

XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom I



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

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR

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

WSPÓŁORGANIZATORZY

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
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA
Mikołaj BUSŁOWICZ
Ryszard GESSING
Jakub GUTENBAUM
Stanisław KACZANOWSKI
Janusz KACPRZYK
Józef KORBICZ
Krzysztof KOZŁOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI
Krzysztof MALINOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI
Tadeusz PUCHAŁKA
Stanisław SKOCZOWSKI
Jerzy ŚWIĄTEK
Ryszard TADEUSIEWICZ
Krzysztof TCHOŃ
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO
Władysław FINDEISEN
Henryk GÓRECKI
Jerzy JÓZEFczyk
Tadeusz KACZOREK
Jerzy KLAMKA
Zbigniew KOWALSKI
Juliusz L. KULIKOWSKI
Kazimierz MALANOWSKI
Wojciech MITKOWSKI
Władysław PEŁCZEWSKI
Leszek RUTKOWSKI
Roman SŁOWIŃSKI
Andrzej ŚWIERNIAK
Piotr TATJIEWSKI
Leszek TRYBUS
Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK
Stanisław KACZANOWSKI
Tadeusz KACZOREK
Krzysztof MALINOWSKI
Roman OSTROWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA
Dariusz WAGNER
Jan STUDZIŃSKI
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowci

ISBN 83-89475-00-6

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

**STEROWANIE OPTYMALNE
I ADAPTACYJNE**

BIEŻĄCA OPTYMALIZACJA PUNKTU PRACY PROCESÓW REGULOWANYCH ALGORYTMEM PREDYKCYJNYM[†]

Maciej ŁAWRYŃCZUK*, Piotr MARUSAK**, Piotr TATJEWski***

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań układów sterowania dwóch nieliniowych obiektów: reaktora przepływowego oraz kolumny destylacyjnej, z regulatorami predykcyjnymi i bieżącą optymalizacją punktu pracy. Układy te wywodzą się bezpośrednio ze struktury klasycznej, wielowarstwowej. Przetestowano wpływ różnych częstotliwości interwencji warstwy optymalizacji (aż do częstotliwości równej częstotliwości interwencji warstwy regulacji) na jakość sterowania przy działaniu na układy zakłóceń o różnej szybkości zmienności, w szczególności porównywalnej z dynamiką obiektu.

Słowa kluczowe: Regulacja predykcyjna, optymalizacja punktu pracy, nieliniowe układy sterowania

1. WPROWADZENIE

Technika automatyzacji procesów przemysłowych bazuje od lat na podejściu warstwowym, przy czym jedną z podstawowych cech wyróżniających poszczególne warstwy sterowania jest istotnie mniejsza częstotliwość interwencji każdej warstwy w stosunku do częstotliwości interwencji warstwy bezpośrednio względem niej podrzędnej (np. [3, 4, 10]). Klasycznymi, głównymi z technicznego punktu widzenia warstwami są: warstwa regulacji procesu w zadanym punkcie pracy i warstwa optymalizacji punktów pracy, optymalizująca wartości zadane dla regulatorów w odstępach czasu znacznie większych od okresu próbkowania regulatorów, dopasowanych do dynamiki wolnozmiennych niesterowanych wielkości wejściowych (zakłóceń) czy wymagań warstw wyższych (tzw. sterowanie stanem ustalonym, *ang. steady-state control*). Podejście takie jest uzasadnione i prowadzi do pracy procesu bliskiej optymalnej, jeśli zmienność zakłóceń wpływających na efektywność ekonomiczną procesu jest wielokrotnie wolniejsza od dynamiki samego procesu regulowanego. Jednakże dla bardzo wielu procesów warunek ten nie jest spełniony albo w przeważających okresach czasu, albo w istotnych okresach zmienności cech strumieni zasilających i energetycznych. Zastosowanie sterowania stanem ustalonym w klasycznej strukturze warstwowej może

wówczas prowadzić do znaczącej utraty efektywności ekonomicznej.

