

doi:10.15199/48.2019.03.11

Analiza metod określania cech dystynktywnych dla interfejsów sprzętowych PC na bazie emisji promieniowanej

Streszczenie. W artykule omówiono trzy opracowane metody określania cech dystynktywnych dla interfejsów sprzętowych PC. Dzięki przedstawionym metodom możliwe jest określenie wzorcowych widm częstotliwościowych dla poszczególnych interfejsów sprzętowych PC, które mogą posłużyć do analizy możliwości ich identyfikacji w systemach współmiejscowych w oparciu o emisję promieniowaną. Ponadto w artykule przedstawiono wyniki analiz porównawczych omówionych metod określania cech dystynktywnych dla interfejsów sprzętowych i wskazano ich zalety oraz wady.

Abstract. The article discusses three developed methods for determining distinctive features for PC hardware interfaces. Using the presented methods it is possible to determine the standard frequency spectrum for individual PC hardware interfaces, which can be used to analyze their identification in co-location systems based on radiated emission. Moreover, the article presents the results of comparative analyzes of the discussed methods for determining distinctive features for hardware interfaces and their advantages and disadvantages. (**Analysis of methods for determining distinctive features for PC hardware interfaces based on radiated emission**).

Słowa kluczowe: interfejs sprzętowy, PC, EMC, emisja promieniowana, cecha dystynktywna.

Keywords: hardware interface, PC, EMC, radiated emission, distinctive feature.

Wstęp

Energia emitowana (ϵ) przez dowolne źródło, ogólnie biorąc, może zależeć od częstotliwości (f), czasu (t) i kierunku (Φ). Wielkość ϵ można uważać za operator opisujący przekształcenie energii wyzwalanej w źródle (która zależy tylko od częstotliwości i czasu) w przestrzenno-czasowo-częstotliwościowy rozkład energii w ośrodku otaczającym źródło. Przy dużej ilości źródeł emisji działających jednocześnie wypadkowy proces zawiera dominujące dyskretne składowe o szczególnie dużej intensywności oraz tło elektromagnetyczne, zbliżone do szumu. Intensywność emisji zamierzonej w zasadzie można oszacować na podstawie rozmieszczenia przestrzenno-czasowo-częstotliwościowego źródeł, promieniowanej mocy i innych znamionowych parametrów wchodzących w grę urządzeń. Natomiast emisja niezamierzona jest znacznie trudniejsza do oceny ilościowej. Przykładem jest system współmiejscowy, w którym jednocześnie znajduje się kilka źródeł emisji elektromagnetycznej. Na podstawie badań i uzyskanych wyników pomiarowych można stwierdzić, że istnieje możliwość zidentyfikowania interfejsów sprzętowych urządzenia informatycznego powodujących wzrost poziomu emisyjności. Cechą dystynktywną pracy poszczególnych interfejsów jest więc ich częstotliwość pracy oraz poziom emisyjności pozwalające na identyfikację danego interfejsu sprzętowego [5].

Proces identyfikacji interfejsów sprzętowych urządzenia informatycznego

Ogólnie proces identyfikacji interfejsów sprzętowych urządzenia informatycznego możemy podzielić na dwa etapy. Pierwszym etapem jest proces pomiarowy, służący do zgromadzenia cech dystynktywnych pracy poszczególnych interfejsów sprzętowych, do których zaliczyć możemy częstotliwość pracy oraz poziom emisyjności. Drugim etapem jest zasadniczy proces identyfikacji interfejsu sprzętowego na podstawie zgromadzonych wyników i określonych miarach podobieństwa emisji promieniowanej pochodzącej od urządzenia informatycznego [1][2]. W celu zrealizowania pierwszego etapu można zastosować jedną z trzech przedstawionych w niniejszym artykule metod do określania cech dystynktywnych interfejsów sprzętowych.

