

Paweł Bieńkowski

Paweł Cała

Bartłomiej Zubrzak

OPTIMALIZACJA METODYKI POMIARU WIELOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO STACJI BAZOWYCH TELEFONII KOMÓRKOWEJ

OPTIMIZATION OF MEASUREMENT METHODS FOR A MULTI-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD
FROM MOBILE PHONE BASE STATION USING BROADBAND EMF METER

Politechnika Wroclawska / Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland

Wydział Elektroniki, Katedra Telekomunikacja i Teleinformatyki / Faculty of Electronics, Telecommunications and Teleinformatics Department

STRESZCZENIE

Wstęp: W artykule przedstawiono charakterystykę źródła pola elektromagnetycznego (PEM), jakim jest stacja bazowa (base station – BS) telefonii komórkowej. Opisano najczęściej spotykane konfiguracje systemowe wraz z ich budową i omówiono specyfikę promieniowanego PEM w zależności od sposobu dostępu do usług telekomunikacyjnych i parametrów transmisji radiowej. Poświęcono także uwagę antenom, jakie są montowane na masztach BS i podano ich typowe parametry. **Materiał i metody:** Analizie poddano wpływ poszczególnych składowych pola wieloczęstotliwościowego, jakie najczęściej jest spotykane w otoczeniu BS, na wypadkowe natężenie PEM mierzone za pomocą popularnych mierników szerokopasmowych. Przedstawiono przykładowe charakterystyki najczęściej spotykanych sond PEM i 2 scenariusze pomiarowe: w jednym źródłem PEM była wielosystemowa stacja bazowa z mikrofalowymi liniami radiowymi, w drugim – stacja bez linii radiowych. **Wyniki:** Przedstawiono metodę pomiaru wieloczęstotliwościowego PEM za pomocą 2 sond szerokopasmowych, która pozwala na znaczne zminimalizowanie niepewności pomiaru. Wzory i przekształcenia, za których pomocą można obliczyć rzeczywiste natężenie PEM w otoczeniu źródeł wieloczęstotliwościowych, zweryfikowano w warunkach laboratoryjnych na specjalnym stanowisku wzorcowym wieloczęstotliwościowego PEM oraz w warunkach rzeczywistych – podczas wykonywania pomiaru istniejącej stacji bazowej z mikrofalowymi liniami radiowymi. **Wnioski:** Metodę pomiaru natężenia PEM w otoczeniu stacji bazowych z mikrofalowymi liniami radiowymi zwalidowano w warunkach zarówno laboratoryjnych, jak i rzeczywistych, co pozwoliło w znacznym stopniu ograniczyć niepewność pomiaru tak specyficznego źródła PEM. Jest to najbardziej optymalne podejście do przeprowadzenia oceny ekspozycji na PEM w otoczeniu BS. Alternatywną metodą oceny jest metoda ostrożności (o znacznie większej niepewności pomiaru) i metoda wyłączenia jednego ze źródeł (o bardziej skomplikowanej procedurze pomiarowej). Med. Pr. 2015;66(5):701–712

Słowa kluczowe: metrologia pola elektromagnetycznego, pasmo E, ekspozycja środowiska, bezpieczeństwo pracy w polach elektromagnetycznych, niepewność pomiaru, stacje bazowe telefonii komórkowej

ABSTRACT

Background: This paper presents the characteristics of the mobile phone base station (BS) as an electromagnetic field (EMF) source. The most common system configurations with their construction are described. The parameters of radiated EMF in the context of the access to methods and other parameters of the radio transmission are discussed. Attention was also paid to antennas that are used in this technology. **Material and Methods:** The influence of individual components of a multi-frequency EMF, most commonly found in the BS surroundings, on the resultant EMF strength value indicated by popular broadband EMF meters was analyzed. The examples of metrological characteristics of the most common EMF probes and 2 measurement scenarios of the multisystem base station, with and without microwave relays, are shown. **Results:** The presented method for measuring the multi-frequency EMF using 2 broadband probes allows for the significant minimization of measurement uncertainty. Equations and formulas that can be used to calculate the actual EMF intensity from multi-frequency sources are shown. They have been verified in the laboratory conditions on a specific standard setup as well as in real conditions in a survey of the existing base station with microwave relays. **Conclusions:** Presented measurement methodology of multi-frequency EMF from BS with microwave relays, validated both in laboratory and real conditions. It has been proven that the described measurement methodology is the optimal approach to the evaluation of EMF exposure in BS surrounding. Alternative approaches with much greater uncertainty (precaution method) or more complex measuring procedure (sources exclusion method) are also presented. Med Pr 2015;66(5):701–712

Key words: metrology of electromagnetic fields, E band, exposure environment, work safety in electromagnetic fields, measurement uncertainty, cellular base stations

Autor do korespondencji / Corresponding author: Paweł Cała, Politechnika Wroclawska,
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Janiszewskiego 9, 50-370 Wrocław, e-mail: pawel.cala@pwr.edu.pl
Nadesłano: 20 lutego 2015, zatwierdzono: 15 września 2015

WSTĘP

Energia elektromagnetyczna i związane z nią pole elektromagnetyczne (PEM) są wykorzystywane w wielu gałęziach nauki, medycyny i techniki. W zależności od zastosowania energii PEM korzysta się z różnych zakresów częstotliwości widma elektromagnetycznego. Na przykład w technice obróbki metali używa się pasmo o stosunkowo niskich częstotliwościach (zwykle do kilkudziesięciu kiloherców), a w fizyoterapii – bardzo niskie częstotliwości (do kilkudziesięciu Hz) albo tzw. pasma ISM (Industry, Science, Medicine) 27 MHz i 2,45 GHz. Najszerszy zakres częstotliwości wykorzystuje się bez wątpienia w radiokomunikacji i radiowych systemach transmisji danych – od częstotliwości z zakresu fal długich (np. 225 kHz – nadajnik Programu I Polskiego Radia) aż po pasma mikrofalowe.

Ze względu na bardzo intensywny rozwój i znaczne „zagęszczenie” systemów radiokomunikacyjnych mikrofałe, czyli częstotliwości z zakresu 300 MHz–300 GHz, nabierają specjalnego znaczenia. Wraz z rozwojem możliwości technicznych wykorzystywano coraz krótsze fale: długie, średnie, krótkie, ultrakrótkie i mikrofałe, czyli fale o „mikro” długościach, od 1 m do 1 mm (dla porównania fala o częstotliwości 225 kHz wspomnianego nadajnika Polskiego Radia ma długość 1333 m). Mikrofałe znalazły pierwsze praktyczne zastosowanie w radarach, ale również stosunkowo szybko trafiły do codziennego użytku – w kuchenkach mikrofalowych. Obecnie wykorzystywane są m.in. w systemach telefonii komórkowej, sieciach bezprzewodowych Wi-Fi i w liniach radiowych, tzw. radioliniach, które zapewniają transmisję sygnałów w systemie punkt–punkt.

