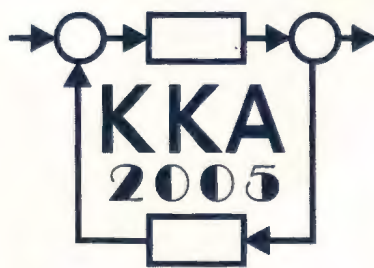


XV Krajowa Konferencja Automatyki

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

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	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

REGULACJA PREDYKCYJNA W WARSTWOWYCH STRUKTURACH STEROWANIA †

Piotr TATJEWSKI

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono zagadnienie odpowiedniego doboru, algorytmów regulacji predykcyjnej dla zastosowania w warstwowej strukturze sterowania procesami przemysłowymi. Po przypomnieniu podstawowych wymagań wynikających z zadań poszczególnych warstw, przedstawia się algorytmy predykcyjne odpowiednie dla warstwy regulacji bezpośredniej, przede wszystkim algorytmy analityczne oparte na liniowych prawach regulacji, wraz z odpowiednimi zasadami ich implementacji w sytuacji występowania ograniczeń sygnału sterującego. Następnie omawiane są algorytmy dla warstwy regulacji nadrzędnej, gdzie istotnymi wyzwaniami, oprócz wielowymiarowości, jest występowanie ograniczeń również sygnałów wyjściowych oraz nieliniowości procesu. W końcowej części omawiane jest istotne dla ekonomicznej efektywności sterowania zagadnienie współpracy bieżącej (on-line) warstw regulacji predykcyjnej nadrzędnej i optymalizacji punktów pracy.

Słowa kluczowe: regulacja predykcyjna, sterowanie warstwowe, ograniczenia, nieliniowość, optymalizacja punktu pracy.

1. WPROWADZENIE

Pierwotne, podstawowe cele sterowania procesami technologicznymi czy gospodarczymi w gospodarce rynkowej są natury ekonomicznej – osiągnięcie zysku z prowadzonej działalności produkcyjnej, handlowej czy produkcyjno-handlowej. Jednakże, aby efektywnie realizować podstawowy cel ekonomiczny, trzeba z reguły zapewniać realizację szeregu celów częściowych, warunkujących możliwość przede wszystkim odpowiednio bezpiecznej realizacji celu podstawowego, a ponadto gwarantujących wymagane parametry jakościowe oferowanych produktów czy usług – i to przy braku czy niepełnej informacji o zachowaniu otoczenia obiektu sterowanego. Ponadto, wiele obiektów sterowania jest złożonej natury, z wieloma wejściami sterowanymi i niesterowanymi oraz wieloma wielkościami wyjściowymi, o skomplikowanej naturze wzajemnych oddziaływań między wejściami i wyjściami. Stąd w sterowaniu złożonymi obiektami od lat ukształtowała się praktyka podejścia *hierarchicznego*, a w szczególności *warstwowego*, praktyka potwierdzona przez teorię, zob. np. [9, 5, 13, 3]. Istotą podejścia hierarchicznego jest *dekompozycja* pierwotnego, podstawowego zadania (celu) sterowania na szereg za-

dań cząstkowych, mniej złożonych i wzajemnie ze sobą powiązanych, z których każde związane jest z przetwarzaniem mniejszej ilości informacji i realizacją na ogół jedynie celu cząstkowego. Spotykamy dwa podstawowe sposoby dekompozycji zadania sterowania [5, 13, 3]: dekompozycję funkcjonalną i dekompozycję przestrzenną. Struktura warstwowa sterowania jest efektem dekompozycji funkcjonalnej.

W pracy na wstępie przypomniane zostaną krótko zasadnicze zadania podstawowych, z punktu widzenia sterowania, warstw struktury sterowania: regulacji bezpośredniej, regulacji nadrzędnej i optymalizacji. Z zadań tych wynikają określone uwarunkowania i wymagania dotyczące układów regulacji bezpośredniej i nadrzędnej. W epoce dominacji regulacji PID wymagania te nierzadko trudno było spełnić nawet w przypadku jednowymiarowych (czy co najwyżej kaskadowych) pętli regulacji dla obiektów o trudnej dynamice (duże opóźnienia, nieminimalnofazowości). Jeszcze gorzej sytuacja wyglądała w sytuacji obiektów wielowymiarowych, z silnymi interakcjami i ograniczeniami nie tylko sterowań, ale nierzadko i pewnych wielkości wyjściowych – regulacja wielopętlowa PID, nawet z odprzeganiem, często prowadziła do niezbyt wysokiej jakości regulacji. Przełomem w tej sytuacji było zastosowanie w latach 70-tych ub. stulecia koncepcji regulacji predykcyjnej (MPC – *Model-based Predictive Control*). Algorytmy tego typu zastosowano przede wszystkim do wielowymiarowej regulacji nadrzędnej procesami o wolniejszej dynamice (kolumny destylacyjne), z wielkim sukcesem. Znaczenie tych rezultatów było tak duże, że doprowadziło do wyodrębnienia się w strukturze warstwowej nowej, odrębnej *warstwy regulacji nadrzędnej*, zwanej w literaturze fachowej często *warstwą regulacji zaawansowanej (advanced control layer)*. Co więcej, algorytmy tej warstwy utożsamiane bywają z algorytmami regulacji predykcyjnej (*predictive control layer* [8]). Z kolei, rozwój techniki mikroprocesorowej z jednej strony, a techniki regulacji predykcyjnej z drugiej umożliwił zastosowania algorytmów klasy MPC również dla poprawy jakości jednopętlowej regulacji bezpośredniej, przede wszystkim obiektami o trudniejszej dynamice.

