

## Ocena efektywności zakłóceń radiolokacyjnych

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia autorską metodę dotyczącą oceny efektywności zakłóceń radiolokacyjnych. Zawiera podstawowe zależności matematyczne niezbędne do obliczania minimalnego zasięgu zakłóceń, po przekroczeniu którego zakłócany radar jest ponownie w stanie wykryć śledzony obiekt. Dokonano obliczeń numerycznych efektywności zakłóceń radiolokacyjnych dla kilku wariantów danych parametrów wybranych radarów samolotowych i stacji zakłóceń. Wyniki obliczeń przedstawiono na odpowiednich wykresach. Skuteczna realizacja aktywnych zakłóceń radiolokacyjnych w systemie walki elektronicznej zależy od dokładnej znajomości parametrów technicznych zakłócanego radaru, nadajnika zakłóceń, odległości między nimi i założonej wartości współczynnika degradacji.

**Abstract.** The article presents the author's method of solving a problem resulting from the necessity of calculating the radar jamming's effectiveness. It contains basic mathematical formulas for the energy criterion needed to calculate the minimal jamming distance after which the radar is again capable to detect a tracked object. Numerical calculations are made for some examples of different radar and jammer parameters. The results of these calculations are presented on the corresponding figures. The realization of effective radar jamming in the electronic warfare system depends mainly on the precise knowledge of the airborne radar and jammer's technical parameters, the distance between them and assumed value of a coefficient degradation. (**The estimation of radar jamming effectiveness**).

**Keywords:** radar, jamming, coefficient of degradation, effectiveness of jamming.

**Słowa kluczowe:** radar, zakłócanie, współczynnik degradacji, efektywność zakłóceń.

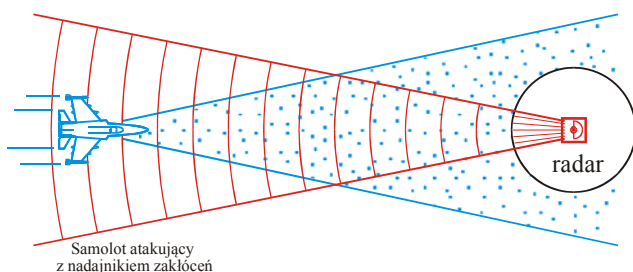
doi:10.12915/pe.2014.09.44

### 1. Wstęp

Zakłócanie aktywne radaru polega na wyprośnieniu w przestrzeń przez stację zakłóceń sygnału zakłócającego na częstotliwości dostrojonej do częstotliwości roboczej pracy radaru i w jego kierunku, który na wejściu odbiornika radaru nałoży się na sygnał użyteczny. Aby zakłócenia radiolokacyjne były skuteczne należy zapewnić odpowiednio wysoki stosunek natężenia pola elektromagnetycznego pochodzącego od stacji zakłóceń  $P_{zwe}$  do natężenia pola elektromagnetycznego sygnału użytecznego (odbitego od celu)  $P_{swe}$  [1, 2, 3].

Bardzo efektywnym rodzajem zakłóceń aktywnych są zakłócenia impulsowe odzewowe. Są to jednokrotne lub wielokrotne impulsy wysokiej częstotliwości, promieniowane synchronicznie z sygnałem użytecznym radaru z pewnym opóźnieniem względem tego sygnału. Impulsy te odpowiadają kształtem, czasem trwania i mocą impulsom odbitym od celu, odbieranym przez radar. Podczas działania zakłóceń na ekranie wskaźnika radarowego pojawia się duża liczba fałszywych znaków celów, które znajdują się na różnych odległościach i kierunkach, w wyniku czego prawie niemożliwe staje się wykrycie i odróżnienie celu prawdziwego od fałszywego. Pogarsza to rozróżnialność i dokładność określania współrzędnych celu.

Najczęściej stosuje zakłócanie przy pomocy nadajników zakłóceń ochrony indywidualnej instalowanych na statkach powietrznych, (rys. 1).



Rys.1. Zakłócanie przy pomocy nadajników zakłóceń ochrony indywidualnej samolotów

Polega ono na tym, że samolot wykonujący zadanie posiada nadajnik zakłóceń, przy pomocy którego zakłóca pracę radaru ochraniając siebie samego przed wykryciem przez środki radioelektroniczne przeciwnika.

