Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Laboratorium Kompatybilności Elektromagnetycznej (1), ORCID: 1. 0000-0003-0396-2451; 2. 0000-0003-0188-1308;

doi:10.15199/48.2021.10.18

Wpływ stosowania różnych torów wysokich częstotliwości na wartość wyniku pomiaru amplitudy generowanego impulsu HPM

Streszczenie. Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia z obszaru pomiaru parametrów impulsowego pola elektromagnetycznego. Jego celem było przeanalizowanie wpływu stosowania różnych torów wysokich częstotliwości na wartość pomiaru amplitudy impulsu HPM (High Power Microwave) generowanego na stanowisku pomiarowym do badania urządzeń informatycznych na oddziaływanie broni wiązkowej bazującej na impulsach HPM.

Abstract. The paper presents some issues concerning measurements of the pulsed electromagnetic field. Its purpose was to analyze the impact of the use of various high-frequency cable on the measurement of amplitude value the HPM pulse (High Power Microwave) generated at the laboratory stand for testing IT devices on the impact of beam weapons based on HPM pulses. (Different high frequency cable influence on the measurement amplitude value of the generated HPM impulse).

Stowa kluczowe: automatyka, elektronika i elektrotechnika; tory w. cz., impuls, HPM. **Keywords**: automatics, electronics and electrical engineering; RF paths, impulse, HPM.

Wstęp

W ostatnich latach obserwujemy zwiększone środowiskiem zainteresowanie elektromagnetycznym cechującym się występowaniem sygnałów o dużej mocy (HPEM - ang. High Power Electromagnetics Environment), szczególnie wytwarzaniem impulsowych pól а elektromagnetycznych dużej mocy i ich wpływem na elektronikę. Środowisko promieniowane HPEM, które jest z natury szkodliwe, może również występować przy częstotliwościach nawet do kilkudziesięciu MHz [1][3].

Impuls elektromagnetyczny wielkiej mocy określany jako HPM (ang. High Power Microwave) jest to impuls o bardzo krótkim czasie trwania (rzędu nanosekund) i o wielkiej mocy (rzędu kilkudziesięciu gigawatów). Po latach badań nad impulsami HPM, znalazły one zastosowanie w technologii wojskowej przy produkcji bomby elektromagnetycznej. Broń ta ma destruktywny wpływ na urządzenia elektroniczne, co w połączeniu z jej ogromnym zasięgiem (znacznie większym niż dotychczasowe bomby) oraz brakiem oddziaływania na istoty żywe, stanowi broń przyszłości. Impulsy o krótkim czasie trwania mogą być generowane na kilka sposobów, poprzez wyspecjalizowane generatory elektromagnetycznego. promieniowania Jednocześnie możliwa jest generacja pól o stosunkowo dużych natężeniach z wykorzystaniem systemów kompaktowych, które mogą mieścić się np. w walizce. Istotnym problemem z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej jest pomiar i analiza zarejestrowanych impulsów w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych. O ile w warunkach rzeczywistych nie mamy informacji jakich impulsów możemy się spodziewać to w warunkach laboratoryjnych można w bardzo dokładny sposób zarejestrować wygenerowany celowo impuls HPM. Bardzo pomiaru amplitudy istotna rolę na stanowisku do HPM dobór mierzonego impulsu ma elementów wchodzących w skład stanowiska pomiarowego tj. sonda pola oraz tory w. cz. łączące sondy pola elektrycznego z aparaturą pomiarową [2][3].

W niniejszym artykule przeanalizowano wpływ zmiany tłumienia (długości, rodzaju) toru w.cz. na wartość amplitudy mierzonego impulsu HPM generowanego na stanowisku pomiarowym do badania odporności komputerów przenośnych typu laptop na oddziaływanie broni wiązkowej bazującej na impulsach HPM. W tym celu w artykule opisano system pomiarowy do badania odporności komputerów przenośnych typu laptop na oddziaływanie broni wiązkowej bazującej na impulsach HPM oraz system pomiarowy do rejestracji natężenia impulsowego pola elektrycznego.