Z drugiej strony, coraz popularniejsze staje się zastosowanie do regulacji algorytmów predykcyjnych (MPC – *ang. Model Predictive Control*), techniki, która odniosła olbrzymi sukces w aplikacjach praktycznych wywierając dominujący wpływ zarówno na kierunek rozwoju przemysłowych układów regulacji i sterowania, jak i prac badawczych w tym obszarze. Algorytmy MPC dominują zdecydowanie w wyodrębnianej już aktualnie powszechnie warstwie regulacji nadrzędnej (*ang. advanced control, set-point control*), położonej między warstwami regulacji bezpośredniej (*ang. basic control, direct control*) i optymalizacji, np. [1, 5, 9, 10]. Szczególnie w warstwie regulacji nadrzędnej algorytmy te implementowane są w pełnych, numerycznych wersjach, tzn. w każdej z dyskretnych chwil zmian wartości sterowania (w każdej chwili próbkowania) prognozowane jest zachowanie się obiektu regulowanego i rozwiązywane jest numerycznie dynamiczne zadanie optymalizacji (np. [10]). W zadaniu tym wyznaczaniu podlega sekwencja sterowań odpowiadająca przyjętym horyzontom predykcji i sterowania, przy czym jedynie pierwsze sterowanie przyjmowane jest do realizacji. Sterowania wyznaczane są jako rozwiązanie zadania optymalizacji ze wskaźnikiem typu regulacyjnego minimalizującym na horyzoncie predykcji określony błąd dochodzenia do założonych wartości zadanych. Jest to sformułowanie dobrze postawione i adekwatne w sytuacji procesów o wolnozmiennych zakłóceniami i o dobrze określonych modelach statycznych, gdzie wartości zadane mogą być aktualizowane (optymalizowane) w wyższej warstwie optymalizacji statycznej w rytmie wielokrotnie wolniejszym. W sytuacjach, kiedy zmienność niesterowanych strumieni wejściowych (natężenia dopływu i parametry strumieni surowców, półproduktów, mediów grzewczych itp.) jest niewiele wolniejsza, a nieraz jest wręcz tego samego rzędu, co dynamika obiektu klasyczne podejście warstwowe, zakładające pracę procesu w sekwencji długo trwających stanów ustalonych, prowadzi do rozwiązań suboptymalnych o nierzadko znacznie obniżonej efektywności ekono-

[†]Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy.

micznej. Ustalane bowiem wówczas w warstwie optymalizacji statycznej wartości zadane dla regulatorów mogą być co najwyżej wyznaczone jako pewne ustalone na dłuższe odcinki czasu średnie, stąd mogą być dalekie od optymalności. W literaturze światowej zaczęły się pojawiać próby formułowania algorytmów dla podwyższenia efektywności sterowania procesów w wymienionej wyżej sytuacji, algorytmów próbujących integrować zadania regulacji i optymalizacji, ale jedynie dla konkretnych procesów o specyficznych cechach np. [11, 12, 13]. Jest to bowiem zagadnienie bardzo trudne, dotyczące problematyki z natury nieliniowej, o zastosowaniach do bieżącego (*ang. on-line*) sterowania dyskretnego. Stąd trudno tu o ogólną, pogłębioną analizę teoretyczną, podstawową jest tu technika badań strukturalnych i symulacyjnych.

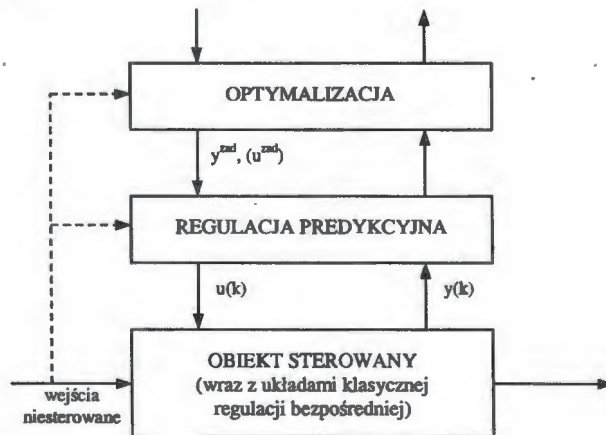
Celem prezentowanego referatu jest przedstawienie analizy wpływu częstotliwości interwencji warstwy optymalizacji statycznej na efektywność sterowania w strukturze współdziałających warstw optymalizacji i regulacji predykcyjnej, dla przypadku zmienności zakłóceń niewiele wolniejszej, porównywalnej z dynamiką obiektu. Należy podkreślić przy tym, że typową sytuacją jest dysponowanie dość dokładnym modelem statycznym nieliniowym złożonego procesu, natomiast znacznie bardziej kosztowne i trudne jest budowanie podobnie dokładnego dynamicznego modelu nieliniowego procesu. Co więcej, jeśli nawet taki model powstanie, to jest z reguły trudny do identyfikacji i zbyt złożony do sterowania w czasie rzeczywistym (stąd do regulacji wykorzystuje się głównie modele liniowe).

W referacie analizowany jest wpływ częstotliwości interwencji warstwy optymalizacji od bardzo małej odpowiadającej sterowaniu stanem ustalonym, aż po dużą (graniczną) równą częstotliwości interwencji regulacji predykcyjnej. Przeanalizowane zostaną niezbędne modyfikacje sformułowania algorytmu regulacji i zadania optymalizacji wynikające z faktu ściślejszego wzajemnego oddziaływania w sytuacji zbliżonych częstotliwości interwencji oraz powodowane sytuacją różnej ilości wejść sterowanych i wyjść regulowanych obiektu regulacji predykcyjnej, kiedy wzajemne sprzężenie regulacji i optymalizacji staje się silniejsze. Uwzględnione zostanie występowanie również wyjść jedynie ograniczonych (nieregulowanych).

