

Zestaw anten pomiarowych do badania emisyjności urządzeń w zakresie częstotliwości od 30 do 1000 MHz

Piotr Tyrawa

Marek Kałuski

Opisano metodykę projektowania i wzorcowania odbiorczych anten pomiarowych w zakresie częstotliwości od 30 do 1000 MHz, wykorzystywanych do badania niepożądanego emisyjności urządzeń, zgodnie z zaleceniami norm. Zaprezentowano zestaw anten opracowany i oferowany przez Instytut Łączności we Wrocławiu.

anteny pomiarowe, wzorcowanie, niepożądana emisyjność, otwarty poligon pomiarowy (OPP), kabina bezechowa, bikon, antena logarytmiczna, dipol

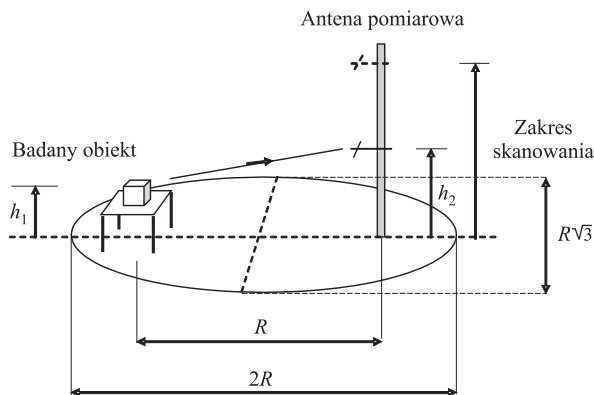
Wprowadzenie

Przestrzeń wokół nas jest środowiskiem, w którym rozchodzą się fale elektromagnetyczne (EM). Wprowadzenie energii w.c.z. do obszaru tej przestrzeni powoduje bądź zamierzone, a zatem przewidywalne skutki (np. nawiązanie łączności), bądź też skutki niezamierzone i nieprzewidywalne (np. zakłócanie tej łączności). Aby więc komunikacja drogą radiową na przydzielonych częstotliwościach mogła odbywać się bez zakłóceń, jest niezbędna umiejętność wykrywania i skutecznego eliminowania emisji nieprzewidywalnych, czyli zakłóceń. Sygnały zakłócające mają bardzo złożoną strukturę widmową, są losowe pod względem częstotliwości i kierunku polaryzacji wektora pola elektrycznego oraz natężenia pola.

Obecnie, przy dużej liczbie różnego rodzaju sprzętu elektrycznego i elektronicznego, spełnienie wymogów szeroko rozumianej kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) jest jednym z podstawowych warunków harmonijnego funkcjonowania społeczeństw i ich cywilizacyjnego rozwoju. Dlatego sprzęt ten musi być – przed wprowadzeniem na rynek lub okresowo – poddawany badaniom kontrolnym, przeprowadzanym przez odpowiednie służby do tego upoważnione. Służby te powinny dysponować laboratoriami wyposażonymi w specjalistyczną aparaturę pomiarową oraz standardowe stanowiska pomiarowe, a ponadto posługiwać się właściwą metodyką badawczą. Laboratorium i metodyka powinny spełniać wymagania zawarte w przedmiotowych – ogólnie stosowanych – normach, zatwierdzonych przez organizacje międzynarodowe. W Polsce korzysta się z norm międzynarodowych IEC/CISPR 16 [9] oraz IEC/CISPR 22 [6], a także z amerykańskiego dokumentu normalizacyjnego ANSI C63.5 [2].

W wymienionych dokumentach ustalono wymagania dotyczące stanowiska pomiarowego (głównie budowanego na otwartym terenie), wyposażenia tego stanowiska oraz technik pomiarowych. Teoretycznie, stanowisko takie powinno być umieszczone na otwartej przestrzeni, pozbawionej wtórnych źródeł promieniowania (linii i słupów energetycznych, budynków, drzew, krzewów itp.), na idealnie gładkiej, jednorodnej ziemi o parametrach niezależnych od warunków atmosferycznych. Ponieważ tych warunków w praktyce nie można spełnić, przyjmuje się dopuszczalne odstępstwa. Ogranicza się obszar wolny od przeszkód terenowych do powierzchni elipsy o wymiarach osi dużej $2R$ i małej $R\sqrt{3}$, gdzie R oznacza odległość pomiarową przyjmowaną standardowo jako 1, 3, 10 lub 30 m. Rzeczywistą powierzchnię ziemi zastępuje się fragmentem metalowej płaszczyzny o znormalizowanych wymiarach

i kształcie. Taka powierzchnia zachowuje praktycznie stałą przewodność, niezależnie od pory roku i pogody, dzięki czemu zapewnia powtarzalność wyników pomiarów. Typowe stanowisko pomiarowe do badania niepożądanego emisyjności przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Typowe stanowisko do badania emisyjności

Badany obiekt umieszcza się zwykle na standardowej wysokości h_1 nad powierzchnią przewodzącą, (na ogół 1 lub 2 m). Przy takiej wysokości powierzchnia metalowa o skończonych wymiarach może wpływać na rozkład pola EM w otoczeniu testowanego urządzenia. Pomija się jednak te wpływy, przypisując powtarzalności wyników pomiarów najwyższy priorytet, dzięki ujednoczeniu warunków pomiarów.

