

PAWEŁ DOBRZYŃSKI  
WOJCIECH KACZMAREK  
WALDEMAR MALESA  
ARKADIUSZ ZGOŁA

Wojskowa Akademia Techniczna - Instytut Techniki Rakietowej,  
00-908 Warszawa ul. Kaliskiego 2 tel. [22] 6857013

## Koncepcja zastosowania układów automatyki cyfrowej w systemach stabilizacji pola widzenia

*Streszczenie.* W pracy została przedstawiona koncepcja realizacji i badań algorytmu adaptacyjnego, przeznaczonego do stosowania w systemach stabilizujących pole widzenia. Wykorzystany algorytm pozwala na ciągłą zmianę nastaw regulatora zarówno przy zmieniających się parametrach obiektu jak i przy zmianie zakłóceń wpływających na proces regulacji. Przedstawiono przykład badania adaptacyjnego systemu cyfrowego sterowania stabilizacji pola widzenia bazującego na modelu matematycznym ruchu bryły pojazdu gąsienicowego wykorzystującym równania różniczkowe.

### Digital control idea in vision field stabilization

*Abstract.* In the paper idea of digital control to vision field stabilization has been presented. The conception of adaptive digital control algorithm and its testing has been also discussed. The control algorithm under consideration has such advantages like continuous modifications of regulator characteristics dependently upon some changes of the controlled system parameters as well as changes in noise influences. Example of examination of adaptive of the digital control based on mathematical model of the tank vehicle body in the form of differential equations, has been presented.

## 1. WPROWADZENIE

Drgania czołgu, spowodowane są poruszaniem się pojazdu po nierównościach drogi i zależą od własności terenu, prędkości ruchu, dynamicznych własności zawieszenia, pracy układu przeniesienia mocy i silnika, pracy mechanizmów skrętu oraz własności układu jezdnego i jego przyczepności do gruntu. Drgania te wpływają na pracę wszystkich układów, zespołów i mechanizmów czołgu, a w szczególności układu stabilizacji uzbrojenia, powodując w istotnym stopniu zmniejszenie efektywności prowadzenia ognia

Efektywność prowadzenia ognia z czołgu będącego w ruchu w istotny sposób zależy od pracy układu stabilizacji uzbrojenia oraz przyrządów obserwacji pola walki.

Układ stabilizacji, zwany potocznie układem stabilizacji pola widzenia, ma za zadanie:

- wyeliminować (ograniczyć) wpływ ruchu pojazdu po nierównościach drogowych na położenie katowe uzbrojenia i przyrządów obserwacyjnych;
- zapewnić w sposób płynny przemieszczanie uzbrojenia z prędkością minimalną (w czasie śledzenia przemieszczającego się celu) i maksymalną (podczas przerzutu wieży);
- przeciwdziałać momentom zakłócającym pochodzącym od niewyważenia elementów uzbrojenia;

- zwiększyć efektywność pracy załogi czołgu.

Wymienione wyżej zadania zapewniają realizację podstawowej funkcji układu stabilizacji uzbrojenia czołgu, jaką jest utrzymanie zadanego położenia uzbrojenia w warunkach drgań korpusu spowodowanych głównie ruchem po nierównościach terenu.

