

## Ocena skuteczności zakłóceń odzewowych w sieciach mobilnych

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy tematyki związanej z efektywnością zakłóceń celowych i odpornością na nie sieci radiowych. W pracy przedstawiono problematykę zakłócania łączności oraz stanowisko laboratoryjne umożliwiające badania skuteczności zakłóceń odzewowych. Na przykładzie systemu radiostacji osobistych, zaprezentowano sposób automatyzacji, metodykę oraz rezultaty badań. W podsumowaniu wskazano kierunki dalszych prac i możliwości rozbudowy prezentowanego stanowiska.

**Abstract.** This article concerns the issues related to efficiency of intentional jamming, of wireless networks, and their immunity against them. The work presents, the issue of communication jamming and laboratory test bed for response jamming effectiveness evaluation. The automation, methodology and example test results for personal radios are shown. In summary, directions for further work and possibilities of test bed development, are indicated. (**Evaluation of response jamming effectiveness in mobile networks**).

**Słowa kluczowe:** radiokomunikacja, walka elektroniczna, zakłócanie odzewowe, emulator kanału radiowego.

**Keywords:** radiocommunication, electronic warfare, response jamming, radio channel emulator.

### Wstęp

W przypadku działań militarnych, istotnym zagadnieniem jest zapewnienie stabilnego i wiarygodnego łącza, które umożliwi utrzymanie komunikacji pomiędzy poszczególnymi węzłami. Wraz z rozwojem systemów radiokomunikacyjnych następuje także unowocześnianie i modyfikowanie metod mających na celu kontrolę łączności radiowej przeciwnika. Jednym z aspektów tej kontroli jest zakłócanie transmisji, które może zostać wykorzystane do ochrony przed improwizowanymi ładunkami wybuchowymi IED (ang. Improvised Explosive Device), wyzwalanymi drogą radiową.

Idea zakłócania łączności polega na dostarczeniu odpowiedniej energii do odbiornika we właściwym czasie i miejscu. Współczynnik wymagany do efektywnego zakłócania oznaczany jako  $J/S$  (ang. Jamming to Signal ratio) określa stosunek mocy sygnału zakłócającego ( $J$ ) do mocy sygnału zakłócanego ( $S$ ) i wyrażany jest zazwyczaj w dB [1]. Według [2] wzór na określenie powyższego parametru składa się z następujących elementów:

$$(1) \quad J/S = ERP_J - ERP_S - L_J + L_S + G_{RJ} - G_R$$

gdzie:  $J/S$  – stosunek mocy sygnału zakłócającego do mocy sygnału zakłócanego na wejściu odbiornika (w dB);  $ERP_J$  – efektywna moc wypromieniowana przez urządzenie zakłócające (w dBm);  $ERP_S$  – efektywna moc wypromieniowana przez nadajnik (w dBm);  $L_J$  – straty propagacji od urządzenia zakłócającego do odbiornika (w dB);  $L_S$  – straty propagacji od nadajnika do odbiornika (w dB);  $G_{RJ}$  – zysk anteny odbiorczej w kierunku urządzenia zakłócającego (w dBi);  $G_R$  – zysk anteny odbiorczej w kierunku nadajnika (w dBi).

W celu skutecznego zakłócania sygnałów zmodulowanych analogowo, konieczne jest zwykle osiągnięcie wysokich wartości współczynnika  $J/S$  (wartość 10 dB uważana jest za wystarczającą). Dodatkowo w większości przypadków, sygnał zakłócający należy generować w trybie ciągłym (współczynnik wypełnienia równy 100%). W sytuacji częściowego zakłócania takich transmisji, odbiorca może być w stanie poprawnie odczytać wiadomość, uzupełniając brakujące fragmenty z kontekstu. Jak podają autorzy [2], w przypadku sygnałów zmodulowanych cyfrowo, przyjmuje się wartość  $J/S$  równą 0dB, jako wystarczającą do skutecznego zakłócenia transmisji, tzn. przy wartościach  $J/S \geq 0$ dB, bitowa stopa błędów (ang. Bit Error Rate) osiąga wartości bliskie 50%. Ponadto,

dla sygnałów cyfrowych, współczynnik wypełnienia sygnału zakłócającego równy 33% (w niektórych pozycjach literatury 20%), uznawany jest za dostateczny.