Po krótkim wprowadzeniu w problematykę sterowania w strukturze warstwowej, w pracy przypomniana zostanie koncepcja regulacji predykcyjnej. Następnie omówione zostaną algorytmy klasy MPC, odpowiednio skła-

†Referat problemowy (praca częściowo finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007 jako projekt badawczy)

syfikowane z punktu widzenia celowości i możliwości zastosowań, kolejno w warstwach regulacji bezpośredniej i nadrzędnej. Poruszony zostanie ponadto problem wzajemnych interakcji między warstwami regulacji nadrzędnej i optymalizacji punktu pracy, szczególnie silnych w sytuacji wejść niesterowanych (zakłóceń) o dynamice niewiele wolniejszej od dynamiki procesu regulowanego, i wynikające stąd konsekwencje dla projektowania sterowania.

2. WARSTWOWA STRUKTURA STEROWANIA

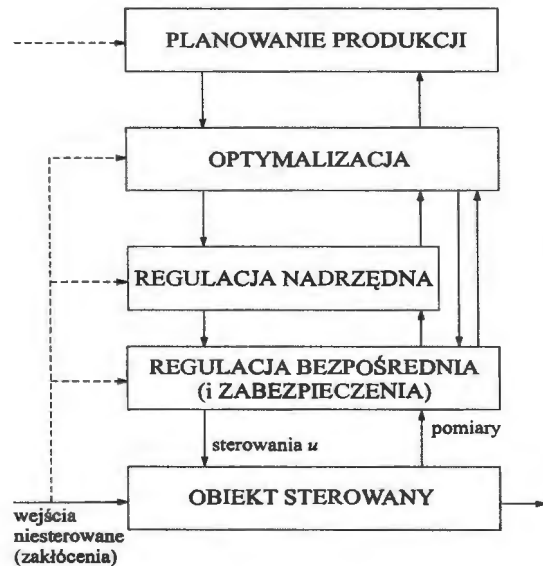
Realizacja podstawowego, ekonomicznego celu sterowania obiektem przemysłowym (technologicznym) wiąże się nierozdzielnie z realizacją pewnych celów szczegółowych, z których najważniejsze to:

1. Zapewnienie bezpiecznego przebiegu procesów w obiekcie sterowanym, tzn. ograniczenie do akceptowalnego poziomu możliwości wystąpienia awarii i zjawisk niekontrolowanych,
2. Zapewnienie odpowiednich cech wyjść obiektu (np. jakości produktów), tj. utrzymywanie zmiennych wyjściowych w obszarze dopuszczalnych wartości,
3. Optymalizacja bieżącej efektywności działania obiektu, tj. z reguły maksymalizacja zysku przy ograniczeniach surowcowych czy energetycznych lub minimalizacja kosztów (surowcowych, energetycznych) przy założonym poziomie produkcji.

Nietrudno zauważyć, że pierwsze dwa z wymienionych celów też mają podłoże natury ekonomicznej, związane są z podstawowym efektywnościowym celem sterowania obiektem. Wystąpienie awarii prowadzi bowiem z reguły do bardzo poważnych strat związanych z jej usuwaniem i przerwą w produkcji, a z kolei niedotrzymanie parametrów jakościowych prowadzi w najlepszym przypadku do utraty części zysku z powodu konieczności obniżenia ceny, może też prowadzić nawet do utraty produktu.

Kolejność wymienienia przedstawionych powyżej cząstkowych celów sterowania obiektem przemysłowym nie jest przypadkowa. Najważniejsze jest bezpieczeństwo sterowania obiektem, w następnej kolejności trzeba dbać o jakość produktów, a dopiero w zakresie swobody pozostawionej po zapewnieniu realizacji tych dwóch celów jest miejsce na bieżącą ekonomiczną optymalizację wartości zmiennych określających przebieg procesów w obiekcie. W takiej też kolejności umieszczone są ponad usytuowanym na samym dole *obiektem sterowania*, realizujące kolejno wymienione cele warstwy *podstawowej warstwowej struktury sterowania* przedstawionej na rys. 1.

Warstwa *regulacji bezpośredniej* (i zabezpieczeń) odpowiada za bezpieczeństwo przebiegu procesów dynamicznych w obiekcie. Tylko ta warstwa ma bezpośredni dostęp do obiektu sterowanego, ma możliwość bezpośredniego wpływania na wielkości wejściowe sterujące (zwane też wielkościami manipulowanymi) oznaczone na rysunku przez u . Realizacja techniczna zadań warstwy regulacji i zabezpieczeń zapewniana jest wspólnie,



Rys. 1. Warstwowa struktura sterowania obiektem przemysłowym [13]

dla większych obiektów, przez tzw. *rozproszone systemy sterowania*, popularne w przemyśle systemy typu DCS (*Distributed Control System*). Są to kompleksowe komputerowe systemy pomiarów, regulacji i zabezpieczeń, wyposażone z reguły we własne, zintegrowane pakiety oprogramowania typu SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) do wizualizacji, operatorskiego i inżynierskiego nadzoru oraz archiwizacji danych. Zadania regulacji i zabezpieczeń dla mniejszych obiektów realizować można z wykorzystaniem sterowników programowalnych (PLC – *Programmable Logic Controllers*) czy też tzw. regulatorów wielofunkcyjnych.

