

Metody kalibracji stanowisk pomiarowych do badania impulsowych pól EM

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodyki kalibracji stanowiska badawczego, będącego na wyposażeniu Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Kalibrację wykonano w określonych miejscach komory TEM oraz w wolnej przestrzeni na potrzeby cechowania przyrządów pomiarowych przeznaczonych do badań impulsowych pól EM dużej mocy w paśmie częstotliwości 100 MHz – 18 GHz.

Abstract: This article presents calibration methodology of a research workstation owned by the Faculty of Electronics at the Military University of Technology in Warsaw. Calibration was conducted in specific spots of the TEM chamber as well as in the free space, for purposes of characterization of measuring devices used for research of powerful EM fields in frequency band of 100MHz-18GHz. (**Calibration methods of measurement stations for testing pulsed EM fields**)

Słowa kluczowe: metody kalibracji, pole impulsowe, stanowisko laboratoryjne.

Keywords: calibration methods, pulse field, laboratory workstation.

Wstęp

Jedną z istotnych potrzeb metrologii w chwili obecnej jest monitorowanie pola elektromagnetycznego. Niebawem stanie się to koniecznością ze względu na szybko rosnącą liczbę i różnorodność urządzeń generujących pola elektromagnetyczne w różnych pasmach częstotliwości. Przyszłością jest stały monitoring smogu elektromagnetycznego podobny do monitoringu jakości powietrza oraz indywidualne dozometry natężenia pola dla personelu pracującego w polach o dużym natężeniu. Dużym wyzwaniem dla metrologii jest badanie niestacjonarnych pól impulsowych generowanych przez różnego rodzaju stacje radarowe. Projektowanie, konstruowanie i badania sprzętu pomiarowego do badania impulsowych pól EM szczególnie dużej mocy, wymaga specjalistycznych stanowisk laboratoryjnych umożliwiających wytworzenie pól wzorcowych w ściśle określonej przestrzeni komory bezodbiciowej. Niezbędne jest również opracowanie procedur do badań i kalibracji urządzeń pomiarowych dla impulsowych pól EM dużej mocy.

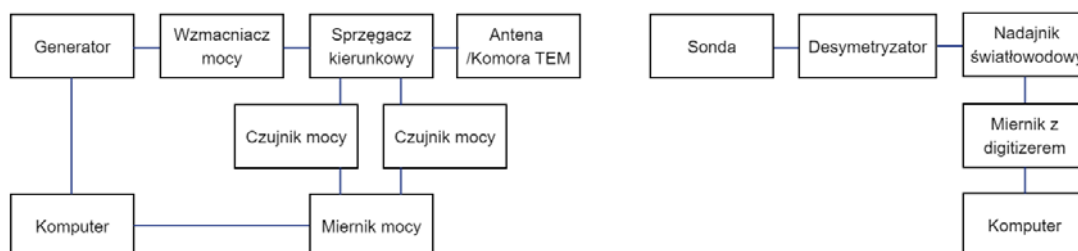
Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne ma zapewnić generację pola EM w kontrolowany sposób z możliwością weryfikacji metrologicznej jego parametrów.

Wymagania dla stanowiska laboratoryjnego:

- ✓ Środowisko pola EM – komory TEM i komora bezodbiciowa;
- ✓ Zakres częstotliwości generowanej fali EM – 100 MHz do 18 GHz;
- ✓ Rodzaj fali – ciągła CW, impulsowa;
- ✓ Parametry fali impulsowej:
 - czasy trwania impulsów 50 ns do 300 μ s, okres powtarzania impulsów do 10 ms;
- ✓ Moc nadawcza doprowadzona do promiennika – do kilkudziesięciu watów;
- ✓ Przewidywane, możliwe do uzyskania natężenie pola elektrycznego:
 - kilka do kilkuset woltów na metr [V/m] – komora TEM,
 - kilka do kilkudziesięciu woltów na metr [V/m] – komora bezodbiciowa;
- ✓ Ciągła kontrola metrologiczna mocy doprowadzonej do promiennika;
- ✓ Kontrola metrologiczna natężenia pola elektrycznego.

