

*Prof. WAT Jan PIETRASIENSKI  
Dr inż. Marcin WARCHULSKI  
Dr inż. Jacek WARCHULSKI  
Wojskowa Akademia Techniczna*

## **BADANIA SYMULACYJNE OSTRZAŁU RAKIET BALISTYCZNYCH PRZECIWLOTNICZYM ZESTAWEM DALEKIEGO ZASIĘGU WEGA**

*Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania przeciwlotniczego zestawu raketowego dalekiego zasięgu Wega do zwalczania rakiet balistycznych. Największą uwagę zwrócono na badania zjawisk aerodynamicznych towarzyszący naprowadzaniu rakiety Wega na rakietę balistyczną. Z uwagi na brak możliwości prowadzenia eksperymentów ogniowych z raketami realnymi, za podstawowe przyjęto badania symulacyjne.*

## **SIMULATION RESEARCH OF TBM'S SHOOTING DOWN BY HIMAD SA-5 GAMMON AA SYSTEM**

*Abstract: In this paper, the potential usage of HIMAD SA-5 Gammon AA system for anti-TBMs protection is analyzed. The main attention is paid to the aerodynamic effects in the moment, when SA-5 Gammon missile is guiding on TBM. Because an experimental missile launch was impossible, researches are based on simulated data.*

### **1. WPROWADZENIE**

Rakiety balistyczne stanowią groźny i trudny do zwalczania środek napadu powietrznego. Wnikliwie analizowane są skutki ich użycia oraz poszukiwane sposoby i środki przeciwdziałania temu zagrożeniu. Okazało się, że nie ma dostatecznie skutecznych systemów walki, które można przeciwstawić rakietom balistycznym, aby wyeliminować ich niszczące działanie. Rakiety balistyczne są atrakcyjnym środkiem napadu powietrznego, mogą być stosowane przeciwko przeciwnikowi dysponującemu silnym systemem obrony powietrznej, kiedy atak lotnictwa byłby niepraktyczny czy wręcz nieopłacalny.

W porównaniu z pilotowanymi środkami napadu powietrznego, rakiety mają niebagatelne zalety: znacznie mniejsze koszty utrzymania i szkolenia, niewielkie wymagania dotyczące zabezpieczenia logistycznego. Nawet ograniczone użycie tego rodzaju broni może spowodować poważne straty i zniszczenia. Obecnie kilkadziesiąt państw posiada systemy rakiet balistycznych. Rakiety te były używane w wojnach Iranu z Irakiem, afgańskiej, jemeńskiej oraz w Zatoce Perskiej.

Należy zauważyć, że problem obrony przeciwrakietowej ma znacznie szersze odniesienie aniżeli zwalczanie rakiet balistycznych. W wyniku rozwoju i wzrostu skuteczności przeciwlotniczych zestawów raketowych nastąpiło w ostatnich latach zauważalne kontrposunięcie techniczno-taktyczne lotnictwa, polegające na odpalaniu na znacznych odległościach w kierunku naziemnego celu zdalnie lub samonaprowadzanych pocisków powietrze-ziemia. To sprawia, że obiektem zwalczania przeciwlotniczych zestawów raketowych często będzie nie samolot, a rakietka. Zdecydowanie pogarsza to warunki naprowadzania rakiety przeciwlotniczej na cel oraz obniża skuteczność ogniową zestawu. Ze

względu na powszechność stosowania rakiet powietrze-ziemia problemy ich skutecznego zwalczania wymagają pilnego rozwiązania zarówno w technicznym, jak i taktycznym wymiarze, przy czym są one w znacznym stopniu zbieżne z zadaniami zwalczania rakiet balistycznych na końcowym odcinku lotu. Należy podkreślić, że obecnie obrona przeciwlotnicza staje się w znacznym stopniu obroną przeciwrakietową.

## 2. BADANIA SYMULACYJNE OSTRZAŁU RAKIET BALISTYCZNYCH

Dla potrzeb przeprowadzenia badań symulacyjnych ostrzału rakiet balistycznych przeciwlotniczym zestawem dalekiego zasięgu Wega opracowano modele ruchu rakiety przeciwlotniczej oraz rakiety balistycznej.

Do odwzorowania aerodynamiki rakiety Wega i jej niestacjonarności wykorzystano rozbudowany model symulacyjny [3, 4, 6] opracowany w środowisku Matlab-Simulink [1]. Opracowany model symulacyjny zapewnia generowanie przestrzennych trajektorii lotu rakiety oraz obliczanie parametrów i charakterystyk jej ruchu.

Charakterystyki ruchu rakiety balistycznej otrzymano za pomocą modelu symulacyjnego przedstawionego w opracowaniu [5].