Metody określania cech dystynktywnych interfejsów sprzętowych w PC

W niniejszym rozdziale przedstawiono i omówiono trzy opracowane metody określania cech dystynktywnych urządzeń informatycznych. Dzięki przedstawionym metodom możliwe jest również określenie wzorcowych widm częstotliwościowych dla poszczególnych urządzeń informatycznych, które mogą służyć do analizy możliwości identyfikacji urządzeń informatycznych w systemach współmiejscowych w oparciu o emisję promieniowaną.

Metoda wartości średniej (AVM)

Na bazie wyników pomiarowych zawierających widma emisji promieniowanej urządzeń informatycznych opracowano metodę wyznaczania cech dystynktywnych dla interfejsów sprzętowych jednostek centralnych PC na bazie wartości średniej (AVM – Average Method). Metoda ta bazuje na wartościach emisji promieniowanej pochodzącej od poszczególnych komputerów z określonymi warunkami pracy. Podczas badań komputer PC jest w pełni obciążony, tj. wymuszona jest transmisja danych na interfejsach zewnętrznych jak i wewnętrznych dzięki czemu zapewniona jest praca poszczególnych urządzeń informatycznych. Jak wynika z analiz stabilności poziomów emisji promieniowanej wykonanych przez autora niniejszego artykułu, intensywność obciążenia badanego urządzenia informatycznego powinna być ustawiona na poziomie 50%. Po wykonaniu pomiarów i zebraniu wyników badań należy przeprowadzić analizę statystyczną zebranych danych pomiarowych. Na podstawie wyników pomiarowych należy wyliczyć wartości średnie poziomów emisji promieniowanej dla każdej częstotliwości:

$$(1) \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

gdzie: \bar{X} - wartość średnia poziomu emisyjności [dB μ V/m],
n - liczba wszystkich pomiarów, i - konkretny pomiar.

Następnie należy wyznaczyć wartości poziomu emisji promieniowanej: minimalnej oraz maksymalnej.

Analizując uśrednione wartości zaburzeń promieniowanych zauważymy, że dla kilku częstotliwości występują znacznie większe poziomy emisji w stosunku do innych. Dla tych częstotliwości o zwiększonej wartości emisji promieniowanej należy dokonać identyfikacji

komponentów metodą eliminacji polegającą na kolejnym odłączaniu obciążeń interfejsów w jednostkach centralnych PC podczas badań. Każdorazowo pomiar obserwowanego sygnału trwa 30 sekund, a nastawy stołu i anten pomiarowych były takie same jak podczas wykonywania wcześniejszych pomiarów. Metodą eliminacji są odłączane kolejne komponenty komputera PC celem ponownej obserwacji emisji na danej częstotliwości. Jeśli emisja spada oznacza to, że został w ten sposób zidentyfikowany interfejs sprzętowy powodujący zwiększenie poziomu emisyjności, a tym samym miejsce potencjalnego wycieku elektromagnetycznego. W przeciwnym wypadku należało kontynuować odłączanie komponentów. Następnie interfejs powinien być obciążony z powrotem ponieważ nie można wykluczyć, że powoduje on zwiększenia emisyjności na innych częstotliwościach. Procedura pomiarowa zostaje ukończona w momencie gdy zostaną zlokalizowane wszystkie interfejsy sprzętowe powodujące podwyższoną emisję, a co za tym idzie miejsca o podwyższonym prawdopodobieństwie wycieku elektromagnetycznego.

Dla wybranych częstotliwości można wyznaczyć częstości występowania określonych wartości poziomów zaburzeń promieniowanych. Następnie na tej podstawie można wyznaczyć rozkłady prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych wartości zaburzeń promieniowanych dla określonej częstotliwości. Dzięki temu można uzyskać informację czy dla określonej częstotliwości występuje jedna wartość zaburzenia bądź kilka. W przypadku jednej dominującej wartości w rozkładzie mamy do czynienia z przypadkiem, gdy nie występuje zaburzenie, a określony poziom oznacza wartość tła szumowego środowiska pomiarowego. W innym przypadku mamy do czynienia z występowaniem zaburzenia pochodzącego od poszczególnych interfejsów sprzętowych jednostki centralnej PC, o różnych wartościach dla danego obiektu badań.

