

Paweł Bieńkowski

## POLE ELEKTROMAGNETYCZNE EMITOWANE PRZEZ URZĄDZENIA W ZAKRESIE RADIO- I MIKROFAL — APARATURA I METODYKA POMIARÓW DLA OCHRONY ŚRODOWISKA I BEZPIECZEŃSTWA PRACY

ELECTROMAGNETIC FIELDS EMITTED IN RADIO- AND MICROWAVE- FREQUENCY RANGE: EQUIPMENT AND METHODS FOR THE ENVIRONMENT PROTECTION AND SURVEY MEASUREMENTS

Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki, Politechnika Wroclawska, Wrocław

Pracownia Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego, Katedra Radiokomunikacji i Teleinformatyki

### STRESZCZENIE

W pracy dokonano przeglądu źródeł pola elektromagnetycznego w zakresie radiofal i mikrofal. Przedstawiono możliwości pomiarów ochronnych z wykorzystaniem metod szerokopasmowych i selektywnych wraz z przykładami aparatury pomiarowej. Oszacowano niepewność typowych pomiarów pola elektromagnetycznego dla celów ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy. Med. Pr. 2008;59(6):513–519

Słowa kluczowe: metrologia pola elektromagnetycznego, ochrona środowiska elektromagnetycznego, pola elektromagnetyczne

### ABSTRACT

In the paper a review of electromagnetic field sources in radio- and microwave- frequency range is presented. The aim of the study was to analyze possibilities and methods used to survey electromagnetic field (EMF) measurements. Selective and broadband methods with examples of apparatus are described. The accuracy of typical EMF survey measurements was estimated. Med Pr 2008;59(6):513–519

Key words: electromagnetic field metrology, electromagnetic environment protection, electromagnetic fields

Adres autora: Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki, Politechnika Wroclawska, Pracownia Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego, Katedra Radiokomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: pawel.bienkowski@pwr.wroc.pl

Nadesłano: 6 października 2008

Zatwierdzono: 16 października 2008

## WPROWADZENIE

Pomiary natężenia pola elektromagnetycznego (PEM) są, obok teoretycznych analiz rozkładów pola (1), podstawowym narzędziem oceny ekspozycji na PEM w środowisku i na stanowiskach pracy. Do prowadzenia pomiarów obligują również polskie przepisy ochronne (2,3), które podają w zarysie metodykę, natomiast nie opisują aparatury pomiarowej przeznaczonej do takich pomiarów. Fakt ten, w powiązaniu ze stosunkowo małą dokładnością metrologii pola elektromagnetycznego (4), przyczynia się do wielu kontrowersji związanych zarówno z samymi pomiarami, jak i interpretacją wyników i oceną ekspozycji na PEM.

W pracy przedstawiono krótki przegląd źródeł PEM z zakresu radiofal i mikrofal, możliwe metody pomiaru PEM oraz ograniczenia ich stosowania, rozwiązania

techniczne aparatury pomiarowej oraz próba oszacowania niepewności takich pomiarów.

### Przegląd źródeł PEM

W zakresie radiofal i mikrofal dominującymi źródłami PEM — istotnymi z punktu widzenia ochrony przed polem elektromagnetycznym — są między innymi: systemy radiokomunikacyjne (w najszerszym rozumieniu tego pojęcia), sprzęt ISM, urządzenia powszechnego użytku (ESPU), systemy przeciwkradzieżowe (EAS) oraz czujniki i sensory wykorzystujące fale radiowe do realizacji funkcji podstawowych (np. mikrofalowe czujniki ruchu) lub do transmisji danych. W tabeli 1. dokonano przeglądowego zestawienia źródeł PEM w zakresie radiofal i mikrofal.

Z przedstawionego, zestawienia wynika duża różnorodność źródeł PEM w rozpatrywanym zakresie. Pod względem liczebności bez wątpienia dominują telefony komórkowe (według szacowań operatorów liczba telefonów w Polsce zbliża się do liczby mieszkańców naszego kraju) oraz stacje bazowe tychże systemów.

\* Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego nr 3T11D 00629 finansowanego przez MNiSW. Kierownik projektu — dr inż. Paweł Bieńkowski. Została również wygłoszona na XXII Szkole Jesiennej Polskiego Towarzystwa Badań Radiacyjnych im. M. Skłodowskiej-Curie pt. „Pola elektromagnetyczne (PEM) w środowisku — aspekty zdrowotne, ekologiczne i pomiarowe”, która odbyła się w dn. 20–24 października 2008 r. w Zakopanem.

**Tabela 1.** Przegląd źródeł PEM w zakresie radiofala i mikrofala**Table 1.** The review of electromagnetic field (EMF) sources in radio- and microwave- band

Dziedzina zastosowań	Zakres częstotliwości	Typowe moce nadajników/generatorów
<b>Radiokomunikacja</b>		
Nadajniki radiowe i telewizyjne	180 kHz–860 MHz	5 W–2 MW
Stacje bazowe telefonii komórkowej	450 (900)–2100 MHz	2–50 W/kanal
Linie radiowe naziemne i satelitarne	1–40 GHz	10 mW–20 W
Radiotelefony i terminale przenośne	27 MHz–2,1 GHz	0,1 W–15 W
Radiolokacja (radary)	1–10 GHz	1 W–3 MW w impulsie
<b>Transmisja danych</b>		
Punkty dostępowe Wi-Fi	2,4; 5,1–5,8 GHz	0,1–1 W
Systemy PMP (punkt-wielopunkt)	3,5–26 GHz	0,1–20 W
Karty Wi-Fi	2,4; 5,1–5,8 GHz	10–100 mW
<b>ISM</b>		
Nagrzewnice, suszarki i zgrzewarki dielektryczne	27,12 MHz	100 W–100 kW
Mineralizatory, suszarki mikrofalowe	2,45 GHz	300 W–10 kW
Aparaty do elektrochirurgii (lancetrony)	300–440 kHz, 1–3 MHz	30–200 W
Diatermie krótko i mikrofalowe	27,12 MHz–2,45 GHz	50–1 000 W (w impulsie)
MRI (niezależnie od pola magnetycznego, występuje pole z zakresu radiofala)	40–100 MHz	30–200 W
EAS	1–20 MHz i 2,45 GHz	brak danych, praca impulsowa
<b>ESPU</b>		
Kuchenki mikrofalowe	2,45 GHz	600–100 W
Czujniki ruchu	2,45 GHz	< 20 mW

### Metodyka pomiarów

Pole elektromagnetyczne charakteryzuje szereg parametrów, które można poddać ocenie i sklasyfikować w trzech grupach (choć jest to klasyfikacja umowna) — widmo, amplituda i polaryzacja. Do parametrów związanych z widmem zalicza się: częstotliwość, szerokość pasma zajmowanego przez sygnał i rodzaj modulacji. Z amplitudą związane są: natężenie pola (w tym natężenie składowej elektrycznej  $E$ , składowej magnetycznej  $H$  i ewentualnie gęstość mocy  $S$ ) oraz modulacja (zależnie od rodzaju modulacja wpływa zarówno na widmo, jak i amplitudę). Polaryzacja pola niesie informację o położeniu wektora  $E$  i  $H$  w przestrzeni i zmianach tego położenia. W systemach radiokomunikacyjnych mamy do czynienia z polaryzacją liniową lub elipsoidalną (zwykle kołową), a w przypadku polaryzacji liniowej — poziomą, pionową lub coraz powszechniej stosowaną w systemach telefonii komórkowej polaryzacją  $\pm 45^\circ$ . W otoczeniu urządzeń przemysłowych czy medycznych oraz w polu bliskim z reguły występuje duże nieuporządkowanie polaryzacyjne PEM. W zależności od celu pomiarów dokonuje się analizy wybranych parametrów, wykorzystując prawidłowo dobrany sprzęt pomiarowy oraz odpowiednie metody.