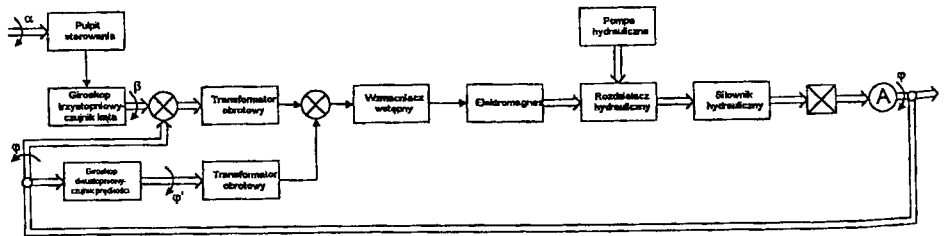
Wszyscy liczący się producenci sprzętu pancernego prowadzą badania mające na celu opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych układów stabilizacji i modernizację już istniejących. Dla zapewnienia obrony biernej, zwiększa się grubość i zmienia konstrukcję pancerna. Dążąc do osiągnięcia większej siły ognia zwiększa się między innymi kaliber armat czołgowych. Powoduje to znaczny wzrost masy samej armaty jak i wieży, ich momentów bezwładności i niewyrównowazenia. Przykładem może być czołg będący na wyposażeniu polskiej armii. Podczas przeprowadzonej modernizacji, polepszając opancerzenie wieży zwiększono jej masę o ok. 1-ną tonę (tj. 13%). Jej moment bezwładności wzrósł o ok. 17%, a niewyrównowazenie, które ma wpływ na dokładność pracy stabilizatora przy przechyłach bocznych o ponad 60%. Każda ingerencja w tak złożony system techniczny wymaga dobrej znajomości zależności pomiędzy jego układami. Dlatego (dotychczas mniej istotny) problem stabilizacji uzbrojenia w pionie i w poziomie staje się coraz ważniejszy i wymaga dokładnego przebadania.

Zadanie stabilizowania elementu o dużej masie jaką jest armata czołgowa może być realizowane w sposób analogowy lub cyfrowy z użyciem sterowników mikroprocesorowych. Generalnie systemy klasyczne nie zapewniają dużej dokładności ze względu na skomplikowaną mechanicznie strukturę układów stabilizacji oraz dynamiczne parametry tego procesu. Tabela 1 przedstawia porównanie systemów stabilizacji wykorzystujących regulatory elektroniczne i cyfrowe w różnych typach czołgów.

Tabela 1

Rodzaj stabilizacji [mrad]	Regulator elektroniczny			Regulator cyfrowy		
	M60A1 (USA)	T-55 (Polska)	T-72 (Polska)	Leopard 1A4 (Niemcy)	M1 ABRAMS (USA)	Leopard 2 (Niemcy)
w pł. pionowej	0,8	1	0,7	0,44	0,2	0,3
w pł. poziomej	1,2	1	1,5	0,37	0,4	0,3

Widać, że różnice pomiędzy dwoma rodzajami stabilizacji przemawiają na korzyść układów mikroprocesorowych. Obecnie wykorzystywane w Polsce systemy stabilizacji zbudowane są z przestarzałych elementów i posiadają strukturę przedstawioną na rysunku 1.

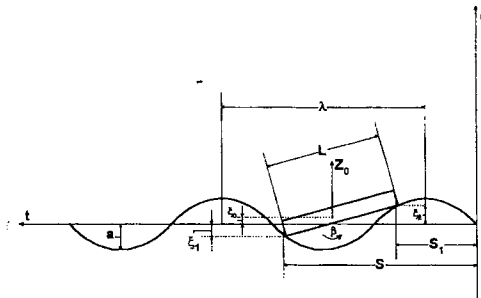


Rys. 1. Schemat blokowy układu stabilizacji w układzie klasycznym.

Wprowadzenie i oprogramowanie regulatora cyfrowego z elementami samonastrajania, adaptacji i diagnostyki całego układu stabilizacji związane jest z wieloma kosztownymi przeróbkami oraz badaniami poligonowymi. Czynniki te mają główny wpływ na brak wdrażania nowych rozwiązań w tym zakresie. Analiza konstrukcji układów stabilizacji i doświadczenia w zakresie warunków pracy pozwoliły autorom artykułu na zaproponowanie zastąpienia dotychczasowego

Dla tak przyjętej drogi wyznaczono równania różniczkowe opisujące wymuszony obrót kadłuba względem środka ciężkości  $\beta$  oraz odpowiadający jemu kąt obrotu lufy armaty względem jej czopów  $\varphi$ . Otrzymane w wyniku symulacji przebiegi zmiennych wartości  $\beta$ ,  $\beta'$ ,  $\beta''$  odzwierciedlają położenie kadłuba czołgu a przebiegi zmiennych pochylenia lufy  $\varphi$ ,  $\varphi'$ ,  $\varphi''$  odpowiadają tym położeniom przy stabilizacji idealnej. Pominięto więc oddziaływanie wałków skrętnych zawieszania na kadłub czołgu, jak i oddziaływanie gruntu na koła (gąsienice) pojazdu.