### 2. Ocena skuteczności zakłóceń

W zależności od postaci sygnału zakłócającego i rodzaju zakłócanego urządzenia stosuje się różne kryteria oceny efektywności obezwładniania radiolokacyjnego. Ważnym parametrem energetycznym sygnałów zakłócających jest tzw. współczynnik degradacji  $k_d$ , zwany też miarą energetyczną jakości sygnałów zakłócających.

Efektywność zakłóceń zależy od stosunku mocy zakłócenia do mocy sygnału, tj. zakłócenie może wprowadzać zadaną stratę informacji przy spełnieniu warunku

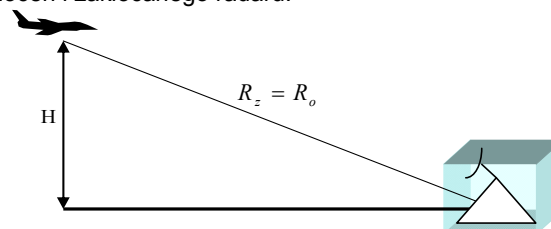
$$(1) \quad k = \frac{P_{zwe}}{P_{swe}} \geq k_d$$

gdzie:  $k_d$  - współczynnik degradacji urządzenia radiolokacyjnego przez dany typ zakłóceń,  $k$  - stosunek mocy zakłócenia  $P_{zwe}$  i mocy sygnału użytecznego  $P_{swe}$  na wejściu odbiornika radaru.

Współczynnik  $k$  określa wartość stosunku mocy zakłóceń do mocy sygnału, odpowiadającą danej odległości  $R_z$  między nadajnikiem zakłóceń i zakłócanym radarem, rys.2.

Współczynnik  $k_d$  określa minimalnie niezbędną wartość tego stosunku zapewniającą określoną stratę informacji. Zależy on od parametrów nadajnika zakłóceń, zakłócanego radaru i ich wzajemnego położenia.

Do oceny skuteczności zakłóceń należy zatem ustalić zależność współczynnika  $k$  od parametrów nadajnika zakłóceń i zakłócanego radaru.



Rys.2. Nadajnik zakłóceń zamontowany na samolocie

Do opisu nadajnika zakłóceń zainstalowanego na samolocie wykorzystuje się następujące parametry:  $P_z$  - moc nadajnika zakłóceń z uwzględnieniem strat w linii przesyłowej [kW],  $G_z$  - zysk kierunkowy anteny nadajnika

zakłóceń,  $\Delta f_z$  - efektywna szerokość widma sygnału zakłócającego [MHz],  $\gamma_z$  - współczynnik uwzględniający różnicę w polaryzacji anten nadajnika zakłóceń i zakłócanego radaru,  $R_z$  - odległość między samolotem (nosicielem nadajnika zakłóceń) a radarem [km],  $R_o$  - odległość między samolotem ochranianym a radarem [km],  $\delta_o$  - skuteczna powierzchnia odbicia (SPO) samolotu ochranianego. Jeśli nadajnik zakłóceń znajduje się bezpośrednio na osłanianym samolocie, to  $R_z=R_o$ .

Parametry zakłócanego radaru są następujące:  $P_z$  - moc zakłócanego radaru z uwzględnieniem strat w linii przesyłowej [kW],  $P_s$  - moc zakłócanego radaru z uwzględnieniem strat w linii przesyłowej [kW],  $G_s$  - zysk kierunkowy anteny zakłócanego radaru,  $P_s G_s$  - potencjał energetyczny radaru (efektywna promieniowana moc radaru),  $\Delta f_{od}$  - szerokość pasma przepuszczania liniowej części odbiornika zakłócanego radaru [MHz],  $k_d$  - współczynnik degradacji radaru dla zadanego sygnału zakłócającego,  $A_r$  - apertura (powierzchnia skuteczna) anteny zakłócanego radaru,  $F^2(\beta_z, \varepsilon_z)$  - funkcja opisująca znormalizowaną charakterystykę kierunkową zakłócanego radaru [1, 2].

