

Robert Głębocki  
Ryszard Vogt  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

## **IDENTYFIKACJA POŁOŻENIA PRZESTRZENNEGO OBIEKTU WZGLĘDEM CELU METODAMI OPARTYMI O SZTUCZNE SIECI NEURONOWE.**

*W referacie przedstawiono zagadnienie naprowadzania sterowanych pocisków moździerzowych i bomb lotniczych. Zastosowano tu układ wykonawczy sterowania oparty na jednorazowych impulsowych silnikach korekcyjnych. Metoda ta daje dobre efekty jednak przy strzelaniu na odległości zbliżone do maksymalnego zasięgu jakość sterowania spada. Opisano przyczyny tego zjawiska oraz zaproponowano metodę poprawy uzyskiwanej dokładności sterowania.*

## **OBJECT TO GOAL ATTITUDE IDENTIFICATION METHODS BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS.**

*In paper we presents problem of guidance of controlled mortar missiles and bombs. We used control system based on one time used impulse control motors set. This method gave good results but with maximal range fire control quality is going down. We described reasons of it and proposed method of improvement control quality.*

### **1. WPROWADZENIE DO ZAGADNIENIA.**

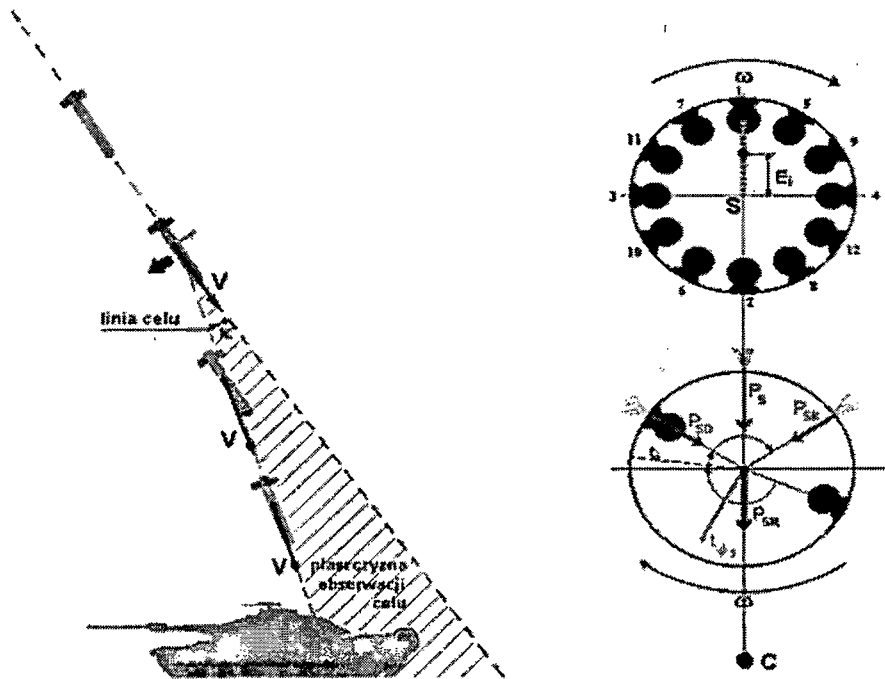
Przedstawione w niniejszej pracy zagadnienia dotyczą badań nad układami sterowania pocisków moździerzowych i bomb lotniczych. W opisywanym rozwiązaniu pociski wirują w czasie lotu sterowanego. Sterowanie jest realizowane za pomocą jednorazowych raketowych silników korekcyjnych rozmieszczonych promieniście wokół środka ciężkości pocisku. Uruchomienie silnika powoduje powstanie impulsu siły skierowanego prostopadle do osi symetrii pocisku i skierowanego wzdłuż prostej przechodzącej przez jego środek ciężkości (rysunek 1).

