe do wektorów \bar{e}_{dij} i \bar{e}_{rij} .
Stąd otrzymujemy:

$$\begin{aligned}\bar{e}_{dij} &= \overline{W}_{dij} / |\overline{W}_{dij}|, \\ \bar{e}_{rij} &= \overline{W}_{rij} / |\overline{W}_{rij}|\end{aligned}\quad [5,6]$$

Definiujemy z kolei zespolone współczynniki propagacyjne K_{dij} i K_{rij} , jako funkcje zysku G_p , mocy doprowadzonej do dipola P_{ij} , kąta fazowego napięcia pobudzenia dipola PH_{ij} oraz odległości R_d i R_r (5,6)

$$K_{dij} = 7.014(G_p P_{ij})^{1/2} \exp[j(PH_{ij} - \beta R_d)] / R_d \quad [7]$$

$$K_{rij} = 7.014(G_p P_{ij})^{1/2} \exp[j(PH_{ij} - \beta R_r)] / R_r \quad [8]$$

Przestrzenne właściwości kierunkowe dipola D_{rij} uwzględniamy poprzez zastosowanie zespolonych funkcji $F_d(\varphi_d, \Theta_d)$ i $F_r(\varphi_r, \Theta_r)$, będących kombinacjami liniowych charakterystyk $F_h(\varphi_d)$, $F_v(\Theta_r)$ i $F_v(\Theta_r)$ dipola D_{rij} , określonymi następująco:

$$F_d(\varphi_d, \Theta_d) = C_{1d}(\varphi_d, \Theta_d)F_h(\varphi_d) + C_{2d}(\varphi_d, \Theta_d)F_v(\Theta_d) \quad [9]$$

$$F_r(\varphi_r, \Theta_r) = C_{1r}(\varphi_r, \Theta_r)F_h(\varphi_r) + C_{2r}(\varphi_r, \Theta_r)F_v(\Theta_r) \quad [10]$$

Obie funkcje są interpolacjami liniowymi, budowanymi w taki sposób, że

$$F_d(\varphi_d, \pi/2) = F_h(\varphi_d), \quad F_r(\varphi_r, \pi/2) = F_h(\varphi_r),$$

$$F_d(0, \Theta_d) = F_v(\Theta_d)_{\varphi=0}, \quad F_r(0, \Theta_r) = F_v(\Theta_r)_{\varphi=0},$$

$$F_d(\pi, \Theta_d) = F_v(\Theta_d)_{\varphi=\pi}, \quad F_r(\pi, \Theta_r) = F_v(\Theta_r)_{\varphi=\pi}$$

Ostatecznie, dla wektorów pola elektrycznego \bar{E}_{dij} i \bar{E}_{rij} w punkcie P_0 , bez uwzględnienia wpływu ziemi, otrzymujemy wyrażenia

$$\bar{E}_{dij} = \bar{e}_{dij} K_{dij} F_d(\varphi_d, \Theta_d) \quad [11]$$

$$\bar{E}_{rij} = \bar{e}_{rij} K_{rij} F_r(\varphi_r, \Theta_r) \quad [12]$$

Wypadkowe pole elektromagnetyczne nad ziemią o skończonej konduktywności dla pojedynczej jednostki antenowej

Wartości współczynników odbicia fali elektromagnetycznej od ziemi są zależne od orientacji wektora elektrycznego, skojarzonego z tą falą, względem płaszczyzny propagacji.

