

XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom II



**Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk**

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom II



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓLORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFczyk
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowci	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-01-4

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

SYSTEMY STEROWANIA

WDRAŻANIE ZAAWANSOWANYCH UKŁADÓW REGULACJI W STRUKTURZE PRZEŁĄCZANEJ

Sebastian PLAMOWSKI*, Piotr TATJEWSKI**

* Politechnika Warszawska, Wydział Elektrotechniki, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, e-mail: splamows@mion.elka.pw.edu.pl

** Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665, e-mail: P.Tatjewski@ia.pw.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono problem wdrażania zaawansowanych układów regulacji na obiektach, które posiadają klasyczną strukturę regulacji opartą na jednopętlowych regulatorach PID. Zwrócono uwagę na podstawowe aspekty takie jak: bezpieczeństwo pracy nowoczesnych układów, przekonania kadry operatorskiej oraz kluczowe zagadnienie jakim jest problem niepewności modeli. Zagadnienie niedokładności modeli w powiązaniu z odpornością regulatorów i jakością regulacji stanowi rdzeń tej pracy. Pokazano, że poszczególne struktury regulacji charakteryzują się zróżnicowaną odpornością i poprzez przełączanie pomiędzy nimi można osiągnąć poprawę jakości regulacji. Zaproponowano i przebadano algorytm przełączający – wyniki z badań symulacyjnych jak i z rzeczywistego wdrożenia przedstawiono w artykule.

Słowa kluczowe: Regulator DMC, regulacja przełączana, diagnostyka, niepewność modelowania.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach zauważa się gwałtowny rozwój technik regulacji opartych na zaawansowanych algorytmach predykcyjnych [6, 10]. W wielu pracach można znaleźć informacje na temat rezultatów uzyskanych w wyniku wdrożenia nowoczesnej predykcyjnej struktury regulacji, mało jest jednak prac, które prezentują sam sposób wdrażania oraz trudności jakie temu towarzyszą.

Większość wdrożeń zaawansowanych układów regulacji predykcyjnej (nazywanych w dalszej części pracy „strukturami zaawansowanymi”) dotyczy obiektów, które posiadają gotowe, pracujące struktury regulacji klasycznej oparte na regulacji jednopętlowej typu PID (nazywane w dalszej części pracy „strukturami klasycz-

nymi”). Celem wdrażania regulacji zaawansowanej jest *wyraźna poprawa jakości regulacji w warunkach pracy zbliżonych do nominalnych (typowych)*, dla trudniejszych obiektów (np. duże opóźnienia, nieminimalnofazowości), a szczególnie w przypadkach występowania silnych interakcji w obiekcie wielowymiarowym i występowania ograniczeń sterowania czy nawet wyjść – sytuacji najczęściej zbyt wymagających dla klasycznych struktur PID. Przy tym wdrażane są najczęściej układy regulacji zaawansowanej oparte na modelach liniowych (opis obiektu w nominalnym punkcie pracy). Rozważania niniejszej pracy dotyczą przedstawionej sytuacji. Podkreślimy przy tym fakt dobrze już znany, że aby regulacja predykcyjna charakteryzowała się wysoką jakością, musi być zaprojektowana z wykorzystaniem dobrego modelu obiektu – i może nie spełniać pokładanych w niej nadziei, a nawet pogarszać jakość regulacji w stosunku do rozwiązań klasycznych, jeśli obiekt będzie znacznie odbiegał od przyjętego modelu.

Z przedstawionych różnic wynika, że w momencie wdrażania struktura klasyczna może posiadać przewagę pod względem niezawodności i bezpieczeństwa. Jest dobrze znana i co za tym idzie silnie popierana przez operatorów. Struktura zaawansowana (oparta na liniowym modelu) oferuje natomiast potencjalne możliwości, które przy warunku dobrej jakości modelu powinny dawać wyraźną poprawę jakości regulacji przede wszystkim w warunkach pracy zbliżonych do nominalnych, przekładając się na zyski natury ekonomicznej. W tabeli 1 zebrano wybrane, interesujące nas w niniejszej pracy cechy struktur regulacji klasycznej i zaawansowanej.

Tabela 1. Cechy struktury regulacji klasycznej i zaawansowanej.