Pomiary PEM w zależności od celu ich prowadzenia, można umownie podzielić na dwie grupy: propagacyjne i ochronne.

Pod pojęciem pomiarów propagacyjnych rozumie się pomiary realizowane pod kątem planowania i analizy systemów radiokomunikacyjnych. Obejmują one wyznaczanie zasięgów i pokrycia terenu, określanie poziomu sygnałów niepożądanych, kompatybilność międzysystemową itp. Pomiary ochronne służą natomiast ocenie ekspozycji na PEM ludzi i środowiska, w tym dotrzymania dopuszczalnych poziomów PEM. W obu przypadkach stosuje się różne metody pozwalające na osiągnięcie założonego celu. Są to w szczególności pomiary selektywne, szerokopasmowe oraz pomiary szerokopasmowe miernikiem selektywnym.

Pomiary selektywne stosowane są głównie w przypadku pomiarów propagacyjnych i oceny parametrów PEM od jednego źródła. Typowo pomiar realizuje się z wykorzystaniem anteny dołączonej do selektywnego odbiornika pomiarowego. Wynik pomiaru wyznacza się na podstawie następującej zależności:

$$E[V/m] = A [1/m] \times U[V] \quad \text{lub} \quad [1]$$

$$E[dB\mu V/m] = A_f[dB/m] + U[dB\mu V] \quad [2]$$

gdzie:

$E$  — natężenie pola,  $A_f$  — współczynnik antenowy (antenna factor),

$U$  — napięcie wskazywane przez odbiornik pomiarowy.

Przedstawiona powyżej zależność jest prawdziwa dla składowej elektrycznej, ale po zamianie  $E$  na  $H$  i  $V/m$  na  $A/m$  uzyskujemy zależności dla składowej magnetycznej PEM.

Z kolei metody szerokopasmowe stosowane są powszechnie w pomiarach związanych z ochroną przed polami elektromagnetycznymi. Wykorzystuje się tu mierniki z sondami szerokopasmowymi umożliwiające wykonywanie pomiarów w bezpośrednim otoczeniu źródeł PEM (zarówno pierwotnych, jak i wtórnych). Wynikiem pomiaru jest wypadkowe natężenie pola z całego pasma pomiarowego sondy. Dla zakresu natężeń PEM, w których sondy pomiarowe zapewniają detekcję wartości skutecznej (RMS) i dla płaskiej charakterystyki częstotliwościowej sondy pomiarowej, odpowiedź sondy (wypadkowe natężenie pola  $E_w$ ) wyraża się zależnością (5):

$$E_w = \sqrt{\sum_n E_n^2} \quad [3]$$

gdzie  $E_n$  jest natężeniem pola od źródła  $n$ .

Warunek pomiaru wartości skutecznej jest dla większości dostępnych mierników spełniony w zakresie natężeń PEM, spotykanych w pomiarach dla celów ochrony środowiska. Nie zawsze jest on jednak spełniony w przypadku pomiarów dla celów BHP, co może być przyczyną zmniejszenia dokładności pomiarów.

Pomiary szerokopasmowe miernikiem selektywnym pozwalają połączyć zalety dwu poprzednich metod — dużą czułość pomiarów selektywnych i możliwość wyznaczenia wypadkowego natężenia pola charakterystycznego dla pomiarów szerokopasmowych. Wypadkowe natężenie pola wyznacza się na podstawie selektywnych pomiarów pojedynczych źródeł korzystając z zależności:

$$E_w = \sqrt{\sum_n (A_{fn} U_n)^2} \quad [4]$$

gdzie  $A_{fn}$  — współczynnik antenowy dla częstotliwości odpowiadającej kolejnemu przedziałowi pomiarowemu (6).