Zadziałanie silnika oddziałuje bezpośrednio na zmianę wektora prędkości lotu pocisku zarówno co do kierunku jak i co do wartości. Precyzyjne naprowadzanie na cel realizuje się poprzez kolejne odpalenie kilku silników.

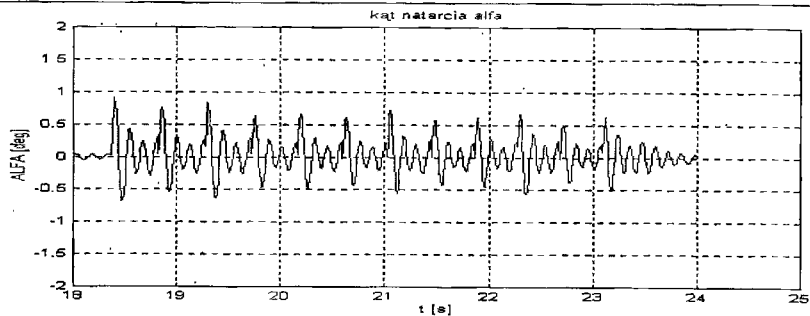
Decyzja o odpaleniu silnika oraz częstość zwana krotnością odpalania zależy od zadanego sygnału sterującego wyznaczonego na podstawie sygnału uchybu. Krotność odpalania, oznaczająca ilość obrotów pocisku między kolejnymi odpaleniami silników, zwiększa się w odpowiedni sposób z wartością sygnału  $K$ . Natomiast kierunek działania impulsu sił sterujących od kolejnych silników zależy od momentu odpalania

wybranego silnika. Tak więc momenty odpalania silników zależą od kąta fazowego  $\phi_m$  położenia celu, położenia kolejno odpalanego silnika na obwodzie pocisku, kąta  $\varphi$  i prędkości obrotowej  $\omega_x$  pocisku.

Czas działania silnika  $t_k$  powinien być możliwie krótki. Odpowiednie badania przeprowadzone przez autorów wykazały, że czas ten nie powinien być większy od  $\frac{1}{4}$  okresu obrotu pocisku. Impuls sterujący silnika powoduje w tym czasie odpowiednią zmianę kierunku lotu pocisku za którą nie nadąża położenie jego osi symetrii. Pojawiają się zatem kąty natarcia i ślizgu, które przy odpowiedniej stateczności pocisku oscylacyjnie zanikają w czasie. Czas ten zależy od krotności odpalania  $N$  i prędkości kątowej obrotu pocisku. Najkrótszy jest przy  $N=1$ . Najczęściej nawet ekstremalne amplitudy kątów natarcia i ślizgu przy tym sterowaniu nie są duże (rysunek 2) i nie powodują znaczących zakłóceń np. w pomiarach położenia celu przez głowicę śledzącą. Jednak w pewnych warunkach (krotności  $N$ , prędkości obrotowej  $\omega_x$ , i prędkości lotu  $V$ ) musi wystąpić zjawisko rezonansu i kąty natarcia i ślizgu osiągają znacznie większe wartości.

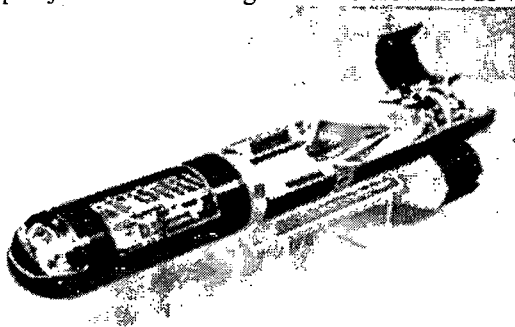


Rysunek 1. Zasada sterowania pociskiem przy pomocy silników raketowych.