Algorytmy regulacji bezpośredniej powinny być niezawodne i stosunkowo proste, stąd nadal dominują tu klasyczne algorytmy PID. Jednakże możliwości systemów DCS, współczesnych sterowników PLC czy komputerów klasy PC są dużo większe. Stąd, tam gdzie klasyczna regulacja PID nie spełnia wymagań, coraz częściej stosowane są bardziej zaawansowane algorytmy regulacji, przede wszystkim odpowiednie modyfikacje algorytmu PID oraz, szczególnie w ostatnim okresie, proste realizacje regulatorów predykcyjnych.

W opracowaniach, materiałach informacyjnych firm z branży automatyki spotyka się dość powszechnie określenie *regulacja bezpośrednia* (ang. *basic regulatory control, direct control*), w odróżnieniu od określenia *regulacja zaawansowana* (ang. *advanced control*). Należy tu jednak zdecydowanie podkreślić, że podstawową cechą wyróżniającą wszelkie algorytmy regulacji bezpośredniej jest *bezpośredni dostęp do obiektu sterowanego i wysoka częstotliwość interwencji* (mały okres próbkowania), a nie rodzaj zastosowanego algorytmu.

Zmiennymi wyjściowymi regulatorów wchodzących w skład *warstwy regulacji nadrzędnej* nie są bezpośrednio wielkości wejściowe sterujące (manipulowane) obiektu, ale wartości zadane dla regulatorów warstwy regulacji bezpośredniej. Ponadto, w pętach regulacji nadrzędnej *częstotliwość interwencji jest mniejsza*, tzn. większe są okresy próbkowania – rzędu np. minuty, podczas gdy w

warstwie regulacji bezpośredniej są to ułamki sekundy, co najwyżej pojedyncze sekundy.

Celem regulacji nadrzędnej jest kontrolowanie wolniej zmiennych wielkości procesowych *decydujących o jakości, o parametrach produkcji*, jak np. stężenia w reaktorach czy kolumnach destylacyjnych. Dla przykładu, dobra stabilizacja (charakteryzująca się małą wariancją uchybu regulacji) stężenia kluczowego zanieczyszczenia w strumieniu produktu destylacji pozwala prowadzić proces w punkcie pracy leżącym bliżej maksymalnej dopuszczalnej wartości tego zanieczyszczenia – wytwarzamy produkt nieco bardziej zanieczyszczony, a przez to taniej. Dlatego też od algorytmów regulacji nadrzędnej wymaga się z reguły wysokiej jakości działania, najczęściej w sytuacji procesu wielowymiarowego, nieliniowego. Typowe nowoczesne rozwiązania to przede wszystkim algorytmy opartej na modelach procesu regulacji predykcyjnej z przesuwającym horyzontem (MPC). Jednym z najbardziej znanych przykładów są tu aplikacje oparte na wykorzystaniu algorytmu DMC (*Dynamic Matrix Control*), powstałego w przemyśle petrochemicznym w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia.

Historia oraz znaczenie warstwy regulacji nadrzędnej bezpośrednio związane są z rozwojem algorytmów zaawansowanej regulacji, w tym szczególnie z aplikacjami algorytmów predykcyjnych. Uprzednio nie rozróżniano bowiem w literaturze przedmiotu warstw regulacji bezpośredniej i nadrzędnej. Dopiero rozwój techniki komputerowej, umożliwiając realizację w czasie rzeczywistym bardziej wymagających obliczeniowo, zaawansowanych algorytmów opartych na modelach procesu, takich jak algorytm DMC i inne algorytmy predykcyjne, spowodował wyraźne wyodrębnienie warstwy regulacji nadrzędnej. Od tego czasu wyróżnienie tej warstwy jest powszechnie spotykane w materiałach, opracowaniach wielu czołowych firm produkujących sprzęt i oprogramowanie do celów sterowania, a także w podstawowych podręcznikach, szczególnie poświęconych sterowaniu procesami technologicznymi (*process control*), zob. np. [9, 8]. Trzeba jednakże zaznaczyć, że warstwa regulacji nadrzędnej nie zawsze występuje. Nie trzeba jej wyodrębniać tam, gdzie nie ma potrzeby regulacji nadrzędnej w wyżej opisanym sensie. Ponadto, nie musi ona rozdzielać w pełni warstwy regulacji bezpośredniej od warstwy optymalizacji – część wartości zadanych dla regulatorów bezpośrednich może być wyznaczana i bezpośrednio przekazywana z warstwy optymalizacji, co zostało zaznaczone na rys. 1. Nie zalicza się też do wyróżnionej warstwy regulacji nadrzędnej regulatorów głównych standardowych kaskadowych układów regulacji.

