

dr hab. inż. Ryszard VOGT  
dr inż. Robert GŁĘBOCKI  
mgr inż. Marcin ŻUGAJ  
mgr inż. Mariusz ANDRZEJCZAK  
Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej

# **STEROWANIE SAMONAPROWADZAJĄCYCH POCISKÓW MOŹDZIERZOWYCH Z WYKORZYSTANIEM STEROWNIKA OPARTEGO NA SZTUCZNYCH SIECIACH NEURONOWYCH**

*W referacie przedstawiono niektóre problemy związane z systemem sterowania inteligentnych pocisków mózdzierzowych przy pomocy rakietowych silników korekcyjnych działających bezpośrednio na środek ciężkości pocisku. Autorzy opisali możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych celem poprawy jakości sterowania pocisku.*

## **1. Wstęp**

Gazodynamiczne impulsowe sterowanie lotem pocisków mieści się w nurcie rozwoju najnowszych technik sterowania. Ze względu na zalety w stosunku do tradycyjnych sterów nad ich wykorzystaniem pracuje się w wielu ośrodkach badawczo rozwojowych. Największym problemem jest złożoność dynamiczna procesów sterowania lotem i logika przetwarzania sygnałów zapewniająca wymaganą dokładność naprowadzania. Do najbardziej znanych i zawansowanych należy szwedzki samonaprowadzający się pocisk STRIX zaliczany do klasy tzw. Pocisków inteligentnych. Również w Polsce prowadzono w latach 90-tych prace nad podobnymi rozwiązaniami sposobu sterowania przy opracowywaniu pocisku mózdzierzowego RAD. Stopień zawansowania tych prac był duży, a wyniki prowadzonych bardzo rozległych badań symulacyjnych weryfikowanych eksperymentalnie w warunkach laboratoryjnych pozytywne. Niestety przyjęte rozwiązania systemu sterującego nie zostały sprawdzone w warunkach poligonowych m.in., dlatego że w przeprowadzanych pierwszych tego typu badaniach nie rozwiązano bardziej podstawowych problemów takich jak stateczność lotu. Mimo bardzo obiecujących wyników prac nad głowicą i przedziałem sterowania prace nad pociskiem RAD zostały przerwane.

Przedstawiane w niniejszej publikacji wyniki badań są w pewnym sensie kontynuacją tamtych prac. Bieżące badania miały na celu sprawdzenie możliwości poprawy jakości sterowania tego typu pocisku dzięki zastosowaniu algorytmów sterowania wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe. Starano się zastosować sztuczne sieci neuronowe do zagadnień których w trakcie programu RAD nie udało się dostatecznie dobrze rozwiązać metodami klasycznymi lub ich użycie (metod opartych na sieciach neuronowych) daje szansę na znaczącą poprawę jakości sterowania. Możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych badano w następujących obszarach: ocena położenia przestrzennego pocisku, rozpoznawania

identyfikacja i selekcja celów widzianych przez głowicę śledzącą, modyfikacja algorytmów sterowania. W niniejszej pracy przedstawione zostaną częściowe wyniki prac nad pierwszym z powyższych zagadnień. Użycie układów oceny położenia przestrzennego pocisku opartych na sztucznych sieciach neuronowych pozwala zrezygnować z dodatkowych urządzeń pomiarowych jak np. giroskopy zwiększających masę i cenę pocisku. Z dotychczasowych doświadczeń zespołu wynika, że otrzymane tą drogą informacje są zazwyczaj łatwo interpretowalne przez człowieka jednak trudne do opisanego algorytmami sterowania. Dlatego podjęto próbę rozwiązania tego problemu stosując sztuczne sieci neuronowe w układach impulsowego korygowania toru lotu małych obiektów latających.

## 2. Obiekt Sterowania

Pocisk wystrzelony jest z moździerza i sterowany jedynie w fazie opadania już na stromym odcinku swej trajektorii lotu. Pocisk taki realizujący zasadę "fire and forget" jest niejako wstrzelony w obszar działania i dopiero w końcowej stromej fazie swego lotu jest naprowadzany na cel. Musi być dość dokładnie wstrzelony nad obszar działania celu. Zakłada się, że głowica śledząca ma kąt obserwacji do  $12^\circ$  i postrzega cele z odległości do 1000m. Pocisk wiruje w trakcie lotu ruchem wymuszonym poprzez przekoszenie brzechw.