Rysunek 2. Zmiany kąta natarcia przy krotkości  $N=3$

Jednokanałowe - impulsowe bezpośrednie sterowanie lotem umożliwia uzyskanie wymaganej jakości sterowania przy odpowiednim doborze algorytmów odpalania silników, jak również stateczności dynamicznej pocisku. W odróżnieniu od skokowo-zmiennego pośredniego sterowania, nie zachodzi konieczność zachowania kompromisu między statecznością a sterownością stąd, stateczność pocisków z bezpośrednim sterowaniem może być dowolnie duża. Bardzo złożone przy tym sterowaniu są algorytmy odpalania silników. Przy ich wyznaczaniu należy uwzględnić taką kolejność odpalania silników, przy której niewyważenie dynamiczne pocisków będzie minimalne. Algorytmy te muszą zapewnić wymaganą jakość sterowania m.in. dzięki proporcjonalności średniego efektu sterowania do wartości sygnału sterowania.



Rysunek 3. Pocisk STRIX sterowany zestawem silników impulsowych.

Właściwości pocisku sterowanego bezpośrednio zestawem silników impulsowych:

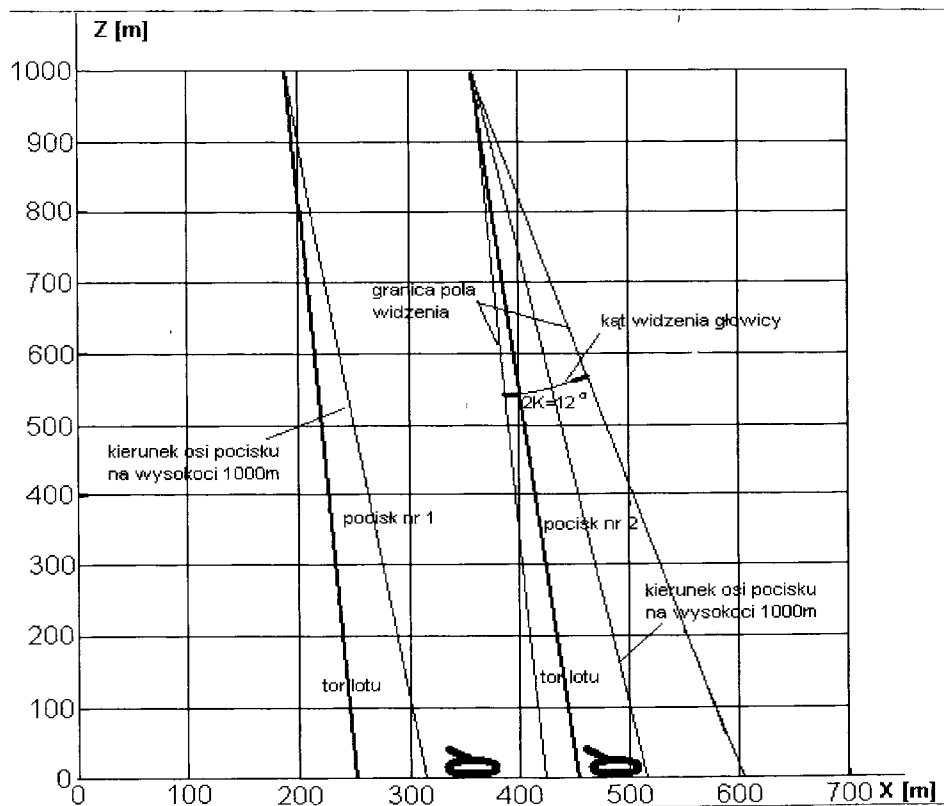
- a) Okresowo i skokowo-zmienne sterowanie wytwarza siły sterujące działające w całym dowolnym zakresie sterowanego lotu, natomiast sterowanie impulsowe ma ograniczoną ilość impulsów korekcyjnych od silników. W związku z tym bardziej ograniczony czas sterowanego lotu
- b) Reakcja pocisku na bezpośrednie sterowanie jest znacznie szybsza. Zmiana kierunku lotu pod działaniem sił sterujących nie wymaga pochylenia pocisku dla wytworzenia odpowiednich sił aerodynamicznych, jak to ma miejsce podczas sterowania pośredniego. Zmniejsza to inercyjność sterowania o dwa rzędy.