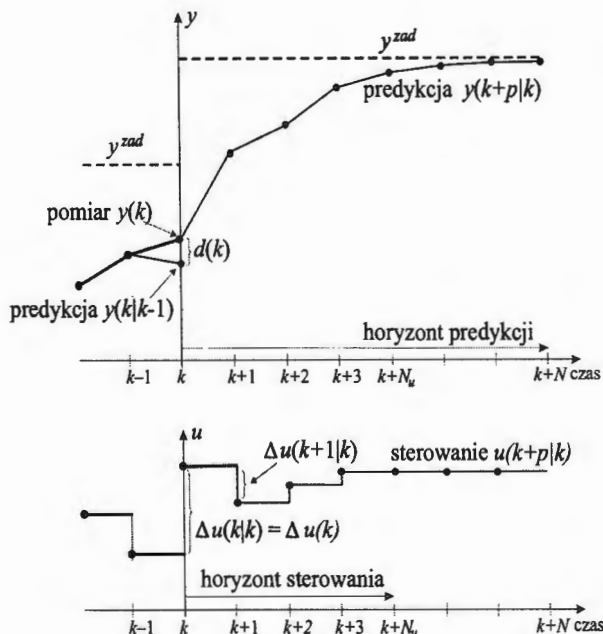
Warstwa *optymalizacji* jest kolejną, usytuowaną bezpośrednio nad warstwami regulacji, zob. rys. 1. Celem jej działania jest wyznaczanie *optymalnych wartości zadanych* dla bezpośrednio jej podporządkowanych regulatorów warstw regulacji nadrzędnej i bezpośredniej. Wartości te wynikają zwykle z optymalizacji określonej funkcji celu natury ekonomicznej, która określa zysk lub bieżące koszty działania obiektu. Rozwiązywane zadanie optymalizacji to najczęściej zadanie optymalizacji statycznej, wyznaczany jest wówczas *optymalny punkt pracy*, tzn. optymalne dla aktualnego stanu otoczenia obiektu war-

tości zadane dla regulatorów. Częstotliwość rozwiązywania zadania optymalizacji, tj. częstotliwość interwencji warstwy optymalizacji jest z reguły znacznie mniejsza niż warstw niższych. Warstwa optymalizacji może przy tym działać w trybie synchronicznym lub asynchronicznym. W tym ostatnim przypadku zadanie optymalizacji punktu pracy obiektu aktywowane jest obserwowanymi czy estymowanymi na bieżąco zmianami niesterowanych wejść obiektu lub zmianami parametrów produkcji przekazywanymi z wyższej warstwy planowania produkcji.

Interesującym zjawiskiem obserwowanym w ostatnich latach, związanym z rozwojem możliwości sprzętu i oprogramowania dla kompleksowego sterowania obiektów przemysłowych, jest integracja oprogramowania do predykcyjnej regulacji nadrzędnej i optymalizacji bieżącej punktów pracy. Algorytmy nadrzędne regulacji predykcyjnej złożonych obiektów działają z reguły w oparciu o rozwiązywane w każdej chwili próbkowania numeryczne zadanie optymalizacji sterowań. Algorytmy tego typu wymagają zarówno dość znacznej mocy obliczeniowej, jak i dość dobrego modelu obiektu. Stąd komercyjne pakiety oprogramowania oferujące algorytmy predykcyjne regulacji wielowymiarowej z ograniczeniami są z reguły kompleksowe i drogie, zawierają również procedury do modelowania i identyfikacji obiektu sterowanego, jak też procedury do optymalizacji bieżącej punktów pracy – bezpośrednio w pakiecie lub w module z nim ściśle związanym. Zbierane na bieżąco z systemu DCS pomiary zmiennych wyjściowych i wejściowych obiektu wykorzystywane mogą być w algorytmach zarówno identyfikacji (dostrajania, adaptacji) modelu, jak i regulacji oraz optymalizacji. Procedura optymalizacji dostarcza algorytmowi regulacji nadrzędnej odpowiednich wartości zadanych dla wyjść regulowanych, uruchamiana jest w odpowiednim rytmie dopasowanym do działania algorytmu nadrzędnej regulacji predykcyjnej. Interesującym z punktu widzenia integracji regulacji i optymalizacji jest przypadek, kiedy liczba sterowań wyznaczanych przez nadrzędny regulator predykcyjny jest większa niż liczba wyjść regulowanych. W tej sytuacji możliwe jest uwzględnienie w funkcji celu algorytmu predykcyjnego również składników o charakterze ekonomicznym.

3. ZASADA REGULACJI PREDYKCYJNEJ

Technika regulacji MPC jest jedyną z tzw. *zaawansowanych technik regulacji* (*advanced control techniques* – technik bardziej zaawansowanych niż standardowa regulacja PID), 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, zob. np. [4, 1, 12, 11, 8, 13]. Jest kilka przyczyn tego sukcesu. Po pierwsze, algorytmy MPC w sposób naturalny potrafią uwzględniać ograniczenia zarówno sygnałów sterujących, jak i ograniczenia wielkości wyjściowych decydujące często o jakości, efektywności i bezpieczeństwie produkcji. Przy tym generują aktualne sterowania uwzględniając zarówno wspomniane ogra-



Rys. 2. Ilustracja zasady regulacji predykcyjnej

niczenia, jak i interakcje wewnętrzne w obiekcie, dzięki bezpośredniemu wykorzystaniu modelu. Stąd w sposób naturalny można je stosować do obiektów wielowymiarowych, również przy nierównej liczbie wejść sterujących i wielkości regulowanych. Po trzecie, są to algorytmy, których zasada działania jest zrozumiała, stosunkowo łatwa do wyjaśnienia personelowi inżynierskiemu, jak i operatorskiemu – aspekt bardzo istotny przy wprowadzaniu nowych technik do praktyki przemysłowej.