Funkcjonowanie pocisku możemy podzielić na kilka etapów:

1. Wykrycie celu przez obserwatora, obliczenie danych ogniowych.
2. Wystrzelenie pocisku, ruch w lufie, rozłożenie stateczników.
3. Balistyczna faza lotu pocisku.
4. Faza lotu kierowanego. W jej czasie pracuje głowica samo naprowadzająca. Następuje przechwycenie i wybór celu oraz sterowanie pociskiem przy pomocy silników korekcyjnych, aż do momentu uderzenia pocisku w cel.

W takim typie pocisku, gdzie sterowanie lotem jest tylko w końcowej jego fazie, wymagane jest niezbyt duże ale szybkie wpływanie na jego wektor prędkości. Zadanie takie bardzo dobrze może być zrealizowane przez układ wykonawczy zbudowany na bazie rakietowych silników korekcyjnych. Niewielkie silniki rakietowe skuteczniej będą oddziaływać na wektor prędkości pocisku niż klasyczne sterowanie aerodynamiczne. Przez co mogą dać lepsze od niego efekty samonaprowadzania.

### Dynamika zjawiska

Stosowane dotychczas metody sterowania obiektami latającymi zakładają, iż układ wykonawczy sterowania tak oddziałuje na obiekt sterowany aby siły pochodzące od sterów wywoływały zmianę momentu sił oddziałujących na obiekt, powodując jego obrót wokół środka masy, dzięki czemu powierzchnie nośne otrzymują niezbędny kąt natarcia potrzebny do wytworzenia siły sterującej. Tak więc najpierw wywołany jest obrót obiektu wokół środka masy co dopiero pociąga za sobą zmianę wektora prędkości jego środka masy.

W proponowanym rozwiązaniu układ wykonawczy sterowania (zespół rakietowych silników korekcyjnych) oddziałuje na środek masy obiektu a ruch wokół środka masy jest dopiero następstwem tego pierwszego i oddziaływań

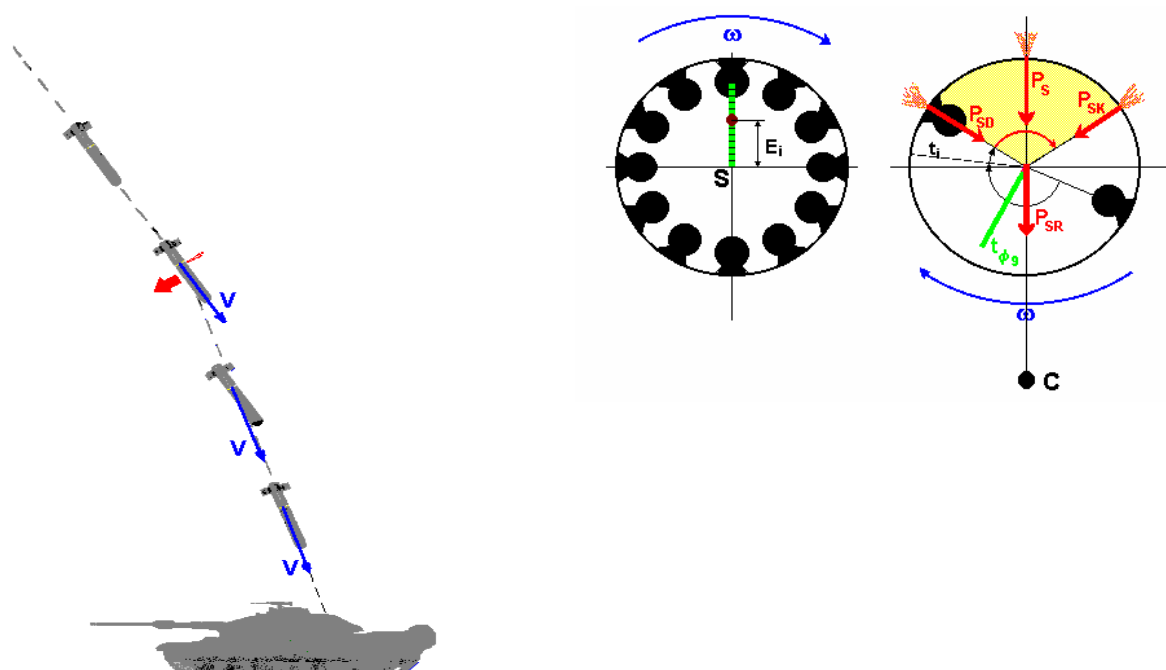
aerodynamicznych. Rozwiązanie takie pozwala na dużo efektywniejsze oddziaływanie na jego wektor prędkości.