Jako anteny pomiarowe natężenia pola EM wyemitowanego przez badany obiekt mogą być wykorzystywane anteny dowolnego typu. Jednak ich poszczególne elementy składowe nie mogą zmieniać położenia względem siebie, a tym samym i swoich właściwości elektrycznych zarówno w trakcie wykonywania badań, jak i w okresie dłuższego ich wykorzystywania. Muszą to więc być anteny o solidniejszej konstrukcji mechanicznej niż anteny powszechnego użytku, bowiem są one przenoszone z miejsca na miejsce, każdorazowo montowane podczas uruchamiania stanowiska pomiarowego i demontowane po zakończeniu pomiarów. Anteny pomiarowe powinny być wygodne w obsłudze, a zatem względnie małe, o niezbyt przestrzennie rozbudowanej konstrukcji i lekkie – najlepiej wykonane ze stopów aluminium, a także umożliwiając ich składanie, np. na czas transportu.

Emisję niepożądaną urządzeń na ogół kontroluje się w dość szerokich zakresach częstotliwości. W związku z tym i anteny pomiarowe powinny charakteryzować się jak najszerszym pasmem pracy, aby nie trzeba było na stanowisku odbiorczym zbyt często ich wymieniać, zwłaszcza że w profesjonalnych laboratoriach badawczych całe procesy pomiarowe są sterowane komputerowo, wg zadanego algorytmu.

Pomiarowa antena odbiorcza musi być poddana procesowi wzorcowania w specjalistycznym laboratorium pomiarowym, czyli musi być przekalibrowana i mieć oznaczone współczynniki antenowe (WA). W zależności od przeznaczenia anteny pomiarowej, warunki, w jakich jest ona wzorcowana, muszą być ściśle określone. Na przykład, dwie anteny nie różniące się pod względem mechanicznym mogą służyć: jedna do pomiarów zasięgów stacji nadawczych, a druga do badania niepożądanego emisji w odległości 3 m od źródła. W takim przypadku błędem jest zastępowanie w pomiarach jednej anteny drugą.

Wyjście anteny musi być również ściśle określone. Jeśli antena pomiarowa jest zakończona odcinkiem przewodu integralnie związanym z anteną, przewód ten musi być uwzględniony podczas wzorcowania.

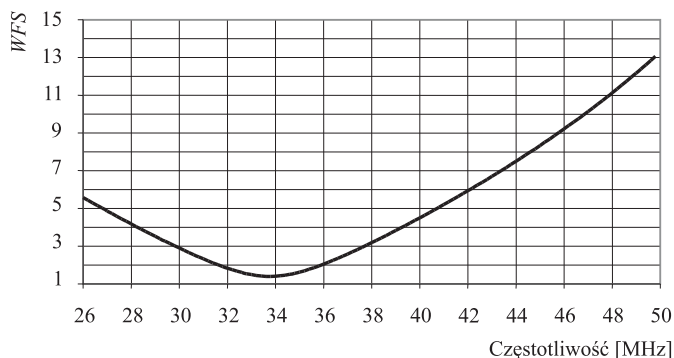
Te czynniki powodują, że jako anteny pomiarowe do badań niepożądanego emisyjności najczęściej są wykorzystywane:

- anteny symetryczne dwustożkowe dla niższych zakresów częstotliwości;
- niewielkie anteny logarytmiczno-periodyczne dla wyższych zakresów częstotliwości,
- zestawy dipoli półfalowych, dostrajanych do każdej częstotliwości pomiarowej.

Antena dwustożkowa

Wybór modelu elektrycznego

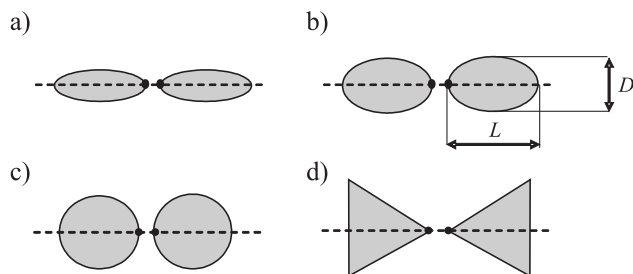
Zakresowi częstotliwości od 30 do 300 MHz w swobodnej przestrzeni odpowiada zakres długości fali od 10 do 1 m. W tym zakresie częstotliwości półfalowy konwencjonalny cienki dipol niestrojony musiałby mieć długość (fizyczną) ok. 5 m. Jednak taki stosunkowo cienki dipol, którego wymiary poprzeczne są małe w stosunku do jego długości i do długości fali, zachowuje stałą impedancję wejściową w bardzo wąskim pasmie i tylko w tym pasmie udaje się uzyskać jego dobre dopasowanie do impedancji obciążenia. Cienki dipol o stałej długości dopasowuje się tylko dla częstotliwości, dla której jego długość elektryczna jest zbliżona do połowy długości fali. Dla przykładu, na rys. 2 pokazano przebieg współczynnika fali stojącej (*WFS*) na wejściu dipola długości 4,3 m i średnicy 10 mm, w stosunku do impedancji falowej 75Ω .



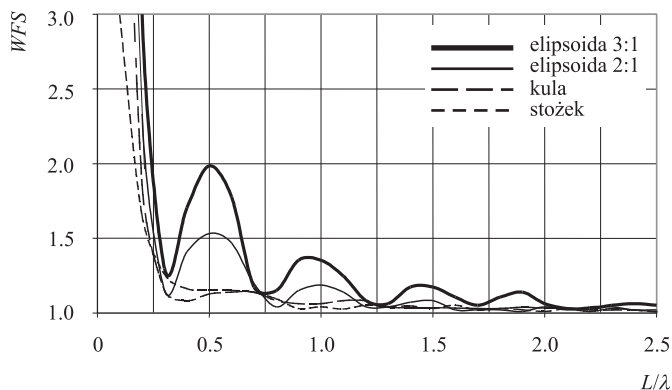
Rys. 2. Dopasowanie cienkiego dipola półfalowego