Ogólna zasada regulacji predykcyjnej (z przesuwającym horyzontem) jest następująca [4, 8, 13]: w każdej iteracji algorytmu, czyli w każdej kolejnej chwili k (dokładniej, kT_p , gdzie T_p oznacza okres próbkowania), dysponując:

- dynamicznym modelem obiektu, zakładającym określony model zakłóceń i pozwalającym przewidywać wartości wyjść y w chwilach przyszłych (dla założonych przyszłych wartości sterowań u),
- pomiarami zmiennych wyjściowych y obiektu w chwilach bieżącej i poprzednich oraz poprzednimi wartościami sterowań u ,
- znaną bądź założoną trajektorią wartości zadanych y^{zad} dla wyjść regulowanych obiektu w chwili bieżącej k i chwilach przyszłych,

wyznaczamy wartości sterowań $u(k) = u(k|k), u(k+1|k), \dots, u(k+N_u-1|k)$, przyjmując dalej $u(k+p|k) = u(k+N_u-1|k)$ dla $p \geq N_u$, gdzie N_u to tzw. *horyzont sterowania* (notacja " $k+p|k$ " oznacza wyznaczenie w chwili k wartości przewidywanej na chwilę $k+p$). Do sterowania obiektu wykorzystywany jest jedynie pierwszy element wyznaczonego optymalnego ciągu wartości sterowań, tzn. sterowanie $u(k) = u(k|k)$. W kolejnej chwili, $(k+1)$ -szej, następuje nowy pomiar wyjść obiektu i cała procedura jest powtarzana, z horyzontem predykcyjnym o nie zmienionej długości N . Stosuje się więc zasadę przesuwanego horyzontu (zwaną też zasadą sterowania repe-

tycyjnego). Przedstawiona zasada działania regulacji predykcyjnej zilustrowana jest na rys. 2.

Sterowania wyznaczone są tak, aby zminimalizować różnice między wartościami regulowanych wyjść obiektu $y(k+p|k)$ przewidywanymi (predykowanymi) w chwili k a wartościami zadanymi dla tych wyjść $y^{zad}(k+p|k)$, na *horyzoncie predykcyjnym* N ($p = 1, 2, \dots, N$). Stąd zadanie wyznaczania sterowań definiuje się jako zadanie optymalizacji, np. typowo w postaci [4, 13]

$$\min_{\Delta u(k+p|k), p=0, \dots, N_u-1} \left\{ \sum_{p=1}^N \|y^{zad}(k+p|k) + y(k+p|k)\|^2 + \lambda \sum_{p=0}^{N_u-1} \|\Delta u(k+p|k)\|^2 \right\}$$

z ogr.: $u(k+p|k) \in U, p = 0, \dots, N_u-1$ (1)
 $y(k+p|k) \in Y, p = 1, \dots, N$,

gdzie $\Delta u(i) = u(i) - u(i-1)$, zaś predykcyjna wartość dokonywana jest na podstawie *modelu* (oznaczymy go przez $f = (f_1, \dots, f_N)$),

$$y(k+p|k) = f_p(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_A), u(k+p-1|k), \dots, u(k|k), u(k-1), \dots, u(k-n_B), d(k)), \quad p = 1, \dots, N \quad (2)$$

przy czym skalar $\lambda \geq 0$ określa w funkcji celu wagę tłumienia zmienności sterowań w stosunku do uchybów regulacji. Tak formułując zadanie wyznaczania sterowań można w nim bezpośrednio uwzględnić ograniczenia zarówno sterowań, jak i wyjść. Będziemy zakładać, że zbiory U i Y definiują proste ograniczenia liniowe (np. na wartości minimalne i maksymalne, co jest typowe).

Kluczowe dla klasyfikacji, własności algorytmów MPC są cechy modelu procesu: podstawowym jest podział na:

- *algorytmy MPC z liniowym modelem procesu* (umownie: *liniowe algorytmy MPC*),
- *algorytmy MPC z nieliniowym modelem procesu* (umownie: *nieliniowe algorytmy MPC*).

Podział jest umowny, albowiem algorytm z modelem liniowym i liniowymi ograniczeniami aktywnymi jest też algorytmem nieliniowym (dokładniej: *kawałkami-liniowym, piecewise-linear*). Podział jest kluczowy, ponieważ tylko liniowy model zależności przewidywanych wyjść od przewidywanych sterowań (zmiennych decyzyjnych $\Delta u(k+p|k)$) prowadzi do zadania (1) z kwadratową, wypukłą funkcją celu – *zadania liniowo-kwadratowego* (LQ), dla którego istnieją niezawodne procedury optymalizacji, ponadto znajdujące rozwiązanie w przewidywalnym czasie, co jest kluczowe dla sterowania w czasie rzeczywistym.

4. MPC W REGULACJI BEZPOŚREDNIEJ

W warstwie regulacji bezpośredniej podstawowym wymaganiem jest prostota i niezawodność działania – dominują tu algorytmy SISO (często też w strukturach kaskadowych). Regulatory MPC znajdują tu zastosowanie

tam, gdzie występuje trudniejsza dynamika i jakość regulacji PID jest niezadowalająca. Ze względu na prostotę działania i implementacji wchodzi tu przede wszystkim w grę *algorytm MPC z modelem liniowym*, które można podzielić na 3 grupy (w porządku rosnącego nakładu obliczeniowego na iterację):

- algorytmy analityczne suboptymalne (prawa regulacji z uzupełnieniami struktury),
- algorytmy analityczne optymalne (jawne kawałkami liniowe prawa regulacji, tzw. algorytmy wieloparametryczne),
- algorytmy numeryczne (rozwiązywanie w każdym kroku zadania optymalizacji LQ).