W obiektach wirujących, gdzie jeden kanał służy do sterowania zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej, przyjęcie takiego rozwiązania pozwala nie tylko na szybszą reakcję obiektu na bodźce sterujące ruchem a co za tym idzie możliwość precyzyjniejszego naprowadzania obiektu na cel, lecz również umożliwia uproszczenie układu wykonawczego sterowania.

### Metoda realizacji sterowania impulsowego poprzez raketowe silniki korekcyjne

W rozwiązaniu tym sterowanie jest realizowane za pomocą jednorazowych raketowych silników korekcyjnych rozmieszczonych promieniście wokół środka ciężkości pocisku. Uruchomienie pojedynczego silnika powoduje powstanie impulsu siły skierowanego prostopadle do osi głównej symetrii pocisku i skierowanego wzdłuż prostej przechodzącej przez jego środek ciężkości.

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 odpalanie kilku silników. W przyjętym w pracy rozwiązaniu zakłada się wykorzystanie dwunastu jednorazowych silników sterujących rozmieszczonych równomiernie wokół środka ciężkości (patrz rysunek 1).



Rysunek 1. Zasada pracy impulsowych sterów gazodynamicznych

Na podstawie pomiaru położenia celu w polu widzenia, wypracowywany jest czas i kierunek impulsów korygujących tor lotu, a następnie sygnały inicjujące dla impulsowych raketowych silników sterujących.

Największą zaletą takiego sterowania w stosunku do tradycyjnych sterów aerodynamicznych jest:

- Większa szybkość działania, inercyjność obiektu na sterowanie jest o dwa rzędy mniejsza od sterowania pośredniego;
- Wyeliminowanie mechanicznych elementów ruchomych, co zwiększa niezawodność działania i zmniejsza zapotrzebowanie na energię (np. elektryczną) zasilającą stery;
- Podczas sterowania występują znacznie mniejsze kąty natarcia i ślizgu komplikujące pomiar położenia celu;
- Mniej skomplikowana aerodynamika obiektu w stosunku do klasycznego sterowania aerodynamicznego gdzie konieczny jest kompromis między jego statecznością a sterownością;

Podstawą działania systemu wykrywania i samonaprowadzania się pocisku do celu jest:

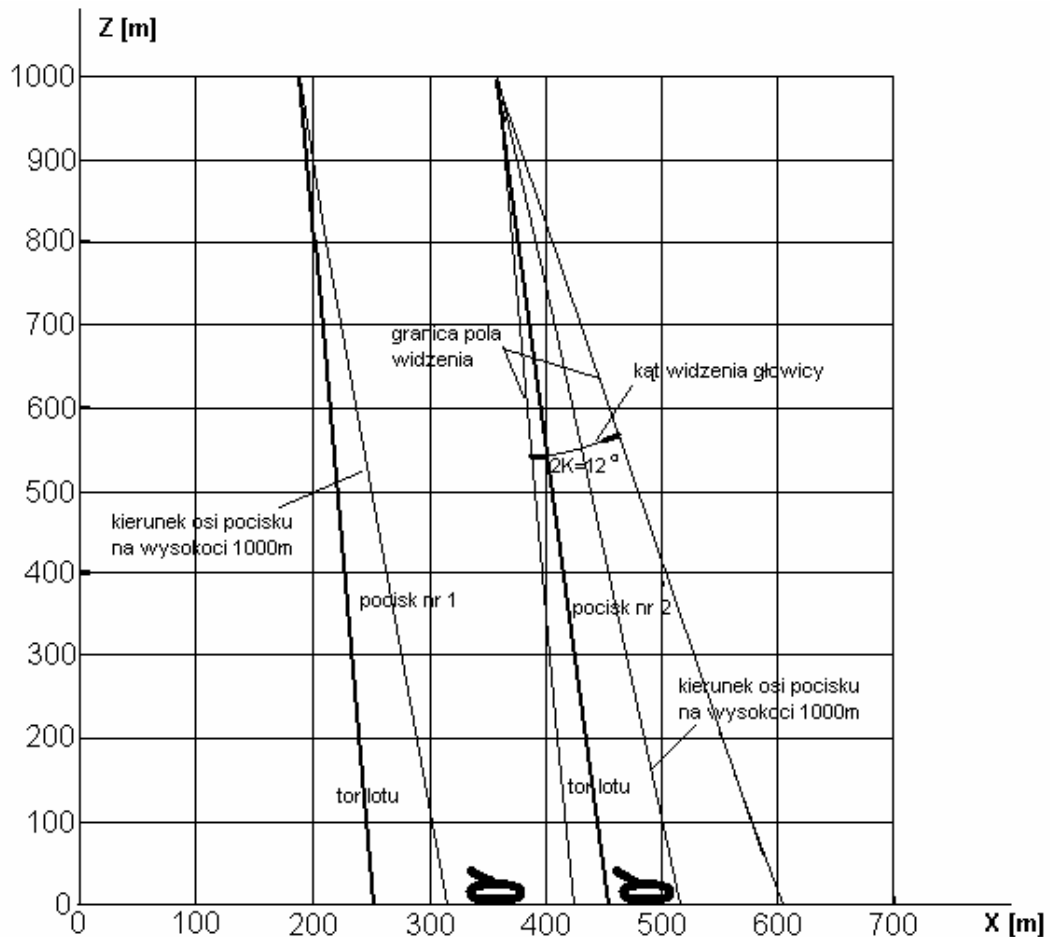
- Głowica Śledząca, której podstawą będą wielosegmentowe liniowe detektory sztywno związane z wirującym obiektem; możliwość sterowania przestrzennego zapewni ruch wirowy tego obiektu;
- Blok Rozpoznania Celu pracujący na sygnałach z Głowicy Śledzącej blok ma za zadanie rozpoznanie celu wyznaczenie jego środka. Następnie przetworzenie dyskretnej informacji (pobieranej raz na obrót pocisku) na ciągły sygnał uchybu przystosowany do wykorzystania przy samonaprowadzaniu. W przypadku detekcji kilku celów blok przekazuje dalej informacje o każdym z nich;
- Blok Położenia Przestrzennego, ważnym elementem jego działania jest sieć neuronowa. Położenie przestrzenne pocisku względem celu oraz względem ziemi określone jest jedynie na podstawie informacji z Głowicy Śledzącej. Nie zakłada się użycia innych urządzeń pomiarowych jak giroskopy i akcelerometry. W bloku tym następuje również wybór celu atakowanego w przypadku rozpoznania więcej niż jednego celu;
- Blok Nawigacji i Sterowania, którego zadaniem jest optymalizacja czasu włączenia sterowania oraz wytworzenia sygnałów sterujących zapewniających samonaprowadzanie pocisku po przyjętej trajektorii spotkania;
- Blok Wykonawczy Sterowania o działaniu bezpośrednim (siły sterujące działają na środek masy), w którym, podstawą sił sterujących są impulsy sił wytworzone przez odpowiednio rozmieszczone raketowe silniki korekcyjne.

### 3. Badania

Badania prowadzono w oparciu o stworzony środowisku obliczeniowym Matlab/Simulink model pocisku wraz z systemem sterowania przedstawiony na rysunku 4. Badania obejmowały następujący zakres prac:

1. Wyznaczenie podstawowych założeń do projektu na podstawie analizy potrzeb i stosowanych rozwiązań;
2. Studia i opracowanie koncepcji rozwiązań głowicy śledzącej i systemu rozpoznawania celu;
3. Opracowanie koncepcji systemu sterującego z algorytmami przetwarzania sygnałów opartymi na sztucznych sieciach neuronowych;
4. Modelowanie poszczególnych elementów systemu naprowadzania
5. Badania symulacyjne mające na celu:

- przebadanie dynamiki ruchu pocisku we wszystkich fazach ruchu oraz wyznaczenie jej skuteczności działania w różnych warunkach;
- analiza wpływu na sterowanie ruchem przyjętych rozwiązań strukturalnych Głowicy, Bloku Uchybu, Bloku Nawigacji i Sterowania, Układu Wykonawczego Sterowania;
- Optymalizacja struktur i parametrów systemu.



