

dr hab. inż. PAWEŁ BIEŃKOWSKI

mgr inż. PAWEŁ CAŁA

mgr inż. BARTŁOMIEJ ZUBRZAK

Politechnika Wrocławska, Katedra Telekomunikacji i Telematyki,
Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego (LWIMP)

Kontakt: pawel.bienkowski@pwr.wroc.pl

Pole elektromagnetyczne wytwarzane przez systemy radiokomunikacyjne pracujące w Paśmie E (60-90 GHz)

Fot. Babar760/Bigstockphoto



W artykule przedstawiono wybrane aspekty związane z potrzebami i możliwościami pomiarowymi pól elektromagnetycznych pochodzących od urządzeń radiokomunikacyjnych pracujących w paśmie częstotliwości wysokich mikrofal (60-90 GHz). Rozwój technologiczny i bezustanne poszukiwanie bezprzewodowego medium transmisyjnego o dużej przepływności sprawił, że w konstrukcji linii radiowych zaczęto wykorzystywać częstotliwości z zakresów 71-76 GHz i 81-86 GHz (Pasma E), które zapewniają pojemności znacznie większe niż tradycyjne rozwiązania. Na rodzimym rynku już pojawiają się dostawcy tego typu sprzętu, co wiąże się m. in. z potrzebą szacowania ekspozycji do celów bhp i ochrony środowiska. Jednocześnie brakuje przyrządów, których zakres pomiarowy pokrywałby zakres Pasma E.

W pracy dokonano przeglądu istniejących systemów radiokomunikacyjnych, anten wykorzystywanych przy budowie radiolinii oraz sposobów analizy rozkładu pola elektromagnetycznego w ich otoczeniu. Przedstawiono także wyniki badań własnych związanych z generacją wzorcowych pól elektromagnetycznych z Pasma E oraz analizą parametrów metrologicznych komercyjnych czujników pola pod kątem możliwości ich wykorzystania na częstotliwościach powyżej deklarowanego przez producentów pasma pracy.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, Pasma E (60-90GHz), mierniki pola elektromagnetycznego, izotropowość

Electromagnetic field in the vicinity of radiocommunication systems working in E-Band (60-90 GHz)

This paper presents selected aspects related to the needs and possibilities of measuring the electromagnetic field (EMF) in the upper part of the microwave spectrum (60-90 GHz). Technological progress and constant searching for greater throughput wireless transmission in microwaves necessitate using higher frequencies like 71-76 GHz or 81-86 GHz (called E-band) in point-to-point systems. The market already has providers offering E-band systems, which also raise the need to assess exposure relevant to occupational safety and health, and environment protection. At the same time, there are no EMF meters working in the E-band. In this paper, we present an overview of common radiocommunication systems, antennas, and methods of analysing EMF in their vicinity. We also present results of research on generating standard EMF in the E-band frequency range and on analysing metrological parameters of popular EMF meters for measuring frequencies above the nominal band declared by the manufacturer.

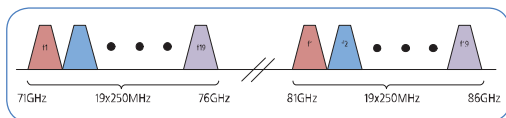
Keywords: electromagnetic field, E-Band, EMF, electromagnetic field meters, isotropy

Wstęp

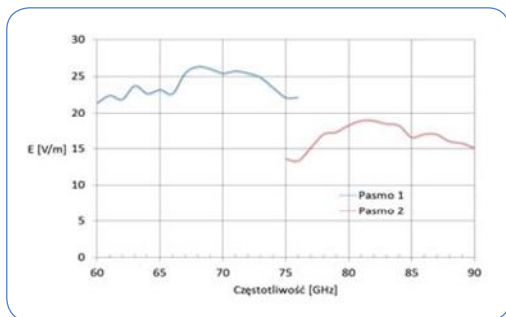
Rozwój radiokomunikacji powoduje coraz bardziej efektywne wykorzystanie widma elektromagnetycznego, w tym eksplorację pasm mikrofalowych coraz wyższych częstotliwości. Pasma powyżej 60 GHz wykorzystywane są zwłaszcza do transmisji punkt-punkt (tak zwane „radiolinie” lub linie radiowe) oraz przez systemy punkt-wielopunkt (P-M-P), np. przez dostawców Internetu na obszarach o luźnej zabudowie, gdzie koszt infrastruktury sieci kablowej przewyższa cenę urządzeń bezprzewodowych. Jednak największym użytkownikiem linii radiowych są sieci telefonii komórkowej, stosujące je głównie do transmisji danych wewnątrz sieci na odcinku stacja bazowa – sterownik stacji bazowych oraz w szkieletach sieci. Anteny tych urządzeń stają się coraz częściej stałym elementem otoczenia człowieka i stanowią potencjalne źródła pola elektromagnetycznego o poziomach istotnych z punktu widzenia ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy [1,2,3].

