

*Omówiono procedury stosowane podczas wzorcowania odbiorczych anten pomiarowych, wykorzystywanych w miernictwie pól elektromagnetycznych w warunkach swobodnej przestrzeni, na otwartych poligonach pomiarowych (OPP), a także w kabinach pomiarowych w zakresie częstotliwości 30 MHz – 3,5 GHz. Procedury dotyczą wzorcowania anten wykorzystywanych w stałych i ruchomych stacjach kontroli emisji radiowych oraz anten stosowanych podczas badań niepożądanego promieniowania urządzeń. W procedurach tych określono metody wzorcowania anten, zgodne ze standardami międzynarodowymi, polegające na wyznaczaniu współczynnika antenowego (WA) i zysku energetycznego (G) w specyficznych warunkach metrologicznych (z uwzględnieniem ich przeznaczenia).*

**otwarty poligon pomiarowy (OPP), anteny pomiarowe, wzorcowanie, niepożądana emisyjność, kontrola emisji radiowych**

## Wprowadzenie

Pomiar natężenia pola elektromagnetycznego (EM) jest jednym z podstawowych pomiarów związanych z propagacją fal radiowych, umożliwia bowiem – przy zachowaniu pewnych procedur pomiarowych – ocenę rzeczywistego stanu środowiska EM w dowolnej przestrzeni lub zebranie niezbędnych informacji o źródle promieniowania, np. urządzeniu elektrycznym czy elektronicznym. Pomiary natężenia pola EM wykonuje się podczas:

- kontroli emisji radiowych stacji nadawczych, rutynowo prowadzonych przez stałe i ruchome stanowiska kontrolne URTiP;
- badań zasięgów stacji nadawczych telewizyjnych, radiofonicznych, radiokomunikacyjnych i innych;
- badań zaburzeń EM;
- badań właściwości polowych anten (charakterystyki promieniowania, zysk);
- badań niepożądanego promieniowania i odporności na silne pola EM wszelkiego rodzaju urządzeń elektrycznych i elektronicznych;
- badań ochrony środowiska EM przed silnym promieniowaniem anten nadawczych czy innych urządzeń.

W każdym z wymienionych rodzajów badań są wykorzystywane bardzo często odmienne typy anten, różniące się nie tylko zakresami częstotliwości pracy, rozwiązaniami konstrukcyjnymi, ale także wzorcowaniem.

W niniejszym artykule skoncentrowano się głównie na procedurach sprawdzania i wzorcowania anten na poligonach pomiarowych w warunkach swobodnej przestrzeni oraz w warunkach ograniczonej przestrzeni nad powierzchnią przewodzącą, w zakresie częstotliwości 30 MHz – 3,5 GHz. Procedury dotyczą anten stosowanych przez stałe i ruchome stacje kontroli emisji radiowych oraz anten wykorzystywanych w badaniach niepożądanego promieniowania różnych urządzeń. W procedurach tych

określono metody wzorcowania anten, zgodnie ze stosownymi normami, polegające na wyznaczeniu współczynnika antenowego ( $WA$ ) i zysku energetycznego ( $G$ ) w takich warunkach metrologicznych, dla jakich anteny te są przeznaczone.

Współczynnik antenowy wyraża stosunek natężenia pola elektrycznego  $E$  w miejscu anteny pomiarowej do napięcia  $U$  na wyjściu anteny, wg zależności:

$$WA[1/m] = \frac{E[V/m]}{U[V]} . \quad (1)$$

Określenie natężenia pola elektrycznego  $E$  w otoczeniu anteny w warunkach rzeczywistych nie jest łatwe, natomiast pomiar napięcia na dopasowanym obciążeniu anteny jest czynnością dość rutynową.

W przypadku pomiarów natężenia pola anteną pomiarową o znanych współczynnikach antenowych proces postępowania i korzystania z zależności (1) jest odwrotny. Znajomość  $WA$  i napięcia na jej wyjściu umożliwia wyznaczenie poziomu natężenia pola elektrycznego  $E$  w miejscu ustawienia anteny. Jeśli współczynnik antenowy jest określony wprost na wyjściu anteny, to natężenie pola wyrażone w dB można wyznaczyć z zależności:

$$E_{[dB(\mu V/m)]} = WA_{[dB(1/m)]} + U_{[dB(\mu V)]} + T_{[dB]} , \quad (2)$$

gdzie  $T$  oznacza tłumienie przewodu w.cz. łączącego antenę z miernikiem, w dB. Należy je uwzględnić w trakcie przeliczania wyników pomiarów. Jeśli zaś przewód stanowi integralną część anteny i jest połączony z nią na stałe, jego tłumienie należy uwzględnić we współczynnikach antenowych, a zależność (2) sprowadzi się do postaci:

$$E_{[dB(\mu V/m)]} = WA_{[dB(1/m)]} + U_{[dB(\mu V)]} . \quad (3)$$

Zysk anteny jest związany z jej współczynnikiem antenowym zależnością:

- względem źródła izotropowego:

$$G_{i[dB]} = 20 \lg (f_{[MHz]}) - 29,78 - WA_{[dB(1/m)]} , \quad (4)$$

- względem dipola półfalowego:

$$G_{d[dB]} = 20 \lg (f_{[MHz]}) - 31,93 - WA_{[dB(1/m)]} . \quad (5)$$

Zalecane są następujące metody wzorcowania anten:

- **metoda standardowego poligonu pomiarowego (MSPP)**, polegająca na wykorzystaniu stanowiska o normowanych właściwościach propagacyjnych; w metodzie tej jest preferowane wykorzystanie trzech różnych anten, z których są tworzone kolejno trzy pary (nadawcza i odbiorcza), między którymi jest wykonywany trzykrotnie pomiar pewnego współczynnika określającego stosunek napięć na wejściach anten;
- **metoda anteny odniesienia (MAO)**, umożliwiająca porównanie w tym samym polu, wytworzonym przez dowolną antenę nadawczą, anteny badanej z dipolem odniesienia, którego charakterystykę zysku i współczynnika antenowego można w sposób bardzo dokładny obliczyć;
- **metoda pola wzorcowego (MPW)**, polegająca na wytworzeniu w miejscu anteny badanej jednorodnego pola elektromagnetycznego o znanym natężeniu;

- **metoda anteny wzorcowej (MAW)**, umożliwiająca porównanie w tym samym polu, wytworzonym przez dowolną antenę nadawczą, anteny badanej z dowolną anteną pomiarową, której charakterystyki zysku i współczynników antenowych są znane.

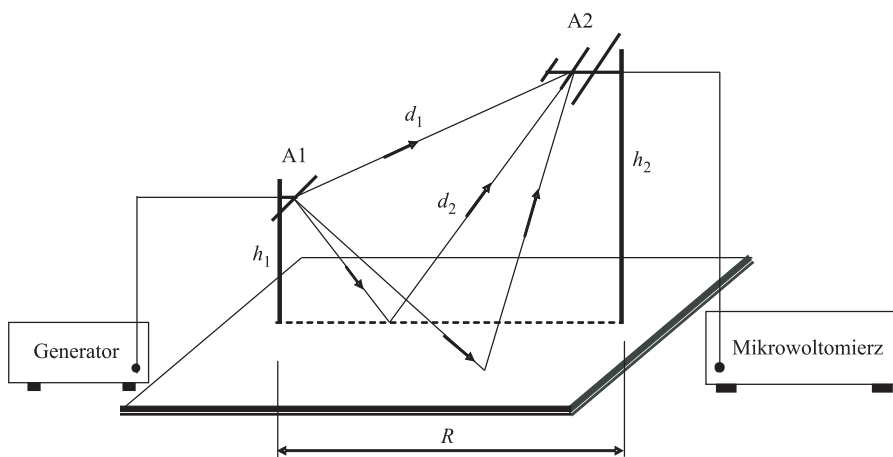
## Typowe stanowisko pomiarowe i warunki wzorcowania anten

Teoretycznie, wzorcowanie anten można przeprowadzić na dowolnym stanowisku pomiarowym, pod warunkiem, że w miejscu wzorcowanej anteny pomiarowej potrafi się wyznaczyć natężenie pola elektrycznego z wymaganą dokładnością. Jak wiadomo, w warunkach rzeczywistych pole EM w otoczeniu anteny pomiarowej powstaje w wyniku nie tylko fali bezpośredniej, ale również i interferencji wielu sygnałów odbitych dochodzących do anteny różnymi drogami. Dlatego w praktyce dąży się do lokalizacji stanowiska pomiarowego w takim miejscu, w którym wpływ wszelkich elementów promieniowania wtórnego jest ograniczony.