Rysunek 2. Tor lotu i parametry śledzenia celu z wysokości 1000m.

Badania zostaną oparte na symulacji komputerowej w oparciu o dane i doświadczenia zebrane we wcześniejszych badaniach nad pociskami sterowanymi prowadzonymi przez członków zespołu.

Proponowany system sterujący różni się od dotychczas stosowanych daleko idącym uproszczeniem pokładowej aparatury sterującej.

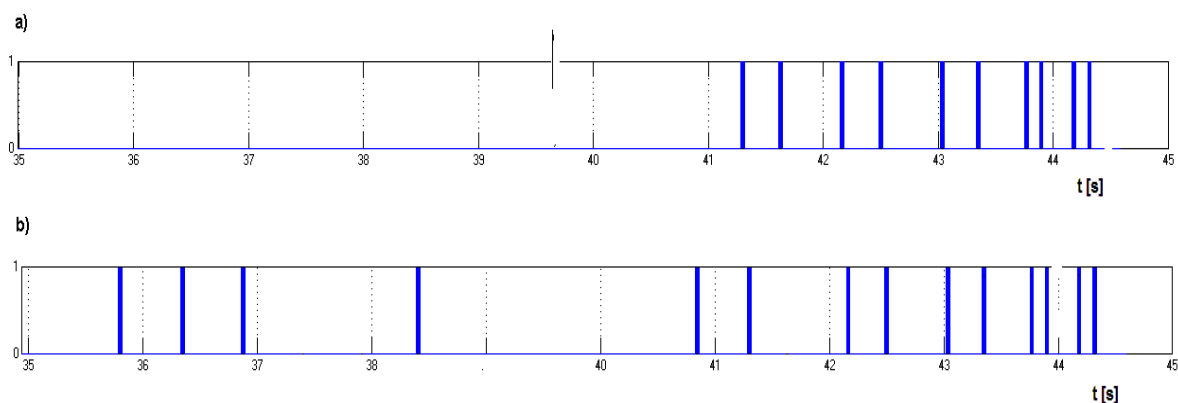
Polegają one głównie na

- braku części ruchomych w tym uproszczonej budowie głowicy składającej się z jednego lub kilku liniowych segmentowych detektorów związanych z wirującym pociskiem co zwiększa jego niezawodność a także obniża koszty i masę;

- rezygnacji z giroskopowego układu odniesienia, powszechnie stosowanego w znanych rozwiązaniach, dzięki temu że proces przetwarzania sygnałów odbywać się będzie w układzie współrzędnych związanym z wirującym obiektem;
- bezpośredniej korekcji toru lotu przez przyłożenie impulsów sił od silników raketowych, do środka masy.

Przy takich uproszczeniach należy liczyć się z problemami związanymi z brakiem rozwiązania problemu położenia pocisku względem ziemi objawiającymi się (niedolotami pocisku) oraz niemożnością wykorzystania w pełni możliwości układu wykonawczego sterowania.