### 2.1. Możliwości śledzenia rakiety balistycznej

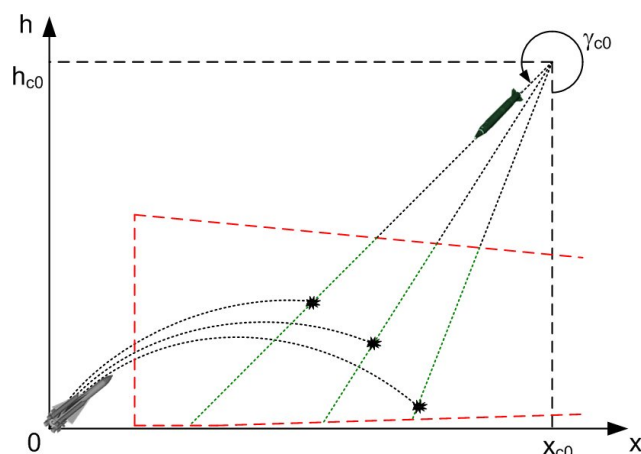
Charakterystyczną cechą końcowego odcinka trajektorii rakiety balistycznej jest duża prędkość opadania, uwarunkowana znacznym nachyleniem trajektorii i dużą prędkością rakiety. Fakt ten istotnie komplikuje warunki ostrzelania rakiety balistycznej w strefie ognia zestawu Wega.

Wysokość strefy ognia istotnie maleje ze wzrostem odległości zwalczania celów. W takim samym stopniu skracany jest czas przebywania rakiety balistycznej w strefie ognia i dla maksymalnej odległości zwalczania wynosi on zaledwie od kilkunastu do dwudziestu sekund. Jest to bardzo mało w porównaniu z czasem dolotu naprowadzanej rakiety Wega do zwalczanej rakiety balistycznej. Czas dolotu jest wielkością losową i w tym przypadku wyniesie około 4 minuty. Losowość czasu dolotu uwarunkowana jest wieloma różnorodnymi czynnikami o charakterze technicznym, środowiskowym, starzeniowym, aerodynamicznym oraz taktycznym. Istotnym czynnikiem wpływającym na charakterystyki statystyczne rozrzutu czasu dolotu rakiety do celu jest odległość do celu. Powyższe uwarunkowania czasowe sprawiają, że ostrzał rakiet balistycznych nie powinien być wykonywany na maksymalnych odległościach.

Dla ilustracji omawianych uwarunkowań przeprowadzono badania czasu przebywania rakiety balistycznej w strefie ognia dla warunków zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Warunki badań czasu przebywania rakiety balistycznej w strefie ognia

$x_{c0}$ [km]	$h_{c0}$ [km]	$\gamma_{c0}$ [°]
100, 90, 80, 70	80	315, 330, 345



Rys. 1. Warunki badań czasu przebywania rakiety balistycznej w strefie ognia

Wyniki badań zestawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2. Czas przebywania rakiety balistycznej w strefie ognia

czas przebywania w strefie ognia [s]		$x_{c0}$ [km]			
		100	90	80	70
$\gamma_{c0}$ [°]	315	31,7	32,8	33,9	35,0
	330	23,1	24,0	24,8	25,7
	345	19,1	19,9	20,7	21,5

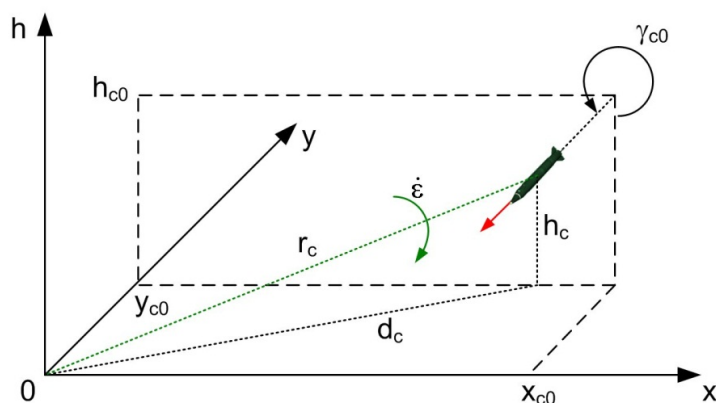
Dla mniejszych odległości wyraźnie wydłużony zostaje czas przebywania rakiety balistycznej w strefie ognia. Ważnym czynnikiem jest zmniejszenie czasu dolotu, a tym samym ograniczenie jego rozrzutu.

## 2.2. Badanie prędkości kątowej linii obserwacji rakiety balistycznej

Prędkość kątowa linii obserwacji rakiety balistycznej została zbadana dla przedstawionych w tabeli 3 ustalonych warunków ruchu oraz zmiennego parametru.