c) Podczas sterowania bezpośredniego występują znacznie mniejsze kąty natarcia i ślizgu, które m.in. zwiększają opór aerodynamiczny, jak również zakłócają pomiar położenia celu przez głowicę śledzącą.

d) Układy wykonawcze sterowania o działaniu impulsowym, którego podstawą są silniki rakietowe, nie posiadają żadnych ruchomych mechanizmów komplikujących konstrukcję oraz zwiększających zapotrzebowanie na energię (szczególnie elektryczną). Dodatkowo dużą zaletą tych układów jest większa niezawodność działania.

e) Zmniejszone wymagania co do aerodynamiki pocisków z impulsowym bezpośrednim sterowaniem wynikają m.in. z tego, że:

- płatowce nie wytwarzają aerodynamicznych sił nośnej i bocznej wymagających odpowiednich powierzchni nośnych oraz kątów natarcia i ślizgu;
- brak jest ograniczeń co do maksymalnych wartości stateczności dynamicznej;
- zmiana kierunku lotu odbywa się pod działaniem sił rakietowych niezależnych od prędkości lotu.

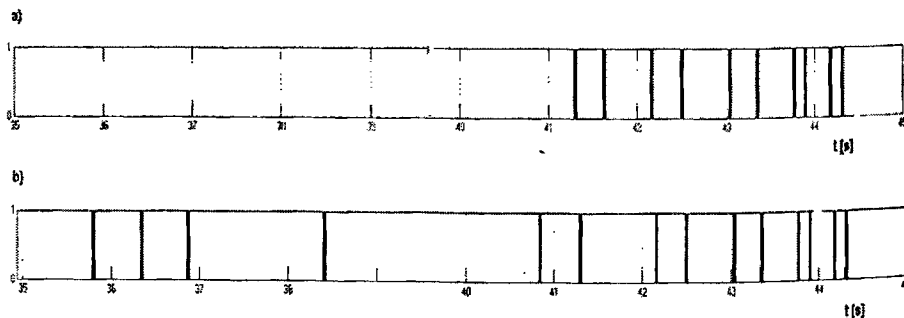


Rysunek. 4. Tory lotu i parametry śledzenia celu z wysokości 1000m dla pocisków 1 i 2.

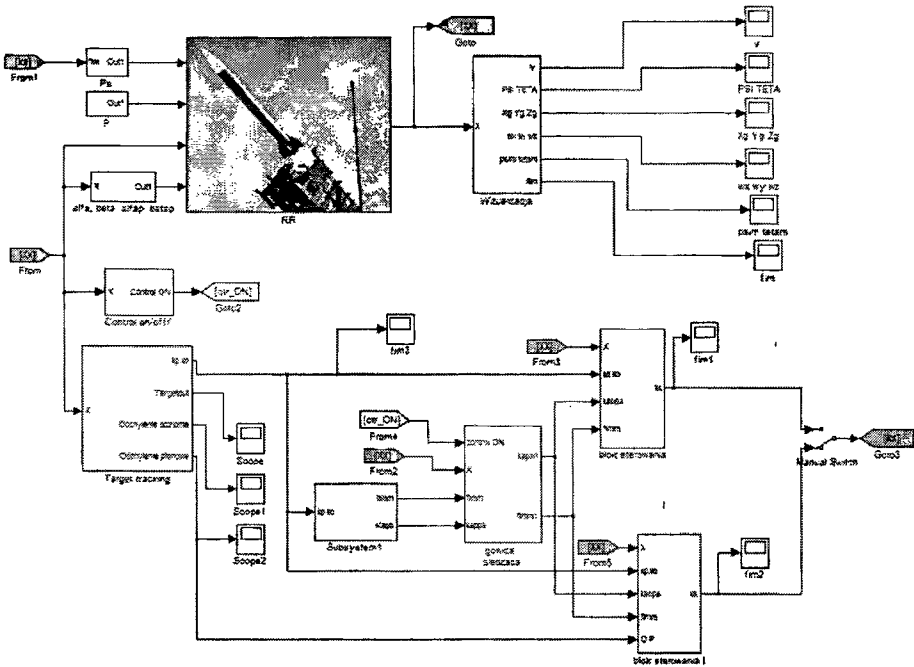
## 2. PROBLEM OCENY POŁOŻENIA POCISKU WZGLĘDEM CELU.