2. STRUKTURA I ALGORYTMY STEROWANIA

Rozważa się warstwową strukturę sterowania obiektem przedstawioną na rys. 1 [10]. Przedmiotem zainteresowania jest współdziałanie regulacji predykcyjnej i optymalizacji bieżącej, stąd obiekt został potraktowany łącznie z układami regulacji bezpośredniej. Podobne zagadnienie zostało poruszone w pracy [6] w odniesieniu do specyfiki rozważanego tam obiektu. Wyodrębniona na rysunku warstwa regulacji predykcyjnej to z reguły warstwa regulacji nadrzędnej, zwana często warstwą regulacji zaawansowanej (*ang. advanced control layer*) lub warstwą sterowania punktami pracy (*ang. set-point control layer*), zob. np. [1, 9, 10]. Może to być jednakże również część układów regulacji mających

bezpośredni dostęp do zmiennych manipulowanych procesy (co charakteryzuje układy regulacji bezpośredniej), jeśli zmienne regulowane są istotne dla ekonomicznej efektywności procesu (występują w zadaniu ekonomicznej optymalizacji punktów pracy) i algorytmy regulacji zaimplementowane są jako numeryczne algorytmy predykcyjne.



Rys. 1. Struktura warstwowa regulacji predykcyjnej i optymalizacji bieżącej

Warstwa optymalizacji realizuje zadanie bieżącej, ekonomicznej, statycznej optymalizacji punktu pracy, z którego bezpośrednio wynikają wartości zadane dla regulacji predykcyjnej. Biorąc pod uwagę współdziałanie optymalizacji i regulacji predykcyjnej zadanie to można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} \min J_e(y^r, y^o, u) \\ y^r = F^r(u, \tilde{w}), y^r \in Y^r \\ y^o = F^o(u, \tilde{w}), y^o \in Y^o \\ u \in U \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie J_e jest ekonomiczną funkcją celu, zaś wektor wyjść y podzielono na podwektory y^r i y^o , $y = (y^r, y^o)$, odpowiednio: wyjść regulowanych (wartości zadanych dla regulatorów warstwy niższej) i wyjść jedynie ograniczonych. Przez $F = (F^r, F^o)$ oznaczono odwzorowanie modelu statycznego procesu regulowanego, w którym \tilde{w} oznacza przyjętą ustaloną estymatę zakłóceń w (wejść niesterowanych, takich jak np. natężenie dopływu i skład surowca zasilającego reaktor czy kolumnę destylacyjną). Niech $(\hat{u}(\tilde{w}), \hat{y}^r(\tilde{w}), \hat{y}^o(\tilde{w}))$ będzie rozwiązaniem zadania optymalizacji dla aktualnej wartości estymaty zakłóceń w . Dla potrzeb przeprowadzanej analizy można założyć, bez utraty ogólności, że cały wektor u zmiennych niezależnych zadania optymalizacji jest jednocześnie wektorem zmiennych wyjściowych (sterowań) regulatora predykcyjnego. Wartości optymalne wyznaczone w warstwie optymalizacji i przekazywane do warstwy regulacji są dla niej wartościami zadanymi, stąd w dalszej części pracy stosuje się oznaczenia $y^{zad}(\tilde{w}) = \hat{y}^r(\tilde{w})$, $u^{zad}(\tilde{w}) = \hat{u}(\tilde{w})$.

W pierwszej kolejności rozważa się sytuację najprostszą i klasyczną w regulacji, kiedy ilość wyjść i zmiennych regulowanych regulatora predykcyjnego jest równa, tzn. $\dim u = \dim y^r = \dim y^{zad}$. Wówczas, dla bieżącej chwili k

czasu dyskretnego, zadanie regulacji predykcyjnej najczęściej formułuje się w postaci:

$$\min \{ J = \sum_{p=1}^N \| y^{zad}(k+p|k) - y^r(k+p|k) \|_M^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} \| \Delta u(k+p|k) \|_A^2 \} \quad (2)$$