Apertura anteny zakłócanego radaru określona jest zależnością:

$$(2) \quad A_r = \frac{G_s \lambda^2}{4\pi}$$

Na wejście odbiornika radarowego doprowadza się jedynie część mocy zakłóceń, określoną stosunkiem szerokości widma sygnału zakłócającego  $\Delta f_z$  i pasma przepuszczania odbiornika zakłócanego radaru  $\Delta f_{od}$ . Przy założeniu prostokątnej aproksymacji widma sygnału zakłócającego i amplitudowo-częstotliwościowej charakterystyki liniowej części odbiornika, moc zakłóceń na wejściu odbiornika w granicach pasma przepuszczania jego liniowej części można określić w następujący sposób:

$$(3) \quad P_{z_{we}} = \frac{P_z G_z}{4\pi R_z^2} A_r \gamma_z \frac{\Delta f_{od}}{\Delta f_z} F^2(\beta_z, \varepsilon_z) \cdot 10^{-0,1\alpha R_z}$$

gdzie:  $\alpha$  - współczynnik uwzględniający osłabienie sygnału w atmosferze [dB/km] przy jego rozchodzeniu się tylko w jedną stronę.

W analogiczny sposób można uzyskać wyrażenie na moc sygnału użytecznego na wejściu odbiornika zakłócanego radaru:

$$(4) \quad P_{s_{we}} = \frac{P_s G_s}{4\pi R_o^2} \frac{\sigma_o}{4\pi R_o^2} \cdot 10^{-0,2\alpha R_o}$$

Podstawiając zależności (4) i (3) w (1) otrzymamy poszukiwane wyrażenie dla stosunku mocy zakłóceń do mocy sygnału użytecznego na wejściu odbiornika zakłócanego radaru w postaci:

$$(5) \quad k = \frac{P_{z_{we}}}{P_{s_{we}}} = \frac{4\pi P_z G_z \gamma_z R_o^4 \Delta f_{od}}{P_s G_s \sigma_o R_z^2 \Delta f_z F^2(\beta_z, \varepsilon_z) \cdot 10^{0,1\alpha(2R_o - R_z)}}$$

Wyrażenie (5) nazywa się *równaniem przeciwdziałania radiolokacyjnego dla zakłóceń czynnych*. Pozwala ono określić wartość stosunku mocy zakłóceń do mocy sygnału użytecznego w zależności od parametrów zakłócanego radaru, nadajnika zakłóceń i ich wzajemnego rozmieszczenia w przestrzeni.

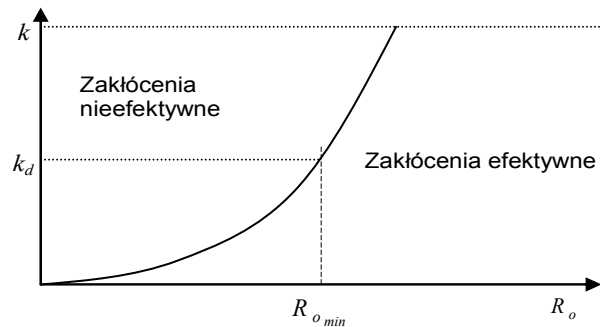
Podstawiając  $k=k_d$  do równania i odpowiednio je

przekształcając otrzymamy zależność na minimalny zasięg zakłócania radaru  $R_{o_{min}}$  (odległość, po przekroczeniu której zakłócanie staje się nieefektywne) w warunkach zakłóceń w postaci ogólnej:

(6)

$$R_{o_{min}} = \left( \frac{k_d P_s G_s \sigma_o R_z^2 \Delta f_z}{4\pi P_z G_z \gamma_z F^2(\beta_z, \varepsilon_z) 10^{0,1\alpha(2R_o - R_z)} \Delta f_{od}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Obszar, w którym  $k \geq k_d$  (zakłócanie jest skuteczne) nazywa się strefą zakłóceń.



Rys.3. Zależność zasięgu zakłóceń od wartości parametru  $k_d$

Przy przeprowadzaniu praktycznych obliczeń konieczna jest znajomość poziomu listków bocznych w stosunku do listka głównego charakterystyki kierunkowej. Poziom listków bocznych i ich struktura należą do indywidualnych cech radaru i zależą od rozmieszczenia anteny. Przy orientacyjnych obliczeniach można zakładać poziom pierwszego i drugiego listka bocznego odpowiednio o 20 i 30 dB mniejszy od poziomu listka głównego charakterystyki kierunkowej.