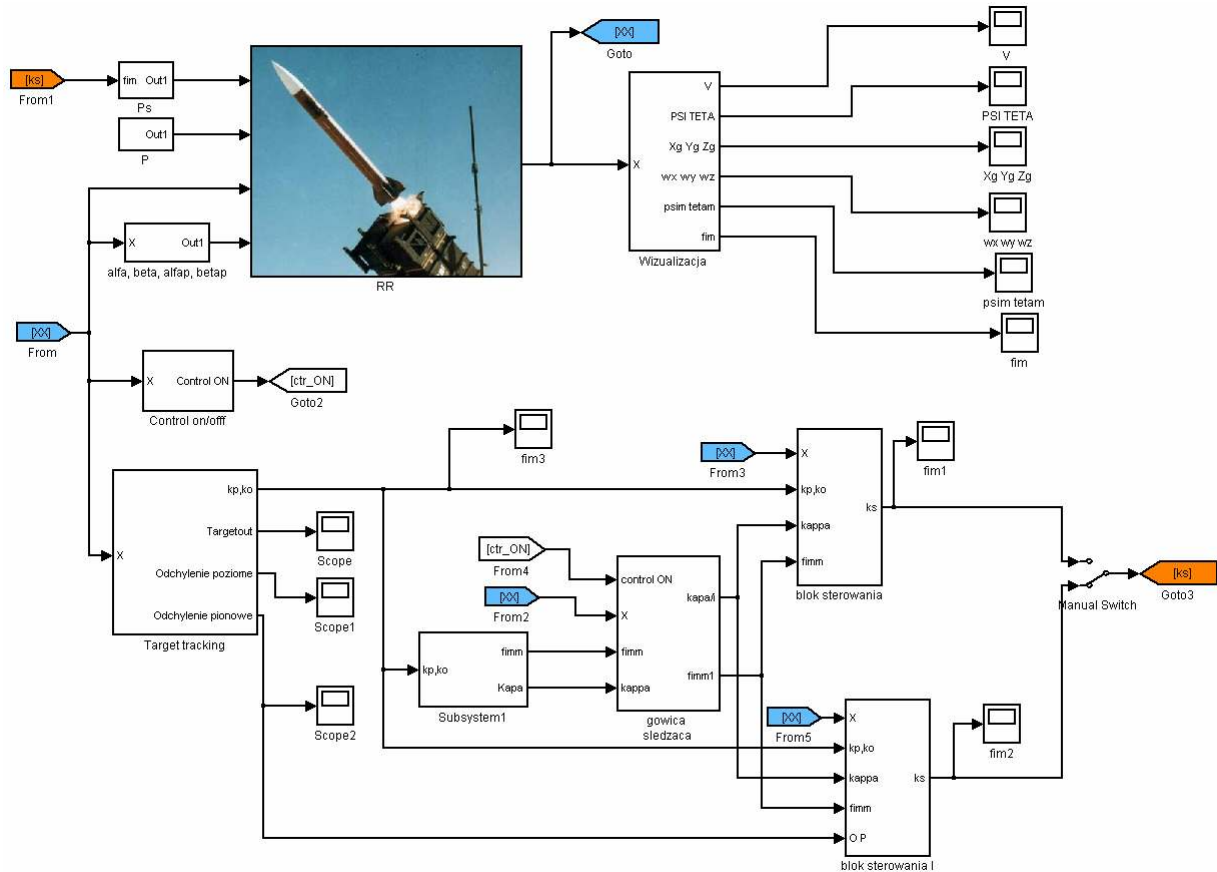
Użycie układów oceny położenia przestrzennego pocisku opartych na sztucznych sieciach neuronowych pozwala zrezygnować z dodatkowych urządzeń pomiarowych jak np. giroskopy zwiększających masę i cenę pocisku. Jednocześnie nie zawsze możliwych do użycia np. w pociskach wystrzeliwanych z moździerza lub haubicy ze względu na przeciążenia w czasie wystrzału. Przetwarzanie sygnałów w całym torze sterowania od liniowego detektora do sterów jest realizowane w układzie współrzędnych związanym z wirującym obiektem. Pozwoli to na rezygnację z giroskopowego układu odniesienia oraz znaczne uproszczenie aparatury pokładowej, z czym wiąże się m. inn. obniżenie kosztu wytwarzania.



Rysunek 3. Przebiegi impulsów od silników sterujących dla pocisku 2  
 a) z dodatkową informacją o położeniu przestrzennym  
 b) bez dodatkowej informacji

W opracowywanej wersji pocisku przyjęto, że dla układu sterowania umieszczonego na pokładzie pocisku dostępne są jedynie następujące informacje: aktualna wielkość uchybu kąowego (kąt pod jakim w danej chwili głowica śledząca pocisku widzi cel), prędkość obrotowa pocisku w danej chwili. Ponadto układ sterowania dysponuje danymi zaprogramowanymi bezpośrednio przed lotem jak odległość strzału prędkości lotu w poszczególnych jego fazach oraz czas rozpoczęcia obserwacji przez głowicę śledzącą. Przy tych założeniach udało się stworzyć układ sterowania pociskiem dający zadowalające rezultaty (uchyby końcowe mieszczące się w obrysie przeciętnego czołgu przyjmując jako punkt celowania obszar najcieplejszy czyli silnik). Jakość sterowania spada jednak wraz ze wzrostem zasięgu strzału gdy trajektoria lotu jest mniej stromotorowa. Z punktu widzenia układu sterowania bardzo istotną informacją poprawiającą jakość sterowania jest kąt obrotu pocisku  $\phi$ . Informacja ta jest zazwyczaj dostępna z układu