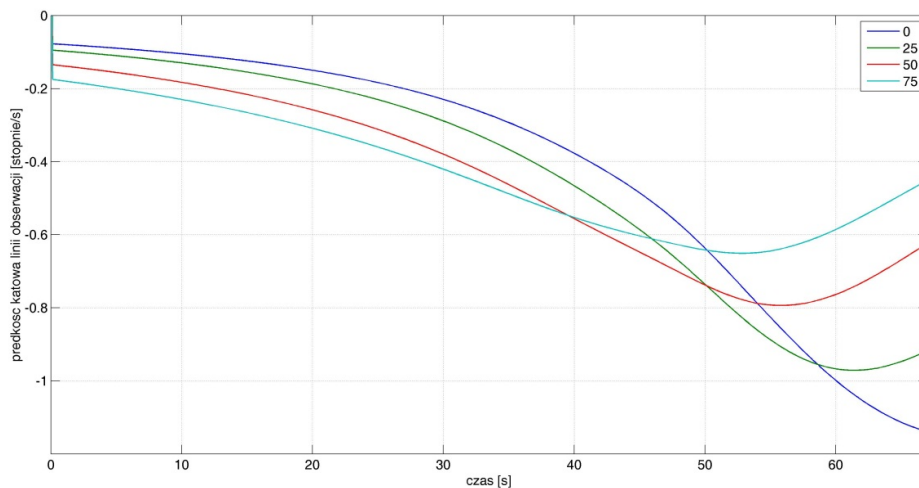
Tabela 3. Warunki badań prędkości kątowej linii obserwacji rakiety balistycznej

$x_{c0}$ [km]	$h_{c0}$ [km]	$\gamma_{c0}$ [°]	parametr [km]
100	80	315	0, 25, 50, 75



Rys. 2. Warunki określenia prędkości kątowej linii obserwacji rakiety balistycznej

Wyniki symulacji dla różnych parametrów przedstawione są na rysunku 3.

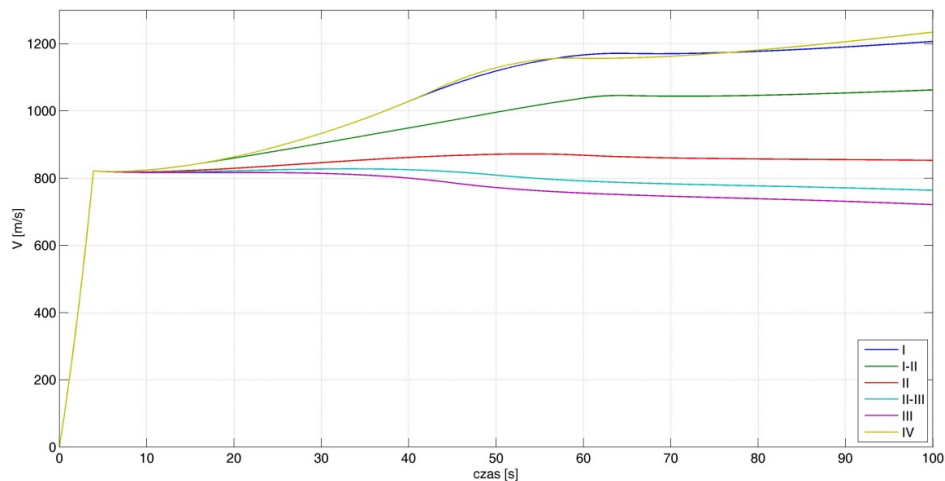


Rys. 3. Prędkość katowa linii obserwacji rakiety balistycznej

Zakres prędkości katowych linii obserwacji rakiety balistycznej dla standardowych sytuacji kinematycznych mieści się w obszarze dopuszczalnych prędkości śledzenia celu we współrzędnych kątowych. Początkowy odcinek trajektorii rakiety charakteryzuje się stosunkowo małymi prędkościami katowymi linii obserwacji, co zdecydowanie poprawia warunki wykrycia rakiety balistycznej.

### 2.3. Badanie zmian prędkości rakiety dla różnych programów ciągu silnika marszowego

Na rysunku 4 i w tabeli 4 przedstawiono zmiany prędkości lotu rakiety Wega dla różnych programów ciągu silnika marszowego [7].



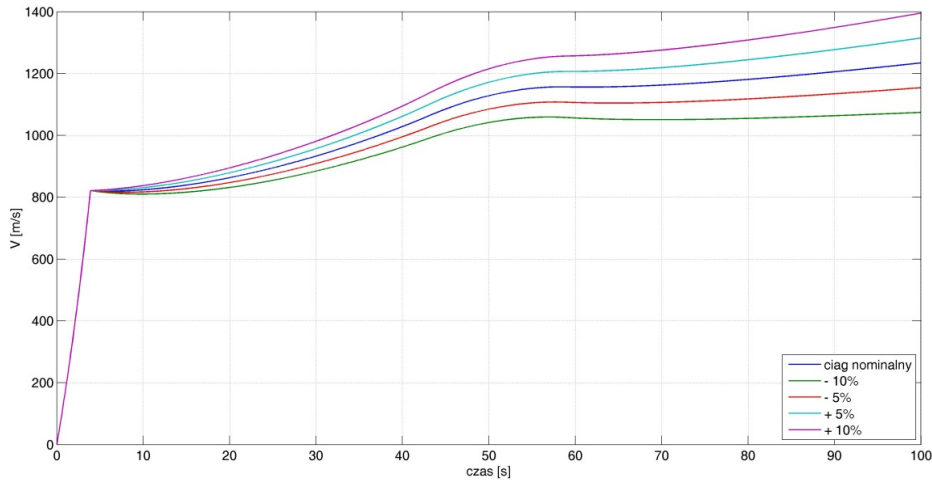
Rys. 4. Prędkość rakiety przeciwlotniczej w zależności od programu pracy silnika marszowego

