

Główny Inspektorat Ochrony Środowiska

**Pola elektromagnetyczne w środowisku –  
opis źródeł i wyniki badań**

**Autor: mgr Przemysław Białaszewski**

**Recenzent: mgr inż. Stefan Różycki**

Warszawa, sierpień 2007

## Spis treści

|  |    |
|--|----|
| Wstęp  | 3  |
| 1. Promieniowanie elektromagnetyczne   | 4  |
| 2. Widmo fal elektromagnetycznych  | 9  |
| 3. Regulacje prawne  | 12 |
| 4. Stacje radiowe i telewizyjne  | 20 |
| 5. Telefonii komórkowa   | 26 |
| 6. Radary  | 38 |
| 7. Linie i stacje elektroenergetyczne  | 46 |
| 8. Inne źródła pól elektromagnetycznych  | 50 |
| 9. Wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych w środowisku   | 52 |
| 9.1 Wyniki pomiarów wykonanych przez<br>Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych                           | 52 |
| 9.2 Wyniki pomiarów wykonanych przez Instytut Energetyki   | 57 |
| 9.3 Wyniki pomiarów wykonanych przez<br>Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy | 58 |
| 9.4 Wyniki pomiarów wykonanych przez<br>Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska                    | 61 |
| 9.5 Podsumowanie   | 72 |
| Słownik  | 74 |
| Literatura   | 76 |

## Wstęp

Naturalne pola elektromagnetyczne towarzyszą człowiekowi od zawsze, stanowiąc integralną część środowiska. Odseparowanie człowieka od tych pól może prowadzić do poważnych zaburzeń w funkcjonowaniu jego organizmu. Gwałtowny rozwój cywilizacyjny, szczególnie w XX wieku spowodował powstanie licznych źródeł wytwarzających pola elektromagnetyczne. Obecnie środowisko jest wręcz naszpikowane różnymi urządzeniami wytwarzającymi pola elektromagnetyczne. Na Ziemi jest ogromna ilość stacji radiowych i telewizyjnych, stacji bazowych telefonii komórkowej, łączności satelitarnej, radiolokacyjnych, stacji i linii elektroenergetycznych. Oprócz wyżej wymienionych źródeł promieniowania elektromagnetycznego w bezpośrednim otoczeniu człowieka istnieje cała gama urządzeń emitujących pola elektromagnetyczne w szerokim spektrum częstotliwości. Pomieszczenia mieszkalne, miejsca pracy są wysłane okablowaniem doprowadzającym energię elektryczną i ogromną liczbą urządzeń, od telewizorów, odbiorników radiowych, kuchenek mikrofalowych, monitorów komputerowych, suszarek aż do telefonów komórkowych, czy telefonów przenośnych.

Niniejsza praca jest poświęcona polu elektrycznemu, magnetycznemu i elektromagnetycznemu z zakresu częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Pierwsze dwa rozdziały zostały poświęcone opisowi natury fal elektromagnetycznych. Rozdział 3 porusza kwestię uregulowań prawnych w materii ochrony środowiska przed promieniowaniem elektromagnetycznym, a rozdziały 4, 5, 6 i 7 opisują najważniejsze źródła promieniowania elektromagnetycznego z punktu widzenia ochrony środowiska. Rozdział 8 został poświęcony opisowi pozostałych źródeł pól elektromagnetycznych, a ostatni rozdział przedstawia wyniki badań poziomów pól elektromagnetycznych wykonanych w latach 2001-2003 przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, w roku 2005 przez Instytut Energetyki, w roku 2006 przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy i w latach 2005 - 2006 przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska.

## 1. Promieniowanie elektromagnetyczne

Jeżeli pola elektryczne i magnetyczne zmieniają się w czasie, to następuje zjawisko wzajemnej indukcji tych pól, a obszary wzajemnych indukcji przemieszczają się w przestrzeni tworząc falę elektromagnetyczną [2]. Szkocki fizyk James Clerk Maxwell udowodnił, że elektryczność i magnetyzm są pojęciami nierozdzielnie ze sobą związanymi i są częścią tego samego zjawiska – elektromagnetyzmu. Podstawowymi równaniami opisującymi naturę promieniowania elektromagnetycznego są „równania Maxwella”. Jest to układ czterech równań: prawo Gaussa dla elektryczności (1.1), prawo Gaussa dla magnetyzmu (1.2), prawo Faradaya (1.3) i prawo Ampere’a rozszerzone przez Maxwella (1.4) [18]:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

gdzie:

$\vec{D}$  - indukcja elektryczna  $C/m^2$ ,

$\vec{B}$  - indukcja magnetyczna T,

$\vec{E}$  - natężenie pola elektrycznego V/m,

$\vec{H}$  - natężenie pola magnetycznego A/m,

$\vec{j}$  - gęstość prądu  $A/m^2$ ,

$\rho$  - gęstość ładunku  $C/m^3$ ,

$\nabla$  - operator nabra,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{i}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{i}_z$ ,

$\vec{i}_x, \vec{i}_y, \vec{i}_z$  - są wektorami jednostkowymi (wersorami) kartezjańskiego układu współrzędnych.

Prawo Gaussa dla elektryczności (1.1) mówi, że źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne. Każdy ładunek elektryczny wytwarza w przestrzeni pole elektryczne działające na inny ładunek za pomocą siły Lorentza wyrażoną wzorem:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1.5)$$

gdzie:

$q$  - ładunek C,

$\vec{v}$  - prędkość m/s.

Z prawa Gaussa (1.2) dla magnetyzmu wynika, iż linie sił pola magnetycznego są zamknięte i samo pole magnetyczne jest bezźródłowe (tzn. nie istnieją monopole magnetyczne). Prawo Faradaya (1.3) oznajmia, że zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne, natomiast z prawa Ampera'a (1.4) wynika, że z kolei zmienne w czasie pole elektryczne i przepływające ładunki elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne. Równaniami uzupełniającymi, są tak zwane równania materiałowe, wiążące wzajemnie podstawowe wielkości fizyczne opisujące pole elektromagnetyczne w następujący sposób:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (1.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (1.7)$$

gdzie:

$\epsilon$  - przenikalność elektryczna F/m,

$\mu$  - przenikalność magnetyczna H/m.

Istnienie fali elektromagnetycznej przewidzianej i opisanej przez Maxwella w 1864 roku, została doświadczalnie potwierdzona w 1888 roku przez niemieckiego fizyka Heinricha Rudolfa Hertza.

Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną, tzn. zaburzenia pola są prostopadłe do kierunku propagacji (rozchodzenia się), zaburzenia te mogą rozprzestrzeniać się także w próżni. Prędkość rozchodzenia się promieniowania elektromagnetycznego w powietrzu jest zbliżona do prędkości rozchodzenia się promieniowania w próżni i jest równa  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ , gdzie  $\epsilon_0 \approx 8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$  i  $\mu_0 \approx 12,566370614 \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$  są kolejno przenikalnością elektryczną i magnetyczną próżni. Wektory natężenia pola elektrycznego i magnetycznego drgając z określoną częstotliwością, nadają fali elektromagnetycznej różne właściwości oddziaływania z materią [8]. Długość fali  $\lambda$  zdefiniowana jest jako odległość pomiędzy kolejnymi jej grzbietami i związana z częstotliwością  $f$  oraz prędkością fazową tej fali  $v$ , poniższą zależnością:

$$\lambda = v/f. \quad (1.8)$$

Im fala ma wyższą częstotliwość, tym większą energię ze sobą niesie. Energię kwantu  $E$  promieniowania elektromagnetycznego określa wzór:

$$E = hf, \quad (1.9)$$

gdzie:

$$h = 6,6260755(40) \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad - \quad \text{stała Plancka.}$$

Dla częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz mamy do czynienia z promieniowaniem niosącym ze sobą zbyt małą energię by móc jonizować jakikolwiek ośrodek materialny, dlatego też promieniowanie z tego zakresu częstotliwości określane jest mianem niejonizującego. Stosunek natężenia pola elektrycznego do natężenia pola magnetycznego  $|\vec{E}|/|\vec{H}|$  w polu dalekim jest stały i dla próżni wynosi  $120\pi \Omega$ , nosząc nazwę impedancji falowej próżni. W obszarze bliskim, bezpośrednio otaczającym źródło pola elektromagnetycznego (rzędu jednej długości fali) wektory  $\vec{E}$  i  $\vec{H}$  nie muszą być do siebie prostopadłe. Wielkością charakteryzującą pole elektromagnetyczne jest gęstość mocy  $S$  wyrażana w  $W/m^2$  i określana zależnościami:

$$S = \vec{E}\vec{H}. \quad (1.10)$$

Polem magnetycznym pochodzenia naturalnego występującym na Ziemi i zarazem najlepiej poznanym jest pole geomagnetyczne. Ziemskie pole magnetyczne jest sumą dwóch składowych, pierwszej pochodzącej z jądra Ziemi oraz głębokich warstw skorupy ziemskiej i drugiej powstającej w górnych warstwach skorupy ziemskiej. Na powierzchni Ziemi pole magnetyczne waha się w zakresach od 16 A/m do 56 A/m (natężenie pola magnetycznego dla Polski waha się w granicach od 33 A/m do 38 A/m) [1], i jest największe w okolicach biegunów magnetycznych, z których jeden znajduje się w Ameryce Północnej a drugi na Antarktydzie. Ziemskie pole magnetyczne rozprzestrzenia się daleko poza powierzchnię naszej planety, tworząc osłonę przed wiatrem słonecznym. Przestrzeń oddziaływania ziemskiego pola magnetycznego nazywana jest magnetosferą. Naładowane cząstki tworzące wiatr słoneczny oddziałują z polem magnetycznym. Zgodnie z siłą Lorentza (1.5) ich tor lotu jest zakrzywiany, docierając do górnych warstw atmosfery ziemskiej głównie w okolicach biegunów magnetycznych, wywołując malownicze zjawisko zorzy polarnej. Pole magnetyczne Ziemi nie jest stałe w czasie, w wyniku oddziaływania z wiatrem słonecznym, dochodzi do fluktuacji pola magnetycznego nazywanych mikropulsacjami, o częstotliwości 0,001 Hz. Zgodnie z prawami elektromagnetyzmu zmiennym polom magnetycznym towarzyszą zmienne pola elektryczne, więc mikropulsacjom towarzyszy pole elektryczne o natężeniu ok. 0,3 V/m [1]. Pole geomagnetyczne jest częścią naturalnego środowiska ziemskiego i najprawdopodobniej służy pewnym gatunkom ptaków, bądź ryb np. węgorz europejski, do orientacji w przestrzeni.

Obok naturalnych pól magnetycznych istnieją w środowisku człowieka naturalne pola elektryczne. Ich natężenie waha się w różnych porach roku i dnia, w okresach zimowych zmiany natężenia pola elektrycznego osiągają minimum w okolicach 100-120 V/m, a maksimum dla rocznych zmian wynosi ok. 150-250 V/m. Natężenie pola elektrycznego

przyjmuje większe wartości wieczorem niż rano [1]. Źródłem pola elektrycznego jest ujemnie naładowana powierzchnia Ziemi. Największe natężenie występuje dla średnich szerokości geograficznych, malejąc w miarę zbliżania się do równika. Oprócz naładowanej elektrycznie Ziemi, jony występują w warstwie atmosfery - jonosferze (powstają w wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego). Warstwa zjonizowanego gazu i naładowana powierzchnia Ziemi oddzielona ok. 50 km warstwą powietrznego dielektryka tworzą gigantyczny kondensator kulisty. W rzeczywistości w atmosferze ziemskiej w skali całego globu obserwuje się stały przepływ ładunków o łącznym natężeniu prądu wynoszącym ok. 1,5 kA [1]. Źródłem pól są również wyładowania spowodowane różnicami potencjałów pomiędzy chmurą burzową, a Ziemią, poszczególnymi warstwami chmury czy innymi chmurami. W wyniku zderzenia zimnych i ciepłych mas powietrza powstaje silny prąd wznoszący, ruch powietrza powoduje zderzanie się ze sobą kryształków lodu i kropeł wody, pocieranie substancji powoduje ich elektryzowanie w ten sposób tworzy się chmura kłębiasto-deszczowa nazywana Cumulonimbus. Chmury mogą mieć wysokość sięgającą kilku kilometrów, dolna część chmury jest naładowana ujemnie, a górna dodatnio. Różnica potencjałów pomiędzy chmurą a Ziemią może dochodzić nawet do 100 MV. Tak duża różnica potencjałów powoduje wyładowania atmosferyczne między chmurą, a Ziemią, bądź w obrębie samej chmury, lub pomiędzy różnymi chmurami. Wyładowanie główne zostaje poprzedzone przez wyładowanie pilotujące, pokonujące warstwy atmosfery kolejnymi skokami co 30-50 metrów, docierając do Ziemi w przeciągu 10-100 ms. Przed dotarciem wyładowania pilotującego do Ziemi na jego spotkanie wyrusza od tej powierzchni dodatni odpowiednik. Źródłem dodatniego wyładowania pilotującego są ostro zakończone przedmioty np. drzewa, krawędzie skał, maszty anten (wyładowania elektryczne na takich powierzchniach występują podczas burzowej pogody na otwartym morzu bądź wysoko w górach, a zjawisko zaobserwowane przez marynarzy zostało nazwane „ogniami świętego Elma”). W tak powstałym zjonizowanym kanale następuje wyładowanie główne powodujące przepływ ogromnych prądów rzędu 30-50 kA, a niekiedy nawet 150 kA. Po wyładowaniu głównym zwykle następuje wyładowanie powrotne, w którym ładunek dodatni płynie z Ziemi do chmury. Oprócz klasycznych wyładowań spotykane są również wyładowania chmury burzowej do jonosfery (nazywane „spirites”), przybierające kolor czerwono-pomarańczowy i trwające dłużej niż zwykły piorun.

Również niektóre gatunki zwierząt wykorzystują pole elektryczne. Jest nim np. węgorz elektryczny, który silnymi impulsami elektrycznymi potrafi oszołomić, lub zabić swoją ofiarę, a modyfikacja jego własnego pola elektrycznego przez pole występujące w otoczeniu służy do orientacji w przestrzeni [2].

Wyładowania elektryczne pobudzają do drgań sferyczny rezonator elektromagnetyczny jakim jest kula ziemską z otaczającą ją jonosferą. Drgania te o częstotliwościach rezonansowych wynoszą 8 Hz, 14 Hz, 20 Hz i 30 Hz [1]. Choć atmosfera stanowi w zasadzie barierę dla pozaziemskiego promieniowania elektromagnetycznego, to jednak zawiera dwa „okna”, jedno dla promieniowania od podczerwieni do nadfioletu i drugie w zakresie fal radiowych od ok. 10 MHz do ok. 37,5 GHz. Źródłem promieniowania kosmicznego jest tło mające charakter stały,

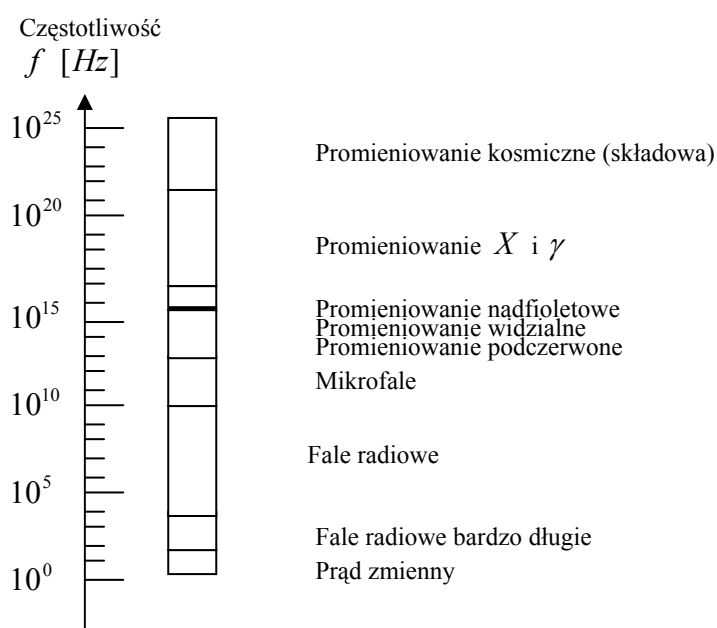
zmiany liczby plam na słońcu objawiające się promieniowaniem w zakresach od 0,5 GHz do 10 GHz i rozblyski na słońcu. Źródłem pól elektromagnetycznych są wszystkie ciała mające temperaturę wyższą od temperatury zera bezwzględnego. Ciała te, w tym i człowiek, promieniają pola elektromagnetyczne niemalże w całym zakresie widma (promieniowanie ciała doskonale czarnego), a częstotliwość promieniowania, dla którego natężenie promieniowania jest największe, rośnie wraz z temperaturą tego ciała.

Oprócz pól elektromagnetycznych pochodzenia naturalnego towarzyszących człowiekowi od zawsze, rozwój cywilizacyjny przyniósł źródła wytwarzające pola elektromagnetyczne. Naturalne środowisko elektromagnetyczne Ziemi zostało zmienione przez ogromne ilości stacji radiowych, telewizyjnych, łączności satelitarnej, radiolokacyjnych, stacji i linii elektroenergetycznych, stacji bazowych telefonii komórkowej i stacji ruchomych wytwarzających pola elektromagnetyczne. Źródła wprowadzające sztucznie wytworzone pola elektromagnetyczne do środowiska zostaną dokładniej omówione w dalszej części pracy.



## 2. Widmo fal elektromagnetycznych

Wspólną cechą fal elektromagnetycznych jest ich jednakowa prędkość w próżni wynosząca  $\sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Dla fal rozchodzących się w ośrodku materialnym, prędkość rozchodzenia się fal jest różna dla różnych długości fal. Własność ta nazywa się dyspersją fal. Poniższy rysunek przedstawia widmo fal elektromagnetycznych. Nazwy nadane różnym obszarom tego widma związane są z odpowiednimi eksperymentalnymi technikami wytwarzania i wykrywania tych fal. Granice podziału widma dotyczą częstotliwości, ponieważ długość fali zależy od właściwości ośrodka. Jeżeli podaje się długość fali, to odnosi się ona do długości fal w próżni.



Rys. 2.1. Widmo fal elektromagnetycznych.

Nie istnieje w zasadzie górna, ani dolna granica częstotliwości. Fale o częstotliwościach kilkudziesięciu herców, są to fale odpowiadające prądom zmiennym stosowanym w technice. Od częstotliwości 3 Hz do 300 GHz rozpościera się zakres fal radiowych, poniżej częstotliwości 3 kHz rozpościera się pasmo fal radiowych bardzo długich. Fale z przedziału 0,3 GHz – 300 GHz są nazywane mikrofalami. Dokładny podział pasma częstotliwości przedstawia tabelka nr. 2.2. Następnym zakresem sąsiadującym z mikrofalami jest zakres fal zwany podczerwienią, rozciągający się od 1 mm do 790 nm. Od 790 nm do 390 nm rozciąga się wąski zakres światła rejestrowanego przez ludzkie oko. Od 390 nm do około 10 nm znajduje się zakres promieniowania nadfioletowego. Promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fal mniejszych od nadfioletu do około 0,02 nm nazywa się promieniowaniem X lub promieniowaniem Roentgena (od nazwiska odkrywcy). Promieniowanie X graniczy z promieniowaniem  $\gamma$  (zakres od 0,02 nm do 0,1 pm). O promieniowaniu  $\gamma$  mówimy wówczas

gdy jest ono pochodzenia jądrowego. Znacznie krótsze fale występują jako jedna ze składowych promieniowania kosmicznego.

| Częstotliwość    | Długość fali         | Oznaczenie metryczne | Nazwa, oznaczenie częstotliwościowe                     |
|------------------|----------------------|----------------------|---|
| 0 Hz - 3 Hz      | > 100000 km          | fale bardzo długie   |   |
| 3 Hz - 30 Hz     | 100000 km - 10000 km |                      | SELF - sub krańcowo niska                               |
| 30 Hz - 300 Hz   | 10000 km - 1000 km   |                      | ELF (Extremely Low Frequency) - skrajnie niskie         |
| 300 Hz - 3000 Hz | 1000 km - 100 km     |                      | VF – ultra niskie                                       |
| 3 kHz - 30 kHz   | 100 km - 10 km       | fale myriametrowe    | VLF (Very Low Frequencies) - bardzo niskie              |
| 30 kHz - 300 kHz | 10 km - 1 km         | fale kilometrowe     | LF (Low Frequencies) - niskie                           |
| 300 kHz - 3 MHz  | 1 km - 100 m         | fale hektometrowe    | MF (Medium Frequencies) - średnie                       |
| 3 MHz - 30 MHz   | 100 m - 10 m         | fale dekametrowe     | HF (High Frequencies) - wysokie                         |
| 30 MHz - 300 MHz | 10 m - 1 m           | fale metrowe         | VHF (Very High Frequencies) - bardzo wysokie            |
| 300 MHz - 3 GHz  | 1 m - 10 cm          | fale decymetrowe     | UHF (Ultra High Frequencies) - ultra wysokie            |
| 3 GHz - 30 GHz   | 10 cm - 1 cm         | fale centymetrowe    | SHF (Super High Frequencies) - super wysokie            |
| 30 GHz - 300 GHz | 1 cm - 1 mm          | fale milimetrowe     | EHF (Extremely High Frequencies) - ekstremalnie wysokie |

Tabela 2.1 Widmo fal elektromagnetycznych z zakresu 0 Hz – 300 GHz.

Fale elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości od 3 Hz – 3000 Hz obejmujące trzy zakresy częstotliwości SELF, ELF i VF znalazły wiele zastosowań. Wykorzystywane są do łączności długodystansowej. Ze względu na swoje właściwości propagacyjne (możliwość wnikania głęboko w warstwę podłoża) są między innymi wykorzystywane do komunikacji z okrętami podwodnymi. Sygnały radiowe na tych częstotliwościach są w stanie dotrzeć do zanurzonych okrętów. Problemem z wykorzystaniem tych częstotliwości są ogromne rozmiary anten, do nadawania sygnałów wykorzystywano między innymi 45 kilometrowe odcinki linii wysokiego napięcia, pochłaniając ogromne ilości energii.

Pola elektromagnetyczne z zakresu ELF towarzyszą przesyłaniu energii elektrycznej w postaci prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz, w USA i w Japonii do tego celu wykorzystuje się częstotliwość wynoszącą 60 Hz.

Zakres fal radiowych o częstotliwości od 3 kHz do 30 kHz oznaczany skrótem VLF, wykorzystywany jest między innymi w telekomunikacji dalekosieżnej, radionawigacji w zastosowaniach medycznych, monitorach ekranowych i ogrzewaniu indukcyjnym.

Fale z zakresu 30 kHz – 300 kHz (LF), są falami radiowymi długimi wykorzystywanymi przez rozgłośnie radiowe, w tym o zasięgu międzynarodowym. Na tych zakresach częstotliwości nadawane są dane cyfrowe np. europejski wzorzec czasu. Zakres wykorzystuje się również w przemiennikach mocy, monitorach ekranowych, sprzęcie elektroiskrowym i ogrzewaniu indukcyjnym metali.

Fale radiowe 300 kHz – 3000 kHz, to zakres fal średnich (MF) używany do transmisji radiowych. W Europie działają stacje radiowe wykorzystujące to pasmo radiowe. Częstotliwości z tego zakresu znalazły również zastosowanie medyczne, do produkcji materiałów półprzewodnikowych czy zgrzewania opakowań.

Fale radiowe od 3 MHz do 30 MHz, to fale krótkie, mogące zapewniać łączność na duże odległości dzięki wielokrotnym odbiciom od jonosfery. Częstotliwości z tego zakresu są powszechnie wykorzystywane przez krótkofalowców na całym Świecie. Częstotliwości z powyższego zakresu wykorzystywane są w również w diatermii, rezonansie magnetycznym i ogrzewaniu dielektrycznym.

Zakres częstotliwości od 30 MHz do 300 MHz oznaczany skrótem VHF, w Polsce powszechnie jest używany skrót UKF (ultrakrótkie fale). Częstotliwości z tego zakresu są najpowszechniej wykorzystywane do transmisji radiowych, kontroli ruchu powietrznego i częściowo wykorzystywane do transmisji programów telewizyjnych.

Zakres od 300 MHz do 3 GHz (UHF) wykorzystywany jest głównie przez stacje telewizyjne, telefonię ruchomą, radary, czy kuchenki mikrofalowe.

Fale z zakresu 3 GHz – 30 GHz (SHF) i 30 GHz – 300 GHz (EHF) wykorzystywane są głównie przez radary, telekomunikację satelitarną, linie radiowe i mikrofalowe czujki przeciwwłamaniowe [1, 4].

### 3. Regulacje prawne

W związku z ogromną liczbą źródeł wytwarzających pola elektromagnetyczne, w wielu krajach w tym i w Polsce, powstały uregulowania prawne dotyczące ochrony środowiska przed polami elektromagnetycznymi.

Zasady ochrony środowiska przed polami elektromagnetycznymi zostały określone w ustawie Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 roku (Dz. U. z 2006 r., Nr 129, poz. 902 z późniejszymi zmianami). Powyższe zasady zostały zawarte przede wszystkim w dziale VI ustawy Poś zatytułowanym „Ochrona przed polami elektromagnetycznymi”, obejmującym art. od 121 do 124.

Art. 121 ustawy Poś oznajmia, iż ochrona przed polami elektromagnetycznymi polega na zapewnieniu jak najlepszego stanu środowiska poprzez:

- 1) utrzymanie poziomów pól elektromagnetycznych poniżej dopuszczalnych lub co najmniej na tych poziomach;
- 2) zmniejszanie poziomów pól elektromagnetycznych co najmniej do dopuszczalnych, gdy nie są one dotrzymane [31].

Zgodnie z art. 122 ustawy, Minister właściwy do spraw środowiska, w porozumieniu z ministrem właściwym do spraw zdrowia, określił w drodze rozporządzenia dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposoby sprawdzania dotrzymania tych poziomów (rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. (Dz. U. Nr 192, poz. 1883)) [12], definiując dopuszczalne wartości poziomów pól elektromagnetycznych dla obszarów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową tabelka 3.1 i dla obszarów dostępnych dla ludności 3.2. Podane wartości natężenia pola elektrycznego i natężenia pola magnetycznego odpowiadają wartościom skutecznym tych wielkości, a wielkość  $f$  jest częstotliwością promieniowania elektromagnetycznego.

| Parametr fizyczny                               |       | Składowa elektryczna | Składowa magnetyczna | Gęstość mocy |
|---|-------|----------------------|----------------------|--------------|
| Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego |       |                      |                      |              |
|   | 1     | 2                    | 3                    | 4            |
| 1   | 50 Hz | 1 kV/m               | 60 A/m               | -            |

Tabela 3.1 Zakres częstotliwości pól elektromagnetycznych, dla których określa się parametry fizyczne charakteryzujące oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko, dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową oraz dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych, charakteryzowane przez dopuszczalne wartości parametrów fizycznych, dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową [12].

| Parametr fizyczny                               |                       | Składowa elektryczna | Składowa magnetyczna | Gęstość mocy         |
|---|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego |                       |                      |                      |                      |
|   | 1                     | 2                    | 3                    | 4                    |
| 1   | 0 Hz                  | 10 kV/m              | 2 500 A/m            | -                    |
| 2   | od 0 Hz do 0,5 Hz     | -                    | 2 500 A/m            | -                    |
| 3   | od 0,5 Hz do 50 Hz    | 10 kV/m              | 60 A/m               | -                    |
| 4   | od 0,05 kHz do 1 kHz  | -                    | 3/f A/m              | -                    |
| 5   | od 0,001 MHz do 3 MHz | 20 V/m               | 3 A/m                | -                    |
| 6   | od 3 MHz do 300 MHz   | 7 V/m                | -                    | -                    |
| 7   | od 300 MHz do 300 GHz | 7 V/m                | -                    | 0,1 W/m <sup>2</sup> |

Tabela 3.2 Zakres częstotliwości pól elektromagnetycznych, dla których określa się parametry fizyczne charakteryzujące oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko, dla miejsc dostępnych dla ludności oraz dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych, charakteryzowane przez dopuszczalne wartości parametrów fizycznych, dla miejsc dostępnych dla ludności [12].