Emisja energii elektromagnetycznej wiąże się z występowaniem pól elektromagnetycznych o poziomach istotnych z punktu widzenia ochrony środowiska czy oceny ekspozycji pracowników na PEM. Jeszcze do niedawna górna częstotliwość systemów do użytku cywilnego nie przekraczała 40 GHz (sporadycznie 60 GHz), ale ostatnie lata przyniosły nowinkę techniczną – wykorzystywanie dotychczas nieużywanego pasma częstotliwości mikrofalowych, tzw. pasma E (60–90 GHz). Daje ono ogromne możliwości w zakresie szeroko pojętej radiokomunikacji i transmisji danych, dzięki dostępności kanałów radiowych o bardzo dużych przepustowościach i szerokiemu spektrum częstotliwości. Podstawową wadą wykorzystania tego pasma jest stosunkowo mały zasięg transmisji, ale mimo wszystko należy się spodziewać dynamicznego rozwoju pracu-

jących w tym paśmie systemów. Będą to np. tzw. kioski i prysznicze danych pozwalające na błyskawiczne (w czasie kilkunastu sekund) pobieranie danych w urządzeniach mobilnych, np. filmów w bardzo wysokiej jakości (high definition – HD). Przewiduje się, że takie rozwiązania wejdą do użytku w ciągu najbliższego roku.

Obecnie pasmo E zaczyna być wykorzystywane w liniach radiowych, zwłaszcza przez operatorów telefonii komórkowej w dużych miastach. Szacuje się, że do końca 2015 r. powstanie ponad tysiąc takich linii radiowych. Wynika to z rozwoju sieci i coraz większego „łtku” w pasmach niższej częstotliwości.

Stacje bazowe telefonii komórkowej z liniami radiowymi pracującymi w paśmie E są tematem przewodnim niniejszej pracy. Mimo że natężenia pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez te źródła nie są bardzo duże, to w ich otoczeniu mogą wystąpić wartości istotne z punktu widzenia ochrony środowiska czy bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) dla pracowników związanych z obsługą tych źródeł [1]. W pierwszym przypadku problem nie jest bardzo istotny, ale należy liczyć się z możliwością występowania PEM z tego pasma o wartościach zbliżonych do dopuszczalnych w miejscach dostępnych dla ludności.

Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza możliwości pomiaru pola elektromagnetycznego z pasma E (w szczególności wtedy, gdy jednocześnie pracują źródła z tego i innych podzakresów częstotliwości) oraz zoptimalizowanie metody pomiaru w celu uzyskania jego możliwie małej niepewności. Typowym przykładem ww. sytuacji są stacje bazowe telefonii komórkowej.

Stacja bazowa (base station – BS) to jeden z podstawowych elementów nowoczesnych radiowych systemów telekomunikacyjnych. W każdym z nich spełnia tę samą rolę – zapewnia łączność bezprzewodową terminala abonenta z siecią operatora. Niezbędny do tego jest interfejs radiowy, specyficzny dla każdego z systemów. Obecnie w Polsce wykorzystuje się głównie 3 systemy telefonii komórkowej – pracujące w pasmach 880–960 MHz (GSM900), 1710–1880 MHz (GSM1800, znany także jako DCS) oraz 1900–2290 MHz (UMTS) [1].

W przypadku pomiarów PEM stacja bazowa jest bardzo specyficznym źródłem pola elektromagnetycznego. Przede wszystkim najczęściej jest to źródło wieloczęstotliwościowe, bo większość operatorów na danej BS instaluje dwa lub trzy systemy. Moc, z jaką pracuje stacja bazowa, jest zmienna w czasie (szersze omówienie w [2–5]) oraz zależy m.in. od natężenia ruchu telekomunikacyjnego, odległości terminali mobilnych od BS i warunków propagacyjnych. Transmisja danych

od stacji bazowych do innych segmentów sieci odbywa się torami światłowodowymi lub drogą radiową z wykorzystaniem linii radiowych (tzw. radiolinii) pracujących na pasmach od ok. 8 GHz do 90 GHz.

Typowe stacje bazowe przedstawiono na fotografii 1. i 2. Fotografia 1. przedstawia konstrukcję starszego typu – w której nadajniki były lokalizowane w dużym oddaleniu od anten, zwykle w osobnym pomieszczeniu, a radiowy sygnał mocy był przesyłany do anten kablami koncentrycznymi – tzw. fiderami. Fotografia 2. prezentuje rozwiązanie nowe, z tzw. plecakowymi modułami radiowymi – powszechnie stosowane w nowo budowanych stacjach, ale też przy modernizacji (zwłaszcza rozbudowie) stacji starszych. Rozwój techniki układów wysokiej częstotliwości umożliwił miniaturyzację układów nadawczo-odbiorczych i umieszczenie ich bezpośrednio przy antenach. Pozwala to na zmniejszenie strat energii wysokiej częstotliwości i uproszczenie konstrukcji mechanicznej.

W dobrze zaprojektowanej i wykonanej stacji bazowej źródłami PEM istotnymi dla bezpieczeństwa pra-



Fot. 1. Stacja bazowa starszego typu z układami nadawczo-odbiorczymi w kontenerze i długimi fiderami
Photo 1. The base station with a transceiver placed in a container and long feeders



Fot. 2. Stacja bazowa z „plecakowymi” modułami radiowymi
Photo 2. The base station with small remote radio units

cy i ochrony środowiska są jedynie anteny. Zdarza się oczywiście występowanie PEM w pomieszczeniach nadajników, zwłaszcza w otoczeniu złączy fiderów, układów sumowania mocy itp., ale najczęściej wynika to z defektu elementów mikrofalowych lub niestarannego wykonania instalacji.

W środowisku ogólnym i środowisku pracy poziom ekspozycji ludzi na PEM wytwarzane przez stację bazową wyznacza się na podstawie wyników pomiarów PEM odniesionych do obowiązujących norm i aktów prawnych [6–8]. W ochronie środowiska ogólnego wartością odniesienia dla częstotliwości w całym paśmie pracy BS jest natężenie pola równe 7 V/m. Z kolei dla oceny ekspozycji w środowisku pracy wartości graniczne dla stref ochronnych w paśmie 15 MHz–3 GHz są stałe ($E1 = 20$ V/m), a powyżej 3 GHz zależą od częstotliwości zgodnie z zależnością:

$$E1(f) = 0,16 \times f + 19,5 \quad (1)$$

gdzie:

$E1$ – wartość graniczna między strefą pośrednią a zagrożenia,
 f – częstotliwość wyrażona w GHz.

Anteny stacji bazowych telefonii komórkowej

Stacje bazowe telefonii komórkowej, niezależnie od systemu, wyposażone są w anteny sektorowe zapewniające łączność między BS a terminalami abonentów oraz anteny linii radiowych służących do transmisji danych w strukturze sieci. Obie klasy anten mają różną budowę i parametry, tj. charakterystyki promieniowania i zysk, różna jest również moc doprowadzana do anten. Przykładowe dane przedstawiono w tabeli 1.

