

Zagadnienia kompatybilności urządzeń pracujących w białych przestrzeniach w zakresach/pasmach telewizyjnych

Streszczenie. W artykule zaprezentowano zagadnienia z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej dla urządzeń i systemów telekomunikacyjnych mogących pracować w białych przestrzeniach w paśmie telewizyjnym. Zwrócono uwagę na potencjalne sygnały niepożądane mogące zakłócać prawidłowy odbiór sygnałów innych systemów, np. odbiór telewizji cyfrowej DVB-T. Przedstawiono istotę spełnienia wymagań norm, w tym normy przedmiotowej ETSI EN 301 598. Zaprezentowano również przykładowe problemy, które mogą pojawić się przy użytkowaniu urządzeń WSD.

Abstract. The article presents some issues regarding electromagnetic compatibility of equipment and telecommunication systems that can work in white spaces in TV frequency range. The attention has been brought to potential undesired signals that can interfere with other systems signals, for example DVB-T. The essentials of complying with standards requirements have been presented, including selected ETSI EN 301 598 requirements. Some examples of problems which can occur while using WSD have also been presented (**Electromagnetic compatibility issues in case of the equipment working in TV white spaces**).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń WSD, białe przestrzenie, normy WSD.

Keywords: Electromagnetic compatibility of WSD, white spaces, WSD standards.

Wstęp

W niniejszym artykule autorzy zwracają uwagę na zagadnienia związane z kompatybilnością elektromagnetyczną urządzeń i systemów telekomunikacyjnych pracujących w białych przestrzeniach częstotliwości w paśmie telewizyjnym (WS – ang. *white space*), czyli w tych obszarach widma częstotliwości radiowych w paśmie telewizyjnym, które nie są w danej lokalizacji wykorzystywane przez służbę pierwszej ważności (w tym wypadku telewizję cyfrową DVB-T). Urządzenia wykorzystujące do swojej pracy wspomniane białe przestrzenie w paśmie telewizyjnym są określane mianem WSD (ang. *white space devices*). Obecnie prowadzonych jest wiele prac badawczych, dzięki którym rozwijane są technologie dla urządzeń przeznaczonych do pracy w zakresie białych przestrzeni pasma telewizyjnego. We wspomnianych pracach uczestniczą również polskie zespoły badawcze. Co więcej, na rynku pojawiają się stopniowo pierwsze urządzenia przewidziane do pracy właśnie jako WSD. Większość prototypów oraz urządzeń testowych budowana była pierwotnie przy założeniu spełnienia wymagań (o ile w ogóle) norm stosowanych typowo dla sprzętu radiowego lub komputerowego, ale niekoniecznie uwzględniających specyfikę WSD. Tymczasem w 2014 roku opublikowana została norma PN-ETSI EN 301 598 V1.1.1:2014-12 [1], która zawiera zestaw wymagań, jakie tego typu urządzenia powinny spełniać.

Przedstawione w artykule obserwacje zostały poczynione na podstawie wyników badań przeprowadzonych w Instytucie Łączności – PIB zgodnie z wymaganiami normy [1] jak również na wnioskach płynących z wcześniejszych doświadczeń z własnych badań kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń pracujących w pasmach telewizyjnych.

W oparciu o wspomniane wyżej wcześniej prowadzone badania oraz nowe badania własne wykorzystujące system testowy National Instruments USRP, w artykule zaprezentowano istotne zagrożenia dla kompatybilności międzysystemowej wynikające z oddziaływania sygnałów zakłócających od WSD oraz sygnałów niepożądanych powstających na nieliniowych elementach urządzeń.

Medium, w którym pracują urządzenia WSD wymusza na nich to, że aby zachodziła możliwość współdziałania tych urządzeń z urządzeniami już użytkowymi, należy w znacznym stopniu zadbać przede wszystkim o spełnienie

wymagań kompatybilności. Każde urządzenie radiowe musi spełniać określone wymagania. Urządzenia takie podlegają ocenie z uwagi na wymagania odpowiednich Dyrektyw, w szczególności Dyrektywy RTT&E [2] oraz EMC [3]. Na jakość prowadzonej transmisji, ale również w ogóle na możliwość jej prowadzenia, mogą mieć wpływ nie tylko efekty obserwowane podczas tradycyjnych badań emisji promieniowanych od WSD, ale również zaburzenia jakie powstają w nieliniowych elementach toru transmisyjnego.