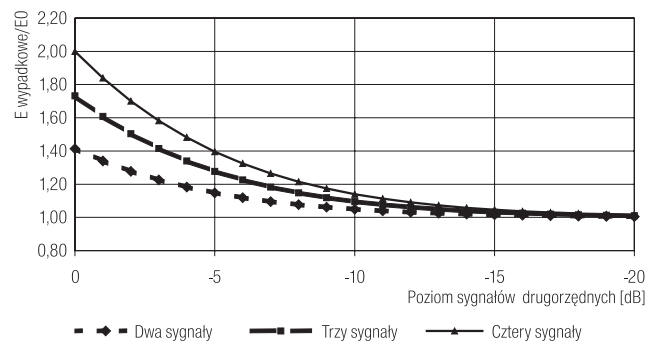
Niezależnie od pomiaru składowych częstotliwościowych, należy pamiętać o składowych przestrzennych pola. W polu dalekim dla sygnałów o polaryzacji liniowej występuje tylko jedna składowa — pole  $E$ , ale w przypadku pomiarów pól pochodzących od różnych źródeł niezbędny jest pomiar w trzech płaszczyznach

lub wyszukiwanie w przestrzeni maksymalnego wskazania dla każdego sygnału. Mierniki szerokopasmowe mają zwykle sondy izotropowe, w przypadku mierników selektywnych z antenami dipolowymi wypadkowe natężenie pola w przestrzeni wyznacza się na podstawie pomiaru poszczególnych składowych i zależności:

$$E_{w(x,y,z)} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad [5]$$

Znacznie bardziej skomplikowane jest wyznaczenie natężenia pola odpowiadającemu pomiarowi sondą izotropową przy zastosowaniu anten o dużej kierunkowości (np. anten logarytmiczno-periodycznych — LPDA). W tym przypadku pomiary ogranicza się zwykle do pomiaru maksymalnego natężenia pola na kierunkach do dominujących źródeł. W większości przypadków jest to w pełni wystarczające. Na rycinie 1. przedstawiono efekt sumowania dwóch, trzech i czterech sygnałów o różnych poziomach względem sygnału dominującego. Jak wynika z wykresu, już sygnały o poziomie niższym o 6 dB względem sygnału mierzonego można pominąć bez znacznego pogorszenia dokładności pomiaru.

Przy wyborze rodzaju pomiaru konieczne jest również uwzględnienie ograniczeń w stosowaniu poszczególnych metod. Dotyczy to zwłaszcza używania mierników z antenami rezonansowymi (w tym LPDA). Pierwszy warunek stosowania takich mierników to realizacja pomiarów w polu dalekim źródła, ale nie można zapominać również o otoczeniu anteny pomiarowej. Wszystkie elementy przewodzące (zwłaszcza o rozmiarach rezonansowych) mogą stać się wtórnymi źródłami pola albo mogą sprzęgać się z anteną, co powoduje zmianę jej parametrów — np. charakterystyki promieniowania lub impedancji, a tym samym stopień dopasowania do odbiornika i współczynnik antenowy,



Ryc. 1. Wypadkowe natężenie PEM przy sumowaniu sygnałów o różnych poziomach.

Fig. 1. Total EMF intensity in the case of summation signals with different levels.

który bezpośrednio wpływa na wynik pomiaru. Niestety w literaturze można znaleźć przykłady bezkrytycznego stosowania takich anten, np. wewnątrz pomieszczeń biurowych czy mieszkalnych lub do pomiarów w bezpośrednim otoczeniu źródła. Dobór właściwej metody pomiaru można podsumować następująco: pomiary ochronne BHP w większości przypadków odbywają się w strefie bliskiej (7), pomiary dla celów ochrony środowiska — zarówno w strefie bliskiej, jak i dalekiej. Zasady pomiarów oraz aparaturę przystosowaną do pomiarów w polu bliskim można z powodzeniem stosować w polu dalekim, sytuacja przeciwna jest niedopuszczalna.