Powyższe rozporządzenie oprócz zdefiniowania dopuszczalnych wartości poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, określa metody wyznaczania i sprawdzania dopuszczalnych pomiarów pól elektromagnetycznych w środowisku w otoczeniu instalacji wytwarzających te pola. Sprawdzenia dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku dokonuje się metodą pomiaru tych pól, a następnie porównania uzyskanych wyników z granicznymi wartościami pól elektromagnetycznych określonymi w rozporządzeniu.

Art. 122a ustawy Poś informuje, iż prowadzący instalację oraz użytkownik urządzenia emitującego pola elektromagnetyczne, które są stacjami elektroenergetycznymi lub napowietrznymi liniami elektroenergetycznymi o napięciu znamionowym nie niższym niż 110 kV, lub instalacjami radiokomunikacyjnymi, radionawigacyjnymi lub radiolokacyjnymi, emitującymi pola elektromagnetyczne, których równoważna moc promieniowana izotropowo wynosi nie mniej niż 15 W, emitującymi pola elektromagnetyczne o częstotliwościach od 30 kHz do 300 GHz, są obowiązani do wykonania pomiarów poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku:

- 1) bezpośrednio po rozpoczęciu użytkowania instalacji lub urządzenia;

- 2) każdorazowo w przypadku zmiany warunków pracy instalacji lub urządzenia, w tym zmiany spowodowanej zmianami w wyposażeniu instalacji lub urządzenia, o ile zmiany te mogą mieć wpływ na zmianę poziomów pól elektromagnetycznych, których źródłem jest instalacja lub urządzenie [31].

Na podstawie art. 123 ustawy Poś, oceny poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku i obserwacji zmian dokonuje się w ramach państwowego monitoringu środowiska, a okresowe badania poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku prowadzi wojewódzki inspektor ochrony środowiska. Ust. 3 art. 123 ustawy Poś zawiera delegację, na podstawie której powstało rozporządzenie Ministra Środowiska z 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz. U. Nr 221, poz. 1645) [34]. Powyższe rozporządzenia, określa sposób wyboru punktów pomiarowych, wymaganą częstotliwość prowadzenia pomiarów oraz sposoby prezentacji wyników pomiarów poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku. Zakres prowadzenia badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku obejmuje pomiary natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w przedziale częstotliwości co najmniej od 3 MHz do 3 000 MHz, a punkty pomiarowe, w których wykonuje się badania poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku wybiera się w dostępnych dla ludności miejscach usytuowanych na obszarze województwa w:

- 1) centralnych dzielnicach lub osiedlach miast o liczbie mieszkańców przekraczającej 50 tys.;
- 2) pozostałych miastach;
- 3) terenach wiejskich.

Na obszarze każdego województwa, dla każdego roku kalendarzowego z trzyletniego cyklu pomiarowego, wyznacza się po 15 punktów pomiarowych w dostępnych dla ludności miejscach, dla każdego z ww. obszarów. Łącznie, na terenie województwa wyznacza się 135 punktów pomiarowych dla trzyletniego cyklu pomiarowego, po 45 punktów pomiarowych dla każdego roku [34].

Na podstawie delegacji ustawowej z art. 51 ust. 8 ustawy Poś, Rada Ministrów w drodze rozporządzenia z dnia 9 listopada 2004 roku określiła rodzaje przedsięwzięć mogące znacząco oddziaływać na środowisko oraz szczegółowe uwarunkowania związane z kwalifikowaniem przedsięwzięcia do sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko (Dz. U. Nr 257, poz. 2573). Ostatnia zmiana powyższego rozporządzenia miała miejsce 31 sierpnia 2007 roku, na mocy rozporządzenia Rady Ministrów z 21 sierpnia 2007 roku (Dz. U. Nr 158, poz. 1105). Rozporządzenie określa następujące rodzaje przedsięwzięć mogące znacząco oddziaływać na środowisko wymagające sporządzenia raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko:

- 1) stacje elektroenergetyczne lub napowietrzne linie elektroenergetyczne, o napięciu znamionowym wynoszącym nie mniej niż 220 kV, o długości nie mniejszej niż 15 km;
- 2) instalacje radiokomunikacyjne, radionawigacyjne i radiolokacyjne, z wyłączeniem radiolinii, emitujące pola elektromagnetyczne o częstotliwościach od 0,03 MHz do 300 000 MHz, w których równoważna moc promieniowana izotropowo wyznaczona dla pojedynczej anteny wynosi:

- a) nie mniej niż 2 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 100 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
- b) nie mniej niż 5 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 150 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
- c) nie mniej niż 10 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 200 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
- d) nie mniej niż 20 000 W;

oraz określa następujące rodzaje przedsięwzięć mogące znacząco oddziaływać na środowisko mogące wymagać sporządzenia raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko:

- 1) stacje elektroenergetyczne lub napowietrzne linie elektroenergetyczne, o napięciu znamionowym nie niższym niż 110 kV, niewymienione w powyższym pkt 1;
- 2) instalacje radiokomunikacyjne, radionawigacyjne i radiolokacyjne, niewymienione w powyższym pkt 2, z wyłączeniem radiolinii, emitujące pola elektromagnetyczne o częstotliwościach od 0,03 MHz do 300 000 MHz, w których równoważna moc promieniowana izotropowo wyznaczona dla pojedynczej anteny wynosi:
  - a) nie mniej niż 15 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 5 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
  - b) nie mniej niż 100 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 20 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
  - c) nie mniej niż 500 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 40 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
  - d) nie mniej niż 1 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 70 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
  - e) nie mniej niż 2 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 150 m i nie mniejszej niż 100 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
  - f) nie mniej niż 5 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 200 m i nie mniejszej niż 150 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny,
  - g) nie mniej niż 10 000 W, a miejsca dostępne dla ludności znajdują się w odległości nie większej niż 300 m i nie mniejszej niż 200 m od środka elektrycznego, wzdłuż osi głównej wiązki promieniowania tej anteny [32, 33].

Zacytowane zapisy ustawy PoS i rozporządzeń, tworzą krajowy system ochrony przed promieniowaniem elektromagnetycznym w środowisku.

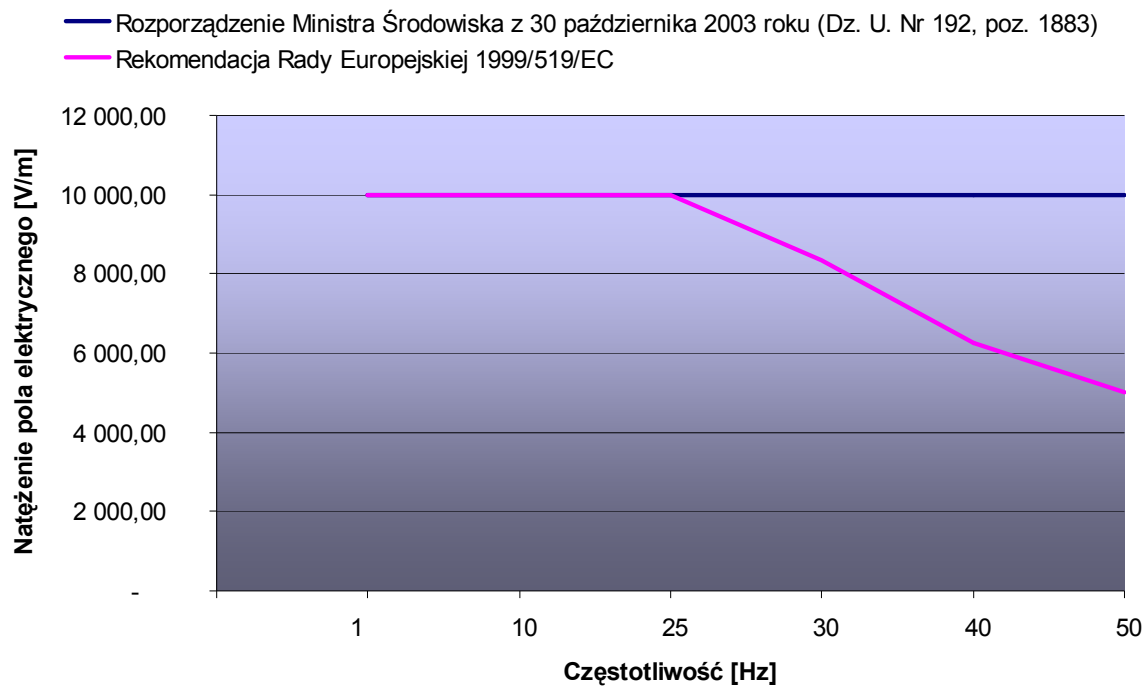
Obowiązującym w Unii Europejskiej dokumentem dotyczącym ochrony znajdującej się w środowisku ludności przed polami elektromagnetycznymi, jest rekomendacja Rady Europejskiej 1999/519/EC z 12 lipca 1999 roku „Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)” [29]. Rekomendacja Rady Europejskiej zawiera poziomy odniesienia pól elektromagnetycznych przedstawione w tabeli 3.3, odpowiadające merytorycznie polskim dopuszczalnym poziomom pól elektromagnetycznych.

| Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego | Składowa elektryczna [V/m] | Składowa magnetyczna [A/m] | Indukcja magnetyczna [ $\mu T$ ] | Gęstość mocy [ $W/m^2$ ] |
|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 0 Hz - 1 Hz                                     | -                          | 32 000                     | 40 000                           | -                        |
| 1 Hz - 8 Hz                                     | 10 000                     | 32 000/f <sup>2</sup>      | 40 000/f <sup>2</sup>            | -                        |
| 8 Hz - 25 Hz                                    | 10 000                     | 4 000/f                    | 5 000/f                          | -                        |
| 0,025 kHz - 0,8 kHz                             | 250/f                      | 4/f                        | 5/f                              | -                        |
| 0,8 kHz - 3 kHz                                 | 250/f                      | 5                          | 6,25                             | -                        |
| 3 kHz - 150 kHz                                 | 87                         | 5                          | 6,25                             | -                        |
| 0,15 MHz - 1 MHz                                | 87                         | 0,73/f                     | 0,92/f                           | -                        |
| 1 MHz - 10 MHz                                  | 87/f <sup>1/2</sup>        | 0,73/f                     | 0,92/f                           | -                        |
| 10 MHz - 400 MHz                                | 28                         | 0,073                      | 0,092                            | 2                        |
| 400 MHz - 2000 MHz                              | 1,375f <sup>1/2</sup>      | 0,0037 f <sup>1/2</sup>    | 0,0046 f <sup>1/2</sup>          | f/200                    |
| 2 GHz - 300 GHz                                 | 61                         | 0,16                       | 0,2                              | 10                       |

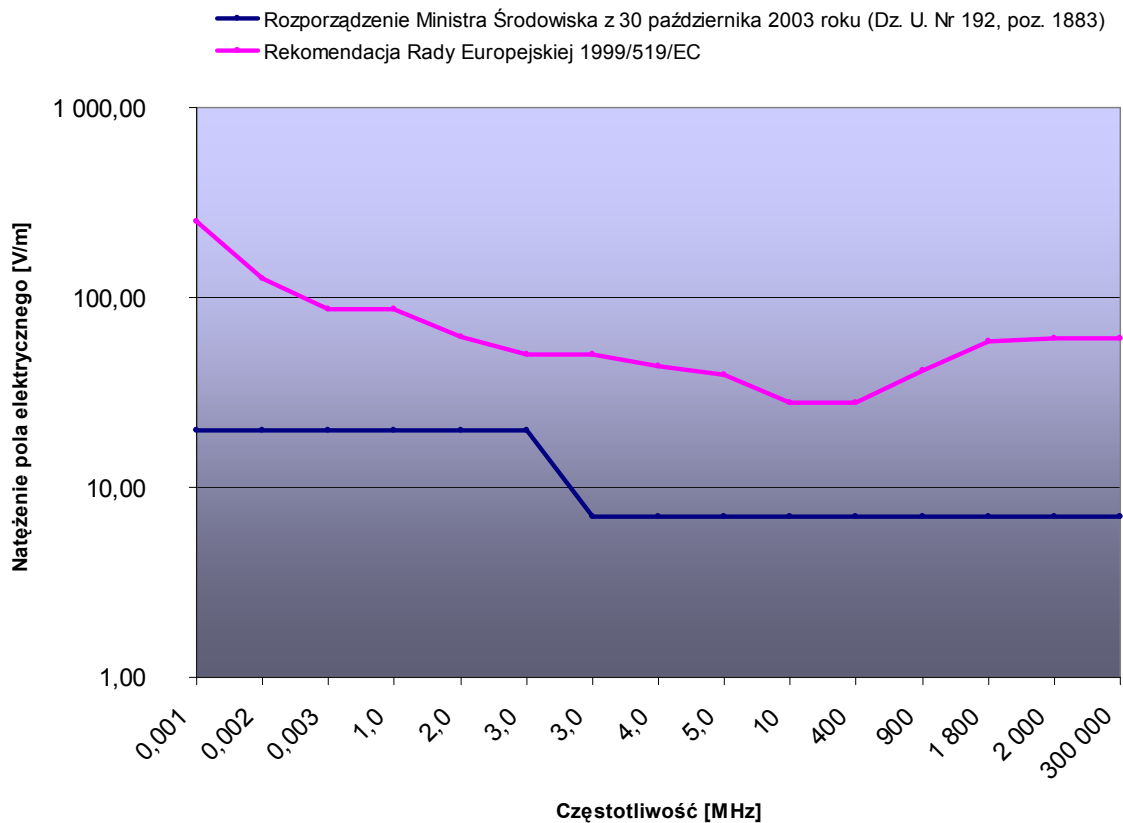
Tabela 3.3 Poziomy odniesienia dla pól elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych [29].

Różnice pomiędzy wartościami dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych określonych w krajowych przepisach ochrony środowiska, a poziomami odniesienia pól elektromagnetycznych zaproponowanych w rekomendacji Rady Europejskiej 1999/519/EC, ilustrują wykresy 3.4 i 3.5.





Wykres 3.4 Porównanie dopuszczalnych poziomów składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego (dla miejsc dostępnych dla ludności) określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. (Dz. U. Nr 192, poz. 1883) z poziomami odniesienia pól elektromagnetycznych zaproponowanymi w rekomendacji Rady Europejskiej 1999/519/EC z 12 lipca 1999 roku, dla zakresu częstotliwości od 1 Hz do 50 Hz.



Wykres 3.5 Porównanie dopuszczalnych poziomów składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. (Dz. U. Nr 192, poz. 1883) z poziomami odniesienia pól elektromagnetycznych zaproponowanymi w rekomendacji Rady Europejskiej 1999/519/EC z 12 lipca 1999 roku, dla zakresu częstotliwości od 1 kHz do 300 GHz.

Z wykresu 3.4 wynika, iż dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych zdefiniowane przez krajowe przepisy ochrony środowiska i rekomendację Rady Europejskiej przyjmują identyczne wartości dla pasma częstotliwości od 1 Hz do 25 Hz. Powyżej częstotliwości 25 Hz, dokument Unii Europejskiej jest bardziej restrykcyjny niż prawo polskie, choć dla częstotliwości 50 Hz (częstotliwości wykorzystywanej do przesyłu energii elektrycznej) rozporządzenie Ministra Środowiska ustala graniczną wartość natężenia pola elektrycznego dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową na poziomie 1 kV/m, a więc pięciokrotnie niższą niż dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego zaproponowana w rekomendacji Rady Europejskiej. Dla częstotliwości od 1 kHz do 300 GHz (wykres 3.5) dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych określone w krajowych przepisach ochrony środowiska przed promieniowaniem elektromagnetycznym są zdecydowanie niższe niż propozycje Rady Europejskiej.

Część krajów Unii Europejskiej ustaliła graniczne wartości poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku zgodnie z rekomendacją Rady Europejskiej, inne kraje w tym i Polska, stosuje własne uregulowania ochrony środowiska przed polami elektromagnetycznymi. Polskie przepisy ochrony środowiska przed polami elektromagnetycznymi, należą do jednych z najbardziej restrykcyjnych.

#### 4. Stacje radiowe i telewizyjne

Emisja promieniowania elektromagnetycznego przez stacje radiowe i telewizyjne stanowi jeden z poważniejszych wkładów do energii promieniowania elektromagnetycznego wprowadzanego do środowiska i wytwarzanego sztucznie. Za pośrednictwem fal elektromagnetycznych można odbierać informacje dziesiątki, setki bądź tysiące kilometrów od źródła tych fal. W początkowym okresie rozwoju radiokomunikacji rozsiewczej dominowały tendencje do zwiększania wysokości anten i długości fal. W październiku 1923 roku w miejscowości Bemowo pod Warszawą (obecnie dzielnica Warszawy), uruchomiono stację składającą się z anteny rozwieszanej na 10 stalowych wieżach wznoszących się na wysokość 127 metrów i rozciągniętych na długości 3,2 km (stacja jest również znana jako stacja w Boernerowie lub Babicach). Stacja pracowała na częstotliwościach w zakresie 14-16 kHz, a zasięg łączności wynosił ok. 6400 km [6]. Tak ogromne zasięgi są możliwe dzięki różnym warunkom propagacji radiowych fal elektromagnetycznych w zależności od częstotliwości. Fale radiowe mogą rozchodzić się jako fale przyziemne (cały zakres częstotliwości fal radiowych), troposferyczne (fale ultrakrótkie), jonosferyczne (cały zakres częstotliwości fal radiowych).

Fale przyziemne rozchodzą się w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni ziemi, wnikając w nią. Rozchodzenie się tych fal zależy od wielu parametrów: przewodności (konduktywności) ośrodków, przenikalności elektrycznej czy częstotliwości fali elektromagnetycznej. Własności elektryczne ziemi zależą od takich czynników jak: temperatura, wilgotność, skład gleby i obiektów znajdujących się na jej powierzchni (roślinność, tereny zabudowane, woda itp.). Im mniejsza jest częstotliwość fal elektromagnetycznych, tym głębiej wnikają one w ziemię. Fale rozchodząc się ulegają tłumieniu, silniej tłumione są fale o polaryzacji poziomej, dlatego też w radiokomunikacji rozsiewczej najczęściej wykorzystuje się fale elektromagnetyczne spolaryzowane pionowo. Zasięg fali przyziemnej wygląda różnie dla poszczególnych częstotliwości. Największym zasięgiem charakteryzują się fale bardzo niskiej częstotliwości VLF (do kilku tysięcy kilometrów). Dla częstotliwości średnich (MF) zasięg wynosi do kilkuset kilometrów, natomiast dla częstotliwości wysokich (HF) zasięg wynosi do kilkudziesięciu kilometrów.

Następną formą rozprzestrzeniania się fal elektromagnetycznych jest propagacja fal w troposferze. Troposfera jest dolną warstwą atmosfery rozciągającą się do ok. 12 km w zależności od szerokości geograficznej i charakteryzującą się jednorodnym składem chemicznym. Parametrami zależnymi od wysokości jest ciśnienie, wilgotność i temperatura, która spada średnio o  $6^{\circ}\text{C}$  na kilometr. W związku z różnymi parametrami opisującymi poszczególne warstwy troposfery zmienia się nieznacznie współczynnik załamania, powodujący refrakcję (załamanie) rozchodzących się fal elektromagnetycznych, w tym promieniowania z zakresu fal radiowych. Refrakcję troposferyczną dzieli się na dodatnią i ujemną. W przypadku refrakcji dodatniej fale uginają się w kierunku do powierzchni ziemi, natomiast w przypadku refrakcji ujemnej uginają się w kierunku od powierzchni ziemi zaginając się ku górze. W

przypadku braku refrakcji fale rozchodzą się w troposferze po liniach prostych. Refrakcję dodatnią można podzielić na słabą, silną, krytyczną i superrefrakcję. W przypadku superrefrakcji promień ugięcia fali jest mniejszy od promienia ziemi, i fale wchodzące do troposfery powracają na powierzchnię ziemi, a następnie odbijają się od niej i ponownie ulegają załamaniu. Dzięki zjawisku superrefrakcji fale rozchodzą się na duże odległości, a obszar w którym się rozchodzą nazywany jest duktem lub falowodem troposferycznym. Superrefrakcja występuje dla fal ultrakrótkich.

Kolejną formą rozprzestrzeniania się fal elektromagnetycznych na duże odległości, poza horyzont optyczny, są odbicia fal od różnych warstw jonosfery. Jonosfera jest warstwą atmosfery rozciągającą się od ok. 60 km nad powierzchnią ziemi. Jonosfera zawiera duże ilości zjonizowanego gazu powstałe przede wszystkim w wyniku promieniowania kosmicznego i nadfioletowego promieniowania słonecznego. Jonosfera dzieli się na kilka warstw: obszar D (60km-90km, występujący tylko w ciągu dnia), E (90km-130km) i obszar F, dzielący się jeszcze na dwa obszary, obszar  $F_1$  rozpościerający się od 160 km do 230 km i obszar  $F_2$  (230 km-450 km). Fale długie i bardzo długie odbijają się w ciągu dnia od najniższych warstw jonosfery od obszaru D, a nocą od obszaru E, zasięgi fal długich sięgają kilku tysięcy kilometrów zarówno w porze nocnej jak i dziennej, z tym, że w odległościach 1000-2000 km natężenie pola fali jonosferycznej przewyższa natężenie pola fali przyziemnej. Fale średnie w ciągu dnia są absorbowane przez dolne warstwy jonosfery i fala jonosferyczna nie występuje, natomiast w nocy tłumienie fali jonosferycznej spada i jest możliwe osiąganie większych odległości. Zasięg fal średnich w ciągu dnia wynosi kilkaset kilometrów i znacznie rośnie w porze nocnej. W przypadku fal krótkich o zasięgu decyduje odbicie (często wielokrotne) od różnych warstw jonosfery, dzięki czemu fale te mogą osiągać niemal dowolnie duże odległości [6]. Ze względu na znaczne tłumienie, zasięg fali powierzchniowej jest znikomy i wynosi kilkanaście kilometrów. Fale krótkie odbijają się zazwyczaj od warstwy  $F_2$  jonosfery, choć w niektórych warunkach również od warstwy E i  $F_1$ .

Stacje radiofoniczne korzystają z następujących zakresów częstotliwości:

- zakres fal długich rozpościera się od 144-288 kHz z odstępami 9 kHz między kanałami. W Polsce nadawane są dwa kanały radiowe na częstotliwościach fal długich: Pierwszy Program Polskiego Radia na częstotliwości 225 kHz (nadawana z stacji radiowej znajdującej się w pobliżu Solca Kujawskiego) i Radio Parlament na częstotliwości 198 kHz (nadawana z stacji radiowej w Raszynie).
- zakres fal średnich 522 – 1611 kHz z odstępami 9 kHz między kanałami. Poza nielicznymi stacjami projektu „Twoje Radio”, których właścicielami są gminy i stacją Radia Racja dla Białorusi (nadawana ze stacji radiowej w Koszęcinie na częstotliwości 1080 kHz) w Polsce nie wykorzystuje się tego zakresu częstotliwości. W latach 90 Polskie Radio zrezygnowało z emisji programu w tym zakresie częstotliwości.
- zakres fal krótkich 5,25-21,75 MHz w paśmie tym nadaje dużo stacji amatorskich (krótkofalowców).

- zakres fal ultrakrótkich 87,5-108 MHz na tych częstotliwościach nadają stacje radiowe w Polsce.
- stacje telewizyjne nadają w następujących zakresach częstotliwości 174-230 MHz, 407-606 MHz i 606-862 MHz.



Zdjęcie 4.1 Jeden z masztów Radiowego Centrum Nadawczego Solec Kujawski – Kabat [24].

Jednym z podstawowych elementów kształtującym rozkład przestrzenny wypromieniowanej energii elektromagnetycznej jest antena. Energię elektromagnetyczną można wypromieniować w różnych kierunkach w przestrzeni w stopniu niejednakowym. Antena promieniująca we wszystkich kierunkach jednakowo nazywana jest anteną izotropową, takie anteny jednak nie występują. Antena promieniuje w stopniu optymalnym jeżeli jej długość równa się wielokrotności połowy długości fali, takie anteny nazywają się rezonansowymi. Jeżeli natomiast długość anteny nie jest równa z długością połowy długości fali wówczas mamy do czynienia z antenami nierezonansowymi. Im emitowane fale elektromagnetyczne mają większą częstotliwość (mniejszą długość fali), tym anteny mają mniejsze rozmiary.

Podstawowe parametry charakteryzujące anteny:

Sprawność anteny wyraża się za pomocą rezystancji strat  $r$  reprezentującą moc traconą w postaci ciepła w materiale, w izolatorach w ziemi i moc traconą na indukowanie prądów w częściach metalowych oraz rezystancji promieniowania  $R$  charakteryzującą moc

promieniowania. Sprawność anteny można równoważnie wyrażać za pomocą mocy promieniowania  $P_{pr}$  i mocy strat  $P_{st}$ :

$$\eta = \frac{R}{R + r}, \quad \eta = \frac{P_{pr}}{P_{pr} + P_{st}}. \quad (4.1)$$

Zysk kierunkowy wyraża zdolność do kierunkowego emitowania energii elektromagnetycznej w porównaniu do anteny wzorcowej:

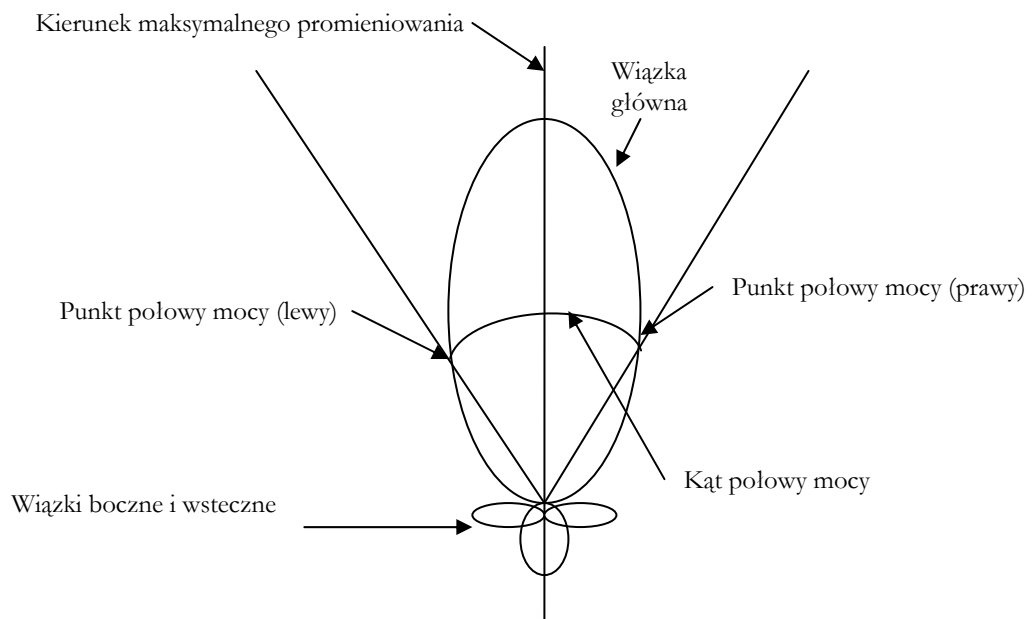
$$D = \frac{P_1}{P_2}, \quad (4.2)$$

gdzie:

- $D$  - zysk kierunkowy,
- $P_1$  - moc anteny kierunkowej,
- $P_2$  - moc anteny wzorcowej.

Zysk kierunkowy zwykle podaje się w dB:

$$D = 10 \log \frac{P_1}{P_2}. \quad (4.3)$$



Rysunek 4.2 Przykładowa charakterystyka promieniowania anteny.

Zysk energetyczny  $G$  uwzględnia straty anteny i wraza się następującym wzorem:

$$G = \eta D. \quad (4.4)$$

Następnym parametrem charakteryzującym cechy fizyczne anteny jest stosunek promieniowania głównego do wstecznego. Wyrażany jest liczbowo jako stosunek maksymalnego natężenia promieniowania wiązki głównej do maksymalnego natężenia promieniowania największego z listków bocznych (przestrzeń nie leżąca na głównym kierunku promieniowania anteny, natężenie promieniowania w listku bocznym jest zwykle dużo mniejsze od natężenia promieniowania w wiązce głównej).