Anteny sektorowe to zwykle układy antenowe, zestawione z pionowego szyku dipoli półfalowych, zapewniające uzyskanie odpowiedniej szerokości wiązki promieniowania w płaszczyźnie pionowej. Za kształtowanie charakterystyki poziomej w dużej mierze odpowiada ekran za antenami, pełniący rolę reflektora. Anteny linii radiowych to w przeważającej większości systemy z reflektorem parabolicznym, choć spotykane są również anteny rożkowe (tubowe). Średnice anten wykorzystywanych w BS wynoszą 25–60 cm, rzadziej – 120 cm. W sieci szkieletowej można spotkać także średnice rzędu 200 cm.

Większość energii emitowanej przez antenę znajduje się w wiązce głównej, ale w charakterystyce promieniowania anteny występują również tzw. listki boczne. Ich poziom i rozkład przestrzenny zależy od konstrukcji anteny. Zdarzają się przypadki, w których to właśnie listki boczne, a nie główna wiązka promieniowania są źródłem PEM występującego w punkcie pomiaru, zwłaszcza w bezpośrednim otoczeniu anten, np. na dachu budynku, na którym jest zainstalowana BS.

Biorąc pod uwagę przedstawioną charakterystykę układów radiowych stacji bazowej telefonii komórkowej, można stwierdzić, że jest to bardzo specyficzny rodzaj źródła, którego PEM może zawierać kilka często-

tliwościowych składowych z bardzo szerokiego zakresu – 0,9–90 GHz. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie optymalnej metodyki pomiarów PEM w otoczeniu wielosystemowych stacji bazowych z liniami radiowymi, która zminimalizuje niepewność pomiaru, a tym samym zwiększy dokładność oceny ekspozycji pracowników czy ogółu ludności na PEM.

MATERIAŁ I METODY

Pomiary pola elektromagnetycznego dla celów ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy mogą być realizowane różnymi metodami, które często są ograniczone możliwościami metrologicznymi dostępnej aparatury pomiarowej. Z technicznego punktu widzenia najbardziej dokładniejszy pomiar wieloczęstotliwościowego źródła PEM, jakim jest stacja bazowa, można wykonać poprzez sumowanie wyników wielu pomiarów selektywnych. Do ich przeprowadzenia wymagany jest specjalistyczny, drogi i kłopotliwy w obsłudze (w przypadku pomiarów terenowych) sprzęt z możliwością analizy widma do identyfikacji poszczególnych źródeł. Ponadto komercyjnie dostępne mierniki tego typu mają pasmo częstotliwości pracy ograniczone do ok. 6 GHz, co uniemożliwia pomiary w otoczeniu stacji z liniami radiowymi. W przypadku pomiaru PEM o natężeniu zbliżonym do poziomu szumu wewnętrznego miernika należy liczyć się ze znacznym błędem pomiarowym, co wraz z metodą jego ograniczenia opisali Bienkowski i wsp. [9].

Powszechnie stosowaną metodą jest wykonywanie pomiarów za pomocą mierników wyposażonych w sondy szerokopasmowe, w których sumowanie różnych składowych częstotliwościowych PEM następuje bezpośrednio w czujniku. Warunkiem poprawnego

Tabela 1. Parametry typowych anten systemów transmisji radiowych stosowanych w stacjach bazowych
Table 1. Parameters of typical antennas for different radiocommunication systems

Typ anteny Type of antenna	Poziomy HPBW Horizontal HPBW [°]	Pionowy HPBW Vertical HPBW [°]	Zysk Gain [dBi]	Pochylenie wiązki Tilt [°]	Moc doprowadzana Delivered power [W]	EIRP [kW]
739 620/GSM900	65,0	27,0	12,5	0	20–100	8,90
739 495/GSM1800	65,0	7,0	18,0	2	20–100	12,60
742 215/UMTS	67,0	6,8	18,0	10	50	19,00
VHLP1-80/ 80 GHz	0,9	0,9	44,0	0	0,005	0,13
HAE3806 / 38 GHz	0,9	0,9	45,9	0	0,02	0,78
HP4-23 / 23 GHz	0,8	0,8	46,6	0	0,04	1,80

HPBW – kąt połowy mocy / half power beam width, dBi – skala logarytmiczna zysku anteny względem anteny izotropowej / decibels relative to an isotropic antenna, EIRP – zastępcza moc promieniowana izotropowo / effective isotropical radiated power.

pomiaru jest detekcja wartości skutecznej (root mean square – RMS) mierzonej składowej elektrycznej PEM, zgodnie z zależnością:

$$E_{W_{rmsI}} = \sqrt{\sum_{nf} E_{nf}^2} \quad (2)$$

gdzie:

$E_{W_{rmsI}}$ – wartość skuteczna PEM,

n – kolejne źródło PEM,

f – częstotliwość promieniowania od ww. źródła,

E_{nf} – wartości skuteczne natężenia PEM dla poszczególnych składowych częstotliwościowych nf .

Taki sposób wyznaczania wypadkowego natężenia pola uwypukla składowe dominujące. Na rycinie 1. przedstawiono graficznie wpływ poszczególnych składowych E_n , o różnych natężeniach względnych E_n/E_0 , na wypadkowe natężenie mierzonego pola E_w .

Wzór 2. jest prawdziwy dla „idealnej” sondy pomiarowej, czyli takiej, która w pełnym zakresie dynamiki mierzonego PEM wskazuje wartość skuteczną natężenia PEM oraz ma stałą transmitancję (płaską charakterystykę częstotliwościową). O ile pierwszy warunek można uznać za spełniony (zwłaszcza w zakresie pomiarów dla celów ochrony środowiska – przy niskich natężeniach PEM), o tyle warunek drugi – płaskiej charakterystyki częstotliwościowej, zwłaszcza w zakresie częstotliwości bardzo wysokich – nie jest spełniony prawie nigdy.

Na rycinach 2. i 3. przedstawiono reprezentatywne charakterystyki częstotliwościowe dwóch grup sond pomiarowych – dla pasma 0,1–3000 MHz i 0,08–90 GHz – uzyskane na podstawie danych producentów oraz pomiarów własnych.

Rzeczywisty wynik pomiaru sondą szerokopasmową pól wieloczęstotliwościowych został opisany poniższą zależnością:

$$E_{W_{rmsR}} = \sqrt{\sum_{nf} \left(\frac{E_{nf}}{C_{dE} C_{nf}} \right)^2} \quad (3)$$

gdzie:

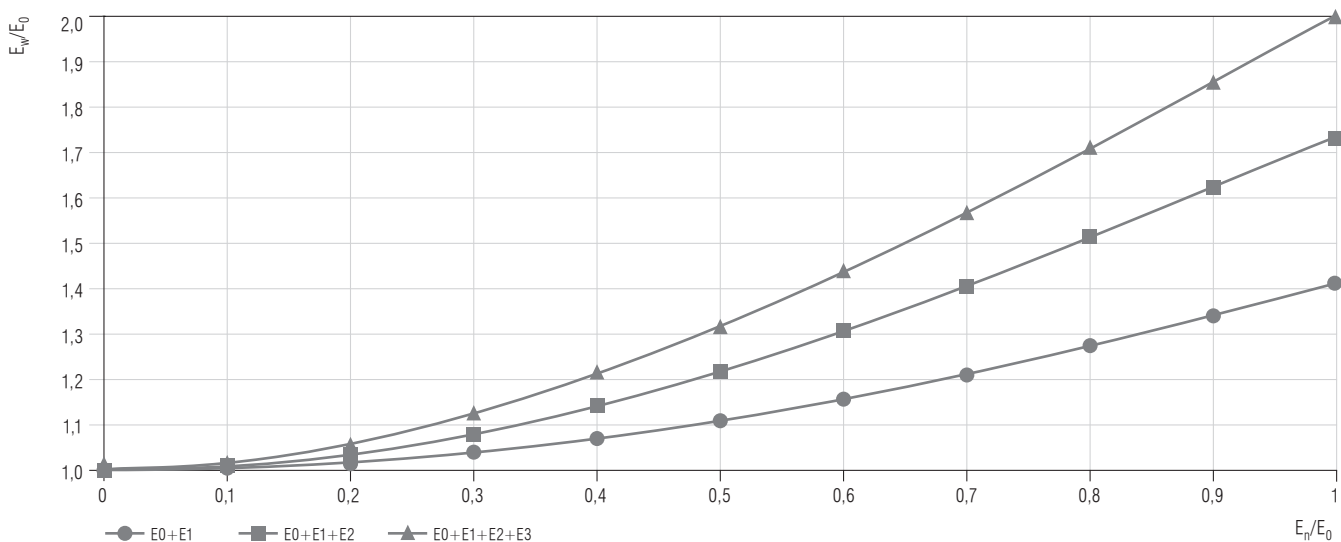
$E_{W_{rmsR}}$ – wartość skuteczna mierzonego PEM,

C_f – współczynnik poprawkowy dla częstotliwości f ,

C_d – współczynnik poprawkowy dla charakterystyki dynamicznej (liniowości).

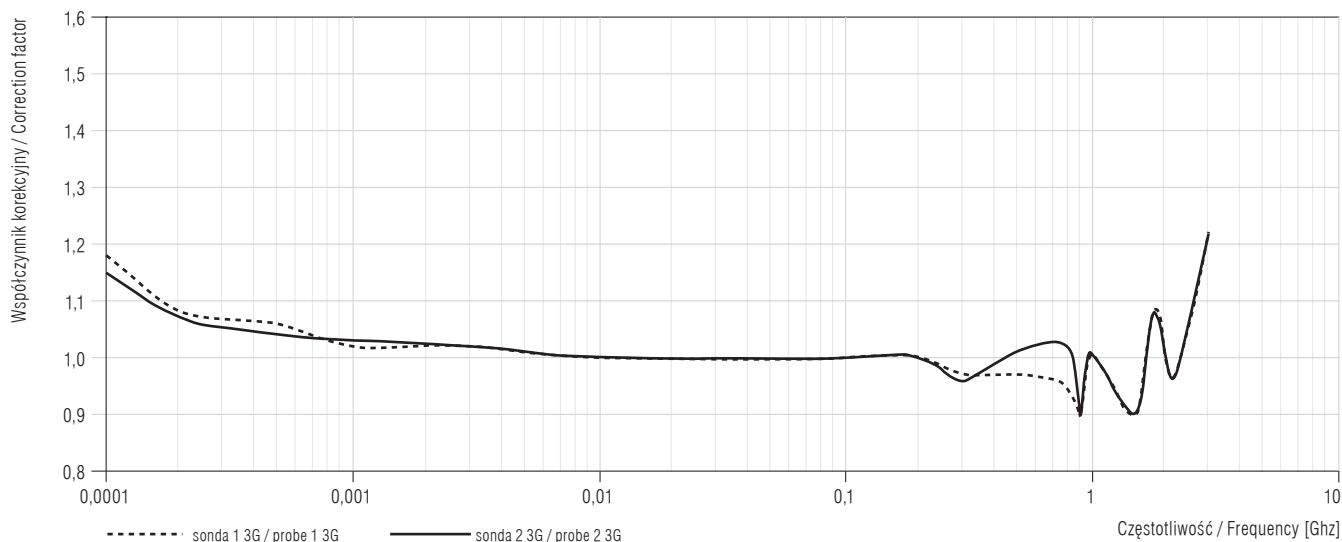
Oba ww. współczynniki są zwykle wyznaczone w świadectwie wzorcowania sondy pomiarowej.

Jeżeli zmiany C_f w funkcji częstotliwości nie są zbyt duże, można przyjąć uśredniony współczynnik poprawkowy, a niepewność pomiaru wynikającą z przybliżenia uwzględnić w budżecie niepewności. Taka sytuacja występuje dla sond pomiarowych, których parametry przedstawiono na rycinach 2. i 3. dla całego pasma częstotliwości, w których pracują systemy telefonii komórkowej. Współczynnik poprawkowy C_f w paśmie 0,8–2,1 GHz nie zmienia się więcej niż $\pm 10\%$. Jeżeli jednak różnice tego współczynnika między poszcze-

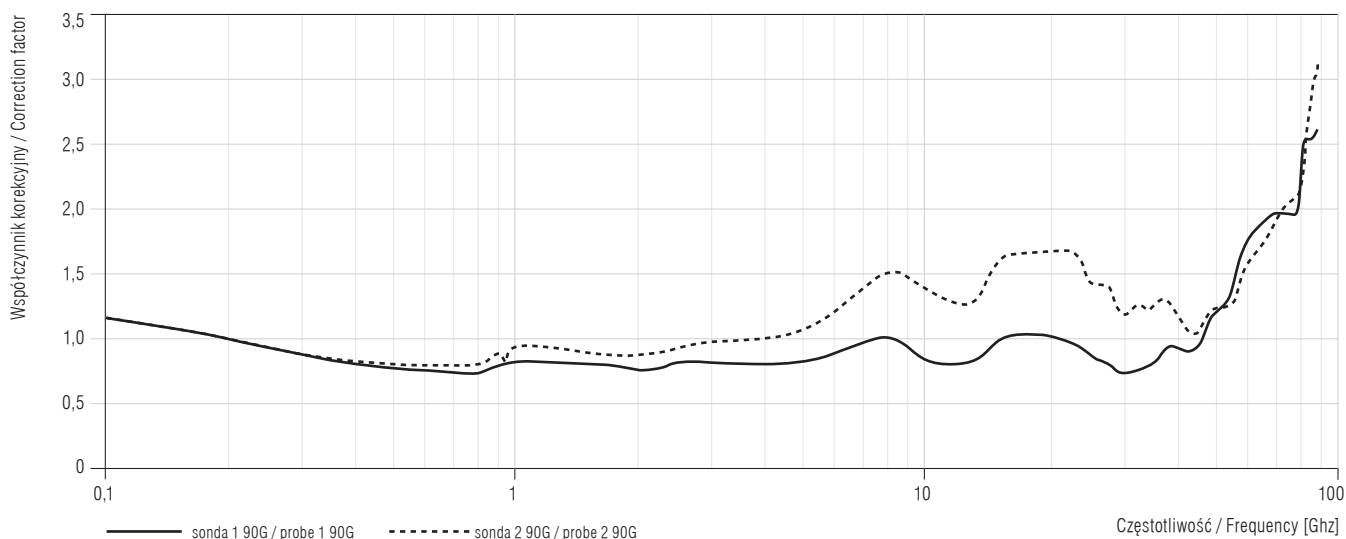


E_w – wypadkowe zmierzone PEM / resultant measured EMF, $E_{0..n}$ – kolejne składowe pola wieloczęstotliwościowego / other components of EMF.