Znana jest zależność szerokości pasma częstotliwości, w którym prosty dipol symetryczny jest dopasowany do danego przewodu zasilającego, od jego kształtu i smukłości. Smukłością jest stosunek długości ramienia dipola L do jego średnicy D . Ramiona dipola mogą mieć kształt walca, kuli, stożka, elipsoidy obrotowej lub jeszcze innych figur geometrycznych. Na rys. 3 zaprezentowano kilka najczęściej wykorzystywanych ze względu na szerokopasmowość kształtów unipoli, dla których przeprowadzono obliczenia impedancji wejściowej dipola w funkcji częstotliwości, posługując się

odpowiednim, gotowym specjalistycznym programem komputerowym. Przebiegi zmian impedancji wejściowej (będącej wielkością zespoloną) w funkcji częstotliwości trudno jest porównywać i wybierać najkorzystniejsze. Łatwiej jest warunki dopasowania dipola ocenić za pomocą współczynnika fali stojącej (*WFS*). Na podstawie impedancji wejściowej dipoli o różnych kształtach (rys. 3) wyznaczono przebiegi *WFS* względem impedancji falowej przewodu zasilającego 50Ω i przedstawiono je w funkcji L/λ na rys. 4.



Rys. 3. Stosowane kształty dipoli szerokopasmowych: a) elipsoida 3:1; b) elipsoida 2:1; c) kula; d) stożek

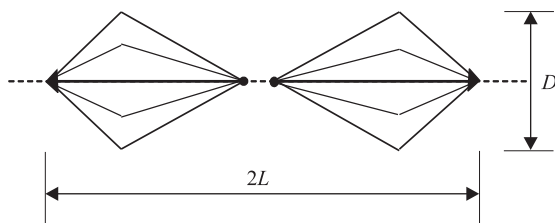


Rys. 4. Dopasowanie różnych kształtów unipoli anten

Jak widać, im smukłość dipola jest większa (większy L/D), tym – niezależnie od kształtów – dipol dopasowuje się lepiej i w szerszym zakresie częstotliwości. Najlepsze dopasowanie uzyskano w przypadku stożka o przyjętym kącie rozwarcia 80° . Jednak wykorzystanie do pomiarów dipola o takich kształtach, zwłaszcza dla niskich częstotliwości, byłoby dość kłopotliwe. Dlatego zmniejszono kąt rozwarcia stożków do 60° , a przy tym i ich smukłość do 1,24, a także zmieniono nieco kształt dipola. Założono, że każde z ramion dipola składa się z dwóch stożków o różnych kątach rozwarcia połączonych ze sobą podstawami w sposób pokazany na rys. 5, stąd nazwa anteny – dwustożkowa. Zewnętrzną powierzchnię przewodzącą stożków, przyjmowaną w obliczeniach jako ciągłą, zastąpiono pewną liczbą prętów metalowych równomiernie rozmieszczonych wzdłuż tworzących stożków. Konstrukcję przestrzenną ramion anteny wykonano z sześciu prętów aluminiowych, średnicy 6 mm,

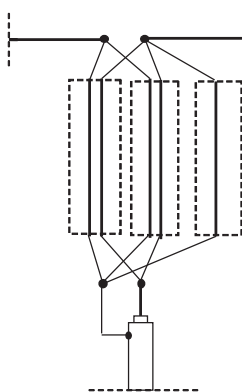
odpowiednio ukształtowanych i połączonych zarówno na wierzchołku, jak i w miejscu zasilania. Całkowita długość anteny wynosi 1290 mm, a maksymalna średnica stożków 520 mm.

Antena jest połączona ze współosiowym przewodem zasilającym przez szerokopasmowy transformator symetryzujący, którego zadaniem jest dopasowanie symetrycznej zespolonej impedancji wejściowej anteny dwustożkowej do niesymetrycznej impedancji falowej linii.



Rys. 5. Przyjęty kształt anteny dwustożkowej

Transformator jest zbudowany z dwóch jednakowych odcinków przewodu symetrycznego o impedancji falowej 100Ω , połączonych równolegle na wyjściu i na wejściu (rys. 6). Oba przewody symetryczne i dodatkowy przewód do odprowadzenia ładunków statycznych niskiej częstotliwości są nawinięte na toroidalnym rdzeniu ferrytowym dwuotworowym o przenikalności magnetycznej F82. Symetryzator ten spełnia tu jeszcze dodatkowo rolę filtra środkowoprzepustowego w zakresie częstotliwości od 30 do 300 MHz, z niewielkimi stratami przenosi składową symetryczną prądu, dość skutecznie zaś wytłumia jego składową asymetryczną.



Rys. 6. Układ elektryczny transformatora symetryzującego

Transformator symetryzujący jest umieszczony w metalowej zamkniętej puszcze na końcu aluminiowej rury nośnej średnicy 22 mm, służącej do mocowania anteny do wspornika. Puszka ma dwie odizolowane od niej końcówki, do których na czas pomiarów są przykręcane stożkowe unipole, a na czas transportu demontowane. Antena jest wyposażona w złącze współosiowe typu N (gniazdo), zamontowane na drugim końcu rury nośnej.

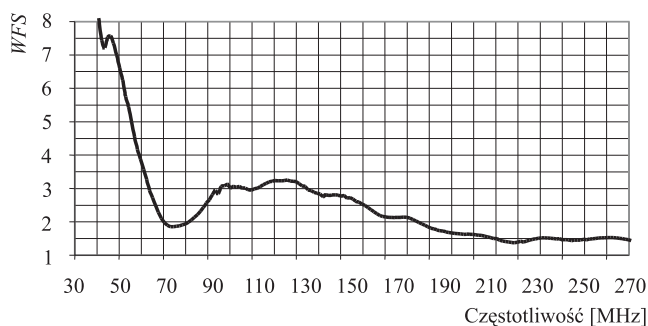
Pomiary i wzorcowanie

Najważniejszymi parametrami elektrycznymi anten pomiarowych są: dopasowanie na wejściu anteny, współczynniki antenowe (albo zysk energetyczny), a czasem także charakterystyki promieniowania (poziome i pionowe). Wartości tych parametrów zależą od częstotliwości, dlatego muszą być wyznaczone w całym zakresie częstotliwości pracy anteny z odpowiednim krokiem, który dla anten pomiarowych jest normowany. W omawianym zakresie częstotliwości przyjmuje się maksymalne kroki w podzakresach: do 50 MHz co 5 MHz, do 100 MHz co 10 MHz, do 200 MHz co 25 MHz i do 300 MHz co 50 MHz.

