

Barbara SZYMANIK
Paweł LESIECKI

TERMOGRAFIA PODCZERWONA Z WYMUSZENIEM MIKROFALOWYM W ZASTOSOWANIU DO WYKRYWANIA NIEMETALICZNYCH MIN LĄDOWYCH

STRESZCZENIE *Niniejszy artykuł prezentuje nową metodę wykrywania min lądowych (zarówno przeciwczołgowych, jak i przeciwpiechotnych). Oparta na połączeniu objętościowego grzania mikrofalowego oraz termografii podczerwonej technika pozwala na otrzymanie sygnatur termicznych płytko położonych obiektów niemetalicznych.*

Słowa kluczowe: *termografia podczerwona, wykrywanie min lądowych*

1. WSTĘP

Obecnie najszerzej stosowanym urządzeniem do wykrywania min lądowych jest, wynaleziony w XIX wieku, wykrywacz metali. Urządzenie to charakteryzuje się dużą skutecznością oraz wygodą w użytkowaniu, jednakże nie sprawdza się w przypadku bardzo popularnych min niemetalicznych [5].

mgr Barbara SZYMANIK
e-mail: szymanik@zut.edu.pl

mgr inż. Paweł LESIECKI
e-mail: apl1@op.pl

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 241, 2009

Specjalnie trenowane psy oraz inne zwierzęta, choć pozwalają na detekcję nawet bardzo małych ilości materiałów wybuchowych, wymagają jednak długotrwałego treningu i znakomitej współpracy z człowiekiem [5]. W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana nowa metoda wykrywania niemetalicznych min lądowych, oparta na aktywnej termografii podczerwonej wzbudzanej mikrofalami [1, 6]. Podgrzewanie gruntu mikrofalami o częstotliwości 2,45 GHz o mocy około 1 kW pozwala na otrzymanie różnicy temperatur między gruntem a miną. Różnica ta może zostać zarejestrowana przez kamerę termowizyjną, co pozwala na dokładne określenie położenia miny.

Przedstawiony zostanie również matematyczny model podgrzewania mikrofalowego materii. Realizacja numeryczna opracowanego modelu za pomocą zależnej od czasu metody FEM, obejmuje dwa przypadki: podgrzewanie piasku oraz podgrzewanie miny wraz z otaczającym ją piaskiem. Otrzymane wykresy temperatury umożliwiają lokalizację poszukiwanego obiektu.

2. TEORIA PODGRZEWANIA MIKROFALAMI

Podgrzewanie dielektryków mikrofalami, opisane w wielu publikacjach [7, 8], oparte jest na dwóch zjawiskach: po pierwsze, dielektryki są materiałami mającymi pewną skończoną wartość oporności – zachodzi więc możliwość grzania oporowego. Po drugie, część dielektryków charakteryzuje się polarną budową molekularną – cecha ta powoduje, że cząsteczki dipolowe w materiale drgają, starając się ułożyć wzdłuż linii zmiennego pola elektrycznego. Ten mechanizm podgrzewania w dużym stopniu jest zależny od częstotliwości pola.

2.1. Zespólona przenikalność dielektryczna

Jednym z ważniejszych parametrów materiałów rozważanych przy analizie podgrzewania mikrofalami jest współczynnik strat dielektrycznych. Prosta analiza kondensatora płaskiego podłączonego do generatora napięcia sinusoidalnego pozwala na wyprowadzenie następującego wzoru na rozproszenie mocy [7]:

$$P = \operatorname{Re}(\mathbf{VI}) = V^2 \omega \frac{\varepsilon_0 A}{d} (\varepsilon'') \quad (1)$$

gdzie A – jest polem powierzchni płytek, d – odległością między płytkami, V – napięciem o pulsacji ω , natomiast ε'' jest składową urojoną zespolonej

przenikalności dielektrycznej $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Łatwo zauważyć, że współczynnik ε'' jednoznacznie określa rozpraszanie mocy w kondensatorze o danych wymiarach wypełnionym dielektrykiem o określonej przenikalności dielektrycznej. Wielkość ε'' jest nazywana współczynnikiem strat dielektrycznych. W praktyce do określania stratności dielektryków używa się następującej wielkości:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2)$$

nazywanej tangensem kąta stratności.