Tabela 4. Średnia prędkość rakiety w zależności od programu pracy silnika marszowego

Program pracy silnika marszowego	I	I-II	II	II-III	III	IV
Średnia prędkość rakiety [m/s]	1005	925	813	766	741	1008

## 2.4. Badanie zmian prędkości rakiety dla rozrzutu ciągu silnika marszowego

Na rysunku 5 i w tabeli 5 przedstawiono zmiany prędkości lotu rakiety przeciwlotniczej dla rozrzutu wartości ciągu silnika marszowego. Badania przeprowadzono dla IV programu ciągu silnika marszowego.



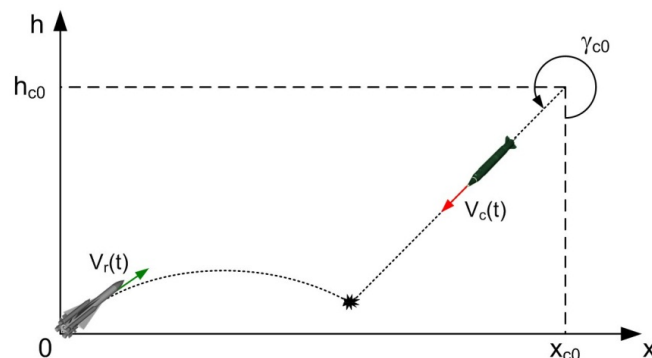
Rys. 5. Prędkość rakiety przeciwlotniczej dla rozrzutu wartości ciągu silnika marszowego

Tabela 5. Średnia prędkość rakiety dla rozrzutu wartości ciągu silnika marszowego

Ciąg silnika marszowego	- 10%	- 5%	ciąg nominalny	+ 5%	+ 10%
Średnia prędkość rakiety [m/s]	930	969	1008	1047	1087

## 2.5. Badanie procesu naprowadzania rakiety Wega na raketę balistyczną dla różnych wartości kąta wejścia w atmosferę rakiety balistycznej

Badania symulacyjne przeprowadzono w jednej płaszczyźnie dla zmiennych w czasie prędkości rakiety – przeciwlotniczej zestawu Wega i balistycznej. Prędkość rakiety przeciwlotniczej Wega zmienia się zgodnie z IV programem pracy silnika marszowego. Zmiana prędkości rakiety balistycznej wynika ze zmiennych charakterystyk ośrodka ruchu – zgodnie z parametrami atmosfery wzorcowej [2]. Warunki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunku 6. Rakieta balistyczna „wchodzi” w atmosferę na odległości  $x_{c0}$  pod zadaniem kątem  $\gamma_{c0}$ . W momencie wejścia rakiety balistycznej w atmosferę następuje start rakiety przeciwlotniczej.



Rys. 6. Warunki badań procesu naprowadzania rakiety Wega na raketę balistyczną

Związki kinematyczne podczas samonaprowadzania można zapisać w postaci:

$$\frac{dr}{dt} = -V_r \cos(\Theta_r - \lambda) + V_c (\Theta_c - \lambda) \quad (1)$$

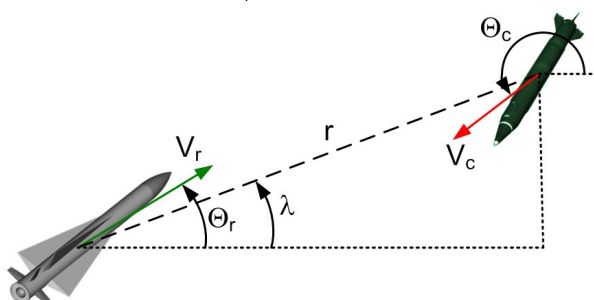
$$r \frac{d\lambda}{dt} = -V_r \sin(\Theta_r - \lambda) + V_c (\Theta_c - \lambda) \quad (2)$$

Wybór metody naprowadzania jest realizowany poprzez dobór stałej nawigacyjnej  $a$ , zgodnie z zależnością:

$$\dot{\Theta} = a\dot{\lambda} \quad (3)$$

Stała nawigacyjna  $a$  jest funkcją prędkości zbliżania rakiety z celem zgodnie z zależnością:

$$a = \frac{2|\dot{r}|}{V_r} \quad (4)$$



Rys. 7. Związki kinematyczne podczas samonaprowadzania

Warunki badań przedstawiono w tabeli 6.