Metoda włączania pojedynczych interfejsów (ONIM)

Metoda włączania pojedynczych interfejsów (ONIM – On Interface Method) jest drugą opracowaną metodą służącą do wyznaczania cech dystynktywnych dla interfejsów sprzętowych w jednostkach centralnych PC na podstawie pomiarów wykonywanych przy pracy pojedynczego interfejsu sprzętowego w komputerze. Metoda ta bazuje na wartościach emisji promieniowanej pochodzącej od wybranych komputerów z określonymi warunkami pracy. Dla każdego komputera należy wykonać pomiary, które można podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie badawczym dokonuje się pomiaru emisji promieniowanej pochodzącej od jednostki PC w stanie spoczynku, tzn. podczas pomiarów na komputerze badanym nie są wykonywane żadne operacje, komputer ma uruchomiony system operacyjny i wyświetla na monitorze tło pulpitu. W etapie drugim należy dokonać włączenia poszczególnych interfejsów sprzętowych w jednostce centralnej PC powodując tym samym wymuszenie transmisji danych na liniach poszczególnych interfejsów. W zależności od ilości interfejsów należy wykonać odpowiednią ilość serii pomiarowych. Podczas badań komputer PC powinien być obciążony pojedynczym interfejsem, tj. wymuszona jest transmisja danych na wybranym interfejsie zewnętrznym jak i wewnętrznym dzięki czemu zapewniona jest praca poszczególnych interfejsów w urządzeniu informatycznym. Jak wynika z analiz stabilności poziomów emisji promieniowanej wykonanych przez autora niniejszego artykułu, intensywność obciążenia badanego urządzenia informatycznego powinna być ustawiona na poziomie 50%. Po przeprowadzeniu badań emisji promieniowanej, kolejnym krokiem jest analiza otrzymanych wyników. Wynikami pomiarów są wzorcowe

wykresy poziomów natężenia pola elektromagnetycznego [dB μ V/m] w funkcji częstotliwości od 30MHz do 1000 MHz dla poszczególnych interfejsów sprzętowych.

Na podstawie przykładowego wzorcowego widma emisji promieniowanej komputera PC wyraźnie widać, że dla pewnych częstotliwości następuje wzrost poziomu emisyjności względem tła szumowego środowiska pomiarowego.

Metoda wykorzystująca ujawniającą emisję promieniowaną (CEM)

W celu określenia źródeł emisji elektromagnetycznych pochodzących z urządzeń informatycznych poprzez określenie lokalizacji tego źródła w jednostkach centralnych PC można tego dokonać poprzez oszacowanie stopnia zawartości sygnału testowego, celowo generowanego na wybranych interfejsach urządzenia informatycznego, w sygnale odebranym przez stanowisko pomiarowe, jako emisja ujawniająca promieniowana. W tym celu musimy znać sygnał wzorcowy. W badanym urządzeniu informatycznym uruchamia się generator wymuszonych sygnałów, którego zadaniem jest generowanie sygnału wzorcowego na wyjściu wybranego interfejsu badanego urządzenia informatycznego odpowiadającego wybranej binarnej sekwencji informacyjnej lub obrazowi testowemu. Dzięki temu mamy sygnał wzorcowy, którego poszukujemy w widmie częstotliwościowym emisji promieniowanej.

Poniżej omówiono trzecią z opracowanych metod wykorzystującą do wyznaczania cech dystynktywnych interfejsów sprzętowych w jednostkach centralnych PC wykorzystującą ujawniającą emisję elektromagnetyczną (CEM – Compromising Emission Method). Dzięki tej metodzie możliwe jest określenie cech dystynktywnych (częstotliwości składowych widma analizowanego sygnału oraz charakterystycznych wzorców binarnych w dziedzinie czasu) sygnałów występujących na wyjściu wybranych interfejsów w dziedzinie czasu i częstotliwości odpowiadających określonym binarnym sekwencjom informacyjnym nadawanym przez dany interfejs urządzenia informatycznego jakim jest jednostka centralna PC.