Kolejnym parametrem jest kąt połowy mocy. Kąt połowy mocy określa się w stopniach i jest to kąt zawarty między punktami połowy mocy (rys. 4.2). Punkt połowy mocy jest to punkt, w którym gęstość promieniowania spada o połowę (odpowiada to spadkowi natężenia pola do wartości  $E_{\max}/\sqrt{2}$ ).

Szerokość pasma roboczego jest różnicą pomiędzy dwoma częstotliwościami ( $f_1 - f_2$ ), dla których wartość natężenia pola elektromagnetycznego nie spada poniżej 0,7 swojej wartości maksymalnej [6].

Anteny emitujące na falach długich i średnich są na ogół umieszczane w środku obszaru, który mają pokrywać swoim zasięgiem i dlatego mają charakterystyki dookólne promieniowania. Z racji wykorzystywanych częstotliwości o zasięgu decyduje rozprzestrzenianie się fal powierzchniowych, dlatego też anteny promieniują maksymalnie wzdłuż powierzchni ziemi. Zakres fal krótkich jest bardzo specyficznym zakresem, ponieważ o zasięgu łączności decyduje fala jonosferyczna, a ponieważ właściwości jonosfery zmieniają się w ciągu doby, dlatego też należy zmieniać częstotliwość nadawania w zależności od panujących warunków. Dla fal elektromagnetycznych z tego zakresu częstotliwości oplaca się stosować anteny o dużym zysku energetycznym i w zależności czy jest to antena przeznaczona do pracy rozsewcznej, czy utrzymywania łączności, szerokość wiązki kształtuje się na ogół w ok.  $30^\circ$  dla pierwszego przypadku, a dla utrzymania łączności wynosi kilka stopni. Dla fal z zakresu UKF i częstotliwości wykorzystywanych przez stacje telewizyjne, anteny powinny charakteryzować się jak największą sprawnością anteny, ze względu na wykorzystywanie dużych mocy nadajników. Na ogół stosowane są anteny o dookólnej charakterystyce promieniowania [7].

Stacje radiowe i telewizyjne należą do źródeł wytwarzających pola elektromagnetyczne często o bardzo dużych mocach, nawet rzędu MW. Źródła o dużych mocach są jednak zamontowane wysoko nad powierzchnia terenu, i promieniują fale elektromagnetyczne głównie w płaszczyźnie poziomej, tak że na powierzchni Ziemi natężenia pól nie osiągają znacznych



wartości. Fale radiowe wnikają w głąb ciała ludzkiego. Głębokość wnikania jest ściśle uzależniona od częstotliwości, dla mikrofal wynosi od kilku cm do kilku mm, natomiast fale radiowe o częstotliwości 100 MHz wnikają do ludzkiego ciała na odległość ok. 10cm. Fale elektromagnetyczne wnikając do ludzkiego ciała indukują prądy wirowe, prądy te krążą głównie na powierzchni ciała. Każdy prąd płynący w ośrodku o niezerowej oporności powoduje wydzielanie energii cieplnej. W przypadku fal radiowych niekorzystnym efektem biologicznym jest efekt termiczny. Przyjmuje się, że dla gęstości mocy wynoszącej  $4W/m^2$ , określa się próg wyczuwania skutków termicznych promieniowania elektromagnetycznego [2, 6, 7].

## 5. Telefonia komórkowa

W ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpił gwałtowny rozwój telefonii komórkowej, zmieniający w sposób radykalny dostęp do informacji i możliwość porozumiewania się niemal z każdego miejsca na Świecie. Zasada funkcjonowania sieci telefonii komórkowej została opracowana już w latach 40-tych dwudziestego wieku. W 1976 roku w Nowym Jorku działał system komórkowy umożliwiający prowadzenie 12 rozmów równocześnie, a w samym systemie zarejestrowanych było 500 abonentów [5]. Od tamtego okresu następowało upowszechnienie systemów telefonii komórkowej, od analogowych systemów komórkowych 1 generacji, cyfrowych systemów 2 i 2+ generacji po systemy 3 generacji nazywane również łącznością osobistą.



Zdjęcie 5.1 Stacja bazowa telefonii komórkowej [24].

Pierwszą generację stanowią analogowe systemy telefonii komórkowej takie jak skandynawski system NMT (Nordic Mobile Telephony, standard systemu NMT został wykorzystany w polskiej sieci komórkowej Centertel), amerykański AMPS (Advanced Mobile Phone System) i europejska wersja TACS (Total Access Communications System). Analogowa telefonia komórkowa była wprowadzana od początku lat 80-tych XX wieku, a same standardy systemu zostały opracowane pod koniec lat 70-tych. Analogową telefonię komórkową wyparła

2 i 2+ generacja cyfrowej telefonii komórkowej. Proces wprowadzania drugiej generacji rozpoczął się w latach 90-tych. Tworzą ją europejski system GSM, w tym GSM 900, GSM 1800 (nazywany również systemem DCS (Digital Cellular System) 1800), amerykański system IS-95 oraz japoński JDC (Japanese Digital Cellular System). Kolejne generacje telefonii komórkowej różnią się między sobą pod względem zakresu usług, zasięgu i technologii. O ile analogowe systemy komórkowe w założeniu oferowały usługi w obrębie państwa, bądź kilku państw, cyfrowe systemy telefonii komórkowej drugiej generacji w obrębie kontynentów, to już trzecia generacja ma mieć zasięg globalny. Trzecia generacja telefonii komórkowej nosi nazwę UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) nadaną przez Europejski Instytut Standaryzacyjny Telekomunikacji (ETSI). Różnica między trzecią, a wcześniejszymi generacjami telefonii komórkowej jest ogromna. Pierwsza i druga generacja skupiały się przede wszystkim na transmisjach mowy udostępniając w niewielkim stopniu możliwość wolnej transmisji danych, natomiast trzecia generacja telefonii komórkowej w samych założeniach zakłada możliwość transmisji danych ze średnimi przepływnościami (kilkaset kbit/s), wielkimi przepływnościami (kilka Mbit/s), transmisji dźwięku wysokiej jakości, transmisji multimedialnej czy kompatybilności z internetem. Niektórzy do systemów łączności osobistej (trzecia generacja) zaliczają również sieci mikrokomórkowe GSM 1800 i GSM 1900 (wykorzystywaną na terenie Ameryki Północnej i Południowej i nazywaną również PCS) [5].

W systemie komórkowym przesyłanie sygnału odbywa się różnymi drogami, w dużej części odbywa się łączami stałymi, jednak zawsze pomiędzy terminalem użytkownika systemu komórkowego a stacją bazową informacje przesyłane są za pośrednictwem fal radiowych. Droga łącząca w przestrzeni promieniujący nadajnik i odbiornik nazywana jest kanałem radiowym. Do zobrazowania propagacji fali w przestrzeni często używa się pojęcia anteny izotropowej. Antena izotropowa jest to antena promieniująca moc równomiernie we wszystkich kierunkach, takie anteny jednak nie istnieją w rzeczywistości, stanowiąc jedynie użyteczny punkt odniesienia. Gęstość mocy dla anteny izotropowej przy założeniu propagacji w wolnej przestrzeni można określić za pomocą wzoru:

$$S = \frac{P_N}{4\pi r^2}, \quad (5.1)$$

gdzie:

- $S$  - gęstość mocy,
- $r$  - promień kuli, w środku której znajduje się źródło promieniowania elektromagnetycznego,
- $P_N$  - moc nadajnika.

Moc odbierana przez antenę odbiorczą  $P_O$  zależy od gęstości mocy wygenerowanej przez nadajnik oraz efektywnej powierzchni anteny odbiorczej  $A$ :

$$P_o = SA = \frac{P_N A}{4\pi r^2}. \quad (5.2)$$

W rzeczywistości spotykamy się z antenami promieniującymi kierunkowo. Gęstość mocy na głównym kierunku propagacji można określić za pomocą poniższej zależności:

$$S = \frac{P_N G_N}{4\pi r^2}, \quad (5.3)$$

gdzie:

$G_N$  - zysk kierunkowy nadajnika.

Wzory dla kierunkowej anteny odbiorczej przybierają następującą postać:

$$P_o = SA, \quad G_o = \frac{4\pi A}{\lambda^2} [28], \quad (5.4)$$

gdzie:

$G_o$  - zysk kierunkowy odbiornika.

Ostatecznie moc odbierana przez antenę odbiorczą można wyrazić zależnością:

$$P_o = \frac{P_N G_N G_o \lambda^2}{(4\pi r)^2}. \quad (5.5)$$

Z analizy powyższych wzorów wynika, iż moc odbieranego sygnału, a tym samym zasięg systemu radiokomunikacyjnego jest wprost proporcjonalny do kwadratu długości fali elektromagnetycznej, mocy nadajnika i odwrotnie proporcjonalny do kwadratu odległości między odbiornikiem i nadajnikiem. W zakresach częstotliwości wykorzystywanych przez systemy GSM 900 (890 MHz – 915 MHz i 935 MHz – 960 MHz) i GSM 1800 (1710 MHz - 1785 MHz i 1805 MHz - 1880 MHz), fale elektromagnetyczne rozchodzą się przede wszystkim w postaci fali przyziemnej w zasięgu horyzontu optycznego.

Propagacja w rzeczywistym kanale radiowym odbiega od warunków panujących w wolnej przestrzeni. Moc odbieranego sygnału jest proporcjonalna do  $1/r^\alpha$ , gdzie  $\alpha$  przyjmuje wartości od 3 do 5 dla dużych komórek oraz od 2 do 6 dla małych komórek, więc tłumienie sygnału jest znacznie większe niż dla wolnej przestrzeni. Komórka jest obszarem obsługiwany przez stację bazową. Głównymi zjawiskami występującymi w rzeczywistym

kanale radiowym są szum i zakłócenia, efekt Dopplera, zaniki wynikające z propagacji wielodrogowej.

Fala elektromagnetyczna przemieszczająca się w rzeczywistym kanale radiowym zaburzana jest przez promieniowanie będące wynikiem działalności człowieka bądź będące pochodzenia naturalnego (np. szum termiczny lub atmosferyczny). Zaburzenia te nazywane są szumem. Innym źródłem zniekształceń są interferencje współkanałowe i międzykanałowe. Parametrem określającym jakość sygnału jest stosunek mocy sygnału informacyjnego do mocy szumu.

Następnym zjawiskiem wpływającym na pogorszenie propagacji fali elektromagnetycznej są odbicia bądź ugięcie fali elektromagnetycznej napotykającej na swojej drodze rozmaite przeszkody, w efekcie docierająca do odbiornika fala jest wypadkową wielu fal radiowych, tworząc obszary o zróżnicowanym poziomie natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Propagacja wielodrogowa z jednej strony jest zjawiskiem pożytecznym, ponieważ umożliwia odbieranie sygnałów w miejscach geometrycznego cienia, ale z drugiej strony każde odbicie fali elektromagnetycznej od przeszkody, wiąże się z dodatkowymi stratami.

Efekt Dopplera jest to zjawisko polegające na zmianie częstotliwości odbieranych drgań w wyniku ruchu obserwatora bądź źródła. Jeżeli odbiornik i źródło promieniowania zbliżają się do siebie częstotliwość odbieranych drgań ulega zwiększeniu, w porównaniu do częstotliwości emitowanej przez źródło, jeżeli natomiast odbiornik i źródło oddalają się od siebie częstotliwość odbieranych drgań ulega zmniejszeniu. Częstotliwość odbieranych drgań ulega przesunięciu tym większemu, im większa jest względna prędkość radialna (prędkość wyznaczona wzdłuż linii prostej łączącej odbiornik i nadajnik) pomiędzy odbiornikiem i nadajnikiem.

Elementem od którego telefonia komórkowa wywodzi swoją nazwę, jest podział obsługiwanego obszaru na komórki, z których każda wyposażona jest w odrębny nadajnik. Dlaczego zamiast zastosowania jak najmniejszej liczby nadajników o jak największym zasięgu, bądź nawet jednego nadajnika pokrywającego cały obszar, stosuje się podział obszaru na wiele mniejszych komórek? Taki wybór systemu wynika ze specyfiki telefonii komórkowej, połączeń punkt-punkt, możliwością wykorzystywania tych samych częstotliwości w różnych komórkach i związanym z tym zagadnieniem pojemności systemu komórkowego, determinującym podział obszaru na mniejsze bądź większe komórki. Zagadnienia te zostaną szczegółowiej przedstawione w następnej części rozdziału.

Obszar wokół promieniującego nadajnika można podzielić na trzy strefy: strefę pierwszą, wokół której poziom sygnału jest wystarczający do uzyskania połączenia; strefę drugą, w obrębie której sygnał docierający do odbiornika jest zbyt słaby do transmisji danych, ale wystarczająco silny by wprowadzać zakłócenia innych sygnałów pochodzących od innych nadajników promieniujących na tej samej częstotliwości, oraz strefę trzecią, w której poziom sygnału jest zbyt niski by stanowić źródło zakłóceń.

Sieci komórkowe projektuje się w ten sposób by strefy, silnego sygnału pochodzące od sąsiednich stacji nadawczych nachodziły na siebie (wykluczając powstawanie strefy drugiej, w której sygnał jest zbyt słaby by umożliwić nawiązanie transmisji), a jednocześnie nadajniki sąsiadujące muszą nadawać na różnych częstotliwościach. Jeżeli odbiornik znajduje się w pierwszej strefie nadajnika nr 1 i jednocześnie w drugiej strefie nadajnika nr 2, wówczas dochodzi do zakłóceń określanych mianem współkanałowych (przeniki wsółkanałowe). Natomiast jeżeli odbiornik znajduje się pomiędzy nadajnikami nadającymi na różnych częstotliwościach, wybierając pracę z pierwszym nadajnikiem, ale składniki widma drugiego nadajnika nachodzą na częstotliwość nadajnika nr 1 i poziom sygnału odpowiada drugiej strefie, wówczas dochodzi do zakłóceń międzykanałowych (przeniki międzykanałowe). Przeniki nazywane są również interferencjami. Najczęściej stosowanym parametrem określającym jakościowo wartość przedników jest stosunek sygnału użytecznego do sygnału zakłócającego oznaczany skrótem CIR (Carrier to Interference Ratio) i wyrażany często w dB:

$$CIR = (\sqrt{3N})^{\alpha} / 6. \quad (5.6)$$

Im większa wartość CIR tym przeniki są mniejsze. Przeniki nie można wyeliminować zwiększając moc sygnału użytecznego, ponieważ wraz z jego wzrostem rośnie moc sygnału zakłócającego. Przeniki można skutecznie wyeliminować zwiększając odległość między komórkami pracującymi na tych samych wiązkach kanałów częstotliwości. Przyczyną przedników międzykanałowych jest niedostateczna selektywność filtrów pasmowo-przepustowych w odbiornikach. Chcąc ograniczać wartość tych przedników stosuje się dokładniejsze filtrowanie odbieranego sygnału oraz odpowiedni przydział częstotliwości stacji bazowych.

W systemie komórkowym zarządzanie przydzielonym pasmem częstotliwości wygląda w następujący sposób. Pasma dzieli się na wiązki kanałów częstotliwościowych, które z kolei dzieli się na kanały częstotliwościowe (w systemach z wielodostępem częstotliwościowym (FDMA) jeden kanał częstotliwościowy wystarcza na przesłanie pojedynczej rozmowy, a w systemie GSM dzięki wykorzystaniu zastosowania wielodostępu czasowego (TDMA) i częstotliwościowego (FDMA) każdy kanał częstotliwościowy przenosi 8 rozmów). Poszczególne komórki systemu wykorzystują po jednej wiązkę kanałów w celu uniknięcia przeników. Liczba wiązek kanałów  $N$  określa licznosc grupy komórek. Jeżeli parametr np.  $N=7$ , wówczas grupa komórek składa się z siedmiu elementów, będących podstawą do projektowania danego systemu komórkowego. W praktyce najczęściej parametr  $N$  zawiera się między wartością 4 a wartością 7. Licznosc wiązek kanałów decyduje o odległościach pomiędzy komórkami używającymi te same wiązki kanałów. Użytecznym wskaźnikiem określającym możliwość powtórnego wykorzystania danej wiązki kanałów jest poniższa zależność:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N}, \quad (5.7)$$

Gdzie:

- $D$  - odległość pomiędzy najbliższymi komórkami pracującymi na tych samych wiązkach kanałów,
- $R$  - promień komórki.

Im większa wartość  $N$  tym większa odległość  $D$  między komórkami wykorzystującymi te same częstotliwości, co zmniejsza możliwość przeników, ale z drugiej strony im większa wartość parametru  $N$ , tym mniejsza liczba kanałów częstotliwościowych przypadających na jedną wiązkę kanałów, co z kolei wpływa na mniejszą pojemność systemu (liczbę kanałów rozmównych w systemie na jednostkę powierzchni) oznaczaną symbolem  $C$ .

Wraz ze wzrostem liczby abonentów i tym samym rozmów przeprowadzanych w danej komórce, pojawia się konieczność zwiększenia pojemności systemu komórkowego. Można to zrobić na dwa sposoby, albo poprzez przydział nowych częstotliwości (to rozwiązanie jest kosztowne i tym samym rzadko stosowane, przydział dodatkowych kanałów częstotliwości prowadzi do wzrostu poziomu przeników i zmniejszenia poziomu CIR), albo poprzez zmniejszanie rozmiarów komórek (rozwiązanie dużo częściej stosowane). Niekiedy można również przydzielić dodatkowe kanały częstotliwościowe sąsiednich komórek, ale jest to rozwiązanie dość niewygodne, komplikujące rozdział częstotliwości w systemie [5]. W praktyce najczęściej stosowaną metodą zwiększania pojemności systemu komórkowego jest zmniejszanie fizycznych rozmiarów komórek. Na terenach wiejskich, na których natężenie liczby rozmów jest niewielkie stosuje się duże komórki, z nadajnikami o większej mocy, a na terenach miejskich, a szczególnie w centrach miast stosuje się małe komórki, z mocą nadajników odpowiednio niższą.

Zwiększanie pojemności systemu komórkowego poprzez zmniejszanie rozmiarów komórek dokonuje się na kilka sposobów:

- poprzez podział większych komórek na mniejsze
- wprowadzanie komórek sektorowych
- wprowadzanie komórek dookólnych pokrywanych przez kilka anten (strefy)
- poprzez strukturę warstwową

Podział większych komórek na mniejsze wymaga wybudowania odrębnych stacji bazowych na danym terenie, zmniejszenia mocy nadajników i często wysokości masztów antenowych.

Następną metodą zwiększania pojemności sieci komórkowej jest podział komórki na sektory. O ile w przypadku klasycznej komórki stosowane są anteny dookólne, promieniujące we wszystkich kierunkach w płaszczyźnie poziomej, to w przypadku komórek sektorowych stosuje się anteny kierunkowe promieniujące energię elektromagnetyczną tylko w określonych kierunkach w płaszczyźnie poziomej. Najczęściej stosowane są komórki trzysektorowe (ką

między głównym kierunkiem promieniowania anten wynosi 120 stopni). Zaletą podziału komórek na sektory jest możliwość wykorzystania już istniejącej infrastruktury, bez konieczności stawiania kolejnych masztów antenowych i również zmniejszenie zakłóceń sygnału powodowanych przenikami współkanałowymi. Np. w komórce trzysektorowej w każdym z sektorów używana jest tylko 1/3 pierwotnej liczby kanałów przysługujących na komórkę, ale dzięki zmniejszeniu przedników współkanałowych można zmniejszyć współczynnik N i obniżenia wartości CIR do pierwotnej wielkości co w efekcie prowadzi do zwiększenia pojemności sieci [5]. Wadą podziału komórek na sektory jest większa liczba przełączeń kanałów pomiędzy komórkami i tym samym obciążenie sieci stałej wiadomościami sygnalizacyjnymi.

Odmiernym sposobem zwiększania pojemności sieci jest podział komórki na tzw. strefy. Anteny umieszczone są nie w środku komórki, lecz na jej obrzeżach, tworząc strefę, którą pokrywają promieniowaniem elektromagnetycznym (strefy poszczególnych anten mogą na siebie zachodzić) i w każdej ze stref może być wykorzystywany dowolny kanał częstotliwości przydzielony pierwotnie danej komórce. Stacja ruchoma (telefon komórkowy) poruszając się w obrębie komórki korzysta z tych samych kanałów obsługiwanych przez te anteny, których sygnał w danej chwili jest najsilniejszy i nie jest potrzebna procedura obciążająca system przełączania stacji ruchomej na inny kanał. Dzięki takiemu rozłożeniu anten, tworzących jedną stację bazową można zmniejszyć wartość przeników współkanałowych i tym samym zmniejszyć wartość współczynnika N, co z kolei zwiększa pojemność sieci. Wadą tego rozwiązania, jest konieczność budowy nowej infrastruktury.

Stosowanie struktury warstwowej polega na uzupełnianiu dużych komórek (makrokomórek), mikrokomórkami w zależności od natężenia ruchu w danym miejscu. Dzięki takiemu rozwiązaniu stacja ruchoma może być obsługiwana przez mikrokomórki jak i pikrokomórki [5]

W systemach telefonii komórkowej, komórki dzieli się w zależności od rozmiarów na: makrokomórki obejmujące obszary słabo zaludnione (promień takiej komórki wynosi kilkanaście kilometrów); mikrokomórki obejmujące obszary gęsto zaludnione (promień wynosi od kilkuset metrów do kilku kilometrów) i pikrokomórki obejmujące swym zasięgiem np. wnętrza budynków.

W systemach telefonii komórkowej przydzielone pasma częstotliwości zostały podzielone na dwie części: na kanały „w górę” (uplink) i kanały „w dół” (downlink). Pasma uplink jest pasmem służącym do transmisji sygnałów od stacji ruchomej do stacji bazowej (w górę), natomiast pasmo downlink służy do transmisji sygnałów od stacji bazowej do stacji ruchomej (w dół). Każde z tych pasm ma taką samą szerokość i dzieli się na tyle samo kanałów częstotliwości.

Dla systemu GSM 900 szerokość przedziału każdego z pasm downlink i uplink wynosi 25 MHz, a szerokość pojedynczego kanału częstotliwości wynosi 200 kHz. Dla pasma 25 MHz można utworzyć 125 kanałów częstotliwości, lecz w praktyce stosuje się na krańcach pasma ochronne przedziały częstotliwościowe o szerokości po 100 kHz i ilość kanałów mniejsza się



do 124. Dla pasma uplink zarezerwowane są częstotliwości 890 MHz – 915 MHz, a dla pasma downlink częstotliwości 935 MHz – 960 MHz.

W wyniku rozwoju systemu GSM w niektórych krajach poszerzono pasma częstotliwości, dodając po 10 MHz do każdego z pasm, co daje w rezultacie dodatkowych 50 kanałów częstotliwości. Dla GSM 900 pasmo uplink rozciąga się od 880 MHz do 915 MHz, a pasmo downlink od 925 MHz do 960 MHz. Systemy z rozszerzonym pasmem częstotliwości znane są pod nazwą E-GSM (Extended frequency GSM).

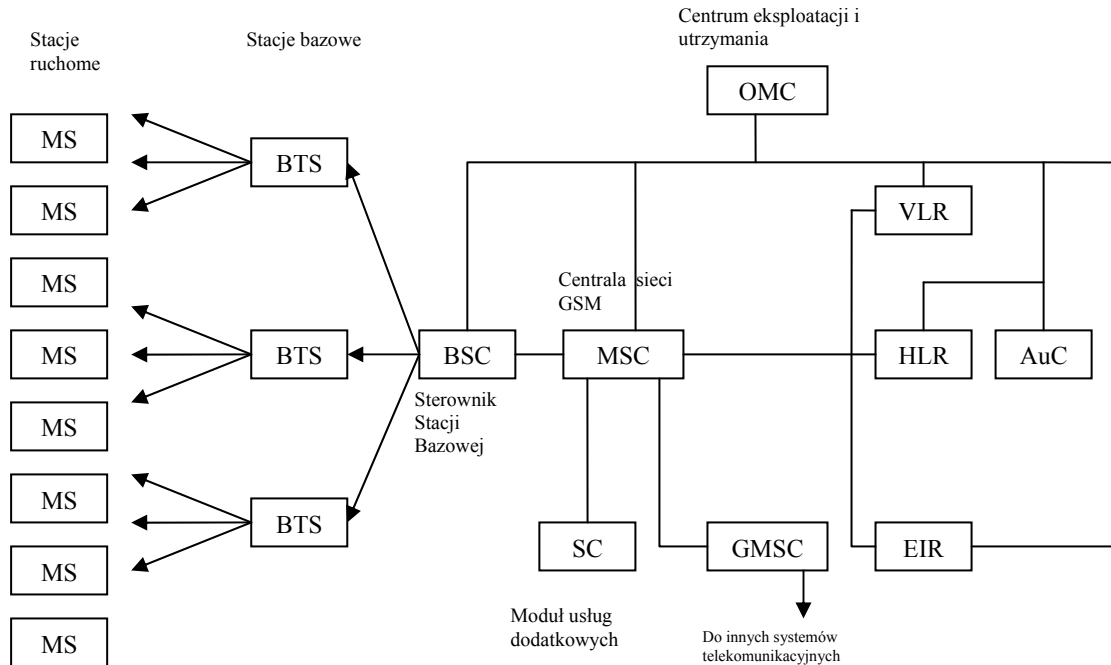
Z powodu dynamicznego rozwoju systemu GSM, pasmo dla GSM 900 nie zapewniło wystarczającej pojemności systemu, w związku z czym postanowiono rozpocząć pracę nad systemem pracującym wokół częstotliwości 1800 MHz, nadając temu systemowi nazwę DCS 1800 (Digital Cellular System), nazywaną również systemem GSM 1800. Szerokość każdego z pasm uplink i downlink wynosi 75 MHz, co daje 374 kanały częstotliwościowe dla każdego z pasm. Pasmo uplink rozciąga się od 1710 MHz do 1785 MHz, a pasmo downlink od 1805 MHz do 1880 MHz.



Wykres 5.2 Przykładowe tygodniowe wyniki pomiaru aktywności stacji bazowej UMTS obrazujące aktywność ludzką [22].

Na system telefonii komórkowej składa się cały szereg urządzeń. Najbardziej widoczną dla abonenta telefonii komórkowej częścią systemu, jest stacja ruchoma (telefon komórkowy) oznaczana symbolem MS. Stacje ruchome komunikują się ze stacjami bazowymi (BTS) obsługującymi poszczególne komórki systemu. Pracą stacji bazowych zarządzają sterowniki stacji bazowych (BSC). Sterownik stacji bazowej jest odpowiedzialny za przełączanie kanałów, czy sterowanie mocą stacji ruchomej [5]. Następną część systemu stanowi blok komutacyjno sieciowy. W skład tego bloku wchodzi centrala systemu ruchomego (MSC). Centrala MSC jest odpowiedzialna za zarządzanie zespołem stacji bazowych współpracując z innymi częściami systemu, w tym z centralą tranzytową GMSC. Rejestr HLR zawiera takie dane dotyczące uprawnień abonenta czy identyfikację oraz informację o aktualnym położeniu stacji ruchomej. Rejestr stacji obcych VLR to drugi z rejestrów uczestniczących w procesie śledzenia stacji ruchomej, zawierając informację o abonentach aktualnie znajdujących się w obszarze obsługiwanym przez skojarzoną z nim centralę MSC i zawiera o wiele bardziej szczegółowe dane o położeniu stacji ruchomej niż rejestr HLR [5]. Centrala tranzytowa GMSC spełnia funkcje komunikacji z innymi systemami telekomunikacyjnymi. Centrum identyfikacji AuC

odpowiada za zabezpieczenie systemu przed niepożądanym dostępem (przeciwdziałanie realizacji połączeń na koszt innych abonentów i uniemożliwienie podsłuchiwania rozmów). Rejestr EIR jest odpowiedzialny za identyfikację stacji ruchomych. Połączenie poszczególnych urządzeń w systemie komórkowym przedstawia rys.5.3.



