

Paweł Bieńkowski
Bartłomiej Zubrzak

TECHNICZNE MOŻLIWOŚCI OCENY EKSPOZYCJI NA POLE ELEKTROMAGNETYCZNE W ŚRODOWISKU POD KĄTEM BADAŃ BIOMEDYCZNYCH NA PRZYKŁADZIE SYSTEMÓW TELEFONII KOMÓRKOWEJ

TECHNICAL POSSIBILITIES OF ESTIMATING THE ENVIRONMENTAL EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS
FOR BIOMEDICAL INVESTIGATIONS BASED ON CELLULAR TELEPHONY SYSTEMS

Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
Pracownia Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono techniczne aspekty oceny ekspozycji na pole elektromagnetyczne w środowisku na przykładzie systemów telefonii komórkowej. Dokonano przeglądu parametrów PEM istotnych z punktu widzenia ekspozycji biosfery, przedstawiono metody oceny PEM: teoretyczne analizy rozkładu PEM w otoczeniu źródeł oraz pomiary *in situ*. Oszacowano spodziewane natężenia PEM w środowisku komunalnym. Dokonano przeglądu metod pomiarowych i określono ograniczenia związane z aparaturą pomiarową oraz oszacowano niepewność pomiarów środowiskowych. Med. Pr. 2010;61(2):233–239

Słowa kluczowe: środowisko elektromagnetyczne, metrologia pola elektromagnetycznego, badania biomedyczne, systemy telefonii komórkowej

ABSTRACT

The work addresses technical aspects of the assessment of exposure to electromagnetic fields (EMF) in the environment based on cellular telephony systems. In this paper, EMF parameters, important to the biosphere exposure, are discussed, and the methods for the EMF assessment: theoretical analysis of EMF intensity in the proximity of EMF sources and also the measurements *in situ*, are described. The review of measurement methods, identification of limitations of measuring devices, estimation of the expected EMF intensity in the municipal environment and environmental measurements uncertainty are presented. Med Pr 2010;61(2):233–239

Key words: electromagnetic environment, electromagnetic field metrology, biomedical investigation, cellular telephony systems

Adres autorów: Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki, Politechnika Wrocławska,
ul. Janiszewskiego 7/9, 50-370 Wrocław, e-mail: pawel.bienkowski@pwr.wroc.pl, bartlomiej.zubrzak@pwr.wroc.pl
Nadesłano: 18 stycznia 2010
Zatwierdzono: 29 stycznia 2010

WSTĘP

Dynamiczny rozwój cywilizacji znamionuje intensywny wzrost różnorodnych emisji do środowiska. Zjawisko to jest zauważane i czynione są odpowiednie kroki w celu ograniczenia emisji czynników potencjalnie szkodliwych. Prowadzone są też badania celem oceny wpływu tych czynników na biosferę. Do czynników, które w ostatnich dziesięcioleciach charakteryzowały się znaczną ekspansją należy pole elektromagnetyczne (PEM). Jest to ściśle związane ze wzrostem zapotrzebowania na energię elektryczną (systemy przesyłowe oraz urządzenia wykorzystujące do zasilania energię elektryczną), a także z upowszechnieniem systemów

radiokomunikacyjnych, zwłaszcza w zakresie transmisji danych. O ile w przypadku radiokomunikacji rozsiewczej dominującymi źródłami PEM były nadajniki radiofoniczne i telewizyjne, lokalizowane zwykle na wydzielonych obiektach, o tyle w nowoczesnych systemach łączności dwukierunkowej źródła znajdują się zarówno po stronie gęstej sieci stacji bazowych, jak i w terminalach abonenckich. Zazwyczaj są to źródła o stosunkowo małej mocy, ale ich liczba jest ogromna.

Na podstawie danych Urzędu Komunikacji Elektronicznej (1) można stwierdzić, że do końca 2009 roku wydano w Polsce ponad 40 tys. pozwoleń radiowych dla stacji bazowych GSM900/1800 i UMTS, co może przełożyć się na ok. 20 tys. fizycznie istniejących obiektów,

natomiast liczba abonentów telefonii komórkowej w tym samym roku przekroczyła 40 milionów. Trudna do oszacowania jest ilość sieci Wi-Fi, które posiada coraz więcej biur i gospodarstw domowych. Należy także wspomnieć o rozwijającej się w Polsce sieci WiMax. Wszystko to powoduje wzrost poziomu PEM w środowisku i chociaż w większości przypadków natężenie PEM jest wielokrotnie niższe od wartości dopuszczalnych, to pojawia się potrzeba monitorowania i oceny tej ekspozycji w taki sposób, aby zebrane dane mogły być wykorzystywane do badań oddziaływania PEM na biosferę.