2.2. Właściwości elektryczne wybranych dielektryków

Tabela 1 przedstawia wartości tangensa kąta stratności dla niektórych dielektryków [7].

TABELA 1

Materiał	Częstotliwość	ε'	ε''
Piach (wilgotność 0%)	1 GHz	2,55	0,012
	2,45 GHz	2,55	0,007
Piach (wilgotność 17%)	1 GHz	20	0,3
	2,45 GHz	17	0,3
Bakelit	1 GHz	3,8	0,26
	2,45 GHz	3,7	0,23
PCV	1 GHz	2,85	0,016
	2,45 GHz	2,85	0,016
Polietylen	1 GHz	2,25	0,0005
	2,45 GHz	2,25	0,0007

Jak widać, wartość tangensa kąta stratności zależy od częstotliwości pola pobudzającego. Istotnym czynnikiem wpływającym na wartości parametrów ε' i ε'' jest również wilgotność gruntu. Wymienione w tabeli materiały plastikowe są często stosowane jako obudowy min przeciwczołgowych (bakelit) oraz przeciw-piechotnych [2]. Ładunek wybuchowy może być modelowany za pomocą parafiny i nylonu – materiały te mają podobne właściwości do trotylu. W szczególności silikon typu RTV-3110 jest używany przez wojsko do modelowania właściwości dielektrycznych niektórych materiałów wybuchowych podczas szkoleń saperskich.

2.3. Matematyczny model podgrzewania mikrofalowego

Przepływ ciepła, zarówno w próbce (w naszym przypadku modelu miny lądowej), jak i w otaczającym ją ośrodku (suchym piasku) można matematycznie opisać za pomocą równań różniczkowych postaci [7, 8, 9, 10]:

$$\left(\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right)_s - (k_h \nabla^2 T)_s = p \quad (3)$$

dla piachu, oraz

$$\left(\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right)_m - (k_h \nabla^2 T)_m = p \quad (4)$$

dla miny, gdzie ρ to gęstość, C_p – ciepło właściwe, k_h – przewodność cieplna. Wielkość p oznacza źródło ciepła w postaci gęstości mocy mikrofalowej. absorbowanej przez materiał, wyprowadzić ją można wprost z twierdzenia Poyntinga, będącego bilansem energetycznym w pewnej objętości V :

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) d\vec{S} = -P_q - \frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) \quad (5)$$

Strumień Poyntinga przez powierzchnię S jest równy sumie mocy traczonej w obszarze ograniczonym powierzchnią S oraz zmiany energii (elektromagnetycznej) w czasie. Widać stąd, że energię zamienianą w ciepło opisuje składnik P_q , który po użyciu prawa Gaussa i równań Maxwella można zapisać w postaci:

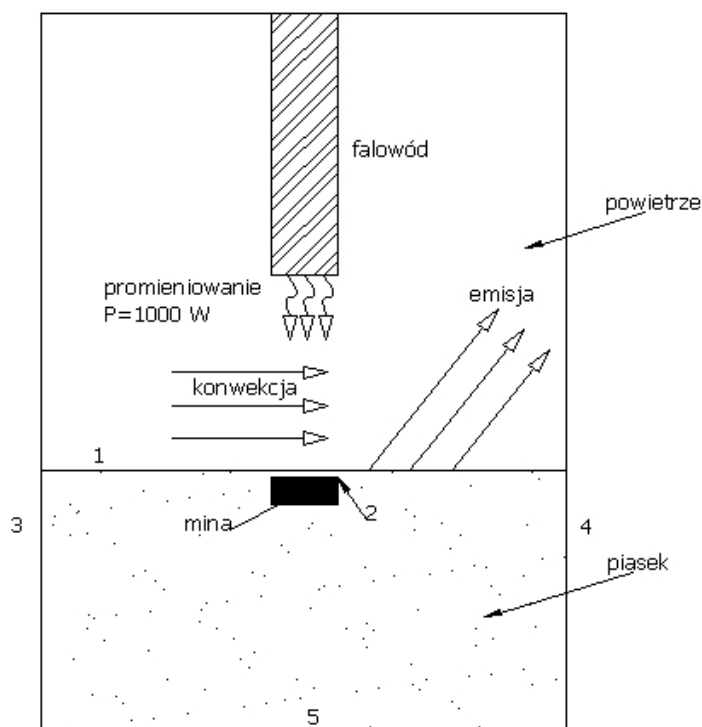
$$P_q = 2\pi f \varepsilon' \varepsilon'' \int |E|^2 dV \quad (6)$$

