

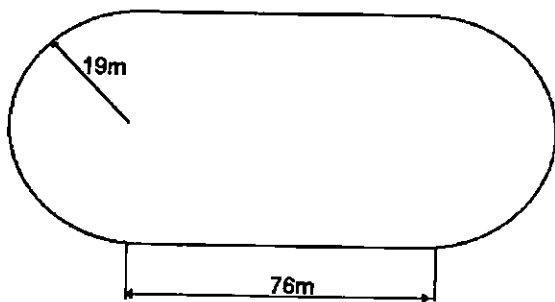
*prof. dr hab. inż. Ryszard Vogt
mgr inż. Robert Głębocki
Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej*

PROGRAMOWO-INDUKCYJNE STEROWANIE RUCHEM MASZYN ROBOCZYCH NA TORZE BADAWCZYM.

Streszczenie: Referat zajmuje się zagadnieniem automatycznego sterowania ruchu maszyn roboczych na torach badawczych. W szczególności omawia metody programowego i indukcyjnego sterowania prędkością i kierunkiem ruchu. Metody te opracowane zostały w Politechnice Warszawskiej na wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa przy udziale, szczególnie w zakresie praktycznych zastosowań, Przemysłowego Instytutu Maszyn Budowlanych.

1. OPIS TORU BADAWCZEGO.

W Przemysłowym Instytucie Maszyn Budowlanych w Kobyłce koło Warszawy zbudowano tor badawczy służący do prowadzenia przyspieszonych badań zmęczeniowych maszyn roboczych. Polegają one na wywołaniu w elementach, zespołach i układach maszyn określonych obciążeń zastępczych. Skutki tych obciążeń w postaci zmęczeniowych uszkodzeń konstrukcji maszyny są ekwiwalentne skutkom obciążeń występujących w warunkach naturalnej eksploatacji, według sprawdzonej w stopniu dostatecznym dla potrzeb badań hipotezy kumulatywnego uszkodzenia zmęczeniowego. Wyposażenie toru pozwala na realizację jednoczesnych badań wytrzymałości zmęczeniowej układów napędowych i ustrojów nośnych kołowych maszyn roboczych i transportowych. Do badań tych rozkłada się na zamkniętym torze badawczym odpowiednio opracowany zestaw przeszkód oraz obciąża się pojazd ciągnięciem przyczepy dynamometrycznej. Rysunek 1 przedstawia schemat toru pomiarowego.



Rysunek 1. Schemat toru badawczego PIMB.

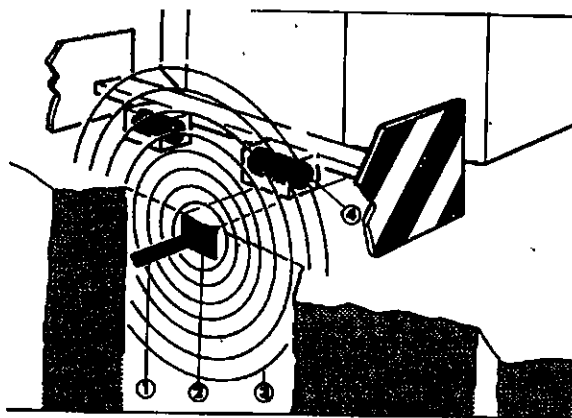
Parametry toru:

długość 270m

wyposażenie:

- zestaw przeszkód wymiennych od 50 do 160mm
- urządzenia do automatycznego prowadzenia i zabezpieczenia badanej maszyny
- przyczepa dynamometryczna o zmiennej sile hamowania w granicach 1200 do 2500daN

Na torze badawczym realizowane są badania zmęczeniowe układu napędowego obciążonego siłami od przyczepy i badania zmęczeniowe ustroju nośnego obciążonego oddziaływaniem jazdy po przeszkodach. Badania takie wymagają wielogodzinnych (np. 100h) prób w trakcie których pojazd wykonuje powielokrotnie tę samą trasę. Rysunek 2 przedstawia maszynę roboczą na torze badawczym.