Ryc. 1. Wpływ poszczególnych składowych E_n o różnych natężeniach względnych E_n/E_0 na wypadkowe natężenie mierzonego pola E_w
Fig. 1. The impact of particular electromagnetic field (EMF) components E_n with different relative intensities E_n/E_0 on the measured resultant field strength E_w



Ryc. 2. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe sond pracujących w paśmie 0,1–3000 MHz
 Fig. 2. Exemplary frequency response of probe working in 0.1–3000 MHz band



Linia ciągła – sonda wykorzystywana do pomiarów analizowanych w pracy / Solid line – probe used in the measurements analyzed in this study.

Ryc. 3. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe sond pracujących w paśmie 80 MHz – 90 GHz
 Fig. 3. Exemplary frequency response of probe working in 80 MHz – 90 GHz band

gólnymi pasmami częstotliwości są duże, takie przybliżenie będzie skutkowało zbyt dużą niepewnością pomiaru (np. jeżeli C_f zawiera się w granicach 0,8–3, niepewność wynikająca z uśrednienia C_f będzie znacznie przekraczała 100% – dla sondy pomiarowej z ryciny 3. przy pomiarze PEM od systemu GSM z linią radiową na pasmo E). W tej sytuacji niezbędne jest zastosowanie metod pomiaru, które pozwolą na zminimalizowanie tej niepewności.

Zależność opisana wzorem 3. obowiązuje dla pola wieloczęstotliwościowego złożonego z dowolnych sygnałów, ale w praktyce metrologii PEM w otoczeniu

stacji bazowych telefonii komórkowej można się spotkać z dwiema typowymi sytuacjami:

- wielosystemowa stacja bazowa (GSM900/GSM1800/UMTS) bez linii radiowych,
- wielosystemowa stacja bazowa (GSM900/GSM1800/UMTS) z liniami radiowymi.

Powyższe sytuacje przeanalizowano w niniejszej pracy pod kątem wyników pomiarów uzyskiwanych według wzoru 3. – przy założeniu, że:

1. Wszystkie składowe PEM mieszczą się w zakresie częstotliwości między ok. 800 MHz a 2200 MHz i dla typowych sond szerokopasmowych są praktycz-

nie „nierozłączne”, co oznacza, że nie ma możliwości niezależnego pomiaru poszczególnych składowych występujących jednocześnie za pomocą sond pomiarowych przeznaczonych do różnych pasm częstotliwości. W tej sytuacji optymalnym rozwiązaniem będzie przyjęcie jednego współczynnika C_f dla całego mierzonego zakresu częstotliwości.

2. Występują 2 grupy PEM o znacznym odstępnie między zakresami wytwarzanych częstotliwości, co umożliwia potencjalne rozdzielanie pomiarów tych pól przez ich niezależny pomiar sondami pomiarowymi przeznaczonymi dla odpowiednich zakresów częstotliwości. W praktyce nie ma powszechnie dostępnych sond pomiarowych tylko dla zakresów częstotliwości stosowanych przez linie radiowe (np. obejmujące przedział 8–90 GHz), dlatego ta metoda będzie trudna do zastosowania w praktyce. Jej modyfikacją będzie opracowana przez autorów niniejszej publikacji metoda pomiaru wypadkowego natężenia PEM z całego zakresu częstotliwości za pomocą sondy super-szerokopasmowej i drugiej sondy, przeznaczonej dla częstotliwości poniżej zakresu pracy linii radiowych. Metodę tę wraz z analizami teoretycznymi oraz weryfikacją pomiarową w warunkach laboratoryjnych (dwa źródła PEM) i rzeczywistych (stacja bazowa) przedstawiono w dalszej części artykułu.

WYNIKI

W celu uproszczenia dalszych rozważań teoretycznych przyjęto następujące założenia:

1. Współczynnik poprawkowy dla charakterystyki dynamicznej (C_d) równa się 1 – ponieważ zasadniczo nie zależy on od częstotliwości i można go potraktować jako stałą. Współczynnik korekcyjny częstotliwości dla pasma GSM/UMTS (C_{fG}) jest stały.
2. Analizie poddano tylko jedną linię radiową (lub kilka, ale pracujących w tym samym paśmie) i dla częstotliwości tej linii radiowej wyznacza się współczynnik korekcyjny sondy (C_{fM}).
3. Sondę pomiarową o paśmie częstotliwości < 3 GHz oznaczono indeksem GG, a sondę obejmującą pasmo częstotliwości linii radiowych (> 3 GHz) – indeksem M.

Po przyjęciu powyższych założeń wzór 3. przyjmuje poniższą postać:

$$E_{WR_MG} = \sqrt{\left(\frac{E_G}{C_{fG}}\right)^2 + \left(\frac{E_M}{C_{fM}}\right)^2} \quad (4)$$

gdzie:

E_{WR_MG} – wskazanie miernika szerokopasmowego dla pomiaru pola wypadkowego,

E_G – rzeczywiste natężenie PEM od anten GSM/UMTS,

E_M – rzeczywiste natężenie PEM od linii radiowych.

Wartością poszukiwaną jest wypadkowe natężenie pola (E_{WG_M}), opisane zależnością:

$$E_{WG_M} = \sqrt{E_G^2 + E_M^2} \quad (5)$$

Metodyka pomiaru wieloczęstotliwościowego PEM metodą dwóch sond szerokopasmowych

Pomiar wieloczęstotliwościowego PEM metodą dwóch sond szerokopasmowych polega na zastosowaniu do pomiarów badanego obiektu dwóch sond pomiarowych, których zakresy częstotliwości pracy pozwalają na uzyskanie minimalnej niepewności pomiaru przy stosunkowo mało skomplikowanej procedurze pomiarowej. Pomiar w każdym pionie pomiarowym wykonuje się dwukrotnie dwiema sondami.

Jeżeli wyniki pomiaru każdą z sond są takie same (z uwzględnieniem współczynników korekcyjnych dla pasma GSM/UMTS), przyjmuje się, że w pionie tym nie ma istotnej składowej PEM z pasma częstotliwości pracy linii radiowych i że wynikiem jest wskazanie sondy GG „GSM/UMTS” z przypisaną do niej niepewnością pomiaru. Jeżeli wskazanie sondy M jest wyższe, należy wyznaczyć udział poszczególnych składowych częstotliwościowych w mierzonym PEM i odpowiednio wyznaczyć natężenia pola z pasma GG i M.

Dla sondy GG prawdziwa jest poniższa zależność:

$$E_G = E_{WGG} C_{fGG} \quad (6)$$

gdzie:

E_{WGG} – wartość wskazana przez miernik,

C_{fGG} – współczynnik częstotliwości dla sondy GG.