- $a$  - amplituda wymuszenia;
- $\lambda$  - okres wymuszenia;
- $\xi_0$  - odchylenie środka ciężkości pojazdu od poziomu zerowego;
- $\xi_1$  - odchylenie przodu pojazdu od poziomu zerowego;
- $\xi_2$  - odchylenie tylnej części pojazdu od poziomu zerowego;
- $S$  - przejechana droga przez przód pojazdu;
- $S_1$  - przejechana droga przez tył pojazdu;
- $\beta$  - obrót środka ciężkości;
- $Z_0$  - przesunięcie środka ciężkości w pionie



Rys.3. Graficzne przedstawienie danych równania

Do wyprowadzania równań drgań układu posłużono się metodą Lagrange'a II rodzaju. Umieszczając dane, tak jak to przedstawiono na rysunkach 2 i 3, przyjmując jako prędkość  $v$  rzut wektora prędkości chwilowej środka masy na oś poziomą, a także uwzględniając dyssypatywną funkcję Rayleigha określającą moc sił tłumienia, otrzymano następujące zależności:

$$\beta = \frac{a \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (v \cdot t - L) - a \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot v \cdot t}{L} \quad (1)$$

$$\beta' = \frac{a}{L} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \right) \cdot \left[ \cos \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (v \cdot t - L) - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \cdot t \right] \quad (2)$$

$$\beta'' = -\frac{a}{L} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \right)^2 \cdot \left[ \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (v \cdot t - L) - \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \cdot t \right] \quad (3)$$

$$z_0'' = -\left( \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \right)^2 \cdot a \cdot \left[ \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot v \cdot t + \frac{L_1}{L} \left( \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (v \cdot t - L) - a \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot t \right) \right] \quad (4)$$

Moment bezwładności armaty względem jej środka ciężkości ma postać:

$$I_0 = I_c + m \cdot l^2 \quad (5)$$

$$(I_c + m \cdot l^2) \cdot \varphi'' + f_0 \cdot \varphi' + k \cdot \varphi = f_0 \cdot \beta' + k \cdot \beta - m \cdot l \cdot z_0'' + m \cdot l^2 \cdot \beta'' \quad (6)$$

Podstawiając zależności 1-5 do równania (6), otrzymano zależność na przyspieszenie kątowe armaty w płaszczyźnie pionowej  $\varphi''$ :

$$\varphi'' = \frac{1}{I_0} \cdot \left\{ \begin{aligned} & f_0 \cdot \varphi' - k \cdot \varphi + \frac{f_0 \cdot a}{L} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \right) \cdot \left[ \cos \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (v \cdot t - L) - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \cdot t \right] + \frac{k \cdot a}{L} \cdot \left[ \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot v \cdot t \right] + \\ & + m \cdot l \cdot a \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \right)^2 \cdot \left[ \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot v \cdot t + \frac{L_1}{L} \cdot \left( \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (v \cdot t - L) - \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot v \cdot t \right) \right] - \\ & - \frac{m \cdot l^2 \cdot a}{L} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \right)^2 \cdot \left[ \sin \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (v \cdot t - L) - \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\lambda} \cdot t \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

układu elektronicznego odpowiedzialnego za wypracowanie sygnału sterującego cyfrowym regulatorem adaptacyjnym. Wewnętrzna struktura takiego regulatora, będąca w praktyce programem dla układu mikroprocesorowego szybkiego sterownika swobodnie programowalnego, dawałaby możliwość wszechstronnego zbadania wielu jego odmian i to zarówno w zakresie monitora procesu (badanie estymatora i identyfikacja modelu procesu), jak i samego mechanizmu adaptacji (zmiana własności dynamicznych) układu stabilizacji. Pozwoliłoby to na porównanie i wyodrębnienie algorytmów o największej szansie powodzenia ich realizacji w praktyce.