Przy zmniejszaniu się odległości między nadajnikiem zakłóceń na samolocie a radarem na ziemi, skuteczność zakłóceń maleje (stosunek zakłócenie/sygnał zmniejsza się). Jest to spowodowane tym, że przy zbliżaniu się samolotów do radaru, moc sygnału odbitego od samolotu ochranianego wzrasta szybciej od mocy sygnału zakłócającego na wejściu odbiornika radarowego, ponieważ moc sygnału odbitego od ochranianego samolotu jest odwrotnie proporcjonalna do  $R_o^4$ , a moc sygnału zakłócającego do  $R_z^2$ . Wzory te są słuszne, jeżeli odbiornik radarowy nie jest przesterowany zakłóceniami.

### 3. Analiza zależności matematycznych

Dla metody zakłóceń, kiedy nadajnik zakłóceń znajduje się na osłanianym obiekcie (w tym przypadku samolocie) odległości *radar – nadajnik zakłóceń* i *radar – osłaniany obiekt* są identyczne [1, 2].

W tym przypadku możemy przyjąć, że:  $\sigma_o$  - skuteczna powierzchnia odbicia (SPO) samolotu ochranianego (zarazem nosiciela nadajnika zakłóceń),  $R_z = R_o$  - odległość między samolotem ochranianym (zarazem nosicielem nadajnika zakłóceń) a radarem na ziemi [km] oraz funkcja opisująca znormalizowaną charakterystykę kierunkową zakłócanego radaru  $F^2(\beta_z, \varepsilon_z) = 1$ .

Po zastosowaniu powyższych uproszczeń wzór (5) sprowadza się do postaci:

$$(7) \quad k = \frac{P_{z_{we}}}{P_{s_{we}}} = \frac{4\pi P_z G_z \gamma_z \Delta f_{od}}{P_s G_s \sigma_o \Delta f_z} R_z^2 \cdot 10^{0,1\alpha R_z}$$

Jeżeli pominiąć tłumienie fal w atmosferze ( $\alpha=0$ ), to wzór (6) po podstawieniu  $k \geq k_d$  można uprościć do postaci:

$$(8) \quad R_{o_{min}} = \sqrt{\frac{k_d P_s G_s \sigma_o \Delta f_z}{4 \pi P_z G_z \gamma_z \Delta f_{od}}}$$

#### 4. Wyniki obliczeń

Dla założonych sytuacji zostały wykonane obliczenia zasięgu zakłóceń  $R_z = f(k)$ . Obliczenia zostały wykonane dla wybranych stacji zakłóceń i radarów instalowanych obecnie na pokładach samolotów [4, 5]. Parametry stacji zakłóceń zamieszczone są w tabeli 1, natomiast parametry radarów w tabeli 2.

Tab.1. Podstawowe parametry samolotowych nadajników zakłóceń

Lp.	Nazwa	Częstotliwość nośna [GHz]	Moc sygnału zakłóceń [W]
1	AN/ALQ-101	2÷20	200
2	ULQ-21	8.5 ÷ 10.3	400 przy niskim zysku; 1260 przy wysokim zysku antenowym
3	ALQ-176	1.2÷ 1.45 2.7 ÷ 3.4	650
4	CROSSJAM 2000	9.0 ÷ 10.5	2000
5	AN/ALQ-119	2÷10	150 (zakłócenia szumowe) 300 (zakłócenia impulsowe)
6	Erijammer 300	6÷20	300

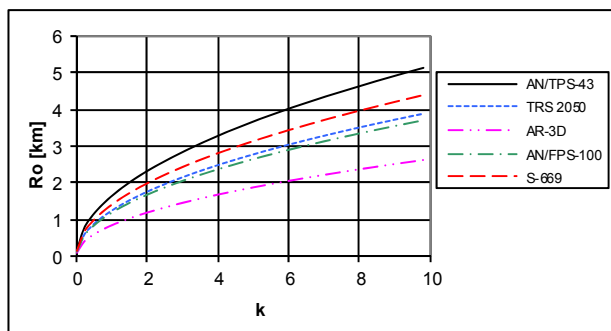
Obliczenia wykonane zostały dla różnych wartości SPO osłanianego samolotu. Wartości SPO zostały przyjęte dla samolotu: myśliwskiego -  $5 m^2$ , myśliwsko- bombowego -  $20 m^2$  i transportowego -  $70 m^2$ .