Kolejnym trudnym zagadnieniem są pomiary ekspozycji na PEM od urządzeń użytkowanych normalnie bezpośrednio przy ciele człowieka (można tu spróbować stworzyć neologizm w rodzaju „sprzęt obwieszany”). Do urządzeń takich zaliczyć można radiotelefony (z telefonami komórkowymi na czele), słuchawki Bluetooth, ale także np. aktywne systemy identyfikacji radiowej. Pomiary natężenia pola są w większości przypadków niemiarodajne, zwłaszcza, że zgodnie z polskimi przepisami pomiary wykonuje się w polu niezakłóconym obecnością człowieka. W takich sytuacjach należy raczej rozważyć pomiary prądów indukowanych w ciele niż zewnętrznego PEM.

### Aparatura pomiarowa

Do pomiarów w strefie bliskiej najczęściej stosuje się czujniki szerokopasmowe, w których detekcja sygnału odbywa się bezpośrednio przy antenie i sygnał stałoprądowy transmitowany jest przez linię transparentową (przezroczystą dla PEM) do układu wskaźnikowego (monitora). Do pomiaru składowej elektrycznej (większość pomiarów w zakresie ochrony środowiska i duża grupa pomiarów w zakresie BHP) stosuje się elektrycznie krótkie anteny dipolowe obciążone zwykle detektorem diodowym, który pozwala na uzyskanie większej czułości i dynamiki niż w przypadku termopar czy bolometrów. Do pomiarów składowej magnetycznej wykorzystuje się układy z antenami ramowymi.

Analizując rozwiązania układowe stosowane w takich miernikach, można stwierdzić, że od momentu opracowania sondy o charakterystyce sferycznej, w samych sondach nie ma rewolucyjnych zmian i osiągnęły one szczyt technicznych możliwości. Dolny próg wykrywalności sond (określany również mianem czułości) ograniczony jest czułością detektorów i maksymalną długością anteny do poziomu ok. 1 V/m, w rozwiązaniach specjalnych osiąga 0,1 V/m. Dynamika pojedynczej sondy nie przekracza 60 dB. Dość

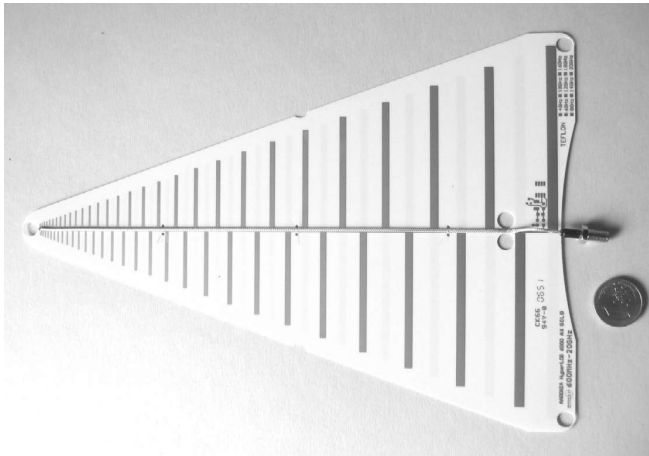


Ryc. 2. Układ do pomiaru PEM z analizatorem widma i anteną 0,3–1 GHz.

Fig. 2. Setup for EMF measurement with spectrum analyzer and 0.3–1 GHz antenna.

dobrze opanowana jest technika kształtowania charakterystyki częstotliwościowej, co pozwala dopasowywać pasmo pracy sond do wybranych zastosowań lub dostosować do wymagań przepisów ochronnych. Znacznie bardziej zmieniają się układy wskaźnikowe. W najnowszych rozwiązaniach można znaleźć, oprócz funkcji podstawowych, szereg pamięci, GPS, możliwość wprowadzania współczynników korekcyjnych i analizy danych itp. Są jednak pomiary, w których niezastąpiony jest miernik analogowy „z przetwarzaniem” w czasie rzeczywistym.