Podjęcie tego zadania wymagało między innymi:

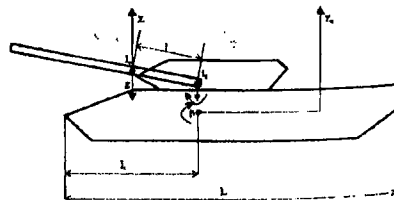
1. Sformułowania modelu matematycznego, który w sposób wiarygodny odzwierciedlałby procesy dynamiczne związane z przemieszczaniem obiektów jakimi są lufa armaty i kadłub pojazdu.
2. Wykonania generatora kątów przechyleń kadłuba pojazdu związanych z jego przemieszczeniem w terenie.
3. Określenia metod optymalizacji różnych typów regulatorów i ich modyfikacji na potrzeby układu stabilizacji oraz sposobu ich porównania w oparciu o przyjęty model matematyczny.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU ARMATY CZOŁGOWEJ

Złożony ruch przestrzenny czołgu powinno rozpatrywać się jako sumę trzech liniowych i trzech kątowych przemieszczeń. Ze względu na rozmiar zagadnienia w pierwszym etapie rozpatrzono drgania podłużne. Drgania te spowodowane są głównie lokalnym profilem drogi, po której przemieszcza się pojazd oraz zmianami siły napędowej układu przeniesienia mocy. Są one podstawową przyczyną rozrzutu pocisków w płaszczyźnie pionowej (po odległości). Wraz ze wzrostem prędkości pojazdu amplituda drgań kątowych podłużnych początkowo rośnie, a następnie maleje. Dla większości typów wozów bojowych największa amplituda drgań kątowych podłużnych występuje w przedziale prędkości 18-25 km/h.

W samym modelu ograniczono się do uwzględnienia tarcia viskotycznego występującego w układzie armata-czołg, ponieważ tarcie suche jest bardzo małe i nie ma w tym przypadku dużego znaczenia. Ponadto w praktyce bardzo często pomija się ten rodzaj tarcia podczas rozpatrywania podobnych układów. W rozważaniach pominięto również proces przejściowy i rozpatrywano jedynie proces ustalony (bardzo rzadko oddaje się strzał w momencie ruszania pojazdu). Jeżeli czołg stoi, to najczęściej oddaje się strzał jeszcze w momencie postoju, a dopiero później rozpoczyna się jazdę. Strzelając w ruchu mamy do czynienia z procesem ustalonym. Rozważając proces ustalony wzięto ponadto pod uwagę to, że tłumienie w maszynach roboczych jest bardzo duże i proces przejściowy trwa bardzo krótko.

- L - długość kadłuba czołgu;
- $l_1$  - odległość środka masy czołgu od jego początku;
- l - odległość środka masy lufy od jej czopów;
- $\beta$  - kąt obrotu kadłuba względem środka ciężkości;
- $\Phi$  - kąt obrotu lufy względem jej czopów (dalej  $\varphi$ );
- $I_c$  - moment bezwładności armaty względem jej środka ciężkości;
- $I_0$  - moment bezwładności armaty względem czopów;
- Z - przesunięcie środka ciężkości armaty w pionie;
- $Z_0$  - przesunięcie środka ciężkości korpusu czołgu w pionie;
- g - siła ciężkości.



Rys.2 Umiejscowienie czołgu w układzie.