Pole elektryczne E obliczyć można z następującego równania różniczkowego:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - \left(\varepsilon^* - j \cdot \frac{\sigma}{\omega} \cdot \varepsilon_0 \right) \cdot I_0 \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (7)$$

gdzie μ_r jest względną przenikalnością magnetyczną, w naszym przypadku $\mu_r = 1$, z uwagi na fakt, że badane materiały nie wykazują własności magnetycznych; σ jest przewodnością materiału (w naszym przypadku wartość ta jest bliska zero), I_0 jest liczbą falową.

Określmy warunki brzegowe dla równania różniczkowego opisującego przepływ ciepła oraz dla równania opisującego pole elektryczne. Rysunek 1 przedstawia dwuwymiarowy model podgrzewania mikrofalowego z uwzględnieniem mechanizmów emisji oraz konwekcji.



Rys. 1. Dwuwymiarowy model obrazujący grzanie mikrofalowe miny lądowej wraz z otaczającym ją piaskiem. Zaznaczone zostały istotne granice, dla których są określone warunki brzegowe

Cyframi oznaczono istotne granice, dla których określane będą warunki brzegowe.

- Dla granicy 1 (powietrze – piasek) mamy warunek brzegowy opisujący zmianę składowej normalnej gęstości strumienia ciepła:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}_s \nabla T = h(T - T_0) + \zeta \sigma_b (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

gdzie: składnik $h(T - T_0)$ opisuje mechanizm konwekcyjnego przenoszenia ciepła, wielkości h oraz T_0 oznaczają odpowiednio współczynnik przejmania ciepła i temperaturę zewnętrzną, natomiast składnik $\zeta \sigma_b (T^4 - T_0^4)$ odpowiada za wymianę ciepła w postaci promieniowania, wielkości ζ , σ_b oznaczają odpowiednio emisyjność gruntu oraz stałą Stefana – Boltzmanna.

Na granicy tej określimy również warunek brzegowy ciągłości składowej stycznej wektora \mathbf{H}

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0 \quad (9)$$

- Na granicy 2 (piasek – mina) określamy warunek brzegowy ciągłości składowej normalnej wektora gęstości strumienia ciepła:

$$\mathbf{n} \cdot k_s \nabla T = \mathbf{n} \cdot k_m \nabla T \quad (10)$$

oraz ponownie warunek brzegowy ciągłości składowej stycznej wektora \mathbf{H} .

- Na granicach 3, 4 zakładamy warunek brzegowy izolacji cieplnej (przyjmując wystarczająco dużą odległość granic pionowych od miny):

$$\mathbf{n} \cdot k_s \nabla T = 0 \quad (11)$$

oraz, w związku z faktem, że padająca fala elektromagnetyczna (typu TE) jest propagowana równolegle do granic 3, 4, a pole magnetyczne jest do nich prostopadłe, nakładamy tutaj warunek brzegowy idealnego przewodnika magnetycznego:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0 \quad (12)$$

- Na granicy 5, określającej poziom gruntu, zakładamy stałą temperaturę:

$$T = T_0 \quad (13)$$

Zakładamy, że początkowo rozważany układ znajduje się w równowadze termicznej, zatem powietrze, piach oraz mina mają jednakową temperaturę T_0 , którą ustalamy na 293 K.

2.4. Numeryczna realizacja modelu matematycznego

Obliczenia numeryczne przeprowadzone zostały za pomocą metody FEM, zależnej od czasu. Do obliczeń został wykorzystany moduł RF pakietu COMSOL Multiphysics v. 3.3. Użyte stałe zostały zebrane w poniższej tabeli 2.

