

*Roman Kubacki**Jarosław Kieliszek**Jaromir Sobiech**Robert Puta*

METROLOGIA PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH MODULOWANYCH IMPULSOWO MIERNIKAMI DIODOWYMI*

METROLOGY OF PULSE MODULATED ELECTROMAGNETIC FIELDS WITH DIODE-TYPE METERS

Zakład Ochrony Mikrofalowej, Wojskowy Instytutu Higieny i Epidemiologii, Warszawa

STRESZCZENIE

Mierniki pomiarowe, wykorzystywane do pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego oraz gęstości mocy w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy oraz ochrony ludzi i środowiska, są wzorcowane w polach ciągłych. Tymczasem wiele urządzeń medycznych, systemów telefonii komórkowej oraz urządzeń radiolokacyjnych wytwarza pola modulowane impulsowo. W pracy przedstawiono wyniki analizy dodatkowych błędów w pomiarach pól impulsowych miernikami diodowymi typu: EMR 200/300, PMM oraz MEH. Med. Pr., 2007;58(1):57–62

Słowa kluczowe: pomiary elektromagnetyczne, impulsowo modulowane pole elektromagnetyczne

ABSTRACT

Electromagnetic field meters used for occupational and general public health protection are commonly calibrated in the continuous wave conditions, but a large number of medical devices, mobile base station antennas and radars generate pulse modulated fields. The results of an analysis of additional errors of pulse fields measurements by diode-type meters (EMR 200/300, PMM and MEH) are presented in this paper. Med Pr 2007;58(1):57–62

Key words: electromagnetic measurements, pulsed electromagnetic field

Adres autora: Kozielska 4, 01-163 Warszawa, e-mail: romankubacki@onet.pl

Nadesłano: 14.11.2006

Zatwierdzono: 21.12.2006

WSTĘP

Pola elektromagnetyczne wytwarzane przez współczesne urządzenia medyczne, urządzenia telefonii bezprzewodowej, czy stacje radiolokacyjne, cechuje w większości przypadków modulacja impulsowa.

W przypadku urządzeń medycznych, pracujących impulsowo, uzyskuje się duże wartości chwilowe przy małej wartości średniej natężenia pola elektromagnetycznego, co pozwala na głębsze wnikanie energii elektromagnetycznej do wnętrza organizmu bez przegrzewania jego warstw podskórnych. Przykładami takich urządzeń są diatermie fizykoterapeutyczne oraz chirurgiczne (lancetrony).

W telefonii komórkowej fala elektromagnetyczna wykorzystywana jest jako nośnik sygnałów umożliwiających bezprzewodową realizację łączności, przy czym łączność z poszczególnymi abonentami odbywa się

w określonych odcinkach czasu, zwanych szczelinami czasowymi. Taki typ modulacji nadawania i odbioru sygnałów wykorzystują wszystkie trzy systemy, tj. GSM, DCS, UMTS.

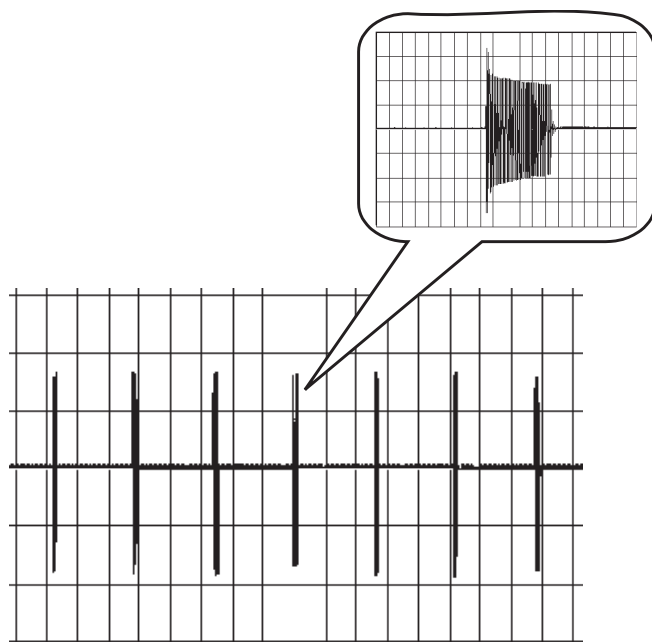
Z kolei urządzenia radiolokacyjne wyspecjalizowane są w wytwarzaniu impulsów promieniowania o bardzo wysokiej mocy szczytowej, przy niskiej wartości średniej. Wytworzenie impulsów o wysokiej mocy pozwala na odbiór sygnałów odbitych od obiektów powietrznych, pomimo iż impulsy te doznają silnego tłumienia i rozproszenia w otaczającej przestrzeni.