W artykule zaprezentowano przykłady niepożądanych efektów wywołanych: nieliniowością urządzeń nadawczych, nieliniowością urządzeń odbiorczych oraz efektami niedopasowania w torze transmisyjnym. Zwrócono uwagę na możliwość powstawania efektów niepożądanych, np. intermodulacyjnych, powstających w samych urządzeniach pracujących w WS oraz w urządzeniach takich jak np. anteny aktywne lub wzmacniacze antenowe, które pracują w paśmie telewizyjnym. Powstające w ten sposób sygnały niepożądane mogą stanowić potencjalne sygnały zakłócające dla urządzeń innych systemów pracujących w tym samym i sąsiednich zakresach częstotliwości. Dlatego autorzy zwrócili szczególną uwagę na ten potencjalnie groźny, a często pomijany przez twórców rozwiązań przewidzianych do zastosowania w urządzeniach do transmisji cyfrowej, efekt związany z pojawianiem się produktów intermodulacji. Pragnąc zobrazować odbiorcom ich siłę i znaczenie pokazano jak łatwo mogą one zakłócić np. odbiór telewizji cyfrowej DVB-T.

Do zaburzeń tych, jako jeden z częstych problemów obserwowanych podczas badań telekomunikacyjnych urządzeń aktywnych, można również zaliczyć powstawanie sygnałów niepożądanych w postaci sygnałów harmonicznych. Na ich potencjalny niekorzystny wpływ na kompatybilność urządzeń i systemów pracujących w WS również zwrócono uwagę w artykule.

Intermodulacje

Efektom często pomijanym przez twórców rozwiązań przewidzianych dla urządzeń transmisji cyfrowej w ogóle, a co za tym idzie również w przypadku WSD, są intermodulacje i ich produkty. W Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności – PIB we Wrocławiu od kilkunastu lat podnoszony jest problem niewystarczającego zwracania uwagi na zagadnienia intermodulacji w przypadku urządzeń cyfrowych i jak to

może niekorzystnie wpływać na ich pracę. Prace realizowane w Instytucie Łączności – PIB przez prof. Struzaka (informacja prywatna) dotyczące m.in. źródeł i przyczyn intermodulacji wskazują, że nie tylko na podstawie wyników badań, jak pokazane w tym artykule, ale również na podstawie analiz można wnioskować o konieczności uwzględnienia tego zagadnienia w celu uniknięcia kolizji przy doborze częstotliwości pracy różnych urządzeń. Zagadnienia związane ze zjawiskiem intermodulacji zostały również uwzględnione w normie [1], które przewiduje badania także w tym zakresie.

Produkty intermodulacyjne powstają w układach wyposażonych w elementy aktywne, zwłaszcza w urządzeniach szerokopasmowych. Podczas badań prowadzonych w Laboratorium Badań EMC Instytutu Łączności – PIB w przypadku urządzeń wykorzystywanych w odbiorze DVB-T (dotyczy to przede wszystkim anten aktywnych) pracujących w obecności systemu testowego USRP pracującego jako urządzenie WSD zarejestrowano przypadki występowania zjawisk intermodulacyjnych.

Należy tu wspomnieć, że oprócz produktów intermodulacyjnych pochodzących od WSD istotne mogą być również zaburzenia intermodulacyjne jakie wytwarzają się w najbliższych kanałach a pochodzące od urządzeń DVB-T pracujących niekoniecznie na najbliższej czy sąsiedniej częstotliwości.

Efekty oddziaływania zaburzeń intermodulacyjnych na odbiornik WSD mogą powodować „zatykanie” wejścia i niemożliwość poprawnej pracy takiego urządzenia.

Efekty intermodulacji, których składnikiem są sygnały generowane przez nadajnik WSD, mogą być obserwowane na odbiornikach urządzeń przeznaczonych do odbioru np. telewizji DVB-T. Taka sytuacja, kiedy służba pierwszej ważności mogłaby zostać zakłócona przez efekty pochodzące od urządzeń, które teoretycznie mają być niekolizyjne, jest oczywiście niedopuszczalna.