Oparty na tych założeniach układ sterowania pociskiem dał zadawalające rezultaty. Uchyby końcowe mieszczące się w obrysie przeciętnego czołgu przyjmując jako punkt celowania obszar najcieplejszy czyli silnik. Jakość sterowania pogarsza się jednak gdy trajektoria lotu pocisku lub bomby jest bardziej płaska. Szczególnie dotyczy to strzelania pociskiem na dalsze odległości. Płaska trajektoria lotu może powodować niedoloty pocisków w skrajnych przypadkach uniemożliwiające trafienie w cel. Dla układu sterowania bardzo istotną informacją pozwalającą układowi sterowania przeciwdziałać temu zjawisku jest kąt obrotu pocisku i wynikająca stąd możliwość oceny, czy cel jest widziany poniżej, czy powyżej osi głównej pocisku. Informacja taka jest zazwyczaj dostępna z układu giroskopowego. Jego zastosowanie podraża jednak koszty pocisku, komplikuje jego konstrukcję a w przypadku pocisków moździerzowych jest często niemożliwe z powodu przeciążeń panujących przy wystrzale. W przedstawionych badaniach ocenę położenia czy cel jest widziany powyżej czy poniżej osi pocisku starano się uzyskać przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych.

Na rysunku 4 przedstawiono dwa skrajne przypadki sytuacji pocisku w chwili rozpoczęcia sterowania. Pocisk nr 1 widzi cel powyżej swojej osi głównej. Pocisk nr 2 widzi cel poniżej swojej osi głównej. Zaznaczony grubszą linia tor lotu odpowiada lotowi niesterowanemu a zatem przedstawia zmiany kierunku osi głównej pocisku. Widzimy stąd, że w pierwszym przypadku sterowanie należy rozpocząć niezwłocznie po detekcji celu w drugim przypadku znacznie korzystniej będzie aż oś pocisku przejdzie przez cel. Daje nam to bardziej stromy tor ataku (łatwiejszy w sterowaniu) i pozwala użyć mniejszej ilości impulsowych silników korekcyjnych. Rysunek 5 przedstawia rozkład impulsów w trakcie lotu sterowanego dla pocisku drugiego z rysunku 4. Wykres a) z informacją czy cel znajduje się powyżej osi pocisku, wykres b) bez tej informacji. Dokładność trafienia w pierwszym przypadku jest od 30 do 50% większa mimo użycia mniejszej liczby silników sterujących.



Rysunek 5. Przebiegi impulsów od silników sterujących dla pocisku 2  
a) z dodatkową informacją o położeniu przestrzennym  
b) bez dodatkowej informacji

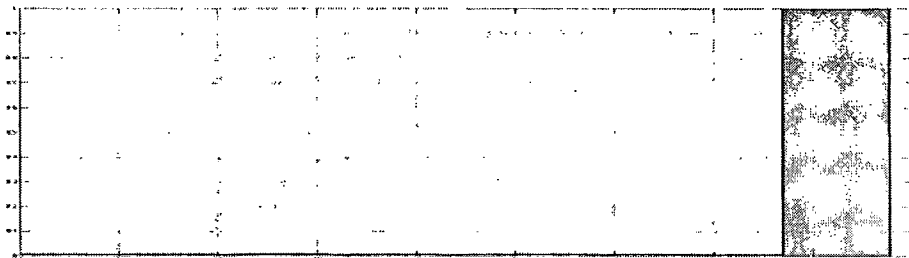


Rysunek 6. Model sterowanego pocisku w środowisku Matlab/Simulink.