Wraz z rozwojem radiokomunikacji pojawiają się coraz bardziej wyszukane metody zakłócania. Urządzenie zakłócające może wykorzystywać różne możliwe strategie działania, gdyż każda technika charakteryzuje się pewnymi zaletami i wadami, które wskazują rozwiązanie najlepsze dla konkretnego zastosowania. Obszerny opis technik zakłócania można znaleźć w pozycji [3]. Jedną z nich jest, zastosowane w niniejszym opracowaniu, zakłócanie odzewowe. W takiej sytuacji system zakłócający musi być wyposażony w elementy skanujące wybrane zakresy pasma oraz spełniać wymagania czasowe wynikające z trybu pracy systemu zakłócanego. Sygnał zakłócający generowany jest tylko w momencie wykrycia niepożądanych emisji. Zastosowanie tej techniki nie wpływa negatywnie na pracę innych systemów pracujących w sąsiednich pasmach częstotliwości oraz minimalizuje energię potrzebną do generacji zakłóceń.

W artykule przedstawiono stanowisko laboratoryjne umożliwiające badania skuteczności zakłóceń odzewowych, w którym istotnymi elementami są: stacja detekcyjno – zakłócająca, emulator kanału radiowego oraz komputer sterujący zarządzający testami według określonego scenariusza. Na przykładzie wybranego systemu, zaprezentowano sposób automatyzacji oraz metodykę badań. W pierwszej fazie testów, przygotowany zestaw scenariuszy posłużył do określenia maksymalnych wartości tłumień pomiędzy danymi węzłami, biorąc pod uwagę czułość urządzeń odbiorczych. Wyznaczone charakterystyki umożliwiły następnie ocenę skuteczności zakłóceń w wybranych konfiguracjach położenia węzłów oraz dla różnych ustawień parametrów stacji zakłóceń. W podsumowaniu artykułu wskazano również kierunki i możliwości dalszej rozbudowy prezentowanego stanowiska.

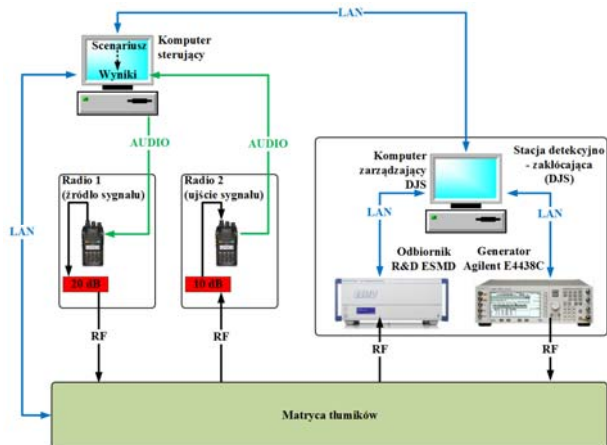
### Stanowisko laboratoryjne

Na rysunku 1 zaprezentowano stanowisko laboratoryjne umożliwiające badanie skuteczności zakłóceń odzewowych. Głównym elementem tego stanowiska jest komputer sterujący odpowiedzialny za realizację następujących funkcji:

- tworzenie scenariusza badań i zobrazowanie wyników,
- komunikacja ze stacją detekcyjno – zakłócającą DJS (ang. Detection and Jamming Station),
- obsługa portów audio połączonych z radiotelefonami

(generacja sygnału audio do radia 1 i odbiór sygnału audio z radia 2),

- obliczanie wartości nastaw tłumików i sterowanie matrycą.



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne do badania skuteczności zakłóceń odzewowych

Scenariusze badań zawierają głównie tłumienia pomiędzy poszczególnymi węzłami w kolejnych chwilach czasu, wynikające z ich wzajemnego położenia oraz parametry detektorów stacji zakłóceń. W celu obliczenia wartości tłumień w określonej konfiguracji, przyjęto model propagacji w wolnej przestrzeni (ang. Free Space Path Loss), opisany wzorem (2).

$$(2) \quad L = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)$$

Symbole występujące w powyższym równaniu oznaczają odpowiednio:  $L$  – tłumienie w decybelach [dB],  $d$  – odległość pomiędzy węzłami w metrach [m];  $\lambda$  – długość fali w metrach [m], w tym przypadku  $\lambda \approx 0,67$  m, co wynika z przyjęcia częstotliwości pracy radiotelefonów  $f \approx 446$  MHz.