Jeśli model procesu (2) jest liniowy, to można go przedstawić w postaci

$$y(k+p|k) = M_p[u(k+p-1|k), \dots, u(k|k)]^T + G_p[u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b)]^T + H_p[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_a)]^T + d(k), \quad p = 1, \dots, N \quad (3)$$

gdzie M_p , G_p i H_p są macierzami.

Jeśli w zadaniu optymalizacji (1) z modelem liniowym pominąć ograniczenia nierównościowe (dane zbiorami Y i U), to zadanie to ma jawne, *analityczne* rozwiązanie, którego pierwszy element (dla uproszczenia rozważmy obiekt SISO) dany jest w ogólności zależnością

$$\hat{u}(k) = k_e(y^{zad} - y(k)) + \bar{k}_u^T[u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T + \bar{k}_y^T[y(k), \dots, y(k-n_a)]^T \quad (4)$$

definiującą *liniowe prawo regulacji*, ze współczynnikami sprzężeń liniowych k_e , \bar{k}_u i \bar{k}_y . W szczególności, jeśli model procesu dany jest odpowiedzią skokową (algorytm regulacji DMC), to prawo regulacji ma postać

$$\hat{u}(k) = k_e(y^{zad} - y(k)) + k_u^T[\Delta u(k-1), \dots, \Delta u(k-(D-1))]^T \quad (5)$$

gdzie D to ilość różnych elementów odpowiedzi skokowej (tzw. horyzont dynamiki obiektu) [13]. Jeśli zaś model procesu dany jest w postaci równania różnicowego (model typu ARX, algorytm GPC), to prawo regulacji może być przedstawione w postaci [13]

$$\hat{u}(k) = k_e(y^{zad} - y(k)) + k_u^T[\Delta u(k-1), \dots, \Delta u(k-n_B)]^T + k_y^T[\Delta y(k), \dots, \Delta y(k-n_A+1)]^T \quad (6)$$

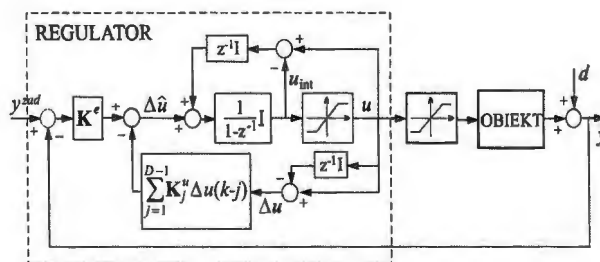
gdzie n_A i n_B to określają liczby współczynników równania różnicowego modelu dynamiki obiektu związanych z wyjściami i sterowaniami, odpowiednio (porównując z (4): $n_a = n_A$, $n_b = n_B + 1$).

Implementacja prawa regulacji dokładnie w postaci (4) (tj. również (5), (6)) prowadzi do dobrych rezultatów jedynie wówczas, gdy nie są aktywne żadne ograniczenia sterowania. Jeśli, jak to często ma miejsce, występują i bywają aktywne ograniczenia amplitudy (czy szybkości

zmiany) sygnału sterującego, to zastosowanie analitycznego prawa regulacji w czystej postaci (4) (czy (5), (6)) przestaje być optymalnym rozwiązaniem zadania (1). Zastosowanie takiego *suboptymalnego algorytmu analitycznego* może prowadzić (i najczęściej prowadzi) nawet do bardzo dobrych rezultatów, ale pod *dwoma warunkami*, w istocie bardzo prostymi do realizacji [13]:

- wartości poprzednich sterowań $u(k-j)$ uwzględniane w prawie regulacji muszą być *sterowaniami rzeczywiście zastosowanymi w obiekcie* (ograniczonymi przez nieliniowości elementu wykonawczego), a nie jedynie wyliczonymi w poprzednich krokach algorytmu,
- powinien być zastosowany mechanizm przeciwdziałający nasycaniu całkowania (*anti-windup*).

Realizacja analitycznego regulatora DMC uwzględniająca powyższe zalecenia przedstawiona jest na rys. 3, dla przypadku modelowego (w regulatorze) uwzględnienia ograniczeń amplitudy sterowania. Alternatywnym i w ogólności lepszym, ale nie zawsze możliwym rozwiązaniem jest podawanie do regulatora wartości zrealizowanych sterowań bezpośrednio z wyjścia elementu wykonawczego.



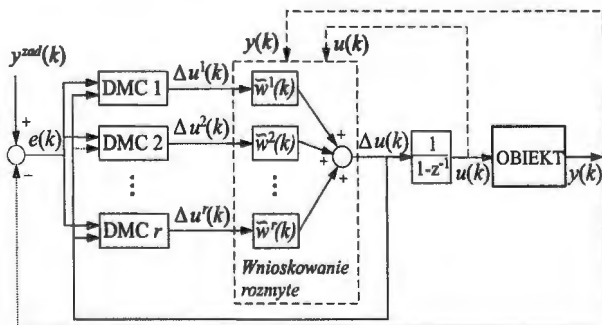
Rys. 3. Struktura prawidłowej implementacji regulatora analitycznego suboptymalnego DMC, dla sytuacji z ograniczeniami amplitudy sterowania