W strukturze stanowiska laboratoryjnego można wyróżnić tor nadawczy i tor pomiaru, rys. 1.



Rys. 1. Koncepcja stanowiska laboratoryjnego

W torze nadawczym generowany jest sygnał RF fali ciągłej lub z modulacją impulsową, odpowiednio wzmacniany i doprowadzony do elementu nadawczego emitującego falę elektromagnetyczną, dzięki czemu powstaje pole EM w przestrzeni pomiarowej. W torze nadawczym zapewniona jest metrologiczna kontrola mocy sygnału nadawanego. W torze pomiaru zapewniono kontrolę metrologiczną parametrów pola poprzez pomiar natężenia składowej elektrycznej.

Praktyczną realizację stanowiska laboratoryjnego do badania impulsowych pól EM, spełniającą przedstawione powyżej założenia techniczne przedstawiono na rys. 2.

Metodyka kalibracji stanowiska pomiarowego do badania impulsowych pól EM

W opracowaniu metodyki kalibracji wykorzystano miernik wzorcowy oraz metodę analityczną na podstawie znanych parametrów toru nadawczo-antenowego.

Przestrzenią pomiarową, podlegającą kalibracji będzie komora typu TEM oraz komora bezodbiciowa, rys. 3.



Rys. 2. Laboracyjne stanowisko do badania impulsowych pól EM



Rys. 3. Komora bezodbiciowa

Komora bezodbiciowa ma kształt graniastosłupa prawidłowego czworokątnego o wszystkich ścianach w kształcie kwadratów o wymiarach zewnętrznych 180 cm x 180 cm z jedną ścianą boczną odkrytą. Sufit i trzy ściany boczne pokryte są absorberem typu WAVASORB VHP-4 w postaci piramidalnych klinów o wysokości 10 cm. Ten typ absorbera ma współczynnik odbicia dla fali o częstotliwościach 1 GHz (-20dB), 3 GHz (-30 dB), 12 – 18 GHz (-45 dB). Betonowa podłoga komory nie jest pokryta absorberem. Komora jest i będzie wykorzystywana do kontroli pracy i wstępnej kalibracji urządzeń pomiarowych pól elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości od 1 GHz do 18 GHz. Elementem nadawczym jest antena tubowa Aaronia PowerLOG 70180 o parametrach:

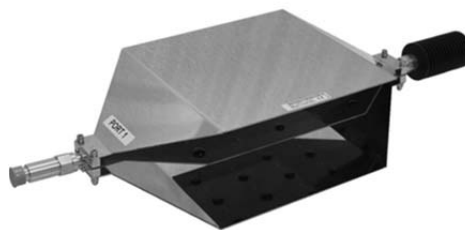
- Zakres częstotliwości roboczych 700 MHz – 18 GHz
- Zysk antenowy 2 dBi – 17 dBi

W komorze bezodbiciowej między anteną nadawczą a badaną anteną (sondą) odbiorczą dla osiągnięcia warunków zbliżonych do pola dalekiego trzeba zachować

odpowiednią odległość. Przy odległości kilku metrów między elementem badanym i nadawczym (anteną), przy typowych wzmacniaczach mikrofalowych, można uzyskać tylko niskie natężenia pola często na progu czułości mierzonego elementu.

Ze względu na powyższe problemy oraz na koszty stosuje się metody zastępcze takie jak komory TEM (Transverse-ElectroMagnetic Mode). Komory TEM są rodzajami symulatorów prowadzących falę pola elektromagnetycznego między dwoma przewodnikami. Zakres częstotliwości pracy wynosi zazwyczaj od DC do kilkuset MHz a nawet do 3 GHz. Zaletą komór TEM w stosunku do komór bezodbiciowych jest również możliwość uzyskania jednorodnego pola o dużo większym natężeniu przy tej samej mocy zasilającego generatora mikrofalowego i wzmacniacza.

Do kalibracji wykorzystano komorę TekBox TEM Cell TBTC2, rys. 4.