Rysunek 2. Zasada działania sterowania indukcyjnego.

1. kabel prowadzący
2. zabudowa kabla
3. pole elektromagnetyczne
4. czujniki

2. METODA PROGRAMOWO-INDUKCYJNEGO STEROWANIA.

Ze względu na przeciążenia (kilka do kilkunastu razy przekraczające wartość przyspieszenia ziemskiego) działające na badaną maszynę kierowanie nią z kabiny jest niemożliwe. Grozi trwałym kalectwem. Stąd niezbędna jest automatyzacja sterowania prędkością i kierunkiem ruchu.

W wyniku analizy różnych możliwych metod sterowania przyjęto następujące rozwiązania.

Sterowanie kierunkiem

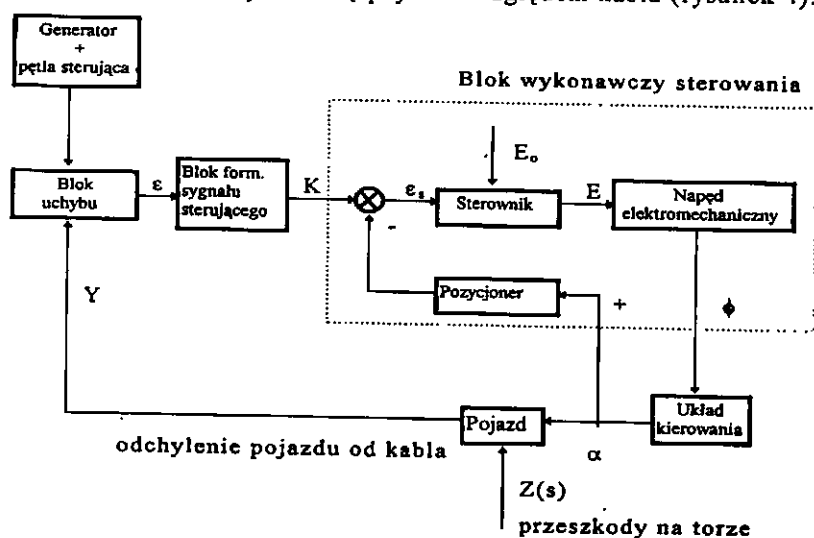
- ♦ indukcyjny system sterowania - jako metodę podstawową
- ♦ zdalne „ręczne” sterowanie z przyczepy laboratorium - jako metodę awaryjną

Sterowanie prędkością

- ♦ sterowanie programowe z tzw. „znacznikami drogi” umożliwiającymi korekcję wyliczenia punktu położenia maszyny na torze.

3. INDUKCYJNY SYSTEM STEROWANIA.

System steruje ruchem pojazdów kołowych po torze zamkniętym. Pojazd porusza się wzdłuż kabla sterującego. Sterowanie indukcyjne charakteryzuje się stosunkowo niskim kosztem, dużą dokładnością na całej długości trasy i umożliwia poruszanie się pojazdu w dostatecznie szerokim dla badań torowych zakresie prędkości. Podczas indukcyjnego sterowania kierunkiem ruchu wzdłuż kabla sterującego do wyznaczania uchybu sterowania stosuje się odpowiedni, zbliżony do normalnego rozkład natężenia pola elektromagnetycznego wokół kabla, przez który przepływa prąd przemienny. Zasadę działania przedstawia rysunek 2. Jeżeli na pojeździe, symetrycznie umieszczone zostaną dwa czujniki-cewki, to różnica napięć indukowanych w cewkach informować będzie o wartości i kierunku odchylenia się pojazdu względem kabla (rysunek 4).



Rysunek 3. Schemat blokowy indukcyjnego systemu sterowania.