Tabela 2. Podstawowe parametry radarów samolotowych użytych do obliczeń

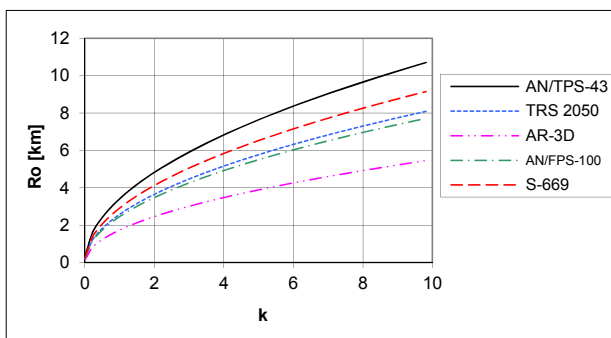
Lp.	Nazwa radaru	Częstotliwość nośna [GHz]	Moc Zasięg wykrywania
1	AN/TPS-43	2.905÷3.09	$P=2.2 \text{ MW}$ $R=500 \text{ km}$
2	TRS 2050	1.250÷1.350	$P=2.2 \text{ MW}$ $R=375 \text{ km}$
3	AR-3D	2.9÷3.1	$P=1.1 \text{ kW}$ $R=330 \text{ km}$
4	AN/FPS-100	1.250÷1.350	$P=2 \text{ MW}$
5	S-669	2.740÷2.900	$P=2.25 \text{ MW}$ $R=470 \text{ km}$
6	S-613	5.3÷5.34 5.48÷5.52	$P=1 \text{ MW}$ $R=230 \text{ km}$
7	TRS-2300	9÷12.5	$P=200 \text{ kW}$ $R=75 \text{ km}$
8	AN/TPS-10D	9.23÷9.404	$P=250 \text{ kW}$ $R=200 \text{ km}$
9	Merkury-2	9÷12.5	$P=250 \text{ kW}$
10	Cyrano-3	9÷12.5	$P=200 \text{ kW}$

Wyniki obliczeń przedstawione są na rysunkach 4÷12. Wykresy przedstawiają minimalną odległość zakłóceń  $R_o$  dla różnych wartości parametru  $k$ . Aby określić granice zakłóceń  $R_{o_{min}}$  dla założonej sytuacji należy odczytać ją z wykresu podstawiając w miejsce  $k$  współczynnik degradacji  $k_d$  dla danego typu radaru.

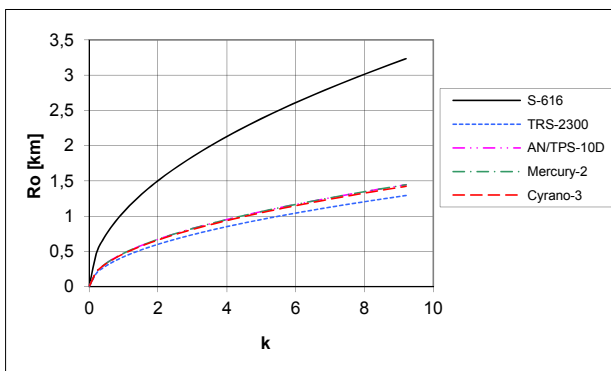
Obliczenia wykonywane są na podstawie zadanych wartości parametrów stacji zakłóceń i radaru, Tabela 3, można prześledzić zależności zachodzące w trakcie zmian wartości wybranych parametrów.