Rysunek 5.3 Schemat blokowy systemu GSM.

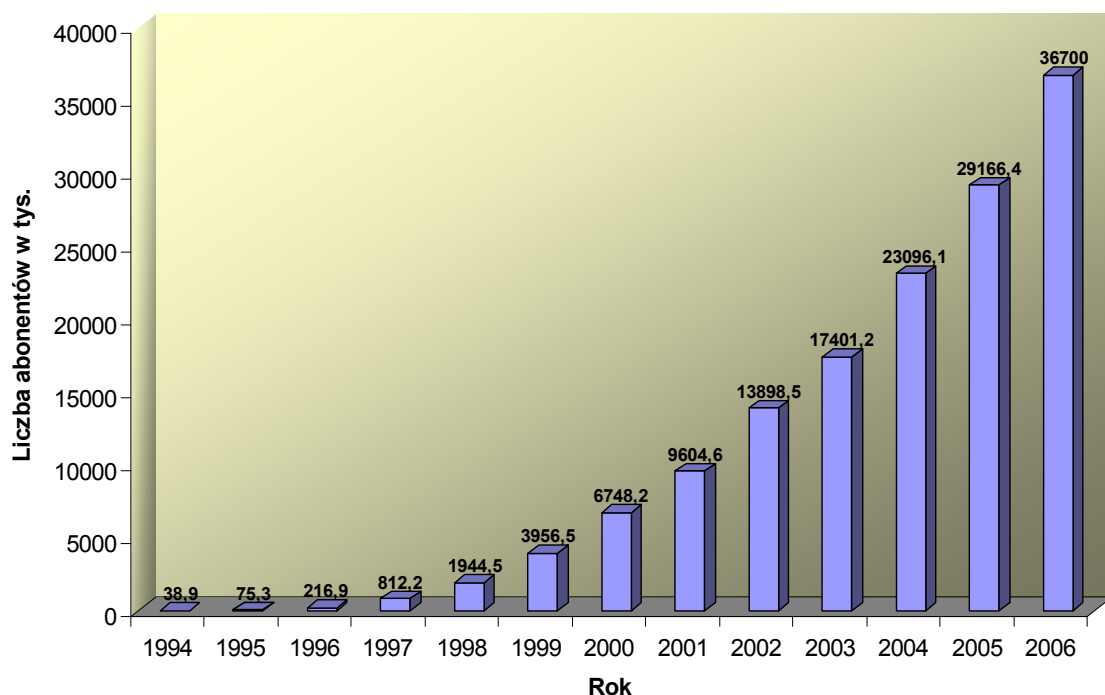
Telefonia komórkowa towarzyszy człowiekowi od dość niedawna i staje się coraz bardziej powszechniejszym narzędziem komunikacji. Dziś jest już trudno spotkać osobę nie znającą pojęcia „telefon komórkowy”, a osoby nie mające telefonów komórkowych zaczynają stanowić mniejszość. Jednocześnie z głosami zachwyty pojawiły się obawy czy telefon komórkowy, a konkretnie promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez telefony komórkowe i stacje bazowe, nie niesie ze sobą zagrożenia dla środowiska, w tym dla człowieka. Powszechnie znany jest niekorzystny wpływ promieniowania jonizującego na zdrowie człowieka. Promieniowanie takie niesie ze sobą wystarczającą energię, by móc jonizować cząsteczki, przyczyniając się do tworzenia komórek rakotwórczych, zmieniając strukturę DNA czy wpływając zaburzająco na inne procesy biologiczne. Liczne badania nie potwierdziły szkodliwości promieniowania niejonizującego z zakresu częstotliwości wykorzystywanej przez telefonię komórkową. Badano wpływ promieniowania z zakresu częstotliwości wykorzystywanej przez telefonię komórkową na powstawanie i rozwój raka mózgu. Choroba taka przebiega w dwóch fazach: inicjacji i rozwoju. Energia potrzebna do rozerwania więzów DNA w procesie inicjacji choroby nowotworowej jest znacznie większa niż energia przenoszona przez fale elektromagnetyczne niejonizujące, więc to promieniowanie nie może uczestniczyć w tej fazie choroby, natomiast nie jest wyjaśniony wpływ promieniowania w fazie

rozwoju choroby. W 1997 roku zostały opublikowane wyniki badań wskazujące na istnienie związku między rozwojem chłonnaika u genetycznie modyfikowanych myszy, a ekspozycją na pola elektromagnetyczne. Jednakże te badania nie zostały potwierdzone i obecny stan wiedzy nie pozwala na powiązanie wzrostu zachorowalności na nowotwory z ekspozycją na promieniowanie elektromagnetyczne z tego zakresu częstotliwości. Znany jest natomiast niekorzystny efekt termiczny wywoływany przez promieniowanie elektromagnetyczne, mogąc prowadzić do przegrzewania, poparzeń, bądź śmierci spowodowanej niemożnością odprowadzenia przez organizm nadmiaru energii. Radiowe pola elektromagnetyczne wnikają w tkanki organizmów na określoną głębokość w zależności od częstotliwości. Dla częstotliwości promieniowania wykorzystywanego w telefonii komórkowej fale wnikają na głębokość do centymetra. Moce nadajników stacji bazowych wahają się od kilku do ponad 100 watów, w zależności od rozmiaru komórki i wykorzystywanej częstotliwości. Anteny montowane są na wysokich masztach, bądź dachach budynków, a same wiązki emitowanych pól elektromagnetycznych są bardzo wąskie w płaszczyźnie pionowej i szerokie w płaszczyźnie poziomej, tak że natężenie pola elektromagnetycznego bezpośrednio pod anteną jest bardzo małe. Oddalając się od anteny poziomy pole elektromagnetycznych najpierw powoli rosną, a później maleją wraz ze wzrostem odległości. Mimo, że anteny telefonów komórkowych wypromieniowują fale elektromagnetyczne o znacznie mniejszej mocy niż w przypadku stacji bazowych (moc wypromieniowanych fal elektromagnetycznych dla anten telefonów komórkowych na ogół waha się od 0,2 W do 0,6 W) to jednak telefony komórkowe mają zdecydowanie większy udział w ilości energii elektromagnetycznej docierającej do człowieka, niż w przypadku anten stacji bazowych. Dzieje się tak dlatego, ponieważ natężenie pola elektrycznego szybko maleje wraz z odległością i mimo, iż anteny stacji bazowych promieniują ze znacznie większymi mocami niż telefony komórkowe, to jednak znajdują się w dużo większych odległościach od człowieka i dodatkowo wiązki promieniowania są ściśle ukierunkowane w przestrzeni. W przypadku telefonów komórkowych mamy do czynienia z antenami dookólnymi i niewielkimi odległościami od ciała, szczególnie od głowy, chyba że korzystamy z zestawu słuchawkowego, wówczas można w poważnym stopniu ograniczyć ilość energii pochłanianej przez głowę. Wpływ na ilość wypromieniowanej energii elektromagnetycznej ma odległość stacji ruchomej od stacji bazowej, bądź pogorszenie warunków propagacji fali elektromagnetycznej (np. zasłonięcie ręką anteny telefonu komórkowego, przebywanie w zamkniętym pomieszczeniu itp.). W takich sytuacjach telefon chcąc utrzymać zadowalającą jakość połączenia ze stacją bazową zaczyna zwiększać moc promieniowania elektromagnetycznego. Poza efektem termicznym nadal prowadzi się badania dotyczące wpływu na organizm człowieka efektów nietermicznych, których natura nadal nie została jeszcze do końca poznana.

Współczynnikiem charakteryzującym termiczne oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z zakresu częstotliwości radiowych jest współczynnik absorpcji energii promieniowania elektromagnetycznego SAR (Specific Absorption Rate). Jednostką SAR jest W/kg. SAR można uśrednić po całkowitej masie ciała wystawionego na działanie pola

elektromagnetycznego, po części masy ciała lub po całkowitym czasie ekspozycji lub po części czasu ekspozycji. Dla człowieka wartość SAR zależy od częstotliwości i polaryzacji fali elektromagnetycznej. SAR największą wartość przyjmuje dla polaryzacji E (natężenie pola elektrycznego E jest równoległe do długiej osi ciała), z wyjątkiem wyższych częstotliwości, dla których SAR przyjmuje większe wartości dla polaryzacji H (natężenie pola magnetycznego H jest równoległe do długiej osi ciała). Dla fali o częstotliwości powyżej 15 MHz, organizm ludzki i zwierzęcy może pochłaniać od 20% do 100% wartości padającej energii promieniowania elektromagnetycznego. Najbardziej narażonymi narządami ciała człowieka, na termiczne działanie promieniowania elektromagnetycznego jest ośrodkowy układ nerwowy, gonady męskie czy części przeziernie oka (głównie soczewka). Organizm człowieka pochłania energię elektromagnetyczną nieliniowo w funkcji częstotliwości i dla standardowego człowieka (o masie ciała wynoszącej 70 kg i wzroście 175 cm) maksimum pochłaniania energii występuje dla częstotliwości 70 MHz [1].

Według danych GUS liczba stacji bazowych w Polsce wzrosła z 14519 w 2004 roku do 15290 w roku 2005 (wzrost o 5,3%). Liczba abonentów wzrosła z 23096,1tys. w 2004 roku, do 29166,4tys. w roku 2005, więc wzrost wyniósł aż 26,3%. Natomiast wzrost liczby abonentów w porównaniu do lat 2005 i 2006 wyniósł 25,8%. W Polsce na 100 mieszkańców przypadło 76,4 abonentów, w Czechach 105,3, we Włoszech 109,4, w Niemczech 86,4, na Słowacji 79,1 a we Francji 73,7. Najwyższą liczbę abonentów telefonii komórkowej na 100 mieszkańców w Europie odnotowano w Luxemburgu 119,4 a najniższą na Białorusi 11,3. W 2006 roku w Polsce na 100 mieszkańców przypadło już 96,3 abonentów. W 2005 roku zanotowano w ruchu krajowym 15950 mln. minut połączeń telefonicznych wychodzących w porównaniu z 10166 mln. minut w 2004 roku (wzrost o 56,9%). W 2005 roku nadano 14070 mln. SMSów, a w 2004 roku 7988 mln. SMSów (wzrost aż o 76,1%) [3]. Te liczby pokazują jak dynamicznie rozwija się w Polsce rynek usług telefonii ruchomej.



Wykres 5.4 Przyrost liczby abonentów telefonii komórkowej w Polsce w latach 1993-2006 [3,30].

Telefony komórkowe mogą zakłócać pracę urządzeń medycznych takich jak rozruszniki serca, czy aparaty słuchowe. Badania wykazały, że pewne rozruszniki serca nie mogą pracować w otwartej przestrzeni w odległościach mniejszych niż 0,5 metra od stacji ruchomej o maksymalnej mocy 8 W. Jednak jeżeli są umieszczone w naturalnym środowisku pracy (w ciele pacjenta), mogą działać bez zakłóceń nawet przy pięciokrotnej mocy nadajnika stacji ruchomej. Na zakłócenia narażone są również systemy podtrzymywania życia w szpitalach. Wiele z tych urządzeń nie spełnia norm odporności elektromagnetycznej, w związku z tym możliwe są zakłócenia spowodowane przenikami. Na zakłócenia narażone są również takie urządzenia jak: magnetofony kasetowe, odbiorniki telewizyjne, przenośne odbiorniki radiowe, wzmacniacze, telefony, komputery i odtwarzacze CD. Dobrze udokumentowany jest wzrost ryzyka wypadków samochodowych w przypadku rozmowy przez telefon komórkowy, ale zwiększona wypadkowość jest spowodowana jedynie samym faktem rozmowy, powodującym zmniejszenie stopnia koncentracji podczas prowadzenia pojazdu [5].

## 6. Radary

Radiolokacja jest dziedziną radiotechniki, zajmującą się wykrywaniem różnych obiektów, oraz pomiarem ich współrzędnych i parametrów ruchu za pomocą fal radiowych odbijanych od obiektu, względnie retransmitowanych lub promieniowanych przez obiekt [9].

Wyróżnia się następujące rodzaje radiolokacji, ze względu na metody wytwarzania sygnałów radiolokacyjnych:

- radiolokacja aktywna,
- radiolokacja półaktywna,
- radiolokacja pasywna.

Radiolokacja aktywna dzieli się na radiolokację aktywną z pasywną odpowiedzią i na radiolokację aktywną z aktywną odpowiedzią.



Zdjęcie 6.1 Antena radarowa radaru kontroli płyty lotniska ASC-10 [35].

Radiolokacja aktywna z pasywną odpowiedzią wykorzystuje do obserwacji celu, jego zdolność do odbijania fal radiowych (odpowiedź pasywna). W przypadku ww. metody wykrywane są tylko obiekty odbijające fale radiowe. Fale radiowe wypromieniowywane są w przestrzeń, przy pomocy odpowiedniej anteny (nadajnika). Jeżeli na drodze rozprzestrzeniania się fal pojawi się cel odbijający fale, wówczas odbite sygnały, jako echo radiolokacyjne powrócą do urządzenia radiolokacyjnego. Odbity sygnał echa radiolokacyjnego zawiera informacje o położeniu celu, jego prędkości i przyspieszeniu oraz takich właściwościach fizycznych, jak kształt celu i jego wymiary [9].

Radiolokacja aktywna z aktywną odpowiedzią przy wykrywaniu celu wykorzystuje współpracę urządzenia radiolokacyjnego lub specjalnego urządzenia wywoławczego z zainstalowanym na wykrywanym celu urządzeniem odzewowym. Urządzenie odzewowe jest urządzeniem nadawczo-odbiorczym, które po odebraniu słabych sygnałów wywoławczych wzmacnia je, a następnie powoduje nadawanie sygnałów odzewowych.

Radiolokacja półaktywna wykorzystuje stosowanie dwu stacji radiolokacyjnych, z których jedna „oświetla” cel falami radiowymi, a druga odbiera odbite od celu sygnały. Radiolokacja tego typu jest wykorzystywana, gdy obiekt na którym chcemy zamontować urządzenie radiolokacyjne przyjmuje małe rozmiary np. pocisk raketowy. Na ziemi montowana jest druga ze stacji radiolokacyjnych służąca do „oświetlania” celu.

Radiolokacja pasywna polega na odbieraniu promieniowania emitowanego przez cel. Jest to promieniowanie termiczne w pasmie fal milimetrowych i centymetrowych, promieniowanie długofalowe powstające przy pracy silników raketowych, promieniowanie różnych urządzeń radiowych znajdujących się na wykrywanych celach.

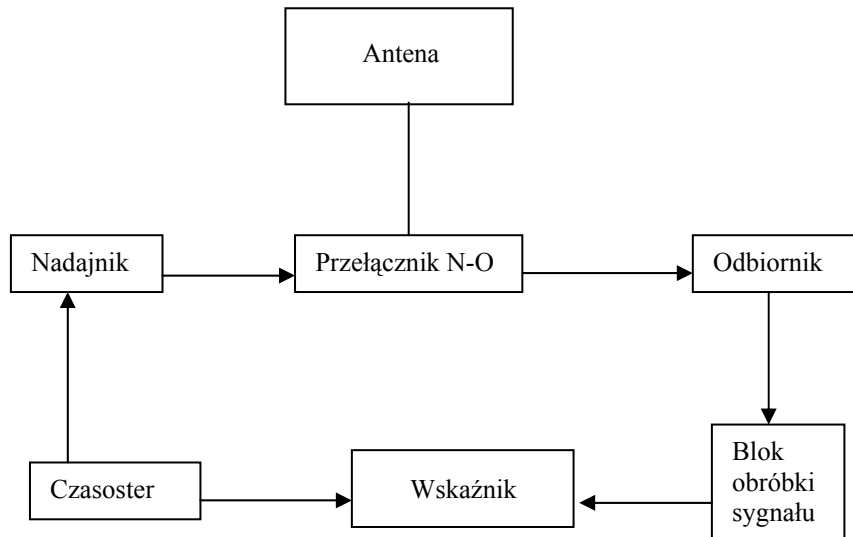
Radar jest zbudowany z kilku elementów. Schemat blokowy radaru przedstawia rys. 6.2. Podstawowym urządzeniem radaru jest nadajnik. Nadajnik wytwarza impulsy drgań elektromagnetycznych odpowiednio dużej mocy o częstotliwościach rzędu MHz i GHz. Z nadajnika są przesyłane impulsy do anteny przy pośrednictwie przełącznika „nadawanie-odbior” (N-O). W przypadku większości anten radarowych można zarówno emitować impulsy elektromagnetyczne formując je w odpowiednio wyprofilowaną wiązkę, jak i odbierać powracające sygnały od napotkanych obiektów odbijających fale elektromagnetyczne w postaci echa. Dla nadawania sygnałów przełącznik N-O jest ustawiony w pozycji N, natomiast w przypadku odbioru w pozycji O. W chwili wypromieniowania przez antenę impulsów elektromagnetycznych urządzenie zwane czasostereem uruchamia pomiar czasu, trwający do momentu powrotu sygnałów w postaci echa. Na podstawie znajomości czasu jaki upłynął między wypromieniowaniem sygnału, a jego powrotem  $t$ , oraz wiedząc z jaką prędkością rozchodzi się fala elektromagnetyczna w danym ośrodku  $v$ , można ustalić odległość  $s$  do obiektu odbijającego fale, przy pomocy wzoru:

$$s = \frac{v \cdot t}{2}. \quad (6.1)$$

Sygnal powracając do anteny trafia następnie do odbiornika w postaci echa. Sygnal ten jest kopią sygnału nadanego, różniąc się natężeniem i ewentualnie zmienioną częstotliwości wynikającą z wartości prędkości radialnej obiektu. Następnie sygnal ten jest wzmacniany w odbiorniku i kierowany do bloku obróbki sygnału. W bloku obróbki sygnału, następuje jego analiza mająca wydobyc takie informacje jak prędkość radialną poruszającego się obiektu, po czym echo radiolokacyjne jest obrazowane na wskaźniku.

Urządzenia radiolokacyjne wysyłające „paczki” promieniowania elektromagnetycznego są określane radarami impulsowymi, a urządzenia emitujące bez przerwania fale

elektromagnetyczne nazywane są urządzeniami pracującymi na fali ciągłej. Urządzenia radiolokacyjne dzielą się na urządzenia z falą koherentną i niekoherentną. Sygnał koherentny jest takim sygnałem, dla którego fazy początkowe fali nośnej kolejnych impulsów są zgodne, natomiast dla sygnału niekoherentnego fazy początkowe kolejnych impulsów są przypadkowe.



Rysunek 6.2 Ogólny schemat blokowy radaru.

Do najważniejszych parametrów opisujących radar należy: częstotliwość emitowanej fali elektromagnetycznej  $f$ , moc szczytowa  $P_i$ , czas trwania impulsu  $\tau$ , a także okres powtarzania tych impulsów  $T_p$ . Okres powtarzania impulsów  $T_p$  jest uzależniony od zasięgu radaru. Odstęp czasu nadawania poszczególnych impulsów musi być na tyle długi, aby odbity sygnał od przeszkody mógł wrócić do anteny przed emisją kolejnego impulsu. Wydłużanie okresu czasu powtarzania impulsów  $T_p$ , wpływa na wartość mocy średniej sygnału  $P_{sr}$ , która z kolei łącznie z wartością zastosowanej częstotliwości fali nośnej ma wpływ na zasięg radaru. Związek pomiędzy czasem  $T_p$  i mocą  $P_{sr}$  wyraża następujący wzór:

$$P_{sr} = \frac{P_i \tau}{T_p}. \quad (6.2)$$

Moc średnią na podstawie wzoru 6.2 można powiększyć manipulując czasem trwania impulsu  $\tau$  oraz mocą szczytową  $P_i$ . Nie można jednakże tego czynić w sposób zupełnie dowolny ze względu na inny bardzo istotny parametr radaru nazywany rozróżnialnością odległościową. Rozróżnialność odległościowa jest parametrem zależnym od czasu trwania impulsu. Jeżeli dwa



obiekty znajdujące się w niewielkiej odległości od siebie, jeden za drugim, poruszają się w kierunku radaru, to w przypadku szerokiego impulsu, impuls ten „obejmie” oba obiekty, w wyniku czego dadzą one jedno echo odpowiednio szersze. Operator widzący echo na wskaźniku nie będzie mógł stwierdzić czy ma do czynienia z jednym większym obiektem, czy z dwoma mniejszymi obiektami, bądź z większą liczbą małych obiektów. By oba te obiekty dały oddzielne echa, długość impulsu musi być mniejsza od odległości pomiędzy tymi obiektami. Rozróżnialność odległościowa jest niezmiernie cenionym parametrem, lecz jej zwiększanie powoduje jednocześnie zwiększanie mocy szczytowej nadajnika. Problem ten można rozwiązać wykorzystując technikę kompresji impulsu. Ta technika polega na „zagęszczaniu” impulsu przez co zmniejsza się jego szerokość. Zmianie szerokości impulsu wskutek kompresji towarzyszy wzrost mocy szczytowej zgodnie z poniższym wzorem:

$$P_{i1} \tau_1 = P_{i2} \tau_2, \quad (6.3)$$

gdzie  $P_{i1}$  i  $\tau_1$  są mocą szczytową i czasem trwania impulsu przed kompresją, natomiast  $P_{i2}$  i  $\tau_2$  są mocą szczytową i czasem trwania impulsu po kompresji impulsu. Stosunek szerokości impulsu przed i po kompresji jest nazywany współczynnikiem kompresji. Jeżeli chcemy by radar pracujący bez zastosowania kompresji impulsu, miał taką samą rozróżnialność odległościową jak radar pracujący z mocą szczytową o wartości 250 kW i współczynnikiem kompresji wynoszącym 20, musimy zwiększyć jego moc szczytową do wartości 5 MW.

Najbardziej charakterystyczną częścią radaru, pozwalającą zakwalifikować dane urządzenie jako radar jest antena. Przeważnie spotykane są dwa rodzaje anten: anteny reflektorowe i anteny fazowe. Zadaniem anten stosowanych w radiolokacji jest koncentrowanie całej wypromieniowywanej energii w wąskiej wiązce, a przy odbiorze koncentrowanie na małej powierzchni, docierającej do anteny energii fali odbitej. Antena reflektorowa jest anteną przybierającą kształt paraboloidy obrotowej oraz wykonaną z materiału odbijającego fale elektromagnetyczne o odpowiedniej częstotliwości, ze źródłem promieniowania umieszczonym w jej ognisku. Anteny tego typu są dominujące w zastosowaniach cywilnych, a w zastosowaniach wojskowych prawie całkowicie wyparte przez anteny fazowe. Antena fazowa jest zbudowana z elementów promieniujących, umieszczonych w odstępach około połowy długości fali jeden od drugiego. Zaletą anteny fazowej jest możliwość kierowania wiązki w różnych kierunkach bez konieczności jej mechanicznego przesuwania, manipulując tylko wielkością przesunięcia fazy sygnału. Wiązka bardzo szybko może zmienić położenie, bez konieczności zajmowania sąsiednich położenia. Poza tymi dwoma podstawowymi i najczęściej spotykanymi rodzajami anten, stosowane są anteny aktywne i anteny o symetrycznej aperturze.

W nowoczesnych typach radarów impulsy bardzo wysokiej częstotliwości wytwarzane są przy wykorzystaniu tzw. nadajników obcowzbudnych. Nadajnik obcowzbudny jest wzmacniaczem tzw. sygnału wzbudzenia, który jest miniaturowym pierwowzorem sygnału sondującego dużej mocy. Nadajniki obcowzbudne umożliwiają stosowanie techniki kodowania

oraz techniki kompresji impulsu, umożliwiając szybki przeskok na inną częstotliwość (przestrajanie częstotliwości) w pewnym pasmie częstotliwości. Z tej możliwości korzystają głównie radary wojskowe, w których zbyt długie nadawanie na tej samej częstotliwości umożliwia wykrycie źródła promieniowania przez urządzenia wroga. Nadajniki samowzbudne są stosowane w starszych typach radarów. Źródłem sygnału sondującego w takich radarach jest sam nadajnik, wytwarzając od razu impuls bardzo wysokiej częstotliwości dużej mocy. Funkcję nadajnika jako wzmacniacza sygnału wyjściowego z bloku wzbudzenia, spełniają dzisiaj nadal lampy elektronowe pracujące w towarzystwie rozmaitych układów mikroprocesorowych, które pełnią tylko funkcje pomocnicze. Stosowane są także nadajniki tranzystorowe i nadajniki „rozproszone” zintegrowane z anteną.

Główną funkcją odbiornika jest wzmocnienie echa sygnału sondującego odebranego przez antenę, a następnie jego filtracja, polegająca na maksymalnym wyróżnieniu echa na tle zakłóceń takich jak: szum termiczny, sygnały pochodzące z innych radarów, urządzenia telekomunikacyjne czy kosmiczne źródła promieniowania radiowego. Przez hasło odbiornik rozumianych jest cały szereg urządzeń elektronicznych mających przetworzyć sygnał do postaci, w której może przyjąć postać cyfrową. Dodatkowym źródłem szumu są same urządzenia odbiornika. Szum ten związany jest on z chaotycznym w pewnym stopniu ruchem nośników prądu i jest tym większy, im wyższa jest temperatura.

Radar jak i wiele innych urządzeń został stworzony przede wszystkim na potrzeby związane z obronnością. Wartość bojowa radaru została po raz pierwszy sprawdzona podczas Bitwy o Anglię w roku 1940.

Radary dzielą się na dwuwspółrzędne i trójwspółrzędne. Radary dwuwspółrzędne cały czas dominują jeszcze w zastosowaniu w wojsku, lecz są powoli wypierane przez radary trójwspółrzędne. Radary dwuwspółrzędne mierzą dwie wielkości fizyczne: azymut i odległość do obiektu, natomiast radary trójwspółrzędne wyznaczają dodatkowo wysokość wykrytego obiektu. Radary dwuwspółrzędne i trójwspółrzędne wyznaczają także prędkość radialną wykrywanych obiektów. Funkcję uzupełniającą w stosunku do radarów dwuwspółrzędnych pełnią wysokościomierze. Wysokościomierze są rodzajem radaru, w którym antena wykonuje ruchy w płaszczyźnie pionowej, określając odległość i kąt elewacji (wzniesienie) wykrywanych obiektów, a sama wysokość obliczana jest przez rozwiązanie trójkąta prostokątnego.

Radiolokacja znalazła także ogromne zastosowanie do celów cywilnych. W obecnych czasach technika radarowa jest wykorzystywana do kontroli ruchu lotniczego, kontroli ruchu nawodnego, radarowe mierniki prędkości wykorzystywane przez policję, w meteorologii, jako samochodowe radary kolizyjne oraz do sondowań podpowierzchniowych.

Radary meteorologiczne generalnie nie różnią się od innych rodzajów radarów, dostarczając przede wszystkim dwóch podstawowych informacji: na temat położenia obiektu w przestrzeni i jego prędkości radialnej. Właściwe interpretowanie tych informacji umożliwia prognozę zjawisk pogodowych takich jak trąby powietrzne, huragany, ulewy czy powodzie. Cechą różniącą radar do prognozowań pogody i „zwykły” radar, są rozmiary wykrywanych obiektów w porównaniu do rozmiarów sondującej wiązki radarowej.

Radary znalazły także zastosowanie jako radarowe mierniki prędkości wykorzystywane przez policję, celem sprawdzenia przestrzegania przepisów ruchu drogowego, dotyczących ograniczenia prędkości ruchu pojazdów. Urządzenia te charakteryzuje niewielki zasięg wynoszący około 300 metrów, a także małe rozmiary. Radarowe mierniki prędkości są coraz częściej stosowane razem z kamerą służącą do dokumentowania dowodów naruszenia przepisów ruchu drogowego.

Radary znalazły również zastosowanie jako samochodowe radary antykolizyjne. System składa się z radaru podłączonego do układu sterującego, który steruje takimi układami, jak hamulce, przepustnica silnika, sygnalizacja świetlna czy sygnalizacja dźwiękowa umieszczona na desce rozdzielczej mająca za zadanie ostrzegać kierowcę o ewentualnych zagrożeniach. Z radaru przesyłane są dane do układu sterującego o odległości od poprzedzającego pojazdu oraz prędkości względnej pomiędzy pojazdami, a także z samochodu podawana jest informacja o prędkości własnej i drodze hamowania, zależnej od aktualnych warunków na drodze. W wyniku analizy powyższych danych, układ sterujący decyduje o ewentualnej reakcji zależnej od stopnia zagrożenia.