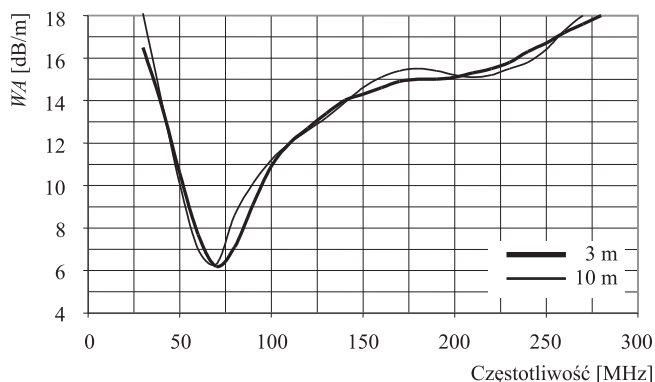
Pomiary parametrów anteny i wzorcowanie przeprowadzono w akredytowanym Laboratorium Pomiarowym EMC Instytutu Łączności we Wrocławiu.

Charakterystyki promieniowania anteny są zbliżone do teoretycznych charakterystyk prostego dipola symetrycznego, łatwych do obliczenia z dostępnych zależności analitycznych, nie było więc potrzeby ich pomiaru. Charakterystyka w płaszczyźnie wektora \mathbf{E} jest „ósemkowa”, a w płaszczyźnie wektora \mathbf{H} – dookólna.

Współczynnik fali stojącej został zmierzony na wejściu anteny w stosunku do impedancji falowej 50Ω . Wynik pomiaru podano na rys. 7.



Rys. 7. Współczynnik fali stojącej na wejściu anteny dwustożkowej



Rys. 8. Współczynniki antenowe dla odległości pomiarowych 3 m i 10 m

Wzorcowanie anteny, czyli pomiary współczynników antenowych (WA), przeprowadzono według amerykańskiego dokumentu normalizacyjnego ANSI C63.5 [9] preferowaną tam **metodą trzech dowolnych anten**, z których żadna nie była wcześniej wzorcowana. Współczynniki antenowe wyznaczono w zakresie częstotliwości od 30 do 280 MHz z krokiem co 10 MHz dla dwóch odległości pomiarowych 3 i 10 m. Przedstawiono je w postaci wykresów na rys. 8.

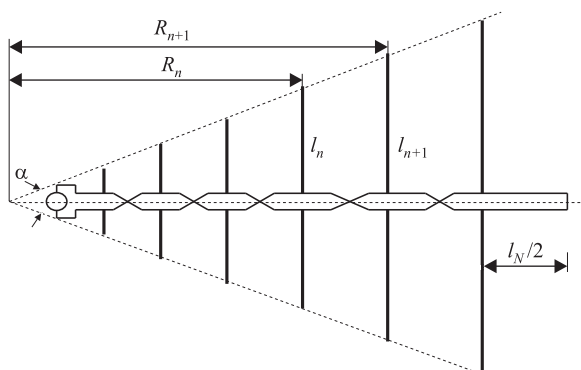
Antena logarytmiczno-periodyczna

Wybór modelu elektrycznego

Antena logarytmiczno-periodyczna składa się z pewnej określonej liczby symetrycznych i równoległych dipoli, odpowiednio od siebie oddalonych, połączonych wspólną symetryczną linią zbiorczą (rys. 9). Długości poszczególnych dipoli i ich odległości od umownego wierzchołka anteny zmieniają się w postępie geometrycznym, co oznacza, że dla każdego n jest spełniona następująca relacja:

$$\frac{l_n}{l_{n+1}} = \frac{R_n}{R_{n+1}} = \tau = \text{const}, \quad (1)$$

w której iloraz τ , zwany okresem struktury, jest dla danej anteny stały.



Rys. 9. Schemat elektryczny anteny logarytmicznej

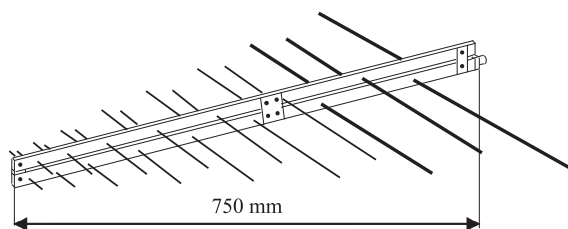
Długości najkrótszego i najdłuższego dipola zależą od początkowej oraz końcowej częstotliwości zakresu pracy anteny. Długość najkrótszego dipola jest zwykle mniejsza od $\lambda_{\min}/4$, najdłuższego zaś zbliżona do $\lambda_{\max}/2$, gdzie λ_{\min} i λ_{\max} są najkrótszą i najdłuższą długością fali, odpowiadającą największej oraz najmniejszej częstotliwości zakresu roboczego anteny. Kąt rozwarcia struktury anteny przy wierzchołku α , a jednocześnie i jej całkowita długość L zależą od przyjętego dla anteny zysku kierunkowego, a także od dopuszczalnego współczynnika fali stojącej na jej wejściu. Większy zysk i lepsze dopasowanie uzyskuje się, gdy antena jest dłuższa, a tym samym i kąt rozwarcia mniejszy. Jednak w antenach pomiarowych, ze względu na wspomniane ograniczenie wymiarów, długość anteny