W pracy przedstawiono powyższe zagadnienie na przykładzie systemów telefonii komórkowej, ale zarówno metodyka, jak i wymagania sprzętowe dla systemów pomiarowych są uniwersalne i mogą służyć do kompleksowej oceny ekspozycji środowiska na pole elektromagnetyczne.

METODY OCENY EKSPOZYCJI I ODDZIAŁYWANIA PEM NA BIOSFERĘ

Ocenę ekspozycji środowiska na PEM można prowadzić na podstawie teoretycznych analiz rozkładów PEM w otoczeniu struktur promieniujących oraz pomiarów rzeczywistego natężenia PEM. Badania biologicznego oddziaływania PEM realizuje się na podstawie eksperymentów laboratoryjnych, gdzie elementy biosfery poddaje się kontrolowanemu oddziaływaniu PEM oraz na podstawie badań epidemiologicznych, w których ocenia się określoną reprezentację populacji. W każdym z rodzajów badań niezbędne jest określenie parametrów PEM i o ile metodyka eksperymentów biomedycznych jest domeną biologów i lekarzy, o tyle techniczne aspekty tych prac pozostają w gestii inżynierów i techników.

Podstawowym problemem technicznym jest określenie parametrów PEM, które powinny podlegać kontroli i ocenie. Pole elektromagnetyczne charakteryzuje szereg parametrów, które mogą być przedmiotem pomiarów i analiz. Można je sklasyfikować w trzech grupach (choć jest to klasyfikacja umowna): widmo, amplituda i polaryzacja. Parametry związane z widmem to: częstotliwość, szerokość pasma zajmowanego przez sygnał i rodzaj modulacji. Z amplitudą wiążą się: natężenie pola (w tym natężenie składowej elektrycznej E , składowej magnetycznej H i ewentualnie gęstość mocy S) oraz modulacja (zależnie od rodzaju wpływa zarówno na widmo, jak i amplitudę). Z kolei polaryzacja pola niesie informację o położeniu wektora E i H

w przestrzeni i zmianach tego położenia. W systemach radiokomunikacyjnych z reguły ma się do czynienia z polaryzacją liniową lub eliptyczną, a w przypadku polaryzacji liniowej: poziomą, pionową lub coraz powszechniej stosowaną w systemach telefonii komórkowej — polaryzacją $\pm 45^\circ$.

W przypadku propagacji wielodrogowej, czy też występowaniu wtórnych źródeł PEM, należy się liczyć z dużym nieuporządkowaniem polaryzacyjnym PEM w miejscu analizy. W ocenie oddziaływania PEM na organizmy żywe powszechnie wykorzystuje się SAR (Specific Absorption Rate). Jest to miara związana jedynie z energią PEM (2) i nie uwzględnia między innymi efektów związanych z modulacją czy obwiednią sygnału wielkiej częstotliwości. Dla przykładu, ze względu na specyfikę interfejsu radiowego maksymalna moc chwilowa nadajnika telefonu GSM jest 8 razy większa od wartości uśrednionej uwzględnianej przy wyznaczaniu SAR (3). Drugą, powszechnie wykorzystywaną w przepisach ochronnych miarą, jest wypadkowe (czy też tzw. wskaźnikowe) natężenie pola — wyznacza się je na podstawie zależności prawdziwych dla sumowania wartości skutecznych natężenia PEM lub bezpośredniego sumowania gęstości mocy (4). Czy ten parametr jest wystarczający? Na to i wiele innych pytań muszą odpowiedzieć biomedycy, ale zanim odpowiedzi się pojawią, z pewnością warto gromadzić odpowiednie informacje o PEM w środowisku.

ANALIZY TEORETYCZNE ROZKŁADU I ABSORPCJI ENERGII PEM

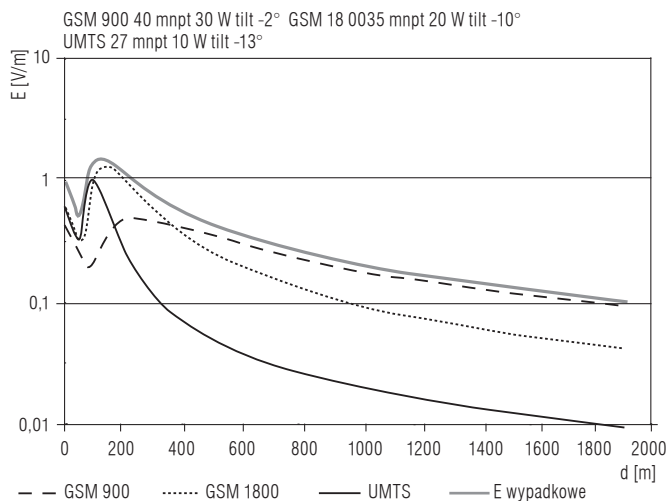
Symulacje rozkładu PEM prowadzi się np. na etapie projektowania systemów radiokomunikacyjnych w celu określenia parametrów użytkowych systemu czy też ich oddziaływania na środowisko. Stosuje się tu najróżniejsze metody od rozwiązań analitycznych wykorzystujących proste modele propagacyjne w swobodnej przestrzeni, aż do analiz opartych na szczegółowych modelach numerycznych radiatorów i ich otoczenia (5). Przyjęty do symulacji model zależy wprost od obszaru, którego symulacja dotyczy (pole dalekie lub pole bliskie źródła), oczekiwanej dokładności i możliwego nakładu pracy.