TABELA 2

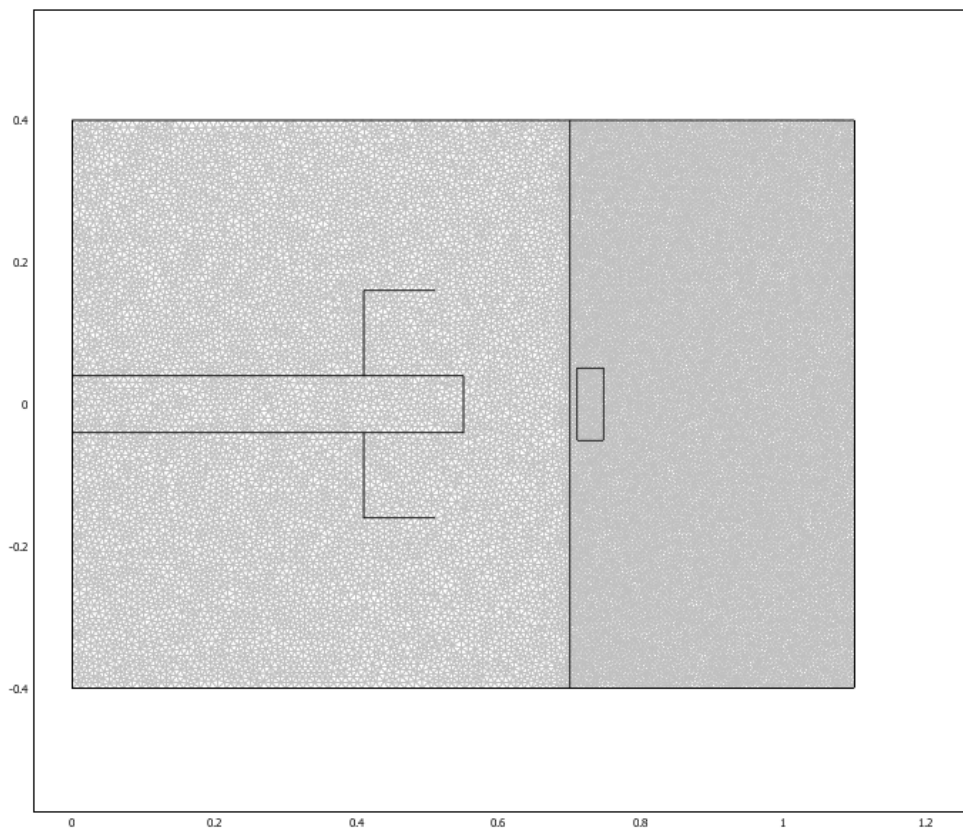
Stała	Wartość	Źródło
Gęstość trotylu $(\rho)_m$	1170 kg/m ³	[9]
Gęstość piachu $(\rho)_p$	2000 kg/m ³	[9]
Ciepło właściwe trotylu $(C_p)_m$	1500 J/kg K	[9]
Ciepło właściwe piasku $(C_p)_p$	837 J/kg K	[9]
Przewodność cieplna trotylu $(k_h)_m$	0.2 W/m K	[9]
Przewodność cieplna piasku $(k_h)_p$	2.511 W/m K	[9]
Współczynnik emisyjności piasku ζ	0.9	[2]
Współczynnik przejmowania ciepła dla piasku h	5.7 W/m ² K	[2]
Tangens kąta stratności dla trotylu $\varepsilon'' \setminus \varepsilon'$	0.0006/2.89	[3]
Tangens kąta stratności dla piasku $\varepsilon'' \setminus \varepsilon'$	0.007/2.55	[7]
Temperatura początkowa T_0	293 K	
Stała Stefana-Boltzmannna σ_b	5.67*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴	

W modelu przyjęto ponadto następujące uproszczenia:

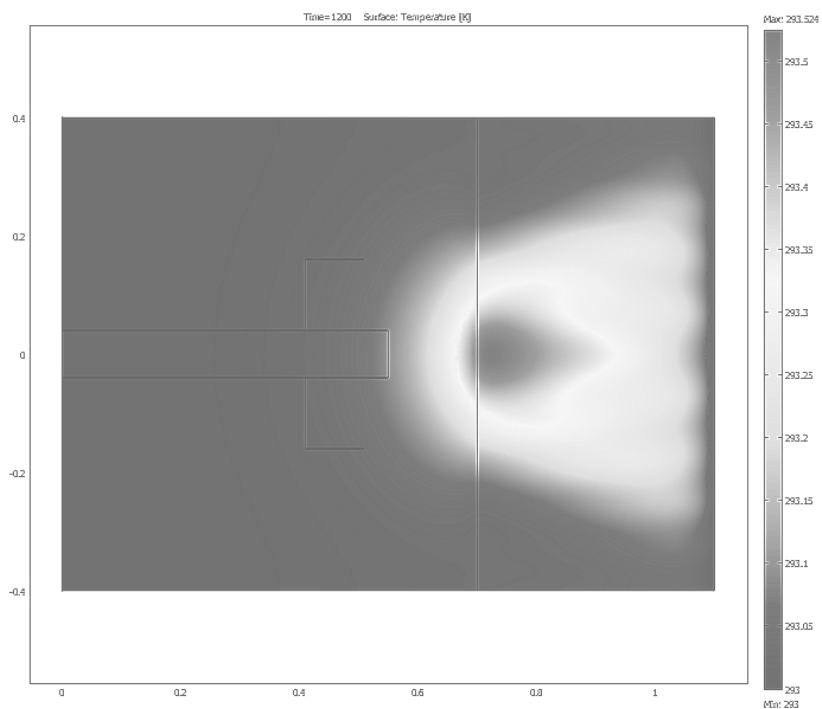
- wilgotność piasku wynosi 0% – nie rozważano zatem zagadnienia transferu ciepła poprzez parowanie;
- prędkość wiatru jest zerowa;
- rozważany model miny składa się wyłącznie z trotylu (zaniedbano obecność obudowy plastikowej);
- zarówno mina, jak i otaczający ją piasek, są jednorodne;
- zagadnienie transportu masy nie jest rozważane w tym modelu.

Przyjęto 20-minutowy czas podgrzewania mikrofalowego. Model miny umieszczony został centralnie pod falowodem na głębokości 1 cm poniżej poziomu gruntu. Rozmiar modelu odpowiada rzeczywistym rozmiarom niemetalicznej miny PMA-3, często spotykanej na terenach byłej Jugosławii. Fala elektromagnetyczna (TE_{1,0}) o częstotliwości 2,45 GHz wzbudzana jest na tylnej ścianie falowodu, moc promieniowania ustalona została na 1000 W. Rysunki 2–6 przedstawiają wynik analizy numerycznej modelu matematycznego. Siatka elementów skończonych prezentowana na rysunku 2 została tak dobrana, aby uwzględnić istotne zmiany długości fali w różnych ośrodkach. Rysunki 3 i 4 prezentują rozkład temperatury po 20-minutowym podgrzewaniu mikrofalowym.

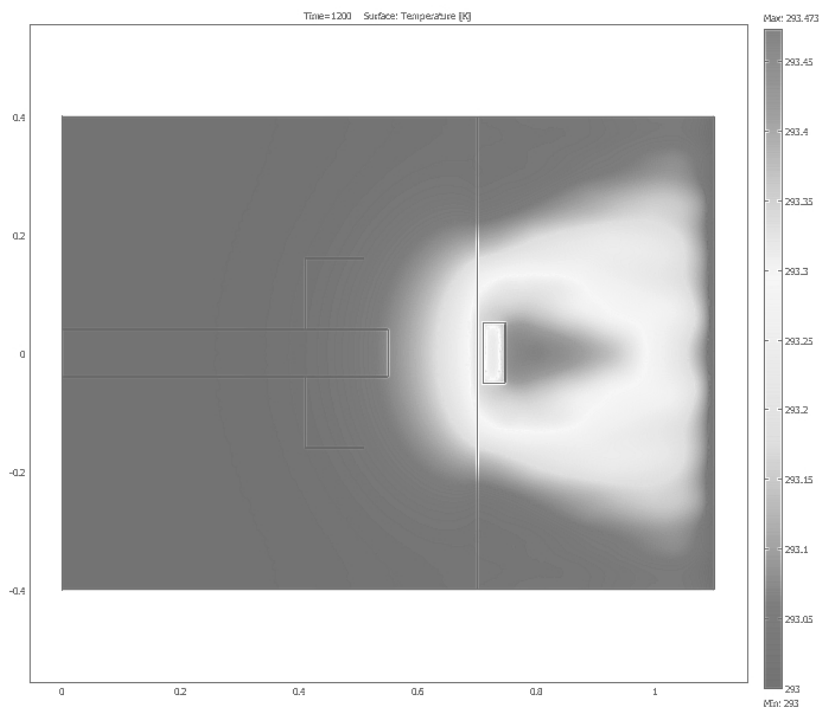
Mniejsza wartość tangensa kąta stratności w minie powoduje jej słabsze nagrzewanie i istotną zmianę rozkładu temperatury w stosunku do tego, jaki otrzymujemy w przypadku podgrzewania samego piasku. Rysunki 5 i 6 prezentują wartości temperatury na powierzchni pojemnika z piaskiem dla kilku wartości czasu. Łatwo zauważyć różnicę w maksymalnych wartościach temperatury między nagrzewaniem samego piasku a podgrzewaniem piasku z miną. Mniejsza temperatura miny powoduje zmniejszenie maksymalnej temperatury powierzchni gruntu o około 0,2 stopnia w stosunku do maksimum temperatury obserwowanej podczas nagrzewania samego piasku.