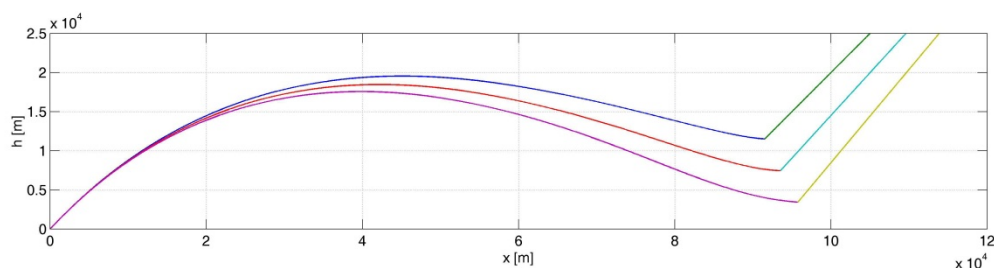
Tabela 6. Warunki badań procesu naprowadzania rakiety Wega na rakietę balistyczną

$x_{c0}$ [km]	$h_{c0}$ [km]	$\gamma_{c0}$ [°]
160	80	315, 317.5, 320

Wyniki badań dla różnych wartości kąta wejścia w atmosferę rakiety balistycznej, zestawiono w tabeli 7, zaś trajektorie przedstawiono na rysunku 8.

Tabela 7. Wyniki badań dla różnych wartości kąta wejścia w atmosferę rakiety balistycznej

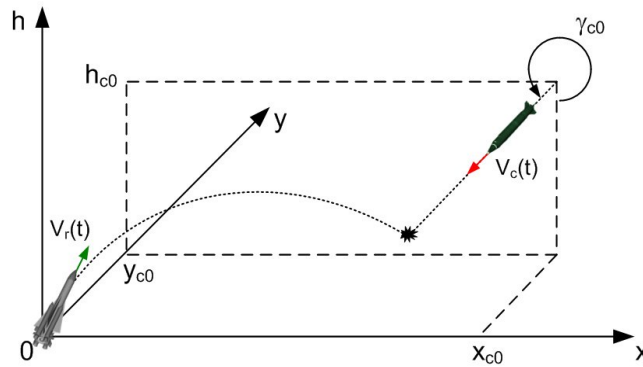
kąt wejścia w atmosferę $\gamma_{c0}$ [°]	pozioma odległość spotkania $d$ [m]	wysokość spotkania $h$ [m]	odległość spotkania $r$ [m]	czas dolotu $t$ [s]
315	91 495	11 502	92 215	86.0
317.5	93 516	7 453	93 813	87.7
320	95 737	3 423	95 798	89.7



Rys. 8. Trajektorie rakiety przy różnych kątach wejścia w atmosferę rakiety balistycznej

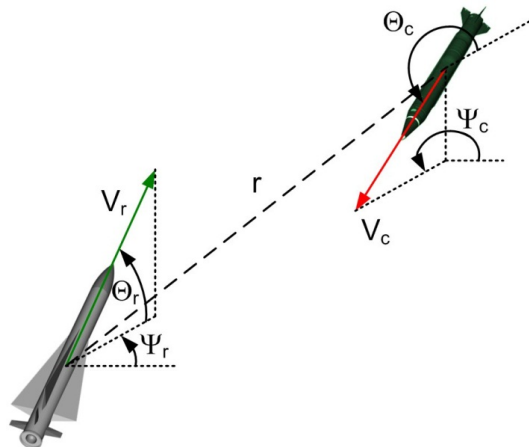
## 2.6. Badanie procesu naprowadzania dla różnych wartości parametru, na którym porusza się rakiet balistyczna

Badania przeprowadzono dla ruchu przestrzennego dla identycznych warunków jak ruchu w jednej płaszczyźnie, przy czym rakiet balistyczna porusza się na parametrze, zgodnie z rysunkiem 9.



Rys. 9. Warunki badań dla ruchu na parametrze

Związki kinematyczne podczas samonaprowadzania przedstawiono na poniższym rysunku.



Rys. 10. Związki kinematyczne podczas samonaprowadzania

Warunki badań przedstawiono w tabeli 8.