Jednoznaczność informacji o wartości uchybu występuje w ograniczonym jego zakresie tj. do wartości, przy której odchylenie pojazdu względem zadanej trasy spowoduje, że jedna z cewek znajdzie się nad kablem, a więc w najbliższej odległości od kabla. Różnica napięć z obu cewek, zwana sygnałem uchybu ε , osiąga wówczas wartość ekstremalną. Dalsze zwiększanie uchybu powoduje już spadek bezwzględnej wartości sygnału uchybu. Użyteczny zakres charakterystyki sygnału uchybu mieści się między maksymalną a minimalną wartością tego sygnału (rysunek 4). Powyżej tej wartości proces sterowania jest niestabilny. Element różniczkujące wytwarza sygnał sterujący o dodatnim sprzężeniu zwrotnym destabilizując proces sterowania.

Rysunek 3 przedstawia schemat blokowy indukcyjnego systemu sterującego. Składa się on z następujących bloków i zespołów:

- ♦ generatora i pętli sterującej (kabla)
- ♦ bloku uchybu
- ♦ bloku formowania sygnału sterującego
- ♦ bloku wykonawczego sterowania obejmującego: potencjometr z pętlą sprzężenia zwrotnego, sterownik i napęd elektromechaniczny.

Generator wytwarza prąd przemienny o częstotliwości w granicach 3 do 7 kHz, zasilany jest prądem stałym o wartości 1A i napięciu $2 * 12V$.

Blok uchybu mieści się na pojeździe, a jego podstawą są dwa czujniki-cewki zamocowane symetrycznie w przedniej części pojazdu. Napięcia indukowane w cewkach są odpowiednio wzmacniane, prostowane, porównywane i normalizowane w taki sposób, aby charakterystyka sygnału uchybu była symetryczna i w pewnym zakresie uchybów zbliżona do liniowej. Jest to jeden z trudniejszych problemów, ponieważ na jej kształt ma wiele czynników, jak parametry prądu w pętli sterującej, parametry czujników oraz geometria ich zamocowania na pojeździe. Zakłócający wpływ na sygnał uchybu ma przykrycie pętli sterującej dużymi przedmiotami metalowymi, a także ruch pojazdu, przy którym następuje jego przechylenie, np. na nierównościach drogi.

Blok formowania sygnału sterującego następuje przetworzenie sygnału uchybu na sygnał sterujący zgodnie z regulacją typu PID. Proces sterowania jest bardzo wrażliwy na dobór wartości parametrów tego bloku. Dotyczy to szczególnie stałej różniczkowania. Jak wykazały badania symulacyjne, a potem eksperymentalne, w tym z ciągnikiem URSUS, istnieje wąski przedział wartości stałej różniczkowania zapewniający optymalną jakość sterowania.

$$T_1 \frac{dK}{dt} + K = k_s \left(\varepsilon + K_f \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \text{ prawo sterowania}$$

T_1 - stała czasowa

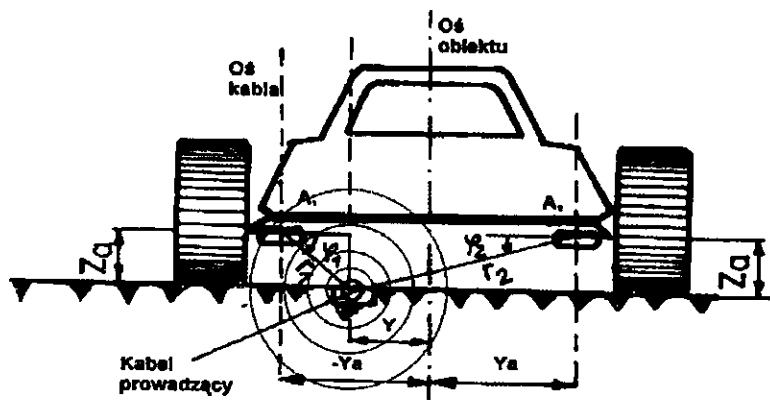
k_s - współczynnik wzmocnienia

K_f - stała różniczkowania

Blok wykonawczy sterowania składa się ze sterownika, napędu elektromechanicznego oraz czujnika skrętu kół z obwodem sprzężenia