Typowe stanowisko pomiarowe do wzorcowania anten przedstawiono na rys. 1. Składa się ono z dwóch masztów o wysokości  $h_1$  i  $h_2$ , umieszczonych w odległości  $R$ , stojących bądź wprost na powierzchni ziemi, bądź na powierzchni o ulepszonej sztucznie przewodności. Na jednym z masztów zainstalowano antenę pomocniczą A1 – zwykle nadawczą, połączoną ze źródłem napięcia w.c.z., a na drugim antenę odbiorczą A2 – będącą przedmiotem wzorcowania, połączoną z mikrowoltmierzem selektywnym.

Każde stanowisko pomiarowe powinno zawsze spełniać następujące podstawowe warunki:

- obszar wolny od elementów postronnych, stanowiących potencjalne źródło fal odbitych, powinien mieścić się w okręgu o promieniu większym od  $R_{\min}$  ( $R_{\min}$  jest oszacowane w dalszej części artykułu);
- obie anteny (nadawcza i odbiorcza) powinny być zainstalowane na takiej wysokości nad podłożem, aby nie wpływało ono na impedancję wejściową anten.



Rys. 1. Typowe stanowisko pomiarowe do wzorcowania anten

Anteny – nadawcza i odbiorcza – podczas wzorcowania powinny być zawsze spolaryzowane poziomo. Przy poziomej polaryzacji uzyskuje się większą dokładność pomiaru, ponieważ jest

wyeliminowany w znacznym stopniu niepożądany wpływ pionowego masztu i pionowego odcinka przewodu zasilającego antenę. W przypadku gdy należy uwzględnić również falę odbitą od podłoża, współczynniki odbicia dla tej polaryzacji są wyliczane z bardziej dokładnych zależności analitycznych.

Wzorcowanie anten pomiarowych można przeprowadzać na stanowisku, na którym jest wyeliminowany wpływ nie tylko źródeł postronnych, ale też prawie całkowicie wpływ fali odbitej od ziemi. Anteny zarówno nadawcza, jak i odbiorcza są umieszczone więc nad rzeczywistą ziemią na stosunkowo wysokich masztach. Nazywa się je otwartym poligonem pomiarowym swobodnej przestrzeni (OPPSP). Na takim stanowisku występuje tylko fala bezpośrednia, a zatem do obliczenia natężenia pola w miejscu anteny pomiarowej nie trzeba znać ani współczynników odbicia od ziemi, ani charakterystyk promieniowania anten. Także prawie całkowicie jest wyeliminowany wpływ ziemi na impedancję wejściową anten. Takie warunki umożliwiają wyznaczenie współczynników antenowych z bardzo dużą dokładnością. Niestety takie stanowisko ma dwie poważne wady: po pierwsze, każdorazowa wymiana anteny na inną wymaga wchodzenia na wysoki maszt, a po drugie, przemieszczanie takich masztów do ustalenia wymaganej między nimi odległości jest również uciążliwe.

W związku z tym postanowiono wzorcowanie anten pomiarowych wykonywać bliżej powierzchni ziemi. Aby wpływ tej ziemi był analitycznie wyliczalny, stały na całej powierzchni i niezmienny w czasie oraz niezależny od warunków atmosferycznych, ziemię rzeczywistą zastępuje się gładką metalową płaszczyzną o doskonałej przewodności elektrycznej. W ten sposób odchodzi się częściowo od warunków swobodnej przestrzeni, dopuszczając falę odbitą, ale taką, którą w sposób jednoznaczny można analitycznie opisać. Jest to możliwe wtedy, kiedy występuje tylko fala odbita biegnąca wzdłuż promienia odbicia zwierciadlanego, a fala odbita jest równa fali padającej. Kryterium to będzie spełnione, jeśli powierzchnia przewodząca będzie mieć dostatecznie duże wymiary. Można wówczas przyjąć moduł współczynnika odbicia stały i równy jedności, a także znacznie ograniczyć wpływ efektów brzegowych tej powierzchni na rozkład pola. Należy jednak liczyć się z tym, że powierzchnia przewodząca i obniżenie wysokości zawieszenia nad nią anten, mogą wpływać na ich impedancję wejściową, a tym samym i na dokładność wyznaczania WA. W tym przypadku natężenie pola elektrycznego w miejscu anteny pomiarowej jest równe sumie wektorowej natężeń pól fali bezpośredniej i fali odbitej od podłoża. Fale te – porównywalne pod względem natężenia – interferują ze sobą, tworząc w funkcji wysokości rozkład prawie zupełnej fali stojącej. Dla polaryzacji poziomej strzałka fali stojącej w otoczeniu mierzonej anteny występuje na wysokości, na której różnica promieni (bezpośredniego  $d_1$  i odbitego  $d_2$ ) jest równa nieparzystej wielokrotności połowy długości fali, a jej węzły – całej długości fali. Dlatego podczas wzorcowania, anteny – nadawcza i odbiorcza – dla każdej częstotliwości muszą być ustawiane na takiej wysokości, na której środek elektryczny anteny pomiarowej jest zawsze położony w jednym z maksimów pionowej fali stojącej. Takie stanowisko pomiarowe nazywa się otwartym poligonem pomiarowym ograniczonej przestrzeni (OPPOP).

Wzorcowanie anten na stanowisku pomiarowym OPPOP wymaga jednak wcześniejszych dość pracochłonnych przygotowań. Jeśli wzorcowaniu mają być poddane anteny kierunkowe, np. logarytmiczno-periodyczne lub typu Yagi, jest niezbędny pomiar charakterystyk promieniowania, ponieważ są one potrzebne do dokładnego analitycznego wyznaczenia natężenia pola wynikającego z fali odbitej.

Oczywiście, w przypadku wzorcowania anten na stanowisku pomiarowym OPPOP dokładność pomiaru współczynników antenowych jest gorsza niż na stanowisku zbliżonym do swobodnej przestrzeni.

### ***Otwarty poligon pomiarowy swobodnej przestrzeni***

Poligon OPPSP jest wykorzystywany głównie do wzorcowania anten, które służą do pomiarów natężenia pola EM w otwartej przestrzeni, w strefie dalekiej źródeł promieniowania, a więc np. stosowanych

przez stałe i ruchome stacje kontroli widma EM emitowanego przez anteny nadawcze radiowe, telewizyjne, radiokomunikacyjne i inne, a także do badania zasięgów stacji nadawczych. Podstawową właściwością stanowiska pomiarowego OPPSP powinno być wytworzenie w miejscu badanej anteny jednorodnego pola EM o znanym natężeniu w całym obszarze przestrzeni obejmującym antenę.

Należy zatem ustalić kryteria, które muszą być spełnione, aby pole w sąsiedztwie anteny mierzonej można było uznać za jednorodne. W praktyce uznaje się, że pole jest jednorodne w obszarze anteny badanej, jeśli odległość  $R$  między antenami spełnia warunek:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (6)$$

w którym:

- $D$  – największy wymiar anteny;
- $\lambda$  – długość fali dla częstotliwości pomiarowej.