Po prostym przekształceniu wzoru 5. i wyeliminowaniu ze wskazania sondy M składowej pola z pasma sondy GG otrzymuje się poszukiwaną rzeczywistą wartość wypadkowego natężenia pola z całego pasma częstotliwości:

$$E_w = \sqrt{E_{WGG}^2 C_{fGG}^2 + C_{fR}^2 (E_{WR}^2 - \frac{E_{WGG}^2 C_{fGG}^2}{C_{fG}^2})} \quad (7)$$

gdzie:

E_w – rzeczywiste, wypadkowe natężenie pola PEM,
 C_{FR} – współczynnik poprawkowy sondy M dla częstotliwości linii radiowej,
 C_{FG} – współczynnik poprawkowy sondy M dla częstotliwości GSM/UMTS.

Niepewność pomiaru należy wyznaczyć odpowiednio dla poszczególnych składowych (dla sondy GG w paśmie GSM/UMTS, a dla sondy M dla częstotliwości pracy linii radiowej), uwzględniając np. różnice w niepewności wzorcowania czy wyznaczenia współczynników korekcyjnych w funkcji częstotliwości.

Weryfikacja pomiarowa metody dwóch sond szerokopasmowych

W celu sprawdzenia poprawności przedstawionej metody pomiaru wieloczęstotliwościowego PEM metodą dwóch sond szerokopasmowych przeprowadzono weryfikację pomiarową w warunkach laboratoryjnych i w otoczeniu rzeczywistych obiektów radiokomunikacyjnych.

Badania laboratoryjne

Pomiary przeprowadzono w Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego Politechniki Wrocławskiej z wykorzystaniem stanowisk pola wzorcowego dla pasma 1–90 GHz (ryc. 4).

Scenariusz pomiarów:

- w przestrzeni pomiarowej wygenerowano PEM o częstotliwości 2,1 GHz i 80 GHz,
- w wybranym punkcie wykonano pomiar natężenia pola dwiema sondami szerokopasmowymi – sondą typu EF0391 i sondą typu EF6091, która została wywzorcowana do częstotliwości 90 GHz (zestaw pomiarowy ma aktualne świadectwo wzorcowania akredytowanego laboratorium wzorcującego),
- wartości odczytane z mierników przeliczono na wartości rzeczywiste natężenia PEM, wykorzystu-

jąc współczynniki korekcyjne C_d i C_f ze świadectw wzorcowania ww. sond,

- przeprowadzono analizę zgodnie ze wzorem 7.

Ostatecznie dla sprawdzenia opracowanej metody wykonano niezależne pomiary pola elektromagnetycznego o częstotliwości 2,1 GHz i 80 GHz (włączając naprzemiennie ww. źródła) za pomocą tych samych sond pomiarowych i wyznaczono wypadkowe natężenie PEM dla pomiarów niezależnych źródeł PEM zgodnie ze wzorem 3. Współczynniki C_f dla sondy typu EF6091 wynoszą 1,97 dla 80 GHz i 0,9 dla 2,1 GHz, natomiast dla sondy EF0392 – C_f równa się 1,00 w całym zakresie częstotliwości pracy sondy.

Niepewność pomiaru dla częstotliwości 80 GHz dla sondy EF6091 wynosi 42%, a pomiary sondą EF0392 w paśmie do 3 GHz są obciążone niepewnością 15%. W prezentowanym scenariuszu pomiarów można jednak przyjąć, że są to pomiary względne, realizowane w stabilnych warunkach, identycznych z warunkami wzorcowania, więc niepewność wzorcowania można wyeliminować z wyniku (jako identyczną w każdym pomiarze). Tym samym różnice w wynikach pomiarów obiema metodami można traktować wprost jako błąd metody, który zdefiniowano zgodnie z poniższą zależnością:

$$\delta X\% = \frac{E_{wypX} - E_{wyp2}}{E_{wyp2}} \times 100\% \quad (8)$$

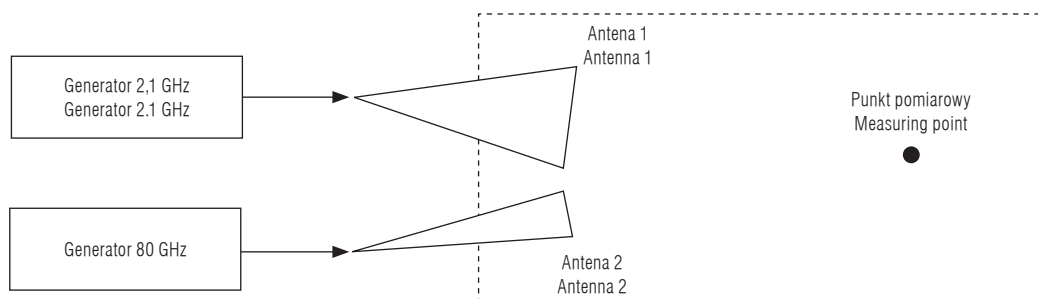
gdzie:

$\delta X\%$ – błąd metody,

X – przyjmuje wartość względem wybranego wzoru 4. lub 7.,
 E_{wypX} – wypadkowa wartość natężenia PEM wyliczona według wzoru 4. lub 7.,

E_{wyp2} – wypadkowa wartość natężenia PEM wyliczona według wzoru 2.

Wartość błędu zgodnie ze wzorem 8. jest miarą poprawności opracowanej metody. Pomiary prze-



Ryc. 4. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru pola elektromagnetycznego (PEM) metodą 2 sond szerokopasmowych
 Fig. 4. The laboratory setup for electromagnetic field (EMF) measurement, method of 2 broadband probes

prowadzono dla różnych stosunków wartości natężenia PEM – 2,1 GHz i 80 GHz w przedziale 5–20 V/m. Wybrane wyniki pomiarów i oczekiwane wartości wyznaczone teoretycznie przedstawiono w tabeli 2. W żadnym wypadku maksymalna różnica wyników pomiarów uzyskanych obiema metodami w odniesie-

niu do wartości teoretycznych nie przekroczyła 11%. Pozwala to na potwierdzenie prawidłowości opracowanej metody pomiaru opisaną wzorem 7. Tym samym ww. metodę można uznać jako zwalidowaną metodę pomiarową dla stacji bazowych z zainstalowanymi liniami radiowymi.