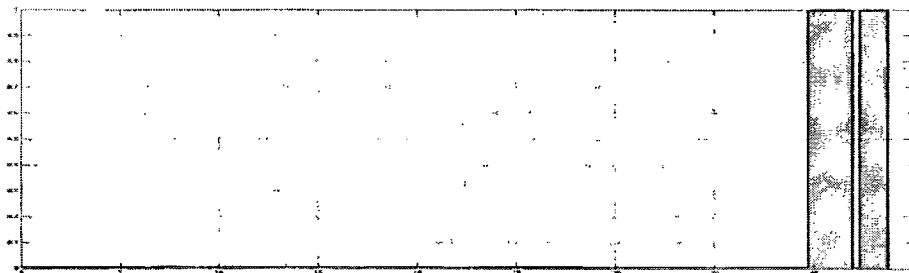
Jednak dla związanej na stałe z pociskiem głowicy śledzącej obydwa przypadki są nierozróżnialne. Kąt uchybu pod jakim głowica widzi cel jest w obu przypadkach taki sam. Brak układu giroskopowego nie pozwala na rozróżnienie obu przypadków. W celu rozpoznania w której powyższych sytuacji znajduje się nasz pocisk zastosowano układ oceny położenia przestrzennego pocisku oparty na sztucznych sieciach neuronowych. Użyto trójwarstwowej sieci neuronowej propagacji wstecznej błędów, która analizuje przebiegi czasowe zmian kąta uchybu. Na podstawie tych zmian sieć ocenia czy cel znajduje się powyżej czy poniżej osi głównej pocisku. Sieć korzysta dodatkowo jeszcze z informacji o bieżącej prędkości obrotowej pocisku.

### 3. BADANIA.

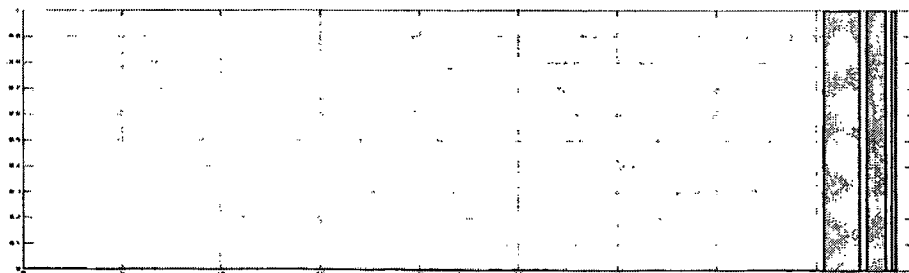
Badania przeprowadzono w oparciu o modele symulacyjne pocisku moździerzowego i bomby lotniczej zbudowane w środowisku Matlab/Simulink. Układ sterowania wykonany jest w trzech wersjach. Pierwsza wyposażona jest w informacje z układu giroskopowego. Druga nie posiada tej informacji a w trzeciej zastosowano moduł z siecią neuronową. W układzie sterowania wykorzystano sztuczną sieć neuronową propagacji wstecznej błędów. Sieć posiadała trzy warstwy po 50 neuronów w każdej. Pary uczące zostały wykonane na podstawie pracy układu wyposażonego w giroskop. Na tej podstawie sieć była uczona rozpoznawania czy cel jest widziany powyżej czy poniżej osi głównej pocisku zastępując w kolejnych symulacjach układ giroskopowy.