Dla poszczególnych interfejsów jako wymuszenie dla emisji ujawniającej stosuje się wybrane sekwencje binarne, wybrane obrazy testowe itp. Za pomocą anten odbiorczych sygnał odebrany przez antenę trafia poprzez komutator przełączający anteny do odbiornika szerokopasmowego. W odbiorniku sygnały te są filtrowane oraz odbywa się ich konwersja w niższy zakres częstotliwości. Sygnał po detekcji podawany jest do wyjścia VIDEO w odbiorniku a następnie podawany jest na wejście kanału zewnętrznego oscyloskopu, na którym istnieje możliwość zobrazowania odebranej informacji w dziedzinie czasu, a tym samym potwierdzenie wykrycia sygnału testowego na danej częstotliwości.

Analiza metod do określania cech dystynktywnych interfejsów sprzętowych w PC

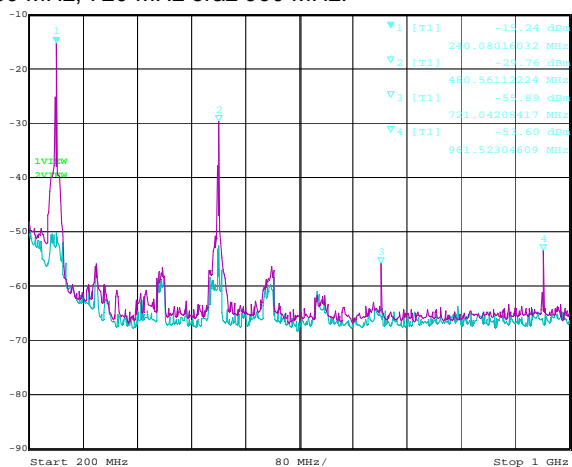
Na podstawie trzech opracowanych metod określania cech dystynktywnych dla poszczególnych interfejsów sprzętowych można otrzymać zbiór wartości emisji promieniowanej cechującej się podwyższonymi poziomami. Na tej podstawie można stwierdzić, że istnieje możliwość zidentyfikowania interfejsów sprzętowych urządzenia informatycznego powodujące wzrost poziomu emisyjności. Cechą dystynktywną pracy poszczególnych interfejsów jest więc jego częstotliwość pracy oraz poziom emisyjności pozwalające na identyfikację danego interfejsu sprzętowego [3][4].

W celu porównania trzech omówionych metod przeprowadzono eksperyment polegający na pomiarze emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB 2.0 stosując wszystkie trzy metody. Pomiary dokonano w

odległości 3 m od urządzenia informatycznego, na którym wymuszona była transmisja danych na liniach transmisji danych poprzez interfejs USB 2.0 [6].

Bezpośredni wpływ na poziom poszczególnych składowych widma emisji promieniowanej z interfejsu USB 2.0 odbieranych przez odbiornik infiltracyjny ma postać przebiegu sygnału bezpośrednio na linii transmisyjnej. W związku z powyższym do analiz mających na celu ocenę możliwości przeprowadzenia infiltracji elektromagnetycznej dobrano taką postać ciągu binarnego generowanego przez oprogramowanie transmisyjne GWS (Generator Wymuszeń Sygnałów) działające na komputerze PC wyposażonym w badany port USB 2.0, która skutkuje maksymalizacją poziomu poszczególnych składowych widma częstotliwościowego emisji promieniowanej. W wyniku przeprowadzonych badań oraz analiz określono, że poszczególne składowe widma sygnału na linii transmisyjnej USB 2.0 posiadają maksymalne poziomy poszczególnych składowych widma emisji promieniowanej tylko dla binarnych ciągów informacyjnych generowanych przez GWS, które po ich obróbce przez standardowe układy wyjściowe portu USB generują na linii transmisyjnej okresowy strumień binarny. Aby wymusić na linii transmisyjnej okresowy strumień binarny, GWS powinien wygenerować binarny ciąg informacyjny, który po obróbce przez standardowe układy wyjściowe portu USB 2.0 spowoduje pojawienie się na linii transmisyjnej okresowego strumienia binarnego. Do istotnych procesów obróbki sygnału w interfejsie USB 2.0, które mają wpływ na postać strumienia binarnego na jego wyjściu należy zaliczyć proces wstawiania bitu synchronizującego (ang. bit stuffing) oraz kodowanie liniowe NRZI (ang. non return to zero inverted). Biorąc pod uwagę wpływ powyższych metod obróbki sygnału na postać strumienia binarnego na wyjściu portu USB 2.0, przy pomocy aplikacji GWS wymuszono transmisję binarnego ciągu informacyjnego poprzez interfejs USB w postaci ciągu zer logicznych (0000000000000000...) co na wyjściu portu USB po kodowaniu NRZI daje ciąg binarny w postaci 0101010101010101....