SPECYFIKACJA PROMIENIOWANIA IMPULSOWEGO

Diatermie

Diatermie fizykoterapeutyczne oraz chirurgiczne charakteryzują się bardzo dużą różnorodnością kształtu wytwarzanego sygnału. Za przykład niech posłuży urządzenie do fizykoterapii typu terapuls GS200. Urządzenie

* Praca wygłoszona podczas Warsztatów IMP 2006 – Ochrona przed PEM „Raporty o oddziaływaniu na środowisko planowanych instalacji wytwarzających pola elektromagnetyczne oraz sprawozdania z badań i pomiarów – podstawy i praktyka”, Łódź, 17–19 października 2006 r.



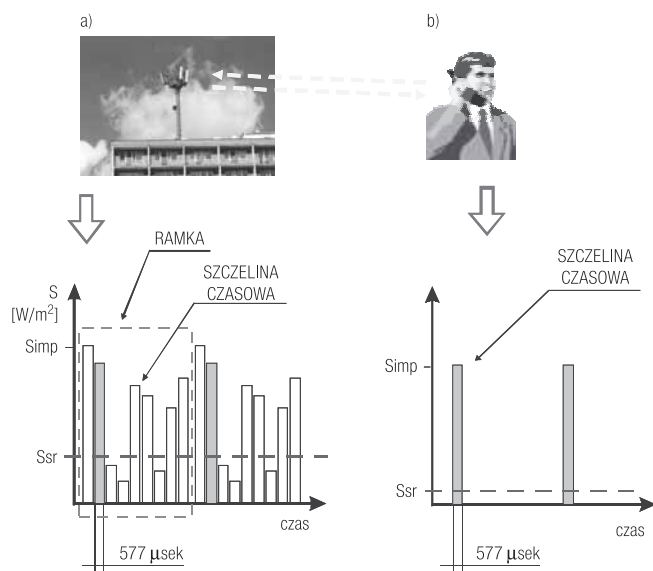
Ryc. 1. Impulsowy charakter pola elektromagnetycznego Terapulsu GS200 oraz kształt pojedynczego impulsu ($WW = 0,8\%$).

nie to pracuje na częstotliwości 27 MHz i posiada różne tryby pracy, różniące się m.in. modulacją wytwarzanego pola. Przebieg czasowy sygnału terapulsu ilustruje ryc. 1. W tym przypadku urządzenie wytwarzało impulsy o czasie trwania $t_i = 100 \mu s$ z okresem repetycji $T_p = 12,5 ms$ (częstotliwość repetycji impulsów $f_p = 80 Hz$). Dla pól impulsowych podawany jest często parametr nazywany współczynnikiem wypełnienia, który określany jest jako: $WW = t_i/T_p \cdot 100\%$ (przy czym współczynnik wypełnienia $WW = 100\%$ odpowiada fali ciągłej). Dla omawianego przypadku $WW = 0,8\%$.