Istotnym elementem stanowiska jest stacja detekcyjno – zakłócająca DJS, składająca się z komputera zarządzającego DJS, odbiornika oraz generatora, umożliwiającą realizację zakłóceń odzewowych. Szczegółowy opis wykorzystanej programowalnej stacji zakłóceń wraz ze strukturą sygnału zakłócającego i przykładową realizacją zadania odzewowego, znajdują się w pozycji [4]. Natomiast informacje dotyczące zastosowanej metody monitoringu widma i systemu detekcji można znaleźć w [5].

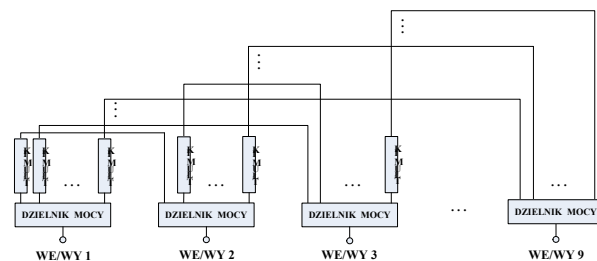
W przedstawionej na rysunku 1 konfiguracji stanowiska, jako źródło (radio 1) i ujście (radio 2) sygnału, wykorzystano radiotelefony MIDLAND CT790, pracujące na częstotliwości 446,00625 MHz z kodem CTCSS (ang. Continuous Tone Coded Squelch System) 127,3 Hz, umieszczone w szczelnych elektromagnetycznie skrzyniach. W celu automatyzacji testów, w radiu 1 zastosowano funkcję głosowego sterowania nadawaniem VOX (ang. Voice Operated eXchange lub Voice Operated Switch), dzięki czemu możliwe było wyzwolenie sygnału za pomocą komputera sterującego. Decyzja o zestawieniu lub braku połączenia pomiędzy radiotelefonami, podejmowana była na podstawie sygnału audio z radia 2. Zakłócanie było uznane za skuteczne, jeśli po wyzwoleniu radia 1, na wyjściu audio radia 2 nie pojawiał się sygnał.

Ostatnim elementem prezentowanego stanowiska jest matryca programowalnych tłumików, służąca do emulacji środowiska elektromagnetycznego pomiędzy poszczególnymi węzłami. W celu zabezpieczenia matrycy przed zbyt wysokim poziomem sygnału z radiotelefonów, zastosowano dodatkowe tłumiki widoczne na rysunku 1. Takie rozwiązanie spowodowało, obniżenie poziomu mocy

sygnału z radia 1 o 20 dB oraz pogorszenie czułości odbiorczej radia 2 o 10 dB, w porównaniu do ich rzeczywistych parametrów. W takiej sytuacji możliwe było także zrównanie poziomów mocy sygnału zakłócającego i sygnału nadawanego przez radio 1. Przyjęto, że wprowadzone modyfikacje, dotyczą bezpośrednio radiotelefonów i nie są częścią emulowanego kanału radiowego. W związku z tym, zapewnienie zawartych w scenariuszach badań, odpowiednich tłumień pomiędzy węzłami, realizowane jest w całości poprzez matrycę tłumików.

### Emulator kanału radiowego

Do emulacji kanału radiowego służy matryca tłumików. Urządzenie to zalicza się do dziedziny analogowych emulatorów kanału radiowego. Składa się z tłumików regulowanych programowo i dzielników mocy połączonych ze sobą, tworząc topologię Full Fan Out (Rys. 2). Matryca umożliwia badanie do 9 urządzeń radiowych w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 3 GHz. W wyniku tego powstaje 36 dwukierunkowych połączeń między radiami. Zakres regulacji tłumienia między wejściem/wyjściem wynosi od 38 dB do 125 dB, co umożliwia łączność z innymi urządzeniami jak i całkowite zerwanie połączenia [6].