Tabela 2. Laboratoryjne badania pól wieloczęstotliwościowych
Table 2. Laboratory research for multi frequency EMF

Pole wzorcowe PEM Standard EMF [V/m]		E_{wyp2} [V/m]	Wskazanie sondy Measured probe value [V/m]		E_{wyp7} [V/m]	δ_7 [%]	E_{wyp4} [V/m]	δ_4 [%]
80 GHz	UMTS		EF6091	EF0391				
0	5	5,0	5,55	5,05	4,78	-4,4	-	1,0
0	10	10,0	11,30	9,90	11,13	11,3	-	1,4
0	15	15,0	17,10	15,30	15,73	4,8	-	-1,0
0	20	20,0	22,00	20,20	18,20	-9,0	-	2,0
5	0	5,0	2,81	0	5,54	10,7	5,54	10,7
5	5	7,1	6,41	5,10	7,80	-10,3	7,49	4,0
5	10	11,2	11,55	10,10	11,44	2,4	11,34	1,5
5	15	15,8	17,20	15,20	16,50	4,3	16,27	2,9
5	20	20,6	23,30	20,30	23,34	13,2	20,94	1,6
10	0	10,0	5,00	0	9,85	-1,5	9,85	-1,5
10	5	11,2	7,40	5,30	10,30	-7,9	11,12	-0,6
10	10	14,1	12,60	10,40	14,36	1,5	14,18	0,3
10	15	18,0	18,20	15,50	19,36	7,4	18,20	0,9
10	20	22,4	24,00	21,00	23,74	6,2	22,74	1,7
15	0	15,0	7,31	0	14,40	-4,0	14,40	-4,0
15	5	15,8	9,24	5,40	14,86	-6,0	15,35	-2,9
15	10	18,0	13,32	10,70	15,95	-11,5	17,76	-1,5
15	15	21,2	18,05	15,70	18,16	-14,4	21,16	-0,3
15	20	25,0	24,35	21,50	23,42	-6,3	25,46	1,9
20	0	20,0	10,35	0	20,39	1,9	20,39	1,9
20	5	20,6	11,75	5,55	20,47	-0,7	21,09	2,3
20	10	22,4	15,20	11,00	20,93	-6,4	23,03	3,0
20	15	25,0	20,00	16,00	24,12	-3,5	25,73	2,9
20	20	28,3	25,90	22,00	27,72	-2,0	29,63	4,8

PEM – pole elektromagnetyczne / EMF – electromagnetic field, UMTS – Uniwersalny System Telekomunikacji Ruchomej / Universal Mobile Telecommunications System.

EF6091 – sonda pracująca do 90 GHz / 90 GHz probe, EF0391 – sonda pracująca do 3 GHz / 3 GHz probe,

E_{wyp2} – wypadkowe natężenie PEM wyliczone według wzoru 2. / EMF calculated by formula 2, E_{wyp7} – wypadkowe natężenie PEM wyliczone według wzoru 7. / resultant strength of EMF based on formula 7, E_{wyp4} – wypadkowe natężenie PEM wyznaczone na podstawie niezależnego pomiaru każdego ze źródeł i wzoru 4. / resultant strength of EMF based on independent measurement of EMF source and formula 4.

δ_7 – błąd względny wyznaczony na podstawie wzoru 7. / relative error based on formula 7, δ_4 – błąd względny wyznaczony na podstawie wzoru 4. / relative error based on pattern 4.

Badania w warunkach rzeczywistych

Po zwalidowaniu w warunkach laboratoryjnych ww. metody (zgodnie ze wzorem 7.) przeprowadzono pomiary PEM w otoczeniu rzeczywistych stacji bazowych. Do analizy wybrano 2 stacje bazowe we Wrocławiu wyposażone w instalację GSM/UMTS oraz radiolinię pracującą w paśmie E, zainstalowaną w taki sposób, że możliwy był pomiar PEM pochodzącego od linii radiowej w jej głównej wiązce promieniowania, a jednocześnie w obszarze tym występowało PEM emitowane przez anteny GSM/UMTS. Ponieważ pomiary odbywały się w miejscach niedostępnych dla ludności (dachy budynków biurowych), analizę ekspozycji przeprowadzono według kryteriów obowiązujących dla środowiska pracy [7,8] z uwzględnieniem granicznych natężeń PEM w funkcji częstotliwości według wzoru 1.

Fotografia 3. przedstawia pomiar PEM w otoczeniu anteny linii radiowej pracującej w paśmie E, zainsta-

lowanej w jednej z badanych stacji bazowych. W tabelach 3. i 4. zebrano wyniki pomiarów PEM w charakterystycznych punktach pionów pomiarowych, w których spełniony był warunek, że wskazania sondy super szerokopasmowej są wyższe od wskazań sondy dla zakresu poniżej 3 GHz. W tych punktach wskaźniki zasięgu strefy pośredniej (ZE_0) wyliczono zgodnie z poniższym wzorem:

$$ZE_0 = \sqrt{\left(\frac{E_{WG} C_{fG}}{6,67}\right)^2 + \left(\frac{E_{WM} C_{fM}}{10,77}\right)^2} \quad (9)$$

gdzie:

ZE_0 – wskaźnik zasięgu strefy pośredniej,

E_{WG} – wartość wskazana przez miernik PEM z sondą do 3 GHz,

E_{WM} – wartość wskazana przez miernik PEM z sondą do 90 GHz.

Tabela 3. Pomiary stacji bazowej nr 1 każdą z sond pracujących w paśmie 3 GHz i 90 GHz

Table 3. Electromagnetic field measurement base station no. 1 for probes working in 3 GHz and 90 GHz bands

Odległość anteny od sondy pomiarowej Distance from antenna to EMF probe [m]	PEM [V/m]					Strefa Zone
	wskazanie sondy measured probe value		E_M	E_G	E_{wyp7}	
	EF6091	EF0391				
1	5,00	4,17	3,70	4,17	5,58	S_b / S_z
2	5,11	4,09	4,60	4,09	6,16	S_b / S_z
3	5,06	4,13	4,20	4,13	5,89	S_b / S_z
4	5,60	4,70	3,98	4,70	6,16	S_b / S_z

E_M – rzeczywiste natężenie PEM od linii radiowych / actual EMF strength from microwave relay, E_G – rzeczywiste natężenie PEM od anten GSM/UMTS / actual EMF strength from GSM/UMTS, S_b – strefa bezpieczna / S_z – safety zone.

Inne skróty jak w tabeli 2 / Other abbreviations as in Table 2.

Tabela 4. Pomiary stacji bazowej nr 2 każdą z sond pracujących w paśmie 3 GHz i 90 GHz

Table 4. EMF measurement of base station no. 2 for probes working in 3 GHz and 90 GHz bands

Odległość anteny od sondy pomiarowej Distance from antenna to EMF probe [m]	PEM [V/m]					Strefa Zone
	wskazanie sondy measured probe value		E_M	E_G	E_{wyp7}	
	EF6091	EF0391				
0,5	2,0	1,0	3,28	1,0	3,43	S_b / S_z
1,0	5,2	1,2	9,90	1,2	9,97	S_b / S_z
1,5	5,7	0,8	11,09	0,8	11,12	S_p / I_z
2,0	2,4	1,0	4,19	1,0	4,31	S_b / S_z
3,0	1,7	1,2	2,08	1,2	2,40	S_b / S_z

S_p – strefa pośrednia / I_z – intermediate zone.

Inne skróty jak w tabeli 2 i 3 / Other abbreviations as in Tables 2 and 3.



Pasmo E – pasmo telekomunikacyjne o szerokości 10 GHz (71–76 GHz oraz 81–86 GHz) / E band – telecommunications bandwidth of 10 GHz (71–76 GHz and 81–86 GHz).