Opis systemu do generacji i pomiarów impulsów HPM

Stanowisko pomiarowe do generacji i rejestracji natężenia impulsowego pola elektromagnetycznego składa się z ze stanowiska do generacji impulsów HPM oraz stanowiska do rejestracji i pomiaru natężenia impulsowego pola elektromagnetycznego W poniższym rozdziale scalono ww. stanowiska pomiarowe i przedstawiono łącznie jako stanowisko do generacji i pomiaru natężenia impulsowego pola elektromagnetycznego.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska do generacji i pomiaru impulsu HPM

Na rys. 1 przedstawiony został schemat blokowy stanowiska do generacji i pomiaru impulsów HPM. Głównym elementem części wykorzystywanej do generacji impulsów HPM jest generator DS110F, który umieszczony komorze bezodbiciowej jest w dzięki czemu prawdopodobieństwo uszkodzenia innych urzadzeń elektronicznych znajdujących się w pobliżu jest bardzo małe. System DS110F to źródło RF dużej mocy opracowane przez Diehl BGT Defence, które przedstawiono na rys. 2. Kompaktowy, autonomiczny generator HPM DS110F wykorzystywany jest do przedstawienia efektów wpływu impulsów wysokich mocy na sprzęt elektroniczny w warunkach rzeczywistych. Jest to kompaktowe urządzenie zamknięte w obudowie wyglądem przypominające walizkę. Elementami składowymi tego generatora sa

wysokonapięciowe układy zasilania, generator Marx'a 300kV oraz antena rezonansowa [7]. Moc sygnału i kształt impulsu generowanego przez system DS110F jest tak skonstruowana by niszczyć urządzenia elektroniczne. Bezpieczna odległość dla układów elektronicznych wynosi około 50 m (~3σ), z kolei bezpieczna odległość od systemu dla człowieka, z uwagi na wysokie napięcia układu i generowanie iskry to 5 m [4][5].



Rys. 2. Generator Diehl HPEM Case System DS110

System pomiarowy do rejestracji nateżenia impulsowego pola elektromagnetycznego łączy funkcje oscyloskopu AFI Tektronix Digital Phosphor z zasilaczem UPS i dodatkowym akumulatorem umieszczonymi w ekranowanej obudowie. W wyniku takiego połączenia system pomiarowy może być obsługiwany np. w pustym otoczeniu bez zasilania, i może być obsługiwany z zamkniętymi pokrywami ochronnymi podczas gdy w bliskiej odległości występuje impulsowe promieniowanie elektromagnetyczne HPM [6].

Głównymi elementami strony odbiorczej stanowiska do pomiaru impulsów HPM jest sonda D-dot, układ dopasowania Balun, zestaw tłumików i torów w. cz., które przeznaczone są do pomiaru impulsowego pola elektromagnetycznego [9]. W ekranowanej obudowie przechowywany jest laptop umożliwiający obliczenia wartości mierzonych pól elektromagnetycznych oraz zawierający oprogramowanie pozwalające na wykonywanie procesów pomiarowych i analizy otrzymanych danych. Sonda pomiarowa D-dot jest detektorem indukcii elektrycznej, pełni ona rolę anteny zmieniającej impuls elektromagnetyczny w sygnał elektryczny. Jest to element pasywny, a sygnał wyjściowy jest pochodną zmiany pola elektrycznego po czasie. Oscyloskop odbiera sygnał z sondy pomiarowej i za pomocą interfejsu LAN przekazuje próbki do komputera pomiarowego, gdzie za pomocą dedykowanego oprogramowania sygnał jest całkowany dzięki czemu otrzymujemy postać czasową sygnału faktycznie wygenerowanego z generatora [8].

Opis torów w. cz. wykorzystywanych w stanowisku do rejestracji i pomiarów impulsów HPM

Kabel koncentryczny został wynaleziony przez Olivera Heaviside'ego, angielskiego matematyka, fizyka i elektronika, który projekt ten opatentował w 1880 roku i zastosował go w liniach transmisyjnych. Jego podstawową budowę przedstawiono na

rys. 3.





Przewód wewnętrzny kabla koncentrycznego wykonany jest przeważnie z miedzi, jako jednodrutowy lub wielodrutowy w postaci linki. Oliver Heaviside odkrył również zjawisko naskórkowego przepływu prądu wysokiej częstotliwości w przewodniku, co zostało wykorzystane do wykonywania przewodów wewnętrznych bimetalowych np.: stalowo-miedzianych, czy aluminiowo-miedzianych. Przewód wewnętrzny pokryty jest izolacją dielektryczną. Przeważnie jest to polietylen jednolity, albo polietylen spieniony fizycznie lub chemicznie. Przewód wewnętrzny może też być odizolowany od przewodu zewnętrznego wspornikami dielektrycznymi, pomiędzy którymi znajduje się powietrze.