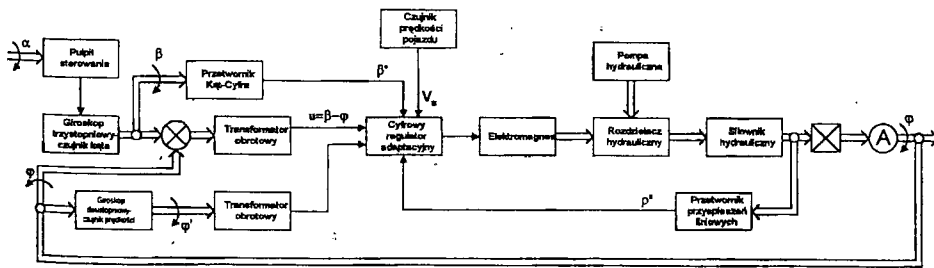
Złożony ruch korpusu czołgu wywołany został w sposób sztuczny tj. przyjęto, że czołg porusza się po terenie, który w przekroju przedstawia sinusoidę (rysunek 3) o zmiennych w czasie: amplitudzie i okresie podstawowym.

### 3. MIEJSCE REGULATORA W UKŁADZIE STABILIZACJI POŁA WIDZENIA

Zadaniem regulatora cyfrowego w układzie stabilizacji jest takie sterowanie rozdzielaczem i siłownikiem hydraulicznym, aby uzyskać niezmiennie względem układu ziemskiego i niezależne od położenia kadłuba pojazdu pochylenie lufy. Dokładność regulatora powinna być niezależna od parametrów sygnału wejściowego, powinien się on także cechować dużą czułością regulacji i małą bezwładnością. Aby sprostać takim założeniom nie wystarczy by zmiana wzmocnienia w układzie stabilizacji wynikała z samego sygnału regulacyjnego, którego wartość uzależniona jest tylko od aktualnej wartości sygnału błędu.

Zastosowanie regulatora cyfrowego umożliwia wykorzystanie kilku sposobów korekcji dynamicznej i metod adaptacyjnych zmieniających w odpowiedni sposób charakterystyki serwomechanizmu wykonawczego. W tym celu autorzy proponują rozwiązanie układu stabilizacji pola widzenia (rysunek 4) z jego rozbudową o następujące elementy:

1. Przetwornik obrotowy ką-cyfra określający kąt  $\beta$  zawarty pomiędzy płaszczyzną układu ziemskiego a kadłubem pojazdu. Ponieważ wartość kąta  $\beta$  zmienia się w niewielkim zakresie zastosowanie przetwornika fotoelektronicznego z kodowaniem bezwzględnym, nie powinno wpłynąć na pracę czujnika kąta  $\beta$  jakim jest giroskop trójstopniowy.
2. Czujnik prędkości pojazdu, będący elementem wprowadzającym dane dla części adaptacyjnej regulatora cyfrowego odpowiedzialnej za odwzorowanie w pamięci sterownika, - dyskretnego przebiegu drogi przejechanej przez pojazd. Ponieważ sygnał ten jest wykorzystywany przez inne elementy systemu kierowania ogniem  $\rightarrow$  jego wykorzystanie przez układ stabilizacji nie nastęrcza większych problemów technicznych.
3. Przetwornik przyspieszeń liniowych siłownika hydraulicznego serwomechanizmu położenia lufy armaty, zamocowany bezpośrednio na elemencie wykonawczym. Możliwa jest dzięki niemu realizacja regulacji kaskadowej z odsprzęgnięciem (od głównej pętli regulacyjnej regulatora cyfrowego) części algorytmu związanej z hydraulicznym układem wykonawczym.



Rys. 4. Proponowane rozwiązanie układu stabilizacji z adaptacyjnym regulatorem cyfrowym.

Wszystkie wymienione wyżej elementy są nadmiarowymi tj. nie wymagają wprowadzenia do dotychczasowego układu stabilizacji żadnych zmian mechanicznych i elektrycznych, poza koniecznością prawidłowego zamocowania i wyskalowania. Sytuacja wygląda podobnie w przypadku samego regulatora cyfrowego i dotychczasowego wzmacniacza błędów, które mogą pracować niezależnie i wybór których zależy od załogi pojazdu.