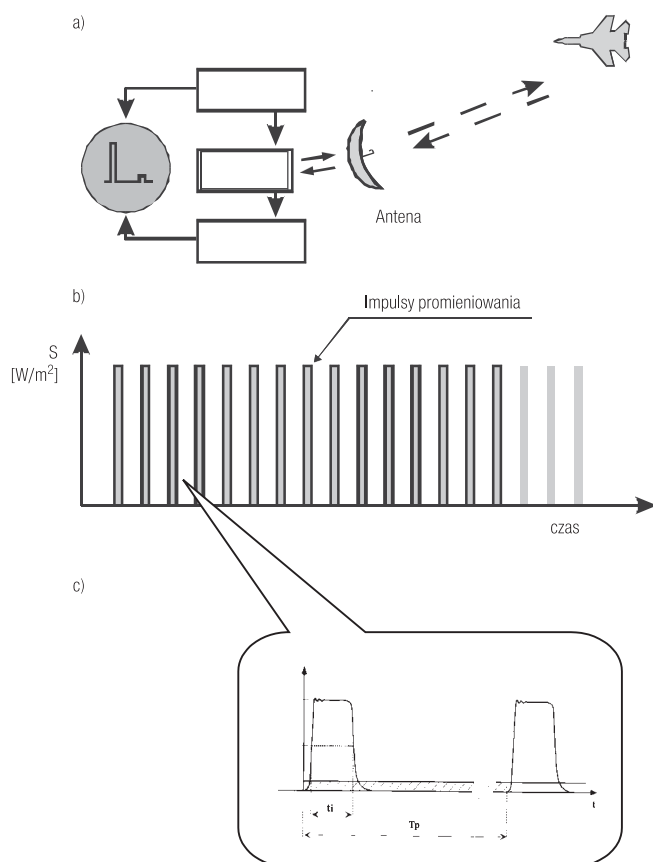
Telefonia komórkowa

W telefonii komórkowej zarówno anteny sektorowe stacji bazowych, jak również przez telefon komórkowy są źródłami impulsowych pól elektromagnetycznych.

Przebieg czasowy sygnału wytwarzanego przez stację bazową i telefon komórkowy przedstawiono na ryc. 2. Impulsy pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez urządzenia telefonii bezprzewodowej mają długość $t_i = 577 \mu s$ (czas trwania szczeliny czasowej). Terminal abonenta komunikuje się ze stacją bazową wysyłając impulsy, jak na ryc. 2b. Stacja bazowa natomiast przyporządkowuje każdemu z obsługiwanych abonentów jedną szczelinę czasową co przedstawiono na ryc. 2a. Różny poziom wypełnienia szczelin czasowych anteny stacji bazowych wynika z różnych odległości abonenta od stacji. W skrajnym przypadku może występować jedna obciążona szczelina czasowa, tzw. szczelina techniczna,



Ryc. 2. Impulsy promieniowania elektromagnetycznego wytwarzane przez: a) antenę stacji bazowej, b) telefon komórkowy.



Ryc. 3. Charakterystyka pracy urządzeń radiolokacyjnych: a) zasada pracy, b) ciąg impulsów, c) kształt impulsów.

po której następuje kolejno siedem szczelin czasowych, w których antena nadawcza stacji bazowej nie wytwarza promieniowania. W tym przypadku sygnał stacji bazo-

wej przypomina sygnał terminala i ma następujące parametry: częstotliwości nośne – pasma 900, 1800 oraz 2100 MHz, $t_i = 577 \mu\text{s}$, $T_p = 4,6 \text{ ms}$ ($f_p = 217 \text{ Hz}$). Współczynnik wypełnienia wynosi $WW = 12,5\%$.

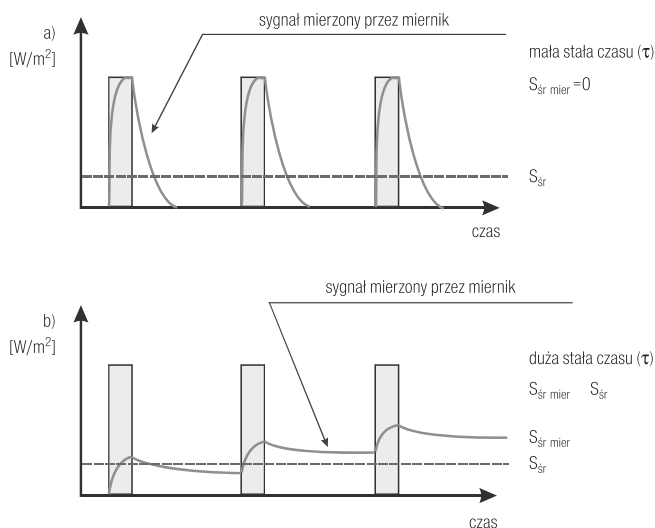
Radary

Specyfika pracy radarów polega na wytwarzaniu silnych impulsowych pól mikrofalowych i odbiór sygnałów echa odbitych od obiektów powietrznych. Wytworzone impulsowe promieniowanie podlega silnym tłumieniom w atmosferze, zatem aby obserwować samoloty znacznie oddalone od radaru, moc wytwarzanych impulsów musi być wysoka, aby sygnał echa mógł być rejestrowany w części odbiorczej radaru – ryc. 3.