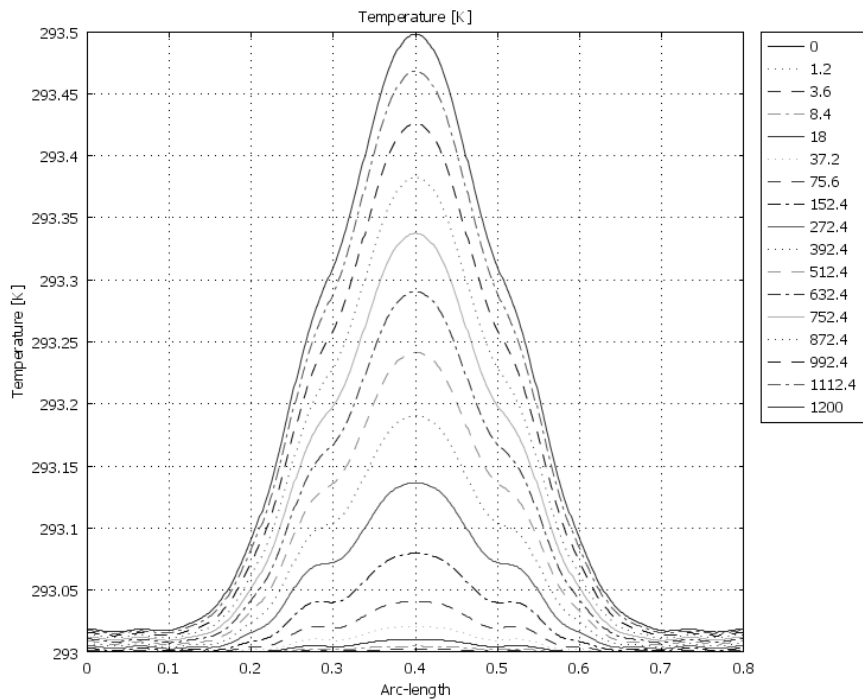
Rys. 2. Siatka elementów skończonych dla analizowanego modelu. W prawej części badanego pola znajduje się model pojemnika z piaskiem zawierający minę, w części lewej znajduje się model falowodu



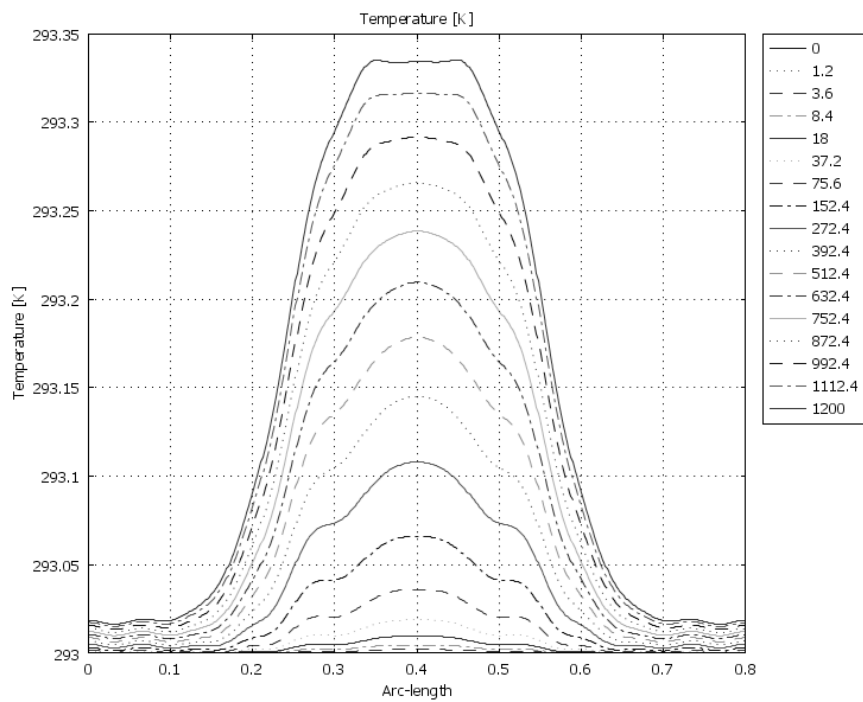
Rys. 3. Efekt podgrzewania mikrofalowego piasku. Po czasie 1200 sekund obserwujemy wzrost temperatury w części centralnej pojemnika o około 0,5 stopnia