Do tej pory większość rozwiązań bazowała na częstotliwościach nieprzekraczających 60 GHz i taki zakres pomiarowy pokrywał obecny na rynku sprzęt do pomiarów pól elektromagnetycznych. Analogicznie ma się sprawa akredytowanych laboratoriów wzorcujących mierniki pól elektromagnetycznych. Rodzi się więc pytanie o możliwości pomiarowe pól o częstotliwościach powyżej 60 GHz. Ponieważ na rodzimym rynku pojawili się już dystrybutorzy urządzeń pracujących w tzw. Paśmie E (71-76 GHz oraz 81-86 GHz), problem miarodajnych pomiarów i oceny ekspozycji staje się wręcz palący.

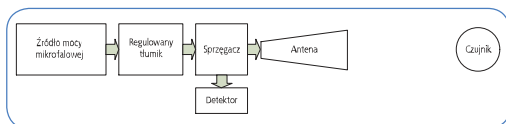
W artykule przeanalizowano aspekty techniczne wykorzystania Pasma E oraz przedstawiono problemy związane z pomiarami pola elektromagnetycznego z zakresu wysokich mikrofal i oceną ekspozycji na takie pola. Dokonano krótkiego przeglądu wykorzystania widma częstotliwościowego w Polsce i perspektywy jego rozwoju, ocenę ekspozycji wg najnowszej Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej [4] oraz przepisów krajowych i oszacowano możliwości metrologiczne współczesnych mierników w paśmie 60-90 GHz.



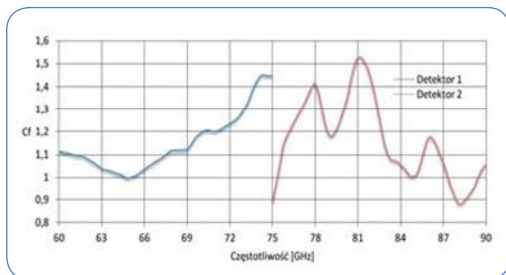
Rys. 1. Szerokość kanałów Pasma E (szerokość pasma – 10 GHz)
Fig. 1. E-band channel width (10 GHz bandwidth)



Rys. 2. Maksymalna wartość natężenia wzorcowego pola elektrycznego Pasma E wytwarzanego w LWiMP
Fig. 2. Maximum of standard electric field strength in E-band generated by LWiMP



Rys. 3. Schemat skonstruowanego w LWiMP stanowiska pomiarowego do wytwarzania wzorcowego pola elektromagnetycznego o częstotliwości z zakresu 60-90GHz
Fig. 3. Setup for generating standard electromagnetic field in the 60-90 GHz range developed by LWiMP



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe detektorów mikrofalowych wykorzystywanych we wzorcach LWiMP (Cf – częstotliwościowy współczynnik korekcyjny detektora)
Fig. 4. Frequency response of microwave detectors used by LWiMP standards (Cf – frequency correction factor)

Wykorzystanie widma i perspektywy dalszego rozwoju – Pasma E

Na nowe systemy radiokomunikacyjne brakuje miejsca w obecnie używanych pasmach, co skutkuje budową urządzeń pracujących w coraz wyższych przedziałach częstotliwości pola elektromagnetycznego. Zwiększone zapotrzebowanie na usługi czasu rzeczywistego wymagają większych przepustowości łączy radiokomunikacyjnych, co wiąże się zwykle z zapotrzebowaniem na szersze pasmo transmisyjne (szczegółowy opis systemów radiokomunikacyjnych i transmisji danych przedstawiono w załączniku, dostępnym na stronie www.ciop.pl/412.html). Jednak wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału maleje zasięg transmisji i dla systemów z pasm 70-90 GHz nie przekracza 3 km, co wynika z własności ośrodka, jakim jest atmosfera [5].