Na rys. 1 przedstawiono widmo sygnału emisji promieniowanej generowanej przez interfejs USB 2.0 podczas transmisji ciągu danych informacyjnych składających się z zer logicznych. Z powyższego spektrogramu można wywnioskować, że emisja ujawniająca promieniowana występuje na częstotliwościach: 240 MHz, 480 MHz, 720 MHz oraz 960 MHz.



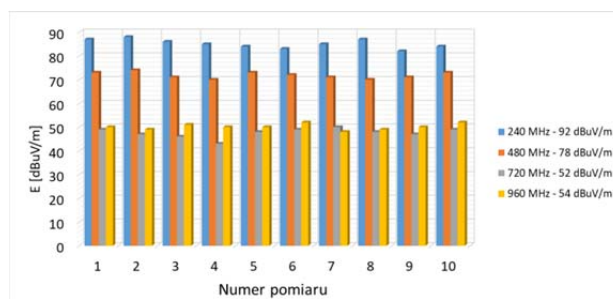
Rys. 1. Emisyjność promieniowana pochodząca od interfejsu USB2.0 podczas wyłączonej transmisji danych (kolor niebieski) oraz podczas przesyłania ciągu binarnego w postaci zer logicznych (kolor fioletowy) w zakresie częstotliwości 200 MHz – 1 GHz

Dla wymuszonej transmisji danych w postaci ciągu danych informacyjnych składających się z zer logicznych

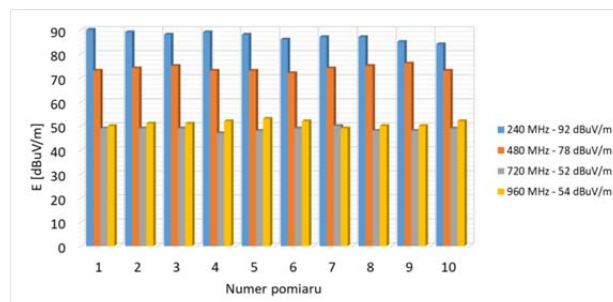
określono wartości emisji promieniowanej dla czterech wybranych częstotliwości: 240 MHz, 480 MHz, 720 MHz oraz 960 MHz. Wartości emisji promieniowanej (natężenia pola elektrycznego) w odległości 3 m od badanego urządzenia dla tych częstotliwości wynoszą odpowiednio: 92 dB μ V/m, 78 dB μ V/m, 52 dB μ V/m, 54 dB μ V/m.