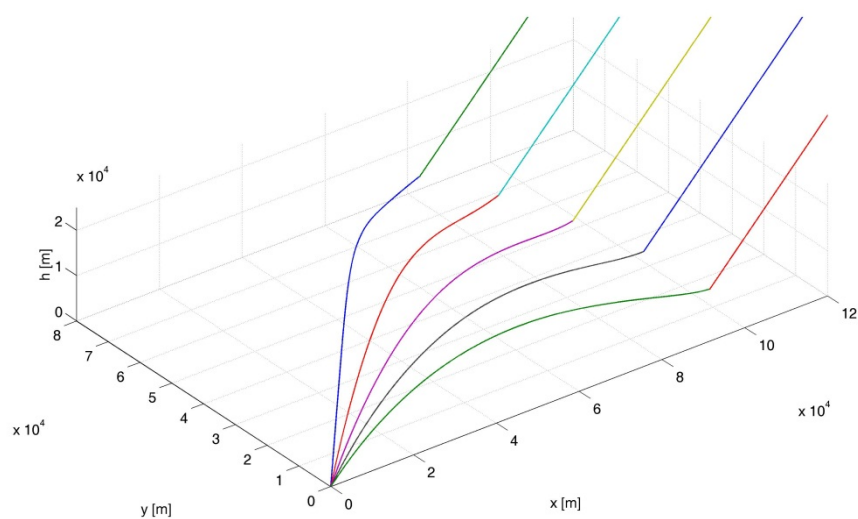
Tabela 8. Warunki badań dla ruchu na parametrze

$x_{c0}$ [km]	$h_{c0}$ [km]	$\gamma_{c0}$ [°]	parametr [km]
160	80	315	0, 20, 40, 60, 80

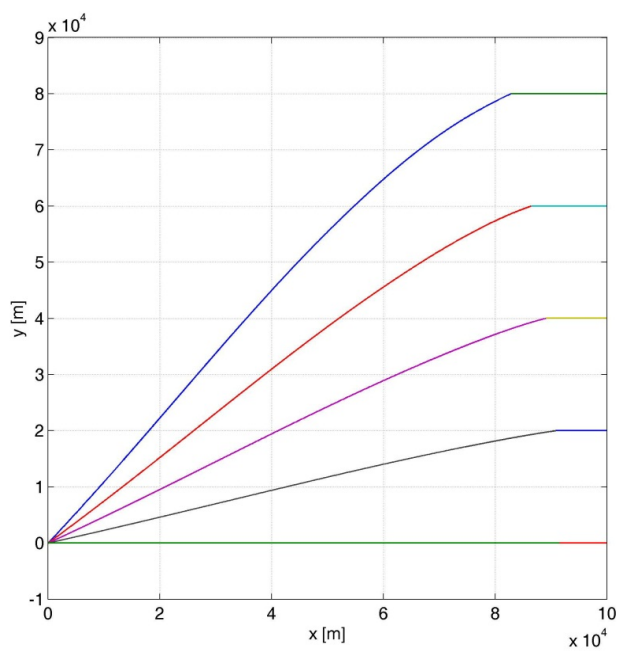
Wyniki badań dla różnych wartości parametru, na którym porusza się rakiet balistyczna zestawiono w tabeli 9, zaś trajektorie przedstawiono na rysunkach 11-13.

Tabela 9. Wyniki badań dla ruchu na parametrze

parametr p [km]	pozioma odległość spotkania d [m]	wysokość spotkania h [m]	odległość spotkania r [m]	czas dolotu t [s]
1	2	3	4	5
80	115 140	2 816	115 170	103.8
60	105 230	6 463	105 430	96.3
40	97 662	9 102	98 085	90.6
20	93 040	10 872	93 673	87.1
0	91 495	11 502	92 215	86.0

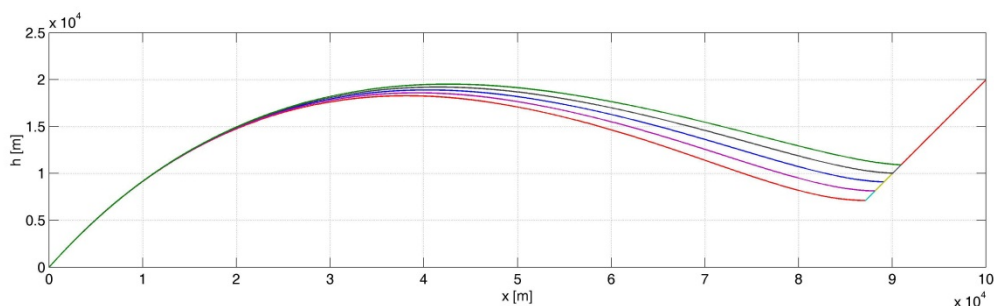


Rys. 11. Przestrzenne trajektorie rakiety dla różnych wartości parametru, na którym porusza się rakieta balistyczna



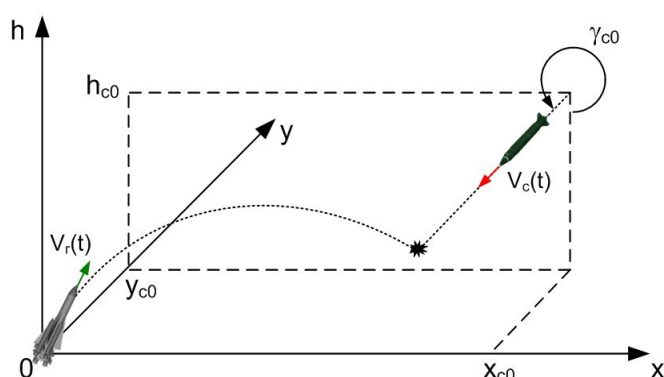
Rys. 12. Trajektorie rakiety dla różnych wartości parametru, na którym porusza się rakieta balistyczna w płaszczyźnie xy