Pasma E dysponuje dwoma podpasmami: 71-76 GHz i 81-86 GHz po 19 kanałów każde (o sze-

rokości min. 250 MHz z możliwością agregacji), co pozwala osiągnąć przesył danych z prędkościami rzędu 10 Gb/s (rys. 1.).

Nic dziwnego, że rynek telekomunikacyjny zainteresował się systemami bazującymi na tym rozwiązaniu. Także w Polsce pojawili się dystrybutorzy urządzeń z Pasma E, jak i pierwsi użytkownicy. Dostępność pasm i możliwość dosyć swobodnego tworzenia infrastruktury z pewnością przyczynią się do tego, że w naszym otoczeniu będzie coraz więcej linii radiowych wykorzystujących Pasma E, a tym samym pojawia się konieczność oceny ekspozycji na emitowane przez nie pole elektromagnetyczne na potrzeby bhp oraz ochrony środowiska.

Ocena ekspozycji na pole elektromagnetyczne z Pasma E w świetle wybranych regulacji prawnych

Pomiary natężenia składowej elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego w otoczeniu różnych źródeł wykonuje się m.in. dla celów bhp oraz ochrony środowiska. Sposób oraz zakres pomiarów regulują odpowiednie przepisy obowiązujące w Polsce [1,2,3]. Z punktu widzenia przepisów bhp [2] w otoczeniu źródeł pola elektromagnetycznego wyróżniamy trzy strefy ochronne bhp w polach elektromagnetycznych: pośrednią, zagrożenia i niebezpieczną. W obszarze strefy pośredniej pracownik może przebywać w ciągu całej zmiany roboczej, w strefie zagrożenia należy to przebywanie ograniczyć (w zależności od wskaźnika ekspozycji wyznaczanego na podstawie czasu ekspozycji oraz wartości natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego), a w strefie niebezpiecznej przebywanie pracownika jest zabronione. Wartości graniczne natężeń pola dla poszczególnych stref podano w [1]. Dla Pasma E, które rozciąga się w zakresie od 71 do 86 GHz, graniczne wartości rozgraniczające strefę pośrednią od bezpiecznej będą wzrastały z częstotliwością i osiągną wartości odpowiednio: dla 71 GHz około:

$$(0,16 \times 71 + 19,5) / 3 = 10,3 \text{ [V/m]} \quad (1)$$

a dla najwyższej częstotliwości pasma – 86GHz – około:

$$(0,16 \times 86 + 19,5) / 3 = 11,1 \text{ [V/m]} \quad (2)$$

Kolejnym aspektem metrologii pól elektromagnetycznych jest oddziaływanie na środowisko [3], gdzie poziom dopuszczalny w miejscach dostępnych dla ludności w tym przedziale częstotliwości wynosi 7V/m, a pomiarom kontrolnym podlegają wszystkie instalacje o zastępczej mocy promieniowanej izotropowo EIRP (ang. *Effective Isotropical Radiated Power*) nie mniejszej niż 15W. W nowej Dyrektywie Unii Europejskiej 2013/35/UE [4] zdefiniowano wartości interwencyjnego poziomu narażenia (IPN) dotyczące, w omawianym zakresie częstotliwości Pasma E, natężenia pola elektrycznego, indukcji magnetycznej i gęstości mocy. IPN natężenia pola elektrycznego wynosi 140 V/m w paśmie częstotliwości 6 – 300 GHz. Ocena zgodności narażenia IPN jest uproszczonym wskaźnikiem, czy należy podejmować jakieś środki zaradcze w celu ograniczenia narażenia pracowników. Wartości poziomu interwencyjnego stanowią najwyższą obliczoną lub zmierzoną wartość w miejscu, w którym znajduje się ciało pracownika. Z tego powodu trudno jest odnieść reprezentowane w nim wartości do regulacji obowiązujących w Polsce.

Składowa elektryczna pola elektromagnetycznego jest przy obecnym stanie techniki praktycznie

jedyną wielkością dostępną pomiarowo w tym paśmie częstotliwości. Możliwy jest również pomiar gęstości mocy z wykorzystaniem anten aperturowych, ale jest to metoda praktycznie nie do zastosowania w pomiarach dla celów bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska.