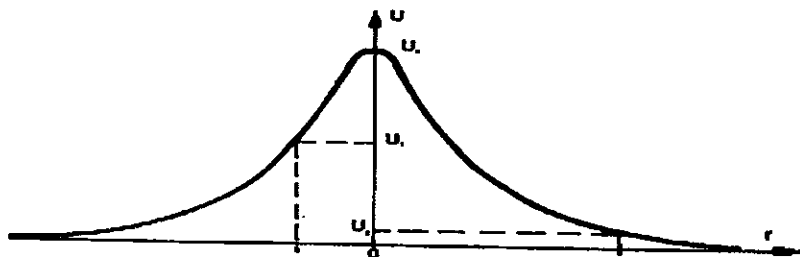
zwrotnego. Sterownik, ze sferą nieczułości i utratą nasycenia, ma duży wpływ na stabilność i dokładność sterowania. Zbyt mała strefa nieczułości i duże wzmocnienie sterowania wpływają niekorzystnie na stabilność sterowania, co w przypadku skrajnym powoduje samowzbudzenie się układu. Natomiast zwiększenie strefy nieczułości i zmniejszenie wzmocnienia sterowania zwiększa błąd statyczny.

3.1. Blok sygnału uchybu.

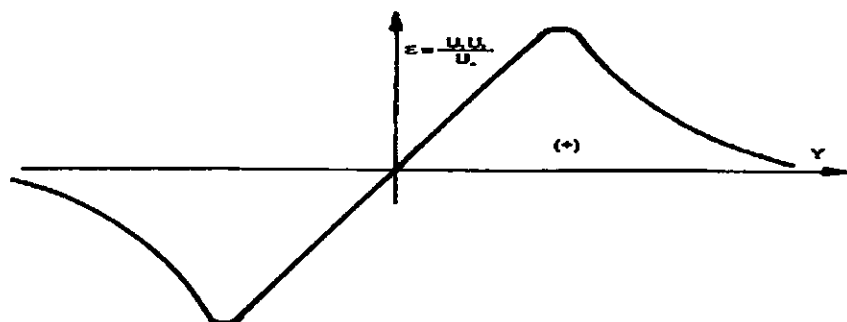


Rysunek.4. Schemat rozkładu pola elektromagnetycznego z rozmieszczeniem cewek na pojeździe.

Rozkład pola elektromagnetycznego wokół kabla przewodzącego prąd zmienny jest zbliżony do rozkładu normalnego. Zjawisko to wykorzystano do wytworzenia odpowiedniego sygnału uchybu. Pomiaru uchybu dokonuje się przy pomocy dwóch cewek, rozmieszczonych symetrycznie względem osi obiektu i znajdujących się w polu elektromagnetycznym (rysunek.4.). Różnica napięć z dwóch cewek informuje o kierunku i wartości odchylenia obiektu od zadanego toru wyznaczonego przez kabel (rysunek.4.). Napięcie U_i uzyskiwane w i -tej cewce, znajdującej się w polu elektromagnetycznym, jest funkcją odległości r_i cewki od kabla i kąta ϕ_i pochylenia cewki.



Rysunek 5. Zależność na cewkach A_1 A_2 od odchylenia obiektu względem kabla



Rysunek 6. Zależność sygnału uchybu od odchylenia Y obiektu względem kabla

Wyznaczona na drodze pomiarów funkcja $U_i(r_i, \varphi_i)$ (rysunek.3.) daje się aproksymować zależnością.

$$U_i = U_o \cdot e^{-A \cdot r_i} \cdot \sin \varphi_i,$$

gdzie:

$U_o = \text{const.}$ - napięcie odpowiadające $r = 0, \varphi = \pi/2$;

A, B - współczynniki charakteryzujące rozkład pola elektromagnetycznego.