Koncepcja *algorytmu predykcyjnego analitycznego optymalnego*, przedstawiona w [2], wykorzystuje fakt, że dla każdego ustalonego zbioru ograniczeń aktywnych sterowania można wyznaczyć odpowiadające temu zbiorowi analityczne liniowe prawo sterowania (podobnie jak (4)). Zasadniczą trudnością jest tu natomiast fakt, że w trakcie wyznaczania optymalnego sterowania (optymalnego dla zadania (1)) aktywność ograniczeń zmienia się, a więc są aktywne coraz to inne liniowe prawa sterowania. Jeśli rozważyć położenie obiektu w przestrzeni jego stanów (opis modelem przestrzeni stanów), to można zbiór zmienności stanów obiektu podzielić na partycje (podzbiory) tak, że w każdej z nich aktywne są dokładnie te same ograniczenia (lub żadne) – i w każdej partycji wyznaczyć odpowiadające jej analityczne liniowe prawo regulacji. Jest to w ogólności zadanie obliczeniowe wykonalne dla ograniczeń liniowych, przy tym mogące prowadzić do dużej liczby partycji, szczególnie gdy mamy ograniczenia zarówno amplitudy jak i szybkości zmiany sterowania (zauważmy ponadto, że rozważany zbiór stanów powinien być inwariantny, tj. stan obiektu nie może z niego wyjść podczas sterowania). Natomiast zadanie to

trzeba wykonać tylko raz, off-line. Algorytm wykonywany on-line polega wówczas na wyznaczaniu, w każdym kroku, konkretnej partycji, w której aktualnie znajduje się stan obiektu i następnie zastosowaniu odpowiadającego jej prawa regulacji. W zastosowaniach dodatkową trudnością może być kwestia estymacji stanu.

Dwie wymienione powyżej realizacje regulacji MPC z modelem liniowym odpowiadają na potrzebę implementacji prostszej i szybszej niż trzecia z nich, standardowe rozwiązywanie zadania LQ w każdym kroku algorytmu. Z doświadczeń autora wynika, że implementacje algorytmów DMC i GPC analityczne suboptymalne prowadzą na ogół do bardzo dobrych rezultatów, są przy tym bardzo proste, zrozumiałe dla obsługi inżynierskiej i operatorskiej.

W sytuacji coraz powszechniej stosowanego sterowania warstwowego z bieżącą optymalizacją punktu pracy wzrasta potrzeba stosowania *algorytmów nieliniowych* w pętach regulacji bezpośredniej odpowiadających procesom nieliniowym, dla których wartości zadane są istotnie zmieniane przez nadrzędne procedury optymalizacji. Jednym z najprostszych i skutecznych rozwiązań jest tu uogólnienie algorytmu liniowego suboptymalnego, przez zastosowanie struktury regulacji rozmytej typu Takagi-Sugeno (TK) [10, 13]. Podstawą projektu jest model procesu rozmyty TK, gdzie poprzednik każdej z reguł wnioskowania określa lokalny rozmyty podobszar modelu, a następnik lokalny model liniowy w tym podobszarze. Dla otrzymania rozmytego regulatora predykcyjnego wystarczy zaprojektować dla każdego z lokalnych modeli odpowiedni liniowy algorytm analityczny. Struktura takiego regulatora, z prawami regulacji DMC, pokazana jest na rys. 4.



Rys. 4. Struktura regulatora analitycznego rozmytego DMC suboptymalnego – elementy rozszerzenia struktury dla przypadku ograniczeń sterowania (identyczne jak na rys. 3) nie pokazane

5. MPC W REGULACJI NADRZĘDNEJ

Jak omówiono w rozdziale 2, celem regulacji nadrzędnej jest kontrolowanie z reguły wolniej zmiennych wielkości procesowych *decydujących o parametrach produkcji, o jej jakości*, zmiennych decydujących o wartości ekonomicznej funkcji celu procesu – a więc przy bieżącej optymalizacji zmienianych w trakcie pracy, nierzadko w dość szerokich zakresach, często w bezpośrednim sąsiedztwie

ograniczeń. Stąd regulacja nadrzędna z reguły jest z ograniczeniami, wielowymiarowa, nieliniowa. Dzięki dłuższym okresom próbkowania i nowoczesnym sterownikom dużej mocy można tu z powodzeniem stosować algorytmy MPC bardziej zaawansowane obliczeniowo, w tym z bieżącą numeryczną optymalizacją – o ile będzie niezawodna i dostatecznie szybka. Jeśli problemem jest trudna dynamika, silne interakcje, ale w pewnym obszarze pracy gdzie wystarczy ograniczyć się do modeli liniowych, to *numeryczne algorytmy liniowe* (DMC, GPC, itd.) świetnie się tu nadają. Ten właśnie obszar zastosowań zdecydował o wielkim sukcesie i rozpowszechnieniu techniki MPC w ostatnich dekadach ub. stulecia, zob np. [1, 12, 11].