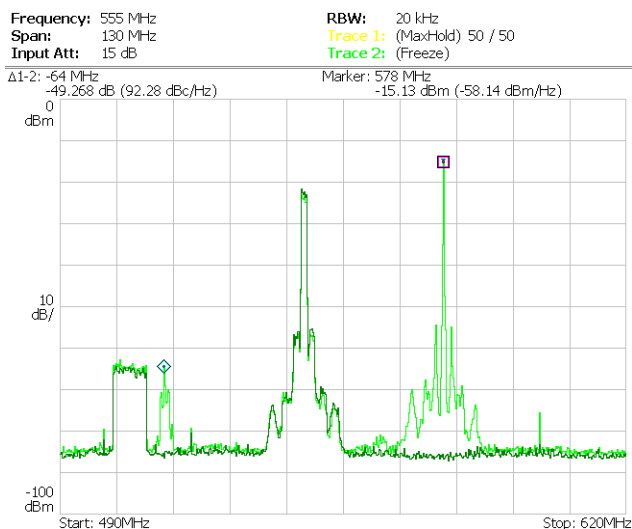
Na rysunku 1 pokazany został przykład reakcji odbiornika DVB-T (zrzut obrazu z testera sygnału DVB-T z najistotniejszymi parametrami) na produkty intermodulacyjne, w których udział biorą sygnały pochodzące od urządzenia WSD.



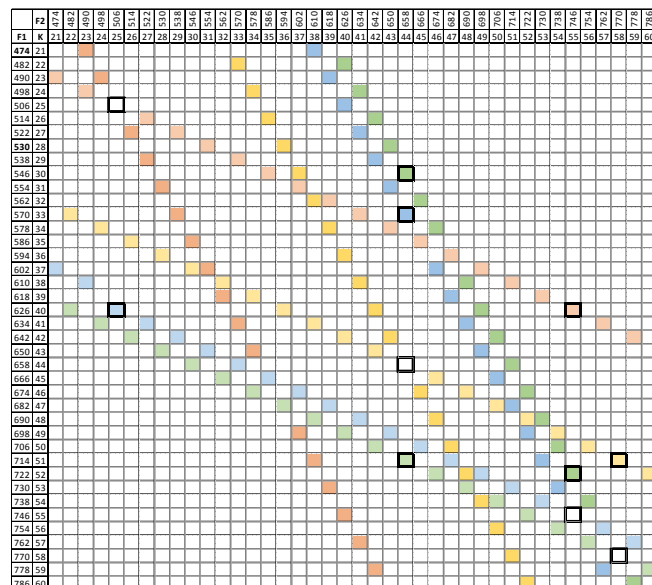
Rys.1. Przykład reakcji odbiornika testowego DVB-T na produkty intermodulacji z udziałem sygnału od WSD, kolorem czerwonym oznaczono przekroczenia zakresów dopuszczalnych niektórych parametrów transmisji w wyniku zakłócenia

Jak widać na rysunku 2 obok sygnału MUX-3 zarejestrowany został produkt intermodulacji powstający w antenie aktywnej. Poziomy sygnałów użytecznego

i pasożytniczego będącego efektem intermodulacji są porównywalne. Częstotliwości sygnałów WSD w przypadku tego eksperymentu dobrano tak, aby sygnał użyteczny DVB-T i produkt intermodulacyjny dwóch sygnałów od WSD były widoczne na tym samym rysunku. W praktyce zaś, taka sytuacja oznaczałaby, że w przypadku korekty częstotliwości jednego z nadajników pasożytniczych o 8 MHz (jeden kanał), widoczny na rysunku 2 produkt intermodulacyjny zostałby przesunięty dokładnie w zakres kanału MUX-3. Efektem byłoby zakłócenie, a nawet uniemożliwienie odbioru sygnału użytecznego. Co więcej taka sytuacja miałaby miejsce przy teoretycznie bezkolizyjnym nadawaniu dwóch rozważanych sygnałów w pasmach ich podstawowej pracy.



Rys.2. Pomiar sygnału wyjściowego z anteny aktywnej w obecności sygnału MUX-3 nadawanego z nadajnika na Ślęży 506 MHz przy włączonym tylko jednym nadajniku USRP 546 M (linia ciemniejsza) lub z dwoma nadajnikami USRP 546 MHz i 578 MHz (linia jaśniejsza). Widoczny produkt intermodulacji o częstotliwości bliskiej kanału MUX-3 (w lewej części rysunku)



Rys.3. Możliwe konflikty związane z intermodulacjami

Przykład tu przedstawiony jest wynikiem działań laboratoryjnych, jednak przeprowadzona analiza potencjalnych kolizji wskazuje (patrz rysunek 3), że potencjalnych wrażliwych kanałów jest wiele i problem ten nie powinien być traktowany powierzchownie. Wskazuje to

jednoznacznie na niebagatelne znaczenie zjawiska intermodulacji.