jest dobrana kompromisowo. Dla anten logarytmiczno-periodycznych przyjmuje się na ogół zysk kierunkowy zbliżony do 7 dBi (względem anteny izotropowej), a *WFS* nie większy od 1,8. Dla założonych parametrów (podanych w pracy [4]) okres struktury τ powinien wynosić 0,87, a druga wielkość σ powinna być równa 0,16. Parametr σ określa odległość między dipolem n a dipolem $(n + 1)$, wyrażoną w długościach fali, i jest powiązany z τ oraz α następującą zależnością:

$$\sigma = \frac{1}{4}(1 - \tau)\text{ctg} \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Wyliczono, że kąt rozwarcia anteny przy wierzchołku powinien wynosić $\alpha = 52^\circ$, co przy najdłuższym dipolu $2l_N = \lambda_{\text{max}}/2 = 0,75$ m (dla 200 MHz), daje całkowitą długość anteny 0,77 m.

Uproszczoną nieco konstrukcję anteny logarytmiczno-periodycznej (widok przestrzenny) przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Antena logarytmiczno-periodyczna przeznaczona dla zakresu częstotliwości od 200 do 1000 MHz

Antena składa się z symetrycznej linii zbiorczej (wykonanej z profilu aluminiowego o wymiarach 10 mm x 13 mm), do której jest zamocowanych 30 unipoli – prętów aluminiowych różnej długości i różnych średnic. Wzajemne odległości unipoli od siebie oraz ich długości zostały tak dobrane, aby przy założonym zakresie częstotliwości pracy, przyjętym jej zysku energetycznym, a także dopuszczalnym *WFS* na wejściu, antena była jak najkrótsza. Na wejściu antena jest zaopatrzona w złącze współosiowe typu N (gniazdo).

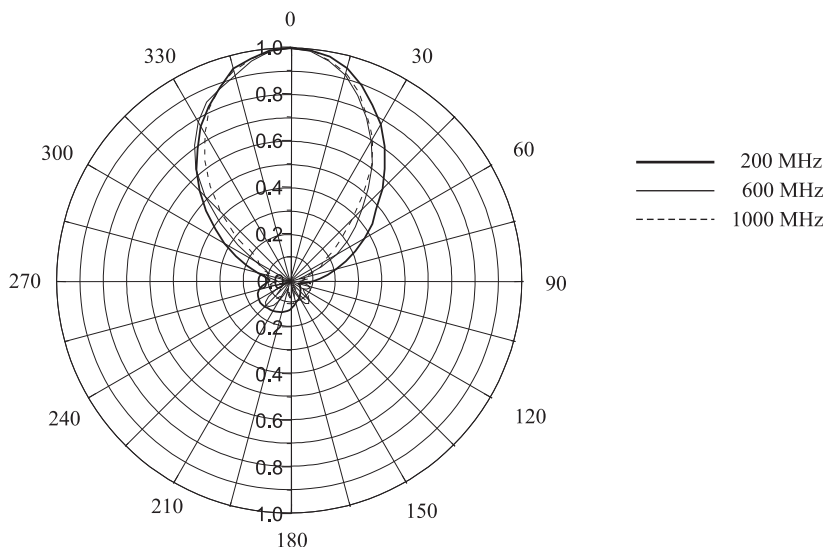
Antena jest głównie pomiarową anteną odbiorczą, ale może być w trakcie pomiarów wykorzystywana też jako pomocnicza antena nadawcza. Do zestawu jest dołączony specjalny uchwyt, służący do mocowania anteny na maszcie pomiarowym w dowolnej polaryzacji i na dowolnej wysokości.

Pomiary i wzorcowanie

W zakresie częstotliwości pracy anteny od 200 do 1000 MHz przyjmuje się, że dopuszczalny maksymalny krok, z jakim pomiary powinny być wykonywane, wynosi 100 MHz.

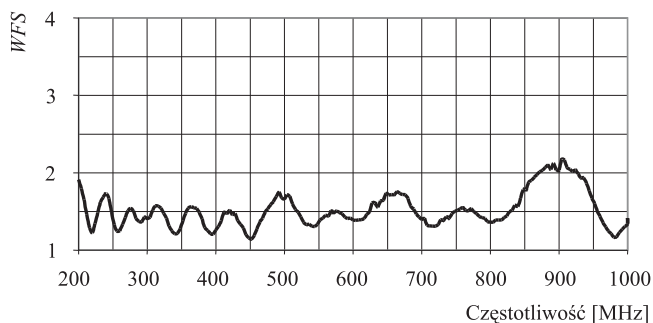
W przewidywanych zastosowaniach anteny do pomiarów poziomów niepożądanego emisyjności sprzętu elektrycznego i elektronicznego, m.in. na otwartych poligonach pomiarowych (OPP), jest niezbędna znajomość charakterystyk promieniowania. Wartości unormowanych charakterystyk są brane pod uwagę w ogólnej zależności analitycznej, opisującej natężenie pola EM w miejscu anteny pomiarowej z uwzględnieniem fali bezpośredniej i odbitej od powierzchni przewodzącej.

Charakterystyki te są funkcją częstotliwości. Wyznaczono je również z krokiem co 100 MHz. Przykładowe poziome charakterystyki promieniowania pokazano na rys. 11.