Dla uwzględnienia wpływu ziemi, przedstawimy wektory \bar{E}_{dij} i \bar{E}_{rij} [11,12] w prostokątnym (ruchomym) układzie odniesienia $P_0\alpha\gamma\zeta$

$$\bar{E}_{dij} = E_{d\alpha}\bar{\alpha} + E_{d\gamma}\bar{\gamma} + E_{d\zeta}\bar{\zeta} \quad [13]$$

$$\bar{E}_{rij} = E_{r\alpha}\bar{\alpha} + E_{r\gamma}\bar{\gamma} + E_{r\zeta}\bar{\zeta}, \quad [14]$$

gdzie:

współczynniki ze wskaźnikami α , γ i ζ są odpowiednio iloczynami skalarnymi wektorów [11] i [12] przez jednostkowe wektory $\bar{\alpha}$, $\bar{\gamma}$ i $\bar{\zeta}$ (dla uproszczenia zapisu w [13] i [14] opuszczono wskaźniki i oraz j).

Składowe $E_{r\alpha}$ i $E_{r\zeta}$ leżą w płaszczyźnie propagacji Π_p , zaś składowa $E_{r\gamma}$ jest prostopadła do Π_p .

Wypadkowy wektor pola \bar{E}_{lij} w punkcie P_0 , przy uwzględnieniu wpływu ziemi, otrzymujemy na podstawie wzoru:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{lij} &= [E_{d\alpha} + C_\alpha E_{r\alpha}] \bar{\alpha} + [E_{d\gamma} + \\ &+ C_\gamma E_{r\gamma}] \bar{\gamma} + [E_{d\zeta} + C_\alpha E_{r\zeta}] \bar{\zeta}\end{aligned}\quad [15]$$

gdzie:

$C_\alpha = C_\alpha(\Theta_r, \varepsilon, \sigma, f_s)$, $C_\gamma = C_\gamma(\Theta_r, \varepsilon, \sigma, f_s)$ – są zespolonymi współczynnikami odbicia fali od ziemi, odpowiednio dla składowych leżących w płaszczyźnie Π_p i dla składowej prostopadłej do Π_p :

Q_r – kąt padania fali na płaską ziemię,

ε i σ – parametry elektryczne ziemi,

f_s – częstotliwość robocza układu antenowego.

Należy zwrócić uwagę na to, że formuła [15] została zbudowana wyłącznie w celu uwzględnienia wpływu ziemi na wartość wypadkową wektora [15]. Układ współrzędnych $P_0\alpha\gamma\zeta$ zmienia się przy zmianie położenia jednostki antenowej Q_{ij} . Nie można, zatem wprost sumować wektorów o postaci [15] przy zmianie jednostki antenowej w piętrze lub zmianie piętra.

Wypadkowe pole elektromagnetyczne dla układu antenowego

W celu określenia wypadkowego pola dla układu antenowego, konieczne jest dokonanie transformacji wektora [15] do prostokątnego układu współrzędnych $P_0\xi\eta\zeta$. W tym układzie wektor [15] przyjmuje postać:

$$\bar{E}_{2ij} = E_{\xi ij}\bar{\xi} + E_{\eta ij}\bar{\eta} + E_{\zeta ij}\bar{\zeta} \quad [16]$$

gdzie

współczynniki przy $\bar{\xi}$, $\bar{\eta}$ i $\bar{\zeta}$ są iloczynami skalarnymi wektora [15] przez $\bar{\xi}$, $\bar{\eta}$ i $\bar{\zeta}$

$$E_{lij} = (\bar{E}_{lij}\bar{\xi}), \quad E_{ij} = (\bar{E}_{lij}\bar{\eta}), \quad [17]$$

$$E_{ij} = (\bar{E}_{lij}\bar{\zeta})$$

Wypadkowy wektor pola dla układu \bar{E}_s w punkcie P_0 otrzymujemy drogą sumowania składowych postaci [17] po wszystkich jednostkach antenowych układu antenowego:

$$\vec{E}_s(P_0) = E_{s\xi} \vec{\xi} + E_{s\eta} \vec{\eta} + E_{s\zeta} \vec{\zeta} \quad [18]$$

gdzie:

$$E_{s\xi} = \sum_i \sum_j E_{\xi ij}, \quad E_{s\eta} = \sum_i \sum_j E_{\eta ij}, \quad E_{s\zeta} = \sum_i \sum_j E_{\zeta ij} \quad [19]$$

Ponieważ składowe $E_{s\xi}$, $E_{s\eta}$ i $E_{s\zeta}$ są liczbami zespolonymi, wektor $\vec{E}_s(P_0)$ jest spolaryzowany elipsoidalnie. Istotna jest wartość modułu wektora $\vec{E}_s(P_0)$, którą można znaleźć metodą konwencjonalną.