Zaburzenia harmoniczne

Kolejnym niepożądanym efektem, jaki może być wynikiem pracy urządzeń aktywnych, jest powstawanie sygnałów niepożądanych w postaci sygnałów harmonicznych. Zjawiska związane z występowaniem harmonicznych, zwłaszcza o poziomach przekraczających dopuszczalne, stanowią szczególnie istotny element podczas analizy potencjalnych zakłóceń od WSD. Widmo niepożądanych sygnałów może być obserwowane w szerokim zakresie częstotliwości, nawet w paśmie obejmującym kilkadziesiąt MHz.

Ponadto należy pamiętać, że do typowo obserwowanych harmonicznych wyższego rzędu mogą dołożyć się jeszcze składowe związane z nieliniowością pracy wzmacniacza w torze wyjściowym. Efekt takiego złożenia w postaci generowania zaburzeń harmonicznych przez urządzenie nadawcze (nawet małej mocy) może być dodatkowo wzmocniony.

W badaniach laboratoryjnych dokonano analizy kilku przypadków powstawania harmonicznych, dla różnych typów modulacji, od urządzenia WSD w którym przy wyższych wzmocnieniach (ustawieniu maksymalnej mocy, co jest typowe w przypadku większości użytkowników) dodatkowo miały wpływ efekty związane z nieliniowością w torze wyjściowym układu.

Poniżej w tabeli 1 podano poziom nastawy, rzeczywisty poziom generowany na częstotliwości podstawowej f oraz poziomy zmierzone dla harmonicznych odpowiednio drugiej f_2 , trzeciej f_3 oraz czwartej f_4 .

Tab. 1. Poziomy harmonicznych w zależności od poziomu wyjściowego badanego urządzenia

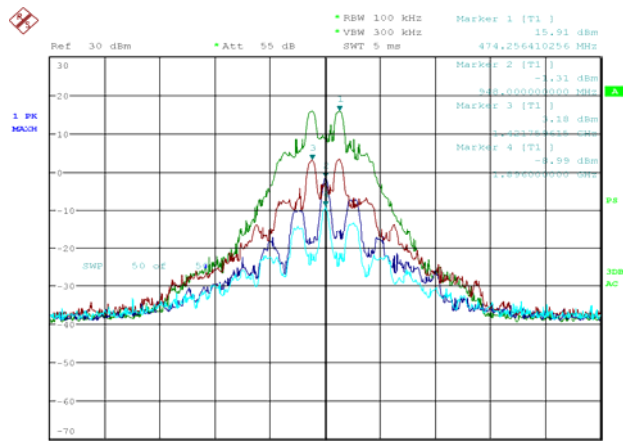
Umowny poziom wyjściowy badanego urządzenia [dB]	Poziomy sygnału na częstotliwości podstawowej f oraz na kolejnych harmonicznych [dBm]			
	$f = 474$ MHz	$f_2 = 948$ MHz	$f_3 = 1422$ MHz	$f_4 = 1896$ MHz
0	-12,6	-40	-26,6	-40
10	-3	-40	-17,6	-40
20	7	-30,2	-7,6	-34,7
30	15,9	-2,5	2,5	-11,6

Efekt związany z emisją zaburzeń harmonicznych jest znaczny i rośnie w sposób istotny wraz ze wzrostem wzmocnienia na wyjściu nadajnika. Dlatego też jeśli urządzenie miałoby pracować w sposób niezakłócający pracy innych urządzeń, należy w urządzeniu znacząco ograniczyć możliwość wykorzystania wzmocnienia przez użytkownika. Na rysunkach 4 i 5 pokazane zostały wyniki pomiarów charakterystyki zaburzeń emisji harmonicznych zarejestrowane za pomocą analizatora widma przy poziomie maksymalnej nastawy wzmocnienia dla badanego urządzenia WSD dla różnych modulacji sygnału.