Przewód zewnętrzny wykonany jest w postaci cylindrycznego oplotu z drutów miedzianych lub w postaci rurki z taśmy poliestrowej pokrytej jednostronnie lub dwustronnie aluminium i oplotu z drutów miedzianych ocynowanych. W niektórych przypadkach przewód zewnętrzny wykonany jest w wielokrotnym oplocie drutów miedzianych. Dzięki takiej budowie kable o torach współosiowych są bardziej odporne na zakłócenia zewnętrzne niż kable symetryczne. Oplotowa konstrukcja przewodu zewnętrznego zapewnia elastyczność kabla koncentrycznego i dopuszcza jego zginanie w określonych granicach.

Budowa kabla koncentrycznego przypomina kondensator. Przewód wewnętrzny i przewód zewnętrzny to okładki kondensatora a pomiędzy nimi znajduje się dielektryk. Charakterystyczna wielkość dielektryka nazywa się względną przenikalnością dielektryczną εr. Dielektryki, w zależności od wewnętrznej budowy mają przenikalność dielektryczną w zakresie liczbowym od kilku do kilkudziesięciu [εr – jest jednostką niemianowaną]. Michael Faraday, fizyk i chemik angielski odkrył, że dielektryk umieszczony pomiędzy okładzinami kondensatora zwiększa jego pojemność, a wielkość ta zależy od rodzaju dielektryka.

Do realizacji postawionego zadania, a więc analizy wpływu zmiany tłumienia (długości, rodzaju) toru w. cz. na wartość amplitudy impulsu HPM generowanego na stanowisku pomiarowym do badań odporności komputerów przenośnych typu laptop na oddziaływanie broni wiązkowej bazującej na impulsach HPM wybrano cztery tory w. cz. Wybrane tory w. cz. charakteryzują się taką samą długością wynoszącą 5 m oraz taką samą impedancją charakterystyczną 50 Ω . Wybrane tory w. cz. mają różną budowę:

 tor w. cz. z plecionym ekranem – jest to tor w. cz. z podwójnym ekranem w postaci metalowego kołnierza oraz dodatkowego oplotu ekranującego i elastyczną powłoką zewnętrzną. Z wybranych torów w. cz. będzie charakteryzował się dużą skutecznością ekranowania oraz dużą elastyczność oraz niskie tłumienie. Jego strukturę przedstawiono na rys. 4a).

 tor w. cz. DIEHL – jest to tor w.cz. dostarczony od producenta systemu pomiarowego do rejestracji impulsów HPM z pojedynczym ekranem w postaci oplotu dodatkowo owinięty folią miedzianą i elastyczną powłoką zewnętrzną. Tor ten charakteryzuje się stosunkowo niskim tłumieniem i dobrą elastycznością. Jego strukturę przedstawiono na rys. 4b).

 tor w. cz. z ciągłym ekranem – jest to tor w. cz. z pojedynczym ekranem w postaci ciągłego metalowego ekranu w postaci miedzianej rurki i elastycznej powłoki zewnętrznej. Z wybranych torów w. cz. będzie charakteryzował się dużą skutecznością ekranowania, natomiast do jego wad należy zaliczyć małą elastyczność oraz stosunkowo duże tłumienie. Jego strukturę przedstawiono na rys. 4c).

 tor w. cz. Linia Półsztywna – jest to tor w. cz. z pojedynczym ekranem w postaci ciągłego metalowego ekranu w postaci miedzianej rurki. Z wybranych torów w. cz. będzie charakteryzował się największą skutecznością ekranowania, natomiast do jego wad należy zaliczyć stosunkowo duże tłumienie. Jego strukturę przedstawiono na rys. 4d).



a) tor w. cz. z plecionym b) tor w. cz. DIEHL ekranem



c) tor w. cz. z ciągłym d) tor w. cz. Linia Półsztywna ekranem

Rys. 4. Wygląd wybranych torów w. cz.