Georadary są radarami służącymi do sondowań podpowierzchniowych. Urządzenia te są wykorzystywane do wykrywania i lokalizowania położonych pod ziemią obiektów takich jak: wodociągi, kable energetyczne i telekomunikacyjne oraz kanalizacja. Georadary są również stosowane w badaniach archeologicznych, geofizycznych, czy w kryminalistyce. Georadary są radarami impulsowymi. Grunt ziemski charakteryzuje się znacznym tłumieniem, tłumienie to zmienia się w szerokich granicach w zależności od jego składu oraz częstotliwości użytej fali. Ogromne znaczenie na tłumienie fal, ma zawartość wody w skałach. Głębokość na jaką mogą dotrzeć fale elektromagnetyczne jest uzależniona od warunków panujących w danym miejscu. Dla częstotliwości rzędu MHz odbierane są echa odbitych sygnałów z głębokości 5 – 10 m, natomiast w przypadku sygnałów o częstotliwości rzędu GHz, rejestrowane są fale z głębokości 0,5 m. Prędkość propagacji fal wnikających w ziemski grunt wynosi od 0,2 do 0,4 prędkości światła, co musi być uwzględnione do poprawnego wyznaczenia głębokości, na jakiej znajduje się badany obiekt. W 1972 roku przeprowadzono sondowania podpowierzchniowe Księżyca ze statku kosmicznego Apollo 17, przy użyciu fal elektromagnetycznych o częstotliwościach 5, 15 oraz 150 MHz. Sondowanie przy wykorzystaniu fal elektromagnetycznych o częstotliwości 5 MHz sięgało na głębokość około 1300 m, dzięki znacznie mniejszemu tłumieniu fal elektromagnetycznych przez skały księżycowe niż przez skały ziemskie.

Radary są również powszechnie używane w systemach kontroli ruchu lotniczego. Spośród systemów kontroli ruchu lotniczego, rozróżniamy radary służące do kontroli tras przelotów, radary kontroli rejonu lotniska oraz radary lądowania. Radary z dwóch pierwszych kategorii różnią się od siebie przede wszystkim zasięgiem i pułapem wykrywania obiektów i dlatego też można je zakwalifikować do jednej grupy radarów kontroli lotów.

Radary kontroli lotów budową i wyglądem zewnętrznym przypominają radary stacjonarne wykorzystywane do celów wojskowych. Składają się z dużej anteny reflektorowej

obracającej się wokół własnej osi w płaszczyźnie poziomej z prędkością obrotową, od kilku do kilkudziesięciu obrotów na minutę. Radary kontroli lotów instalowane na lotniskach muszą mieć możliwość jednoczesnego śledzenia wielu obiektów. Na większych lotniskach, na których występuje intensywny ruch samolotów, ruch pojazdów pomocniczych, autobusów dowożących i odwożących pasażerów, stosowane są radary do obserwacji powierzchni lotniska. Niekontrolowany ruch wszystkich wymienionych obiektów może okazać się bardzo niebezpieczny, zwłaszcza podczas mgły bądź silnych opadów deszczu. Radary do obserwacji powierzchni lotniska nie muszą się charakteryzować dużym zasięgiem, lecz muszą poprawnie funkcjonować podczas silnych zakłóceń atmosferycznych oraz wykazywać dużą rozróżnialność obserwowanych obiektów.

Oddzielną grupę radarów kontroli ruchu lotniczego tworzą radary precyzyjnego podejścia do lądowania. Radary te są niezmiernie przydatne, zwłaszcza podczas trudnych warunków atmosferycznych bądź w przypadku nieprawidłowego działania pokładowych urządzeń nawigacyjnych. Radary precyzyjnego podejścia do lądowania są montowane przy pasie startowym i składają się przeważnie z dwóch radarów, z których jeden kontroluje przestrzeń w pionie (elewacja), a drugi w poziomie (azymut). Rolą tych radarów jest pomiar „odchyłek” pozycji lądującego samolotu od wyznaczonego kursu (w azymucie) oraz ścieżki schodzenia (w elewacji) [13]. Kontroler lotu dysponując tymi danymi, przekazuje pilotowi instrukcje pozwalające wprowadzić korekty dotyczące prawidłowego podchodzenia do lądowania. Radary precyzyjnego podejścia do lądowania są sukcesywnie wypierane przez instrumentalne systemy kontroli lądowania, charakteryzujące się większą precyzją wyznaczanych parametrów. Systemy kontroli lądowania wykorzystują wzorcowe sygnały wysyłane z ziemi, które po odebraniu przez aparaturę pokładową dają pilotowi dokładną informację na temat położenia samolotu względem pasa startowego.

Niezwykle przydatnymi systemami radiolokacyjnymi są radary wtórne, których idea wywodzi się z wojskowych systemów rozpoznawania „swój-obcy”. W radiolokacji wtórnej wykorzystywana jest kodowana łączność radiowa pomiędzy radarem a samolotem. Radar wysyła w kierunku samolotu zakodowany ciąg impulsów, a następnie sygnał ten jest odbierany przez pokładowe urządzenie zwane transponderem, które z kolei wysyła odpowiedź do radaru. Tego typu dialog między radarem a samolotem jest bardziej pożyteczny niż standardowa radiolokacja, gdyż umożliwia przekazywanie większej liczby informacji, takich jak: prędkość, położenie, przekazywanie informacji na temat wysokości lotu zmierzonej na pokładzie samolotu, przekazywanie numeru rejsu samolotu, informacji o ewentualnych sytuacjach awaryjnych, takich jak awaria łączności czy akcja terrorystyczna.

Radary znalazły również szerokie zastosowanie w nawigacji morskiej. Radary kontroli ruchu nawodnego służą do wykrywania statków nawodnych, charakteryzujących się dużymi powierzchniami odbicia fal elektromagnetycznych. Radary montowane na okrętach muszą zapewniać ciągłość wykrywania obiektów w warunkach nieustannych przechyłów statku [9,13].

Radary wykorzystują do swojej pracy częstotliwości z zakresu fal radiowych, jak i mikrofal. Efekty biologiczne działania fal z tego zakresu częstotliwości zostały opisane w

poprzednich rozdziałach. W przypadku radarów mamy do czynienia z innym rodzajem emisji elektromagnetycznej. O ile w przypadku telefonii ruchomej (telefonii komórkowej) i radiokomunikacji rozsiewczej (stacje radiowe i telewizyjne) promieniowanie elektromagnetyczne jest często emitowane w jak najszerszym zakresie w płaszczyźnie poziomej, przyjmując charakterystykę kształtowaną w płaszczyźnie pionowej, to w przypadku radarów promieniowanie formowane jest w wąskie wiązki zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej. Promieniowanie ma charakter krótkich impulsów o znacznej mocy (rzędu kW lub MW w impulsie).

## 7. Linie i stacje elektroenergetyczne

Pola elektromagnetyczne towarzyszą przesyłaniu energii elektrycznej. W Polsce do przesyłania energii stosuje się częstotliwość 50 Hz. Zanim energia elektryczna dotrze do naszych domów, miejsc pracy, czy innych odbiorców energii elektrycznej, najpierw musi zostać wytworzona a następnie przetransportowana. Do transportu energii służą linie i stacje elektroenergetyczne.

Stosowane do przesyłu energii elektrycznej napięcia dzieli się na kilka grup:

- napięcia niskie (nn) do 1 kV (230 V, 400 V, 500 V),
- napięcia średnie (NS) od 1 kV do 60 kV (6, 10, 15, 20, 30 kV, rzadko 40 i 60 kV),
- napięcia wysokie (NW) (110 kV),
- napięcia najwyższe (NN) (220 kV, 400 kV, 450 kV),
- napięcia ultrawysokie (UWN lub UHV) (750 kV i wyższe).



Zdjęcie 7.1 Linie elektroenergetyczne i w tle stacja elektroenergetyczna [23].

Napięcia niskie stosowane są do przesyłania energii do odbiorców indywidualnych (230 V, 400 V). Rozdział energii elektrycznej dokonuje się liniami napowietrznymi lub kablowymi o napięciach znamionowych od 6 kV do 110 kV, natomiast przesył energii odbywa się liniami o napięciach 220 kV i 400 kV. Do przesyłu energii na większe odległości stosuje się wyższe napięcia (220 kV i 400 kV). Dlaczego podnosi się wartość napięć pracy linii elektroenergetycznych? Podstawową przyczyną powstawania strat przesyłu energii elektrycznej jest nagrzewanie się przewodów spowodowane przepływem prądu. Chcąc ograniczyć straty

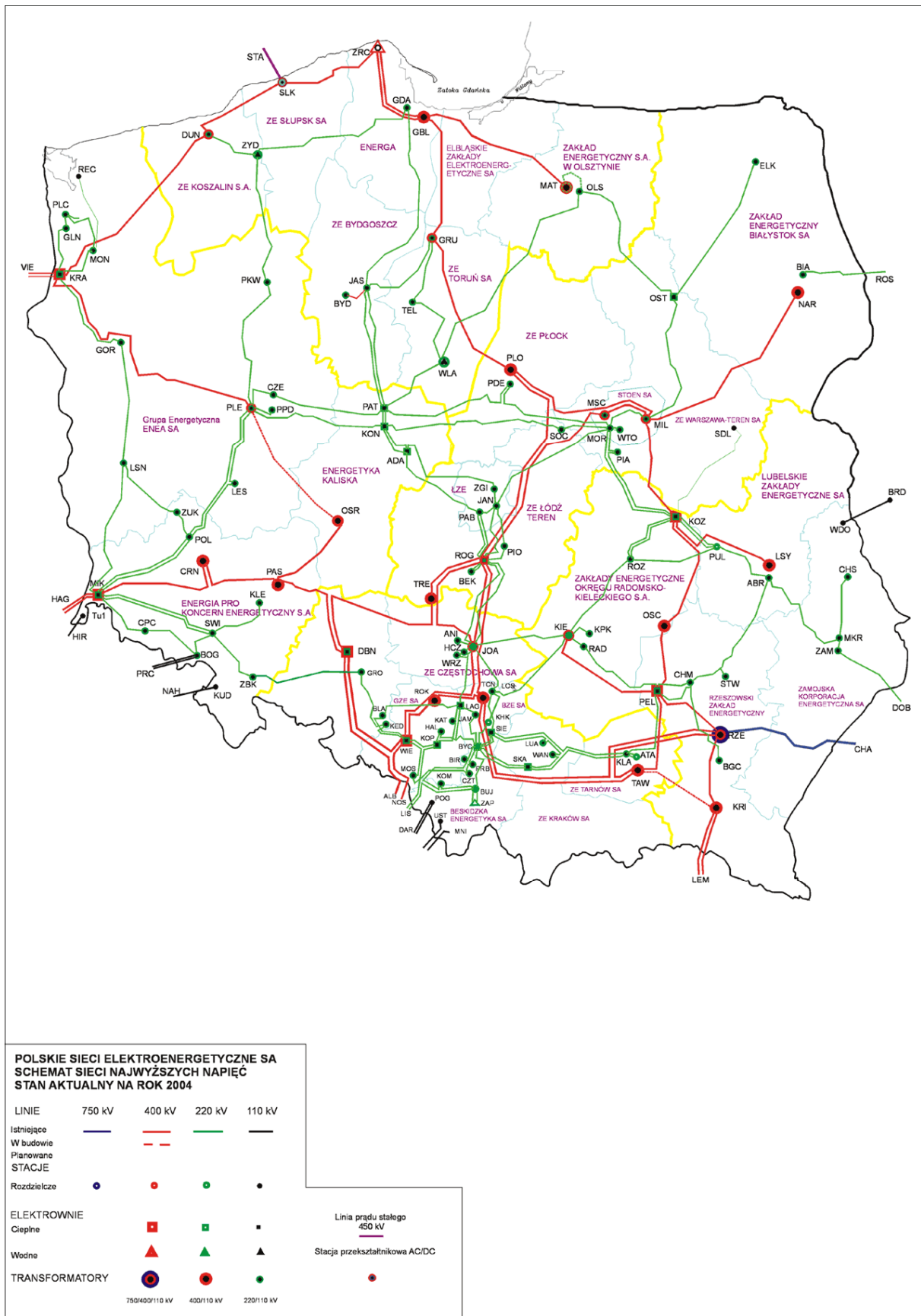
cieplne stosuje się podwyższanie napięć pracy linii elektroenergetycznych [14]. Poza liniami o napięciu znamionowym wynoszącym 400 kV istnieje w Polsce 114 km odcinek linii energetycznej o napięciu 750 kV łączącej stację Rzeszów - Widelka z elektrownią atomową Chmielnicka na Ukrainie. Istnieje również podmorska linia elektroenergetyczna na prąd stały łącząca dwa kraje Polskę i Szwecję (Słupsk-Starno), układ pracuje na napięciu 450 kV. Długość kabla wynosi 250 km, z czego 230 km przebiega w części podmorskiej.

Niezbędną część systemu przesyłu energii elektrycznej stanowią stacje elektroenergetyczne. Stacje elektroenergetyczne mają na celu przetworzenie i rozdział energii elektrycznej o żądanych parametrach pomiędzy poszczególnych odbiorców, przy zachowaniu odpowiedniej pewności dostaw [10]. Stacje elektroenergetyczne transformujące energię elektryczną o napięciu 110 kV na średnie napięcia nazywane są Głównym Punktem Zasilania. Często charakteryzując stację elektroenergetyczną podaje się najwyższe napięcie na jakim stacja elektroenergetyczna pracuje.

W Polsce oprócz wspomnianego 114 km odcinka linii o napięciu pracy 750 kV istnieją 53 linie o napięciu 400 kV i łącznej długości ok. 4791 km, 165 linii 220 kV o łącznej długości ok. 7875 km, 32391 km linii 110 kV, 282201 km linii SN i 400557 km linii nn [15]. Linie łączy 77 stacji o górnym napięciu 220 kV, 29 stacji o górnym napięciu 400 kV (w tym jedna z przetwarzaniem AC/DC - Słupsk) i jedna stacja o górnym napięciu 750 kV (Rzeszów - Widelka). Poniższy rysunek przedstawia mapę sieci linii i stacji elektroenergetycznych, z zaznaczonymi transformatorami oraz elektrowniami.

Linie o średnich napięciach (SN) wywarzają pola elektromagnetyczne o pomijalnie małym natężeniu. Pola o większych natężeniach wywarzają linie i stacje elektroenergetyczne pracujące na napięciach 110 kV, 220 kV i 400 kV.

O ile w przypadku telefonii ruchomej, stacji radiowych i telewizyjnych, radiolinii i urządzeń radiolokacyjnych, emisja promieniowania elektromagnetycznego jest efektem zamierzonym, to w przypadku przesyłu energii elektrycznej stanowi efekt uboczny. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię i tym samym rozbudową systemu przesyłu energii powstało pytanie czy wytwarzane w ten sposób pola elektromagnetyczne nie niosą ze sobą zagrożeń dla człowieka i środowiska. Fale elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 50 Hz niosą ze sobą zbyt małą energię by móc wywołać zjawisko jonizacji. Składowa elektryczna promieniowania z tego zakresu jest dość silnie tłumiona przez ciało człowieka (ok.  $10^6$  razy). Ekspozycja na zewnętrzne pole elektryczne o częstotliwości 60 Hz i natężeniu 1 kV/m powoduje powstawanie w organach wewnętrznych pola o wartości 1-3 mV/m. By wywołać znaczące skutki biologiczne np. skręcenie cząsteczki białka wymagane są pola elektryczne o natężeniu rzędu  $10^9$  V/m [16]. Liczne badania nie stwierdziły wpływu na zdrowie człowieka pola elektrycznego z zakresu ELF o wartościach spotykanych w środowisku. Dla zakresu tej częstotliwości dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego dla terenów dostępnych dla ludności wynosi  $10$  kV/m, a dla obszarów zamieszkałych przez ludność  $1$  kV/m.



Rysunek 7.2 Schemat sieci najwyższych napięć w Polsce na rok 2004 [21].



W praktyce np. dla linii o napięciu znamionowym 110kV na przynajmniej 40% trasy linii natężenie pola elektrycznego nie przekracza  $1kV/m$  [1]. Pole elektryczne jest silnie tłumione przez budynki i w środku budynków natężenia pól elektrycznych są znikomo niskie.

Inaczej sytuacja przedstawia się w przypadku pola magnetycznego z zakresu częstotliwości ELF. Na początku lat 70-tych i 80-tych pojawiły się doniesienia o prawdopodobnym związku ekspozycji na pola magnetyczne z zachorowalnością dzieci na białaczkę. Od tego czasu wykonano mnóstwo badań epidemiologicznych ryzyka zachorowalności na nowotwory i na podstawie tych badań w 2002 roku Międzynarodowa Agencja Badań Nad Rakiem (IARC) uznała pola „magnetyczne z zakresu ELF za przypuszczalnie rakotwórcze dla ludzi (grupa 2B), uznając że istnieje ograniczony dowód działania rakotwórczego tych pól u ludzi, bez wystarczających dowodów rakotwórczości u zwierząt [16]. Odwrotnie do pól elektrycznych pola magnetyczne bez problemu przenikają przez ludzkie ciało czy budynki, a ich natężenie w głównej mierze zależy od odległości od źródła. Ludzie zdecydowanie lepiej znoszą stałe pola magnetyczne, pewnie dlatego, iż stałe pola magnetyczne są polami występującymi w sposób naturalny w środowisku.

## 8. Inne źródła promieniowania elektromagnetycznego

Poza wymienionymi źródłami pól elektromagnetycznych, mającymi największy wkład w wprowadzaniu energii promieniowania elektromagnetycznego do środowiska, istnieje jeszcze cała gama innych urządzeń emitujących pola elektromagnetyczne.

Jedną z grup urządzeń są urządzenia do zastosowań przemysłowych. Do urządzeń z tej grupy należą piece elektryczne, piece indukcyjne, sprzęt elektroiskrowy, spawarki, urządzenia do zgrzewania opakowań, hartowania, lutowania, topienia, produkcji materiałów półprzewodnikowych, suszenia, mierniki mikrofalowe, urządzenia do obróbki gastronomicznej, czy kuchenki mikrofalowe. Powyżej wymienione urządzenia wytwarzają pola elektromagnetyczne z różnych zakresów częstotliwości, od fal radiowych krótkich po mikrofałe. Stosowane moce wahają się od setek watów do setek kilowatów. Promieniowane pole elektromagnetyczne jest na ogół kształtowane. Wartości natężenia pola elektromagnetycznego na ogół nie osiąga istotnych wartości poza terenami zakładów pracy, a pomieszczenia w których te urządzenia są zainstalowane niekiedy są ekranowane.

Drugą grupę urządzeń stanowią urządzenia do zastosowań medycznych. Wśród tych urządzeń największe natężenia pól elektromagnetycznych wytwarzają diatermie krótkofalowe i mikrofalowe oraz rezonans magnetyczny. Diatermie krótkofalowe pracują na częstotliwościach 13 MHz, 27 MHz, 40 MHz a mikrofalowe na częstotliwościach 430 MHz, 915 MHz, 2,3 GHz, 2,4 GHz. Urządzenia emitują promieniowanie elektromagnetyczne o mocach od kilku do setek watów i poza pomieszczeniami, w których są zainstalowane, natężenia pól nie osiągają znaczących wartości.

Następną grupą urządzeń są urządzenia bezpieczeństwa np. czujki mikrofalowe. W tych urządzeniach stosuje się pola stacjonarne bądź impulsowe, a stosowane moce nie przekraczają kilkudziesięciu watów.

Kolejną grupę urządzeń tworzą urządzenia łączności osobistej, urządzenia radiodostępowe i radiolinie (urządzenia do transmisji danych). Do urządzeń łączności osobistej zaliczana jest telefonia komórkowa, jak i radiotelefony. Radiotelefony mają tę przewagę nad telefonią komórkową, że komunikują się między sobą bezpośrednio nie potrzebując żadnej infrastruktury, dlatego używają jej służby profesjonalne: straż pożarna, policja, wojsko. Do celów osobistych zostało wydzielone pasmo w zakresie częstotliwości od 26,96 MHz do 27,4 MHz wykorzystywanym przez CB-radio.

Radiolinie są urządzeniami typu punkt-punkt i służą do przesyłania danych z jednego punktu do drugiego. Są wykorzystywane między innymi w telefonii komórkowej. Radiolinie są urządzeniami pracującymi w zakresie mikrofal 7GHz, 13GHz, 15GHz, 18GHz, 23GHz, 38GHz, osiągających zasięg do 40-50 km. Promieniowanie elektromagnetyczne w radioliniach jest formowane często w bardzo wąskie wiązki, dlatego też obszary występowania pól o istotnych wartościach są ograniczone.

Urządzenia radiodostępowe (systemy abonenckiego dostępu radiowego, do przekazu danych) pracują w zakresach częstotliwości 2-3 GHz oraz 20-30 GHz i mogą stanowić źródła o istotnych poziomach pól elektromagnetycznych z punktu widzenia ochrony środowiska [1].

## 9. Wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych w środowisku

Niniejszy rozdział przedstawia wyniki pomiarów poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, wykonane na przestrzeni 13 lat, od 1993 do 2006 roku. Pomiary zostały wykonane przez laboratorium Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, laboratorium Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego, laboratorium Instytutu Energetyki oraz laboratoria Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska.

### 9.1 Wyniki pomiarów wykonanych przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

W latach 2001-2003 na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych przeprowadził pomiary pól elektromagnetycznych w sześciu dużych miastach na terenie Polski, wykorzystując aparaturę pomiarową typu Rohde Schwarz. Wykonano pomiary natężenia pola elektrycznego i natężenia pola magnetycznego w zakresie częstotliwości od 0,1 MHz do 10 MHz; natężenia pola elektrycznego w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 300 MHz oraz gęstości mocy w zakresie częstotliwości od 300 MHz do 2000 MHz (uzyskane wyniki gęstości mocy zostały przeliczone na wartości natężenia pola elektrycznego).

Pomiary przeprowadzono w różnych miejscach na terenie miast dla częstotliwości od 100 kHz do 10 MHz, średnie wartości natężenia pola magnetycznego wahały się w przedziale od 0,036 A/m do 0,253 A/m (wykres 9.2), natomiast średnie wartości natężenia pola elektrycznego w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 10 MHz wahały się w przedziale 0,049 V/m do 0,709 V/m (wykres 9.3). Najwyższy średni poziom natężenia pola magnetycznego zanotowano w Warszawie, a najniższy w Szczecinie. Zdecydowanie najwyższe średnie poziomy natężenia pola elektrycznego w tym zakresie częstotliwości zarejestrowano dla miasta Warszawy (0,709 V/m), podczas gdy następne co do wielkości średnie natężenia pola elektrycznego zanotowano w Poznaniu (0,228 V/m) i w Łodzi (0,113 V/m), a najniższe w Gdańsku. Tak duża różnica w poziomie pól elektromagnetycznych pomiędzy Warszawą a drugim w kolejności miastem -Poznaniem, wynika z faktu, iż pod Warszawą w miejscowości Łazy jest zlokalizowana stacja nadawcza Warszawa-Raszyn nadająca audycje na częstotliwości 198 kHz.

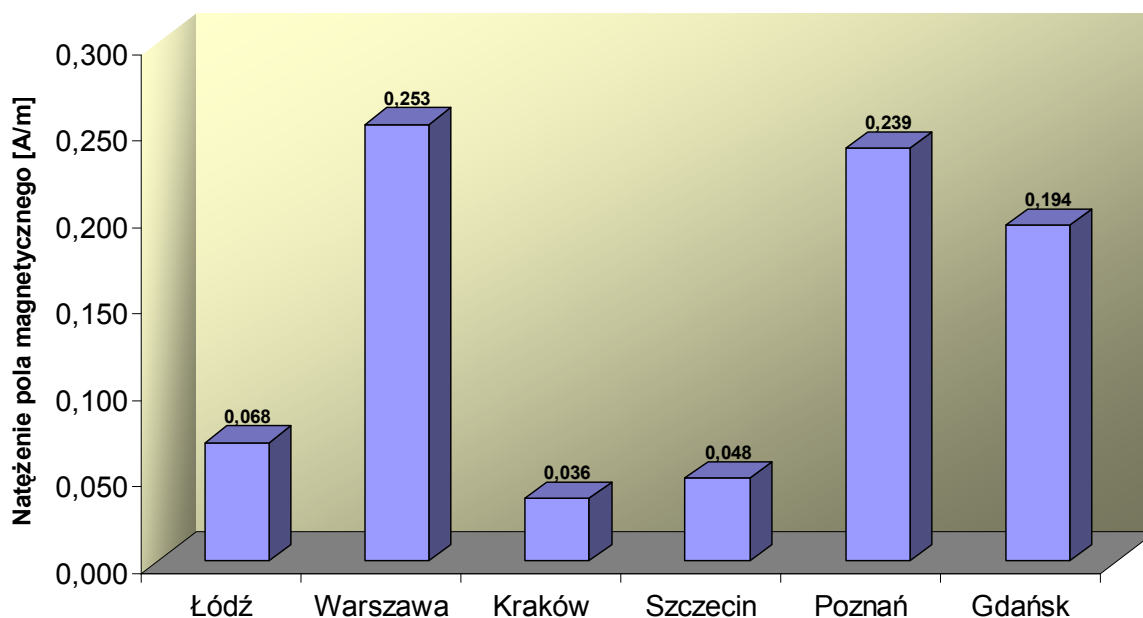
W zakresie częstotliwości 10 MHz - 300 MHz, zmierzone średnie wartości natężenia pola elektrycznego wahały się w przedziale od 0,072 V/m do 0,292 V/m (wykres 9.4). Najniższe średnie natężenie zanotowano w Poznaniu, natomiast najwyższe w Warszawie. Wysokie poziomy pól elektromagnetycznych zmierzone w Warszawie wynikają z lokalizacji punktów pomiarowych wokół Pałacu Kultury i Nauki, na którym znajduje się wiele anten radiowo-telewizyjnych.