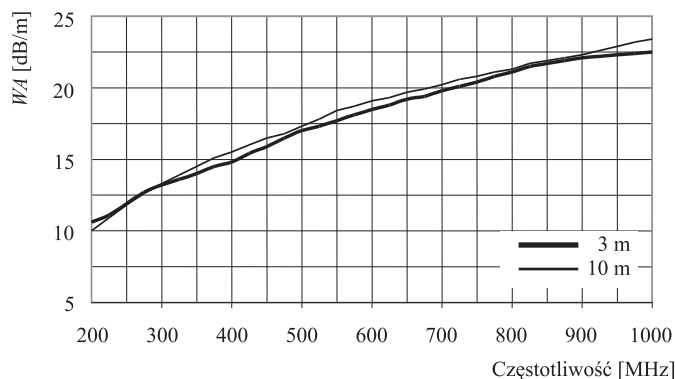


Rys. 11. Poziome charakterystyki anteny logarymiczno-periodycznej

Współczynnik fali stojącej zmierzono na wejściu anteny w stosunku do impedancji falowej 50 Ω . Wynik pomiaru podano na rys. 12.



Rys. 12. Współczynnik fali stojącej na wejściu anteny logarymiczno-periodycznej



Rys. 13. Współczynniki antenowe dla odległości pomiarowych 3 i 10 m

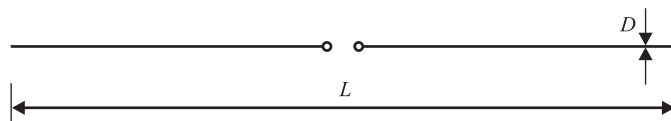
Współczynniki antenowe wyznaczono w zakresie częstotliwości od 200 do 1000 MHz z krokiem co 25 MHz, dla dwóch odległości od źródła promieniowania 3 i 10 m. Przedstawiono je w postaci wykresów na rys. 13.

Antena pomiarowa – dipol półfalowy dostrajany

Wybór modelu elektrycznego

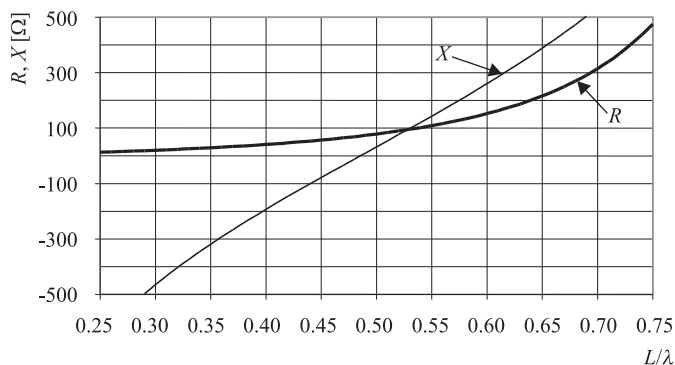
Anteny dipolowe półfalowe dostrajane do częstotliwości pomiarowej są wykorzystywane do selektywnych pomiarów emisji niepożądanych, a także do wzorcowania innych anten, służąc wtedy jako anteny odniesienia.

Impedancja wejściowa prostego dipola symetrycznego, cienkiego w stosunku do jego długości (rys. 14), zależy od częstotliwości i w pobliżu rezonansu zmienia się w sposób pokazany na rys. 15. Oczywiście, jeśli długość fizyczna dipola zmieni się, to jego rezonans wystąpi na innej częstotliwości, a oba przebiegi składowej rzeczywistej i urojonej przesuną się wzdłuż osi częstotliwości w lewo lub w prawo, w zależności od tego, czy jego długość zwiększy się, czy zmniejszy. Jak widać z rys. 15, przy fizycznej całkowitej długości dipola równej połowie długości fali ($L/\lambda = 0,5$), jego impedancja wejściowa nie jest rzeczywista, ma niewielką dodatnią składową urojoną (ok. 42Ω). Natomiast gdy ta składowa urojona jest równa zero ($X = 0$), występuje rezonans dipola dla częstotliwości niższej od częstotliwości półfalowej. Jeśli zwiększać średnicę dipola, to przy zachowaniu tej samej jego długości, jego częstotliwość rezonansowa będzie się obniżać. Należy zatem zastanowić się, czy w pomiarach



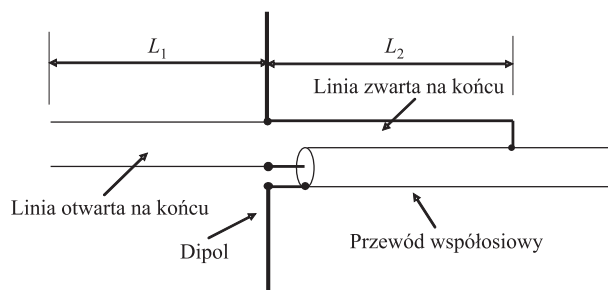
Rys. 14. Prosty dipol symetryczny

natężenia pola dipol strojony powinien być wykorzystywany dla częstotliwości półfalowej, czy dla częstotliwości rezonansowej? W praktyce nie można wykonać nieskończenie cienkiej anteny dipolowej strojonej. Dla tej samej częstotliwości dipol będący w rezonansie jest, w zależności od jego średnicy, bardziej lub mniej krótszy od dipola półfalowego, wobec tego siła elektromotoryczna na wyjściu dipola dla przypadku gdy jest on w rezonansie, jest mniejsza od wydzielonej w dipolu półfalowym o skompensowanej składowej urojonej. Mniejszy jest zysk anteny rezonansowej od zysku dipola półfalowego, dla którego wynosi on 2,14 dBi. Mimo tego jako anteny pomiarowe wykorzystuje się dipole dostrajane do rezonansu, a więc dipole nieco krótsze od półfalowych, ale dąży się, aby ich smukłości były jak największe ($L/D \gg 1$). Nieco niższy poziom napięcia na wyjściu dipola będącego w rezonansie nie ma większego praktycznego znaczenia, jest on bowiem uwzględniony we współczynniku antenowym podczas wzorcowania.