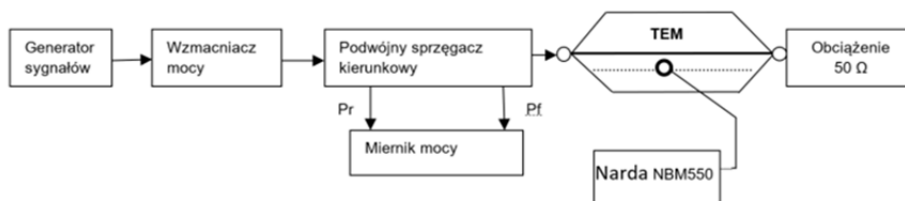


Rys. 4. TekBox TBTC2

Komora TekBox TEM Cell TBTC2" o wymiarach (636 x 300 x 205) mm, posiada obszar pod septum wielkości (310 x 195 x 100) mm. Komora półotwarta będzie wykorzystywana do generowania pola elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości 100 MHz – 1 GHz. Urządzenie umożliwia podanie mocy wejściowej RF do 25 W i dostarczane jest wraz z obciążeniem RF 50 Ω - 3 GHz - 25 W, które charakteryzuje się współczynnikiem fali stojącej VSWR ≤ 1.2. Straty odbiciowe wejścia komory prezentują się następująco: do 800 MHz < -15dB, do 1.5 GHz < -10dB. Natomiast straty transmisyjne: do 800 MHz < 1 dB, do 1.15 GHz < 3dB. Natężenie pola elektrycznego uzyskane w komorze, w zależności od mocy doprowadzonej do wejścia przedstawia tabela 1.

Tab.1. Natężenie pola w funkcji doprowadzonej mocy w komorze TBTC2

Doprowadzona moc	Natężenie pola
10W (40dBm)	224 V/m
1 W (30 dBm)	71 V/m
0.1 W (20 dBm)	22 V/m
0.01 W (10dBm)	7 V/m



Rys. 5. Schemat połączeń aparatury w trakcie kalibracji

Kalibracja komory TEM

Kalibrację przeprowadzono w układzie pomiarowym, który schematycznie przedstawiono na rys. 5. ($f_n \leq 1$ GHz).

W trakcie kalibracji zostały określone zależności między wartościami natężenia pola w komorze TEM TBTC2 a poziomem mocy na wyjściu generatora sygnałów

mikrofalowych. Jako miernik wzorcujący natężenie pola wykorzystano miernik NARDA NBM520 z sondą EF1891. Określono również natężenie pola analitycznie według zależności (1).

$$(1) \quad E_{wz} = \sqrt{\frac{Z_0 \cdot P_{f-r}}{h}} \left[\frac{V}{m} \right]$$

gdzie: Z_0 – impedancja komory TEM (typowo 50Ω), P_{f-r} – $P_f - P_r$, h – odległość między septum i dolną lub górną ścianą w metrach; P_f – moc padająca; P_r – moc odbita

Dla generatora sygnałów ROHDE SCHWARZ i wzmacniacza mocy KB00810M47A, które wykorzystano w torze nadawczym przeprowadzono kalibrację charakterystyki częstotliwościowej w zakresie 100 MHz – 1 GHz ze skokiem 100 MHz przy stałym natężeniu pola w komorze TEM 100 V/m (rys. 6).

Przy kalibracji charakterystyki amplitudowej dla częstotliwości 1 GHz określono zależność pomiędzy poziomem sygnału na wyjściu generatora a wielkością natężenia pola w komorze TEM.

wartością dla komory TEM przy rezystorze obciążenia 50 Ω, 25 W. W całym zakresie mierzonych amplitud sygnału wzmocnienie wzmacniacza mocy ma stałą wartość. Poziom sygnał wyjściowego z generatora, wymagany do uzyskania zadanej stałej wartości natężenia pola elektrycznego 100V/m, wskazuje na nieliniową charakterystykę wzmocnienia wzmacniacza mocy w zależności od częstotliwości, co jest zgodne z charakterystyką dostarczoną przez producenta. Należy pamiętać, że jest to charakterystyka wypadkowa całego toru nadawczego, która jest złożeniem charakterystyk