Dla częstotliwości z zakresu 0,3 GHz – 2 GHz średnie wartości natężenia pola elektrycznego wahały się w przedziale od 0,132 V/m do 0,256 V/m (wykres 9.5). Najniższą wartość średniej gęstości mocy zmierzono w Szczecinie, natomiast najwyższą wartość w

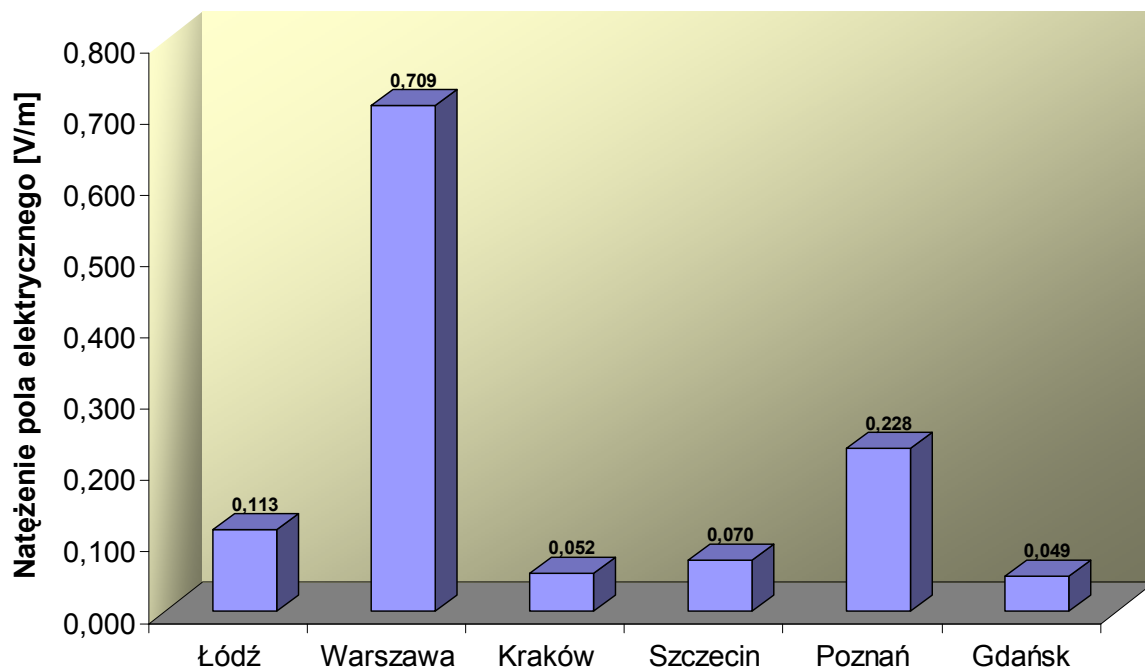
Gdańsku. Różnice średnich natężeń pól elektrycznych pomiędzy poszczególnymi miastami nie są znaczne, co świadczy o tym, iż zagęszczenie stacji bazowych w miastach, w których przeprowadzono pomiary, jest równomierne [17, 26].

| Miasto   | H (0,1÷10 MHz) | E (0,1÷10 MHz) | E (10÷300 MHz) | E (300÷2000 MHz) |
|----------|----------------|----------------|----------------|------------------|
|          | [ A/m ]        | [ V/m ]        | [ V/m ]        | [ V/m ]          |
| Łódź     | 0,068          | 0,113          | 0,212          | 0,160            |
| Warszawa | 0,253          | 0,709          | 0,292          | 0,229            |
| Kraków   | 0,036          | 0,052          | 0,195          | 0,200            |
| Szczecin | 0,048          | 0,070          | 0,127          | 0,132            |
| Poznań   | 0,239          | 0,228          | 0,072          | 0,182            |
| Gdańsk   | 0,194          | 0,049          | 0,102          | 0,256            |

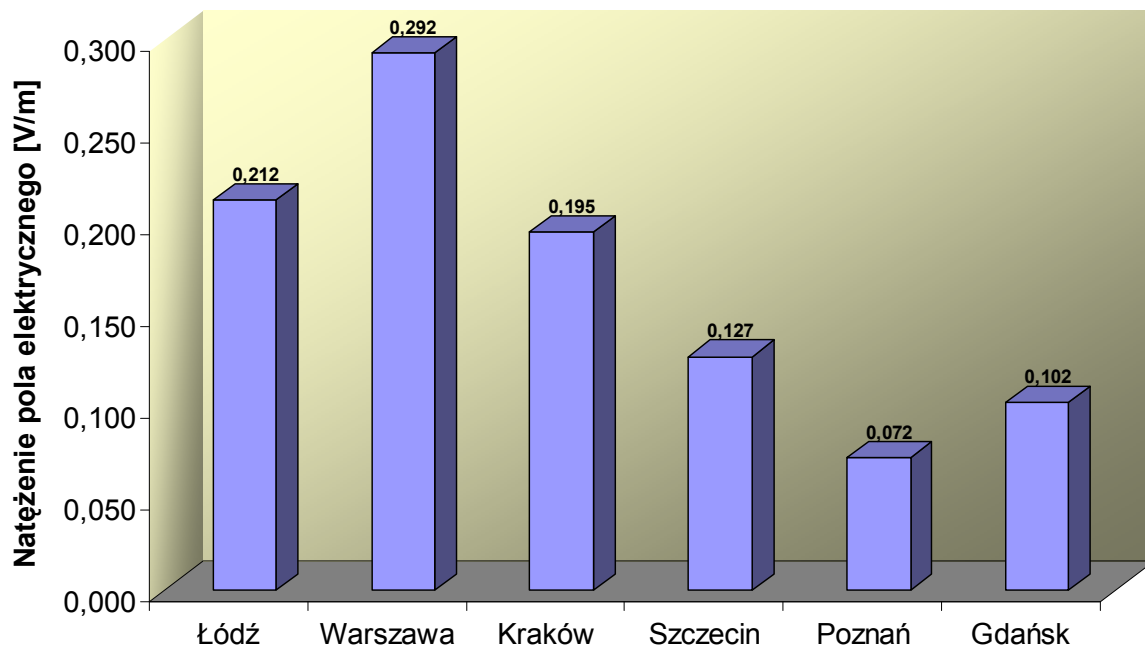
Tabela 9.1 Porównanie wyników średnich natężeń pola elektromagnetycznego w poszczególnych miastach.



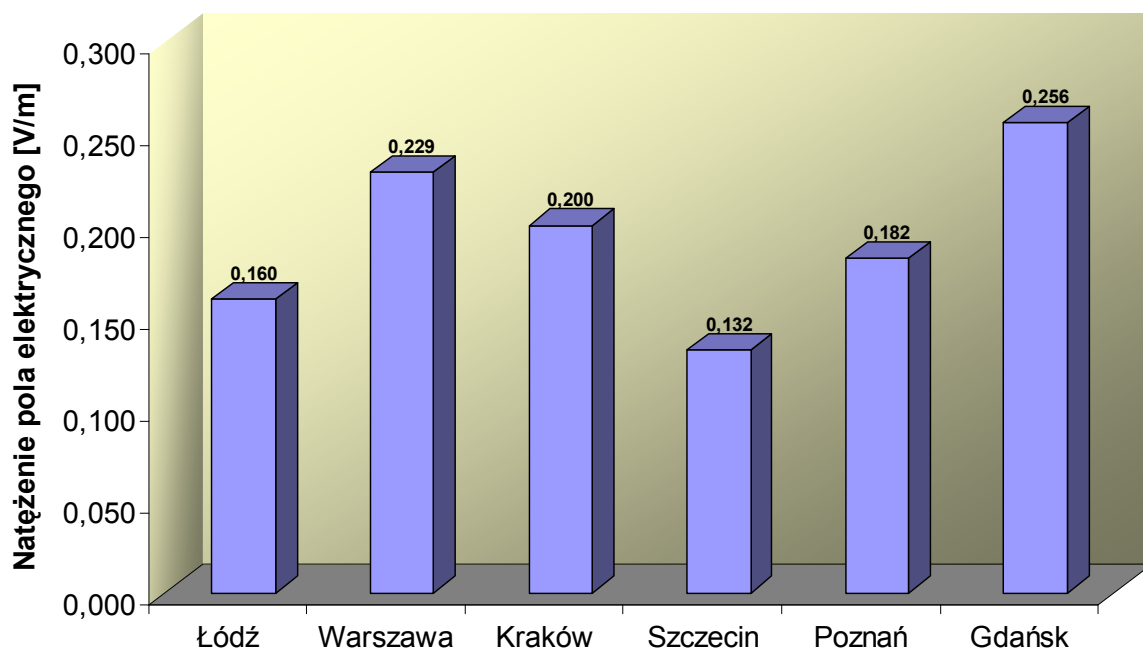
Wykres 9.2 Porównanie wyników średniej arytmetycznej natężenia pola magnetycznego z zakresu częstotliwości od 100 kHz do 10 MHz dla poszczególnych miast, zmierzonych w latach 2001-2003 przez ITWL.



Wykres 9.3 Porównanie wyników średniej arytmetycznej natężenia pola elektrycznego z zakresu częstotliwości od 100 kHz do 10 MHz dla poszczególnych miast, zmierzonych w latach 2001-2003 przez ITWL.



Wykres 9.4 Porównanie wyników średniej arytmetycznej natężenia pola elektrycznego z zakresu częstotliwości od 10 MHz do 300 MHz dla poszczególnych miast, zmierzonych w latach 2001-2003 przez ITWL.

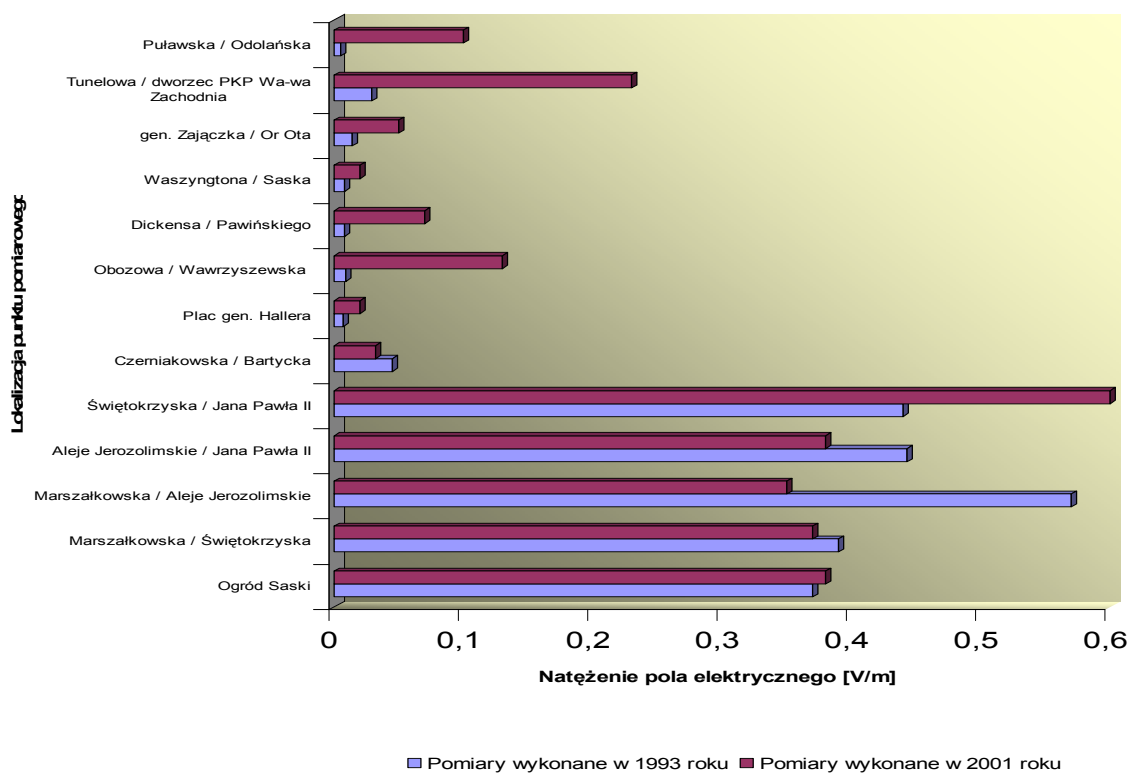


Wykres 9.5 Porównanie wyników średniej arytmetycznej natężenia pola elektrycznego z zakresu częstotliwości od 300 MHz do 2000 MHz dla poszczególnych miast, zmierzonych w latach 2001-2003 przez ITWL.

W 2001 roku Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych wykonał pomiary na terenie miasta Warszawy, w tych samych punktach, w których wykonano pomiary w 1993 roku. Uzyskane wyniki obrazują brak zmiany poziomów pól elektromagnetycznych w punktach usytuowanych wokół Pałacu Kultury i Nauki, na którym zamontowane są liczne anteny radiowo-telewizyjne. W punktach oddalonych od PKiN zanotowano kilku, kilkunastokrotny wzrost poziomów promieniowania elektromagnetycznego w stosunku do wyników pomiarów przeprowadzonych w 1993 roku i 2001 roku. Tak duże zwiększenie poziomów PEM jest spowodowane rozwojem w połowie lat 90 telefonii komórkowej. Dla zakresu częstotliwości od 80 MHz do 1300 MHz dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego w środowisku zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 30 października 2003 r. wynosi 7 V/m [12]. Z wyników umieszczonych w tabelce 9.6 wynika, iż natężenia pól elektrycznych zmierzonych na terenie Warszawy w zakresie częstotliwości 80 MHz – 1300 MHz, wahają się w granicach od 0,07% do 8,57% dopuszczalnych wartości.

| Nr punktu | Miejsce pomiaru                        | Współrzędne geograficzne |            | E (80÷1300 MHz) | E (80÷1300 MHz) |
|-----------|--|--------------------------|------------|-----------------|-----------------|
|           |  | N                        | E          | 1993 r.         | 2001 r.         |
|           |  |                          |            | [V/m]           | [V/m]           |
| 1         | Ogród Saski                            | 52° 14'363               | 21° 00'606 | 0,37            | 0,38            |
| 2         | Marszałkowska / Świętokrzyska          | 52° 14'130               | 21° 00'530 | 0,39            | 0,37            |
| 3         | Marszałkowska / Aleje Jerozolimskie    | 52° 13'757               | 21° 00'660 | 0,57            | 0,35            |
| 4         | Aleje Jerozolimskie / Jana Pawła II    | 52° 13'723               | 21° 00'078 | 0,443           | 0,38            |
| 5         | Świętokrzyska / Jana Pawła II          | 52° 14'042               | 20° 59'833 | 0,44            | 0,6             |
| 6         | Czerniakowska / Bartycka               | 52° 12'732               | 21° 02'874 | 0,045           | 0,032           |
| 7         | Plac gen. Hallera                      | 52° 15'620               | 21° 01'659 | 0,007           | 0,02            |
| 8         | Obozowa / Wawrzyszewska                | 52° 14'746               | 20° 57'719 | 0,009           | 0,13            |
| 9         | Dickensa / Pawińskiego                 | 52° 12'246               | 20° 58'540 | 0,008           | 0,07            |
| 10        | Waszyngtona / Saska                    | 52° 14'307               | 21° 03'312 | 0,008           | 0,02            |
| 11        | gen. Zajęczka / Or Ota                 | 52° 15'675               | 20° 59'159 | 0,014           | 0,05            |
| 12        | Tunelowa / dworzec PKP Wa-wa Zachodnia | 52° 13'257               | 20° 57'808 | 0,029           | 0,23            |
| 13        | Puławska / Odolańska                   | 52° 12'206               | 21° 01'333 | 0,005           | 0,1             |

Tabela 9.6 Porównanie wyników pomiarów wykonanych przez ITWL w roku 1993 i 2001 na terenie Warszawy.



Wykres 9.7 Porównanie wyników pomiarów wykonanych przez ITWL w roku 1993 i 2001 na terenie Warszawy w zakresie częstotliwości od 80 MHz do 1300 MHz.



Zmierzone wielkości składowej elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego nie przekraczają dopuszczalnych wartości określonych w polskich i unijnych przepisach dotyczących ochrony środowiska przed promieniowaniem elektromagnetycznym [12, 29].

## 9.2 Wyniki pomiarów wykonanych przez Instytut Energetyki

W 2005 roku na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, Instytut Energetyki przeprowadził pomiary pól elektromagnetycznych w sześciu punktach na terenie Warszawy i Poznania, oraz w trzech punktach: w mieście ok. 50 tys. mieszkańców, w mieście ok. 15 tys. mieszkańców i w terenie zamiejskim, wykorzystując do pomiarów miernik pola elektromagnetycznego produkcji firmy Wandel&Goltermann (Narda) typu NMR-200 wyposażony w sondę typu 11.3 o dookólnej charakterystyce, mierzącym w zakresie częstotliwości od 27 MHz do 60 GHz. Wyniki pomiarów przedstawia poniższa tabela.

| Nazwa punktu pomiarowego       | Średnia arytmetyczna zmierzonych wartości natężenia pola elektrycznego [V/m] |
|--------------------------------|--|
| Warszawa ul. Ciepła            | 0,66   |
| Warszawa ul. Obozowa           | 0,56   |
| Warszawa, al. Jerozolimskie    | 1,11   |
| Warszawa, ul. Wawelska         | 0,48   |
| Poznań, ul. Dąbrowskiego       | 0,66   |
| Poznań, ul. Bułgarska          | 0,46   |
| Miasto ok. 50 tys. mieszkańców | 0,62   |
| Miasto ok. 15 tys. mieszkańców | 0,36   |
| Obszar zamiejski               | 0,36   |

Tabela 9.8 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego zmierzonych w 9 punktach pomiarowych.

Wyniki pomiarów wykonane przez Instytut Energetyki wykazują zgodność z wynikami pomiarów wykonanymi przez Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych w latach 2001 – 2003. Średnia arytmetyczna wartość natężenia pola elektrycznego zmierzona przez Instytut Energetyki w 2005 roku dla Warszawy, Poznania i miasta liczącego ok. 50 tys. mieszkańców wynosi 0,65 V/m, natomiast średnia arytmetyczna natężenia pola elektrycznego zmierzonego przez ITWL w 2001 roku w siedmiu punktach zlokalizowanych w centralnych dzielnicach Warszawy również wynosi 0,65 V/m (dla zakresu 10 MHz – 2000 MHz). Wyniki pomiarów składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego dla miasta liczącego ok. 15 tys.

mieszkańców i punktu pomiarowego umiejscowionego na terenie obszaru zamiejskiego, kształtują się na tym samym poziomie – 0,36 V/m. Pomiar uzupełniającym, jest pomiar natężenia pola elektrycznego na otwartym terenie w odległości około 1 km od Radiowo Telewizyjnego Centrum Nadawczego Konin-Żółwieniec. Na maszcie zainstalowane są anteny, których równoważna moc promieniowana (ERP) wynosi około 660 kW. Średnia wartość natężenia składowej elektrycznej pola wyniosła tam 1,55 V/m [25].

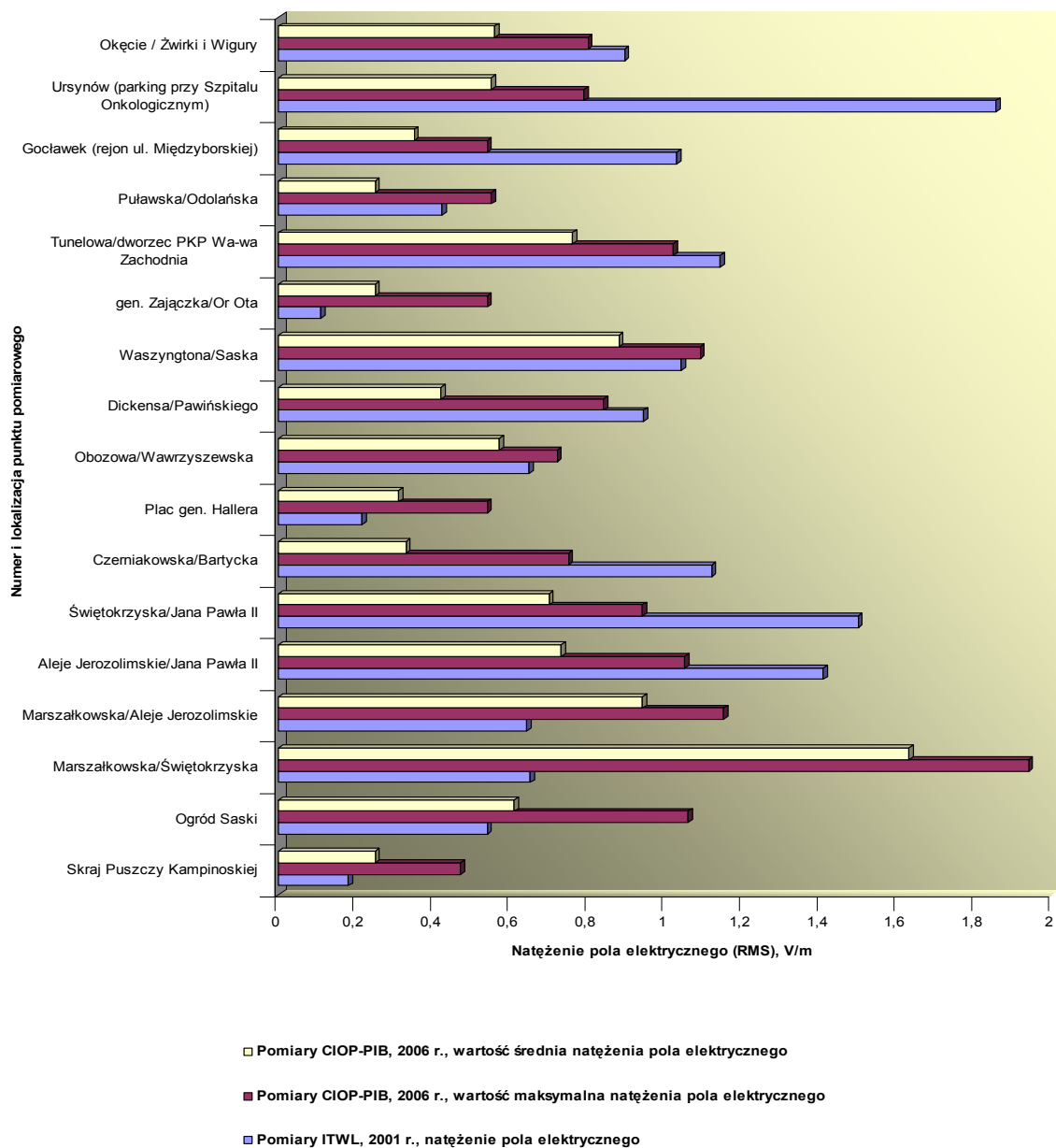
Wyniki pomiarów wykonanych przez Instytut Energetyki nie przekraczają dopuszczalnych wartości poziomów pól elektromagnetycznych, kształtując się na poziomie od 5,2 % do 15,9 % wartości określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów [12].

### ***9.3 Wyniki pomiarów wykonanych przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy***

W 2006 roku Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska wykonał pomiary poziomów pól elektromagnetycznych na terenie Warszawy w tych samych punktach, w których w 2001 roku pomiary wykonywał Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Wykres 9.10 przedstawia zestawienie wyników wykonanych przez CIOP-PIB w 2006 roku sondą mierzącą natężenie pola elektrycznego w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 3 GHz i przeliczonych wyników pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonanych przez ITWL w 2001 r. w zakresie od 100 kHz do 2 GHz. Wartość średniej maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego zmierzonych w poszczególnych 17 punktach pomiarowych wykonanych w 2006 roku przez CIOP-PIB wynosi 0,87 V/m, natomiast wartość średnia wypadkowych wartości natężenia pola elektrycznego zmierzonych w poszczególnych 17 punktach pomiarowych wykonanych w 2001 roku przez ITWL wynosi 0,84 V/m. Powyższe dane wskazują, iż średni poziom natężenia pola elektromagnetycznego na terenie miasta Warszawy nie uległ istotnej zmianie na przestrzeni 2001 i 2006 roku [27].

| Lokalizacja                 | Miejsce pomiaru                               | Współrzędne geograficzne |            | Wartość maksymalna natężenia pola elektrycznego, E <sub>max</sub> | Wartość średnia natężenia pola elektrycznego, E <sub>sr</sub> |
|-----------------------------|---|--------------------------|------------|---|---|
|                             |   | N                        | E          | [V/m]   | [V/m]   |
| (osiedle)                   | (rejon skrzyżowania ulic)                     |                          |            |   |   |
| Izabelin                    | Skraj Puszczy Kampinoskiej                    | 52017'608                | 20049'374  | 0,47  | 0,25  |
| Centrum Śródmieście         | Ogród Saski                                   | 52014'363                | 21000'606  | 1,06  | 0,61  |
| Centrum Śródmieście         | Marszałkowska/Świętokrzyska                   | 520 14'130               | 210 00'530 | 1,94  | 1,63  |
| Centrum Śródmieście         | Marszałkowska/Aleje Jerozolimskie             | 52013'757                | 210 00'660 | 1,15  | 0,94  |
| Centrum Śródmieście         | Aleje Jerozolimskie/Jana Pawła II             | 52013'723                | 210 00'078 | 1,05  | 0,73  |
| Centrum Śródmieście         | Świętokrzyska/Jana Pawła II                   | 52014'042                | 200 59'833 | 0,94  | 0,7   |
| Mokotów - Siekierki         | Czerniakowska/Bartycka                        | 52012'732                | 210 02'874 | 0,75  | 0,33  |
| Praga Północ – Nowa Praga   | Plac gen. Hallera                             | 52015'620                | 210 01'659 | 0,54  | 0,31  |
| Wola - Młynów               | Obozowa/Wawrzyszewska                         | 52014'746                | 200 57'719 | 0,72  | 0,57  |
| Ochota - Rakowiec           | Dickensa/Pawińskiego                          | 52012'246                | 200 58'540 | 0,84  | 0,42  |
| Praga Południe – Saska Kępa | Waszyngtona/Saska                             | 52014'307                | 210 03'312 | 1,09  | 0,88  |
| Żoliborz                    | gen. Zajączka/Or Ota                          | 52015'675                | 200 59'159 | 0,54  | 0,25  |
| Wola - Czyste               | Tunelowa/dworzec PKP Wa-wa Zachodnia          | 52013'257                | 200 57'808 | 1,02  | 0,76  |
| Stary Mokotów               | Puławska/Odolańska                            | 52012'206                | 210 01'333 | 0,55  | 0,25  |
| Praga Południe - Gocław     | Gocławek (rejon ul. Międzyborskiej)           | 52013'879                | 210 05'329 | 0,54  | 0,35  |
| Ursynów – Imielin Stary     | Ursynów (parking przy Szpitalu Onkologicznym) | 52008'877                | 210 02'068 | 0,79  | 0,55  |
| Okęcie - Zbąrz              | Okęcie / Żwirki i Wigury                      | 52010'613                | 200 58'693 | 0,8   | 0,56  |

Tabela 9.9 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego zmierzonych przez CIOP - PIB w 17 punktach pomiarowych na terenie miasta Warszawy.



Wykres 9.10 Zestawienie wyników uzyskanych w poszczególnych punktach pomiarowych na terenie miasta Warszawy przez ITWL (2001 r.) i CIOP-PIB (2006 r.)

Uzyskane wyniki na terenie miasta Warszawy kształtują się znacznie poniżej dopuszczalnych poziomów określonych w polskich przepisach ochrony środowiska, mieszcząc się w przedziale od 6,7 % do 27,7 % dopuszczalnych norm [12].