OBLICZANIE ROZKŁADU POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W OTOCZENIU OBIEKTU NADAWCZEGO ZGODNIE Z OBOWIĄZUJĄCYMI PRZEPISAMI

Struktura pola elektromagnetycznego w otoczeniu obiektu nadawczego

Obiekt nadawczy zawiera na ogół kilka układów antenowych A_1, A_2, \dots, A_L , a wśród nich do najważniejszych należą:

- radiofoniczne układy antenowe UKF-FM,
- telewizyjne układy antenowe I, II, III, IV i V pasma,
- stacje bazowe radiokomunikacji ruchomej, przystosowane do rozsiewania programów radiowych i telewizyjnych, a także do zapewnienia łączności w systemach radiokomunikacji ruchomej.

Poszczególne układy antenowe/anten pracują zwykle na różnych częstotliwościach:

$$\begin{aligned} & (f_{11}, f_{21}, \dots), (f_{12}, f_{22}, \dots), \dots \\ & (f_{1L}, f_{2L}, \dots) \end{aligned} \quad [20]$$

■ PEM w otoczeniu obiektu ma skomplikowany charakter: jest złożeniem pól elektromagnetycznych o różnych częstotliwościach i różnych intensywnościach.

Z punktu widzenia ochrony zdrowia ludzi i środowiska, w ustalonym punkcie obserwacji P_0 , pole można ocenić tylko na podstawie wypadkowej sumy poszczególnych gęstości mocy skojarzonych z układami antenowymi i z częstotliwościami, na których te układy pracują. Wypadkową sumę S_{res} można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} S_{res} = & (S_{11} + S_{21} + \dots) + (S_{12} + S_{22} + \dots) + \\ & + \dots + (S_{1L} + S_{2L} + \dots) \end{aligned} \quad [21]$$

gdzie:

$$S_{res k} = (S_{1k} + S_{2k} + \dots)$$

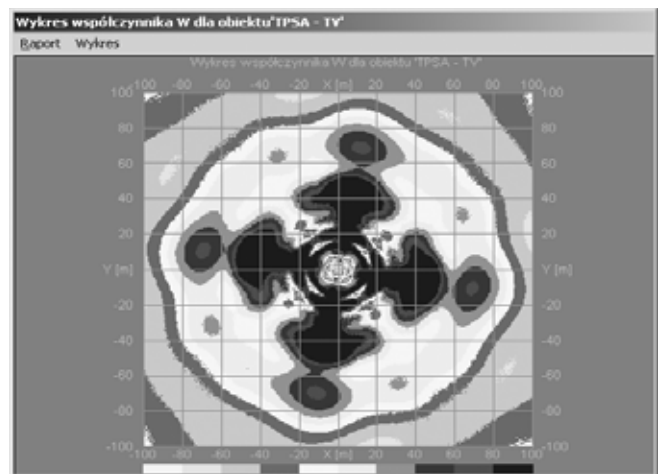
jest sumą gęstości mocy odpowiadającą układowi antenowemu/antenie o numerze k , przy czym poszczególne składniki sumy (22) odpowiadają poszczególnym częstotliwościom pracy tego układu.