$$y^r(k+p|k) \in Y^r, \quad p=1, \dots, N$$

$$u(k+p|k) \in U, \quad p=0, \dots, N_u-1$$

$$u(k+p|k) = u(k+N_u-1|k), \quad p=N_u, \dots, N-1$$

gdzie N jest horyzontem predykcji, N_u horyzontem sterowania, zaś $y^r(k+p|k)$ oznacza wyznaczoną w chwili k (a więc dla wartości zakłócenia $w(k)$) predykcję wartości wyjść regulowanych obiektu dla chwili $k+p$ – oczywiście wyznaczoną przy pomocy odgrywanego w regulacji predykcyjnej kluczową rolę modelu obiektu, który nie został tu jawnie oznaczony. Macierz diagonalna M ma wymiar $\dim y \times \dim y$, natomiast A ma wymiar $\dim u \times \dim u$. Dla uproszczenia, szczególnie w przypadku obiektu o jednym wejściu i jednym wyjściu, przyjmuje się często $M=I$, $A=\lambda I$. W sytuacji takiej algorytm ma jeden współczynnik wagowy λ . Postać (2) zadania regulacji predykcyjnej jest powszechnie przyjmowana w literaturze jako typowa i standardowa, np. [2, 9, 10]. Z reguły nie wprowadza się jawnie, jak i w (2), wyjść ograniczonych nieregulowanych. Jeśli są one istotnie aktywne, to więcej niż prawdopodobne są trudności z eliminacją uchybów regulacji, ze względu na zbyt małą ilość sterowań ($\dim u = \dim y^{zad}$), ponadto trudno wówczas wyznaczyć jawną postać prawa sterowania. W przypadku zadania (2) interakcja zadania regulacji z zadaniem optymalizacji statycznej (1) jest stosunkowo słaba, przez wartość zadaną wyjść $y^{zad}(\tilde{w}) = \hat{y}^r(\tilde{w})$, która jest na ogół przyjmowana jako stała na horyzoncie predykcji, $y^{zad}(k+p|k) = y^{zad}(\tilde{w})$, $p=1, \dots, N$. Natomiast przy rozważaniu różnych częstotliwości interwencji warstwy optymalizacji, istotny jest sposób wyznaczania estymaty zakłóceń \tilde{w} . Jeśli optymalizacja powtarzana jest co $N_0 \gg N$ okresów interwencji T_p i zakłócenia można przyjąć jako stałe na horyzoncie nie mniejszym od N_0 (dokładnie $N_0 \times T_p$), to można mówić o klasycznym sterowaniu warstwowym. Wystarczy wówczas przyjąć $\tilde{w} = w(k)$, gdzie $w(k)$ jest pomiarem lub estymatą wartości zakłóceń wyznaczaną w chwili k . Jeśli natomiast dynamika zakłóceń jest niewiele mniejsza, porównywalna z dynamiką obiektu sterowanego – co jest przedmiotem zainteresowania niniejszej pracy – to sensownym rozwiązaniem jest częstsze uruchamianie optymalizacji statycznej, w granicznym przypadku w każdej z dyskretnych chwil k (tzn. co okres próbkowania T_p). Ponieważ rozwiązaniem zadania optymalizacji statycznej są ustalone, docelowe wartości wejść regulowanych $y^{zad}(\tilde{w})$ i sterowań $u^{zad}(\tilde{w})$, to należy przyjąć odpowiadające im „docelowe” prognozy zakłóceń, tzn. $\tilde{w} = w(k+N|k)$. Oczywiście jedynie, jeżeli dostępny jest dynamiczny model zakłóceń to $\tilde{w} = w(k+N|k) \neq w(k)$. Należy dążyć do opracowania takiego modelu.

Z punktu widzenia interakcji między optymalizacją punktu pracy i regulacją predykcyjną bardziej interesujący przypadek ma miejsce wówczas, gdy ilość sterowań jest większa od ilości zmiennych regulowanych, tzn. $\dim u > \dim y^r$. W sytuacji takiej zachodzi możliwość uwzględnienia ograniczeń dodatkowych zmiennych wyjściowych nieregulowanych. Przy dobrej regulacji istnieje dodatkowa swoboda działania układu, mogąca prowadzić do uzyskania większych efektów ekonomicznych. W rozważonej sytuacji standardowe sformułowanie zadania regulacji predykcyjnej (2) nie prowadzi do właściwego wykorzystania dysponowanej swobody działania. Proponuje się wówczas następujące sformułowanie zadania regulatora predykcyjnego:

$$\min \{ J = \sum_{p=1}^N \| y^{zad}(k+p|k) - y^r(k+p|k) \|_M^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} \| \Delta u(k+p|k) \|_A^2 \} \quad (3)$$

$$y^r(k+p|k) \in Y^r, \quad p=1, \dots, N$$

$$y^o(k+p|k) \in Y^o, \quad p=1, \dots, N$$

$$u(k+p|k) \in U, \quad p=0, \dots, N_u-1$$

$$u(k+p|k) = u^{zad}, \quad p=N_u-1, \dots, N-1$$

W stosunku do zadania (2), w sformułowaniu (3) dodano wymaganie, aby ustalony stan sterowań (tzn. poczynając od chwili $k+N_u-1$ do końca horyzontu predykcji) był równy przesłanej z zadania optymalizacji wartości optymalnej u^{zad} . Jednakże, w przypadku występowania ograniczeń postać (3) może okazać się zbyt restrykcyjna, w skrajnie niekorzystnym przypadku zbiór rozwiązań dopuszczalnych może być pusty. Można zaproponować zrelaksowaną wersję zadania (3) postaci:

$$\min \{ J_z = \sum_{p=1}^N \| y^{zad}(k+p|k) - y^r(k+p|k) \|_M^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} \| \Delta u(k+p|k) \|_A^2 + \rho \| u(k+N_u-1|k) - u^{zad} \|^2 \} \quad (4)$$

$$y^r(k+p|k) \in Y^r, \quad p=1, \dots, N$$

$$u(k+p|k) \in U, \quad p=0, \dots, N_u-1$$

$$u(k+p|k) = u(k+N_u-1|k), \quad p=N_u, \dots, N-1$$

gdzie ρ jest odpowiednio dobranym współczynnikiem kary. Oczywiście, w konkretnych aplikacjach możliwe są wersje pośrednie, kiedy dla części składowych wektora sterowań wartości w chwili końcowej horyzontu sterowania $k+N_u-1$ narzucone są równościowo (jak w (3)), a dla pozostałych składowych w sposób „miękki” (jak w (4)).