Rys. 4. Efekt podgrzewania miny wraz z otaczającym ją piaskiem. Po upływie 20 minut widzimy wzrost temperatury w części centralnej pojemnika o około 0,3 stopnia. Model miny nagrzał się istotnie słabiej niż otaczający go piasek



Rys. 5. Podgrzewanie mikrofalowe piasku. Nałożone na siebie wykresy temperatury powierzchni gruntu dla kilku wartości czasowych

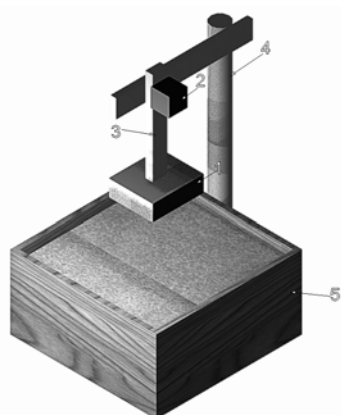


Rys. 6. Efekt podgrzewania miny wraz z otaczającym ją piaskiem. Nałożone na siebie wykresy temperatury obserwowanej na powierzchni gruntu dla kilku wartości czasowych

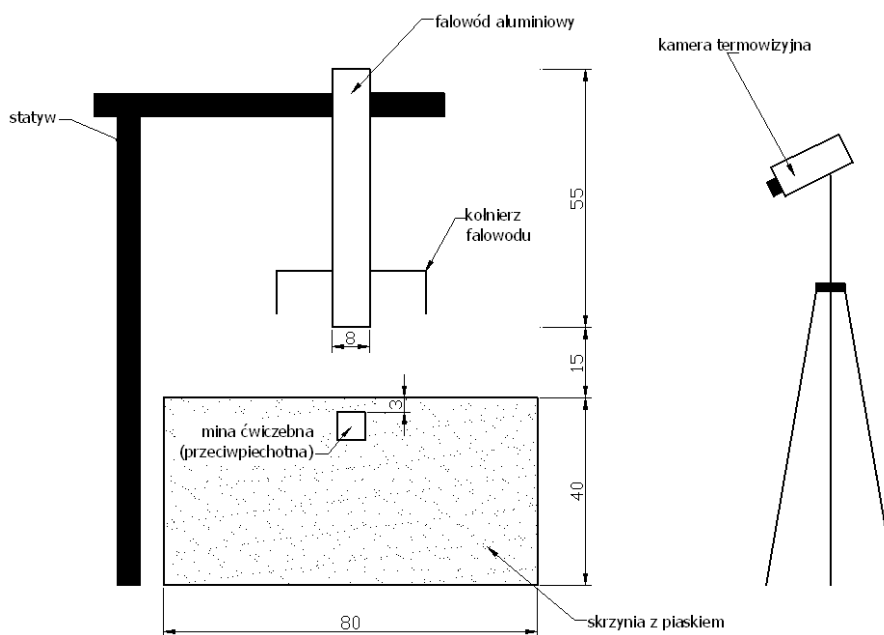
3. OPIS UKŁADU POMIAROWEGO

Budowany układ pomiarowy składa się z generatora mikrofal (magnetron Panasonic, operujący na częstotliwości 2,45 GHz, o mocy około 1 kW), falowodu o długości 55 cm o wymiarach apertury 8 cm x 4 cm, zakończonego kołnierzem. Próbki (miny ćwiczebne) umieszczane będą na różnej głębokości w pojemniku o wymiarach 80 cm x 80 cm x 40 cm, wypełnionym piaskiem. Trójwymiarowy model takiego układu przedstawia rysunek 7.

