

## WYKORZYSTANIE KOMORY GTEM W BADANIACH ODPORNOŚCI UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH NA ZABURZENIA PROMIENIOWANE

Beata PAŁCZYŃSKA<sup>1</sup>, Patryk ŁAWNICZAK<sup>2</sup>

1. Katedra Telekomunikacji Morskiej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni  
tel.: 58 5586552 e-mail: palbeata@am.gdynia.pl
2. Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, e-mail: pat.lawniczak@gmail.com

**Streszczenie:** Zaprezentowano metodykę pomiarów odporności na zaburzenia promieniowane układu elektronicznego z wykorzystaniem komory GTEM. Badania przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 80 MHz do 1 GHz na stanowisku pomiarowym wyposażonym w komorę GTEM -500, zintegrowany generator sygnałowy z wbudowanym wzmacniaczem mocy, sterowanym z poziomu specjalistycznego oprogramowania WIN6000. Opisano procedurę kalibracyjną, określającą obszar jednorodny komory GTEM. Przedstawiono wybrane wyniki testów odporności na zaburzenia promieniowane typowego multiwibratora astabilnego przeprowadzone zarówno w oparciu o zalecenia normalizacyjne jak i w szerszym zakresie, uwzględniającym wyższe niż normatywne poziomy natężenia pola elektrycznego.

**Słowa kluczowe:** kompatybilność elektromagnetyczna, odporność na zaburzenia promieniowane, komora GTEM.

### 1. WPROWADZENIE

Badania odporności układów elektronicznych na zaburzenia promieniowane o częstotliwości radiowej (RF) wykonuje się zgodnie z wymaganiami podanymi w normach kompatybilności elektromagnetycznej [1, 2]. Normy te określają metodę badań, opisują aparaturę badawczą wraz z konfiguracją stanowiska pomiarowego oraz podają sposób przeprowadzenia kalibracji wygenerowanego pola elektromagnetycznego. W warunkach laboratoryjnych symulacje pól elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości od 80 MHz do 1 GHz przeprowadza się m.in. w komorze GTEM (*ang. Gigahertz Transverse Electromagnetic*) [3]. Jest to metoda alternatywna do badań na otwartej przestrzeni wynikająca z rozwinięcia klasycznej komory TEM (*ang. Transverse Electromagnetic*) z pewnymi rozwiązaniami znanymi z komór bezdechowych (np. zastosowanie absorberów energii elektromagnetycznej). Komora GTEM jest całkowicie ekranowana, dzięki czemu nie jest podatna na wpływ zewnętrznego środowiska elektromagnetycznego ani nie promieniuje pola elektromagnetycznego na zewnątrz. Podczas testów odporności z wykorzystaniem komory GTEM w przestrzeni pomiarowej stanowiska badawczego powinno być wytworzone pole o określonym natężeniu, polaryzacji i równomierności. Proces kalibracji stanowiska pomiarowego poprzedzający testy odporności na zaburzenia promieniowane dotyczy przede wszystkim konfiguracji i pomiarów jednorodności pola wewnątrz komory GTEM [2]. W trakcie kalibracji komory GTEM określony zostaje jednoznacznie obszar pola jednorodnego, w którym

urządzenie badane jest poddawane równomiernie działaniu wygenerowanego pola elektromagnetycznego.

Istotnym problemem występującym przy pomiarach odporności na zaburzenia jest niejednoznaczność w ocenie zgodności z normami. Brak jest jasno ustalonej granicy, po przekroczeniu której sprzęt zostanie uznany za niespełniający wymogi stawiane przez normy. Czasami trudno jest ustalić moment, w jakim urządzenie przestaje pracować poprawnie. Dlatego ważne jest określenie obiektywnego kryterium poprawnej pracy badanego urządzenia [3].

W artykule przedstawiono metodykę badania odporności na promieniowane zaburzenia radioelektryczne typowego multiwibratora astabilnego zbudowanego w oparciu o tranzystory bipolarne [4]. Zaprezentowano wybrane wyniki procedury kalibracyjnej stanowiska pomiarowego

z komorą GTEM. Opisano sposób przeprowadzenia testów zarówno w oparciu o zalecenia normalizacyjne jak i w szerszym zakresie, uwzględniającym wyższe niż normatywne poziomy natężenia pola elektrycznego. W trakcie pomiarów na oscyloskopie obserwowano napięcie na kolektorze tranzystora sterującego pracą przerzutnika. Na podstawie zmian parametrów zarejestrowanego sygnału przeprowadzono ocenę wrażliwości badanego układu na generowane w komorze pole elektromagnetyczne.