3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

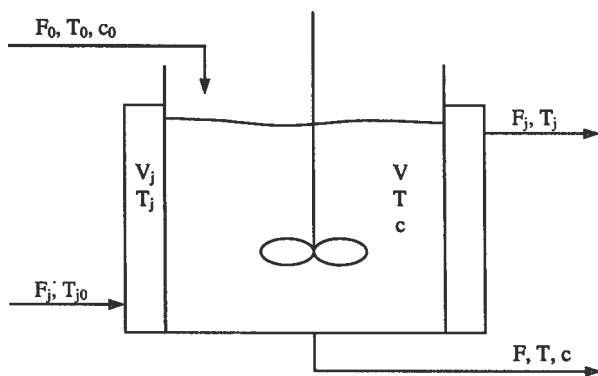
W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układów regulacji dwóch silnie nieliniowych obiektów: reaktora przepływowego i kolumny destylacyjnej. Pokazano różnice w działaniu układów w przypadku różnych częstotliwości interwencji warstwy optymalizacji, poczynając od małej (przypadek klasycz-

ny) do dużej, równej częstotliwości interwencji regulatora predykcyjnego.

3.1. Układy sterowania reaktora przepływowego

Model reaktora przepływowego

Obiektem regulacji jest reaktor przepływowy opisany w [7], pracujący w okolicy niestabilnego punktu pracy. Schemat obiektu pokazano na rys. 2; przyjęto następujące oznaczenia: F_j – dopływ czynnika chłodzącego do płaszcza reaktora, T_{j0} – temperatura czynnika chłodzącego wpływającego do płaszcza reaktora, T_j – temperatura czynnika chłodzącego wypływającego z płaszcza, F_0 – dopływ surowca, F – odbiór produktu, T_0 – temperatura surowca, T – temperatura w reaktorze, c_0 – zawartość zanieczyszczeń w surowcu, c – stężenie zanieczyszczeń w produkcie (pomiar tej wielkości wymaga czasu).



Rys. 2. Schemat nieizotermicznego reaktora przepływowego z idealnym mieszanym

Wartości stałych przyjęto takie, jak w [7], zaś wartości poszczególnych wielkości w punkcie pracy są następujące: $F=1,13 \text{ m}^3/\text{h}$, $V=1,36 \text{ m}^3$, $c_0=17,66 \text{ mol/m}^3$, $c=8,65 \text{ mol/m}^3$, $T_0=294,4 \text{ K}$, $T=333,3 \text{ K}$, $F_j=1,41 \text{ m}^3/\text{h}$, $V_j=0,109 \text{ m}^3$, $T_{j0}=294,4 \text{ K}$, $T_j=330,3 \text{ K}$.

Wyniki badań

Podczas eksperymentów założono, że $F=F_0$ (reakcja zachodzi w stałej objętości V), sterowaniem jest F_j , wielkością regulowaną T , a celem – stabilizacja stężenia zanieczyszczeń w produkcie c . Przyjęto ponadto, że F_0 jest zakłóceniem mierzalnym. Założono następującą postać wskaźnika jakości użytego w warstwie optymalizacji:

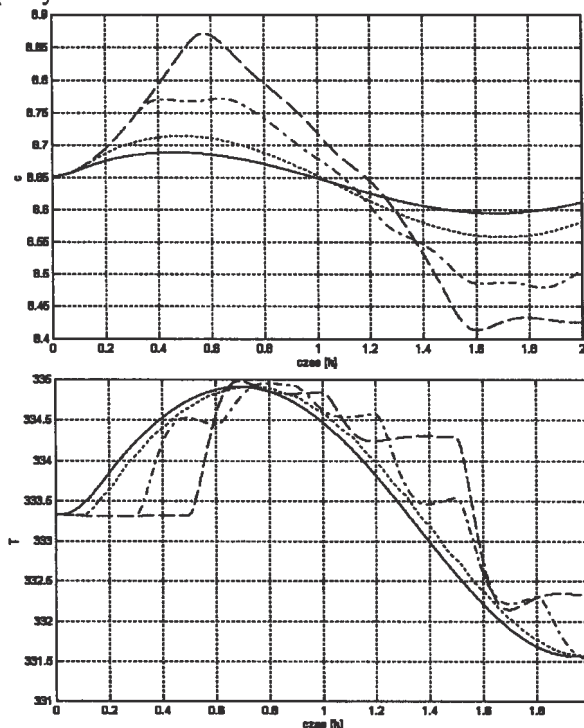
$$J_e = (c(T) - 8,65)^2 \quad (5)$$

gdzie $c(T) = \frac{F_0 c_0}{F_0 + V \alpha e^{\frac{E}{RT}}}$, α , E , R – stałe z [7].