Środowisko działania programu – przykład obliczeń

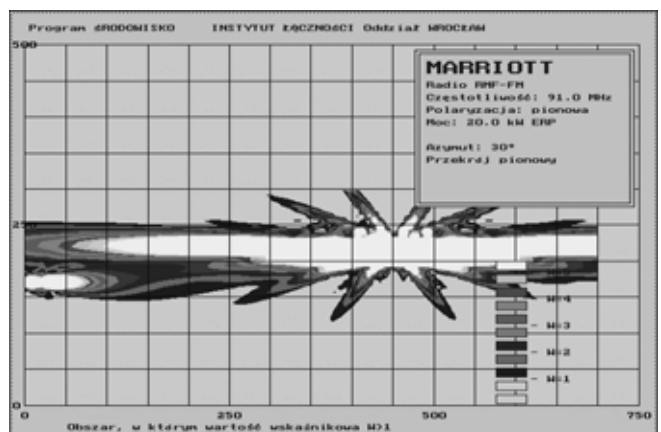
Program został opracowany jako aplikacja 32-bitowa, w pełni wykorzystująca języki programowania wysokiego poziomu.

Aplikacja zarządzająca systemem umożliwia:

- wprowadzanie lub wybór obiektu do obliczeń;
- wprowadzanie lub wybór układów antenowych pracujących w danym obiekcie;
- tworzenie, wybór lub edycja zbiorów z geometrią układu antenowego i parametrami funkcjonalnymi;
- komunikacja z bazą danych zawierającą charakterystyki promieniowania jednostek antenowych;
- tworzenie, wybór i edycja zbiorów z punktami obserwacji (prosta, okrąg, węzły siatki prostopadłościowej);
- wprowadzanie parametrów dodatkowych (częstotliwość, parametry ziemi);
- obliczenia rozkładu natężenia PEM;
- wizualizacja wyników obliczeń.



Ryc. 1. Rzut poziomy obszaru, w którym wartość wskaźnika $W > 1$.



Ryc. 2. Przekrój pionowy obszaru, w którym wartość wskaźnika $W > 1$ na kierunkach maksymalnego promieniowania anten.

Aplikacja zarządzająca systemem jest oparta na oknach dialogowych, z dynamicznie wybieranymi opcjami. Okna dialogowe układów antenowych związanych z wyborem geometrii, parametrów funkcjonalnych, punktów obserwacji i parametrów dodatkowych posiadają swoje własne menu.

Poniżej, na rycinie 1. i 2. przedstawiono przykłady obliczenia wartości wskaźnikowej W (w węzłach siatki prostopadłościowej) dla złożonego obiektu nadawczego w płaszczyźnie poziomej i w przekroju pionowym.

PODSUMOWANIE

Oprogramowanie jest wykorzystywane do:

- graficznej prezentacji wyników obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego, szczególnie pola bliskiego,
- szybkiej i dokładnej interpretacji wyników obliczeń natężenia pola i gęstości mocy w otoczeniu źródeł emisji (anten nadawczych),
- wykonywania opinii w zakresie oddziaływania pola elektromagnetycznego na środowisko (2,3),
- do wykonywania ekspertyz kompatybilnościowych dotyczących niezakłóconej pracy wielu źródeł pracujących blisko siebie.

PIŚMIENNICTWO

1. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. DzU 2001, nr 62, poz. 627
2. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. DzU 2003, nr 192, poz. 1883
3. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2002, nr 217, poz. 1833
4. Harrington R.F.: Matrix methods for field problems. Proc. IEEE, 1996;AP-29:136–149
5. Kałuski M., Stasiński L.: Electromagnetic field estimation in the vicinity of panel antenna system for FM and TV broadcasting. IEEE Trans. Broadcasting, 1995; 41(4):136–142
6. Kałuski M., Macher M., Scharoch P., Stasiński L.: EM field estimation in the vicinity of multiple panel antenna systems for FM and TV broadcasting. Proceedings of the Thirteenth International Wrocław Symposium „Exhibition on Electromagnetic Compatibility”; 25–28 czerwca 1996; Wrocław. Instytut Telekomunikacji, Wrocław 1996, ss.79–84