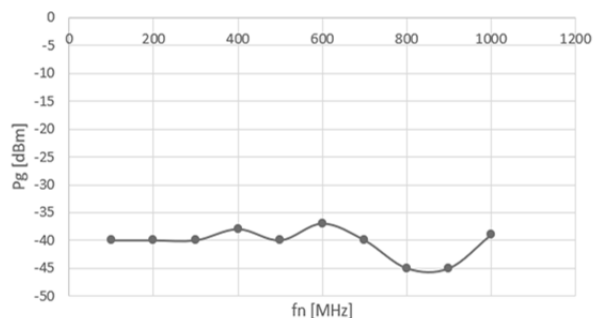
poszczególnych elementów łańcucha pomiarowego, nie tylko samego wzmacniacza.

Kalibracja komory bezodbiciowej

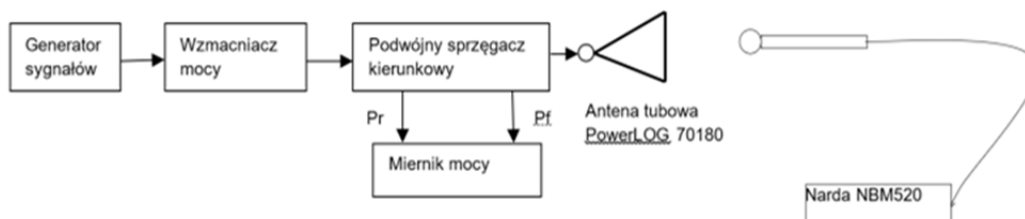
Dla wyższych częstotliwości, powyżej 1 GHz, do generacji wzorcowych pól EM wykorzystuje się komory bezodbiciowe i transmisję z anten tubowych.

Schemat połączeń aparatury w trakcie kalibracji w komorze bezodbiciowej został przedstawiony na rys.7.

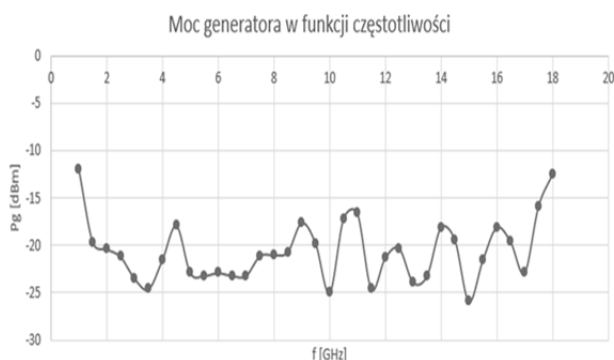
Zadaniem kalibracji metodą przejściowego wzorca jest określenie poziomu mocy P_{f-r} doprowadzonej do anteny zapewniającego stały poziom natężenia pola (np. 20 V/m) mierzonego miernikiem wzorcowym. Pomiaru wykonywane są w komorze bezodbiciowej w stałej odległości od anteny (np. 1.5 m) w zakresie częstotliwości 1 GHz do 18 GHz z dyskretnością 500 MHz.



Rys. 6. Moc generatora w funkcji częstotliwości przy stałym natężeniu pola w komorze TEM



Rys. 7. Kalibracja pola ($f_n > 1$ GHz) w komorze bezodbiciowej metodą przejściowego wzorca



Rys. 8. Kalibracja charakterystyki częstotliwościowej.

Dla niektórych częstotliwości fali nie był podany współczynnik korekty pomiaru miernika Narda. W takich przypadkach dokonywano interpolacji liniowej z wartości współczynników sąsiadujących częstotliwości. Antena nadawcza i sonda miernika znajdują się w jednej linii na tej samej wysokości (np. 1,35 m). Dokładność tego typu kalibracji będzie zależna przede wszystkim od dokładności

wzorca (w tym przypadku Narda NBM520 z sondą EF1891) oraz od stabilności parametrów toru generacji sygnałów.