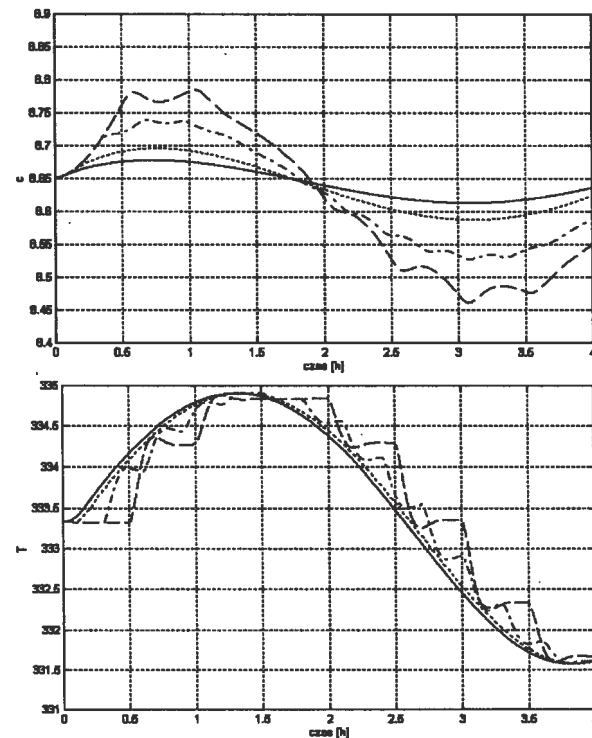
Do syntezy regulatora predykcyjnego użyto liniowego modelu obiektu, otrzymanego dla podanego punktu pracy. Przyjęto następujące parametry regulatora: $N=10$, $N_d=5$, $\lambda=0,1$. Założono stałą wartość zadaną temperatury na całym horyzoncie predykcji. Przyjęto także, że sygnał zakłócający (dopływ surowca) zmienia się okresowo, w sposób opisany wzorem:

$$F_0(t) = F_{0s} + 0,1416 \sin\left(\frac{2\pi t}{2,5}\right) \quad (6)$$

gdzie $F_{0s} = 1,1327 \text{ m}^3/\text{h}$ – wartość przepływu w punkcie pracy.



Rys. 3. Odpowiedzi układów regulacji na zmiany dopływu surowca F_0 ; optymalizacja powtarzana co: linia ciągła – $T_p=36 \text{ s}$, linia kropkowana – 6 min, linia przerywana kropkowana – 18 min, linia przerywana – 30 min



Rys. 4. Odpowiedzi układów regulacji na dwukrotnie wolniejsze zmiany dopływu surowca F_0 ; optymalizacja powtarzana co: linia ciągła – $T_p = 36 \text{ s}$, linia kropkowana – 6 min, linia przerywana kropkowana – 18 min, linia przerywana – 30 min

Przeprowadzono eksperyment mający na celu porównanie działania struktury warstwowej dla różnych częstotliwości interwencji, przy czym przyjęto, że optymalizacja punktu pracy jest powtarzana, co okres równy od T_p do 30 min (rys. 3). Zauważmy, że wraz ze wzrostem częstotliwości interwencji, otrzymane odpowiedzi są lepsze i zbliżają się stopniowo do przypadku granicznego, gdy optymalizacja jest powtarzana tak samo często, jak interwencja regulatora (linia ciągła na rys. 3), a ilość zanieczyszczeń w produkcie waha się nieznacznie.

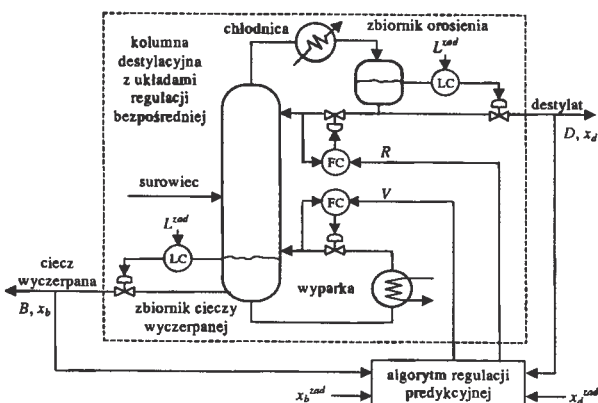
Przetestowano również działanie układów regulacji w przypadku, gdy zakłócenie zmieniało się w tych samych co poprzednio granicach, lecz dwa razy wolniej (rys. 4). Nadal wraz ze wzrostem częstotliwości interwencji, otrzymywane odpowiedzi są coraz lepsze, jednak różnice między odpowiedziami otrzymanymi w przypadkach skrajnych są tym razem wyraźnie mniejsze. Ponadto, we wszystkich przypadkach ilość zanieczyszczeń w produkcie podlega mniejszym zmianom i w mniejszym stopniu odbiega od wartości pożądanej, niż w sytuacji gdy na układ regulacji działa szybsze zakłócenie.

Istotny wpływ na działanie układów regulacji może mieć sposób szacowania wartości zakłócenia. W szczególności porównano działanie struktur dla dwóch przypadków: pomiaru jego bieżącej wartości (ten sposób użyto w poprzednich eksperymentach) oraz liczenia średniej wartości z ostatnich 30 minut. Zaobserwowano lepszą pracę układu regulacji z pomiarem bieżącej wartości zakłócenia. Warto jednak zaznaczyć, że w niektórych przypadkach można dokonać próby wyznaczenia predykcji zakłóceń, co może znacząco wpłynąć na poprawę jakości regulacji w stosunku do przypadku z pomiarem bieżącej wartości zakłócenia.