Specyfika systemów radiokomunikacyjnych, jakimi są linie radiowe sprawia, że narażenie na pola elektromagnetyczne w otoczeniu anten dotyczy głównie pracowników, którzy potencjalnie mogą znaleźć się w wiązce głównej, co może się zdarzyć podczas przemieszczania się po dachach budynków czy platformach masztów radiowych. Jedną z form ochrony pracownika w takich sytuacjach mogłyby być uproszczone mierniki wskaźnikowe lub osobiste ekspozymetry [6,7], ale ich skuteczność przy bardzo wąskich wiązkach promieniowania anten radiolinii i tak wysokich częstotliwościach może być dyskusyjna. Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione regulacje, przyrząd pomiarowy do pomiarów pola elektrycznego z pasma 60-90 GHz powinien mieć próg detekcji poniżej 7V/m, ale uwzględniając niepewność pomiaru rzędu 40% i biorąc pod uwagę zasady oceny wyników z uwzględnieniem niepewności, próg ten powinien być nie wyższy niż 4 V/m.

Analiza rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu anten linii radiowych (bardziej szczegółowo opisanych w załączniku dostępnym z wersją elektroniczną niniejszej publikacji – patrz strona internetowa „Bezpieczeństwa Pracy” w portalu www.ciop.pl) o parametrach typowych dla Pasma E pozwalają oszacować, że maksymalny zasięg strefy pośredniej (tj. pola elektrycznego o natężeniu ok. 11 V/m dla $f = 86 \text{ GHz}$) wystąpi dla anteny o średnicy 0,3 m oraz mocy 17 dBm i nie przekroczy 10 m. Strefa zagrożenia może wystąpić jedynie w bezpośrednim otoczeniu anteny (do ok. 10-30 cm od anteny). Ze względu na moc EIRP oraz poziomy natężenia pola w otoczeniu anteny (miejsca wykonywania pracy), instalacje takie podlegają pomiarom pola elektromagnetycznego.

Możliwości metrologii pola elektromagnetycznego w paśmie E

Zakres częstotliwości powyżej 60 GHz nie był dotychczas powszechnie wykorzystywany, a tym samym nie występowały potrzeby rutynowych pomiarów w tych pasmach. Przekłada się to na brak dostępnych komercyjnie mierników pola elektromagnetycznego przeznaczonych do pomiarów dla celów bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska. Wynika to z całą pewnością nie tylko z braku zapotrzebowania, ale także trudności technicznych. Jednym z podstawowych problemów jest wytwarzanie pola wzorcowego o zadowalających parametrach.

W Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego Politechniki Wrocławskiej (LWiMP) od kilku lat prowadzone są prace badawcze dotyczące pól elektromagnetycznych z pasm fal milimetrowych (mikrofałe z zakresu częstotliwości powyżej 30 GHz) [9]. Ich efektem są nowe stanowiska pola wzorcowego pozwalającego na płynne pokrycie częstotliwości od 60 do 90 GHz przy natężeniach pola wzorcowego do 13-26 V/m w zależności od częstotliwości (rys. 2.).

Stanowisko pola wzorcowego w paśmie 60 – 90 GHz zbudowane jest podobnie do stanowisk pola wzorcowego z antenami tubowymi, które omówiono m.in. w artykule opublikowanym w „Przeglądzie

Elektrotechnicznym" [10], a schemat takiego stanowiska przedstawiono na rys. 3.

Do pomiaru parametrów pobudzenia stosuje się detektory diodowe kalibrowane indywidualnie (rys. 4.), a jako źródła mocy – generatory i przestrajane oscylatory mocy.

Pozostałe elementy układu to anteny, sprzęgacze i tłumiki – typowe układy falowodowe dostępne komercyjnie. W skład budżetu niepewności stanowiska pola wzorcowego wchodzi m.in. niepewność wzorcowania detektorów mikrofalowych (do 1,5 dB), zafalowania charakterystyki częstotliwościowej sprzęgaczy oraz niedopasowania w układzie (do 1 dB), niepewność wyznaczenia zysku anten (do 1dB) oraz niejednorodność pola w obszarze wzorcowym. Ostatecznie całkowita niepewność rozszerzona ($k=2$) wyznaczenia parametrów pola wzorcowego wynosi $(2,1 \pm 2,7 \text{ dB})$ w zależności od zastosowanych elementów składowych stanowiska. Jest to akceptowalny poziom niepewności w tym zakresie częstotliwości.