Dla celów oceny ekspozycji środowiska na PEM stosuje się zwykle modele pola dalekiego, najczęściej tzw. model sferyczny, w którym źródło rzeczywiste reprezentowane jest przez źródło punktowe, umieszczone w środku elektrycznym anteny i posiadające charakterystykę promieniowania rozpatrywanej anteny nadawczej. We wcześniejszych publikacjach (6–8)

współautor niniejszego artykułu zaproponował analityczne modele pozwalające na uproszczenie i unifikację metodyki obliczeń PEM od wybranych systemów radiokomunikacyjnych.

Dla oceny absorpcji energii PEM stosuje się najczęściej analizy numeryczne wykorzystujące modele tkanek od prostych homogenicznych po dokładne wielowarstwowe oraz modele źródeł PEM od podstawowego opromieniowania falą płaską po szczegółową analizę PEM rzeczywistych radiatorów, np. odwzorowujących rzeczywiste telefony komórkowe lub radiotelefony (9) Można oszacować, że niepewność analiz numerycznych odniesionych do warunków laboratoryjnych znajduje się na poziomie 10–30%, a przy stosowaniu prostych modeli propagacyjnych i dla warunków rzeczywistych przyjęcie niepewności 30–100% jest w pełni uzasadnione.

Niezależnie od możliwej do uzyskania niepewności estymacji niezbędne jest oszacowanie poziomu PEM będącego przedmiotem analiz. Na rycinie 1. przedstawiono wyniki estymacji natężenia PEM na kierunku maksymalnego promieniowania i wysokości 2 mnpt

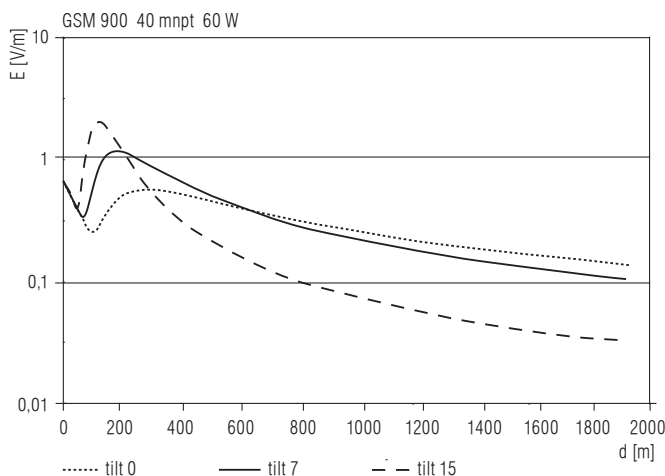


Ryc. 1. Natężenie składowej elektrycznej PEM na wysokości 2 mnpt w otoczeniu typowej stacji bazowej GSM900/1800/UMTS.

Fig. 1. E-field intensity at a height of 2 m above the ground in the vicinity of a typical GSM900/1800/UMTS base station.

w otoczeniu hipotetycznej stacji bazowej telefonii komórkowej. Do obliczeń przyjęto typowe parametry trójsystemowej stacji GSM900/1800/UMTS (tab. 1) oraz model propagacji w swobodnej przestrzeni. Odpowiada to np. stacji bazowej zainstalowanej na wieży antenowej w obszarze niezabudowanym.

Wykresy ryciny 2. obrazują, jak może zmieniać się rozkład PEM w otoczeniu tej samej anteny przy zmianie pochylecia jej wiązki głównej (tzw. tilt).

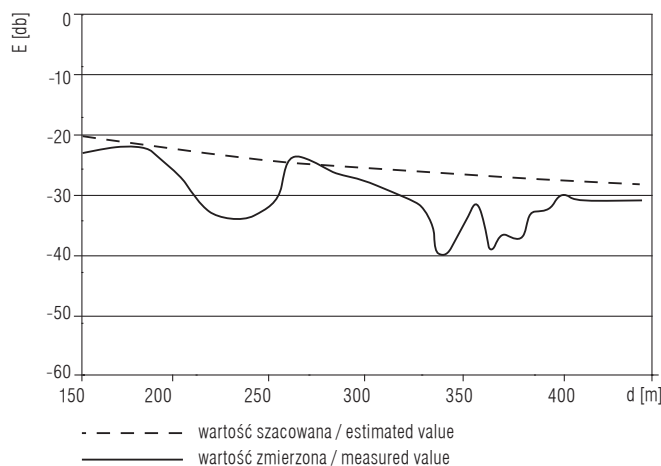


Ryc. 2. Zmiany natężenia składowej elektrycznej PEM na wysokości 2 mnpt w zależności od wartości parametru tilt anteny. Fig. 2. E-field intensity depending of the tilt factor at a height of 2 m above the ground depending on the antenna tilt factor.