Sygnał uchybu, uzyskany z różnicy napięć wytworzonych na obu cewkach (rysunek.4.) i wyrażony w postaci bezwymiarowej.

$$\varepsilon = \frac{U_1 - U_2}{U_o} = e^{-A \cdot r_1} \cdot \sin \varphi_1 - e^{-A \cdot r_2} \cdot \sin \varphi_2$$

Odległości r_1 i r_2 cewek od osi kabla i kąty φ_1 i φ_2 nachylenia osi cewek względem r_1 i r_2 opisują równania (rys 2 i 5).

$$r_1 = \sqrt{Y^2 + Z^2 + C_o^2 + 2C_o(Z \cdot \sin \varphi - Y \cdot \cos \varphi)}$$

$$r_2 = \sqrt{Y^2 + Z^2 + C_o^2 - 2C_o(Z \cdot \sin \varphi - Y \cdot \cos \varphi)}$$

$$\varphi_1 = \varphi_{o1} - \varphi + \arccos \frac{C_o \cdot \cos \varphi - Y}{r_1}$$

$$\varphi_2 = \varphi_{o2} + \varphi + \arccos \frac{C_o \cdot \cos \varphi - Y}{r_2}$$

3.2. Blok formowania sygnału sterującego.

Blok formowania w automatycznym systemie sterowania ruchem pojazdów spełnia te funkcje, które przy ręcznym sterowaniu wykonywane są przez centralny system nerwowy kierowcy. W przybliżeniu funkcje te odpowiadają regulatorowi typu PD (proporcjonalno-różniczkującemu). Tak więc uwzględniając inercję układu elektronicznego realizującego tę funkcję, blok formowania sygnału sterującego K opisuje zależność

$$T_b \frac{dK}{dt} + K = K_a \cdot \left(\varepsilon + T_f \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$$

gdzie

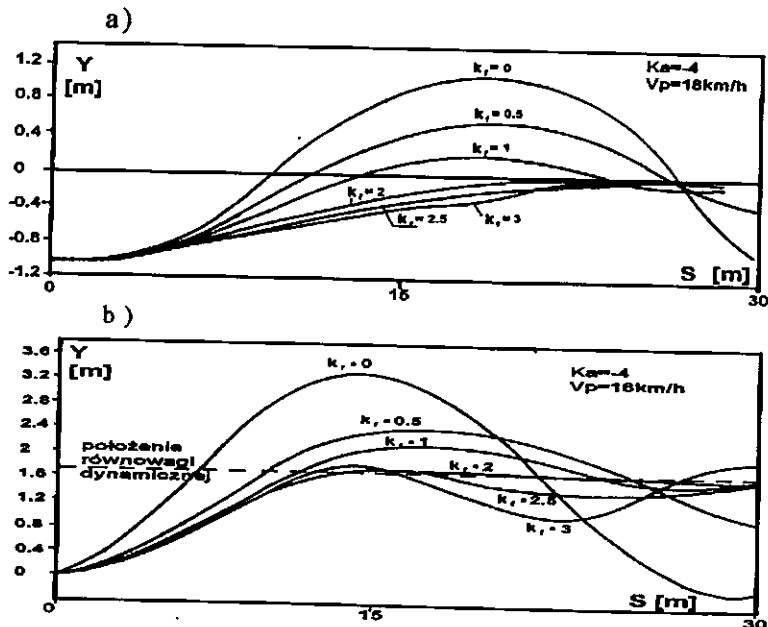
K_a , T_f - współczynnik wzmocnienia i stała różniczkowania;
 T_b - stała czasowa.

4. STEROWANIE PRĘDKOŚCIĄ

Program prędkości ruchu oraz program kierunku ruchu zapisane są w funkcji przebytej drogi określającej położenie na zadanej trasie. Wyliczenie prędkości i drogi odbywa się na podstawie impulsów z optoelektronicznego czujnika mierzącego prędkość zespołu napędowego kół jezdnych. Błąd obliczeń przebytej drogi korygowany jest dzięki rozmieszczeniu w znanych punktach zadanej trasy odpowiednich znaczników drogi.