Czujniki szerokopasmowe składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego pracujące w paśmie do 90 GHz są układami możliwymi w realizacji, ale napotykanne trudności techniczne są znacznie większe niż przy niższych częstotliwościach. Pomijając problem czułości diod detekcyjnych w Paśmie E, największą trudność sprawia kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej czujnika w taki sposób, aby wyeliminować niepożądane rezonanse mogące znacznie zafałszować wyniki pomiarów. Praktycznie cały układ anteny z detektorem traktować należy jako układ o stałych rozłożonych, a dodatkowo antena czujnika przestaje spełniać kryterium anteny krótkiej elektrycznie. Ten problem można ograniczyć wykonując antenę z rozłożoną rezystancją, którą dodatkowo traktować można jako element filtra kształtującego charakterystykę częstotliwościową.

Prototypy czujników opracowanych w LWiMP przedstawiono na rys. 5. Uzyskane wyniki jeszcze nie w pełni satysfakcjonują, ale prace są w toku. Zanim prototypowe czujniki osiągną oczekiwane parametry, na stanowiskach pola wzorcowego przebadano szereg czujników pola elektrycznego dostępnych komercyjnie, a przewidzianych przez producenta do pracy przy częstotliwościach do 40-60 GHz. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6.

Ich analiza pozwala stwierdzić, że w pewnym zakresie istnieje możliwość wykorzystania tych sond do pomiarów w Paśmie E. Charakterystyki częstotliwościowe przedstawianych sond pozwalają na ostrożne wykorzystywanie, również w pasmach powyżej częstotliwości deklarowanej przez producentów. Współczynniki korekcyjne zbadanych sond dla tej częstotliwości zawierają się między 0,6 a 2,7. Oznacza to, że każdy z mierników zaniza lub zawyża wartość mierzoną. Istotne jest jednak to, że najniższe wartości stabilnie wskazywane przez te mierniki to ok. 0,5-1V/m. Przy przyjęciu z zapasem współczynnika korekcyjnego $C_f = 3$, najniższe mierzalne przez zbadane mierniki natężenie pola elektrycznego w paśmie 84 – 86 GHz wynosi $2,5 \pm 3 \text{ V/m}$. Wartość ta jest znacznie poniżej granicy strefy pośredniej [1] i wartości dopuszczalnej w środowisku zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska [3]. Tym samym możliwe jest wyznaczenie granic pola elektromagnetycznego przewyższającego wartości graniczne.

Należy podkreślić, że uzyskane wyniki dotyczą tylko i wyłącznie przebadanych sond i nie mogą być wprost przenoszone na inne egzemplarze, nawet

sond tego samego typu. Nie mniej ważnym aspektem (poza charakterystyką częstotliwościową) w zakresie fal milimetrowych jest izotropowość sondy sferycznej i symetria dla sondy kierunkowej. Na izotropowość wpływają między innymi sprzężenia między czujnikami składowymi, odbicia wewnętrzne od elementów konstrukcji sondy, sposób transmisji sygnału z czujnika pomiarowego do miernika i szereg innych czynników.

Na rys. 7. przedstawiono uzyskane w procesie wzorcowania wyniki pomiarów izotropowości jednej z komercyjnie dostępnych sond pola elektrycznego. Badanie przeprowadzono na stanowisku pola wzorcowego LWiMP w ustawieniu pod kątem analitycznym [11]. W trakcie pełnego obrotu sondy wokół osi uchwytu wykonywano 25 pomiarów co $14,4^\circ$. Izotropowość jest gorsza niż dla niższych częstotliwości, gdzie parametr ten nie przekraczał $\pm (1-2,5) \text{ dB}$, ale uzyskane wyniki są akceptowalne do pomiarów dla celów ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy.

Podsumowanie

Wyniki badań sond pomiarowych do pomiarów pól elektromagnetycznych pracujących poza częstotliwościowym zakresem pracy podanym przez producentów pozwalają na optymistyczne podejście do możliwości stosowania niektórych sond do pomiarów pól elektromagnetycznych pracujących w paśmie 60 – 90 GHz.

Jednocześnie należy zauważyć, że w zakresie pracy powyżej pasma producenta, zmienność parametrów metrologicznych jest znacznie większa niż w podstawowym paśmie pracy i niezbędne są pełne indywidualne badania każdego egzemplarza czujnika. Zakres takich badań powinien obejmować co najmniej analizę charakterystyki częstotliwościowej i izotropowości. Przeprowadzone również w LWiMP badania charakterystyki dynamicznej i stabilności temperaturowej nie wykazały znaczących zależności tych parametrów od częstotliwości dla natężeń poniżej 20V/m.