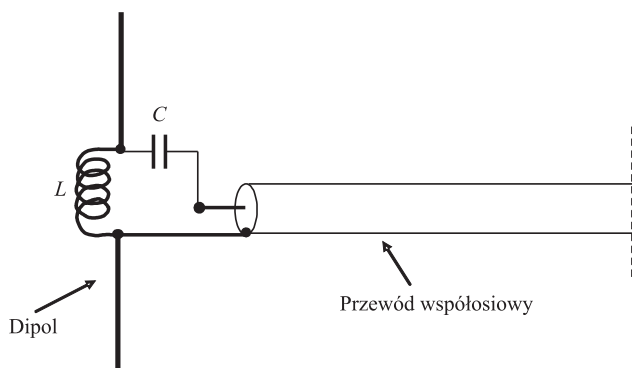
Rys. 15. Przebieg impedancji wejściowej dipola w funkcji L/λ

Założonemu zakresowi częstotliwości od 30 do 1000 MHz odpowiada w swobodnej przestrzeni fala długości od 10 do 0,3 m, a zatem długość dipola półfalowego powinna zmieniać się od 5 m dla najniższej częstotliwości do 15 cm dla częstotliwości najwyższej. Praktycznie nie ma możliwości wykonania dipola o długości zmiennej w tak szerokim zakresie, a także symetryzatora o tak szerokim pasmie pracy. Dlatego zaproponowano cztery różniące się nieco wersje anten dipolowych, każda na inny podzakres. Podzakresy ustalono tak, aby w każdym z nich stosunek częstotliwości najwyższej do najniższej był możliwie stały. W ten sposób utworzono następujące podzakresy: 30 – 72 MHz, 72 – 173 MHz, 173 – 410 MHz i 410 – 1000 MHz.



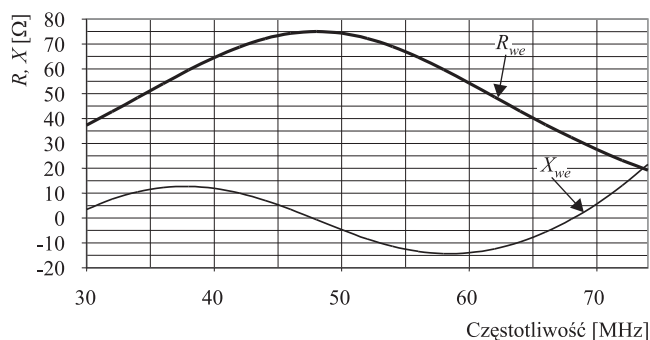
Rys. 16. Układ elektryczny transformatora symetryzującego

W celu dopasowania symetrycznej impedancji wejściowej anteny dipolowej do niesymetrycznej impedancji falowej linii współosiowej zasilającej antenę zastosowano transformator symetryzujący, którego układ elektryczny, jednakowy dla wszystkich czterech anten dipolowych, zaprezentowano na rys. 16. Transformator jest wykonany wyłącznie z elementów o stałych rozłożonych – odcinków linii współosiowych – zwartych i rozwartych na końcu. W zastępczym układzie elektrycznym na elementach skupionych LC można go przedstawić w sposób pokazany na rys. 17.

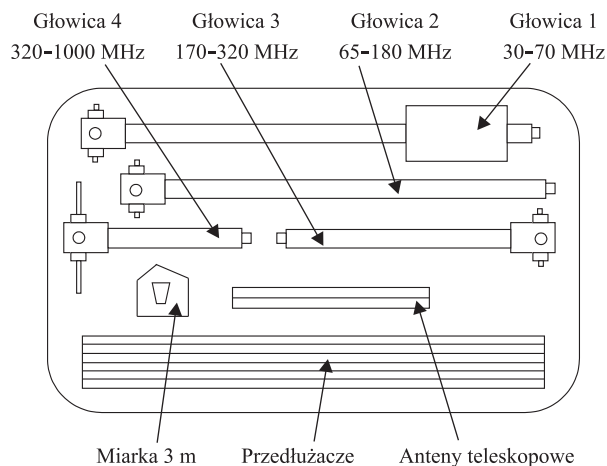


Rys. 17. Układ zastępczy transformatora z rys. 16

Długości obu przewodów – zwartego i rozwartego na końcu – dobrano tak, aby zmiany impedancji wejściowej dipola przy jego długości rezonansowej były jak najmniejsze. Ustalono, że w antenie dipolowej dla pierwszego podzakresu częstotliwości 30 – 72 MHz długość odcinka zwartego powinna wynosić 1047 mm, a rozwartego 1038 mm. Dla takich długości odcinków obu linii, przy założeniu stałej impedancji obciążenia 70Ω (rezystancja dipola w rezonansie), zilustrowano na rys. 18 impedancję wejściową transformatora symetryzującego (obliczoną z prostych zależności analitycznych). Jak widać, składowa urojona impedancji wejściowej jest skompensowana w trzech punktach (dla częstotliwości około 30, 50 i 70 MHz), a składowa rzeczywista oscyluje wokół wartości 50Ω . W pozostałych trzech antenach dipolowych przeznaczonych dla innych podzakresów częstotliwości zastosowano symetryzatory o podobnych rozwiązaniach elektrycznych.