W celu minimalizacji mocy promieniowanie wytwarzane jest w postaci impulsów o bardzo krótkim czasie trwania. Typowe czasy trwania impulsów radiolokacyjnych w zależności od typu radaru wynoszą: $t_i = 0,5, 1, 2, 10$ oraz $20 \mu\text{s}$. Okresy repetycji impulsów uzależnione są od przeznaczenia radaru i mieszczą się w granicach $T_p = 1-2,5 \text{ ms}$. Współczynniki wypełnienia dla urządzeń radiolokacyjnych są małe i mieszczą się w zakresie $WW = 0,1-0,8\%$.

METROLOGIA PROMIENIOWANIA IMPULSOWEGO

Parametrem określającym narażenie ludzi na promieniowanie impulsowe jest wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego lub wartość średnia gęstości mocy (1–3). Obecnie najbardziej rozpowszechnionymi przyrządami pomiarowymi są mierniki bazujące na diodowej detekcji sygnałów. Znacznie rzadziej dostępne są mierniki z detektorami termistorowymi lub termoparowymi. Diodowy system detekcji mierzonych sygnałów charakteryzuje się największą dynamiką pomiarów natężenia pola elektrycznego, jednakże wymaga on dodatkowego kształtowania charakterystyki częstotliwościowej miernika poprzez zastosowanie układów RLC w sondzie pomiarowej. Zastosowanie układów RLC powoduje zwiększenie stałej czasu miernika, a tym samym wnosi duże błędy przy pomiarach pól elektromagnetycznych modulowanych impulsowo. W typowych warunkach wzorcowanie tych mierników odbywa się w sytuacji promieniowania ciągłego, jednakże, aby mierniki można stosować do pomiarów impulsowych pól elektromagnetycznych wymagane jest dodatkowe, indywidualne kalibrowanie w polach impulsowych o parametrach (czas trwania impulsu oraz częstotliwość repetycji impulsów) identycznych z impulsami mierzonego pola elektromagnetycznego. Stosowane układy RLC w son-



Ryc. 4. Pomiar pola impulsowego: a) miernik z małą stałą czasu, b) miernik z dużą stałą czasu (oznaczenia: S_{sr} – wartość średnia promieniowania, $S_{sr\text{ mier}}$ – wartość mierzona przez miernik).

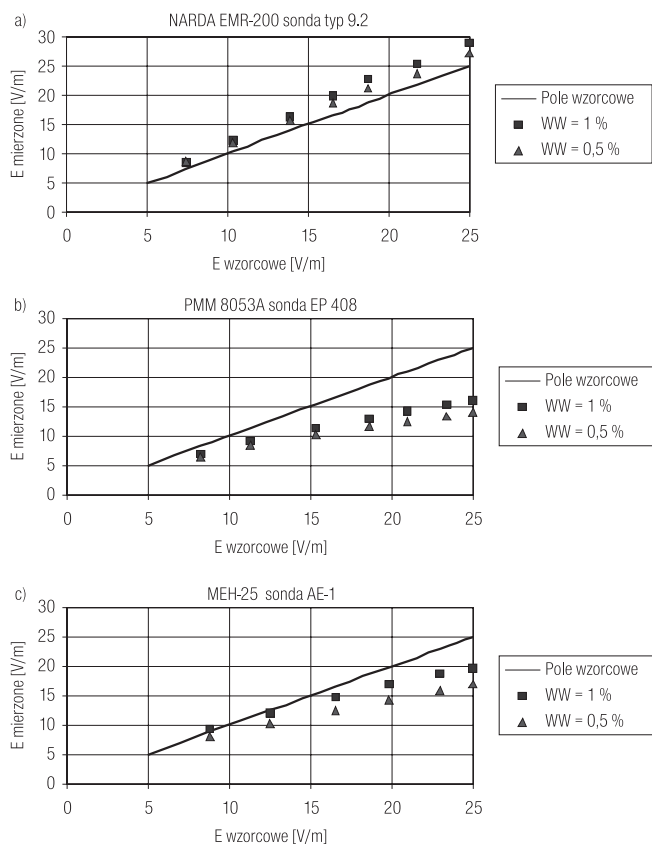
dach pomiarowych powodują zwiększenie stałej czasu czyli zwiększenie bezwładności sondy – im większa stała czasu, tym wolniej narasta i opada sygnał mierzony przez miernik – ryc. 4b.