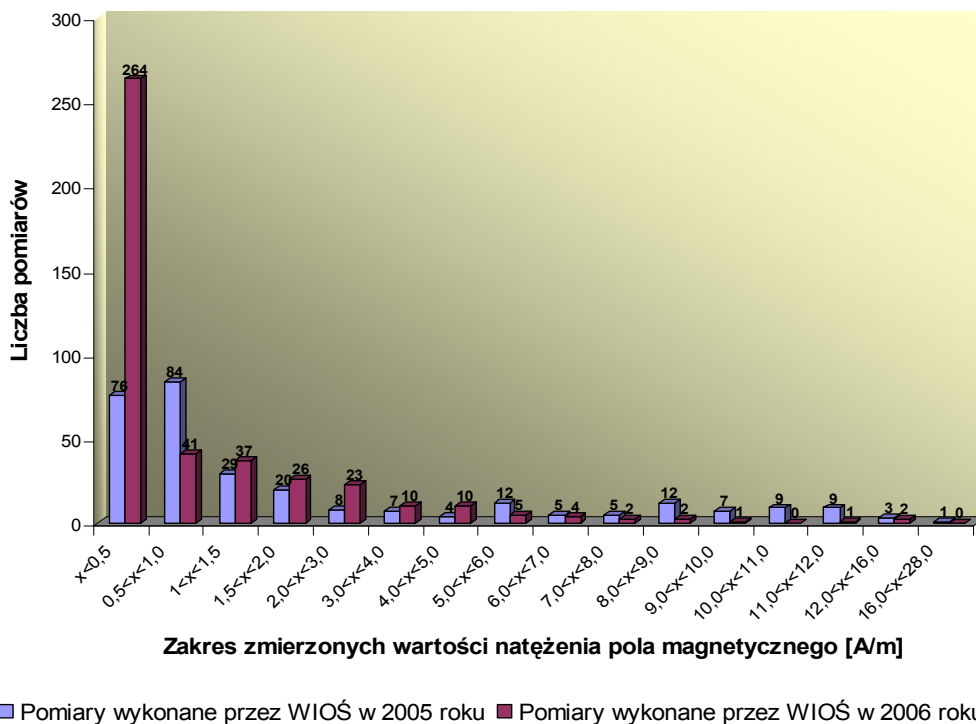
#### **9.4 Wyniki pomiarów wykonanych przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska**

W 2004 Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska zostały wyposażone w mierniki pola elektromagnetycznego (PMM 8053A) wraz z zestawem sond pomiarowych:

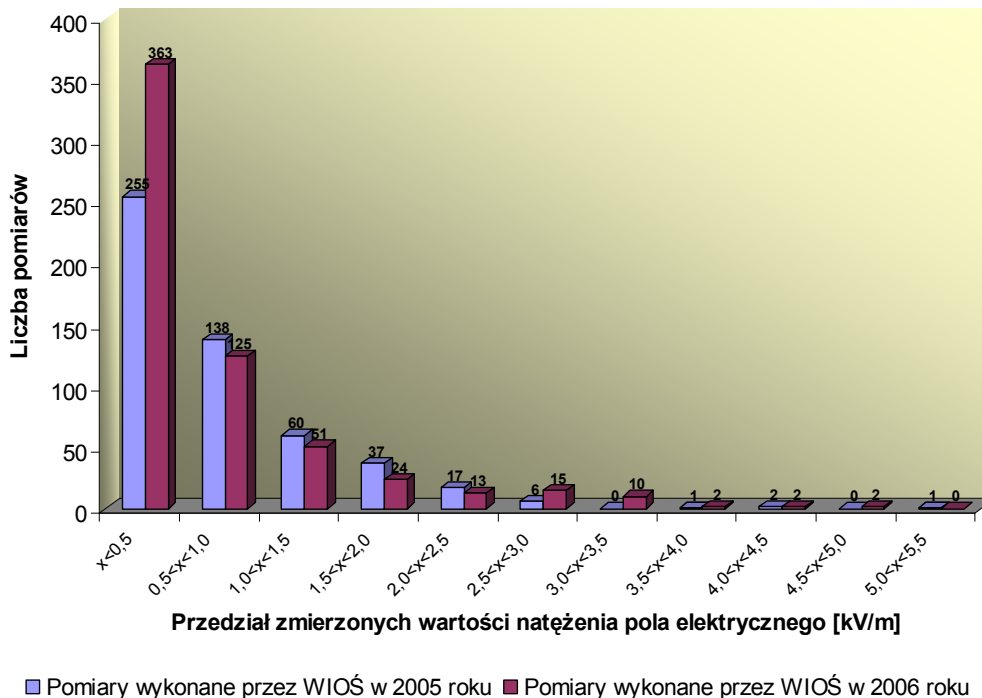
- analizator pola elektrycznego mierzący natężenie pola elektrycznego w zakresach od 0,1 V/m do 100 kV/m dla częstotliwości od 5 Hz do 100 kHz
- analizator pola magnetycznego mierzący indukcję magnetyczną w zakresach od 10 nT do 10 mT dla częstotliwości od 5 Hz do 100 kHz;
- sonda pola elektrycznego EP 105 (zakres częstotliwości 0,1 MHz - 1 GHz, zakres mierzonego natężenia pola elektrycznego 0,05 V/m – 50 V/m)
- sonda pola elektrycznego EP-408 (zakres częstotliwości 1 MHz - 40 GHz, zakres mierzonego natężenia pola elektrycznego 0,8 V/m – 800 V/m).

W 2004 roku wykonywano głównie pomiary o charakterze szkoleniowym natomiast od początku 2005 roku rozpoczęto wykonywanie pomiarów pól elektromagnetycznych o charakterze monitoringowym i kontrolnym.

Dla pomiarów składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego dla częstotliwości 50 HZ (wykres 9.11) wynika, iż zdecydowanie najwięcej wyników pomiarów nie przekraczało wartości 1 A/m. Wyższe poziomy natężenia pola magnetycznego dotyczą przede wszystkim pomiarów wokół silnych źródeł pola magnetycznego, do których należą linie i stacje elektroenergetyczne o napięciu znamionowym 110 kV i wyższym. Najwyższą wartość natężenia pola magnetycznego 27,5 A/m, (co odpowiada 45,8% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]) w 2005 roku zmierzyło laboratorium Mazowieckiego WIOŚ dla linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 400 kV, traktacji Miłosna – Płock. W 2006 roku najwyższą wartość natężenia pola magnetycznego 12,9 A/m (21,5% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności), uzyskano dla traktacji wysokiego napięcia 220 kV i 110 kV. W 2005 roku wartość średniej arytmetycznej z wykonanych pomiarów wynosiła 2,67 A/m (4,45% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana 0,85 A/m (1,42% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), natomiast w 2006 roku średnia arytmetyczna z wykonanych pomiarów wynosiła 0,99 A/m (1,65% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana 0,24 A/m (0,4% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Różnice w uzyskanych wartościach średnich arytmetycznych i medianach dla natężenia pola magnetycznego uzyskanych w latach 2005 i 2006 wynikają z faktu, iż w 2005 roku wykonywano więcej pomiarów w otoczeniu linii i stacji elektroenergetycznych, niż w 2006 roku.



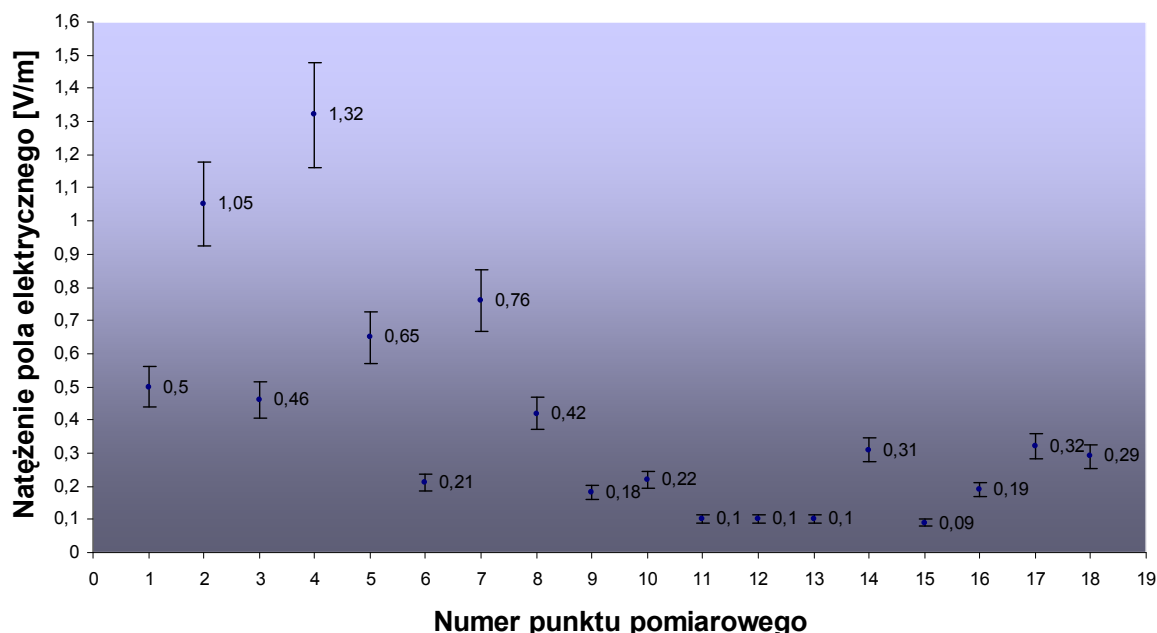
Wykres 9.11 Zestawienie liczby pomiarów natężenia pola magnetycznego wykonanych przez laboratoria Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska w latach 2005 – 2006 dla źródeł o częstotliwości 50 Hz.



Wykres 9.12 Zestawienie liczby pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonanych przez laboratoria Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska w latach 2005 – 2006 dla źródeł o częstotliwości 50 Hz.

Wyniki pomiarów dla składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego dla źródeł o częstotliwości 50 Hz ilustruje wykres 9.12. Najwyższa zmierzona wartość natężenia pola elektrycznego w roku 2005 wyniosła 5,03 kV/m (50,3% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a w roku 2006 wyniosła 4,85 kV/m (48,5% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Obie zmierzone najwyższe wartości natężenia pola elektrycznego uzyskało laboratorium Lubelskiego WIOŚ dla linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 400 kV. W 2005 roku wartość średniej arytmetycznej z wykonanych pomiarów wynosiła 0,73 kV/m (7,3% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności), a mediana 0,51 kV/m (5,1% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), natomiast w 2006 roku średnia arytmetyczna z wykonanych pomiarów wynosiła 0,72 kV/m (7,2% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana 0,28 kV/m (2,8% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Rozbieżność w wartości mediany dla pomiarów natężenia pola elektrycznego przeprowadzonych w latach 2005-2006, podobnie jak dla pomiarów natężenia pola magnetycznego dla częstotliwości 50 Hz, wynika z faktu, iż w 2006 roku wykonywano więcej pomiarów w miejscach oddalonych od snych źródeł pola elektrycznego, w stosunku do pomiarów wykonanych w 2005 roku.

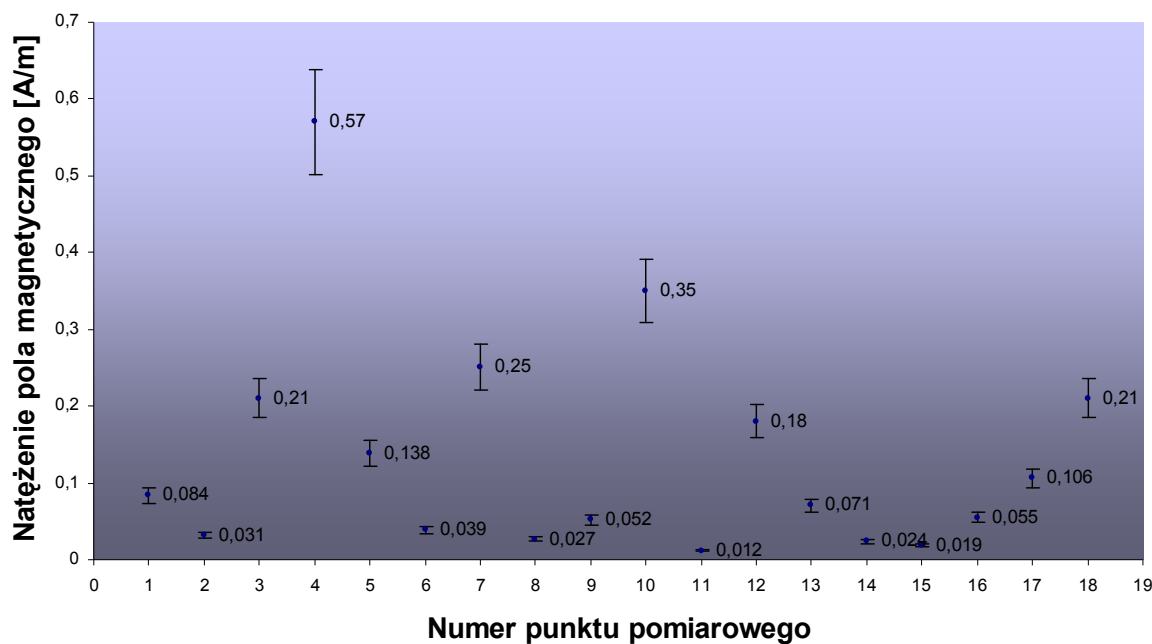
• Pomiary wykonane przez Warmińsko-Mazurski WIOŚ w 2006 roku



Wykres 9.13 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonane przez Warmińsko-Mazurski WIOŚ w 2006 roku w 18 punktach pomiarowych zlokalizowanych na terenie Olsztyna, Elbląga i Ostródy w zakresie częstotliwości 5 Hz – 100 Hz.

Wykresy 9.13 i 9.14 przedstawiają wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego i natężenia pola elektrycznego w 18 punktach na terenie Olsztyna, Elbląga i Ostródy w zakresie częstotliwości 5 Hz – 100 Hz. Średnie wartości składowej elektrycznej promieniowania elektromagnetycznego kształtują się na poziomie 0,4 V/m (0,004% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana wynosi 0,3 V/m (0,003% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Natomiast średnie wartości składowej magnetycznej promieniowania elektromagnetycznego wynoszą 0,134 A/m (0,22% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana wynosi 0,077 A/m (0,13% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Powyższe wyniki obrazują jak niskie wartości przyjmują poziomy pól elektromagnetycznych dla punktów nie sąsiadujących z silnymi źródłami pól elektromagnetycznych dla częstotliwości 50 Hz.

• Pomiary wykonane przez Warmińsko-Mazurski WIOŚ w 2006 roku



Wykres 9.14 Wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego wykonane przez Warmińsko-Mazurski WIOŚ w 2006 roku w 18 punktach pomiarowych zlokalizowanych na terenie Olsztyna, Elbląga i Ostródy w zakresie częstotliwości 5 Hz – 100 Hz.

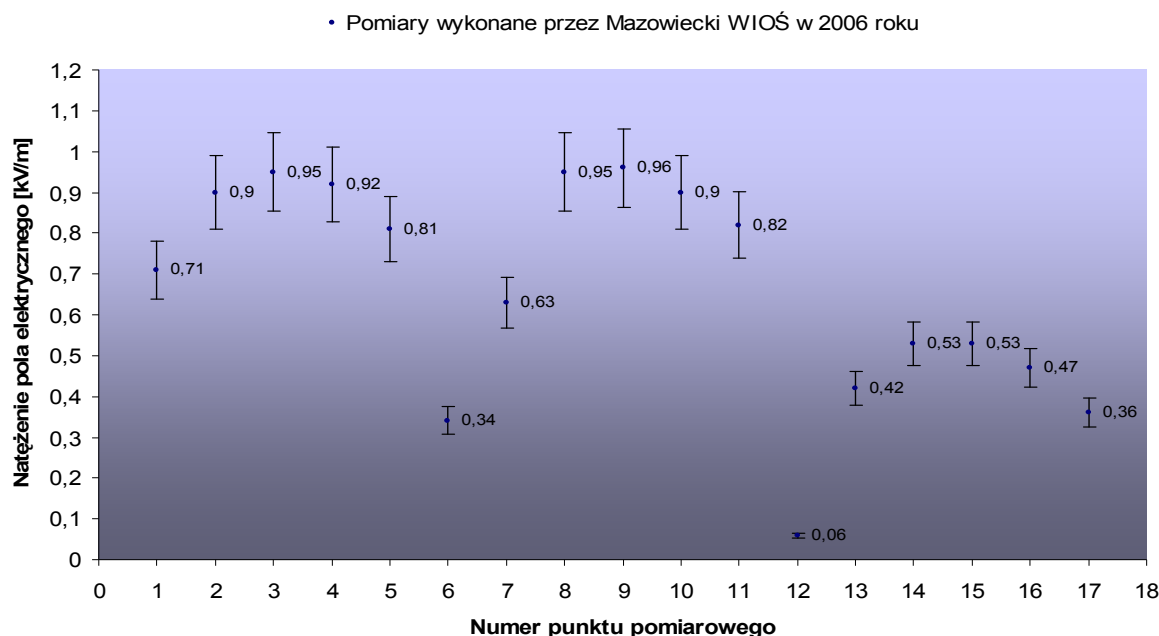
| Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego            | Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego               |
|----|---|----|--|
| 1  | Olsztyn, ul. Czeska - Osiedle Mazurskie   | 10 | Elbląg, ul. Browarna 30                      |
| 2  | Olsztyn, ul. Orłowicza 7- Osiedle Nagórki | 11 | Elbląg, Pl. Słowiański                       |
| 3  | Olsztyn, Pl. Bema                         | 12 | Elbląg, ul. Saperów                          |
| 4  | Olsztyn, Pl. Jana Pawła II – Centrum      | 13 | Elbląg, ul. Monte Cassino 1                  |
| 5  | Olsztyn, Pl. Roosvelta                    | 14 | Elbląg, ul. Kaszubska 8 - Osiedle Metalowców |



|   |   |    |                               |
|---|---|----|-------------------------------|
| 6 | Olsztyn, Pl. Inwalidów Wojennych            | 15 | Ostróda, ul. Jagielly 2B      |
| 7 | Olsztyn, Pl. Powstańców Warszawy            | 16 | Ostróda, ul. Grunwaldzka 26   |
| 8 | Olsztyn, ul. Wilczyńskiego - Osiedle Jaroty | 17 | Ostróda, ul. Armii Krajowej 1 |
| 9 | Olsztyn, ul. Żołnierska 18                  | 18 | Ostróda, ul. Kościuszki 5     |

Tabela 9.15 Lokalizacja punktów pomiarowych, dla pomiarów przedstawionych na wykresach 9.13 i 9.14.

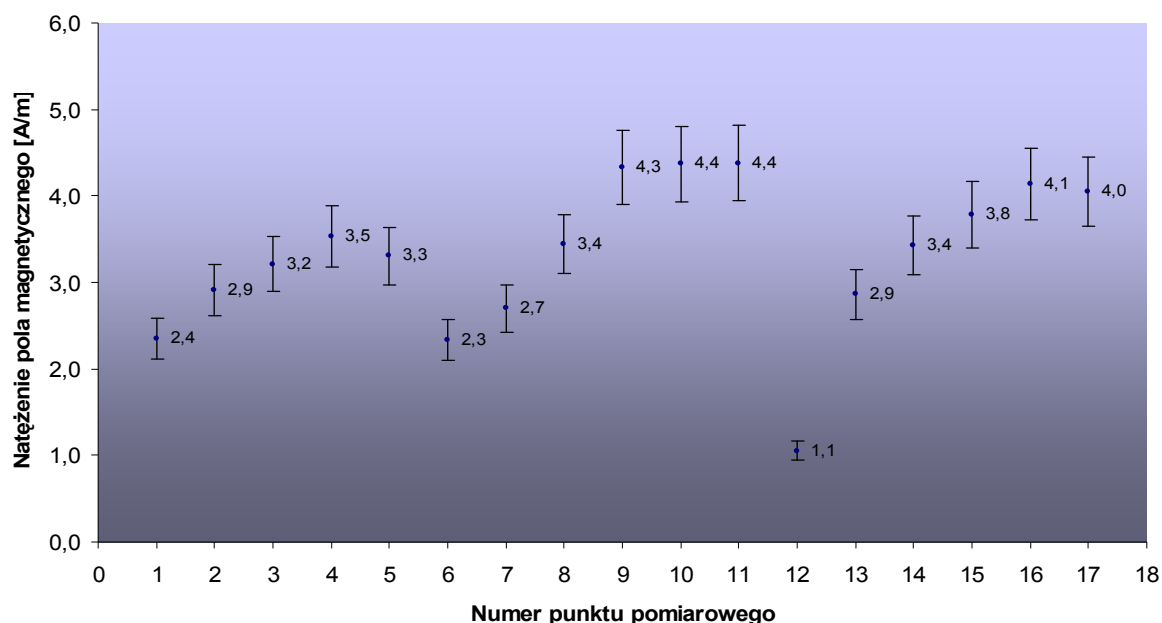
Inaczej sytuacja przedstawia się dla miejsc znajdujących się w niewielkiej odległości od silnych źródeł promieniowania elektromagnetycznego dla częstotliwości 50 Hz (wykresy 9.16 i 9.17). Średnie wartości składowej elektrycznej promieniowania elektromagnetycznego kształtują się na poziomie 0,66 kV/m (6,6% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana wynosi 0,71 kV/m (7,1% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Natomiast średnie wartości składowej magnetycznej promieniowania elektromagnetycznego wynoszą 3,3 A/m (5,5% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana wynosi 3,4 A/m (5,7% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Choć poziomy pól elektromagnetycznych wokół silnych źródeł PEM dla częstotliwości 50 Hz są dużo wyższe niż w miejscach oddalonych od tych źródeł, to i tak mierzone wartości pól elektromagnetycznych nie przekraczają dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności.



Wykres 9.16 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonane przez Mazowiecki WIOŚ w 2006 roku w 17 punktach pomiarowych zlokalizowanych w bezpośrednim otoczeniu napowietrznej linii elektroenergetycznej 110 kV

mieszczącej się na terenie dzielnicy Warszawa-Bemowo, w zakresie częstotliwości 5 Hz – 100 Hz.

• Pomiary wykonane przez Mazowiecki WIOŚ w 2006 roku



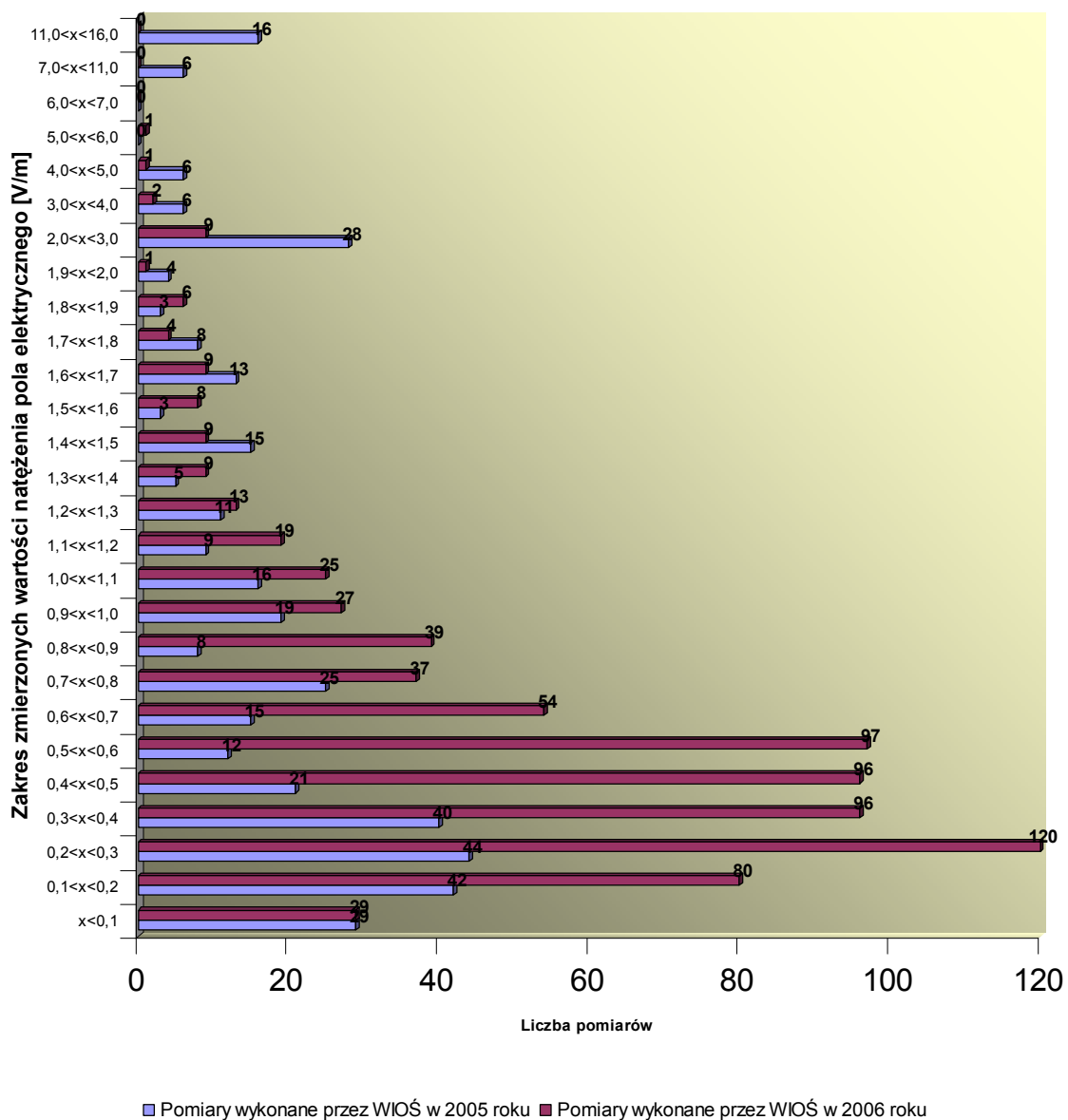
Wykres 9.17 Wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego wykonane przez Mazowiecki WIOŚ w 2006 roku w 17 punktach pomiarowych zlokalizowanych w bezpośrednim otoczeniu napowietrznej linii elektroenergetycznej 110 kV mieszczącej się na terenie dzielnicy Warszawa-Bemowo, w zakresie częstotliwości 5 Hz – 100 Hz.

| Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego  | Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego  |
|----|---|----|---|
| 1  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "aleja główna, polana" 2 m od skrajnego przewodu od strony północnej                      | 10 | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "projektowany amfiteatr, centrum parku" pod skrajnym przewodem od strony południowej    |
| 2  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "aleja główna, polana" pod skrajnym przewodem od strony północnej                         | 11 | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "projektowany amfiteatr, centrum parku" 2 m od skrajnego przewodu od strony południowej |
| 3  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "aleja główna, polana" na środku pomiędzy przewodami linii energetycznej                  | 12 | 10m od skrajnego przewodu o strony północnej na polanie   |
| 4  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "aleja główna, polana" pod skrajnym przewodem od strony południowej                       | 13 | Ok. 35 m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu określonym jako "boiska, place zabaw" 2m od skrajnego przewodu od strony północnej                   |
| 5  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "aleja główna, polana" 2 m od skrajnego przewodu od strony południowej                    | 14 | Ok. 35 m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu określonym jako "boiska, place zabaw" pod skrajnym przewodem od strony północnej                     |
| 6  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "aleja główna, polana" 10 m od skrajnego przewodu od strony południowej na terenie boiska | 15 | Ok. 35 m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu określonym jako "boiska, place zabaw" na środku pomiędzy przewodami linii energetycznej              |
| 7  | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "projektowany amfiteatr, centrum parku" 2 m od skrajnego przewodu od strony północnej     | 16 | Ok. 35 m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu określonym jako "boiska, place zabaw" pod skrajnym przewodem od strony południowej                   |

|   |   |    |  |
|---|---|----|--|
| 8 | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "projektowany amfiteatr, centrum parku" pod skrajnym przewodem od strony północnej        | 17 | Ok. 35 m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu określonym jako "boiska, place zabaw" 2m od skrajnego przewodu o strony południowej |
| 9 | Ok. 35m w kierunku wschodnim od słupa w miejscu opisanym jako "projektowany amfiteatr, centrum parku" na środku pomiędzy przewodami linii energetycznej |    |  |

Tabela 9.18 Lokalizacja punktów pomiarowych, dla pomiarów przedstawionych na wykresach 9.16 i 9.17.

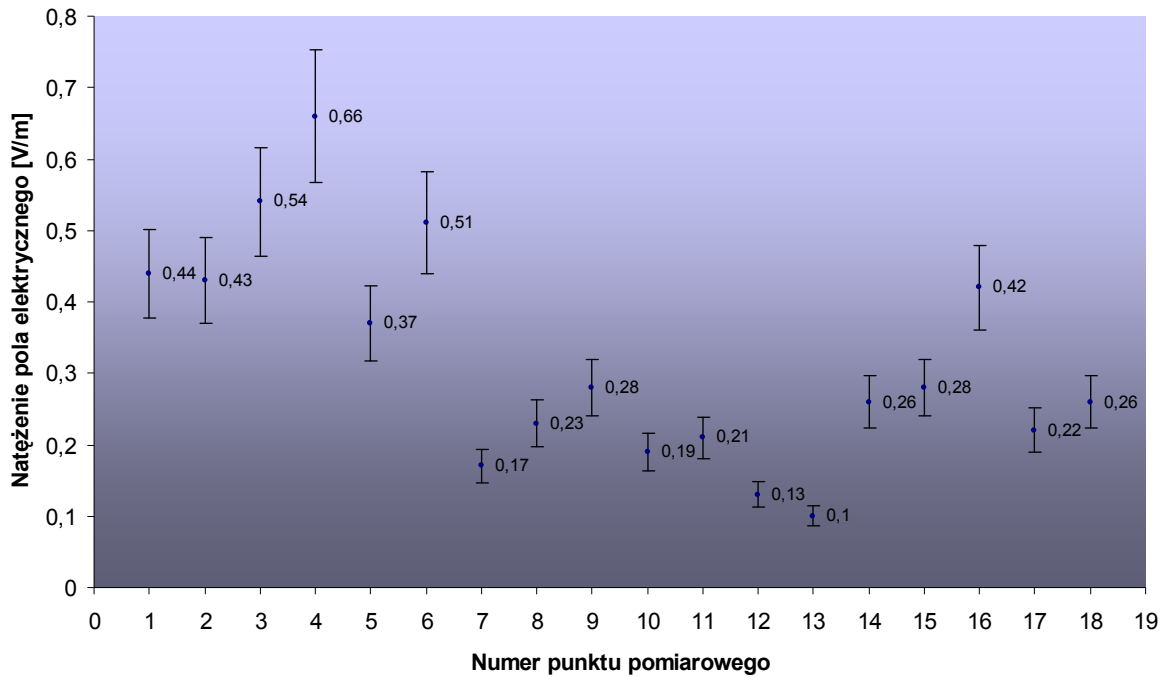
Kolejnym badanym pasmem widma elektromagnetycznego przez laboratoria Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska, jest pasmo z zakresu częstotliwości od 100 kHz do 1 GHz, obejmujące promieniowanie elektromagnetyczne emitowane głównie przez anteny radiowo-telewizyjne i stacje bazowe telefonii komórkowej GSM 900 – wykres 9.19. Zdecydowana większość wyników przeprowadzonych pomiarów lokowała się w zakresie od 0,1 V/m do 0,6 V/m. W 2005 roku najwyższą wartość natężenia pola elektrycznego wynoszącą 15,5 V/m (77,5% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]) zmierzyło laboratorium Kujawsko-Pomorskiego WIOŚ wokół Radiowego Centrum Nadawczego „Solec Kujawski – Kabat”. W 2006 roku najwyższą wartość natężenia pola elektrycznego wynoszącą 5,7 V/m (81,4% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]) uzyskało laboratorium Podkarpackiego WIOŚ wokół stacji nadawczej radiowo-telewizyjnej w miejscowości Czarnorzeki. Średnie wartości składowej elektrycznej promieniowania elektromagnetycznego zmierzonych w 2005 roku kształtują się na poziomie 1,53 V/m (21,9% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana wynosi 0,69 V/m (9,9% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Natomiast średnie wartości składowej elektrycznej promieniowania elektromagnetycznego zmierzonych w 2006 roku kształtują się na poziomie 0,59 V/m (8,4% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), a mediana wynosi 0,46 V/m (6,5% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). W 2005 roku wykonywano większą liczbę pomiarów wokół silnych źródeł promieniowania elektromagnetycznego, stąd zdecydowanie wyższa średnia arytmetyczna w porównaniu do roku 2006.