Struktura klasyczna (istniejąca)	Struktura zaawansowana (wdrażana)
<ul style="list-style-type: none"> - Dostrojona do bezpiecznej pracy w operacyjnym zakresie regulacji (często szerokim), w tym i typowych zmian cech obiektu - z reguły kosztem jakości regulacji w warunkach nominalnych - Bogate doświadczenia eksploatacyjne, sprawdzona 	<ul style="list-style-type: none"> - Zaprojektowana dla uzyskania wyraźnej poprawy jakości regulacji w warunkach nominalnych (np. zmniejszenie wariancji uchybów), jakość regulacji może wyraźnie spadać przy warunkach odbiegających od nominalnych

<p>na rzeczywistym obiekcie</p> <ul style="list-style-type: none"> - Intuicyjna dla operatorów, stąd odporna na wiele sytuacji awaryjnych (operatorzy wiedzą jak się zachować – np. przechodząc na pracę ręczną w pewnych pętach) 	<ul style="list-style-type: none"> - Brak doświadczeń eksploatacyjnych, sprawdzona jedynie na modelu obiektu - Mało intuicyjna dla operatorów (często regulator wielowymiarowy), nie sprawdzona operacyjnie, operatorzy nie mają doświadczeń jak reagować w ramach struktury w sytuacjach awaryjnych
--	--

Uwzględniając powyższe cechy, pomysł wdrażania struktury zaawansowanej w strukturze przełączanej, wyłączającej nowe algorytmy w sytuacjach, kiedy działają gorzej czy wręcz nieprawidłowo, wydaje się być uzasadniony. Podejście to pozwala na bezpieczną weryfikację nowego układu i automatyczną ocenę jego jakości pracy. Projektanci układu i operatorzy mogą w sposób komfortowy zdobywać doświadczenie. Podejście to odpowiada też w znacznym stopniu na problem bezpieczeństwa i jakości regulacji w sytuacji niedokładności modelu, jeden z poważniejszych problemów regulacji w ogóle, a w szczególności regulacji predykcyjnej.

Sposoby reagowania na niedokładności modelu (wywołane nie tylko niedokładnością modelowania nominalnego w fazie projektowania regulatorów, ale przede wszystkim zmiennością obiektu czy wpływem zakłóceń w czasie pracy) oparte są głównie na dwóch podejściach. Pierwszy to regulacja adaptacyjna: zakłada identyfikację bieżącą modelu i używanie w regulatorze modelu aktualnego. Problemy jakie spotyka się przy tego typu rozwiązaniach to przede wszystkim problemy identyfikacji w pętli sprzężenia zwrotnego i w sytuacji niedostatecznego pobudzenia, tj. niewystarczającej zmienności sygnałów sterowania i wyjściowego, i to często w obecności szumów pomiarowych, okresami porównywalnych z poziomem sygnałów użytecznych [8,9].

Drugie rozwiązanie to uwzględnianie niedokładności modelu w regulatorze na etapie projektowania czy strojenia (tzw. regulatory odporne – *robust controllers*). W tym przypadku regulator z reguły projektowany jest na najgorszy przypadek, co objawia się dużym „konserwatywnym” i zachowawczością również w warunkach nominalnych. W sytuacji regulacji klasycznej PID odpowiada to w praktyce odpowiedniemu doborowi nastaw prowadzącemu do stłumienia odpowiedzi regulatora. Przy tym proces strojenia, tak aby uzyskać układy odporne przy nie większej niż niezbędna utracie jakości pracy w warunkach bliskich nominalnym, jest trudny i wymaga wielu doświadczeń, szczególnie dla układów wielopętlowych. Niemniej, pracujące klasyczne układy regulacji PID to właśnie z reguły takie układy, lepiej czy gorzej dostrojone na bazie wieloletnich doświadczeń – przystępując do wdrażania struktury zaawansowanej dysponujemy już alternatywą „odporną”.