Zasadą pracy mierników powinno być osiągnięcie stanu ustalonego przez sygnał mierzony przez miernik tak, aby wartość ta odpowiadała wartości średniej mierzonego promieniowania. W warunkach rzeczywistych duża stała czasu najczęściej powoduje, że mierzona wartość promieniowania ($S_{sr\text{ mier}}$) jest wyższa lub znacznie wyższa od wartości średniej promieniowania (S_{sr}), tj. $S_{sr\text{ mier}} \neq S_{sr}$ – ryc. 4b. W niektórych przypadkach mierzona wartość promieniowania może być niższa od wartości średniej promieniowania. W skrajnym przypadku przy zbyt niskiej stałej czasu sygnał mierzony narasta zgodnie z impulsem mierzonego pola, ale jednocześnie równie szybko opada, gdy nie ma pola i to sprawia, że miernik taki pokazuje wartość mierzoną równą zero - $S_{sr\text{ mier}} = 0$, pomimo, iż średnia wartość pola jest różna od zera – ryc. 4a.

WYNIKI POMIARÓW BŁĘDÓW W POLACH IMPULSOWYCH

Błędy pomiarów urządzeń medycznych

Stosowanie mierników dipolowo-diodowych do pomiarów pól impulsowych, kalibrowanych jedynie w polach ciągłych, powoduje, że pomiary te obciążone są dużym lub bardzo dużym błędem. Na ryc. 5 przedstawiono błędy pomiarów pola elektrycznego Terapulsu GS200 miernikami: typu NARDA EMR-200 z sondą typu 9.2,



Ryc. 5. Błędy pomiarów pola elektromagnetycznego w otoczeniu Terapulsu GS200 dla $WW = 0,5\%$ oraz $WW = 1\%$ miernikami: a) EMR-200, b) PMM, c) MEH-25.

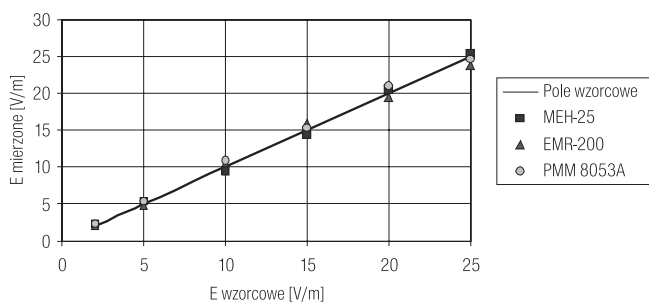
typu PMM8053A z sondą typu EP408 oraz typu MEH-25 z sondą AE-1. Pomiary przeprowadzono dla współczynników wypełnienia $WW = 0,5\%$ oraz $WW = 1\%$.

Na podstawie pomiarów pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez Terapuls GS200 łatwo zauważyć, że pomiary dostępnymi na rynku miernikami z sondami diodowymi obarczone są błędami, przy czym miernik typu EMR-200 zawyża wartości pomiarów, podczas gdy mierniki typu PMM oraz MEH-25 podają wartości zaniżone. Stwierdzono, że pomiary tymi miernikami obarczone są następującymi błędami:

- miernik typu NARDA EMR-200 – dodatkowy błąd pomiaru wynosi 15%,
- miernik typu PMM8053A – dodatkowy błąd pomiaru wynosi 45%,
- miernik typu MEH-25 – dodatkowy błąd pomiaru wynosi 35%.

Błędy pomiarów urządzeń telefonii komórkowej

Błędy pomiarów pola elektromagnetycznego anteny stacji bazowej miernikami diodowymi typu: EMR-200, PMM8053A oraz MEH-25 przedstawiono na ryc. 6.