Wykres 9.19 Zestawienie liczby pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonanych przez laboratoria Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska w latach 2005 – 2006 w zakresie częstotliwości 100 kHz – 1 GHz.

Pomiary wykonane w losowo wybranych punktach w miastach województwa Kujawsko-Pomorskiego przedstawia wykres 9.20. Średnia arytmetyczna natężenia pola elektrycznego wynosi 0,32 V/m (4,6% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), natomiast mediana 0,27 V/m (3,9% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]).

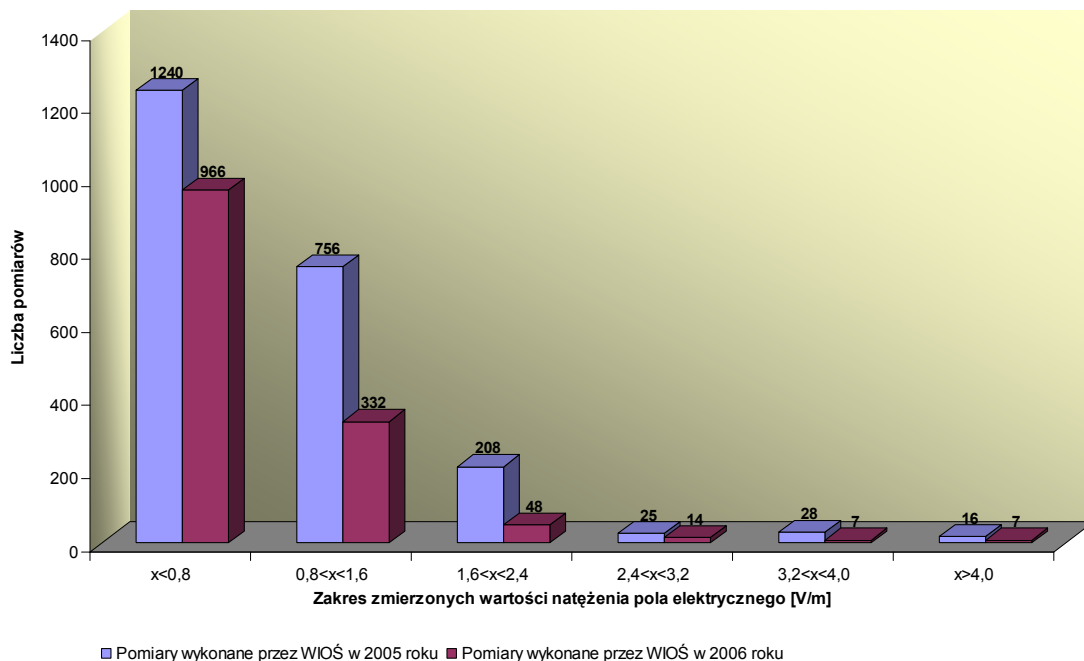
• Pomiary wykonane przez Kujawsko-Pomorski WIOŚ w 2006 roku



Wykres 9.20 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonane przez Kujawsko-Pomorski WIOŚ w 2006 roku w 18 punktach pomiarowych zlokalizowanych w wybranych miastach na terenie województwa Kujawsko-Pomorskiego, w zakresie częstotliwości 100 kHz – 1 GHz.

| Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego |                      | Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego |                          |
|----|--------------------------------|----------------------|----|--------------------------------|--------------------------|
| 1  | Toruń                          | Mickiewicza, CPN     | 10 | Grudziądz                      | Warszawska 17            |
| 2  | Toruń                          | Bulwar filadelfijski | 11 | Grudziądz                      | Konstytucji 3-maja       |
| 3  | Toruń                          | Ligi Polskiej 2      | 12 | Nakło                          | Rynek                    |
| 4  | Toruń                          | Św. Józefa7          | 13 | Żnin                           | Browarowa, parking       |
| 5  | Toruń                          | Inowrocławska, plac  | 14 | Kruszwica                      | Kujawska 37              |
| 6  | Solec Kujawski                 | Plac Jana Pawła II   | 15 | Inowrocław                     | Wilkońskiego, uzdrowisko |
| 7  | Świecie                        | J. Hallera, parking  | 16 | Inowrocław                     | Wojska Polskiego         |
| 8  | Grudziądz                      | Rapackiego           | 17 | Inowrocław                     | Narutowicza, pomnik      |
| 9  | Grudziądz                      | Poniatowskiego 19    | 18 | Inowrocław                     | Długa 40                 |

Tabela 9.21 Lokalizacja punktów pomiarowych, dla pomiarów przedstawionych na wykresie 9.20.

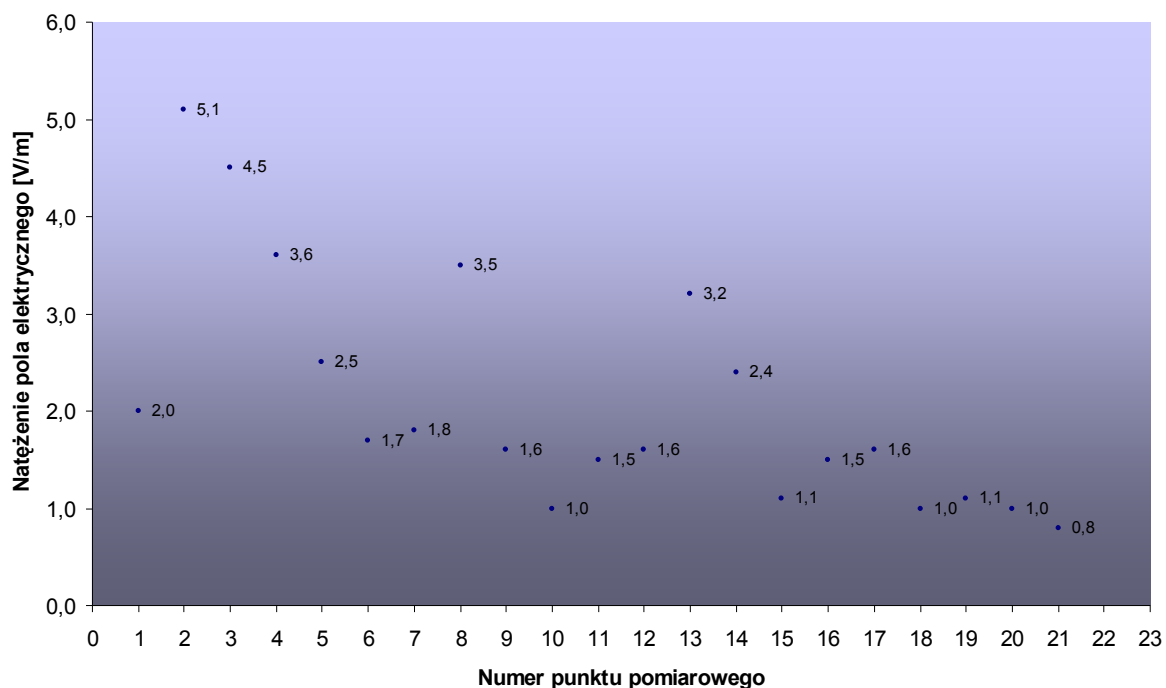


Wykres 9.22 Zestawienie liczby pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonanych przez laboratoria Wojewódzkich Inspektoratów Ochrony Środowiska w latach 2005 – 2006 w zakresie częstotliwości 1 MHz – 40 GHz.

Zdecydowana większość wyników pomiarów przeprowadzonych sondą pomiarową EP 408 (częstotliwościowy zakres pomiarowy wynosi 1 MHz – 40 GHz), kształtowała się poniżej czułości sondy, tzn. poniżej wartości 0,8 V/m (wykres 9.22). Podobnie jak w innych zakresach częstotliwości, laboratoria WIOŚ w 2005 roku wykonywały więcej pomiarów wokół silnych źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Część laboratoriów wykonała pomiary w miejscach niedostępnych dla ludności (np. dach budynku, na którym zamontowano stację bazową telefonii komórkowej) uzyskując wyniki przekraczające wartość 7 V/m określoną w polskich przepisach jako wartość dopuszczalną dla miejsc dostępnych dla ludności, natomiast w miejscach dostępnych dla ludności wyniki pomiarów nie przekraczały wartości dopuszczalnej określonej w krajowych przepisach ochrony środowiska [12].

Przykładowy pomiar wokół silnego źródła promieniowania elektromagnetycznego przedstawia wykres 9.23. Średnia arytmetyczna natężenia pola elektrycznego wynosi 2,1 V/m (30% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]), natomiast mediana wynosi 1,6 V/m (22,9% wartości dopuszczalnych norm określonych dla miejsc dostępnych dla ludności [12]). Maksymalną zmierzoną wartość (5,1 V/m), uzyskano w punkcie 3 usytuowanym w odległości 47 metrów od wieży nadawczej.

• Pomiaru wykonane przez Pomorski WIOŚ w 2005

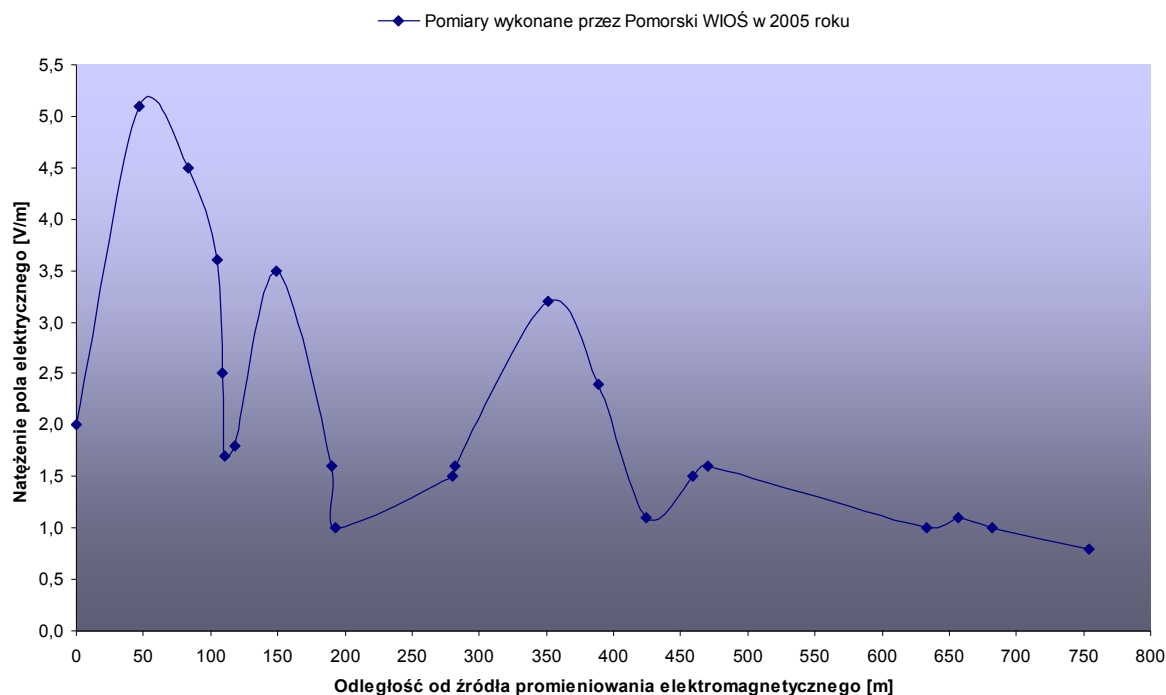


Wykres 9.23 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonane przez Pomorski WIOŚ w 2005 roku w 21 punktach pomiarowych zlokalizowanych w pobliżu wieży nadawczej radiowo-telewizyjnej „Skórowo Nowe” pod Lęborkiem, w zakresie częstotliwości 1 MHz – 40 GHz.

| Lp | Lokalizacja punktu pomiarowego |                            |            |            |
|----|--------------------------------|----------------------------|------------|------------|
|    |                                | N                          | E          |            |
| 1  | Skórowo Nowe                   | pod wieżą                  | 54 29 42.7 | 17 29 53.6 |
| 2  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 47 m  | 54 29 41.8 | 17 29 55.7 |
| 3  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 83 m  | 54 29 40.1 | 17 29 52.4 |
| 4  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 105 m | 54 29 46.1 | 17 29 53.1 |
| 5  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 109 m | 54 29 39.2 | 17 29 54.0 |
| 6  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 111 m | 54 29 39.7 | 17 29 57.0 |
| 7  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 118 m | 54 29 38.9 | 17 29 53.1 |
| 8  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 149 m | 54 29 40.1 | 17 30 00.6 |
| 9  | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 190 m | 54 29 48.7 | 17 29 51.2 |
| 10 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 193 m | 54 29 41.3 | 17 30 04.1 |
| 11 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 280 m | 54 29 36.3 | 17 29 42.6 |
| 12 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 282 m | 54 29 51.5 | 17 29 49.3 |
| 13 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 351 m | 54 29 53.6 | 17 29 48.0 |
| 14 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 389 m | 54 29 53.3 | 17 29 41.9 |
| 15 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 424 m | 54 29 44.6 | 17 30 17.0 |
| 16 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 459 m | 54 29 55.5 | 17 29 40.6 |
| 17 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 470 m | 54 29 31.4 | 17 30 11.1 |
| 18 | Skórowo Nowe                   | odległość od wieży - 633 m | 54 29 26.0 | 17 30 14.0 |

|    |              |                            |            |            |
|----|--------------|----------------------------|------------|------------|
| 19 | Skórowo Nowe | odległość od wieży - 657 m | 54 29 32.9 | 17 29 21.2 |
| 20 | Skórowo Nowe | odległość od wieży - 682 m | 54 29 48.7 | 17 29 17.1 |
| 21 | Skórowo Nowe | odległość od wieży - 754 m | 54 29 48.6 | 17 30 36.0 |

Tabela 9.24 Lokalizacja punktów pomiarowych, dla pomiarów przedstawionych na wykresie 9.23.



Wykres 9.25 Wyniki pomiarów natężenia pola elektrycznego wykonane przez Pomorski WIOŚ w 2005 roku w 21 punktach pomiarowych w funkcji odległości od wieży nadawczej radiowo-telewizyjnej „Skórowo Nowe” pod Lęborkiem, w zakresie częstotliwości 1 MHz – 40 GHz.

### 9.5 Podsumowanie

Metodę szacowania budżetu niepewności pomiarowej opracował Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy w pracy wykonanej na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Do pomiarów wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego użyto sondę izotropową (dookólną) E-field probe type 8 z miernikiem typu EMR-300 Radiation Meter produkcji Narda. Opracowane wartości maksymalnej niepewności standardowej wykonanych pomiarów wartości chwilowej natężenia pola elektrycznego, dla ww. urządzeń pomiarowych wynoszą:

- 27,7% przy pomiarach pola elektrycznego o natężeniach 0,6 V/m – 1,25 V/m,
- 15,6% przy pomiarach pola elektrycznego o natężeniach 1,25 V/m – 12,5 V/m,
- 14,3% przy pomiarach pola elektrycznego o natężeniach 12,5 V/m – 400 V/m.



W przypadku pomiarów poniżej 0,6 V/m niepewność wzrasta dwukrotnie w stosunku do niepewności dla przedziału od 0,6 V/m do 1,25 V/m [27].

Przedstawione wyniki badań poziomów pól elektromagnetycznych wykonane przez różne laboratoria, stosujące odmienne metodyki badawcze, wykazują zbieżność. Uzyskane wyniki obrazują, ścisłą zależność zmierzonej wartości składowej elektrycznej bądź magnetycznej pola elektromagnetycznego od odległości do źródła promieniowania, a także od charakterystyki i usytuowania źródła. Pomiarów dla źródeł emitujących pola elektromagnetyczne wolnozmiennie wykazują szybki spadek natężenia pola elektromagnetycznego wraz ze wzrostem odległości. W ciągu ostatnich 13 lat zaobserwowano wzrost poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, spowodowany w znacznym stopniu rozwojem telefonii komórkowej. Największy wzrost natężenia pola elektromagnetycznego wysokich częstotliwości zanotowano w centralnych dzielnicach bądź osiedlach dużych miast. W ciągu najbliższych lat przewidywany jest rozwój systemów naziemnych technik cyfrowego nadawania programów radiowych i telewizyjnych, mogący skutkować ograniczeniem mocy nadajników radiowo-telewizyjnych, a co za tym idzie spadkiem natężeń pól elektromagnetycznych wokół takich obiektów. Jednocześnie następuje szybki rozwój sieci bezprzewodowego dostępu do Internetu, a także rozwój telefonii komórkowej trzeciej generacji, skutkujący zagęszczeniem stacji bazowych telefonii komórkowej. Rozwój ww. źródeł może spowodować nieznaczny wzrost średnich poziomów pól elektromagnetycznych, szczególnie na terenach wysokozurbanizowanych. Reasumując, średnie poziomy pole elektromagnetycznych nie powinny drastycznie się zmienić w przeciągu najbliższych lat, natomiast zmniejszeniu będzie sukcesywnie ulegać ilość terenów, na których poziomy pole elektromagnetycznych kształtują się obecnie na bardzo niskich, bądź na niskich poziomach w stosunku do średnich poziomów pól elektromagnetycznych rejestrowanych na terenach zurbanizowanych. Średnie poziomy pole elektromagnetycznych kształtują się znacznie poniżej dopuszczalnych wartości poziomów pól zdefiniowanych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 30 października 2003 roku (Dz. U. Nr 192, poz. 1883) [12] oraz w rekomendacji Rady Europejskiej 1999/519/EC [29].

## Słownik

**Antena** – część systemu radiowego przeznaczona do wypromieniowywania fal elektromagnetycznych w wolną przestrzeń (lub do ich odbioru). W jej skład nie wchodzi linie transmisyjne i falowody prowadzące do radiatora [19].

**Częstotliwość** – liczba sinusoidalnych cykli wykonywanych przez fale elektromagnetyczne w ciągu jednej sekundy, zwykle wyrażana w hercach [19].

**Efekt termiczny** – w tkance lub układzie biologicznym efekt związany z ogrzewaniem tkanki w wyniku zastosowania pól elektromagnetycznych, a także innych sposobów ogrzewania [19].

**Efekt nietermiczny** – każdy efekt związany z działaniem energii elektromagnetycznej na ciało, który nie jest efektem zależnym od ciepła [19].

**Energia elektromagnetyczna** – energia zmagazynowana w polu elektromagnetycznym [19].

**Fala** – zmiana stanu fizycznego środowiska, rozprzestrzeniająca się w wyniku zaburzenia lokalnego.

**Fala elektromagnetyczna** – fala scharakteryzowana przez zmienne pole elektryczne i magnetyczne [19].

**Gęstość strumienia mocy** – dla rozchodzącej się fali elektromagnetycznej moc przechodząca przez jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Jednostką jest wat na metr kwadrat [19].

**Natężenie pola magnetycznego** – wielkość wektorowa, która wraz z indukcją magnetyczną charakteryzuje pole magnetyczne w danym punkcie przestrzeni. Jednostką jest amper na metr (A/m) [19].

**Natężenie pola elektrycznego** – wielkość wektorowa, która wraz z indukcją elektryczną charakteryzuje pole elektryczne w danym punkcie przestrzeni. Jednostką jest volt na metr (V/m).

**Pole elektryczne** – składowa elektryczna pola elektromagnetycznego; stan energetyczny przestrzeni wokół ładunków elektrycznych, w wyniku którego występuje działanie sił na inne ładunki elektryczne [20].

**Pole magnetyczne** – składowa magnetyczna pola elektromagnetycznego; stan energetyczny przestrzeni wokół przepływającego prądu elektrycznego, przejawiający się działaniem sił na inne ładunki elektryczne będące w ruchu [20].

**Pole elektromagnetyczne** – szczególny stan materii, charakteryzujący wszelkie oddziaływania pomiędzy ładunkami elektrycznymi, prądami elektrycznymi i dipolami magnetycznymi równocześnie za pośrednictwem pola elektrycznego i pola magnetycznego. Pole elektromagnetyczne wypełniając przestrzeń pomiędzy ładunkami, prądami i dipolami objawia się określonym stanem energetycznym, w wyniku którego występuje działanie sił i w konsekwencji potencjalnie szkodliwe działanie na organizmy żywe. Stan energetyczny pola elektromagnetycznego charakteryzowany jest jednocześnie przez wektory pola elektrycznego  $E$  i pola magnetycznego  $H$  [20].

**Równoważna moc promieniowana izotropowo (EIRP)** - zastępcza moc promieniowana (ERP) – iloczyn mocy doprowadzonej do anteny i zysku energetycznego anteny. Zysk energetyczny anteny może być odniesiony do anteny izotropowej, mówi się wówczas o zastępczej mocy promieniowanej izotropowo, wg.: (EIRP) PN-80/T-01012:1980 Słownictwo telekomunikacyjne. Anteny. Nazwy i określenia; w przypadkach gdy antena jest zbudowana z więcej niż jednego systemu nadawczego przyjmuje się sumę równoważnych mocy promieniowanych izotropowo systemów jako EIRP anteny.

**SAR (Specific Absorption Rate)** – tempo, w jakim energia jest pochłaniana przez tkanki ciała w watach na kilogram (W/kg) [19].

## Literatura:

1. H.Aniolczyk, K.Pachocki, S.Różycki, „Pola elektromagnetyczne wielkiego miasta z punktu widzenia ochrony środowiska”, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, 1996.
2. M.Siemiński, „Fizyka zagrożeń środowiska”, PWN, Warszawa, 1994.
3. Główny Urząd Statystyczny.
4. D.Haliday, R.Resnick, „Fizyka 2”, PWN, Warszawa, 1980.
5. W.Hołudowicz, P.Plóciennik, „Cyfrowe systemy telefonii komórkowej: GSM 900, GSM 1800, UMTS”, Poznańska Drukarnia Naukowa, Poznań, 1998.
6. J.Pieniak, „Anteny telewizyjne i radiowe”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2001.
7. J.Szóstka, „Fale i anteny”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2000.
8. M.Krakowski, „Elektrotechnika teoretyczna: Pola elektromagnetyczne”, PWN, Warszawa, 1995.
9. M.R.Sztarski, „Urządzenia radiolokacyjne”, Wyd. Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 1963.
10. T.Beldowski, H.Markiewicz, „Stacje i urządzenia elektroenergetyczne”, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa, 1998.
11. III Konferencja Naukowo Techniczna, „Pola elektromagnetyczne a energetyka i środowisko”, Bielsko Biała, 1996.
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 30 października 2003 roku, w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. Nr 192, poz. 1883).
13. Z. Czekala, „Parada radarów”, Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa, 1999.
14. pod red. M.Szuba „Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka”, Biuro konsultingowo-inżynierskie „EKO-MARK”, Wrocław, 2005.

15. Informator Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Nr. 2, czerwiec 2005.
16. M.Zmyślony, „Biofizyczne mechanizmy działania pól elektromagnetycznych a skutki zdrowotne”, Warsztaty IMP Łódź 2005 „Ochrona przed PEM”.
17. Ewa Zralek, Magdalena Brodowska, „Zadania Inspekcji Ochrony Środowiska w zakresie monitoringu pól elektromagnetycznych”, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.
18. Maxwell J. C., “Treatise on Electricity and Magnetism, Vol.1”, Dover Publications, 1954.
19. Environmental Health Criteria No. 137. Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz). WHO Geneva 1993. (Kryteria zdrowotne środowiska. Tom 137. Pola elektromagnetyczne (300 Hz do 300 GHz). Tłumaczył dr Marek Zmyślony, MZiOS Departament Zdrowia Publicznego, 1995 r.).
20. H.Aniolczyk, A.Koperski, R.Kubacki, A.Pilatowicz, S.Różycki, „Ochrona środowiska przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym. CODKO-ŚiGW, Dębe, 1993.
21. Strona internetowa Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A.: <http://www.pse.pl>.
22. P.Bieńkowski, „Monitoring pól elektromagnetycznych w obszarach miejskich”, Politechnika Wroclawska, Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki.
23. Informator Polskich Sieci Energetycznych – Operator S.A. „Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka”, Biuro Konsultingowo – Inżynierskie „Eko-Mar”, Wrocław, 2005.
24. Strona internetowa serwisu Wikipedia <http://pl.wikipedia.org>.
25. S.Różycki, „Wytyczne zasad sporządzania ocen poziomu pól elektromagnetycznych w środowisku”, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2005.
26. K.Mroszkiewicz, M.Chybowski, „Raport końcowy Nr 31/43/03 z pracy pt.: „Pomiary pól elektromagnetycznych na terenach zurbanizowanych”, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2003.

27. K.Gryz, J.Karpowicz, M.Molenda, P.Zradziński, „Pomiary poziomów pól elektromagnetycznych na terenie miasta stołecznego Warszawy”, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2006.
28. PN-EN 50384:2004, Norma grupy wyrobów dla wykazania zgodności radiowych stacji bazowych i stacjonarnych stacji końcowych systemów bezprzewodowej telekomunikacji z ograniczeniami podstawowymi lub poziomami odniesienia dotyczącymi ekspozycji ludzi w polach elektromagnetycznych częstotliwości radiowych (110 MHz – 40 GHz) – Ekspozycja zawodowa.
29. Rekomendacja Rady Europejskiej 1999/519/EC „Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)” (Dziennik Urzędowy L 199, 30/07/1999 P. 0059 – 0070).
30. „Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego za rok 2006”, Urząd komunikacji Elektronicznej, Warszawa, 2006.
31. Ustawa Prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 roku (Dz. U. z 2006 r., Nr 129, poz. 902 z późniejszymi zmianami).
32. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2004 roku w sprawie określenia rodzajów przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko oraz szczegółowych uwarunkowań związanych z kwalifikowaniem przedsięwzięcia do sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko (Dz. U. Nr 257, poz. 2573).
33. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 21 sierpnia 2007 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie określenia rodzajów przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko oraz szczegółowych uwarunkowań związanych z kwalifikowaniem przedsięwzięcia do sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko (Dz. U. Nr 158, poz. 1105).
34. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007 r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku (Dz. U. Nr 221, poz. 1645).
35. Strona internetowa Przemysłowego Instytutu Telekomunikacji: <http://www.pit.gda.pl/>