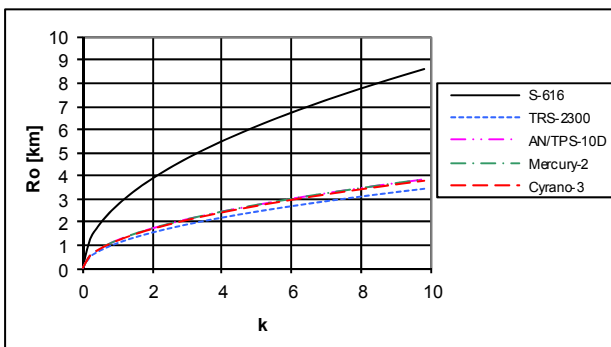
Rys.4. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji AN/ALQ-176 i  $\sigma_o$  samolotu równej  $5 m^2$



Rys.5. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji AN/ALQ-119 i  $\sigma_o$  samolotu równej  $5 m^2$

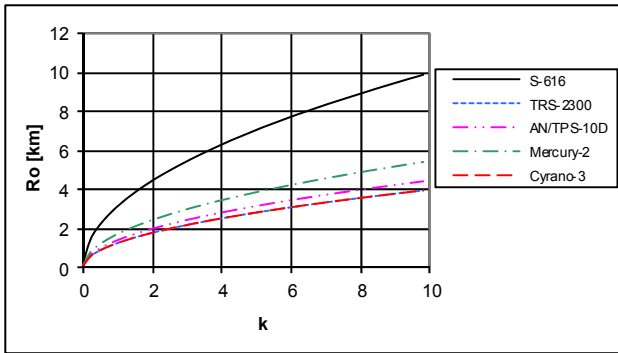


Rys. 6. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji Crossjam 2000 i  $\sigma_o$  samolotu równej  $20 m^2$

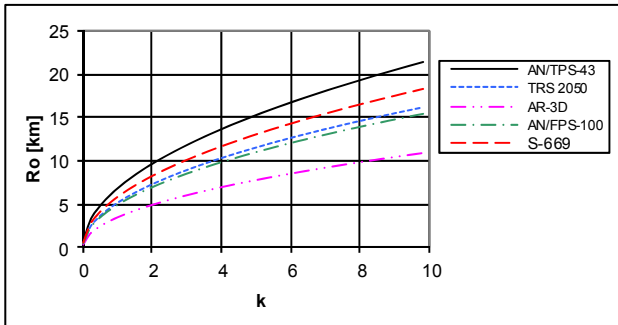


Rys.7. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji Erijammer 300 i  $\sigma_o$  samolotu równej  $20 m^2$

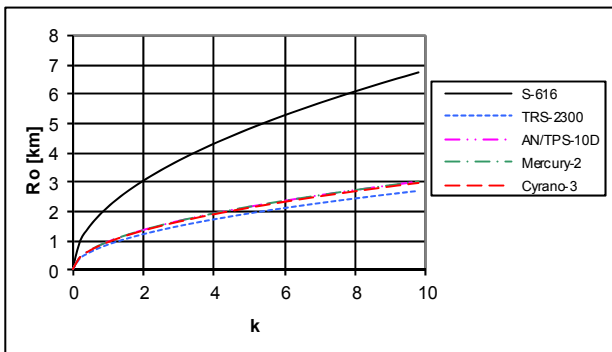
Obliczenia zostały wykonane przy założeniu, że stacja zakłóceń znajduje się w miejscu stania obiektu. Każdy wykres przedstawia zmianę zasięgu zakłócania w zależności od zmiany dwóch parametrów.



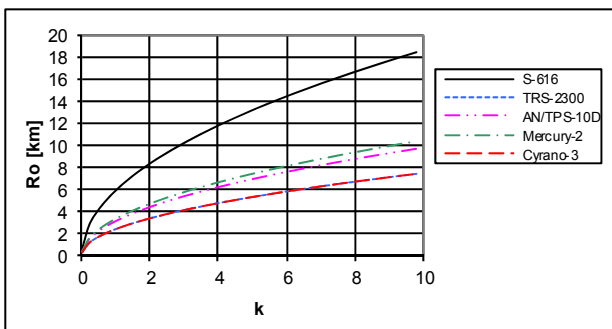
Rys. 8. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji ULQ-21 i  $\sigma_0$  samolotu równej  $20 \text{ m}^2$



Rys. 9. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji AN/ALQ-119 i  $\sigma_0$  samolotu równej  $20 \text{ m}^2$