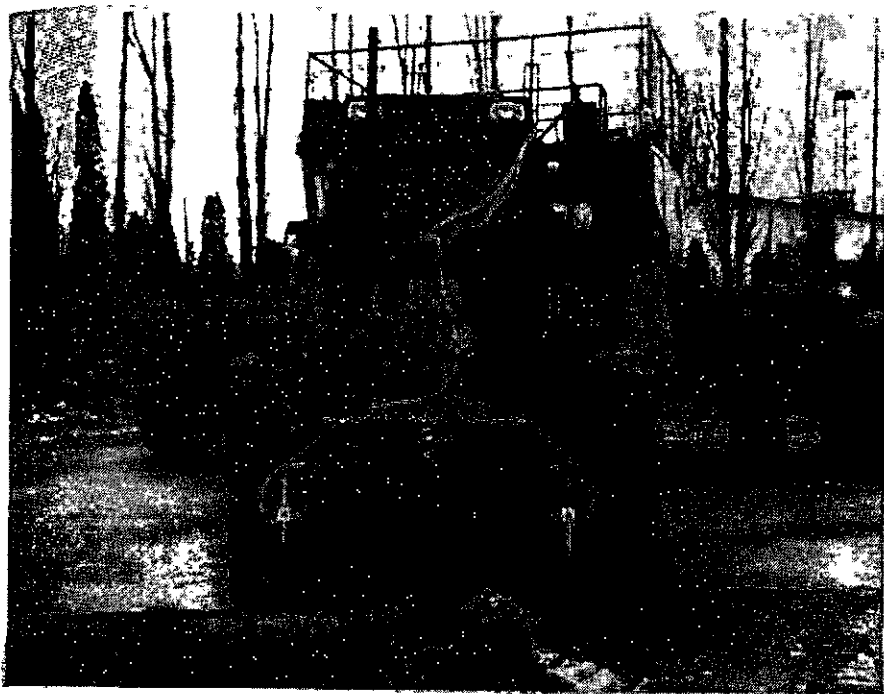
Do sterowania prędkością, zgodnie z zaprogramowaną wartością, służy regulator prędkości. Sygnał uchybu zostaje przetworzony na sygnał sterujący, zgodnie z regulacją typu PID. Regulator ma dwa bloki wykonawcze:

- ♦ blok napędu umożliwiający przyspieszenie ruchu obiektu
- ♦ blok hamowania umożliwiający opóźnienie ruchu obiektu



Rysunek 7. Zależność przebiegu procesów przejściowych sterowania (w przypadku zakłócenia początkowego) w zależności od stałej różniczkowania K_f .

- a) dla ruchu prostoliniowego
- b) dla ruchu po łuku



Rysunek 8. Ciągnik URSUS na torze badawczym. Widoczne czujniki cewki.

5. WNIOSKI

Badania potwierdziły skuteczność systemu sterowania ruchem różnych maszyn roboczych na torze badawczym, a więc w warunkach silnie działających zakłóceń od przeszkód. Cechuje go duża możliwość modyfikacji i rozwoju między innymi dzięki modułowej budowie, możliwość pracy w różnym terenie w tym przy nierównościach powierzchni, duża dokładność sterowania kierunkiem ruchu - błąd nie przekraczał 6cm co jest nieosiągalne przy ręcznym sterowaniu.

Zakres możliwych zastosowań opracowanego systemu jest szeroki. Obok torów badawczych może być zastosowany do sterowania transportem w automatycznych elastycznych liniach produkcyjnych oraz w wielkich magazynach, jak również do sterowania pojazdami transportowymi w warunkach szkodliwych lub niebezpiecznych dla zdrowia.