Pomiar napięcia indukowanego się wewnątrz torów w. cz. wykorzystywanych w stanowisku do rejestracji i pomiarów impulsów HPM

Na bazie przedstawionego stanowiska do generacji i pomiaru impulsów HPM w pierwszym etapie analiz wyników pomiarów dokonano porównania pomierzonych wartości amplitud napięcia indukowanego wewnątrz toru w. cz. podczas narażania go impulsowym polem elektromagnetycznym dla wybranych 4 torów w. cz. łączących sondę D-dot z oscyloskopem. Do realizacji tych pomiarów zestawiono stanowisko pomiarowe, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do pomiaru amplitud napięcia indukowanego wewnątrz toru w. cz. łączącego sondę Ddot i oscyloskop cyfrowy podczas narażania go impulsowym polem elektromagnetycznym

W celu realizacji pomiarów należy wykonać pomiary w czterech etapach, dla których zmieniać należy rodzaj toru w. cz. stosowanego w połączeniu sondy D-dot i oscyloskopu cyfrowego. W generatorze HPM należy zastosować reflektor.

W każdym etapie należy wymieniać tylko tor w. cz. stosując tory w. cz. od nr 1 do nr 4. Tor w. cz. należy ustawić w odległości 200 cm od generatora HPM a następnie jeden koniec toru w. cz. podłączyć do systemu pomiarowego poprzez Kanał Nr 1 w oscyloskopie a drugi koniec toru w. cz. obciążyć impedancją 50 Ω. W torze w.cz.

należy nie używać dodatkowych tłumików czyli wypadkowa wartość tłumienia ma być ustawiona na 0 dB.

W kolejnym kroku należy wykonać pomiar impulsów HPM dla serii 10 impulsów a następnie wyliczyć średnie wartości z pomiarów. Dzięki temu uzyskano wartości średnie napięcia indukowanego wewnątrz toru w. cz. z dziesięciu pomiarów impulsów HPM przy zastosowaniu torów w.cz. od nr 1 do nr 4. Tak zarejestrowane wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej i porównawczej, dzięki czemu możliwe było określenie wpływu rodzaju toru w. cz. na wartość indukowanego napiecia wewnątrz toru w. cz.. W ramach przeprowadzonych badań otrzymano wyniki pochodzące z pomiarów. Następnie dokonano uśrednień wyników otrzymanych z 10 pomiarów dla scenariusza i analizy otrzymanych dokonano wyników. Wyniki zarejestrowanych sygnałów zaindukowanych wewnątrz wybranych torów w. cz. przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Postać sygnałów napięciowych zaindukowanych wewnątrz wybranych torów w. cz.

Z przedstawionych wyników wartości napięcia indukowanego się wewnątrz toru w. cz. podczas narażania go impulsowym polem elektromagnetycznym wynika, że największa wartość indukowanego napięcia występuje dla toru w. cz. z ciągłym ekranem. Oznacza to, że taki tor w. cz. charakteryzuje się najmniejszą skutecznością ekranowania z wybranych do pomiarów torów. Najlepszymi torami w. cz. pod względem skuteczności ekranowania (najmniejsza wartość indukowanego napięcia wewnątrz toru) okazały się tory w postaci toru w. cz. z podwójnym ekranem oraz linii półsztywnej.



Rys. 7. Schemat blokowy do wyznaczania transmitancji torów w.cz.

Pomiar transmitancji torów w. cz.

W celu analizy wpływ zmiany tłumienia (długości, rodzaju) toru w.cz. na wartość amplitudy mierzonego impulsu HPM generowanego na stanowisku pomiarowym do badania odporności komputerów przenośnych typu laptop na oddziaływanie broni wiązkowej bazującej na impulsach HPM niezbędnym jest wyznaczenie tłumienności poszczególnych torów w. cz. aby wyeliminować wpływ tego czynnika na wyniki pomiarów amplitud impulsów HPM. W tym celu określono dla wybranych torów w. cz. wartość tłumienia torów w. cz. Stanowisko pomiarowe wykorzystane do określenia tłumienia torów w. cz. bazuje na analizatorze wektorowym, dzięki któremu możliwe jest wyznaczenie tłumienności wtrąceniowej dla badanych torów w. cz.. Schemat blokowy do wyznaczania transmitancji torów w. cz. został przedstawiony na rys. 7.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów dla wybranych torów w. cz. uzyskano wyniki pomiarowe w postaci wartości tłumienia różnych torów w. cz. w funkcji częstotliwości, które przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wartość tłumienia w funkcji częstotliwości dla wszystkich torów w. cz.