W terenie zurbanizowanym zmienność poziomu PEM będzie inna, przy czym należy spodziewać się raczej, że rzeczywiste natężenia PEM będzie niższe od wyznaczonego nawet o rząd wielkości, a ewentualne podwyższenie poziomu związane z wielodrogową propagacją nie będzie większe niż dwukrotne. Na rycinie 3. przedstawiono wyniki pomiarów zmienności natężenia PEM od stacji bazowej GSM wzdłuż trasy, na której występowały przeszkody, co powodowało okresowe przesłanianie anten. Na wykres z wynikami pomiarów naniesiono również oczekiwaną zmianę natężenia PEM dla propagacji w swobodnej przestrzeni.

Tabela 1. Parametry typowej stacji bazowej GSM900/1800/UMTS
Table 1. Parameters of a typical GSM900/1800/UMTS base station

System	Wysokość zawieszenia anteny Height of antennas suspension [mnpt]	Maks. moc doprowadzona do anteny Maximum power delivered to antenna [W]	Zysk anteny Antennas gain [dBi]	Tilt [°]
GSM900	40	60	16	-2
GSM1800	35	40	19	-10
UMTS	27	20	17	-13

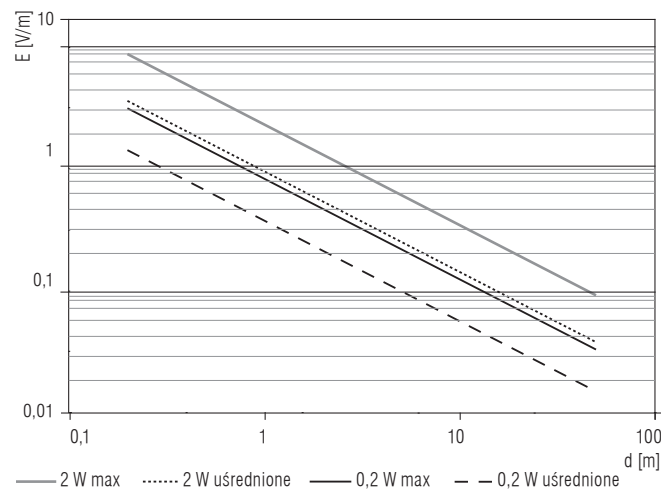


Ryc. 3. Pomiary zmienności natężenia składowej elektrycznej PEM w funkcji odległości od stacji bazowej.

Fig. 3. Measurements of variation of E-field intensity as a function of the distance from the base station.

Korzystając z bardziej zaawansowanych modeli propagacyjnych można uzyskać dokładniejsze estymacje, ale na potrzeby niniejszej pracy nie jest to niezbędne.

Równie ciekawa może być analiza PEM w otoczeniu terminala przenośnego GSM. Na rycinie 4. przedstawiono symulację zmian składowej elektrycznej PEM w funkcji odległości od telefonu dla kilku przypadków: maksymalne chwilowe natężenie pola przy mocy nadajnika 2W (maksymalna moc nadajników stosowana w telefonach GSM 900), uśrednione za okres powtarzania szczelin czasowych przy mocy 2 W oraz analogiczne przypadki dla mocy nadajnika obniżonej do 0,2 W — np. rozmowa przy wysokim poziomie sygnału od stacji bazowej.



Ryc. 4. Zależność natężenia składowej elektrycznej PEM od telefonu komórkowego w funkcji odległości.

Fig. 4. Dependency of E-field intensity emitted on a cellular phone as a function of the distance.

METODY POMIARU PEM

Przed przystąpieniem do pomiaru praktycznie każdej wielkości fizycznej trzeba odpowiedzieć na kilka podstawowych pytań:

- Co mierzyć?
- Jak mierzyć?
- Gdzie mierzyć?
- Kiedy mierzyć?
- Czym mierzyć?
- Jaka jest oczekiwana dokładność pomiaru?