Podchodząc do projektowania regulacji predykcyjnej projektant ma również do swej dyspozycji mechanizmy zwiększania odporności (oczywiście kosztem utraty jakości regulacji, jak zawsze). Pominiemy tu rozwiązania prowadzące do tzw. odpornych regulatorów predykcyjnych (*robust predictive controllers*). Na obecnym etapie rozwoju nie wydają się to być rozwiązania doj-

rzałe z praktycznego punktu widzenia. Po pierwsze, projektowanie takich regulatorów jest trudne, bardzo złożone obliczeniowo (typowe jest podejście typu min-max [4,12]) i wymaga znajomości dobrych modeli niepewności, co na ogół jest mało realne w warunkach przemysłowych. W przeciwnym przypadku uzyskane regulatory odporne są równie albo bardziej konserwatywne niż klasyczne układy regulacji, będąc przy tym z reguły bardzo złożone obliczeniowo i stąd trudne do implementacji. Nie spełniają wówczas postawionego przed nimi zadania efektywności i istotnej poprawy jakości regulacji w warunkach zbliżonych do nominalnych, wdrożenie takich układów byłoby trudne do wykonania, a przede wszystkim do uzasadnienia wobec personelu inżynierskiego i operatorskiego.

Pozostając na gruncie sprawdzonych w praktyce rozwiązań regulatorów predykcyjnych, takich jak np. DMC, podstawowym i w istocie jedynym parametrem wpływającym na odporność regulatora jest dobór współczynników wagowych przy składnikach funkcji celu odpowiadających za przyrosty sterowań [10]. Im większe ich wartości, tym wolniejsze odpowiedzi regulatora i większa jego odporność. Niestety, zależność ta jest w rzeczywistych sytuacjach nieliniowa i poza ogólnym trendem a priori nie znana. Wdrażając regulację zaawansowaną w strukturze przełączanej projektant jest w sytuacji bezpiecznej i w istocie komfortowej. Może, w efekcie wielu zgromadzonych doświadczeń podczas pracy układu sterowania, dobrać odpowiednio do postawionych wymagań i cech obiektu odporność układu regulacji zaawansowanej:

- od odporności porównywalnej z opornością regulacji klasycznej (która w istocie mogłaby być potem jedynie redundantna),
- do odporności mniejszej, dla struktury z istotnym przełączaniem, kiedy regulator zaawansowany jest znacznie lepszy w warunkach zbliżonych do nominalnych, ale jest mniej odporny w sytuacjach znacznie od tych warunków odbiegających i potrzeba wówczas przełączenia na strukturę klasyczną (w razie potrzeby w dalszych etapach rozwoju systemu może być opracowany np. odporny i efektywny nieliniowy układ regulacji zaawansowanej).

Istotnymi dla projektowania proponowanej w niniejszym referacie przełączanej struktury regulacji są:

- opracowanie i weryfikacja odpowiednich diagnostycznych algorytmów przełączania;
- badania porównawcze regulatorów klasycznych i zaawansowanych, w warunkach zróżnicowanej niepewności modelowania;

Przed omówieniem algorytmu przełączania, w celu jego lepszego zrozumienia, przedstawiono sposób uwzględniania niepewności przykładowego modelu oraz opis

struktury regulatora. Przedstawiono również przykład badań porównawczych pokazujący zróżnicowanie jakości regulacji klasycznej i zaawansowanej, w zależności od poziomu niedokładności modelu.

2. NIEPEWNOŚĆ MODELU

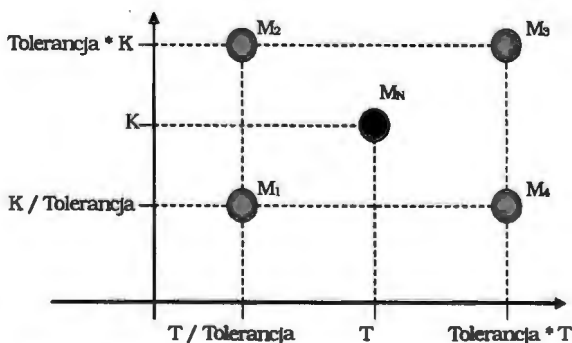
Rzeczywiste obiekty występujące w przemyśle są tak skomplikowane, że nie istnieją ich bezbłędne modele. Nawet najbardziej wyrafinowane nieliniowe, niestacjonarne modele dynamiczne są obciążone błędami. Błędy wynikają z faktu traktowania części modelowanych w postaci zmiennych skupionych, gdy naprawdę mają one charakter zmiennych rozłożonych. Innymi czynnikami wprowadzającymi błędy są: niemierzalne zakłócenia, błędy pomiarowe, zmiany punktu pracy (w dziedzinie zmiennych niemierzalnych). Stąd projektant układu regulacji zmuszony jest do uwzględniania niepewności modelu. Jednym ze sposobów radzenia sobie z niepewnością jest przyjęcie, że parametry modelu należą do pewnych przedziałów wartości. Sposób ten zaprezentowany zostanie na przykładzie.