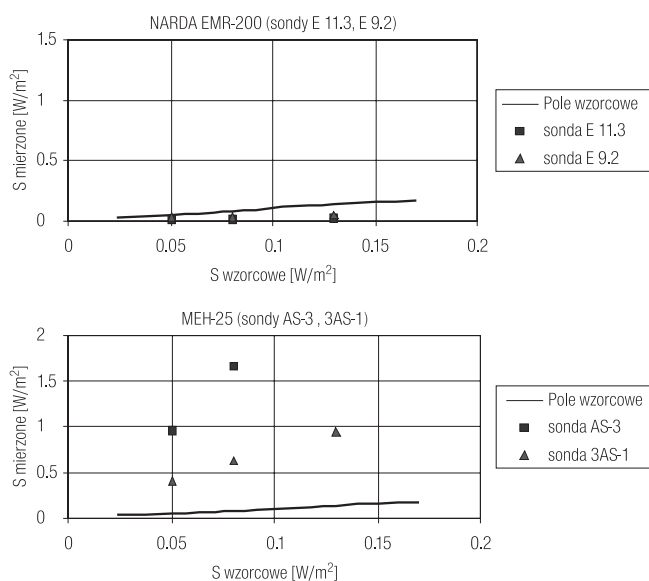
Ryc. 6. Błędy pomiarów miernikami EMR-200, PMM oraz MEH-25 pola elektromagnetycznego anteny stacji bazowej.

Błędy pomiarów promieniowania wytwarzanego przez anteny urządzeń telefonii bezprzewodowej nie są duże i mieszczą się w granicach błędów miernika.

Błędy pomiarów urządzeń radiolokacyjnych

Błędy pomiarów pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez radary przeprowadzono w bezekowej komorze pomiarowej, w której wytworzone było pole wzorcowe jednego ze stosowanych radarów, dla sytuacji, w której antena radaru jest zatrzymana na czas pomiarów – ryc. 3b – pomiary stacjonarne. Współczynnik wypełnienia wynosił $WW = 0,11$. Pomiary przeprowadzono miernikami typu EMR-200 oraz typu MEH-25. Wyniki pomiarów pola elektromagnetycznego przedstawiono na ryc. 7.

Pomiary miernikami diodowymi promieniowania wytwarzanego przez radary obarczone są dużymi lub rażąco dużymi błędami:



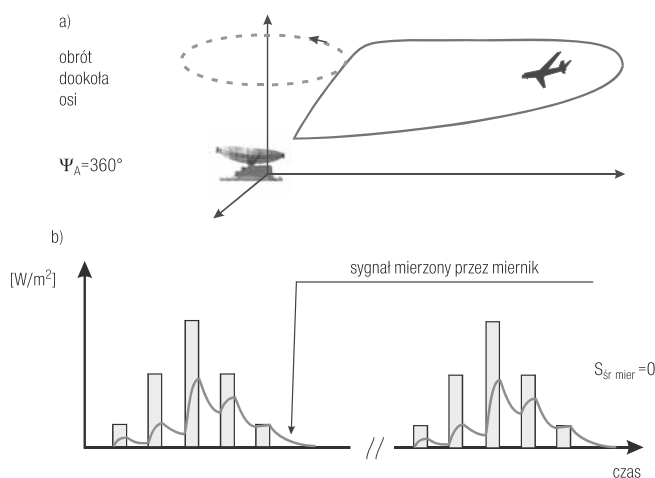
Ryc. 7. Błędy pomiarów miernikami EMR-200 oraz MEH-25 pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez radar.

- miernik typu NARDA EMR-200 – dodatkowy błąd pomiaru wynosi 60%,
- miernik typu MEH-25 – dodatkowy błąd pomiaru wynosi 1950%.

Błędy pomiarów niestacjonarnych pól impulsowych

Przedstawiona w poprzednim rozdziale analiza błędów pomiarów pól impulsowych dotyczyła przypadku, gdy antena radaru była zatrzymana na czas pomiarów (pole stacjonarne). W rzeczywistości takie przypadki są raczej rzadko spotykane, gdyż zatrzymanie anteny wytwarzającej impulsy promieniowania o bardzo wysokiej wartości mocy grozi uszkodzeniem układów elektronicznych. W znamionowych warunkach mamy do czynienia z niestacjonarnym charakterem pola, tj. gdy wiązka promieniowania wykonuje obroty dookoła swojej osi (ryc. 8a) lub gdy pole ma charakter pulsacyjny (4,5).