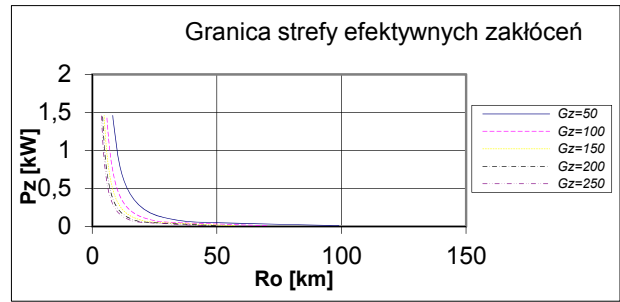
Rys. 10. Minimalne odległości zakłóceń radarów stacji ULQ-21 i  $\sigma_0$  samolotu równej  $70 \text{ m}^2$



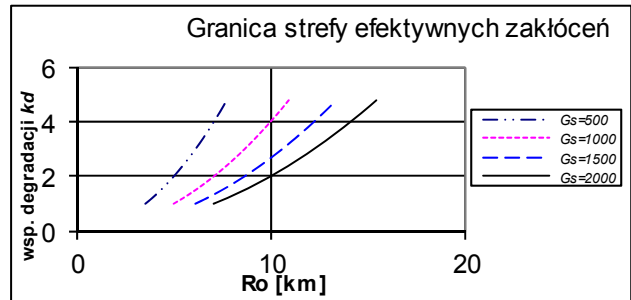
Rys. 11. Minimalne odległości zakłóceń radarów dla stacji DLQ-31C i  $\sigma_0$  samolotu równej  $70 \text{ m}^2$

Tabela 3. Parametry radaru i stacji zakłóceń

Parametry radaru	Parametry stacji zakłóceń	Inne parametry
$P_s = 160 \text{ kW}$	$P_z = 0.6 \text{ kW}$	$\delta_0 = 70 \text{ m}^2$
$G_s = 2000$	$G_z = 165$	$\gamma_z = 0.5$
$\Delta f_{od} = 3 \text{ MHz}$	$\Delta f_z = 4 \text{ MHz}$	
$K_d = 1$		



Rys. 14. Wykres zmian granicy efektywnych zakłóceń przy zmianie mocy stacji zakłóceń  $P_z$  i przy różnych wartościach zysku energetycznego nadajnika zakłóceń  $G_z$



Rys. 15. Wykres zmian granicy strefy zakłóceń przy zmianie współczynnika degradacji  $k_d$  dla różnych wartości zysku energetycznego anteny radaru  $G_s$

#### 4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wybór najlepszego wariantu obliczeń jest bardzo trudnym i złożonym problemem. Przede wszystkim obliczenia muszą być przeprowadzane dla danych przypominających jak najbardziej rzeczywiste parametry środowiska elektromagnetycznego. Musimy więc dysponować bazą danych, która będzie zawierała podstawowe parametry radarów i stacji zakłóceń [4, 5]. Tworzy się ją na podstawie danych z pomiarów parametrów sygnałów radarowych pochodzących z rozpoznania elektronicznego.

Reasumując, skuteczność zakłóceń zależy od tego, czy dysponujemy wystarczająco dokładnymi danymi odnośnie wartości parametrów czasowo-częstotliwościowych radarów. Dysponując takimi danymi możemy odpowiednio dobrać parametry sygnału zakłócającego, takie jak częstotliwość, moc nadawana, pasmo, rodzaj zakłóceń, a potem wybrać odpowiedni wariant zakłóceń, który zapewni najlepszą ich efektywność.

#### LITERATURA

- [1] Adamy L. D.: EW 102: A Second Course in Electronic Warfare, Artech House, Boston • London, 2004.
- [2] Van Brunt Leroy B., *Applied ECM*, Vol. I, II, III. EW Engineering, Inc P.O. Box 28, Duun Lorgin, VA22027, USA, 1991.
- [3] *Walka elektroniczna w Siłach Powietrznych. Podręcznik*, Wyd. Dowództwo Sił Powietrznych, Zarząd Rozpoznania i WE, Warszawa, 2010.
- [4] Matuszewski J., Metody tworzenia wzorców klasy dla celów rozpoznawania źródeł emisji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr 5, 104-108
- [5] Matuszewski J., The Radar Signature in Recognition System Database, *Conf. Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2012*, Warsaw, (2012), vol. 2, 617-622

**Autor:** dr inż. Jan Matuszewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, E-mail: jan.matuszewski@wat.edu.pl