Czasem jednak spełnienie tego warunku nie wystarcza, aby pomiary były przeprowadzane prawidłowo. Na przykład, można założyć, że pomiary są wykonywane na częstotliwości 30 MHz ( $\lambda = 10$  m), a antenami – pomocniczą i badaną – są proste dipole półfalowe. Podstawiając do wzoru (6) za  $D = \lambda/2 = 5$  m oraz za  $\lambda = 10$  m, otrzyma się odległość  $R = 5$  m. Przy tak małej odległości w stosunku do długości fali ( $R/\lambda = 1/2$ ) błąd wyznaczenia współczynnika antenowego, w stosunku do swobodnej przestrzeni, może dochodzić nawet do 1,6 dB.

Nie ma prostej matematycznej zależności na oszacowanie odległości między antenami, przy której sprzężenie EM między nimi jest do pominięcia. Można ją wyznaczyć pośrednio, korzystając z funkcji, która opisuje odchyłkę współczynnika antenowego  $\Delta WA$  od wartości poprawnej, wynikającą z impedancji wzajemnej. Według [13], funkcja ta ma postać:

$$\Delta WA = 10 \lg \left[ \frac{(50 + R_s + R_m)^2 + (X_s + X_m)^2}{(50 + R_s)^2 + X_s^2} \right], \quad (7)$$

w którym:

- $R_s, X_s$  – składowa rzeczywista i urojona impedancji wejściowej dipola;
- $R_m, X_m$  – składowa rzeczywista i urojona impedancji sprzężonej.

Zakładając różne odległości między antenami i wyliczając za każdym razem impedancje wzajemne (np. wg [1]), można znaleźć odległość, przy której założona odchyłka współczynnika antenowego od wartości poprawnej nie jest przekroczona. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że dla opisanego przykładu geometrii dwóch dipoli półfalowych i przy założeniu odchyłki nie większej niż np. 0,5 dB, na częstotliwości 30 MHz anteny muszą być oddalone od siebie o co najmniej  $3\lambda$ , co w omawianym przykładzie odpowiada odległości 30 m.

Na stanowisku do wzorcowania anten metodą OPPSP teren powinien być wolny od jakichkolwiek postronnych źródeł wtórnego promieniowania na obszarze w kształcie elipsy, której półosie opisują zależności:

$$a = \frac{1}{2}R_o, \quad b = \frac{1}{2}\sqrt{R_o^2 - R_b^2}, \quad (8)$$

w których:

- $R_o$  – długość promienia odbitego od przeszkody;
- $R_b$  – długość promienia bezpośredniego.

Można założyć, że odległość  $R_b$  między antenami wynosi 30 m (wynika to z warunku odsprzężenia anten dla 30 MHz) lub można ją wyznaczyć z zależności (6) i przyjmując tę, która jest większa. Długość promienia  $R_o$ , zgodnie z [11], można określić z zależności:

$$\lg\left(\frac{R_o}{R_b}\right) \geq 1,25, \quad (9)$$

stąd  $R_o \geq 17,8 R_b$ .

Jeśli antenę nadawczą o zysku energetycznym  $G_N$  zasilić mocą  $P_N$ , to na wyjściu anteny odbiorczej o zysku energetycznym  $G_O$ , umieszczonej w odległości  $R$  od anteny nadawczej, na obciążeniu dopasowanym wydzieli się następująca moc:

$$P_O = \frac{G_N G_O \lambda^2 P_N}{(4\pi R)^2}, \quad (10)$$

a stosunek napięć  $S_{NO}$  na wejściach obu anten, wynikający z zależności (10), wyniesie:

$$S_{NO} = \frac{U_N}{U_O} = \frac{4\pi R}{\lambda\sqrt{G_N G_O}}. \quad (11)$$

Zyski anten względem źródła izotropowego są związane z ich współczynnikami antenowymi zależnościami:

$$WA_N = \frac{9,73}{\lambda\sqrt{G_N}}, \quad WA_O = \frac{9,73}{\lambda\sqrt{G_O}}. \quad (12)$$

Po podstawieniu zależności (12) do (11) otrzymuje się jedną z podstawowych zależności wykorzystywanych podczas wzorcowania anten (dlatego ujęto ją tutaj w ramkę):

$$S_{NO} = 39,82 \frac{R \cdot WA_N \cdot WA_O}{f_{[\text{MHz}]}}. \quad (13)$$

Uzależnia ona stosunek napięcia na wejściu anteny nadawczej do napięcia na wyjściu anteny odbiorczej od ich współczynników antenowych, odległości między nimi i od częstotliwości. Zależność ta, nazwana w tym artykule **współczynnikiem tłumienia między antenami**  $S_{NO}$ , wyrażona w [dB], przyjmuje postać:

$$S_{NO[\text{dB}]} = 32 + WA_{N[\text{dB}]} + WA_{O[\text{dB}]} + 20 \lg R_{[\text{m}]} - 20 \lg f_{[\text{MHz}]}. \quad (14)$$

Widać z niej, że jeśli obie anteny – nadawcza i odbiorcza – są jednakowe, to na podstawie pomiaru tłumienia sygnału  $S_{NO}$  między nimi, ich współczynnik antenowy  $WA$  można łatwo obliczyć z zależności:

$$WA_{[\text{dB}]} = \frac{1}{2} S_{NO[\text{dB}]} - 16 - 10 \lg R_{[\text{m}]} + 10 \lg f_{[\text{MHz}]}. \quad (15)$$

W przypadku wzorcowania anten tego samego typu, ale różniących się znacznie współczynnikami antenowymi, lub też wzorcowania anten różnego typu o nieznanach współczynnikach antenowych, jest stosowana metoda pomiarowa **trzech anten**. Kolejno są tworzone pary anten nadawcza – odbiorcza, wg schematu zamieszczonego na rys. 2. Pomiar współczynnika tłumienia  $S_{NO}$  jest wykonywany trzykrotnie.



Dzięki temu, że jest wyeliminowany wpływ fali odbitej od ziemi oraz założona stosunkowo duża odległość anten od siebie, stanowisko pomiarowe OPPSP umożliwia uzyskiwanie stosunkowo dużych dokładności pomiaru współczynników antenowych. Dla przykładu, w tabelicy 1 przedstawiono stopień wpływu poszczególnych czynników na łączną ocenę dokładności wzorcowania anten.

**Tabl. 1. Dokładność wzorcowania anteny na OPPSP**

Czynniki wpływające na dokładność	Wartości
Dokładność pomiaru odległości	$\pm 0,03$ dB
Dokładność pomiaru tłumienia propagacji	$\pm 0,15$ dB
Dokładność ustawienia jednakowej wysokości anten Dokładność ustawienia zgodnej polaryzacji Dokładność ustawienia kierunków na siebie	Łącznie $\pm 0,15$ dB
Wpływ masztów Wpływ przewodów w.cz.	Łącznie $\pm 0,05$ dB
Dokładność odczytu częstotliwości	$\pm 0,05$ dB
Wpływ niedopasowania anten	$\pm 0,05$ dB
<b>Łączna dokładność wzorcowania</b>	<b><math>\pm 0,48</math> dB</b>

Omówione stanowisko pomiarowe ma zasadniczą wadę, a mianowicie każdorazowa zamiana anteny na inną wymaga od wykonującego pomiary wchodzenia na stosunkowo wysoki maszt. W związku z tym w nowoczesnych laboratoriach badawczych wzorcowanie anten pomiarowych przeprowadza się na nieco innych stanowiskach pomiarowych, na niewielkich wysokościach nad powierzchnią ziemi, opisanych w dalszej części artykułu.