Rozważono model dwu-inercyjny z opóźnieniem. Model ten w postaci transmitancyjnej można zapisać jak niżej:

$$T_{M_n}(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-st} \quad (1)$$

Model ten charakteryzowany jest przez cztery parametry: wzmocnienie, dwie stałe czasowe oraz opóźnienie. Z punktu widzenia zachowania modelu rozpatrywanie osobno każdej z jego stałych czasowych nie jest celowe – zazwyczaj wszystkie stałe czasowe zmieniają się w tym samym kierunku. Uwzględniając powyższe stwierdzenie można wyróżnić trzy grupy znaczących parametrów: wzmocnienie, zagregowane stałe czasowe oraz opóźnienie.

Niepewność modelu można uwzględniać poprzez założenie, że parametry modelu należą do obszaru wyznaczonego przez modele skrajne. Modele te wyznaczone są w ten sposób, że tworzą wierzchołki w przestrzeni parametrów modelu. W dalszych badaniach ograniczono się do uwzględniania niepewności wzmocnienia i zagregowanych stałych czasowych (oznaczonych jako T), co przedstawiono na poniższym rysunku:



Rys 1. Uwzględnianie niepewności modelu

Model nominalny zaznaczony jest jako M_N . Parametry modeli skrajnych zależą od modelu nominalnego i dla przykładu, dla modelu pierwszego wynoszą:

$$T_{M_1}(s) = \frac{K / Tol}{((T_1 / Tol)s + 1)((T_2 / Tol)s + 1)} e^{-st} \quad (2)$$

gdzie: $Tol = Tolerancja$

Parametry trzech pozostałych modeli otrzymywane są w ten sam sposób, zgodnie z oznaczeniami na rysunku.

3. PROJEKTOWANIE REGULATORÓW PID I DMC W WARUNKACH NIEPEWNOŚĆ MODELU

Dobór struktury regulacji jest zadaniem trudnym wymagającym od projektanta dużego doświadczenia. Dominują regulatory PID (w różnych strukturach [1]), które w zadawalający sposób pracują w większości przypadków. Pozostałe sytuacje to obiekty trudne, z dużym opóźnieniem, nieminimalnofazowe, wielowymiarowe o silnych interakcjach, pracujące w pobliżu ograniczeń technologicznych. W sytuacjach tych poprawę jakości regulacji uzyskać można poprzez zastosowanie algorytmów bardziej zaawansowanych, predykcyjnych (MPC).

W referowanym przykładzie skoncentrowano się na przypadku obiektu z dużym opóźnieniem. Założono, że obiekt reprezentowany jest przez model dwu-inercyjny z opóźnieniem. Warto wspomnieć, że model ten dla pewnej klasy obiektów charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami aproksymującymi przy stosunkowo prostej strukturze, stąd często wykorzystywany jest w modelowaniu dla potrzeb sterowania (np. regulator IMC [7]). Założono, że opóźnienie w modelu jest znane, niepewne natomiast są parametry modelu – wzmocnienie i stałe czasowe.

Dla tak opisanego obiektu zaprojektowano regulatory: klasyczny PID i predykcyjny DMC (Dynamic Matrix Control). W obu regulatorach nie uwzględniano ograniczeń na sygnały regulujące, regulatory realizowane były w postaci analitycznej [5,10] jako równanie różnicowe:

$$\text{PID: } u_k = u_{k-1} + r_0 e_k + r_1 e_{k-1} + r_2 e_{k-2} \quad (3)$$

$$\text{DMC: } \Delta u_k = \left(1 + \sum_{j=1}^{D-1} k_j z^{-j} \right)^{-1} k^e e_k \quad (4)$$

Przy projektowaniu każdego z regulatorów założono, że model nominalny znany jest z pewną *Tolerancją* (znaczenie parametru *Tolerancja* zobrazowane zostało na rys. 1) oraz założono, że maksymalne przeregulowanie regulator z obiektem po skokowej zmianie wartości zadanej nie może przekroczyć pewnej zdefiniowanej wartości. Warunki te zostały uzyskane na drodze komputerowej symulacji regulatora i obiektu w pętli zamkniętej. Uznawano, że regulator jest odpowiedni, gdy dla wszystkich modeli (nominalny i cztery skrajne) spełniał warunki na maksymalne przeregulowanie.