*Rysunek 7a Przebieg sygnału sterującego w czasie lotu pocisku dla sterowania bez układu giroskopowego.*



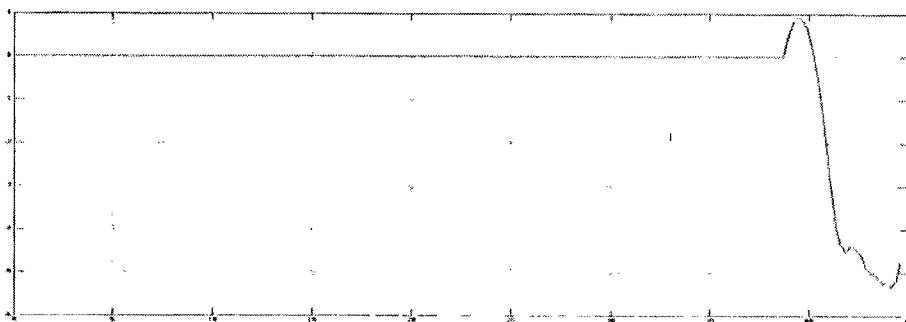
*Rysunek 7b Przebieg sygnału sterującego w czasie lotu pocisku dla sterowania z układem giroskopowym.*



*Rysunek 7c Przebieg sygnału sterującego w czasie lotu pocisku dla sterowania bez układu giroskopowego z zastosowaniem sieci neuronowej do oceny położenia przestrzennego pocisku względem celu.*

Rysunki 7 a, b i c przedstawiają wykresy sygnałów sterujących dla przypadku lotu pocisku 2 z rysunku 4. Pocisk leci najpierw lotem niesterowanym i w trzydziestej dziewiątej sekundzie następuje detekcja celu. Na rysunku 7a mamy przebieg sygnału sterującego gdy układ sterowania pozbawiony jest informacji o tym czy cel jest widziany powyżej czy poniżej osi głównej pocisku. Rysunek 7b pokazuje przebieg tegoż sygnału gdy układ sterowania wyposażony jest w informacje o kacie obrotu pocisku. Rysunek 7c przedstawia przebieg sygnału sterującego w czasie lotu pocisku dla sterowania bez układu giroskopowego z zastosowaniem sieci neuronowej do oceny

położenia przestrzennego pocisku względem celu. Wyniki uzyskane dla tych eksperymentów numerycznych najlepsze otrzymano dla przypadku b. Jednak wynik sterowania mierzony uchybem końcowym trafienia uzyskany dla przypadku c jest o 50% lepszy niż dla przypadku a. Nie udało się nam jak na razie poprzez użycie sztucznej sieci neuronowej uzyskać wyniku takiego samego jak dla układu sterowania wyposażonego w giroskop. Sieć nie zawsze prawidłowo ocenia położenie przestrzenne pocisku względem celu. Jednak jej użycie poprawia rezultaty uzyskane bez użycia giroskopu. Na rysunku 8 widzimy odchyłkę toru lotu od pierwotnej osi wizowania celu dla przypadku lotu z zastosowaniem sieci neuronowej. Układ sterowania rozpoczyna korekcję lotu dopiero po minięciu celu przez osłona pocisku.



*Rysunek 8 Odchyłka toru lotu od pierwotnej osi wizowania celu dla lotu pocisku przy sterowaniu bez układu giroskopowego z zastosowaniem sieci neuronowej do oceny położenia przestrzennego pocisku względem celu.*

Badania prowadzono w ramach grantu MNIł  
Nr 0T00A02826

## Literatura

1. R. Głębocki, R. Vogt: „Analiza metod sterowania małych obiektów latających.” XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa czerwiec 2005
2. R. Głębocki: „Wybrane problemy sterowania lotem przestrzennym inteligentnych pocisków mózdzierzowych.” XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa czerwiec 2005
3. R. Vogt, R. Głębocki, M. Żugaj, „Zastosowanie sieci neuronowych do oceny położenia przestrzennego sterowanych pocisków mózdzierzowych i bomb lotniczych” X Krajowa konferencja automatyzacji i eksploatacji systemów sterowania i łączności. Gdynia-Jastarnia październik 2005
4. T. Hung Nguyen, „First course in fuzzy and neural control”.
5. A Skomara, “Skuteczność lotniczych rakiet samonaprowadzających się na cel” Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2005 .