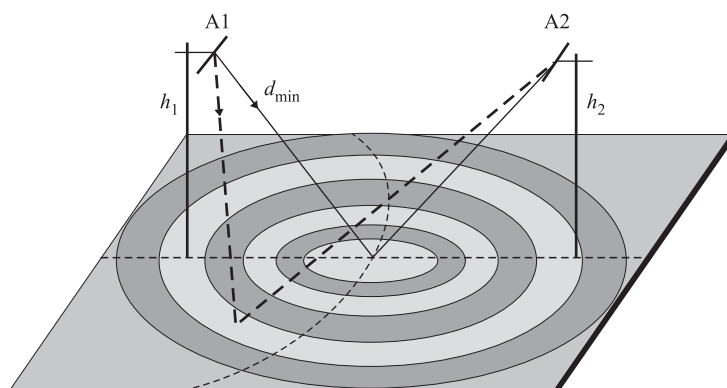
### **Otarty poligon pomiarowy ograniczonej przestrzeni**

Podstawowym elementem stanowiska otwartego poligonu pomiarowego ograniczonej przestrzeni jest gładka i równa powierzchnia, zwykle na poziomie ziemi, charakteryzująca się doskonałą przewodnością prądu elektrycznego, nad którą na dwóch masztach ustawionych w odpowiedniej od siebie odległości, są umieszczone anteny – pomocnicza jako nadawcza i mierzona jako odbiorcza (rys. 1). Stanowiska te są wykorzystywane do różnego rodzaju pomiarów, dlatego w zależności od przeznaczenia wymiary i rodzaj materiału, z jakiego jest wykonana płyta przewodząca, są różne. Jeśli stanowisko pomiarowe przeznacza się tylko do pomiarów niepożądanego emisyjności urządzeń przemysłowych, to dopuszcza się pewne uproszczenia jego konstrukcji, np. jako płaszczyznę odniesienia stosuje się siatkę metalową o drobnych oczkach, rozciągniętą wzdłuż powierzchni ziemi. Wymiary powierzchni przewodzącej są również wtedy ograniczone. Jeśli stanowisko to ma być wykorzystywane też do wzorcowania anten pomiarowych, jest wymagana bardzo duża gładkość powierzchni, doskonała jej przewodność, a także dość spore wymiary. Stanowisko OPPOP musi być tak usytuowane w terenie, aby sygnały odbite od elementów postronnych, znajdujących się w pobliżu (budyneków, drzew, trakcji energetycznej), były do pominięcia w stosunku do sygnału bezpośredniego. Wtedy w miejscu anteny odbiorczej – pomiarowej – uzyskuje się sumę wektorową jedynie dwóch sygnałów: dochodzącego od anteny nadawczej wzdłuż promienia bezpośredniego  $d_1$  i odbitego od powierzchni  $d_2$ .

Powszechnie używa się pojęcia „odbicia fali EM”, np. od ośrodka materialnego o innych właściwościach elektrycznych niż ośrodek, w którym fala się rozchodzi. Zjawiska, jakie zachodzą na poziomie cząsteczek, nie powodują żadnych odbić. Fala EM, padając na powierzchnię przewodzącą, wzbudza drgania ładunków swobodnych (lub związanych w przypadku dielektryków) cząstek elementarnych



tej powierzchni. Cząstki te stają się źródłami wtórnego ich promieniowania. Obowiązuje tu zasada Huygensa, zgodnie z którą wszystkie punkty leżące na granicy ośrodków, gdy dobiegnie do nich powierzchnia falowa, stają się źródłami nowych kulistych fal cząstkowych. Wszystkie więc cząstki leżące na powierzchni gruntu jednakowo oddalone od anteny nadawczej A1, np. wzdłuż linii przerywanej (rys. 3), są pobudzone taką samą mocą, a w związku z tym natężenie ich promieniowania wtórnego, rozchodzące się od każdej cząstki izotropowo, jest również takie same.



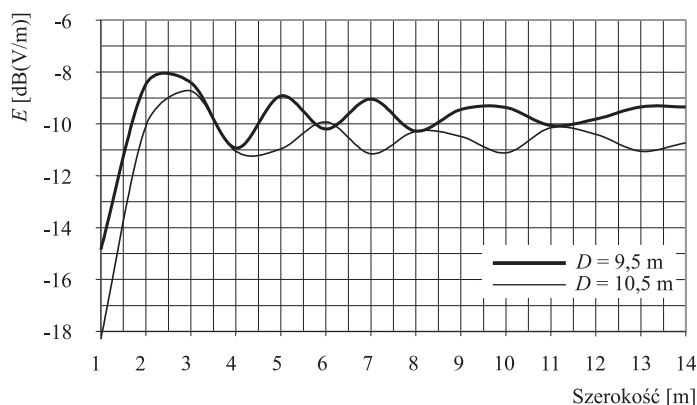
Rys. 3. Strefy Fresnela na powierzchni przewodzącej poligonu pomiarowego

Mimo że promieniowanie wtórne poszczególnych cząstek elementarnych jest kuliste i udział wszystkich cząstek całej powierzchni gruntu jest prawie jednakowy, to maksimum promieniowania wtórnego występuje zawsze wzdłuż promienia lustrzanego odbicia.

Na powierzchni przewodzącej OPPOP tworzą się strefy Fresnela w postaci elips. Pierwsza – najbardziej wewnętrzna – powstaje wtedy, gdy różnica dróg promieni odbitych od dowolnego źródła powierzchni i promienia wzdłuż lustrzanego odbicia nie będzie większa od połowy długości fali. Sygnały wtórne dochodzące od tej strefy do anteny odbiorczej są w fazie, co sprawia, że natężenia pola się sumują. Jest to więc powierzchnia, od której odbija się największa z możliwych energia. To stwierdzenie stanie się zrozumiałe, jeśli uwzględnimy drugą i pozostałe strefy. W drugiej strefie Fresnela różnica dróg promieni jest większa od połowy długości fali, a natężenie pola od tej strefy odejmuje się od poprzedniego, w wyniku czego pole w miejscu anteny odbiorczej maleje. Z kolejnej, trzeciej strefy natężenia pól ponownie będą się sumować z tymi pochodzącymi z pierwszej itd. Udział promieniowania wtórnego poszczególnych stref coraz bardziej oddalonych od pierwszej jest oczywiście coraz mniejszy, ponieważ sygnały pochodzące od nich maleją wraz z odległością.

Można zadać pytanie, jak duża powinna być powierzchnia przewodząca gruntu stanowiska pomiarowego do wzorcowania anten, aby można było uzyskiwać dokładności wyznaczania współczynników antenowych lepsze od  $\pm 1$  dB? Odpowiedź na to pytanie nie jest prosta. Wielkość powierzchni przede wszystkim zależy od częstotliwości wzorcowania, a także od odległości między antenami. Aby przekonać się, jak zmienia się natężenie pola w miejscu anteny odbiorczej w funkcji wielkości powierzchni przewodzącej, przeprowadzono obliczenia przy założeniu stałej mocy promieniowanej przez antenę nadawczą. Obliczenia wykonano dla częstotliwości 300 MHz oraz dla odległości między antenami zbliżonej do jednej z normowanych 10 m, przyjmując stałą długość powierzchni 15 m,

a zmieniając tylko jej szerokość. Przykładowe wyniki obliczeń dla odległości  $D = 9,5$  i  $10,5$  m przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zależność natężenia pola przy antenie odbiorczej w funkcji szerokości powierzchni

Jak widać, natężenie pola zmienia się periodycznie i im szerokość powierzchni jest większa, tym zmiany te są coraz mniejsze. Dla przyjętej szerokości powierzchni 12 – 14 m natężenie pola przy antenie pomiarowej nie zmieniało się więcej niż 1 dB. Dla stanowiska pomiarowego, umożliwiającego wzorcowanie anten od częstotliwości 30 MHz, wymiary pola pomiarowego muszą być jeszcze większe. W jednym ze znanych laboratoriów amerykańskich wzorcujących anteny pomiarowe wymiary metalowej powierzchni wynoszą  $40\text{ m} \times 60\text{ m}$  [2].