### 2. POMIARY ODPORNOŚCI NA ZABURZENIA PROMIENIOWANE W KOMORZE GTEM

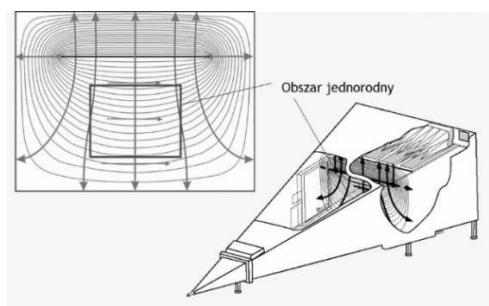
Komora GTEM jest współosiowym przewodnikiem rozchodzącym się w kształcie piramidy z punktu zasilającego, o impedancji  $Z = 50 \Omega$ . Impedancja ta jest zrealizowana i zamontowana na końcu linii jako kombinacja rezystorów (technologia PCB – wiele pojedynczych rezystorów scalonych ze sobą) i absorberów HF. Z powodu geometrii komory (piramida) tak dobrane układy rezystorów i absorberów wykazują odpowiednią skuteczność w ograniczonym zakresie częstotliwości. Powietrze w układzie współosiowego przewodnika jest dielektrykiem. Komora stanowi strukturę całkowicie zamkniętą z wewnętrznym septum pochłaniająco-promieniującym, z ciągłym wygładzaniem geometrii sygnałów tłumionych w hybrydowych absorberach, bez rezonansów wzdłużnych. Wartość natężenia pola podczas testów odporności na promieniowane pole RF jest proporcjonalne do

przyłożonego napięcia (mocy) i odległości pomiędzy anteną (septum) i ziemią układu.

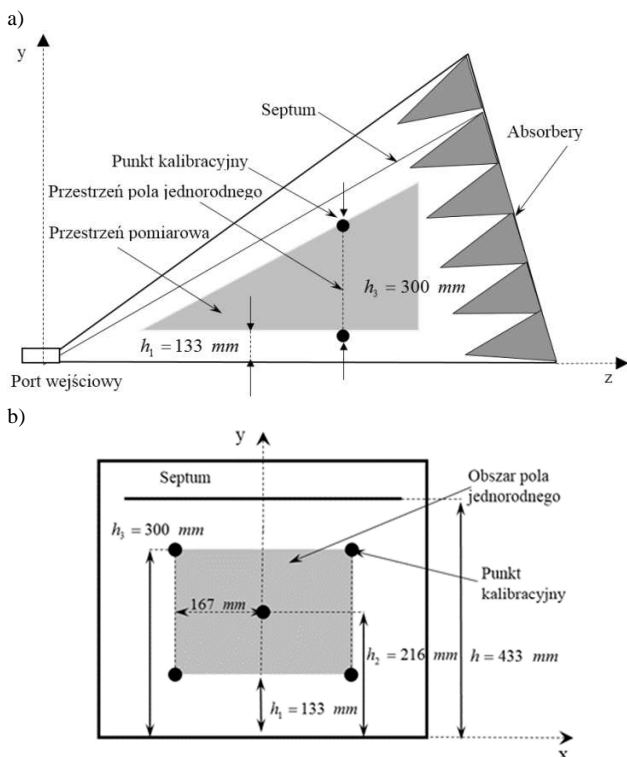
### 2.1. Pole elektromagnetyczne w komorze GTEM

W komorach GTEM określa się obszar pola jednorodnego (rys. 2), który zgodnie z norma PN EN 61000-4-20 jest "hipotetyczną płaszczyzną pionową (ortogonalną) do kierunku propagacji pola". W komorze GTEM jest reprezentowany przez płaszczyznę prostopadłą do podłogi komory. Obszar jednorodny powinien być skalibrowany dla zakresu częstotliwości, w który komora GTEM ma być używana, począwszy od 30 MHz i zwiększany z krokiem 1 % do co najmniej 1 GHz. Liczba punktów kalibracji zależy od wielkości obszaru jednorodnego (dla zastosowanej w badaniach komory Teseq GTEM-500 kalibrację przeprowadzono dla 5 punktów – rys. 3). Układ pomiarowy do konfiguracji i pomiarów jednorodności pola wewnątrz komory GTEM przedstawiono na rysunku 4.