Następnie dokonano dziesięciokrotnego pomiaru wartości natężenia pola elektrycznego w odległości 3 m od urządzenia informatycznego stosując trzy przedstawione w artykule metody do określania cech dystyngtywnych interfejsów sprzętowych w jednostkach centralnych PC. Stosując pierwszą metodę (AVM) wymuszono transmisję danych na wszystkich interfejsach sprzętowych w jednostce centralnej PC, a następnie dziesięciokrotnie dokonano pomiaru poprzez odłączanie i podłączanie obciążenia na porcie USB 2.0 zapisując wartości podwyższonej emisji promieniowanej dla 4 wybranych częstotliwości. Dla metody ONIM dokonano pomiaru tła szumowego przy pracy jednostki centralnej PC w stanie jałowym, tj. na komputerze nie była generowana żadna transmisja danych, a następnie wymuszono transmisję danych na interfejsie USB 2.0 i dokonano dziesięciokrotnego pomiaru wzorcowych widm przy obciążonym interfejsie. Na bazie otrzymanych widm emisji promieniowanej dokonano odczytu podwyższonych wartości emisji promieniowanej dla 4 wybranych częstotliwości. Dla metody CEM wymuszono transmisję danych na interfejsie USB 2.0 i dokonano dziesięciokrotnego pomiaru wzorcowych widm przy obciążonym interfejsie. Odbiornik pomiarowy dostrajono do 4 wybranych częstotliwości i dokonano odczytu podwyższonych wartości emisji promieniowanej obserwując sygnał w dziedzinie czasu.

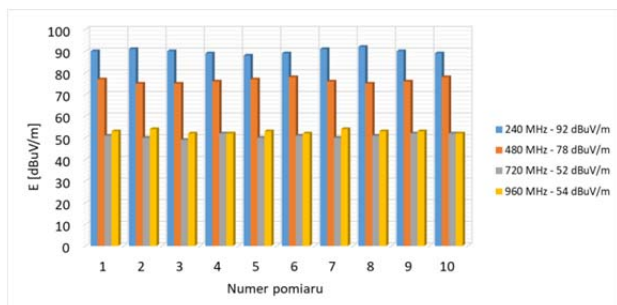
Poniżej na rysunkach od rys. 2 do rys. 4 przedstawiono wyniki dziesięciokrotnych pomiarów wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone trzema metodami dla 4 wybranych częstotliwości pomiarowych.



Rys. 2. Wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone metodą AVM dla 4 wybranych częstotliwości pomiarowych

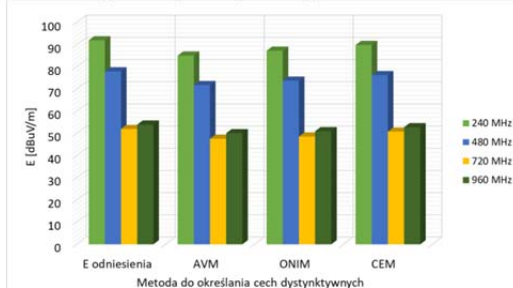


Rys. 3. Wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone metodą ONIM dla 4 wybranych częstotliwości pomiarowych

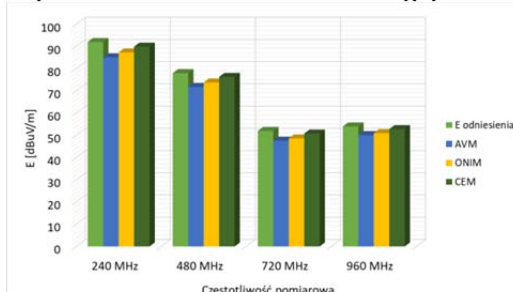


Rys. 4. Wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone metodą CEM dla 4 wybranych częstotliwości pomiarowych

Dokonując analizy danych otrzymanych z powyższych pomiarów można porównać trzy omówione metody do wyznaczania cech dystyngtywnych interfejsów PC w jednostkach centralnych PC. Poniżej na rys. 5 oraz rys. 6 pokazano porównanie wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone trzema metodami w odniesieniu do określonych wartości referencyjnych emisji promieniowanej dla wybranych częstotliwości.



Rys. 5. Wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone trzema metodami (AVM, ONIM, CEM) dla 4 wybranych częstotliwości pomiarowych w odniesieniu do wartości referencyjnych



Rys. 6. Wartości emisji promieniowanej pochodzącej od interfejsu USB2.0 podczas włączonej transmisji danych wyznaczone trzema metodami (AVM, ONIM, CEM) dla 4 wybranych częstotliwości pomiarowych w odniesieniu do wartości referencyjnych

Na podstawie porównania wyników emisji promieniowanej uzyskanych trzema metodami (AVM, ONIM, CEM) można stwierdzić, że najdokładniejszą metodą określania cech dystyngtywnych interfejsów sprzętowych w jednostkach centralnych PC jest metoda wykorzystująca emisję ujawniającą. Niestety wadą tej metody jest to, że pomiary są wykonywane w długim czasie i nie zawsze da się określić częstotliwości, na których występuje podwyższona wartość emisji promieniowanej.