Na OPPOP można przeprowadzać wzorcowanie anten o różnym przeznaczeniu – zarówno wykorzystywanych do kontroli widma częstotliwości radiowych, jak i stosowanych w pomiarach niepożądanego emisyjności urządzeń. Procedury wzorcowania anten w obu przypadkach różnią się jedynie odległością między antenami – nadawczą i odbiorczą. W przypadku pierwszym odległość ta nie powinna być mniejsza od określonej wzorem (6), w drugim zaś przypadku odległość ta jest normowana. Pomiar niepożądanego emisji urządzeń przemysłowych są wykonywane w standardowo przyjmowanych, w zależności od potrzeb, odległościach 1, 3, 10 lub 30 m. Przy tak małych odległościach obiekt promieniujący (źródło pola EM) znajduje się w polu bliskim anteny pomiarowej, w związku z tym występuje stosunkowo silne sprzężenie EM, co powoduje, że antena pomiarowa charakteryzuje się nieco innymi właściwościami elektrycznymi niż w swobodnej przestrzeni. W związku z tym anteny pomiarowe tej grupy powinny być wzorcowane w takich samych odległościach od źródła promieniowania, w jakich będą wykorzystywane do pomiarów.

Zaleca się przeprowadzanie wzorcowania anten przy polaryzacji poziomej. Przy tej polaryzacji na dokładność pomiaru jest w znacznym stopniu ograniczony wpływ zarówno pionowego masztu, jak i pionowo prowadzonego przewodu w.c.z. zasilającego anteny. Ponadto współczynnik odbicia od powierzchni przewodzącej jest wyznaczany analitycznie z większą dokładnością.

Na stanowisku OPPOP wzorcowanie anten pomiarowych przeprowadza się, wykorzystując te same co poprzednio metody pomiarowe, w tym także metodę trzech dowolnych anten. Współczynniki antenowe wyznacza się z trzech pomiarów współczynników tłumienia między trzema parami anten A1, A2 i A3 z następujących wzorów:

$$WA_1(f) = 10 \lg f_M - 24,46 + \frac{1}{2} \left[ E_D^{\max}(f) + S_1(f) + S_2(f) - S_3(f) \right], \quad (21)$$

$$WA_2(f) = 10 \lg f_M - 24,46 + \frac{1}{2} \left[ E_D^{\max}(f) + S_1(f) + S_3(f) - S_2(f) \right], \quad (22)$$

$$WA_3(f) = 10 \lg f_M - 24,46 + \frac{1}{2} \left[ E_D^{\max}(f) + S_2(f) + S_3(f) - S_1(f) \right], \quad (23)$$

w których:

$f_M$  – częstotliwość [MHz];

$S_1(f)$  – tłumienie między parami anten [dB];

$E_D^{\max}$  – obliczone w miejscu anteny odbiorczej maksymalne natężenie pola od dipola półfalowego, zasilanego mocą 1 pW [ $\mu\text{V/m}$ ].

Wielkość  $E_D^{\max}$  jest opisana zależnością:

$$E_D^{\max}(f) = \frac{\sqrt{49,2} \sqrt{d_2^2 F^2(\Theta_1) + d_1^2 |\rho_h|^2 F^2(\Theta_2) + 2d_1 d_2 |\rho_h| F(\Theta_1) F(\Theta_2) \cos [\Phi_h - \beta(d_2 - d_1)]}}{d_1 d_2} \quad (24)$$

gdzie:

$$d_1 = \sqrt{R^2 + (h_1 - h_2)^2}, \quad d_2 = \sqrt{R^2 + (h_1 + h_2)^2}, \quad (25)$$

$$\rho_h = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma}}, \quad (26)$$

$\epsilon_r$  – względna stała dielektryczna gruntu,

$\sigma$  – konduktywność gruntu [S/m],

$\gamma$  – kąt nachylenia promienia względem gruntu [ $^\circ$ ],

$\lambda$  – długość fali [m],

$R$  – odległość między antenami [m],

$h_1, h_2$  – wysokości zawieszenia anten [m],

$\beta$  – stała propagacji fali,

$F(\Theta_1), F(\Theta_2)$  – wartości charakterystyki promieniowania anteny nadawczej na kierunkach  $\Theta_1, \Theta_2$ .

Jeśli wzorcowanie jest wykonywane nad gruntem o doskonałej przewodności, a takie właśnie właściwości gruntu założono, to  $|\rho_h| = 1$  i  $|\Phi_h| = 180^\circ$ . Wtedy wyrażenie (24) upraszcza się do postaci:

$$E_D^{\max}(f) = \frac{\sqrt{49,2} \sqrt{d_2^2 F^2(\Theta_1) + d_1^2 F^2(\Theta_2) - 2d_1 d_2 F(\Theta_1) F(\Theta_2) \cos [\beta(d_2 - d_1)]}}{d_1 d_2}. \quad (27)$$

Jeśli wszystkie trzy anteny są dipolami (np. dostrajanymi do częstotliwości pomiarów lub szerokopasmowymi) albo antenami, których charakterystyki pionowe są szerokie, to wyrażenie (27) upraszcza się do postaci:

$$E_D^{\max}(f) = \frac{\sqrt{49,2} \sqrt{d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1d_2 |\rho_h| \cos [\Phi_h - \beta (d_2 - d_1)]}}{d_1 d_2}. \quad (28)$$

Może się zdarzyć, że jedna z anten – nadawcza lub odbiorcza – charakteryzuje się dużą kierunkowością (wiązka główna charakterystyki pionowej jest stosunkowo wąska) lub obie anteny są wysoko zawieszane w stosunku do odległości między nimi, wtedy falę odbitą od gruntu można pominąć i wówczas:

$$E_D^{\max}(f) = \frac{\sqrt{49,2}}{d_1} = \frac{7,014}{d_1}. \quad (29)$$

Jeśli np. dwie z trzech przyjętych do pomiaru anten są jednakowe, to ich WA można wyznaczyć z jednego tylko pomiaru  $S_1(f)$  i obliczyć z zależności:

$$WA_1(f) = 10 \lg f_M - 24,46 + \frac{1}{2} [E_D^{\max}(f) + S_1(f)]. \quad (30)$$

## Przykład wzorcowania anten pomiarowych

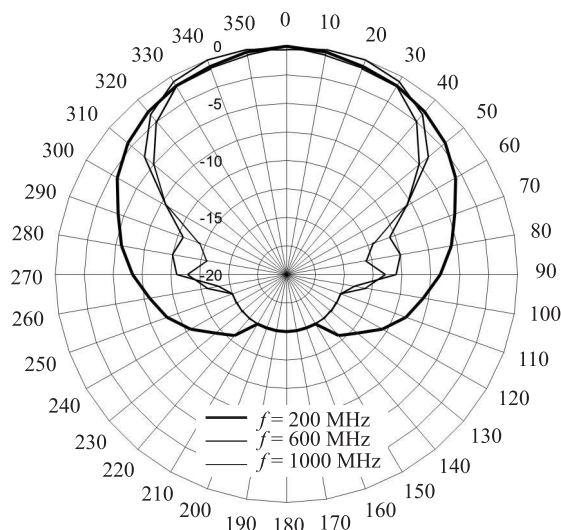
Warto przedstawić procedurę postępowania podczas wzorcowania szerokopasmowej anteny logarytmiczno-periodycznej w zakresie częstotliwości od 200 do 1000 MHz. Dysponowano dwiema antenami tego samego typu, dlatego metodę trzech anten zmodyfikowano do metody dwóch jednakowych anten. Aby jednak można było stwierdzić, że są one jednakowe pod względem parametrów elektrycznych, w pierwszej kolejności należało to sprawdzić.

### Porównanie właściwości elektrycznych anten na OPPOP

W celu porównania właściwości elektrycznych anten na OPPOP w miejsce pomocniczej anteny nadawczej A1 (rys. 1) umieszczono dowolną antenę, którą w omawianym przykładzie była również antena logarytmiczno-periodyczna o znacznie szerszym od badanych zakresie częstotliwości pracy (200 MHz – 5 GHz). Natomiast w miejsce odbiorczej anteny A2 wstawiano kolejno obie anteny logarytmiczne pierwszą oraz drugą i, korzystając z układu pomiarowego wyposażonego w analizator wektorowy, wykonano kolejno pomiar współczynników tłumienia  $S_{N1}$  i  $S_{N2}$ . Okazało się, że obie anteny, identyczne pod względem rozwiązania mechanicznego, są również jednakowe pod względem elektrycznym, co w praktyce nie zawsze się potwierdza. Wyniki pomiarów wykazały, że różnica tłumień dla obu anten w całym zakresie częstotliwości jest mniejsza od 0,3 dB.