Fot. 3. Pomiar radiolinii pracującej w paśmie E na stacji bazowej
Photo 3. Microwave relay measurement working in E-band

OMÓWIENIE

W artykule przedstawiono metodykę pomiaru natężenia PEM w otoczeniu stacji bazowych z liniami radiowymi, która została zwalidowana w warunkach laboratoryjnych i potwierdzona w otoczeniu rzeczywistych stacji bazowych. Biorąc pod uwagę obecne możliwości techniczne dostępnych sond pomiarowych, zdaniem autorów niniejszej publikacji opisana metoda jest optymalnym rozwiązaniem dotyczącym sposobu oceny ekspozycji na PEM w otoczeniu obiektów wielczęstotliwościowych z dużą różnicą między zakresami częstotliwości pracy zainstalowanych anten. Nie jest to jednak jedyna metoda w ocenie ogólnej ekspozycji. Pracownicy Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego Politechniki Wrocławskiej rozpatrywali także inne scenariusze pomiarowe, które w szczególnych przypadkach można wykorzystać w pomiarach i ocenie ekspozycji na PEM – ich opis przedstawiono dalej.

Pomiar metodą pojedynczej sondy superszerokopasmowej z możliwością naprzemiennego wyłączenia źródeł PEM

W tym scenariuszu badań wykorzystuje się tylko jedną sondę typu M i jest to metoda dająca wyniki z najmniejszą niepewnością, ale zwykle niemożliwa do zastosowania w typowych pomiarach (choć bardzo dobrze sprawdziła się w pomiarach laboratoryjnych). Trudność w jej stosowaniu wynika z jej podstawowej zalety – niezależnego pomiaru każdej składowej częstotliwościowej PEM przy wyłączonych źródłach z innych pasm częstotliwości. Pomiar w wybranych pionach wykonuje się najpierw przy wyłączonych liniach radiowych (pracuje system GSM/UMTS), a następnie przy wyłączonych antenach sektorowych GSM/UMTS (pracują linie radiowe: wszystkie jednocześnie lub – jeżeli są z różnych pasm częstotliwości – pojedynczo). Wynik pomiaru wyliczono według wzoru 9.

Niepewność pomiaru będzie wyznaczona dla obu składowych częstotliwościowych przypisanych odpowiednim zakresom częstotliwości sondy typu M.

Pomiar metodą pojedynczej sondy superszerokopasmowej z uwzględnieniem pochodzenia PEM głównie od źródeł z zakresu częstotliwości, dla których sonda ma najwyższy współczynnik korekcyjny (C_f)

W przypadku wykonywania pomiaru sondą superszerokopasmową (typu M) za wynik (wyliczony według wzoru 10.) przyjmuje się wskazanie miernika z uwzględnieniem najgorszego przypadku charakterystyki częstotliwościowej – maksymalnego C_f dla częstotliwości, które występują w polu wypadkowym (zwykle będzie to C_f dla częstotliwości linii radiowej pracującej na najwyższej częstotliwości) z niepewnością przypisaną dla tego zakresu częstotliwości.

$$E_W = C_{\max_f} E_{WR_GM} \quad (10)$$

gdzie:

E_W – rzeczywista wartość PEM.

Przyjęcie takiego scenariusza może powodować znaczne zawyżenie wyniku pomiaru względem rzeczywistego natężenia pola, dlatego wymaga on szczególnie dobrego rozeznania sytuacji i prawidłowego oszacowania potencjalnych źródeł PEM istotnych w każdym pionie pomiarowym. Zastosowanie tej metody jest możliwe, kiedy natężenie PEM w pionie pomiarowym jest tak małe, że nawet przy dużej niepewności pomia-

ru i potencjalnym zawyżeniu wyniku z całą pewnością można stwierdzić, że nie są przekroczone wartości dopuszczalne.

WNIOSKI

Eksploracja pasma wysokich częstotliwości z zakresu 60–90 GHz spowodowała, że pojawiły się niespotykane dotąd źródła PEM, których oddziaływanie na ludzi i środowisko powinno być poddane ocenie. Specyfika problemu polega na ograniczeniach sprzętowych w zakresie pomiarów PEM w tym paśmie i jednocześnie uwzględnieniu wymogu objęcia źródeł PEM, jakimi są linie radiowe, nadzorem metrologicznym [10]. Przedstawiona w niniejszej pracy metodyka pozwala na pomiary najpowszechniejszych obecnie instalacji wykorzystujących pasmo E – stacji bazowych telefonii komórkowej z liniami radiowymi. Metodyka ta może zostać wykorzystana przez laboratoria badawcze do pomiaru i oceny ekspozycji na PEM z możliwie małą niepewnością pomiaru.

Metodyka przedstawiona w niniejszej pracy przy obecnym stanie techniki pomiarowej stanowi optymalne rozwiązanie i całe opracowanie może zostać wykorzystane jako materiał do przygotowania procedury pomiarowej dla laboratoriów badawczych i jako narzędzie do weryfikacji wyników dla służb kontrolnych.

PIŚMIENNICTWO

1. Aniołczyk H., Mariańska M., Mamrot P.: Ocena ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne częstotliwości radiowych. *Med. Pr.* 2015;66(2):199–212, <http://dx.doi.org/10.13075/mp.5893.00196>
2. Urząd Komunikacji Elektronicznej, Departament Zarządzania Zasobami Częstotliwości [Internet]: Urząd, Warszawa c2005 [cytowany 12 stycznia 2015]. Zakresy częstotliwości przydzielone dla operatorów sieci ruchomych; [11 ss. ekranowych]. Adres: https://www.uke.gov.pl/files/?id_plik=9455
3. Bieńkowski P., Zubrzak B., Surma R.: Pole elektromagnetyczne stacji bazowej telefonii komórkowej – studium przypadku. *Med. Pr.* 2011;62(1):37–45
4. Bieńkowski P., Staniec K.: EMF variability in the surrounding of typical cellular system base stations. W: *Proceedings of 7th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*; 8–12 października 2012; Malta. University of Malta, Malta 2012, ss. 1–4
5. Cała P., Bieńkowski P., Zubrzak B.: Wieloczęstotliwościowe systemy radiokomunikacyjne – analiza niepewności pomiaru. W: *Doskonalenie metod pomiarowych pól elektromagnetycznych oraz oceny ekspozycji zawodowej i środowiskowej. Nowa dyrektywa 2013/35/UE. Porównania międzylaboratoryjne w zakresie 50 Hz i 18 GHz. 10 jubileuszowe Warsztaty IMP 2014 – Ochrona przed PEM*; 15–17 października 2014; Łódź, Polska. Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź 2014, ss. 86–88
6. Bieńkowski P., Zubrzak B.: Electromagnetic field from mobile telephone systems. W: *Proceedings of 8th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields*; 21–26 września 2014; Varna, Bułgaria. Foundation Faraday, Varna 2014, ss. 141–143
7. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *DzU z 2014 r., poz. 817*
8. PN-T-06580-3:2002: Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Część 3. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
9. Bieńkowski P., Burnecki K., Janczura J., Weron R., Zubrzak B.: A new method for automated noise cancellation in electromagnetic field measurement. *J. Electromagn. Waves Appl.* 2012;26(8):1226–1236, <http://dx.doi.org/10.1080/09205071.2012.710721>
10. 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*