W przypadku regulatora DMC cel osiągnięto poprzez zwiększanie w każdej pętli symulacji wagi nałożonej na przyrosty sygnału sterującego. W ten sposób osiągano coraz większą odporność regulatora – kosztem oczywiście jakości regulacji. W miarę wzrostu wagi, sygnał regulujący miał mniejszą dynamikę, co przekładało się na dłuższe czasy regulacji. W przypadku regulatora PID zastosowano optymalizację globalną w dziedzinie parametrów strojeniowych regulatora. Optymalizowano sumę błędu kwadratowego, przy warunkach na przeregulowanie. Zadanie to posiada wiele minimum lokal-

nych, dlatego zastosowano globalną metodę optymalizacji opartą o metodę siatki [11].

Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki uzyskane dla modelu w postaci:

$$T_{M_n}(s) = \frac{1}{(10s+1)(4s+1)} e^{-s\theta} \quad (5)$$

Badano struktury regulacji dla małej i dużej wartości parametru *Tolerancja* i dla dużej i małej wartości przeregulowania – łącznie dla czterech konfiguracji. Wartości parametrów strojeniowych uzyskanych dla każdego z przypadków umieszczono w poniższej tabeli.

Tabela 2. Parametry strojeniowe regulatorów PID i DMC przy różnych poziomach niedokładności modeli.

Przeregulowanie Tolerancja	PID		DMC	
	1.10	1.20	1.10	1.20
1.05	Kp = 1.01 Td = 6.96 Ti = 14.09 12.6834	Kp = 1.05 Td = 7.85 Ti = 12.47 12.45	$\lambda = 3.20$ 16.35	$\lambda = 0.00$ 10.00
1.20	Kp = 0.85 Td = 6.17 Ti = 14.88 13.81	Kp = 0.85 Td = 7.72 Ti = 12.13 13.16	$\lambda = 181.38$ 25.90	$\lambda = 10.79$ 18.26

Tabela pokazuje wartości uzyskane dla badanych regulatorów, dodatkowo pod parametrami strojeniowymi wypisany jest (wyłuszczone drukiem) sumaryczny błąd kwadratowy uzyskany dla modelu nominalnego. Ważny przy dokonywaniu porównań jest fakt, że obiekt jest opóźniony o 9 kroków, przez co minimalna wartość błędu jest równa 10 (obiekt odpowiada na następną chwilę).

Wyniki eksperymentu pokazują, że regulator PID jest bardziej odporny na zmiany parametrów obiektu. Wyniki uzyskane dla wszystkich czterech konfiguracji w przypadku regulatora PID nie różnią się aż tak znacząco jak to jest w przypadku regulatora predykcyjnego. Jeżeli są dopuszczalne duże przeregulowania dla modeli skrajnych i dobrze znamy modele (parametr *Tolerancja* jest bliski 1.0) wówczas regulator predykcyjny dla modelu nominalnego będzie lepszy. Filozoficznie odpowiada to sytuacji, kiedy człowiek podejmuje decyzje znając dokładnie, co będzie i nie martwi się zbyt wiele o następstwa pomyłki (decyzja jest szybka i zdecydowana – brak jest dywersyfikacji ryzyka). Im jednak są większe wymagania (mniejsze dopuszczalne przeregulowania) i większe dopuszczalne zmiany modelu, zachowanie regulatora DMC jest bardziej zachowawcze. Doskonale to widać w sytuacji zwiększenia parametru *Tolerancja* z 1.05 do 1.20 przy ograniczeniach na przeregulowanie równym 1.10. Regulator DMC do spełnienia wymagań w tej sytuacji potrzebuje zwiększenia wagi nałożonej na sygnał sterujący z $\lambda=3.20$ do $\lambda=181.38$, co w konsekwencji przekłada się na największy (spośród badanych sytuacji) wzrost sumy błędu kwadratowego z 16.35 do 25.90. Uogólniając wyniki można stwierdzić, że w przypadku gdy odchylenia pa-

rametrów modelu są małe (*Tolerancja* = 1.05) i dozwolone są duże przeregulowania zdecydowanie lepsze wyniki w sensie całki z kwadratu uchybu można osiągnąć stosując regulatory predykcyjne. W pozostałych przypadkach, a szczególnie, gdy parametr *Tolerancja* jest duży a dozwolone maksymalne przeregulowanie małe lepsze rezultaty uzyskano stosując regulator PID.