Rys. 2. Ogólna budowa matrycy tłumików

Wykorzystując modele propagacyjne można tworzyć stacjonarne lub mobilne scenariusze, które definiują wartości tłumienia między radiami. Zamodelowanie tych wyników w emulatorze kanału radiowego wiąże się z przeliczeniem wartości poszczególnych tłumików. W tym celu należy wyznaczyć model matematyczny odpowiadający urządzeniu oraz algorytm do wyliczenia nastaw tłumików. Problemy te szczegółowo zostały opisane w następującej pozycji [7].

### Badania laboratoryjne

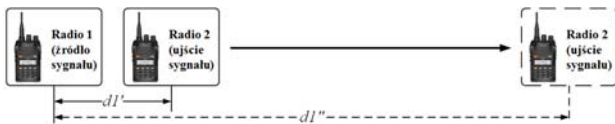
Na potrzeby realizacji celu niniejszego artykułu, przygotowano zestaw scenariuszy obejmujący następujące aspekty:

- badanie czułości radiotelefonów,
- badanie czułości detektorów stacji zakłóceń,
- oraz badanie skuteczności zakłóceń odzewowych.

W każdym przypadku, dla ustalonych parametrów, tzn. określonych wartości tłumień pomiędzy węzłami oraz wybranego progu detektorów, wykonano serię 30 prób. Prezentowane w dalszej części wykresy odebranych połączeń, prawdopodobieństwa detekcji oraz skuteczności zakłócania zostały unormowane do przedziału 0 – 100%.

### Scenariusz 1 – badanie czułości radiotelefonów

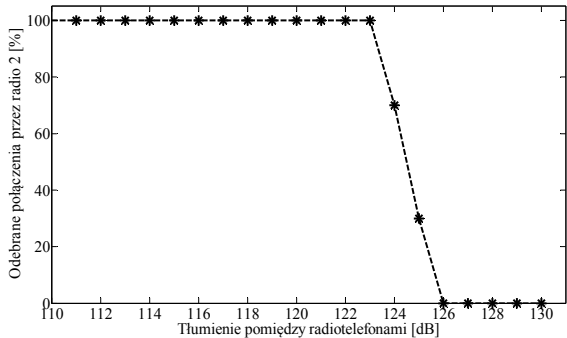
Pierwszym wykonanym testem było określenie czułości radiotelefonów, polegające na wyznaczeniu maksymalnej wartości tłumienia pomiędzy radiami, przy której możliwe jest zestawienie połączenia. Konfiguracja położenia węzłów w tym scenariuszu została przedstawiona na rysunku 3, gdzie odległość między radiem 1 i radiem 2 oznaczono jako  $d1'$  ( $d1''$  – odległość początkowa,  $d1'''$  – odległość końcowa).



Rys. 3. Scenariusz 1 - badanie czułości radiotelefonów

Jak wynika z rysunku 4, na wyjściu audio radia 2 nie pojawia się żaden sygnał przy wartościach tłumienia pomiędzy radiotelefonami powyżej 126 dB. Do stworzenia scenariuszy dla kolejnych testów, dla których założeniem jest konfiguracja radiotelefonów umożliwiającą zestawienie połączenia pomiędzy nimi, przyjęto maksymalne dopuszczalne wartości tego tłumienia poniżej 123 dB.

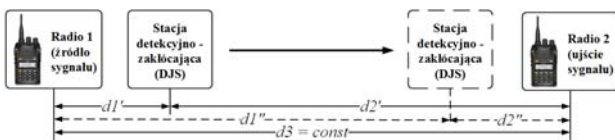
Odebrane połączenia w funkcji tłumienia pomiędzy radiotelefonami



Rys. 4. Odebrane połączenia w funkcji tłumienia pomiędzy radiotelefonami

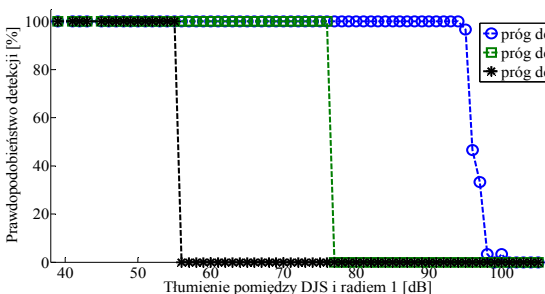
### Scenariusz 2 – badanie czułości detektorów stacji zakłóceń

Celem scenariusza 2 było wyznaczenie prawdopodobieństw detekcji dla różnych progów detektora energii zastosowanego w stacji zakłóceń DJS. Dla ustalonego dystansu  $d_3$  pomiędzy radiotelefonami, zmianie ulegały  $d_1$  i  $d_2$ , stanowiące odpowiednio odległości radia 1 i radia 2 od DJS (Rys. 5). Zaplanowane w ten sposób konfiguracje zostały następnie przeliczone, na podstawie wzoru (2), na odpowiednie wartości tłumień.