W przypadku, gdy wiązka promieniowania wykonuje obroty dookoła swojej osi lub gdy pole ma charakter pulsacyjny na miernik pomiarowy pada zaledwie kilkadziesiąt impulsów w czasie przechodzenia wiązki przez punkt pomiarowy, po czym następuje okres bez pola elektromagnetycznego w tym punkcie. W takim przypadku wszystkie mierniki z sondami diodowymi będą wykazywać zerowe wartości mierzonego pola elektromagnetycznego – ryc. 8b. Stosowanie tych mierników do pomiarów niestacjonarnych, impulsowych pól elektromagnetycznych jest niezgodne z metodyką pomiarów.



Ryc. 8. Pomiar niestacjonarnych pól elektromagnetycznych: a) niestacjonarny charakter promieniowania anten radarów powodowany zmianą położenia wiązki antenowej, b) kształt sygnału i odpowiedź miernika w punkcie pomiarowym.

WNIOSKI

1. Mierniki diodowe kalibrowane i wzorcowane są w polach ciągłych, a więc są przeznaczone do pomiarów takich pól elektromagnetycznych.

2. W przypadku pomiarów pól impulsowych, dla których należy wyznaczać wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego lub wartość średnią gęstości mocy, popełniane są dodatkowe błędy pomiarów, wynikające z błędnego pomiaru pól impulsowych. Błąd ten najczęściej jest nieznan, gdyż jego wartość wynika z wartości współczynnika wypełnienia mierzonego pola elektromagnetycznego oraz stałej czasu sondy pomiarowej. Dodatkowy błąd pomiaru wynikający z impulsowości pola może być ustalony eksperymentalnie przez dodatkowe wzorcowanie w impulsowych polach wzorcowych. Pamiętać jednakże należy, że kalibrację w polach impulsowych należy wykonywać przy zachowaniu dokładnie takich samych wartości współczynników wypełnienia, przy których będą wykonywane pomiary pola elektromagnetycznego.

3. Pola elektromagnetyczne wytwarzane przez urządzenia telefonii komórkowej, z powodu wysokiej wartości współczynnika wypełnienia, mogą być mierzone miernikami diodowymi, a dodatkowy błąd pomiaru mieści się w granicach błędów miernika.

4. Pomiary miernikami diodowymi impulsowego promieniowania wytwarzanego przez urządzenia radiolokacyjne, przy zatrzymanej antenie radaru na czas pomiarów (promieniowanie stacjonarne), ze względu na małe współczynniki wypełnienia (WW około 0,1%) bez dodatkowych kalibracji są obciążone rażąco dużym błędem. Dodatkową kalibrację i wzorcowanie należy przeprowadzić w polach impulsowych, charakteryzujących się zarówno takim samym współczynnikiem wypełnienia jak mierzone pole elektromagnetyczne, ale również urządzenia generujące pole wzorcowe muszą zapewnić odpowiednio wysokie wartości mocy w impulsie, gdyż przy wysokich wartościach natężenia pola zmienia się funkcja charakterystyki diody jako detektora sondy pomiarowej. Z tego powodu, dodatkowe kalibracje i wzorcowania w polach impulsowych muszą być wykonywane w funkcji mocy, ponieważ dla mierników diodowych otrzymuje się różne wartości współczynników kalibrujących w polach impulsowych w zależności od natężenia pola elektrycznego.

5. Pomiary niestacjonarnego promieniowania impulsowego wytwarzanego przez urządzenia radiolokacyjne, tj. przy obracającej się antenie radaru miernikami diodowymi są rażącym błędem metrologicznym.

PIŚMIENNICTWO

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzenia dotrzymania tych poziomów. DzU 2003, nr 192, poz.1883
2. 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. DzU 2002, nr 217, poz. 1833 [z późniejszymi zmianami]
3. PN-T-06580-3:2002: Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Część 3. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
4. Kubacki R., Kieliszek J., Sobiech J.: Warunki narażenia ludzi na impulsowe promieniowanie mikrofalowe wytwarzane przez urządzenia radiolokacyjne. Materiały konferencji naukowej „Urządzenia i Systemy Radiolokacyjne”. Redakcja Wydawnictw WAT, Warszawa 2005.
5. Kubacki R.: Charakterystyka urządzeń radiolokacyjnych jako źródeł wytwarzających silne pola mikrofalowe. W: Aniołczyk H. [red.] Pola elektromagnetyczne – źródła – oddziaływanie – ochrona. Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2000