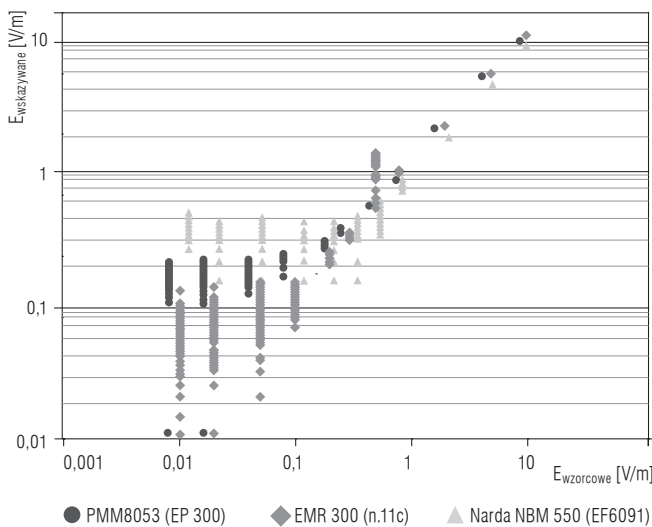
To abecadło metrologa jest szczególnie przydatne w sytuacji, kiedy na powyższe pytania nie ma jednoznacznej odpowiedzi. Metodyka pomiarów PEM dla celów BHP czy „normatywnej” ochrony środowiska jest lepiej lub gorzej zdefiniowana, ale przedmiotem niniejszej pracy są pomiary pojęte znacznie szerzej — na dzisiaj bliżej nieokreślone potrzeby oceny PEM w środowisku. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można przyjąć, że z punktu widzenia analizy oddziaływania PEM na biosferę, podstawowe znaczenie mają informacje o natężeniu poszczególnych składowych PEM w określonych zakresach częstotliwości (chyba że zostanie w sposób jednoznaczny wykazana odpowiednio duża selektywność biosfery na wybrane częstotliwości PEM), najlepiej tożsamych z podanymi w przepisach ochronnych.

Wstępnie można przyjąć, że informacja o polaryzacji i modulacji PEM nie jest istotna (wyłączając uwarunkowania techniczne związane z metodyką pomiarów). Uszczegóławiając dane, można na podstawie pasm pracy identyfikować klasy źródeł PEM (np. w radiokomunikacji: radiodyfuzja i radiokomunikacja ruchowa itp.). W takim podejściu preferuje się pomiary szerokopasmowe lub pasmowe oraz wykorzystanie mierników z pasywnymi sondami szerokopasmowymi, umożliwiającymi wykonywanie pomiarów w bezpośrednim otoczeniu źródeł PEM, zarówno pierwotnych, jak i wtórnych. Mierniki takie powszechnie stosuje się w pomiarach realizowanych dla celów bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska. Wynikiem pomiaru jest wypadkowe natężenie pola z całego pasma pomiarowego sondy.

W miernikach szerokopasmowych dobrze opanowano realizację charakterystyki wszechkierunkowej (sferycznej) sond oraz kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej. Podstawową wadą tej techniki jest stosunkowo wysoki próg detekcji, ograniczony czułością detektorów do minimalnej wartości ok. 1 V/m (do 0,1 V/m w rozwiązaniach specjalnych) przy dynamice pomiaru nieprzekraczającej 1000. Pomiary wła-

sne popularnych w Polsce mierników natężenia PEM stosowanych w pomiarach ochronnych wskazują, że typowy poziom szumów tych mierników oscyluje w granicach 0,12–0,35 V/m dla sond o największej czułości i ok. 0,8–1,7 V/m dla sond mniej czułych. Wartości te mogą rosnąć z czasem (można to tłumaczyć starzeniem się układów oraz zmianą charakterystyk sondy związanych np. z chwilowymi przeciążeniami sondy). Oznacza to, że nawet w miejscu, gdzie występuje „cisza elektromagnetyczna”, średnie wskazanie miernika będzie miało powyższą wartość.

Na rycinie 5. przedstawiono porównanie wyników pomiarów trzech typowych mierników PEM. Pomiar wykonano umieszczając mierniki w polu wzorcowym o zadanym natężeniu (oś X) i rejestrując wskazania miernika, przy czym dla każdego natężenia pola przeprowadzono 50 pomiarów. Uzyskane wyniki oznaczono punktami na wykresie. Ich rozrzut wskazuje na niestabilność wskazań mierników i wpływ szumów własnych na wynik pomiarów. Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze wzrostem natężenia pola wzorcowego wyniki stają się coraz bardziej powtarzalne, a wartości wskazane przez miernik odpowiadają rzeczywistemu natężeniu pola wzorcowego.