Kalibrację wykonano w następującym zestawie przyrządów:

- ✓ Generator sygnałów ROHDE SCHWARZ typu SMB100A
- ✓ Wzmacniacze mikrofalowe mocy typu: KB1060M43A (1 GHz – 6 GHz), KB60180M44B (6 GHz – 18 GHz),
- ✓ Antena PowerLog 70180,
- ✓ Miernik Narda NBM520 z sondą EF1891,
- ✓ Miernik mocy 2438PB (CW/peak channel),
- ✓ Sprzęgacz kierunkowy podwójny RF-LAMBDA RFDDC5M18G20B.

Przykładowe rezultaty dla badania charakterystyki częstotliwościowej przedstawiono na rys. 8

Ponieważ miernik Narda jest kalibrowany dla sygnałów CW trzeba było znaleźć sposób na generację wzorcowych sygnałów impulsowych o tym samym natężeniu pola w impulsie jak sygnały CW. Zastosowano dwie metody, które dały identyczne wyniki. Pierwsza metoda polegała na wykorzystaniu zestawu złożonego z eksperymentalnej sondy wraz z układem detekcyjnym i wzmacniaczem dopasowującym. Amplitudę zdetekowanego sygnału CW i obwiedni impulsów (przy impulsowej modulacji sygnału w generatorze mikrofalowym) mierzono na oscyloskopie

RIGOL MSO8064. Jeżeli amplituda sygnału CW i sygnału impulsowego były jednakowe można było założyć jednakową wartość maksymalnego natężenia pola dla obydwu przypadków. W drugiej metodzie wykorzystano oscyloskop cyfrowy MS064B gdzie mierzono amplitudę sygnału CW lub amplitudę impulsów na wyjściu P_f sprzęgacza dwukierunkowego.

Podsumowanie

Skalibrowane stanowisko do generacji ciągłych i impulsowych pól EM umożliwiło przeprowadzanie szeregu unikalnych prac, takich, jak kalibracja izotropowych sond pomiarowych własnej konstrukcji, określenie charakterystyk izotropowości sond, badania, naprawy, wstępne cechowanie mierników do pomiarów impulsowych pól EM dużej mocy EMF-5. Dla powyższych mierników zaproponowano sondy pomiarowe własnej konstrukcji oraz przeprowadzono cechowanie mierników z nowymi sondami.

Bez narzędzi przedstawionych w artykule, wyposażonych w kalibrowane przestrzenie pomiarowe niemożliwe staje się wykonywanie wszelkich prac badawczych, pomiarowych, technicznych w obszarze impulsowych pól EM.

Niebagatelne znaczenia ma również szkolenie studentów, nie tylko teoretyczne, ale przede wszystkim praktyczne na nowoczesnym sprzęcie technicznym i pomiarowym.

Praca została dofinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 865.

Autorzy: dr hab. inż. Marek Kuchta Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marek.kuchta@wat.edu.pl; mgr inż. Benedykt Jakubowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Kaliskiego 2, 00-908, E-mail: jakben@kki.pl;

LITERATURA

- [1] Sprawozdania z realizacji zadania PSOB/16-062/2014/WAT/P w ramach projektu UGB 850, ISE WEL WAT, 2022.
- [2] IEC 61000-4-3, Ed.3.0, 2007.
- [3] IEC 61000-4-20, Ed.1.0, 2003.
- [4] J.P. Kärst, C. Groh, and H. Garbe, "Calculable Field Generation Using TEM Cells Applied to the Calibration of a Novel E-Field Probe", IEEE Transactions on EMC Vol. 44, No. 1, pp.59-71, 2002.
- [5] N. W. Kang, J. S. Kang, D. C. Kim, and J. H. Kim, "Fabrication of Small Reference Probe and Its Application", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.56, No.2, pp.435-438, 2007.
- [6] M. D. Judd, "Transient calibration of electric field sensors", IEE Proc-Sci. and Meas. Technol. Vol.146, No.3 pp.113-116, 1999.