Wyniki przedstawionych badań sugerują dalsze prace w kierunku badania mechanizmów wykrywających niedokładności modelu i dokonujących przełączeń struktur sterowania (przełączeń pomiędzy strukturą klasyczną a zaawansowaną) w sytuacjach, gdy niedokładności wystąpiły. Kierunek ten o tyle wydaje się słuszny, że istniejące obiekty przemysłowe posiadają już sprawdzoną, działającą strukturę regulacji (zazwyczaj opartą o regulator PID), a zastosowanie zaawansowanej techniki ma na celu poprawić to, co jest obecnie.

4. DIAGNOSTYKA W OCENIE MODELU I JAKOŚCI REGULACJI

Klasyczny algorytm diagnostyki powinien wykrywać sytuacje awarii na obiekcie oraz sytuacje wystąpienia błędów programu realizującego algorytm zaawansowany. Dla potrzeb struktury przełączanej, algorytm ten powinien rozpoznawać wystąpienie niedostatecznej jakości regulacji, która w przypadku regulacji predykcyjnej jest spowodowana niedokładnym modelem. Wykrywanie rozbieżności pomiędzy modelem a obiektem można przeprowadzić na kilka sposobów. Można wyróżnić podejście bezpośrednie polegające na porównywaniu w każdej chwili wyjścia predykowanego z mode-

lu z rzeczywistym sygnałem. Drugie rozwiązanie, to podejście pośrednie oparte tylko o analizę w właściwości sygnału regulowanego. Podejście to zakłada, że struktura regulacji jest zestrojona w sposób zapewniający prawidłowe przebiegi w momencie zgodności modelu z obiektem. W przypadku wystąpienia rozbieżności, jakość regulacji (przebieg sygnału regulowanego) ulega zmianie. Detekcja i analiza zmiany charakteru sygnału regulowanego stanowi przesłankę do przełączenia się na strukturę bardziej odporną. W niniejszej pracy zastosowano pierwszy sposób.

Wykrywanie poziomu różnic zrealizowano poprzez sprawdzenie czy wartość rzeczywista sygnału sterowanego znajduje się w przedziale wartości wyznaczonych przez minimalną i maksymalną wartość predykcji pewnych modeli skrajnych, rozszerzonym o parametr *Margins* (*min_pred - Margines*, *max_pred + Margines*), definiowany przez użytkownika. Metoda nazwana została jako DBPW (Diagnostyka Bezpośrednia z Predykcją Wielokrotną). Predykcja dokonywana jest w oparciu o równania używane w regulatorze DMC [10]:

$$Y_k^f = Y_k + M^P \Delta U_k^P + M^{DV-P} \Delta U_k^{DV-P} \quad (6)$$

$$\Delta Y_k = M \Delta U_k \quad (7)$$

$$Y_k^{PRED} = Y_k^f + \Delta Y_k \quad (8)$$

Równanie (6) wylicza przewidywaną trajektorię w oparciu o historie sygnałów sterujących i zakłóceń, czyli trajektorię, jaka by obowiązywała gdyby wartości sterowań i zakłóceń pozostały stałe (tzw. trajektoria swobodna). Równanie (7) wylicza zmianę trajektorii uwzględniając przewidywane zmiany sygnału sterującego (tzw. trajektoria wymuszona). Wzory te można w bardzo prosty sposób wykorzystać do weryfikacji wartości bieżących wyjść. Będąc w chwili bieżącej możemy założyć, że jesteśmy w chwili *k-L*. Zmiany sterowań, które zostały zrealizowane od chwili *k-L* do chwili obecnej możemy traktować jako predykcje zmian sterowań. Dysponując historią zmian sterowań oraz wartością wyjścia z chwili *k-L* możemy policzyć predykcje na chwile od *k-L+1* do *k* (obecna). Podejście to wymaga rozszerzenia informacji przechowywanej przez algorytm DMC o historię wyjść oraz powiększenia bufora historii zmian sterowań i zakłóceń o dodatkowe *L* elementów. Ponadto do wzoru liczącego trajektorię wymuszoną należy dodać człon uwzględniający zakłócenia od chwili *k-L+1* (wektor zakłócenia jest przesunięty o jeden krok w stosunku do wektora przewidywanych sterowań) do chwili obecnej. Wyrażenie przyjmie wówczas postać następującą:

$$\Delta Y_k = M \Delta U_k + M^{DV} \Delta U_k^{DV} \quad (9)$$

Parametr *L* jest parametrem metody. Ze względu na niemierzalne zakłócenia, które występują w rzeczywistych układach wprowadzono dwa dodatkowe parametry *h** i *n**. Wartość tych parametrów są definiowane przez użytkownika. Parametr *h** należy do przedziału (*1, N*), a *n** do przedziału (*1, h**), gdzie *N* jest horyzontem predykcji regulatora. Zadaniem tych parametrów

jest znieczulenie metody diagnostyki na reagowanie na krótkie, niemierzalne zakłócenia. Parametr *h** definiuje przez ile kolejnych porównań musi wystąpić chociaż *n** zdarzeń wykroczenia wartości rzeczywistej regulowanej poza zbiór (*min_pred - Margines*, *max_pred + Margines*), żeby metoda diagnostyki stwierdziła niepoprawność modelu i nastąpiło przełączenie na strukturę klasyczną. Powrót do struktury zaawansowanej zapewniają parametry *h* i *n* (analogiczne do *h** i *n**). Uwzględniając wszystkie wprowadzone parametry, metoda będzie oznaczana w dalszej części pracy jako DBPW(*L, h*, n*, h, n, Margines*).

5. REZULTATY SYMULACJI I RZECZYWI- STEGO WDROŻENIA

W przykładzie testowym użyto obiekt symulowany przez model dwu-inercyjny opisany równaniem o parametrach:

$$T_{M_n}(s) = \frac{1 * Tol}{(10/Tol * s + 1)(4/Tol * s + 1)} e^{-s^9} \quad (10)$$

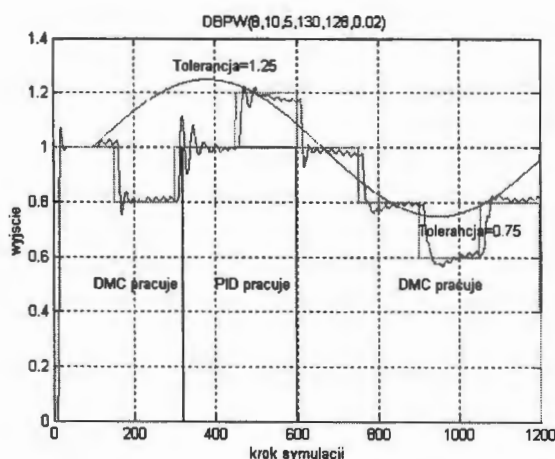
Do obiektu (z parametrem *Tol=1.0*) zaprojektowano układ klasyczny i zaawansowany w taki sposób, że wartości sumarycznych błędów kwadratowych (podczas symulacji skokowej zmiany wartości zadanej na horyzoncie 200 kroków) dla modeli skrajnych uzyskanych w przypadku stosowania regulatora PID i DMC były następujące.

Tabela 3. Wartość sumarycznego błędu średniokwadratowego.

	M1	M2	M3	M4
PID	14.35	12.43	13.87	16.56
DMC	12.65	14.65	13.15	14.22

Regulator DMC jest gorszy tylko w przypadku zmian obiektu w kierunku modelu M2, i tylko w takich sytuacjach model powinien być klasyfikowany jako niedokładny i tylko w takiej sytuacji powinno dochodzić do przełączenia na strukturę podstawową (PID), która jest wówczas lepsza. Zachowanie metody pokazano na przykładzie symulacji, podczas której zmieniano parametry modelu oraz wartość zadaną.