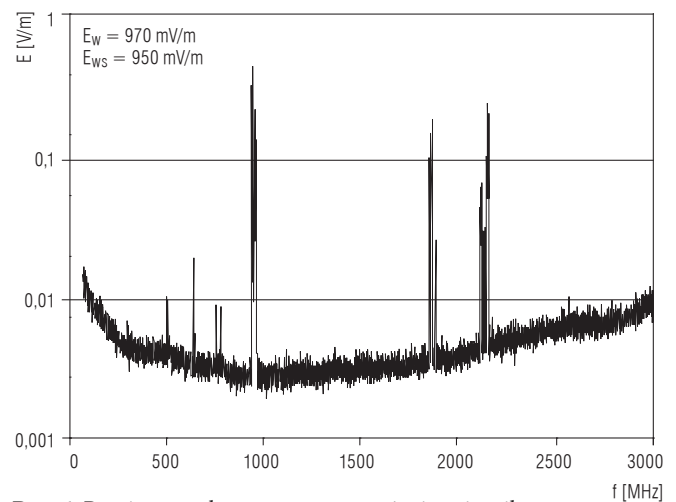


Ryc. 5. Pomiar szumu mierników PEM.
Fig. 5. Noise measurement of EMF dosimeters.

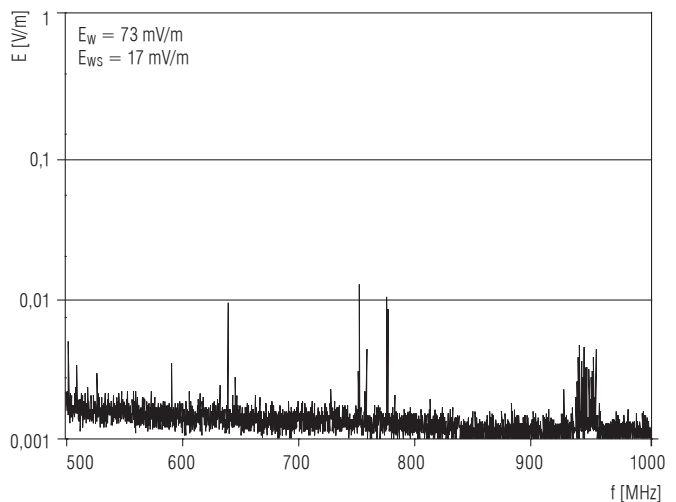
Znacznie niższy próg detekcji i dużo większą dynamikę można uzyskać, wykorzystując techniki pomiarów selektywnych, znanych z typowych pomiarów propagacyjnych. System złożony z anteny oraz odbiornika pomiarowego pozwala uzyskać czułość na poziomie nawet pojedynczych $\mu\text{V/m}$ przy dynamice dochodzącej do 140 dB. Podstawową wadą tej techniki w zastosowa-

niu do pomiarów środowiskowych jest stopień komplikacji układu (a tym samym wysoka cena), bardzo duża ilość danych uzyskiwanych z pomiaru oraz konieczność ich przetworzenia w celu wyznaczenia wypadkowego natężenia pola, a także trudności w doborze układu antenowego i uzyskaniu charakterystyki sferycznej. Również w tym przypadku występuje problem szumów miernika, zwłaszcza przy wyznaczaniu wypadkowego natężenia PEM z całego pasma pomiarowego miernika selektywnego.

Na rycinach 6. i 7. przedstawiono wyniki pomiarów natężenia PEM miernikiem selektywnym w zakresie



Ryc. 6. Pomiar szerokopasmowy przy użyciu miernika selektywnego — poziom składowej elektrycznej PEM dużo wyższy od poziomu szumów.
Fig. 6. Broadband measurement using a selective meter. E-field intensity level is higher than noise level.



Ryc. 7. Pomiar miernikiem selektywnym przy poziomach natężenia składowej elektrycznej PEM bliskich poziomowi szumów miernika.
Fig. 7. Broadband measurement using a selective meter. E-field intensity level is almost close to noise level.

radio- i mikrofal w dwóch różnych miejscach, w zróżnicowanym środowisku elektromagnetycznym. Na wykresach podano też wypadkowe natężenia pola E_w , wyznaczone na podstawie sumowania z całego pasma pomiarowego, oraz natężenie pola E_{ws} wyznaczone na podstawie sumowania tylko tych próbek, których wartość przekraczała poziom szumu. Widać, że w przypadku pomiarów, w których natężenie PEM niewiele przekracza poziom szumów miernika, błąd wyznaczenia wypadkowego natężenia PEM może przekraczać nawet 10 dB.