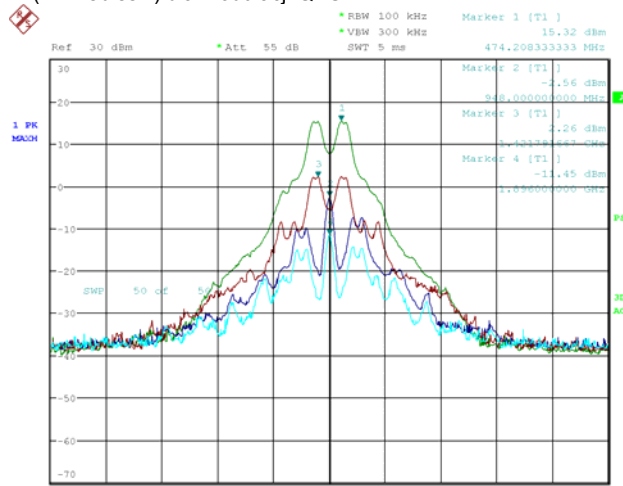
Poziomy sygnałów niepożądanych generowanych poza pasmem pracy, dla przedstawionych w tych przykładach badań, są tylko o kilkanaście decybeli niższe niż poziom sygnału generowanego przez urządzenie pracujące w WS. Ponadto należy tu zauważyć, że niepożądane harmoniczne pochodzące od sygnału WSD są również zaburzeniami szerokopasmowymi o szerokości kanału jedynie o kilka

procent węższymi niż sygnał generowany w paśmie podstawowym i to niezależnie od tego dla jakiej modulacji obserwowano tą generację harmonicznych.

Dla lepszego zobrazowania różnic poziomów poszczególnych sygnałów (podstawowego oraz harmonicznych od drugiej do czwartej), ich widma (zarejestrowane osobno) zostały przedstawione na jednym rysunku, w tej samej skali.



Rys.4. Nałożone na podstawowy sygnał (1 - zielony) kolejne zaburzenia harmoniczne: f_2 (2 - granatowy), f_3 (3 - brązowy), f_4 (4 - niebieski) dla modulacji QPSK



Rys.5. Nałożone na podstawowy sygnał (1 - zielony) kolejne zaburzenia harmoniczne: f_2 (2 - granatowy), f_3 (3 - brązowy), f_4 (4 - niebieski) dla modulacji FSK

Poziomy zaburzeń pozapasmowych będących harmonicznymi, znacznie przekraczają w tym przypadku poziom dopuszczalny określony w normie [1]. Podczas badań zaobserwowano że efekt ten wzmagają się wraz z przechodzeniem urządzenia w zakres nieliniowej pracy układu wzmacniacza wyjściowego urządzenia. Należy na to szczególnie zwrócić uwagę, ponieważ, jak już wcześniej wspomniano, użytkownicy często przejawiają tendencję do wykorzystania maksymalnej dostępnej mocy urządzenia, a co za tym idzie mogą prowadzić do częstego występowania efektu o jakim tu wspomniano. W związku z tym producenci urządzeń mających pracować w pasmach WS powinni tak projektować swoje urządzenia, aby wzmacniacz wyjściowy w ich urządzeniu mógł być wykorzystywany przez użytkownika końcowego tylko w zakresie swojej liniowej pracy, kiedy to wytwarzane harmoniczne mają poziom mniejszy od dopuszczalnego.

Inne niepożądane efekty

W pracach prowadzonych w Zakładzie Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności – PIB zwrócono szczególną uwagę na dwa główne efekty opisane powyżej (intermodulacje i harmoniczne). Należy jednak wspomnieć również o innych efektach jakie mogą występować w urządzeniach pracujących w pasmach WS.

Wśród parametrów związanych z niepożądanymi efektami występującymi w urządzeniach WSD norma [1] ogranicza możliwość emisji produktów intermodulacyjnych powstających na wyjściu nadajnika. Produkty te są w normie [1] definiowane jako efekt intermodulacji sygnału pożądanego emitowanego przez nadajnik i sygnału niepożądanego z zewnątrz wprowadzanego do wzmacniacza antenowego poprzez antenę, np. pochodzącego z innego WSD. Badania takich oddziaływań przeprowadza się z użyciem ciągłego sinusoidalnego sygnału o częstotliwości środkowej odległej o ± 8 MHz od środkowej częstotliwości sygnału pożądanego. Poziom sygnału niepożądanego powinien być 40 dB poniżej maksymalnego sygnału użytecznego. Pomija się niepożądane sygnały znajdujące się poza pasmem 470-790 MHz. Badaniu podlega tłumienie produktów intermodulacyjnych wstecznych 3-go rzędu.