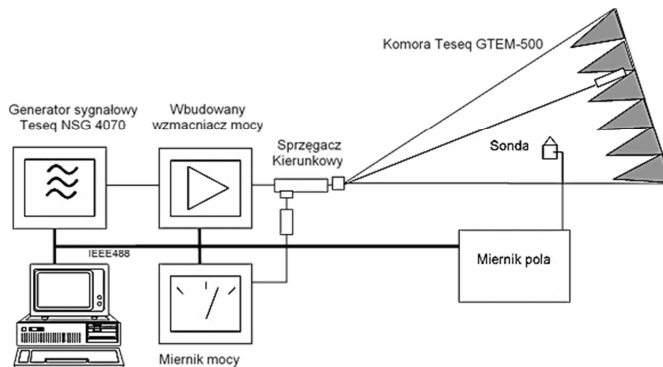
Do wyznaczenia obszaru jednorodnego zastosowano procedurę kalibracyjną znaną jako metoda „stałej mocy wyjściowej” [3], która polegała na umieszczeniu izotropowego czujnika natężenia pola kolejno w punktach kalibracji, a następnie z generatora sygnałowego na wejście komory GTEM podawano sygnał niemodulowany o mocy wyjściowej tak aby powstałe natężenie pola elektrycznego



Rys. 2. Określenie obszaru jednorodnego w komorze GTEM [5]



Rys. 3. Punkty konfiguracyjne w przestrzeni pomiarowej komory Teseq GTEM – 500 - widok boczny (a), przekrój poprzeczny (b)

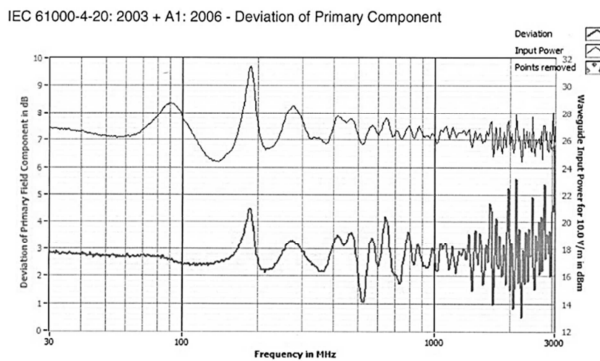


Rys. 4. Konfiguracja układu pomiarowego do określania jednorodności pola w komorze GTEM [3]

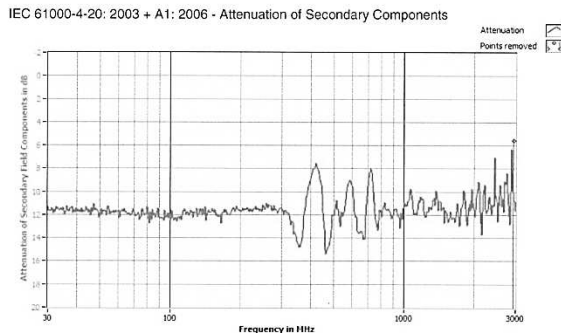
wyniosło 10 V/m, w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 3 GHz. Jednocześnie rejestrowano wszystkie moce wyjściowe, składniki natężenia pola podstawowego (wektor pola pionowy „y”) i wtórny (prostopadły do podstawowego) oraz wynikowe (pierwiastek z sumy kwadratów składowej podstawowej pola i dwóch składowych wtórnych) [3]. Dla obszaru jednorodnego powinno być spełnione następujące wymaganie, że wewnątrz obszaru jednorodnego zmiany składowej podstawowej pola oscylują w zakresie od 0 dB do + 6 dB w stosunku do pola wynikowego nominalnego, w co najmniej 75% punktach pomiarowych. Jednocześnie poziom składowych wtórnych pola nie może przekroczyć – 6 dB poziomu pola wynikowego w każdym z tych punktów. Wyniki przeprowadzonej procedury kalibracyjnej (rys. 5, 6) wskazują, że wymagania te zostały spełnione w pełnym zakresie częstotliwości, wyłączając punkt o częstotliwości 3 GHz, w którym dewiacja składowej podstawowej natężenia pola przekroczyła 6 dB i wyniosła 6,42 dB.