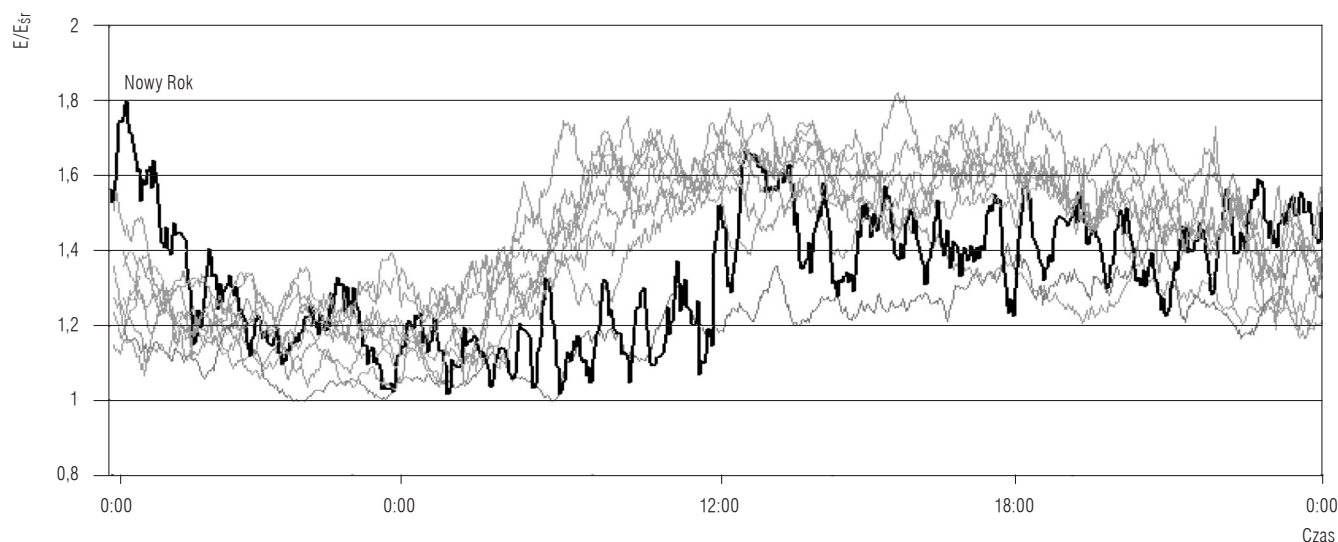
Kolejnym zagadnieniem związanym z analizowaną klasą pomiarów jest sposób realizacji pomiarów — monitoring przestrzeni (środowiska) lub ocena ekspozycji wybranych elementów biosfery (np. indywidualna dozymetria ludności). W pierwszym przypadku czujniki umieszcza się w wybranych punktach i bada np. długoterminowe zmiany PEM lub okresowość zmian. Przykład takich pomiarów przedstawiono na rycinie 8. W wybranym punkcie prowadzono tygodniowe pomiary w paśmie GSM, badając zmienność natężenia PEM (na podstawie pomiaru składowej elektrycznej) w czasie. Na wykresie nałożono unormowane wyniki pomiarów z poszczególnych dni, co pozwoliło wykazać znaczną okresowość i powtarzalność zmian PEM w czasie. Przy dłuższym okresie obserwacji udało się również zauważyć charakterystyczne obniżenie natężenia PEM w dni wolne od pracy, ale nie jest to regułą i wyników pomiarów z jednego punktu nie można uogólniać na obszar całego miasta. Można jednak, na

podstawie cyklu reprezentatywnych pomiarów, określić pewne reguły zmian PEM.

Poziom PEM (reprezentowany przez natężenie dowolnej składowej lub gęstość mocy) zależy od odległości od źródła, ale również od warunków propagacji, dlatego dla pomiarów bezwzględnego poziomu PEM kluczowego znaczenia (zwłaszcza w terenie zurbanizowanym) nabiera wybór punktu pomiaru. W przypadku pomiarów PEM od np. stacji bazowych można przeprowadzić rekonesans przez wykonanie szeregu pomiarów w różnych punktach, wykrywając w ten sposób zmiany w rozkładzie PEM odbiegające od oczekiwanego rozkładu.

Większy problem występuje przy próbie monitorowania PEM telefonów komórkowych — w tym przypadku, ze względu na mobilność źródeł PEM, zmiany mogą być bardzo duże i niepoddające się analizie statystycznej. Poza tym aktywność emisyjna telefonu ma inny charakter niż w przypadku stacji bazowej — urządzenie mobilne emituje PEM tylko w trakcie połączenia i pracuje w tym czasie ze zmienną mocą, która zależy od chwilowego poziomu sygnału ze stacji bazowej, rodzaju transmisji (rozmowa; wysyłanie wiadomości, w tym transmisje systemowe niezależne od połączeń użytkowych; transfer danych).

Dodatkowo poziom PEM zależy jeszcze od rodzaju usługi — transmisje szerokopasmowe będą wykorzystywały średnio większą moc nadajnika, a tym samym w trakcie ich realizacji w otoczeniu terminala będzie występowało większe natężenie pola. Kolejny aspekt



Ryc. 8. Przykład pomiarów monitoringowych składowej elektrycznej PEM w stałym punkcie w pobliżu stacji bazowej GSM (23.12.2009–03.01.2010).