Rys. 13. Trajektorie rakiety dla różnych wartości parametru, na którym porusza się rakiet balistyczna w płaszczyźnie xh

## 2.7. Badanie procesu naprowadzania dla ruchu na parametrze rakiety balistycznej przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego rakiety Wega



Rys. 14. Warunki badań dla ruchu na parametrze rakiety balistycznej przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego rakiety Wega

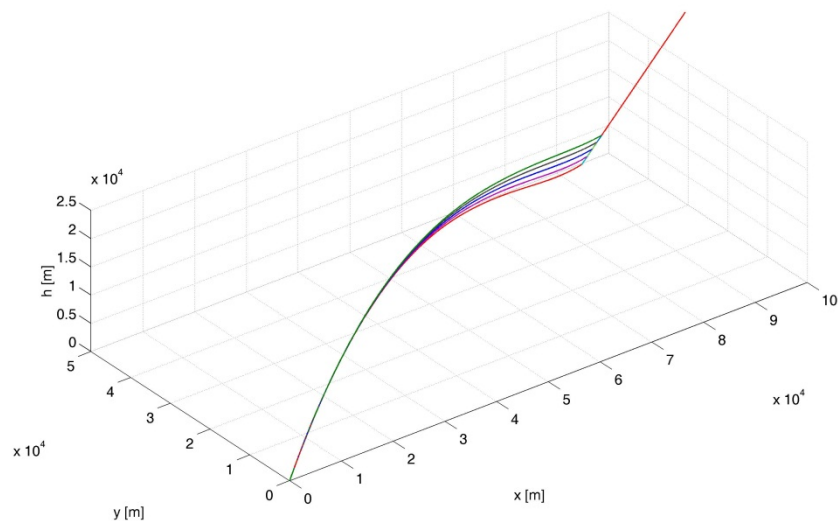
Tabela 10. Warunki badań dla ruchu na parametrze rakiety balistycznej przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego rakiety Wega

$x_{c0}$ [km]	$h_{c0}$ [km]	$\gamma_{c0}$ [°]	parametr [km]
160	80	315	40

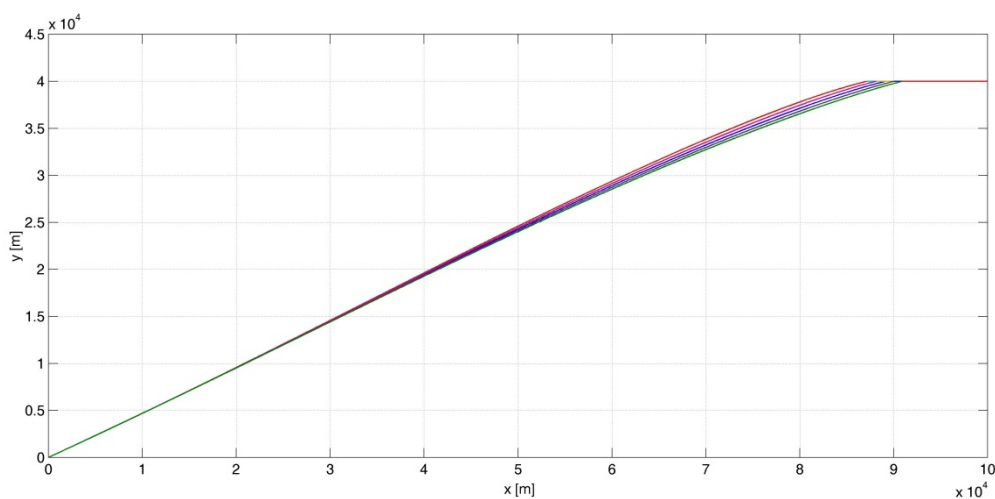
Wyniki badań dla ruchu na parametrze rakiety balistycznej przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego rakiety Wega zestawiono w tabeli 11, zaś trajektorie przedstawiono na rysunkach 15-17.