Rys. 5. Scenariusz 2 - badanie czułości detektorów stacji zakłóceń

Prawdopodobieństwo detekcji w funkcji tłumienia pomiędzy DJS i radiem 1



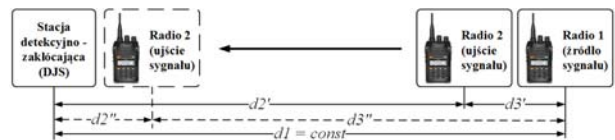
Rys. 6. Prawdopodobieństwo detekcji w funkcji tłumienia pomiędzy DJS i radiem 1

Rezultaty tego testu, dla trzech wartości progów detektora, zostały zaprezentowane na rysunku 6. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia maksymalnych wartości tłumień pomiędzy DJS i radiem 1, przy których możliwa jest

poprawna detekcja emisji sygnału z nadajnika (radio 1). Jest to istotny parametr wpływający na konfigurację połączeń węzłów w kolejnych dwóch scenariuszach.

### Scenariusz 3 – badanie skuteczności zakłóceń odwzajemnych

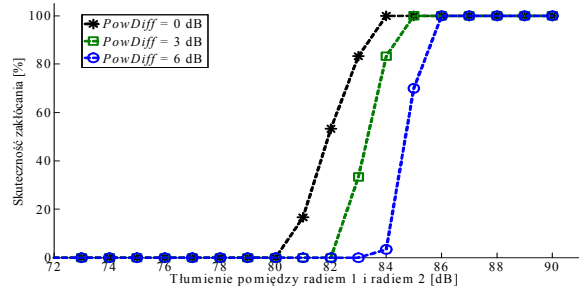
Kolejny scenariusz, zakłada stałą odległość pomiędzy DJS, a radiem 1 ( $d_1 = \text{const}$ ), wyznaczoną na podstawie maksymalnego tłumienia pomiędzy tymi węzłami. W celu uzyskania jak największego dystansu, wybrano próg detektora równy 5. Na rysunku 7 przedstawiono kierunek zmian położenia radia 2, przemieszczającego się w kierunku stacji detekcyjno – zakłócającej.



Rys. 7. Scenariusz 3 - badanie skuteczności zakłóceń odwzajemnych

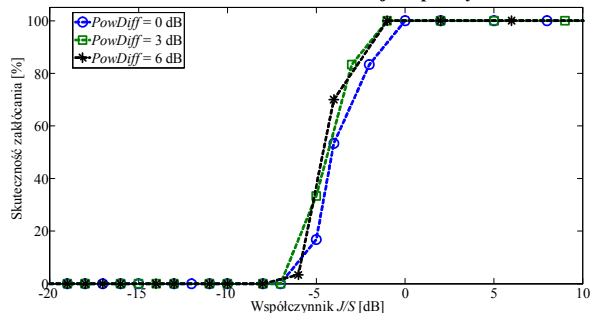
Podczas tego testu, przeprowadzono badania skuteczności zakłócania dla trzech wariantów stosunku mocy sygnału generowanego przez radio 1 i sygnału zakłócającego (Rys. 8). Jako odniesienie, przyjęto równy poziom mocy w obu węzłach ( $PowDiff = 0 \text{ dB}$ ). Kolejne dwa przebiegi na rysunku 8 uzyskano w przypadku zmniejszenia mocy sygnału zakłócającego o ok. 3 dB ( $PowDiff = 3 \text{ dB}$ ) oraz ok. 6 dB ( $PowDiff = 6 \text{ dB}$ ). Wrz z redukcją tej mocy, zakłócanie jest skuteczne przy wyższych wartościach tłumienia pomiędzy radiami.