Fig. 8. An example of E-field monitoring measurements in a fixed point near a GSM base station (23.12.2009–03.01.2010).

to mobilność sama w sobie — użytkownik telefonu przemieszcza się, co poza oczywistą zmianą odległości źródło–punkt pomiaru skutkuje także przełączaniem się między komórkami sieci (lub między sektorami tej samej komórki). Podczas tego procesu (tzw. hand-over) terminal mobilny również cechuje wzmożona aktywność emisji PEM.

Wymienione czynniki sprawiają, że monitoring PEM emitowanego przez telefony komórkowe jest zadaniem dużo bardziej złożonym niż monitoring PEM emitowanego przez stacje bazowe. W przypadku oceny ekspozycji wybranych osób lepszym rozwiązaniem może być monitoring osobisty, z wykorzystaniem indywidualnych dozymetrów PEM.

WNIOSKI

Powyższe przykłady wskazują, że do uzyskania kompleksowej oceny PEM w środowisku czy też oceny ekspozycji poszczególnych elementów biosfery niezbędne jest prowadzenie szeroko zakrojonych pomiarów monitoringowych. Osobnym zagadnieniem jest oszacowanie niepewności takich analiz. Przyjmując, że pojedynczy pomiar w warunkach terenowych charakteryzuje się niepewnością na poziomie 15–30%, oraz pamiętając o tym, że każdy pomiar jest tylko próbką, autorzy na tym etapie rozważań nie podejmują się określić całkowitej niepewności takiej oceny PEM, ale niepewność na poziomie rzędu wielkości można uznać za całkiem realną.

Podsumowując, oczekiwania dotyczące technicznej strony oceny ekspozycji biosfery na PEM, jakie można sformułować na podstawie analiz przedstawionych w niniejszej pracy, są następujące:

- pomiary selektywne lub pasmowe do oceny spektralnej PEM;
- pomiary szerokopasmowe do oceny wskaźnikowego natężenia PEM lub miar energetycznych (np. SAR);
- pożądane długoterminowe pomiary z odpowiednio dużą rozdzielczością w czasie (zmienność PEM w czasie) w wielu punktach pomiarowych (zmienność PEM w przestrzeni);
- pożądany zakres dynamiczny mierników dla za-

kresu radio- i mikrofal: 5(10) mV/m – 50(100) V/m (poziom najniższy pozwoli na rzetelne oszacowanie PEM w środowisku, poziom najwyższy to PEM w bezpośrednim otoczeniu źródeł, np. telefonu komórkowego przy dozymetrii indywidualnej);

- zintegrowany system zbierania i analizy danych pomiarowych, z identyfikacją źródeł (modulacje, polaryzacja, rodzaj transmisji).

PIŚMIENNICTWO

1. Urząd Komunikacji Elektronicznej: Wykazy pozwoleń radiowych. Pozwolenia radiowe dla stacji GSM, UMTS oraz CDMA, [cytowany 8 stycznia 2010]. Adres: http://www.uke.gov.pl/uke/index.jsp?news_cat_id=358&news_id=3749&layout=9&page=text&place=Lead01
2. Trzaska H.: Limitations in the SAR Use. *Environmentalist* 2005;25(2–4):181–185
3. Bieńkowski P.: Oddziaływanie pola elektromagnetycznego od stacji bazowych GSM generacji 2.5 na środowisko. *Przegl. Elektrotechn.* 2005;81(12):60–62
4. Bieńkowski P.: Pole elektromagnetyczne emitowane przez urządzenia w zakresie radio- i mikrofal — aparatura i metodyka pomiarów dla ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy. *Med. Pr.* 2008;59(6):513–519
5. Bieńkowski P., Lewicki F.: Poziomy PEM pochodzących od systemów radiokomunikacyjnych w pasmach powyżej 1 GHz. *Przegl. Telekom.* 2009;11:1990–1996
6. Bieńkowski P.: Czytelność „raportu o oddziaływaniu przedsięwzięcia na środowisko” dla osób bez przygotowania specjalistycznego w zakresie telekomunikacji. *Med. Pr.* 2007;58(2):161–168
7. Bieńkowski P.: Metodyka wyznaczania obszaru występowania pola elektromagnetycznego o wartościach większych od dopuszczalnych dla środowiska w otoczeniu anten linii radiowych. *Med. Pr.* 2007;58(2):117–123
8. Bieńkowski P.: Monitoring pola elektromagnetycznego w środowisku — koncepcja sieci sensorycznej. *Przegl. Elektrotechn.* 2009;12:37–39
9. Kieliszek J., Sobiech J.: Pomiary prądów indukowanych jako element oceny ekspozycji personelu na pola elektromagnetyczne. Warsztaty IMP, Łódź 2009 „Ochrona przed PEM”. 12–14 października 2009. Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2009, s. 72–80