Tabela 11. Wyniki badań dla ruchu na parametrze rakiety balistycznej przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego rakiety Wega

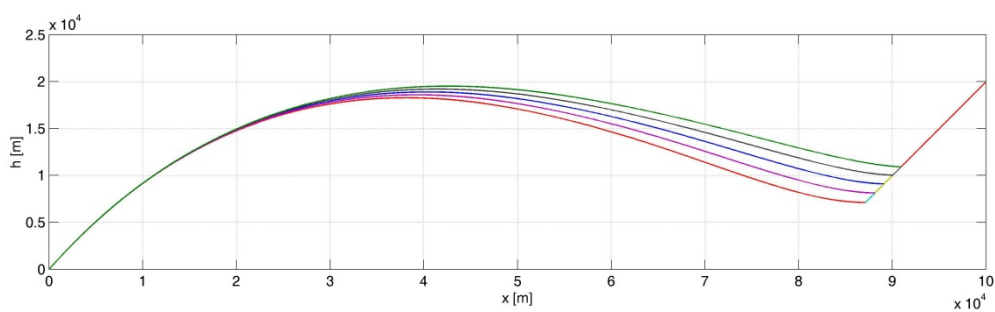
ciąg silnika marszowego F [%]	pozioma odległość spotkania d [m]	wysokość spotkania h [m]	odległość spotkania r [m]	czas dolotu t [s]
90%	95 851	7 113	96 114	94,9
95 %	96 786	8 141	97 127	92,7
100%	97 662	9 102	98 085	90,6
105 %	98 506	10 027	99 015	88,8
110 %	99 320	10 917	99 919	87,1



Rys. 15. Przestrzenne trajektorie rakiety przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego



Rys. 16. Trajektorie rakiety przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego w płaszczyźnie xy



Rys. 17. Trajektorie rakiety przy rozrzucie wartości ciągu silnika marszowego w płaszczyźnie xh

### 3. WNIOSKI

W pracy najwięcej uwagi poświęcono badaniom zjawisk aerodynamicznych towarzyszących naprowadzaniu rakiety Wega na rakietę balistyczną. Z uwagi na brak możliwości prowadzenia eksperymentów ogniowych z raketami realnymi, za podstawowe przyjęto badania symulacyjne.

Rakiety balistyczne jako obiekt niszczenia wyróżniają się następującymi osobliwościami:

- dominujący ruch rakiety odbywa się w płaszczyźnie pionowej,
- czynnikiem decydującym są zjawiska kinematyczne zachodzące w wysokości, a nie względem parametru ruchu rakiety balistycznej,
- rakietę balistyczną wykonuje w atmosferze silne manewry prędkością,
- cechą charakterystyczną jest krótki czas przebywania rakiety w strefie ognia zestawu przeciwlotniczego.

W odniesieniu do wykrywania, śledzenia i ostrzału rakiet balistycznych z wykorzystaniem zestawu Wega zasadnicze uwagi i wnioski są następujące:

- potencjał radiolokacyjny zestawu Wega spełnia wymagania w zakresie zwalczania rakiet balistycznych,
- z uwagi na bardzo krótki czas dolotu rakiety balistycznej do strefy startu niezbędne są wstępne dane wskazujące parametry położeniowe nadlatującej rakiety balistycznej,
- rakiety mogą być zwalczane tylko z przedniej półsfery na odległościach nie przekraczających 100 km,
- z przeprowadzonych badań, analiz oraz jakości środków radiolokacyjnych zestawu Wega wynika, że prawdopodobieństwo naprowadzenia rakiety Wega na rakietę balistyczną – z błędem mniejszym od zasięgu głowicy bojowej – jest wysokie.

Wśród zestawów raketowych będących na wyposażeniu wojsk Wega jest zestawem o największych możliwościach niszczenia rakiet balistycznych, a jego zmodernizowana wersja jest konstrukcyjnie przygotowana do wprowadzenia niezbędnych uzupełnień funkcjonalnych.

### 6. LITERATURA

- [1] Mrozek B., Mrozek Z.: *MATLAB i Simulink. Poradnik użytkownika*, wydanie III, Helion 2010.
- [2] PN-78/N-03100. *Atmosfera wzorcowa*, Wydawnictwa Normalizacyjne, 1978.
- [3] Warchulski M., Warchulski J.: *Modelowanie obwodu naprowadzania rakiety sterowanej komendowo*, VI Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 13-17 maja 2002, materiały konferencyjne, s. 375-382.
- [4] Warchulski M., Warchulski J., Kurowski W.: *Wykorzystanie pakietu MATLAB-Simulink do modelowania ruchu rakiety przeciwlotniczej*, VIII Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 10-14 maja 2004, materiały konferencyjne, s. 261-268.
- [5] Warchulski M., Warchulski J.: *Model symulacyjny rakiety balistycznej jako celu dla systemu obrony przeciwlotniczej (przeciwraketowej)*, X Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 8-12 maja 2006, materiały konferencyjne, s.253-262.

- [6] Warchulski M., Warchulski J., Rodzik D.: *Wykorzystanie środowiska Matlab-Simulink do syntezy nowej metody naprowadzania rakiety przeciwlotniczej*, XIV Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 10-14 maja 2010, materiały konferencyjne, s. 523-534.
- [7] Zestaw raketowy S-200WE. Opis techniczny. Dowództwo Wojsk Obrony Powietrznej Kraju, Warszawa 1989.