Parametr *Tol* podczas symulacji przyjmował wartość od 0.75 do wartości 1.25. Podczas symulacji zmieniany była wartość zadana dla układu, (przy różnych parametrach obiektu) oraz dodatkowo wyjście obiektu zaburzone było sumą sygnałów sinusoidalnych o różnej częstotliwości i o maksymalnej amplitudzie sumarycznej równej 0.02. Zastosowano przełączanie w oparciu o metodę DBPW opisaną w poprzednim punkcie. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki, w postaci trendów obrazujących pracę metody



Rys 2. Symulacja metody DBPW na obiekcie w postaci transmitancji dwu-inercyjnej z opóźnieniem.

Przedstawiona przełączana struktura regulacji została użyta podczas rzeczywistego wdrożenia regulatora DMC do regulacji temperatury pary w kotle energetycznym. Podczas wdrożenia użyto metody DBPW(5,8,6,60,50,3C) z modelami skrajnymi z parametrem $Tolerancja=1.3$. Użycie metody pozwoliło w bezpieczny sposób wdrożyć układ zaawansowany. Dzięki możliwości bezpiecznego testowania układu w pętli zamkniętej (całodobowego – bez konieczności nadzorowania układu przez osobę wdrażającą), metoda pozwoliła stwierdzić kiedy model odbiegał od obiektu a kiedy był prawidłowy. W oparciu o te informacje dokonywano powtórnych identyfikacji modelu na danych, na których model był niepoprawny, co w efekcie pozwoliło wypracować model poprawny.

Wdrożenie zaawansowanego układu zakończyło się owocnie. Uzyskano znaczną poprawę jakości redukcja wahań temperatury o około 20% podczas stabilnej mocy

- redukcja wahań temperatury o około 30% podczas zmian mocy
- wzrost sprawności w sytuacjach niedotrzymania temperatur końcowych

6. WNIOSKI

Struktura przełączana wydaje się być skutecznym sposobem wdrażania zaawansowanych układów regulacji, jak również pewną alternatywą projektową. Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych prac badawczych. Dla realizacji przełączania zamierza się zbadać również możliwości metod diagnostyki opartych tylko o analizę sygnałów regulowanych (rozpoznawania wzorców) [2,3]. Zamierza się również prowadzić badania nad strukturą przełączaną jako alternatywą projektową, z wykorzystaniem w warstwie regulacji bezpiecznej nie tylko regulacji klasycznej, ale również dokonać analizy i porównania z podejściem bazującym na zaawansowanej regulacji odpornej.

IMPLEMENTATION OF ADVANCED CONTROL THE VARIABLE STRUCTURE WITH SWITCHING

Abstract: This paper presents a problem of application advanced control structures in the industrial objects where classic PID control is installed already. The authors attention is focused on the safety of the implementation of the advanced control structure. The problem of quality of control when model is uncertain is investigated. This paper presents a comparison of robustness of classic and advanced control structures in the uncertain model case. The diagnostic method was proposed for detection when model is uncertain. Based on this diagnostic method control structure with switching between PID and advanced algorithms was tested and results of investigation are presented in the paper.

Literatura

- [1] Åström K.J., Hägglund T. (1995) *PID Control – Theory, Design and Tuning*, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC.
- [2] Duda J.T. (2003) *Modele matematyczne, struktury i algorytmy nadrzędnego sterowania komputerowego*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
- [3] Klemiato M. (2001) *Algorytmiczne nadzorowanie układów regulacji nadrzędnej*. Praca doktorska, AGH, Kraków
- [4] Löfberg J. (2003) *Minima approaches to robust model predictive control*. Rozprawa doktorska. Linköping University, Linköping.
- [5] Marusak M (2002) *Regulacja predykcyjna obiektów nieliniowych z zastosowaniem techniki DMC i modelowania rozmytego*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa
- [6] Morari M., Lee J.H. (1999). Model predictive control: past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, **23**, 667-682.
- [7] Marori M., Zafirios E. (1989) *Robust Process Control*. Prentice-Hall.
- [8] Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z. (1995) *Regulacja adaptacyjna*. PWN, Warszawa.
- [9] Soderstrom T, Stoica P. (1997) *Identyfikacja systemów*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa
- [10] Tatjewski P (2002). *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, Struktury i algorytmy*. Akademia Oficyna Wydawnicza EXIT, Waszwa.
- [11] Törn A., Żilinkas A. (1989) *Global Optimization*. Springer-Verlag. Berlin.
- [12] Wang Y. (2002) *Robust Model Predictive Control*. Rozprawa doktorska. University of Wisconsin-Madison.



Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4