### Pomiar charakterystyk pionowych anteny

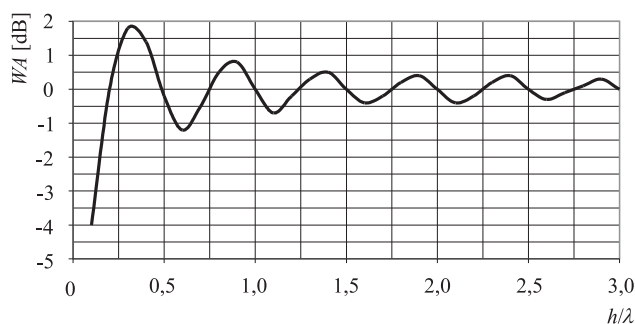
Drugim etapem w przyjętej procedurze wzorcowania, szczególnie w przypadku anten pomiarowych logarytmiczno-periodycznych, jest pomiar pionowych charakterystyk promieniowania. Znajomość charakterystyk jest niezbędna do analitycznego wyznaczenia wyrażenia  $E_D^{\max}$  wg wzoru (24). Od charakterystyk tych zależy wielkość fali odbitej wzdłuż promienia  $d_2$ . Nie można przyjąć jednej, uśrednionej charakterystyki, ponieważ zmienia się ich szerokość w funkcji częstotliwości. Dla potrzeb wzorcowania charakterystyki pionowe powinny być wyznaczone z krokiem częstotliwości nie mniejszym niż 100 MHz. Przykładowo, na rys. 5 przedstawiono charakterystyki pionowe dla trzech częstotliwości zakresu roboczego 200, 600 i 1000 MHz.



Rys. 5. Charakterystyka pionowa anteny logarymiczno-periodycznej dla  $f = 200, 600$  i  $1000$  MHz

### Dobór wysokości zawieszenia anten

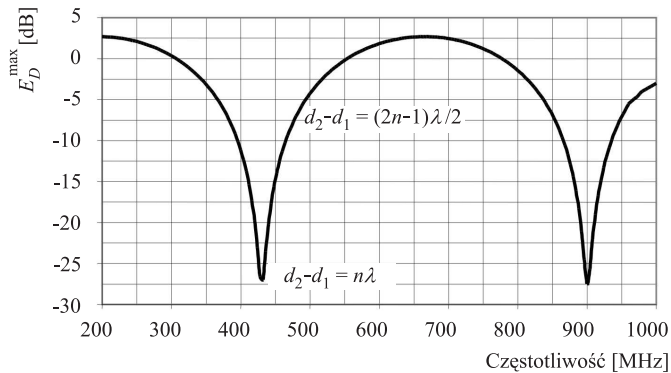
Powierzchnia ziemi lub inna powierzchnia dobrze przewodząca, nad którą jest wykonywane wzorcowanie anteny, może mieć wpływ na jej zespoloną impedancję wejściową, a tym samym i na wynik końcowy, czyli na współczynnik antenowy, zwłaszcza gdy antena ta jest nad tą powierzchnią stosunkowo nisko zainstalowana. Wpływ ten dla różnych typów anten nie jest jednakowy, zależy zarówno od właściwości kierunkowych badanej anteny, jak i od jej polaryzacji. Im promieniowanie anteny w kierunku gruntu jest większe, a więc im szersza jest pionowa charakterystyka promieniowania anteny, tym wpływ fali odbitej od gruntu na impedancję wejściową jest większy. Także większy jest wpływ powierzchni podłoża na impedancję anten spolaryzowanych poziomo niż spolaryzowanych pionowo. Dla przykładu na rys. 6 pokazano, jak zmienia się współczynnik antenowy spolaryzowanego poziomo dipola półfalowego dla częstotliwości 30 MHz w funkcji jego wysokości nad podłożem. Jak widać,



Rys. 6. Zmiana WA w funkcji wysokości zawieszenia dipola półfalowego dla 30 MHz

w przyjętym zakresie zmian wysokości anteny pomiarowej od 1 do 4 m (co odpowiada  $h/\lambda$  0,1 – 0,4) zmiany współczynnika antenowego dipola mogą dochodzić do 6 dB. Dla 100 MHz ( $\lambda = 3$  m) zmiany WA są nieco mniejsze i nie przekraczają 2,4 dB.

W prezentowanym przykładzie wzorcowania anten logarytmicznych przyjęto jednakowe wysokości ich zawieszenia równe 1,8 m, dla których zmiany WA nie powinny przekraczać  $\pm 0,5$  dB. Anteny ustawiono w jednej ze standardowo przyjmowanej odległości od siebie 10 m, w polaryzacji poziomej i skierowano głównymi wiązkami promieniowania na siebie. Dla przyjętej geometrii położenia w przestrzeni obu anten względem powierzchni odbijającej i względem siebie obliczono współczynnik  $E_D^{\max}$ , który ze względu na charakterystyki promieniowania i trzeci czynnik pod pierwiastkiem we wzorze (27), z którego tu korzystano, jest funkcją częstotliwości.



Rys. 7. Przebieg obliczonego współczynnika  $E_D^{\max}$

Wynik obliczeń przedstawiono na rys. 7. Widać na nim, że dla niektórych częstotliwości w miejscu anteny odbiorczej występują maksima natężenia pola, a dla innych – dość głębokie minima. Maksima powstają wtedy, kiedy oba sygnały – bezpośredni i odbity od podłoża – sumują się w fazie, co występuje, gdy różnica dróg jest równa połowie długości fali i spełnia zależność:

$$d_2 - d_1 = (2n - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (31)$$

natomiast minima powstają wtedy, kiedy różnica dróg jest równa całej długości fali:

$$d_2 - d_1 = n\lambda. \quad (32)$$

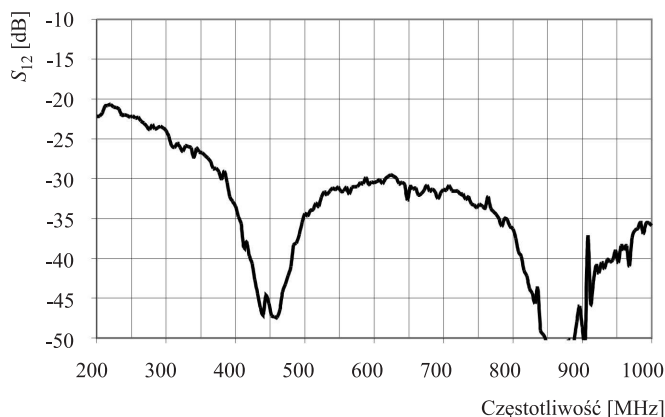
Następnie w układzie pomiarowym z analizatorem wektorowym zmierzono współczynnik tłumienia między wejściem jednej i wyjściem drugiej anteny  $S_{12}$ , którego przebieg w funkcji częstotliwości pokazano na rys. 8.