### 4. STRUKTURA ALGORYTMU ADAPTACYJNEGO CYFROWEGO REGULATORA

Z punktu widzenia teorii sterowania układ stabilizacji wraz z lufą armaty stanowią obiekt inercyjny z tłumionymi oscylacjami. Przy zakłóceniach stochastycznych dla tej grupy obiektów badania literaturowe nie wskazują jednoznacznie optymalnego algorytmu regulacji adaptacyjnej.

Działanie regulatora w proponowanym rozwiązaniu jako całości jest kompromisem odpowiednich priorytetów, wskaźników i założeń. Należą do nich m. in.:

Zastosowanie sterownika PLC o małej pamięci i CPU przystosowanym raczej do prostych zadań sterowania i regulacji, a także równoległe realizowanie w pojeździe innych zadań, ograniczając zbiór możliwych do realizacji algorytmów sterowania.

Zakłócenia układu stabilizacji stanowią ciąg czasowy, będący realizacją dyskretnego stacjonarnego procesu stochastycznego o wartości średniej równej zeru.

Ocena działania regulatora przez monitor procesu związana jest z ograniczoną liczbą zmiennych procesu takich jak: czas regulacji, przeregulowanie, całka błędów średniokwadratowego.

Proponowane rozwiązanie algorytmu regulatora adaptacyjnego zawiera w swojej strukturze następujące bloki programowe:

1. Filtr adaptacyjnej zmiany strefy nieczułości sygnału regulacji siłownika hydraulicznego z automatyczną redukcją w stanach nieustalonych (przejściowych).
2. Algorytm kompensacji zakłóceń liniowych siłownika hydraulicznego związanych ze zmianą ciśnienia oleju lub zewnętrznych sił działających na luźną.
3. Algorytm rejestracji pofałdowania drogi przebytej przez pojazd i obliczania współczynników dla przyjętego wskaźnika jakości.
4. Algorytm realizacji numerycznej PID, zmian nastaw regulacji i realizacji funkcji regulatora krokowego.
5. Algorytm monitora procesu używającego kryteriów działania dla oszacowania regulatora PID.

Połączenie wszystkich bloków programowych zostało przeprowadzone w językach programowania Function Block Diagram i Structured Text (Concept). Pozwoliło to na uzyskanie regulatora z otwartymi obwodami strojenia, w którym poza główną pętlą regulacyjną (bazującą na informacji o odchyleniach wielkości regulowanych), wykorzystywana jest informacja o czynnikach zakłócających (zewnętrznych i wewnętrznych) i minimalizacji ich wpływu na zasadzie kompensacji. Przedstawiona metoda poszukiwania optymalnych rozwiązań programowych pozwala na łatwe porównywanie różnych algorytmów i rozwiązań regulacji bez przygotowywania czasochłonnej i kosztownej bazy pomiarowej.

## LITERATURA

- [1] A.W. Chodkowski: „*Badania modelowe pojazdów gąsienicowych i połowych*”; Warszawa 1982.
- [2] Niederliński: „*Systemy komputerowe automatyki przemysłowej cz. II*”; Warszawa 1984.
- [3] R.H. Cannon jr.: „*Dynamika układów fizycznych*”; Warszawa 1973.
- [4] L. Trybalski: „*Regulatory wielofunkcyjne USE*”; Warszawa 1992.
- [5] Schneider Automation: „*Instrukcja użytkownika oprogramowania sterownika Quantum*”.
- [6] H. Szewczyk: „*Napęd i stabilizacja armaty czołgowej*”; Warszawa 1981.
- [7] D. Driankow: „*Wprowadzenie do sterowania rozmytego*”; Warszawa 1996.
- [8] R. Kulikowski: „*Procesy optymalne i adaptacyjne w układach regulacji automat.*”; Warszawa 1965.
- [9] E. Mishkin: „*Adaptacyjne układy sterowania automatycznego*”; Warszawa 1965.