Najmniej dokładną metodą określania cech dystyngtywnych okazała się metoda wykorzystująca wartości średnie emisji promieniowanej AVM. Jest to jednak najprostsza metoda pod względem pomiarowym.

Wnioski

W artykule przedstawiono i omówiono trzy opracowane metody określania cech dystyngtywnych interfejsów sprzętowych w jednostkach centralnych PC. Są to metoda wartości średniej, metoda włączania pojedynczych interfejsów oraz metoda wykorzystująca emisję ujawniającą. Dzięki przedstawionym metodom możliwa jest również ekstrakcja cech dystyngtywnych oraz określenie wzorcowych widm częstotliwościowych dla poszczególnych urządzeń informatycznych, które mogą posłużyć do analizy możliwości identyfikacji urządzeń informatycznych w systemach współmiejscowych w oparciu o emisję promieniowaną.

Najdokładniejszą metodą określania cech dystyngtywnych interfejsów sprzętowych w jednostkach centralnych PC jest metoda wykorzystująca emisję ujawniającą. Niestety wadą tej metody jest to, że pomiary są wykonywane w długim czasie i nie zawsze da się określić częstotliwości, na których występuje podwyższona wartość emisji promieniowanej. Ważne jest również dokładne dostrojenie odbiornika pomiarowego do badanej częstotliwości pomiarowej.

Najmniej dokładną metodą określania cech dystyngtywnych okazała się metoda wykorzystująca wartości średnie emisji promieniowanej AVM. Jest to jednak najprostsza metoda pod względem pomiarowym.

Metoda ONIM jest metodą, dzięki której możemy w dokładny sposób wyznaczyć wartości emisji promieniowanej dla poszczególnych interfejsów sprzętowych. Jest to metoda, w której pomiary są wykonywane pojedynczo dla poszczególnych interfejsów i stosunkowo szybko otrzymujemy wyniki pomiarów. Jest to duża zaleta tej metody, która staje się wadą w przypadku pomiarów dla dużej ilości interfejsów sprzętowych ponieważ czas wykonania pomiarów zależy od ilości analizowanych interfejsów sprzętowych.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Marian Wnuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, E-mail: marian.wnuk@wat.edu.pl; dr inż. Rafał Przesmycki, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, E-mail: rafal.przesmycki@wat.edu.pl

LITERATURA

- [1] Nowosielski, L., Wnuk, M., Ziółkowski, C. Interlaboratory tests in scope of measurement of radio disturbance, Conference Proceedings - 39th European Microwave Conference, EuMC 2009, Article number 5296286, Pages 288-291,
- [2] R. Przesmycki, L. Nowosielski, M. Bugaj, K. Piwowarczyk Stability analysis of emissivity levels of the mobile computers, MIKON 2012, 19th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, May 21 - 23, IEEE Xplore, Pages 555 - 558
- [3] Rafał Przesmycki Identyfikacja interfejsów sprzętowych w systemach współmiejscowych w oparciu o emisję promieniowaną, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 7/2014, str: 247-250,
- [4] Rafał Przesmycki, Marian Wnuk Metoda pomiaru wycieków elektromagnetycznych w oparciu o emisję promieniowaną jednostek centralnych PC, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 7/2014, str: 251-254,
- [5] Lars Middelstaedt ; Andreas Lindemann – "Methodology for analysing radiated EMI characteristics using transient time domain measurements, IET Power Electronics (Volume: 9, Issue: 10, 8 17 2016), Print ISSN: 1755-4535.
- [6] M. A. Azpúrua M. Pous F. Silva – "A Measurement System for Radiated Transient Electromagnetic Interference Based on General Purpose Instruments", Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE) International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2015.