giroskopowego. Jak pisaliśmy wcześniej jego zastosowanie w pocisku wyrzeliwanym z moździerza jest jednak kłopotliwe ze względu na przeciążenia panujące przy wystrzale. W przedstawianych badaniach ocenę czy cel jest widziany powyżej czy poniżej osi pocisku starano się uzyskać przy pomocy sztucznych sieci neuronowych.



Rysunek 4. Model systemu sterowania pocisku sporządzony w środowisku obliczeniowym Matlab/Simulink.

Na rysunku 2 przedstawiono dwa przypadki gdy cel jest widziany powyżej osi pocisku (pocisk nr 1) i poniżej (pocisk nr 2). Tor lotu odpowiada lotowi niesterowanemu a zatem przedstawia zmiany kierunku osi pocisku. Widzimy stąd, że w pierwszym przypadku sterowanie należy rozpocząć niezwłocznie po detekcji celu w drugim przypadku znacznie korzystniej będzie poczekać aż oś pocisku przejdzie przez cel. Daje nam to bardziej stromy tor ataku (łatwiejszy w sterowaniu) i pozwala użyć mniejszej ilości silników korekcyjnych. Jednak dla głowicy śledzącej obydwa przypadki są nierozróżnialne. Stąd badania nad pozyskaniem informacji o położeniu celu względem osi pocisku w płaszczyźnie pionowej mimo braku możliwości zastosowania giroskopu.

Do zagadnienia zastosowano sieć perceptronową dwuwarstwową analizującą przebieg w czasie zmian kąta uchybu i na tej podstawie oceniającą położenie celu względem osi pocisku.

Drugą badaną metodą jest zastąpienie regulatora proporcjonalnego, stosowanego dotychczas w pocisku, przez regulator oparty na podobnej jak wyżej sieci perceptronowej. Sieć jest uczona na modelu pocisku posiadającym regulator z

możliwością oceny czy cel znajduje się powyżej czy poniżej osi pocisku. Rysunek 3 przedstawia rozkład impulsów w trakcie lotu sterowanego dla pocisku drugiego z rysunku 2. 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.

*Badania prowadzono w ramach grantu MNIł Nr OT00A02826*

## Literatura

1. R. Vogt, R. Głębocki,,: „Modelowanie i badania systemowe w zastosowaniu do projektowania, produkcji i eksploatacji pocisków sterowanych” III Konferencja Awioniki Waplewo 2001, Publikacja w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej
2. R. Vogt, R. Głębocki,,: „Wpływ algorytmów sterowania na proces impulsowego naprowadzania pocisku do celu” XI Konferencja Naukowo-Techniczna UZBROJENIE' 2002, Rynia maj 2002, Publikacja w Biuletynie WITU „Problemy techniki uzbrojenia”.
3. R. Vogt, R. Głębocki,,: "Ujęcie systemowe i symulacja przy projektowaniu wytwarzaniu i eksploatacji systemów sterowania." Konferencja AUTOMATION' 2004 Automatyzacja Nowości i Perspektywy, Warszawa marzec 2004. Publikacja w materiałach.
4. Vogt R., Głębocki R.: “Dynamika nieciągłego-dwustanowego sterowania lotem przestrzennym obiektem”, XI Ogólnopolska Konferencja. “Mechanika w Lotnictwie” 2004, Kazimierz 2004, Publikacja w materiałach konferencji
5. R. Vogt, R. Głębocki,,: „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem systemów sterowania lotem małokalibrowych pocisków inteligentnych” IV Konferencja Awioniki Polańczyk 2004, Publikacja w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej
6. R. Vogt, R. Głębocki,,: „Smart mortar missiles” 5th International Conference MECHATRONICS 2004 Warszawa wrzesień 2004. Publikacja w miesięczniku naukowo-technicznym „Elektronika”.