Skuteczność zakłócania w funkcji tłumienia pomiędzy radiami



Rys. 8. Skuteczność zakłócania w funkcji tłumienia pomiędzy radiami dla scenariusza 3

Skuteczność zakłócania w funkcji współczynnika J/S



Rys. 9. Skuteczność zakłócania w funkcji współczynnika J/S dla scenariusza 3

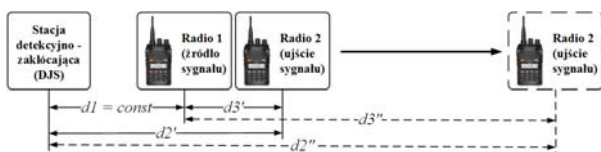
Na rysunku 9 przedstawiono wykres skuteczności zakłócania w funkcji współczynnika  $J/S$ , wyrażającego stosunek mocy sygnału zakłócającego do mocy sygnału zakłócanego. W związku z przewodowym połączeniem

węzłów, parametry związane z zyskiem anten występujące we wzorze (1), zostały pominięte.

Jak wynika z rysunku 9, 100% skuteczność zakłócenia uzyskano już dla wartości  $J/S \geq 0$  dB.

#### Scenariusz 4 – badanie skuteczności zakłóceń odzewowych

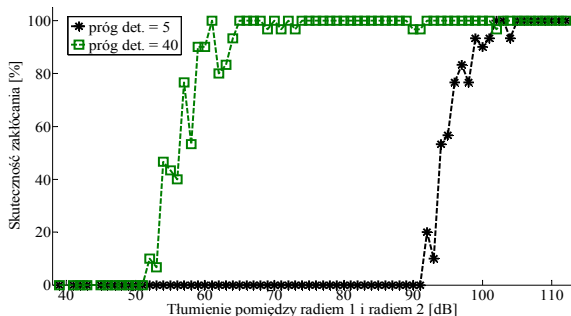
Ostatnia, badana konfiguracja położenia węzłów została zaprezentowana na rysunku 10. W tym przypadku testy wykonano, przy stałej odległości  $d1$ , natomiast radio 2 zmieniało swoją lokalizację oddalając się od obu pozostałych węzłów. Testy wykonano dla dwóch wartości odległości  $d1$ , stosując odpowiednie progi detekcji. Dla progu detektora równego 5, przyjęto odległość odpowiadającą 90 dB tłumienia, natomiast dla progu 40, odległość odpowiadającą 50 dB tłumienia (wartości wyznaczone na podstawie charakterystyk z rysunku 6).



Rys. 10. Scenariusz 4 - badanie skuteczności zakłóceń odzewowych

Wykresy skuteczności zakłócenia w funkcji tłumienia pomiędzy radiami oraz w funkcji współczynnika  $J/S$  przedstawiono na rysunkach 11 – 13.

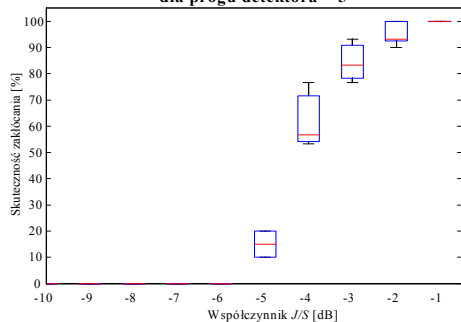
#### Skuteczność zakłócenia w funkcji tłumienia pomiędzy radiami



Rys. 11. Skuteczność zakłócenia w funkcji tłumienia pomiędzy radiami dla scenariusza 4

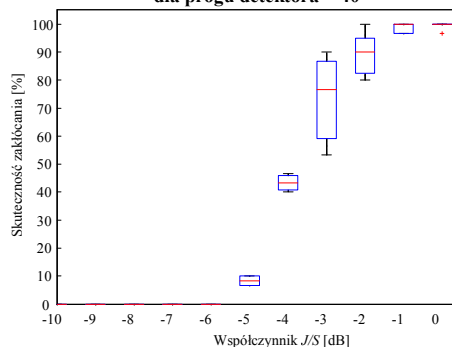
W tym przypadku parametr  $PowDiff$  wynosi 0 dB. Podobnie jak w poprzednim teście, wartości  $J/S$  zbliżające się do 0 dB, są wystarczające do skutecznego zakłócenia. Niejednoznaczność określenia dokładnej wartości skuteczności zakłócenia dla wybranego  $J/S$  może wynikać z ograniczonej serii pomiarów, gdyż jak wcześniej wspomniano, procentową skuteczność określano na podstawie serii 30 prób.