Pomiary pola dalekiego rządzą się innymi zasadami. Podstawowym rodzajem pomiarów są pomiary selektywne, a podstawowym zestawem pomiarowym jest antena dołączona do odbiornika pomiarowego i, w odróżnieniu od mierników pola bliskiego, do odbiornika przekazywany jest sygnał wielkiej częstotliwości. Mierniki takie charakteryzują się również możliwością pomiarów o dużo niższych natężeniach — nawet rzędu  $\mu\text{V/m}$  i dynamiką dochodzącą do 140 dB. Jest to



Ryc. 3. Widok anteny logarytmiczno-periodycznej 0,6–8 GHz.  
Fig. 3. LPDA antenna for 0.6–8 GHz frequency range.

możliwe dzięki przetwarzaniu sygnału z anteny w odbiorniku. Jako odbiorniki pomiarowe bardzo często wykorzystuje się analizatory widma, a anteny są zwykle szerokopasmowymi antenami kierunkowymi (np. przywołane wcześniej anteny logarytmiczno-periodyczne LPDA), lub szerokopasmowymi antenami dipolowymi. W uzasadnionych przypadkach stosuje się również anteny wąskopasmowe. Na rycinie 2. przedstawiono przykład układu do pomiaru PEM z wykorzystaniem analizatora widma i anteny dipolowej pracującej w paśmie 0,3–1 GHz, a na rycinie 3. — antenę LPDA pracującą w paśmie 0,6–8 GHz. Obie zaprezentowane anteny mają stosunkowo niewielkie wymiary i mogą być z powodzeniem stosowane w pomiarach terenowych „z ręki”.

W przypadku stosowania takich anten występuje sygnalizowany wcześniej problem pomiaru wypadkowego natężenia PEM w przestrzeni. W celu wyeliminowania tego problemu zostały opracowane (i są dostępne w handlu) układy trzech anten usytuowanych ortogonalnie z wbudowanym przełącznikiem pozwalającym dołączać poszczególne anteny do wyjścia układu. Opisany zespół anten wspomagany analizatorem widma i komputerem z odpowiednim programem sterującym pozwala na kompleksowe pomiary PEM dla celów monitoringu oraz ochrony ludzi i środowiska. Kolejnym krokiem jest scalenie powyższego układu. Powstaje w ten sposób specjalizowany miernik natężenia PEM z anteną izotropową i analizą widma. Takie rozwiązania są również dostępne na rynku. Kilku producentów oferuje również stosunkowo proste (a tym samym odpowiednio tańsze) przenośne analizatory widma z dedykowanymi antenami (zwykle kierunkowymi), które mogą być stosowane do pomiarów szacunkowych lub

wstępnego rozpoznania pola elektromagnetycznego w punkcie pomiaru. Inną grupą mierników są, oparte na technologii mierników selektywnych, mierniki szerokopasmowe (np. 80 MHz–6 GHz lub pasmowe). Pozwalają one np. na jednoczesny pomiar wraz z archiwizacją danych natężenia PEM w wybranych pasmach częstotliwości, np. pasmach pracy typowych systemów radiokomunikacyjnych. Przykładowy podział pasm może wyglądać następująco: radiofonia i radiokomunikacja — UKF (80–170 MHz), TV-VHF (170–250 MHz), radiokomunikacja — UHF (250–470 MHz), TV-UHF (470–860 MHz), pasma GSM (900 i 1800 MHz, niezależnie uplink i downlink), UMTS (2100 MHz) oraz pasma dostępowe i WiFi (2500–6000 MHz).

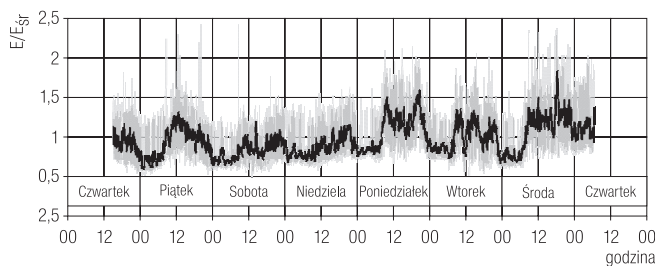
Niezależnie od wybranej metody i zastosowanej aparatury pomiarowej, powinna ona podlegać nadzorowi metrologicznemu, w tym okresowemu wzorcowaniu w kompetentnych laboratoriach. Bardzo korzystna (a w wielu przypadkach wręcz niezbędna) jest bieżąca kontrola sprawności mierników np. z wykorzystaniem dedykowanych źródeł wzorcowego pola elektromagnetycznego.