### 2.2. Stanowisko pomiarowe

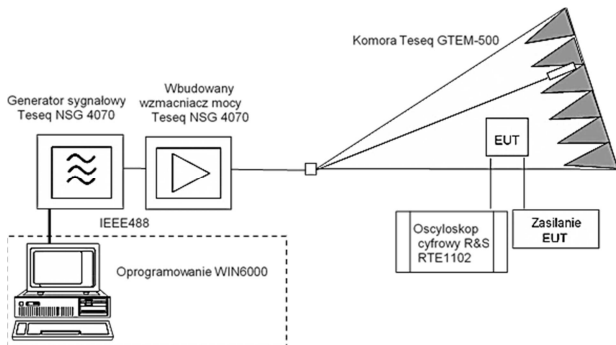
Zastosowana w pracy konfiguracja układu do pomiaru odporności na pole promieniowane z wykorzystaniem komory GTEM (rys. 7) zgodna jest z zaleceniami normalizacyjnymi [1, 2]. Do przeprowadzenia badań wykorzystano generator sygnałowy pracujący w paśmie częstotliwości od 80 MHz do 1 GHz, który generuje przebieg zmodulowany sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 1 kHz z głębokością modulacji wynoszącą 80%. Zintegrowany generator do testów odporności Teseq NSG 4070B-45 wyposażony jest we wbudowany moduł wzmacniacza mocy klasy A o mocy 45 W [6].



Rys. 5. Dewiacja składowej podstawowej natężenia pola elektrycznego oraz mocy wejściowej dla natężenia pola elektrycznego równego 10 V/m w funkcji częstotliwości – oprogramowanie WIN6000



Rys. 6. Zależność tłumienia składowych wtórnych natężenia pola elektrycznego od częstotliwości – oprogramowanie WIN6000



Rys. 7. Konfiguracja układu pomiarowego do badania odporności układów elektronicznych w komorze GTEM

Komora Teseq GTEM-500 o wymiarach 2,95 m x 1,48 m x 1,6 m pozwala testować urządzenia (EUT) o maksymalnych wymiarach 0,41 m x 0,41 m x 0,31 m.

Z tym, że wymiary EUT dla obszaru jednorodnego wynoszą odpowiednio 0,167 m x 0,167 m 0,167 m [5].

Komora została skalibrowana w zakresie częstotliwości 30 MHz - 3 GHz dla natężenia pola elektrycznego 10 V/m.

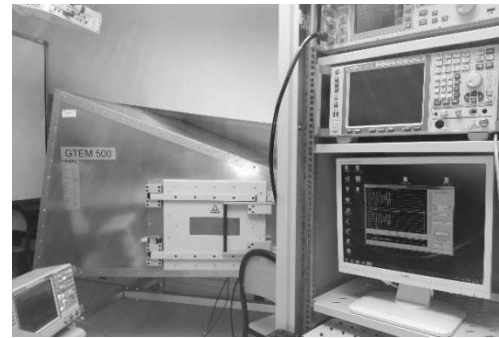
Badane urządzenie jest zasilane zewnętrznie z baterii lub alternatywnie z zasilacza NN DF1723003TC. Z płytki układu badanego został również wyprowadzony przewód sygnałowy podłączony do wejścia oscyloskopu Rohde&Schwarz RTE 1102.

Proces pomiaru jest kontrolowany z poziomu oprogramowania WIN6000, zainstalowanego na komputerze osobistym połączonym z generatorem sygnałowym poprzez interfejs IEEE488.

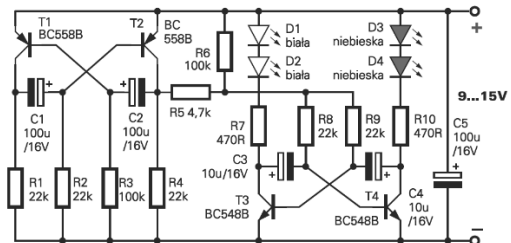
### 3. TESTY ODPORNOŚCI MULTIWIBRATORA ASTABILNEGO

Zaprezentowany w poprzednim rozdziale układ pomiarowy (rys. 8) wykorzystano do badań odporności na zaburzenia promieniowane typowego multiwibratora astabilnego zbudowanego w oparciu o tranzystory bipolarnie T3 i T4 (rys. 9.). Tranzystory te sterują pracą diod D1-D4. Układ zasilany jest z baterii 9V lub zasilacza. Poprawna praca układu objawia się migotaniem diod ze zmienną częstotliwością. Z kolektora tranzystora T3 wyprowadzono przewód sygnałowy, który podłączono do wejścia oscyloskopu.