Na podstawie przedstawionych powyżej wykresów porównawczych wartości tłumienia torów w. cz. wyznaczono wartość tłumienia określoną dla zakresu częstotliwości od 100 MHz do 600 MHz, będącego zakresem częstotliwości, w którym występuje energia zgromadzona w impulsie HPM. W tabeli 1 przedstawiono rzeczywistą wartość tłumienia, którą należy stosować przy wyznaczaniu amplitudy i gęstości widmowej impulsów HPM wykorzystując stanowisko pomiarowe omówione w niniejszym artykule.

Tabela 1. Zestawienie rzeczywistych wartości tłumienia dla wybranych torów w. cz. dla częstotliwości rezonansowej impulsu HPM

Tor w. cz.	Rzeczywista wartość tłumienia
Tor w. cz. z plecionym ekranem	1,40 dB
Tor w. cz. z ciągłym ekranem	1,50 dB
Tor w. cz. DIEHL	2,50 dB
Tor w. cz. Linia Półsztywna	3,60 dB

Wpływ zmiany tłumienia (długości, rodzaju) toru w. cz. na wartość amplitudy generowanego impulsu HPM

W celu przeprowadzenia analizy wpływu zmiany tłumienia (długości, rodzaju) toru w. cz. na wartość amplitudy generowanego impulsu HPM należy wykonać pomiary w czterech etapach, dla których zmieniać należy rodzaj toru w. cz. stosowanego w połączeniu sondy D-dot i oscyloskopu cyfrowego. Do realizacji pomiarów należy wykorzystać schemat pomiarowy przedstawiony na rys. 9.

W każdym etapie sondę pomiarową D-dot należy ustawić w odległości 200 cm od generatora HPM a następnie podłączyć do systemu pomiarowego poprzez Kanał Nr 1 w oscyloskopie. W torze w.cz. łączącym sondę D-dot z oscyloskopem należy użyć wartości tłumików 30 dB oraz wartości tłumienności poszczególnych torów w. cz.. W kolejnym kroku (dla każdego toru w. cz.) należy wykonać pomiar impulsów HPM dla serii 10 impulsów a następnie wyliczyć średnie wartości z pomiarów [10][11].

Tak zarejestrowane wyniki pomiarów poddano analizie statystycznej i porównawczej, dzięki czemu możliwe było określenie wpływu rodzaju toru w. cz. na wartość amplitudy zarejestrowanego impulsu HPM. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych z wykonanych pomiarów według czterech scenariuszy pomiarowych dokonano zestawienia wartości amplitud przebiegów czasowych oraz obliczoną gęstość widmową impulsów HPM z wykorzystaniem różnych rodzajów torów w. cz..



Rys. 9. Schemat blokowy stanowiska do pomiarów amplitudy impulsów HPM z odległości 2 m od generatora dla wybranych rodzajów torów w. cz.















Rys. 11. Porównanie wartości gęstości widmowej wyznaczonej z dziesięciu pomiarów impulsów HPM przy zastosowaniu różnych torów w.cz. o różnych wartościach tłumienia w dziedzinie częstotliwości

Na rys. 10 przedstawiono porównanie wartości średnich z dziesięciu pomiarów impulsów HPM przy zastosowaniu różnych torów w.cz. w dziedzinie czasu, natomiast na rys. 11 przedstawiono porównanie wartości średnich z dziesięciu pomiarów impulsów HPM przy zastosowaniu różnych torów w.cz. w dziedzinie częstotliwości.

Jak widać z przedstawionych wyników dotvczacvch przebiegów czasowych różnica pomiędzy wartościami amplitud impulsów HPM wynosi 15 kV przy amplitudzie impulsu HPM poziomie 70 kV/m. Ζ na wyżej analiz należy przedstawionych wnioskować, że W stanowisku pomiarowym może dochodzić do popełnienia dużego błędu pomiarowego lub rodzaj stosowanego toru w. cz. może stanowić przyczynę takiego rozrzutu amplitud impulsów HPM. Należy więc stosować jak najkrótsze tory w. cz. o jak najwiekszej skuteczności ekranowania płaszcza zewnętrznego.

Wnioski i podsumowanie

Celem artykułu było przeanalizowanie wpływu zmiany tłumienia (długości, rodzaju) toru w.cz. na wartość amplitudy impulsu HPM generowanego na stanowisku pomiarowym do badania odporności komputerów przenośnych typu laptop na oddziaływanie broni wiązkowej bazującej na impulsach HPM.