## WIARYGODNOŚĆ POMIARÓW PEM

Pomiary PEM dla celów ochronnych są pomiarami obciążonymi dużym ryzykiem popełnienia błędu. Wynika to z bardzo dużej liczby czynników wpływających na niepewność wykonywanych pomiarów. Będą to między innymi:

- niedoskonałości metody pomiaru,
- niedoskonałości aparatury pomiarowej,
- czynniki środowiskowe (temperatura, wilgotność),
- wpływ warunków pracy źródła na wynik pomiaru,
- czynnik ludzki.

Czynniki od (a) do (c) są zwykle uwzględniane w podstawowym budżecie niepewności pomiarów przypisanym do stosowanej aparatury pomiarowej. Wpływ czynników (d) i (e) w większości przypadków jest niemożliwy do wyznaczenia *a priori* i powinien być przypisany do danego pomiaru (lub kategorii pomiarów). Dobrą ilustracją wpływu warunków pracy źródła na wynik pomiarów może być przykład najliczniejszych obecnie pomiarów w otoczeniu stacji bazowych telefonii komórkowej. Pomiary takie wykonuje się w warunkach normalnej eksploatacji stacji. Ze specyfiki systemów (zarówno GSM, jak i UMTS) wynika, że chwilowa moc nadajników, a więc i natężenie pola w otoczeniu anten, zależy od chwilowego obciążenia stacji ruchem telekomunikacyjnym. Ponieważ pomiary są tylko próbka,



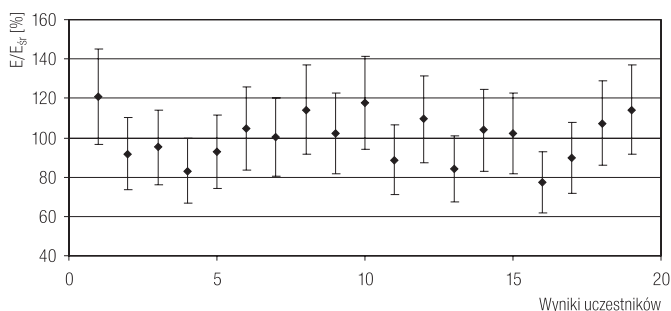
**Ryc. 4.** Wyniki monitoringu natężenia PEM od stacji bazowej GSM w Bielanych Wrocławskich w dniach 23–30 maja 2008 r.

**Fig. 4.** The results of EMF emitted by GSM base station localized in Bielany Wrocławskie monitored on 23–30th May 2008.

powinny odzwierciedlać warunki największej ekspozycji na PEM występujące w warunkach normalnej eksploatacji. Jak więc realizować takie pomiary? Odpowiedzi na to pytanie poszukać można np. w wynikach długoterminowego monitoringu PEM w otoczeniu stacji bazowych. Przykładowe wyniki tygodniowego pomiaru PEM od wybranej (jako reprezentatywnej) stacji bazowej pod Wrocławiem przedstawia rycyna 4.

W tego typu pomiarach mniej istotne jest bezwzględne natężenie PEM, większą uwagę przywiązuje się do względnych zmian w ciągu doby czy dłuższego okresu, stąd wyniki przedstawia się jako odchylenie od wartości średniej lub minimalnej zmierzonego PEM. Na podstawie przedstawionego wykresu można oszacować, że jeżeli pomiary będą wykonywane w czasie statystycznie największego ruchu (między godziną 8:00 a 18:00) w dzień powszedni, to niepewność oszacowania najwyższego natężenia pola na podstawie pojedynczego pomiaru będzie na poziomie 20–30%. Te same szacowania wykonane na podstawie pomiarów realizowanych w nocy będą obarczone niepewnością rzędu 100%.