3.2. Układy sterowania kolumny destylacyjnej

Modele kolumny destylacyjnej

Rozważanym obiektem regulacji jest schematycznie przedstawiona na rys. 8 kolumna destylacyjna służąca do rozdzielania dwuskładnikowej mieszaniny metanolu i wody. Celem destylacji jest oczyszczenie surowca, produkt destylacji (destylat) powinien być praktycznie czystym metanolem (ok. 95%), podczas gdy produkt uboczny (ciecz wyczerpana) powinien zawierać niewielkie ilości alkoholu (ok. 5%).



Rys. 5. Struktura układu regulacji kolumny destylacyjnej.

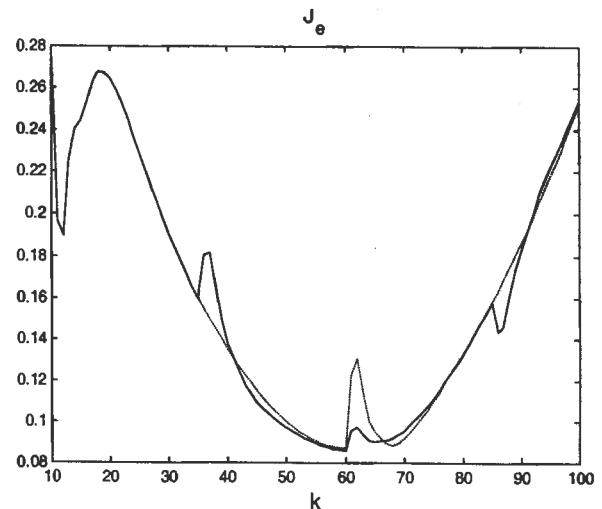
W celu stabilizacji poziomów w zbiorniku cieczy wyczerpanej oraz zbiorniku orosienia stosuje się konwencjonalne regulatory PID, sterujące strumieniami B oraz D . Do stabilizacji kluczowych wartości stężenia produktu destylacji (x_d) oraz produktu ubocznego (x_b), a więc zmiennych decydujących o jakości produkcji, stosuje się dwuwymiarowy algorytm regulacji predykcyjnej, sterujący wartościami zadanymi przepływów R oraz V . Szybkie regulatory PID poziomu w zbiorniku cieczy wyczerpanej oraz zbiorniku orosienia, a także regulatory przepływu strumieni R i V tworzą warstwę regulacji bezpośredniej, okres ich interwencji jest krótki (rzędu sekund). Algorytm regulacji predykcyjnej składu jest natomiast regulatorem nadrzędnym, jego okres interwencji jest znacznie dłuższy (10 min.). Natężenie przepływu F i skład x_f strumienia surowca są głównymi zakłóceniami procesu. W nominalnym punkcie pracy wartości poszczególnych wielkości są następujące: $x_{d0}=0,95$, $x_{b0}=0,05$, $R_0=33,3634$ kmol/h, $V_0=83,3636$ kmol/h, $F_0=100$ kmol/h, $x_{f0}=0,5$, przy czym jednostką składu jest ułamek molowy.

Wyniki badań

W algorytmie regulacji predykcyjnej zastosowano model liniowy drugiego rzędu, do optymalizacji statycznej punktu pracy wykorzystano statyczny nieliniowy model fizykochemiczny. Przyjęto następujące parametry: $N=10$, $N_u=5$, $M=\text{diag}\{10, 5\}$, $A=\lambda I$, $\lambda=1$. Uwzględniono ograniczenia wartości sygnałów sterujących i ich przyrostów na horyzoncie sterowania ($p=0, \dots, N_u-1$):

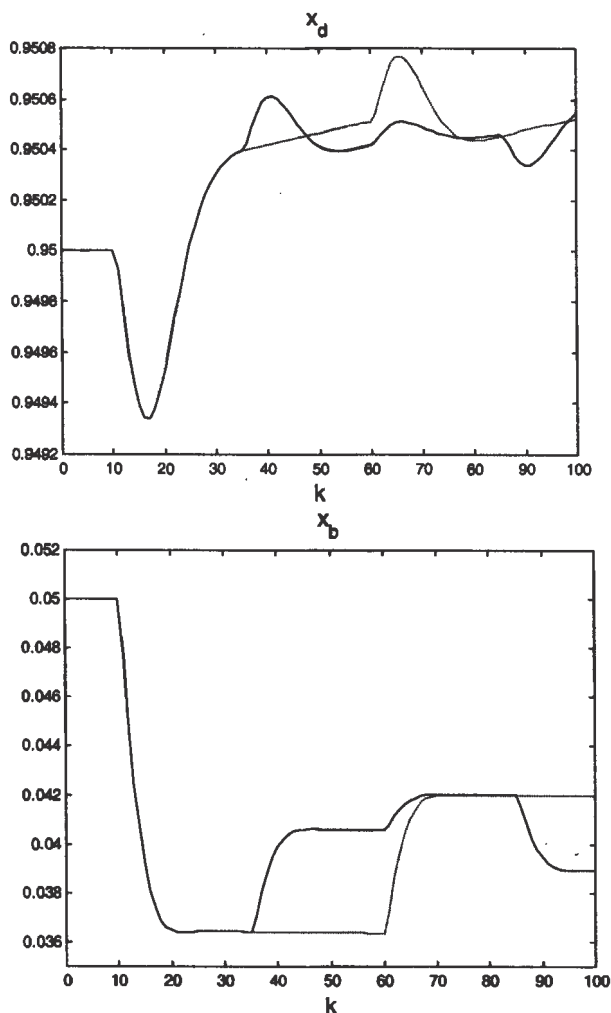
$$\begin{aligned} R^{\min} &\leq R(k+p|k) \leq R^{\max} \\ V^{\min} &\leq V(k+p|k) \leq V^{\max} \\ \Delta R^{\min} &\leq \Delta R(k+p|k) \leq \Delta R^{\max} \\ \Delta V^{\min} &\leq \Delta V(k+p|k) \leq \Delta V^{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie $R^{\min}=R_0-20$ kmol/h, $R^{\max}=R_0+20$ kmol/h, $V^{\min}=V_0-20$ kmol/h, $V^{\max}=V_0+20$ kmol/h, gdzie $\Delta R^{\max}=5$ kmol/h, $\Delta V^{\max}=5$ kmol/h.