Na podstawie obserwacji zmian kształtu sygnału sterującego przełączaniem diod dokonano oceny wrażliwości układu na pole promieniowane w komorze GTEM.



Rys. 8. Stanowisko badawcze do testów odporności układów elektronicznych w komorze GTEM [7]



Rys. 9. Schemat elektryczny układu AVT 720 [4] (układ wykonany przez dr inż. K. Detkę i mgr inż. J. Patrzyk z Katedry Elektroniki Morskiej AM w Gdyni)

#### 3.1. Przebieg pomiarów

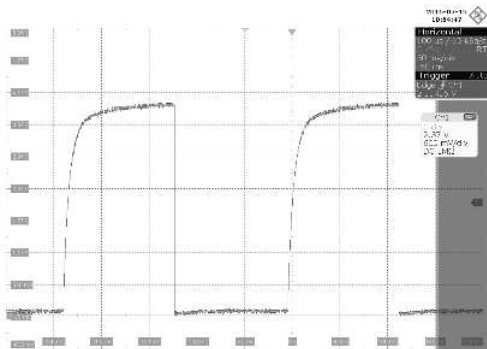
W pierwszym etapie badań pomiary przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 1 GHz z krokiem 1 %, sygnałem zmodulowanym amplitudowo z częstotliwością modulującą 1 kHz i głębokością modulacji 80 %. Pomiary powtórzono dla trzech różnych poziomów natężenie pola elektromagnetycznego odpowiednio 1 V/m, 3 V/m i 10 V/m. Położenie układu badanego w obszarze jednorodnym komory GTEM zmieniano dla 3 ortogonalnych kierunków „xyz” (rys. 3). W trakcie pomiarów obserwowano zmiany kształtu przebiegu napięcia sterującego na oscyloskopie w stosunku do kształtu przebiegów odniesienia, zarejestrowanych przy wyłączonym generatorze sygnałowym (rys. 10).

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów określono położenie „y” (pionowe) układu badanego w komorze GTEM jako najbardziej podatne na zaburzenia. Ponadto wyselekcjonowano zakres częstotliwości od 100 MHz do 300 MHz, w których kształt przebiegu napięcia sterującego najbardziej odbiega od przebiegu odniesienia. Dla tego zakresu częstotliwości powtórzono pomiary zwiększając liczbę punktów pomiarowych a następnie wybierając kilka punktów częstotliwościowych, w których zaobserwowano najbardziej intensywne zakłócenia przebiegu napięcia sterującego (rys. 11).

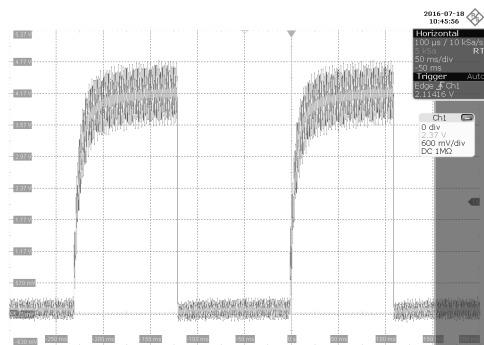
W drugim etapie badań przeprowadzono testy odporności podając wyższe niż normatywne poziomy natężenia pola elektrycznego od 15 V/m do 50 V/m z krokiem 5 V/m. Pomiary przeprowadzono dla wybranych wcześniej częstotliwości sygnału generatora, dla położenia „y” układu badanego w komorze GTEM (rys. 12).

#### 3.2. Wyniki testów odporności

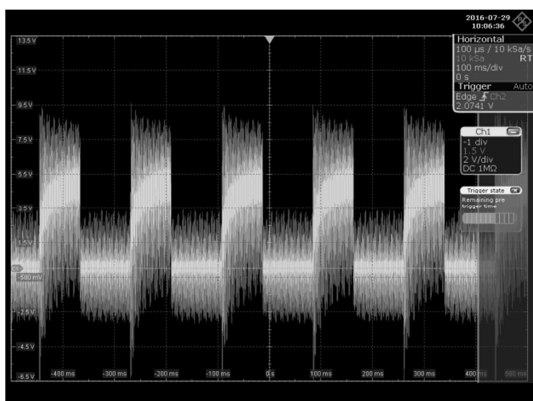
Przeprowadzone badania w oparciu o zalecenia normalizacyjne (etap I pomiarów) nie wykazały zakłóceń w poprawnej pracy układu. Obserwowane zmiany kształtu sygnału na kolektorze tranzystora T3 nie spowodowały zmiany częstotliwości sygnału sterującego migotaniem diod.