Korzystając z obu wyznaczonych współczynników  $E_D^{\max}$  i  $S_{12}$  oraz ze zmodyfikowanej dla tego przypadku zależności (21) do postaci:

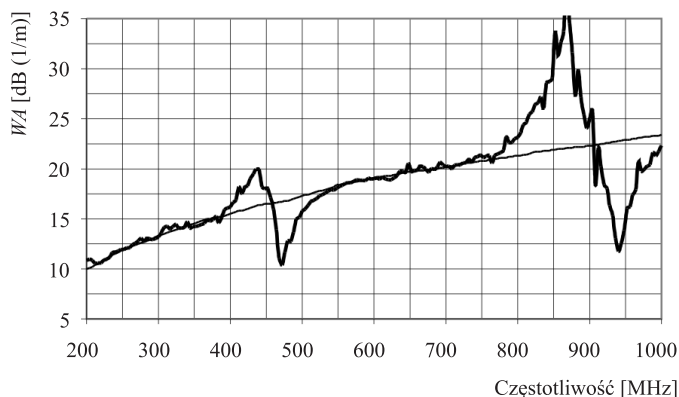
$$WA_{1,2}(f) = 10 \lg f_M - 24,46 + \frac{1}{2} \left[ E_D^{\max}(f) + S_{12}(f) \right], \quad (33)$$

obowiązującej dla dwóch jednakowych anten, wyznaczono współczynniki antenowe WA anten logarytmiczno-periodycznych, których zmienność w funkcji częstotliwości oznaczono na rys. 9 grubą linią.

Wyprzedzając nieco procedurę pomiarową, na rysunku tym wykreślono również linią cienką przebieg prawidłowo wyznaczonego współczynnika antenowego. Porównując ze sobą przebiegi przedstawione na rys. 7, 8 i 9, łatwo można zauważyć, że największe błędy w wyznaczeniu współczynników antenowych występują wtedy, kiedy w miejscu anteny wzorcowanej A2 powstaje minimum natężenia pola, spowodowane znoszeniem się pól sygnału bezpośredniego i odbitego. Wynika stąd oczywisty wniosek, że pomiary powinny być wykonywane w warunkach, kiedy antena wzorcowana A2 znajduje się zawsze w maksimum sygnału emitowanego przez antenę pomocniczą A1. Aby warunek taki mógł być spełniony, należałoby dla każdej częstotliwości pomiarowej zmieniać bądź wysokości zawieszenia obu anten, bądź wysokość tylko anteny wzorcowanej, pozostawiając stałe położenie



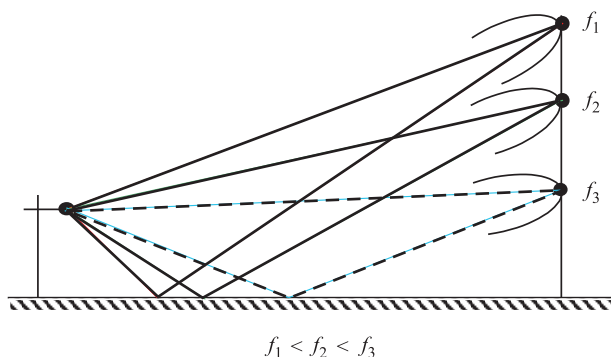
Rys. 8. Przebieg zmierzonego współczynnika tłumienia  $S_{12}$



Rys. 9. Przebieg wyznaczonego WA anteny logarytmiczno-periodycznej

anteny pomocniczej. Zmianę położenia wypadkowej wiązki, odpowiadającej sumie wektorowej obu sygnałów w funkcji częstotliwości, przy stałym położeniu anteny nadawczej pokazano na rys. 10.

Pomiary niepożądanego emisyjności urządzeń na OPPOP wykonuje się w warunkach, kiedy źródło promieniowania (badane urządzenie) jest umieszczone na jednej ze standardowo przyjmowanych



**Rys. 10.** Zmiana wysokości położenia maksimum interferencyjnego sygnału w funkcji częstotliwości

wysokości 1 lub 2 m nad podłożem. Dla tych wysokości źródła i dla kilku przykładowo przyjętych częstotliwości, wysokości zainstalowania anteny wzorcowanej A2 powinny być takie, jak podano w tabelicy 2. Jak wynika ze wzoru (24), wysokość występowania pierwszego maksimum w miejscu anteny wzorcowanej zależy od odległości między antenami, wysokości źródła promieniowania i częstotliwości pomiarowej, natomiast tylko w niewielkim stopniu od właściwości kierunkowych źródła A1. Wobec tego, dla tej samej geometrii ustawienia anten i tej samej częstotliwości maksima będą występować stale na tej samej wysokości. Ma to dość istotne znaczenie, ponieważ umożliwia wyeliminowanie błędów pomiaru spowodowanych wpływem powierzchni przewodzącej na impedancję wejściową anteny pomiarowej. Skoro w ustalonych warunkach pomiarowych każdej częstotliwości odpowiada konkretna wysokość anteny pomiarowej, to wpływ podłoża można uwzględnić we współczynniku antenowym podczas wzorcowania anteny, umieszczając ją na wynikającej z danej częstotliwości wysokości.

**Tabl. 2.** Wysokość umieszczenia anteny wzorcowanej dla pola 10 m

Wysokość umieszczenia źródła [m]	Wysokość umieszczenia anteny wzorcowanej [m] dla $f$ [MHz]				
	200	300	400	500	600
1	4,06	2,59	1,92	1,52	1,27
2	1,94	1,28	0,96	0,77	0,64

W związku z tym, że największą dokładność wzorcowania uzyskuje się wtedy, kiedy antena wzorcowana znajduje się zawsze w maksimum interferencyjnym, przy wyznaczaniu współczynników antenowych przyjmuje się nieco inną metodykę postępowania niż wcześniej opisano.



## Metodyka wzorcowania na OPPOP

Na otwartym poligonie pomiarowym ograniczonej przestrzeni procedura postępowania przy wzorcowaniu anten pomiarowych metodą trzech anten powinna być następująca:

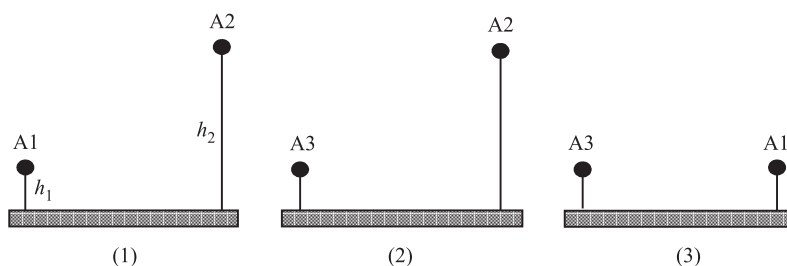
- 1) antenę A1 ustawić na wysokości 1 m (lub 2 m) nad gruntem (rys. 11) oraz zasilić z generatora o napięciu wyjściowym  $U_g$  i częstotliwości  $f_1$ ;
- 2) w odległości standardowej 10 m (lub 1 m, 3 m, 30 m) od niej ustawić antenę A2 i połączyć ją z mikrowoltomierzem;
- 3) zmieniając położenie anteny A2 wzdłuż masztu w zakresie wysokości od 1 do 4 m, znaleźć pierwsze maksimum i odczytać napięcie wyjściowe  $U_2$ ;
- 4) obliczyć współczynnik tłumienia  $S_{12}$  [dB], który wynosi:

$$S_{12} = 20 \lg \frac{U_g}{U_2} + T_k, \quad (34)$$

gdzie:

$T_k$  – łączne tłumienie przewodów zasilających obie anteny [dB];

- 5) w miejsce anteny nadawczej A1 wstawić antenę A3, ponownie zmierzyć napięcie wyjściowe  $U_2$  i obliczyć współczynnik tłumienia  $S_{32}$ ;
- 6) w miejsce anteny odbiorczej A2 wstawić antenę A1, ustawić ją na wysokości 1 m, zmierzyć napięcie wyjściowe  $U_1$  i obliczyć współczynnik tłumienia  $S_{31}$ .



Rys. 11. Dobór wysokości w metodzie wzorcowania trzech anten

Prawidłowo wzorcowaną anteną jest tylko antena oznaczona jako A2, natomiast pozostałe dwie anteny – pierwsza A1 i trzecia A3 – są antenami pomocniczymi. Współczynnik antenowy anteny A2 można wyznaczyć z zależności (22) o postaci:

$$WA_2(f) = 10 \lg f_M - 24,46 + \frac{1}{2} \left[ E_D^{\max}(f) + A_{31}(f) + A_{12}(f) - A_{32}(f) \right], \quad (35)$$

w której  $E_D^{\max}$  należy obliczyć z zależności (27) dla aktualnej częstotliwości pomiarowej, geometrii położenia anten i ich charakterystyk promieniowania.