Rys. 6. Porównanie wskaźnika ekonomicznego przy zmianach składu surowca x_f ; optymalizacja powtarzana co: linia ciągła – $25 T_p$, linia przerywana – $50 T_p$.

Porównano działanie struktury warstwowej regulacji kolumny destylacyjnej przy różnych okresach interwencji warstwy optymalizacji. Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rys. 7, natomiast porównanie ekonomicznego wskaźnika jakości J_e na rys. 6. W przypadku częściej powtarzanej optymalizacji sumaryczna wartość wynosi 14,4522, natomiast przy dwukrotnie rzadszym działaniu warstwy optymalizacji jest ona wyraźnie wyższa i równa 14,5277.



Rys. 7. Trajektorie stężeń przy zmianach składu surowca x_i ; optymalizacja powtarzana co: linia ciągła – 25 T_p , linia przerywana – 50 T_p

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania układów regulacji w strukturze warstwowej, z różnymi częstotliwościami interwencji warstwy optymalizacji, przy różnej zmienności zakłóceń, wykazały celowość kontynuacji rozpoczętych prac. Oprócz dalszego badania omówionej struktury, planuje się opracowanie i sprawdzenie działania innych koncepcji optymalizującego sterowania predykcyjnego, w szczególności z optymalizacją ekonomiczną zintegrowaną z warstwą regulacji.

ON-LINE SET-POINT OPTIMISATION OF PROCESSES CONTROLLED BY A PREDICTIVE ALGORITHM

Abstract: The paper is concerned with a multi layer control structure with predictive control and set-point optimization. Different frequencies of the optimization layer intervention were considered; the influence of the disturbance dynamics was investigated, including the case when it is comparable with the plant dynamics. The efficiency of the proposed structures was tested on two nonlinear benchmark problems (a CSTR and a distillation column.)

Literatura

- [1] Brdys M., Tatjewski P. (2005) *Iterative Algorithms for Multilayer Optimizing Control*. Imperial College Press/World Scientific, London.
- [2] Camacho E.F., Bordons C. (1999) *Model predictive control*. Springer, London.
- [3] Findeisen W., Bailey F.N., Brdyś M., Malinowski K., Tatjewski P., Woźniak A. (1980) *Control and Coordination in Hierarchical Systems*. J. Wiley & Sons.
- [4] Findeisen W. (1997) *Struktury sterowania dla złożonych systemów*. OWPW, Warszawa.
- [5] Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.-E. (2001) *Control System Design*, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- [6] Lautenschlager Moro L.F., Odloak D. (1995) Constrained multivariable control of fluid catalytic converters. *Journal of Process Control*, 5, 1, 29–39.
- [7] Luyben W.L. (1976) *Modelowanie, symulacja i sterowanie procesów przemysłu chemicznego*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa.
- [8] Ławryńczuk M., Marusak P., Tatjewski P. (2004) *Metody optymalizującego sterowania predykcyjnego*. Raport IAiS PW 04–16, Warszawa.
- [9] Maciejowski J.M. (2002) *Predictive control with constraints*. Prentice Hall.
- [10] Tatjewski P. (2002) *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- [11] Tvrzka de Gouvea M., Odloak D. (1998) One-layer real time optimization of LPG production in the FCC unit: procedure, advantages and disadvantages. *Computers & Chemical Engineering*, 22, S191–S198.
- [12] Zanin A., Tvrzka de Gouvea M., Odloak D. (2000) Industrial implementation of a real-time optimization strategy for maximizing production of LPG in a FCC unit. *Computers & Chemical Engineering*, 24, 525–531.
- [13] Zanin A., Tvrzka de Gouvea M., Odloak D. (2002) Integrating real-time optimization into model predictive controller of the FCC system. *Control Engineering Practice*, 10, 819–831.



**Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk**

ISBN 83-89475-02-2