#### Skuteczność zakłócenia w funkcji współczynnika $J/S$ dla progu detektora = 5



Rys. 12. Skuteczność zakłócenia w funkcji współczynnika  $J/S$  dla scenariusza 4 (dla progu detektora = 5)

#### Skuteczność zakłócenia w funkcji współczynnika $J/S$ dla progu detektora = 40



Rys. 13. Skuteczność zakłócenia w funkcji współczynnika  $J/S$  dla scenariusza 4 (dla progu detektora = 40)

#### Podsumowanie i wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono stanowisko laboratoryjne służące do pomiarów i oceny skuteczności zakłóceń w sieciach radiowych. Na przykładzie wybranego systemu, tzn. radiotelefonów PMR (ang. Private Mobile Radio) pracujących na wybranym kanale z ustalonym kodem CTCSS, zaprezentowano automatyzację, metodykę oraz rezultaty badań. Zaproponowany zestaw scenariuszy, stanowi logiczny ciąg testów, w którym wyznaczone charakterystyki są wykorzystywane w kolejnych badaniach.

Przedstawione stanowisko, umożliwia dalszą rozbudowę mającą na celu wykonywanie bardziej złożonych testów. Przede wszystkim może być ono wykorzystane do testowania zarówno innych systemów, jak też różnych stacji detekcyjno – zakłócających. Ponadto, dysponując rozkładem tłumień pomiędzy węzłami uwzględniającym, np. ukształtowanie terenu oraz budynku, możliwe jest stworzenie scenariuszy i przebadanie zachowania całego systemu w konkretnym środowisku. Poza tym, w celu wierniejszego i bardziej realistycznego odwzorowania sytuacji elektromagnetycznej, należy rozważyć wprowadzanie dodatkowych węzłów, np. emulujących pracę innych użytkowników widma, poprzez wykorzystanie większej liczby wejść/wyjść emulatora kanału radiowego. Takie rozwiązanie, daje również możliwość oceny parametrów DJS, takich jak: selektywność detektorów czy selektywność zakłócenia (wpływ zakłócenia na pracę innych systemów).

#### LITERATURA

- [1] Graham A., Communications, Radar And Electronic Warfare, Wiley, (2011), 95-100
- [2] Adamy D.L., Tactical Battlefield Communications Electronic Warfare, Artech House, (2009), 251-273
- [3] Poisel R., Modern Communications Jamming Principles and Techniques, Artech House, (2011), 467-502
- [4] Malon K., Łopatka J., Demonstrator programowalnej stacji zakłóceń, Biuletyn WAT, (2013), nr. 4, 63-75
- [5] Kryk M., Łopatka J., Efektywna metoda monitoringu widma do wykrywania sygnałów wyzwalających IED, Biuletyn WAT, (2013), nr. 2, 87-99
- [6] FW Industries [http://www.ifwindustries.co/products/50PMA\\_072\\_Transceiver\\_Test\\_System\\_from\\_JFW\\_Industries-1298-137.html](http://www.ifwindustries.co/products/50PMA_072_Transceiver_Test_System_from_JFW_Industries-1298-137.html)
- [7] Kryk M., Łopatka J., RF Switch Matrix Control Optimization for MANET Simulation, Karlsruhe Workshop on Software Radios, (2014)

**Autorzy:** dr hab. inż. Jerzy Łopatka – prof. WAT, E-mail: [jlopotka@wat.edu.pl](mailto:jlopotka@wat.edu.pl); mgr inż. Krzysztof Malon, E-mail: [kmalon@wat.edu.pl](mailto:kmalon@wat.edu.pl); mgr inż. Michał Kryk, E-mail: [mkryk@wat.edu.pl](mailto:mkryk@wat.edu.pl); Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Telekomunikacji Wydziału Elektroniki, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49.