Rys. 18. Przebieg impedancji wejściowej symetryzatora

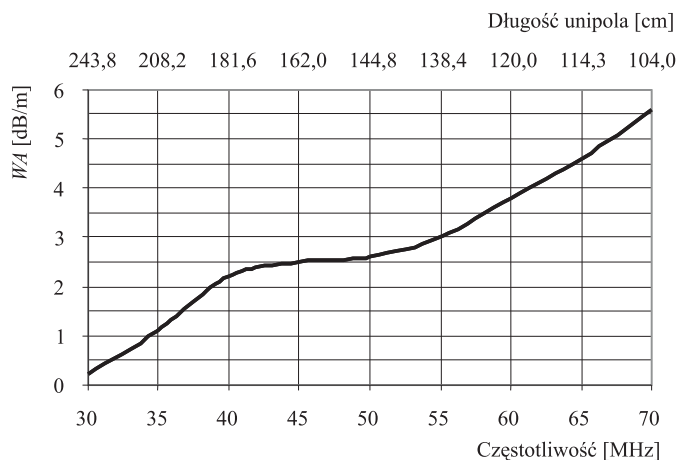


Rys. 19. Rozmieszczenie elementów zestawu antenowego w walizce

W skład kompletu antenowego wchodzi cztery głowice, z których każda składa się z transformatora symetryzującego i rury nośnej, sześciu przedłużaczy, dwóch anten teleskopowych, miarki długości 3 m i przewodu w.c.z. długości 10 m. Wszystkie elementy składowe anteny zostały rozmieszczone w specjalnej walizce (rys. 19).

Pomiary i wzorcowanie

W pierwszej kolejności musi być wyznaczona fizyczna długość dipola (i zapisana w odpowiedniej tabelcy), przy jakiej jest on w rezonansie dla założonej częstotliwości pomiarowej. Długościom tym podczas wzorcowania są przypisywane (w tej samej tabelcy) odpowiadające im współczynniki



Rys. 20. Przebieg współczynnika antenowego w funkcji częstotliwości dla pierwszej anteny

antenowe i zyski. Długości ramion anteny dipolowej dobiera się tak, aby przede wszystkim były jednakowe i odpowiadały minimalnej wartości współczynnika fali stojącej na wejściu dla danej częstotliwości pomiarowej. Długości ramion w trakcie pomiarów mierzy się od środka transformatora do wierzchołka dipola, specjalną miarką dołączoną do zestawu pomiarowego.

Współczynniki antenowe WA wyznaczono dla wszystkich czterech anten dipolowych w podzakresach częstotliwości ich pracy z odpowiednim krokiem. Dla pierwszej anteny w podzakresie 30 – 70 MHz z krokiem co 5 MHz, dla drugiej w podzakresie 65 – 180 MHz z krokiem co 5 MHz, dla trzeciej w podzakresie 170 – 320 MHz z krokiem co 10 MHz i czwartej w podzakresie 320 – 1000 MHz z krokiem co 20 MHz. Współczynniki te określono dla dwóch odległości od źródła promieniowania 3 i 10 m. Przebieg współczynnika antenowego w funkcji częstotliwości dla pierwszej anteny pokazano na rys. 20.

Podsumowanie

Opracowany w Instytucie Łączności zestaw anten pomiarowych jest przeznaczony do badania niepożądanego emisji urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Stanowi on wyposażenie standardowego poligonu pomiarowego lub kabin pomiarowych. W skład zestawu wchodzi: antena dwustożkowa, antena logarytmiczno-periodyczna i anteny dipolowe półfalowe. Anteny te charakteryzują się solidniejszą niż inne anteny konstrukcją mechaniczną, zapewniającą im stałość parametrów elektrycznych w warunkach częstych montażu i demontażu, a także w różnych warunkach ich transportu.

Antena staje się pomiarowa tylko wtedy, kiedy zostanie poddana procesowi wzorcowania, tzn. gdy zostanie przekalibrowana. Anteny pomiarowe o takiej samej konstrukcji mechanicznej mogą służyć do różnych pomiarów. Na przykład, anteny do kontroli widma EM i do pomiarów niepożądanego emisyjności odróżnia jedynie sposób wzorcowania, czyli mają one różne współczynniki antenowe, a zatem nie mogą być wykorzystywane zamiennie. Chyba że ta sama antena była wzorcowana zarówno dla jednych, jak i dla drugich warunków.

Anteny pomiarowe – dwustożkowa i logarytmiczna – charakteryzują się stosunkowo szerokim pasmem pracy, dzięki temu mogą być wykorzystywane w laboratoriach badawczych, przeprowadzających skomputeryzowane procesy pomiarowe.

Bibliografia

- [1] Alexander M. J.: *Calibration and use of EMC antennas*. National Physical Laboratory, 1997, no. 4
- [2] ANSI C63.5 – 1998: *American National Standard for Calibration of Antennas Used for Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control*
- [3] Balanis C. A.: *Antenna Theory Analysis and Design*. New York, Wiley, 1997
- [4] Bem D. J.: *Anteny i rozchodzenie się fal radiowych*. Warszawa, WNT, 1973
- [5] Bem D. J., Więckowski T. W.: *Metody badań parametrów elektrycznych układów i urządzeń antenowych*. Raport nr 133.03.A. Wrocław, Politechnika Wrocławska, 1980
- [6] CISPR 22 (2003-04): *Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement*
- [7] EMCO – The Electro-Mechanics Company: *Antennas and accessories for EMC testing*

- [8] 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*, 1993, s. 83–86
- [9] PN-CISPR 16-1:1997: 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
- [10] 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*, 1993, s. 87–92
- [11] Siczek S.: *Zagadnienie szerokopasmowości wibratorów antenowych*. Przegląd Zagadnień Łączności II, 1965
- [12] Smith A. A., German R. F.: *Calculation of site attenuation from antenna factor*. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 1982, vol. EMC-24, no. 3
- [13] Szelkunow S., Friis G.: *Antenny*. Moskwa, Sowietkoje Radio, 1955
- [14] Tyrawa P., Kałuski M.: *System pomiarowo-kontrolny emisji radiowych na zakres częstotliwości 100 kHz ÷ 3 GHz*. Prace Instytutu Łączności, 1995, nr 105, s. 107–151
- [15] Wolff E. A.: *Antenna Analysis*. New York, Wiley, 1966

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