Akwizycja obrazów termograficznych odbywać się będzie za pomocą kamery termowizyjnej (rys. 8). Odpowiednia obróbka komputerowa otrzymanych termogramów pozwoli na precyzyjne rozpoznanie obiektu oraz wskazanie jego dokładnej lokalizacji.



Rys. 7. Trójwymiarowy model układu pomiarowego: 1) kołnierz falowodu, 2) magnetron, 3) falowód aluminiowy, 4) statyw, 5) pojemnik z piaskiem



Rys. 8. Przykładowe rozmieszczenie elementów układu pomiarowego

4. PODSUMOWANIE

Metoda termografii podczerwonej wzbudzonej mikrofalami wydaje się być dobrą alternatywą dla wykrywaczy metali. Pewne aspekty omawianej metody wymagają jednakże dopracowania:

- efektywność metody, jak wykazały testy w otwartym polu [6], w dużym stopniu zależna jest od pogody. Zaawansowana obróbka numeryczna otrzymanych termogramów mogłaby jednakże w dużym stopniu zniwelować zakłócenia powstałe w niesprzyjających warunkach pogodowych;
- nierówności powierzchni w dużym stopniu wpływają na jakość termogramów;
- niejednorodność gruntu (w szczególności obecność innych obiektów, o podobnych właściwościach dielektrycznych do miny) utrudnia precyzyjną lokalizację i rozpoznanie poszukiwanego obiektu.

Do podstawowych zalet tej techniki należy niewątpliwie fakt, że umożliwia ona wykrywanie niemetalicznych min, niewykrywalnych, bądź słabo wykrywalnych dla wykrywaczy metali.

LITERATURA

1. Balageas D., Levesque P.: Mines detection using the EMIR® method., Actes de la conférence QIRT 2002, 71-78, 2003.
2. Balsi M., Corcione M.: Thermal detection of buried landmines by local heating, International Journal of Systems Science, 589-604, 2005.
3. Brooks J. W.: The detection of buried non-metallic anti-personnel land mines, Hunsville 2000.
4. Chant I., Lee D., Ireland D.: DSTO Landmine Detection Test Targets. Australian Government Department of Defense.
5. Guelle D., Smith A., Lewis A., Bloodworth T.: Metal detector handbook for humanitarian demining, European Communities, 2003.
6. Mende H., Dej B., Khanna S., Apps R., Boyle M., Addison F.: Microwave Enhanced IR Detection of Landmines using 915 MHz and 2450 MHz, Technical Memorandum DRDC Ottawa TM, 2004.
7. Meredith R. J.: Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating, Short Run Press, 1998.
8. Metaxas A. C., Meredith R. J.: Industrial microwave heating, Peter Peregrinus Ltd., 1983.
9. Moukalled F. et.al.: Numerical and experimental investigation of thermal signatures of buried landmines in dry soil, Journal of Heat Transfer, 484-493, 2006.
10. Yu X. D., Vardan V., Vardan V. K.: Modeling microwave heating of ceramics, Ceramic Transactions, 167-175, 1991.

Rękopis dostarczono dnia 15.09.2009 r.

Opiniował: dr hab. inż. Stefan F. Filipowicz, prof. PW

NONMETALLIC LANDMINE DETECTION USING MICROWAVE ENHANCED INFRARED THERMOGRAPHY

B. SZYMANIK, P. LESIECKI

ABSTRACT *In this paper we present the new method of the antipersonnel and antitank landmines' detection. This technique, based on connection of the volumetric microwave heating and active infrared thermography, can be used to detect thermal signatures of buried nonmetallic objects.*



Mgr Barbara SZYMANIK – ukończyła Uniwersytet Szczeciński na kierunku Matematyka oraz Fizyka z zastosowaniem komputerów. Obecnie doktorantka na wydziale Eklektycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Zajmuje się teorią oddziaływania mikrofal z materiałą.

Mgr inż. Paweł LESIECKI – ukończył Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie na kierunku Elektronika i Telekomunikacja oraz Politechnikę Szczecińską na kierunku Informatyka. Zajmuje się techniką antenową oraz modelowaniem fal EM.