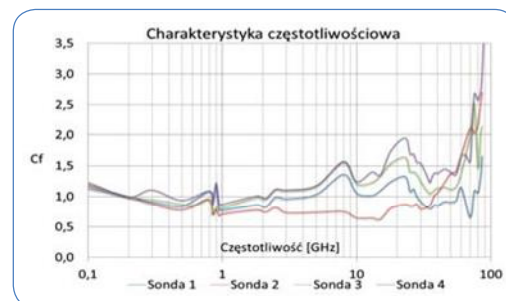
PIŚMIENNICTWO

- [1] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Załącznik 2, Część E. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. (DzU z 2002 r. nr 217 poz. 1833 z późniejszymi zmianami). Zgodnie z projektem rozp. MPiPS z 18.06.2013 w najbliższym czasie utraci moc prawną i będzie zastąpione przez nowe rozporządzenie, bez zmian merytorycznych w zakresie dotyczącym zagrożeń elektromagnetycznych.
- [2] 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.
- [3] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów utrzymania tych poziomów (DzU 62 poz. 627 z późniejszymi zmianami)
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE Dz. Urz. UE L 179/1, 2013.
- [5] ITU-R P.676-9. 02.2012 Attenuation by atmospheric gases. Radiocommunications sector for ITU



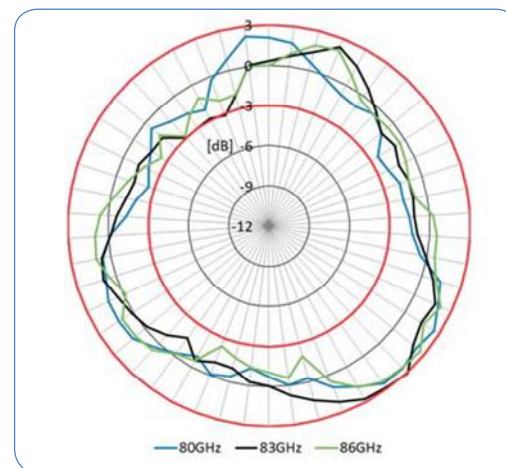
Rys. 5. Prototypy czujników pola elektromagnetycznego w paśmie 60-90 GHz, skonstruowane w LWiMP

Fig. 5. Prototypes of electromagnetic field detectors for the 60-90 GHz band manufactured in LWiMP



Rys. 6. Charakterystyki częstotliwościowe komercyjnych sond pomiarowych w paśmie 0,1-90 GHz. (C_f – częstotliwościowy współczynnik korekcyjny)

Fig. 6. Frequency response of commercial electromagnetic field probes for the 0.1 – 90 GHz band (C_f – Frequency correction factor)



Rys. 7. Izotropowość sondy 1 pola elektrycznego w Paśmie E

Fig. 7. Isotropy of electric field probe 1 in E-band

- [6] Gryz K., Karpowicz J., Leszko W. Ekspozymetry radiofalowego promieniowania elektromagnetycznego – przegląd parametrów użytkowych i technicznych. „Bezpieczeństwo Pracy” 2012,485,2:12-15
- [7] Gryz K., Karpowicz J. Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (1) – środki ochrony zbiorowej i indywidualnej. „Bezpieczeństwo Pracy” 2009,448,1:6-9
- [8] Bieńkowski P. Metodyka wyznaczania obszaru występowania pola elektromagnetycznego o wartościach większych od dopuszczalnych dla środowiska w otoczeniu anten linii radiowych. „Medycyna Pracy” 2007,58,2:117-123
- [9] Zakres akredytacji, <http://www.pca.gov.pl/zakresy/zakresy.php?d=AP&z=AP%20078>
- [10] Bieńkowski P., Zubrzak B. Algorytm ustalania zadanych wartości w układzie ze sprzężeniem zwrotnym na przykładzie automatycznego stanowiska wzorcowego pola elektromagnetycznego z antenami tubowymi. „Przegląd Elektrotechniczny” 2011, R. 87, nr 9a:160-165
- [11] Bieńkowski P. Charakterystyki metrologiczne mierników natężenia pola elektromagnetycznego. „Przegląd Elektrotechniczny”. 2009, R. 85, nr 12:33-36
- [12] Wg materiałów firmy 3M, http://www.3m-services.de/Telekommunikation/Produkte/Transport/downloads/WTM3300ETSDatasheet_2013-01_3MS_en.pdf