Ponadto z uwagi na pasożytnicze efekty norma [1] określa stałe poziomy dopuszczalne emisji poza pasmem cyfrowej telewizji naziemnej. Dla emisji niepożądanego w paśmie cyfrowej telewizji naziemnej metoda wyznaczenia tych poziomów dopuszczalnych uwzględnia po pierwsze klasę urządzenia deklarowaną przez producenta/dostawcę, a po drugie zmierzony poziom sygnału pożądanego w paśmie/kanale nominalnym, czyli nadawanego przez WSD w sposób zamierzony. Ograniczenie to dotyczy mocy wypromieniowywanej poza pasmem nominalnym, czyli tym na którym WSD nadaje, ale na częstotliwościach znajdujących się w paśmie cyfrowej telewizji naziemnej 470-790 MHz.

Podsumowanie

Autorzy w niniejszym artykule postawili sobie za zadanie prezentację wyników badań realnych zjawisk związanych z generowaniem sygnałów niepożądanych przez same urządzenia WSD, jak również wyników badań możliwości tworzenia się produktów intermodulacyjnych na wejściach odbiorników DVB-T skutecznie zakłócających odbiór nadawanych programów z użyciem szerokopasmowej modulacji cyfrowej. Na podstawie tych badań zwrócono szczególną uwagę na problemy kompatybilności urządzeń przewidywanych do pracy w pasmach WS. Rozważono tu zarówno kompatybilność pomiędzy samymi urządzeniami wykorzystywanymi jako WSD i wykorzystywanymi przez nie systemami, jak również kompatybilność z podstawową służbą działającą w tym zakresie częstotliwości, tzn. DVB-T. Obecnie, gdy coraz większym zainteresowaniem cieszy się możliwość wykorzystywania białych przestrzeni

w pasmach telewizyjnych, trzeba zadbać o to, aby zagadnienia z zakresu EMC zostały przemyślane i zaimplementowane zarówno w rozwiązaniach algorytmów dla radia kognitywnego (np. poprzez wyliczanie i zabezpieczanie przed pracą na częstotliwościach, na których może sygnał interferować) jak i przy rozwiązaniach typowo sprzętowych (np. poprzez zadbanie o zapewnienie liniowości pracy wzmacniaczy).

Przedstawiono przykłady sygnałów niepożądanych mogących powstawać w samych urządzeniach wykorzystywanych jako WSD (harmoniczne) oraz mogących powstawać zarówno w urządzeniach WSD jak również w innych urządzeniach pracujących w tym samym lub sąsiednim paśmie częstotliwości (intermodulacje). Przedstawiono również jakie rzeczywiste problemy, z którymi mogą się spotkać twórcy urządzeń WSD i systemów na nich opartych, mogą powstawać w wyniku zaprezentowanych w artykule zjawisk. Implementacja rozwiązań pozwalających na ograniczenie podatności urządzeń na zakłócenia, a także zmniejszenie do wymaganego przez normy poziomu generowanych zaburzeń na etapie opracowywania urządzeń są o wiele mniej kosztowna, niż późniejsze usuwanie już powstałych problemów lub rezygnacja z już wyprodukowanych urządzeń. Warto, aby producenci nowych urządzeń, w tym przypadku WSD, brali pod uwagę przedstawione w artykule zjawiska, w tym zaniebdywany ostatnio problem zjawisk nieliniowych, a szczególnie intermodulacji.

LITERATURA

- [1] PN-ETSI EN 301 598 v1.1.1 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive
- [2] Dyrektywa 1999/5/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 9 marca 1999 r. w sprawie sprzętu radiowego i urządzeń terminali telekomunikacyjnych oraz wzajemnego uznawania ich zgodności
- [3] Dyrektywa 2004/108/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 15 grudnia 2004 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej i uchylająca dyrektywę 89/336/EWG

Autorzy: mgr inż. Marek Jermakowicz, Instytut Łączności – PIB, Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Swojczycka 38, 50-501 Wrocław, E-mail: M.Jermakowicz@itl.waw.pl; mgr inż. Marek Michalak, Instytut Łączności – PIB, Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Swojczycka 38, 50-501 Wrocław, E-mail: M.Michalak@itl.waw.pl; mgr inż. Karolina Spalt, Instytut Łączności – PIB, Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Swojczycka 38, 50-501 Wrocław, E-mail: K.Spalt@itl.waw.pl; mgr inż. Monika Szafranska, Instytut Łączności – PIB, Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Swojczycka 38, 50-501 Wrocław, E-mail: M.Szafranska@itl.waw.pl.