Z przedstawionych analiz należy wnioskować, że w stanowisku pomiarowym może dochodzić do popełnienia dużeo błędu pomiarowego ze względu na zastosowany rodzaj toru w. cz., który może stanowić przyczynę dużego rozrzutu wartości amplitud impulsów HPM. Należy więc stosować jak najkrótsze tory w. cz. o jak największej skuteczności ekranowania płaszcza zewnętrznego. Ważne jest to ze względu na eliminacje napiecia indukowanego sie wewnatrz toru w.cz. Im wieksza wartość skuteczności ekranowania toru w. cz. tym mniej prawdopodobne zaindukowanie się napięcia wewnątrz przewodu, a tym samy m prawdopodobieństwo popełnienia błędu pomiarowego maleje. Wartość tłumienia torów w. cz. nie ma dużego znaczenia ponieważ przy pomiarach impulsów HPM generowane są bardzo wysokie amplitudy impulsów. Oczywiście gdy wartość tłumienia toru w. cz. będzie bardzo duża to też będzie miała istotny wpływ na pomiar impulsów HPM. Wybrane tory w. cz. miały porównywalne wartości tłumienia wiec można wnioskować, że nie miało to wpływu na wartość amplitudy impulsów HPM. Wybrane tory w. cz. miały porównywalne wartości tłumienia więc można wnioskować, że nie miało to wpływu na wartość amplitudy impulsów HPM.

Zaleceniem podczas realizacji takich pomiarów jest stosowanie możliwie jak najkrótszych torów w. cz. o jak największej skuteczności ekranowania płaszcza zewnętrznego. Wartość tłumienia torów w. cz. nie ma dużego znaczenia ponieważ przy pomiarach impulsów HPM generowane są bardzo wysokie amplitudy impulsów.

Autorzy: dr inż. Rafał Przesmycki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: <u>rafal.przesmycki@wat.edu.pl;</u> dr inż. Marek Bugaj, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Email: <u>marek.bugaj@wat.edu.pl;</u>

LITERATURA

- Kuchta Marek, Paś Jacek: Terroryzm elektromagnetyczny zagrożenia w obiektach budowlanych, Biuletyn WAT, vol. LXIV, Nr 2, 2015
- [2] Przesmycki Rafał, Wnuk Marian: Odporność urządzeń informatycznych na narażenia impulsami HPEM, Przegląd Telekomunikacyjny, NR 8-9/2016, str: 1085-1088
- [3] AECTP 250 Ed.2 2011 : Electrical and electromagnetic environmental conditions, NATO INTERNATIONAL STAFF -DEFENCE INVESTMENT DIVISION, 2011.
- [4] Bickes; A. Ganghofer E., Instrukcja obsługi i konserwacji dla DS110.KS2.F.MP1.B High-Power RF Source HPM DS110.KS2.F.x, Diehl, 20.12.2007r.
- [5] DIEHL BGT Defence Operating and Maintenance Manual for DIEHL DS110.KS2.F.MP1.B (HPM Case System DS110), document No BDB8118952.
- [6] DIEHL HPEM measuring RF Pulse Measurement System, "Operating Manual - Safety Guideline", Manual No. BD8286482, 28.11.2011.
- [7] R. Przesmycki, M. Wnuk Susceptibility of IT devices to HPM pulse, International Journal of Safety and Security Engineering, Vol. 8, No. 2 (2018) 1–11, ISSN 2041-9031, str: 223-233
- [8] Przesmycki Rafał: Directed Energy Applications to the Destruction of Informatic Devices, Prague, Czech Republic, PIERS Proceedings 2015, str. 292-296, ISSN 1559-9450, ISBN: 978-1-934142-30-1
- [9] Rafał Przesmycki D-dot Probes Used in HPM Pulse Measurements, IEEE Xplore, Electronic ISBN: 978-1-7281-3403-1, Electronic ISSN: 1559-9450, Pages 3126 – 3134,
- [10] Sabath Frank: Classification of Electromagnetic Effects at System Level, 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe, Year: 2008, Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786916
- [11] Vladimir Vasilevich Shurenkov, Vyacheslav Sergeevich Pershenkov: Electromagnetic pulse effects and damage mechanism on the semiconductor electronic, Electronic and Energetics Vol. 29, No 4, December 2016, pp.621-6