Przedstawiony tok postępowania dotyczy wyznaczenia współczynnika antenowego tylko dla jednej częstotliwości – dla innych całą procedurę należy w całości powtarzać. W przypadku wzorcowania

anten dipolowych strojonych dochodzi jeszcze dodatkowa czynność, ręczny dobór ich długości tak, aby dla każdej częstotliwości pomiarowej była ona równa połowie długości fali. Jak widać, procedury wzorcowania anten są bardzo pracochłonne i czasochłonne.

**Tabl. 3. Dokładność wzorcowania anteny na OPPOP**

Czynniki wpływające na dokładność	Wartości
Dokładność pomiaru odległości $d_1$	$\pm 0,1$ dB
Dokładność pomiaru odległości $d_2$	$\pm 0,2$ dB
Dokładność pomiaru tłumienia propagacji	$\pm 0,3$ dB
Dokładność obliczenia współczynnika $E_D^{\max}$	$\pm 0,4$ dB
Dokładność ustawienia jednakowej wysokości anten Dokładność ustawienia zgodnej polaryzacji Dokładność ustawienia kierunków na siebie	Łącznie $\pm 0,3$ dB
Wpływ masztów Wpływ przewodów w.cz.	Łącznie $\pm 0,05$ dB
Dokładność odczytu częstotliwości	$\pm 0,05$ dB
Wpływ niedopasowania anten	$\pm 0,5$ dB
<b>Łączna dokładność wzorcowania</b>	<b><math>\pm 1,9</math> dB</b>

Dla przykładu, w tablicy 3 wymieniono czynniki wpływające na dokładność wzorcowania anteny na stanowisku OPPOP.

## Podsumowanie

W niniejszym artykule opisano dwa podstawowe stanowiska do wzorcowania anten pomiarowych w zakresie częstotliwości od 30 do 3500 MHz:

- otwarty poligon pomiarowy swobodnej przestrzeni (OPPSP), na którym są wzorcowane anteny przeznaczone do pomiarów natężenia pola w warunkach swobodnej przestrzeni – kontroli widma EM i pomiarów zasięgu stacji nadawczych;
- otwarty poligon pomiarowy ograniczonej przestrzeni (OPPOP), na którym są wzorcowane głównie anteny przeznaczone do pomiarów szkodliwej emisyjności urządzeń; mogą być również wzorcowane anteny wykorzystywane w pomiarach natężenia pola w swobodnej przestrzeni.

Stanowisko OPPSP umożliwia wyznaczenie współczynników antenowych anten pomiarowych w warunkach bardzo zbliżonych do warunków swobodnej przestrzeni, z silnie ograniczonym wpływem czynników zewnętrznych, dzięki temu uzyskuje się stosunkowo duże dokładności wzorcowania. Pomiar współczynnika tłumienia między antenami mogą być w tym przypadku wykonywane przy użyciu analizatora wektorowego, a więc szerokopasmowo, jednocześnie w całym zakresie pracy anteny z dowolnie założonym krokiem częstotliwości. Zasadniczą wadą tego stanowiska jest konieczność każdorazowego wchodzenia na dość wysokie maszty przy wymianie anten na inne.

Stanowisko OPPOP, którego podstawowym wyposażeniem jest powierzchnia doskonale przewodząca o stosunkowo dużych wymiarach, umożliwia wzorcowanie anten zarówno przeznaczonych do pomiarów natężenia pola EM w swobodnej przestrzeni – umieszcza się wtedy antenę badaną w polu dalekim źródła promieniowania – jak też i anteny do badania emisyjności – wtedy antenę badaną lokalizuje się w odległości normowanej 1, 3, 10 lub 30 m od anteny pomocniczej (nadawczej). Na stanowisku tym, ze względu na wpływ powierzchni przewodzącej na falę odbitą, a także na impedancję wejściową anten umieszczonych stosunkowo blisko tej powierzchni, uzyskuje się nieco mniejsze dokładności wzorcowania niż na stanowisku poprzednim. W tym przypadku, z uwagi na konieczność zmiany wysokości anteny badanej w funkcji częstotliwości, pomiary mogą być wykonywane wyłącznie dla dyskretnych częstotliwości.

W obu warunkach pomiarowych jest preferowane wzorcowanie metodą trzech anten (lub jej modyfikacjami), pracujących w tych samych zakresach częstotliwości, których współczynniki antenowe nie są znane.

## Bibliografia

- [1] Ajzenberg G. Z.: *Anteny krótkofalowe*. Warszawa, WNT, 1966
- [2] Alexander M. J.: *Calibration and use of EMC antennas*. National Physical Laboratory, 1997, no. 4
- [3] ANSI C63.5 – 1998: *American National Standard for Calibration of Antennas Used for Radiated Emission Measurements in Elektromagnetic Interference (EMI) Control*
- [4] Bem D. J., Więckowski T. W.: *Metody badań parametrów elektrycznych układów i urządzeń antenowych*. Raport 133.03.A, Wrocław, Politechnika Wrocławska, 1980
- [5] Bennett W. S.: *Properly applied antenna factors*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-28, no. 1, February 1986
- [6] Dąbrowski G., Klimkiewicz R., Szwad L.: *Zautomatyzowane stanowisko pomiarowe do badania parametrów anten*. Wrocław, Instytut Łączności O/Wrocław, 1998
- [7] Kałuski M., Klimkiewicz R.: *Opracowanie koncepcji i dokumentacji technicznej pomiarowego stanowiska antenowego dla celów badań homologacyjnych*. Wrocław, Instytut Łączności O/Wrocław, 1994
- [8] McConnell R. A.: *A method of determining free space antenna factor on an open area test site*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000
- [9] Monrad L. G., Scov K.: *Practical calibration of antennas for use at radiation measuring test site, 30 – 1000 MHz*. W: *Materiały z sympozjum 10th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, March 1993, s. 83–86
- [10] PN-CISPR 16-1:1997 + Zmiana A1: 2000: *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Wymagania dotyczące urządzeń i metod pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne – Urządzenia do pomiarów zaburzeń radioelektrycznych i odporności na zaburzenia radioelektryczne*
- [11] PN-T-84712-3: *Anteny telewizyjne III, IV i V zakresu częstotliwości oraz anteny radiofoniczne UKF/FM dla sieci stacji nadawczej dużej i małej mocy. Metody nadań*

- [12] Rencens J. J. H., Kromjong C. J.: *Calibration procedure on an EMC test-site*. W: Materiały z sympozjum *10th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, March 1993, s. 87–92
- [13] Smith A. A., German R. F.: *Calculation of site attenuation from antenna factor*. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-24, no. 3, August 1982

### **Piotr Tyrawa**



Mgr inż. Piotr Tyrawa (1940) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (1966); długoletni pracownik Instytutu Łączności we Wrocławiu (od 1966); autor licznych publikacji, kilku norm i 4 patentów; rzeczoznawca SEP w dziale elektroniki; zainteresowania naukowe: modelowanie cyfrowe anten, kompatybilność blisko siebie zlokalizowanych anten, wzorcowanie anten pomiarowych na otwartych poligonach pomiarowych i systemy antenowe do kontroli emisji radiowych w zakresie częstotliwości 100 kHz–3 GHz.  
e-mail: p.tyrawa@il.wroc.pl

### **Marek Kałuski**



Mgr inż. Marek Kałuski (1947) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (1970); długoletni pracownik Instytutu Łączności we Wrocławiu (od 1970); autor wielu prac konstrukcyjnych i publikacji, autor i współautor wielu patentów; zainteresowania naukowe: metrologia i modelowanie numeryczne źródeł pól EM, sterowanie pomiarowych systemów antenowych.  
e-mail: m.kaluski@il.wroc.pl