Czynnik ludzki to parametr praktycznie nigdy niewzględniany w budżetach niepewności pomiarów



**Ryc. 5.** Wyniki eksperymentu przeprowadzonego dla oszacowania wpływu czynnika ludzkiego na wynik pomiarów (Program ILC/LBS 2008, 28 maja 2008 r.).

**Fig. 5.** The results of the experiment performed to estimate the effects of human factors (ILC program LBS 2008, 28th May 2008).

PEM, a związany z umiejętnościami, doświadczeniem, przyzwyczajeniami, a nawet chwilowym stanem psychofizycznym osoby wykonującej pomiar. Jest to czynnik, którego istotności nie da się wyznaczyć metodami analitycznymi, można jedynie próbować oszacować jego wpływ empirycznie. Na podstawie badań i analiz prowadzonych przez autora niepewność pomiaru związaną z czynnikiem ludzkim można oszacować na  $\pm 20\%$ , pod warunkiem, że pomiary wykonuje osoba kompetentna w warunkach normalnych. Wyniki jednego z eksperymentów przeprowadzonych przez autora przedstawione są na rycinie 5. W trakcie porównań międzylaboratoryjnych w zakresie pomiarów PEM wszyscy uczestnicy mieli za zadanie zmierzyć natężenie pola w ściśle określonym punkcie przestrzeni, wykorzystując ten sam miernik. Pomiary odbywały się w bardzo zbliżonych warunkach dla wszystkich uczestników.

## PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono przegląd metod i aparatury stosowanej w pomiarach PEM dla celów ochronnych. Przedstawiono również wybrane czynniki wpływające na dokładność takich pomiarów. Podsumowując, można stwierdzić, że przy prawidłowo dobranej metodyce oraz aparaturze pomiarowej, jeżeli pomiary wykonywane są przez kompetentne osoby, to niepewność pomiarów na poziomie 2÷4 dB należy uznać za zadowalającą. Pojawia się jednak pytanie, czy pomiary prowadzone z niepewnością ok. 20÷60% można uznać za miarodajne narzędzie do oceny ekspozycji na PEM? Odpowiedź jest twierdząca — nie ma lepszego narzędzia, ponieważ nawet najbardziej dokładne symulacje numeryczne czy obliczenia teoretyczne muszą być zweryfikowane pomiarami. Należy sobie jedynie zdawać sprawę z możliwości do osiągnięcia dokładności takiej weryfikacji, a tym samym urealnić dokładność oceny ekspozycji.

## PIŚMIENNICTWO

1. Lewicki F., Lugowski A., Lesiak S.A.: Simplification of the Exposure Assessment in Multiple Sources Environment, Proceedings of XVIII International Wrocław Symposium on Electromagnetic Compatibility. Czerwiec 2006, Wrocław, Poland. Wrocław 2006
2. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. DzU z 2003 r. nr 192, poz. 1883
3. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie dopuszczalnych stężeń

- i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU z 2002 r. nr 217, poz. 1833
4. Bieńkowski P.: Electromagnetic fields measurements — methods and accuracy estimation, EHE'07 — 2nd International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment. 10–12 września 2007, Wrocław, Poland. Wrocław 2007
  5. Bieńkowski P.: Pole elektromagnetyczne-rzeczywistość metrologiczna w świetle obowiązujących norm i przepisów ochronnych. KKRRiT, Gdańsk 2002
  6. Bicki K., Bieńkowski P.: Perspektywy monitoringu pola elektromagnetycznego w środowisku. Przegl. Telekom. 2008;4 [CD-ROM]
  7. Trzaska H.: Electromagnetic Field Measurements in the Near Field. Noble Publishing Corporation, Atlanta 2001