Rys. 10. Napięcie sterujące przetrutnikiem przy wyłączonym generatorze sygnałowym dla położenia „y” EUT [7]



Rys. 11. Napięcie sterujące przetrutnikiem przy natężeniu pola elektrycznego 10 V/m. Częstotliwość sygnału z generatora równa 146,7 MHz, dla położenia „y” EUT [7]



Rys. 12. Napięcie sterujące przetrutnikiem przy natężeniu pola elektrycznego 50 V/m. Częstotliwość sygnału z generatora równa 146,7 MHz, dla położenia „y” EUT [7]

Po zakończeniu testu przebieg napięcia odniesienia obserwowany na oscyloskopie był identyczny jak przed testem. Działanie pola elektromagnetycznego na układ nie miało istotnego wpływu na parametry pracy multiwibratora.

Wpływ zaburzeń promieniowanych uwidocznił się dopiero w trakcie badań niestandardowych, wówczas, gdy

znacznie zwiększono poziom natężenia pola elektrycznego. Niepoprawna praca układu objawiła się w postaci widocznej zmiany częstości migotania diod, wynikającej ze zmienionego kształtu a także wzrostu poziomu napięcia sterującego. Przeprowadzone badania przy maksymalnym, ze względu na ograniczenia sprzętowe, poziomie natężenia pola elektrycznego równym 50 V/m nie spowodowały trwałego uszkodzenia układu, który po ustaniu działania pola elektromagnetycznego wrócił do swojej normalnej pracy.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie komory GTEM do badania odporności układów elektronicznych na zaburzenia promieniowane zapewnia powtarzalne wyniki pomiaru przy spełnieniu warunku równomierności rozkładu natężenia pola elektrycznego w obszarze pomiarowym komory. W przypadku układów elektronicznych o rozmiarach nieprzekraczających dopuszczalnych wymiarów EUT dla obszaru jednorodnego komory GTEM 500 pomiary wykonuje się dla trzech ortogonalnych położenia EUT. Ze względu na łatwość procesu pomiarowego, wspomaganego specjalistycznym oprogramowaniem możliwe jest przeprowadzenie badań wrażliwości układu elektronicznego na zaburzenia promieniowane w szerokim zakresie, zarówno w oparciu o zalecenia normalizacyjne jak i uwzględniającym wyższe niż normatywne poziomy natężenia pola elektrycznego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 61000-4-3:2007, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-3: Metody badań i pomiarów -- Badanie odporności na promieniowane pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej.
2. PN-EN 61000-4-20:2011, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-20: Metody badań i pomiarów -- Badanie emisji i odporności w falowodach z poprzeczną falą elektromagnetyczną (TEM).
3. Nothofer A., Martin A., Bozec D., Marvin A., McCormack L.: The Use of GTEM Cells for EMC Measurements, National Physical Laboratory, UK, 2003.
4. <http://serwis.avt.pl/manuals/AVT720.pdf>.
5. Katalog Teseq; GTEM 500 - GTEM cell for emissions and immunity testing, 2012.
6. Katalog Teseq; NSG 4070B - test system for conducted and radiated immunity, 2016.
7. Ławniczak P., Pomiary odporności na zaburzenia radioelektryczne w zakresie częstotliwości powyżej 80 MHz – testowanie stanowiska pomiarowego zgodnego z normami EMC, Praca dyplomowa inżynierska (w przygotowaniu), Akademia Morska w Gdyni.

### USING GTEM CELL FOR RADIATED IMMUNITY TESTS ON ELECTRONIC SYSTEMS

The measurement techniques for radiated, radio frequency, electromagnetic field immunity tests are presented. The measurements were performed in frequency range from 80 MHz to 1 GHz using the measurement setup with the GTEM cell. The method for field calibration, indicating the uniform zone within the cell is described. The selected measurement results of the immunity test on typical electronic multivibrator were shown.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, radiated immunity, GTEM cell.