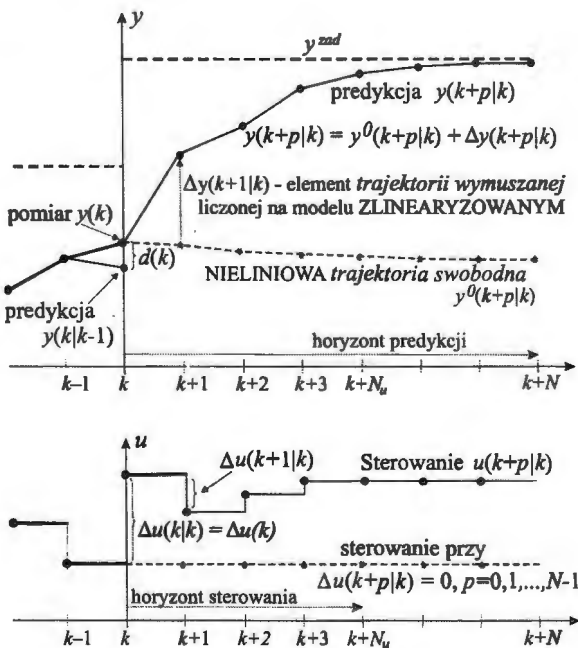
Znacznie trudniejsze jest zaprojektowanie efektywnego i niezawodnego *algorytmu MPC z modelem nieliniowym*. Jednym z najprostszych rozwiązań jest przytoczony w rozdziale poprzednim algorytm rozmyty MPC – nieliniowe rozszerzenie suboptymalnego liniowego algorytmu analitycznego, nie uwzględniające ograniczeń na etapie projektowania prawa regulacji. Aby ograniczenia precyzyjnie uwzględnić, trzeba zastosować algorytm numeryczny. Konceptyjnie, komplikacja wydaje się niewielka: trzeba tylko w zadaniu (1) użyć w miejsce liniowego modelu (3) modelu nieliniowego postaci (2). Ale konsekwencje są zasadnicze: dla modelu nieliniowego zadanie (1) staje się niewypukłym, a często multimodalnym zadaniem optymalizacji z ograniczeniami. Dla takich zadań nie ma w ogólności procedur efektywnych numerycznie i niezawodnych (gwarantujących znalezienie rozwiązania), ponadto trudno przewidywalny jest czas znajdowania rozwiązania. Są to cechy trudno akceptowalne dla zastosowań w sterowaniu bieżącym. Stąd pomysły algorytmów suboptymalnych, ale niezawodnych i o gwarantowanym czasie trwania jednej iteracji. Naturalnym pomysłem jest tu wykorzystanie *linearyzacji*. Najprostszym rozwiązaniem jest algorytm, który w każdym kroku dokonuje linearyzacji modelu nieliniowego i wyznacza sterowanie wybranym algorytmem predykcyjnym z aktualnym modelem liniowym (zlinearyzowanym) – wykorzystując ten model zarówno do predykcji wyjść jak i optymalizacji przyrostów sterowań (dostajemy algorytm *Nieliniowy z Sukcesywną Linearyzacją* (MPC-NSL) [13]. Nie jest to jednakże rozwiązanie najefektywniej wykorzystujące dostępny model nieliniowy, przy zachowaniu rozwiązywanego on-line zadania optymalizacji w pożądanej postaci QP.

W przypadku modelu liniowego obowiązuje zasada superpozycji, stąd można wówczas *rozdzielić zadanie predykcji przyszłych wyjść* w zależności od poprzednich sterowań i wyjść (zakładając "zamrożenie" przyszłych sterowań na ostatnich wartościach $u(k+p|k) = u(k-1)$, $p = 0, \dots, N_u - 1$), od *zadania optymalizacji przyrostów przyszłych sterowań* $\Delta u(k+p|k)$, $p = 0, \dots, N_u - 1$. Jest to istotne o tyle, że tak rozumianą predykcję wyjść, zwaną *trajektorią swobodną wyjść*, liczymy w każdym kroku algorytmu tylko raz, na początku, natomiast przyrosty wyjść $\Delta y(k+p|k)$, $p = 1, \dots, N$ powodowane optymalizowanymi przyrostami sterowań (tzw. *trajektorią wymuszana wyjść*) liczone są wielokrotnie w trakcie działania procedury QP. Korzystając z filozofii podziele-

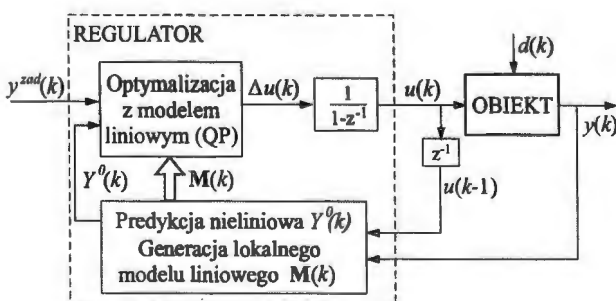
nia trajektorii wyjść predykowanych na część swobodną i wymuszaną można sformułować następujący algorytm z *Nieliniową Predykcją i Linearyzacją* (MPC-NPL): w każdym kroku

1. zakładając brak przyrostów wyjść na horyzoncie predykcji wyznaczyć trajektorię swobodną wyjść z wykorzystaniem modelu nieliniowego,
2. dokonać linearyzacji modelu nieliniowego w aktualnym stanie obiektu, wyznaczając liniowy model przyrostów wyjść w zależności od przyszłych przyrostów sterowań,
3. dokonać optymalizacji przyrostów sterowań rozwiązując zadanie QP, pierwszy element wyznaczonego wektora ($\hat{u}(k|k)$) zastosować do sterowania procesem.

Filozofia dekompozycji trajektorii wyjść predykowanych przedstawiona jest na rys. 5, zaś struktura algorytmu MPC-NPL na rys. 6.



Rys. 5. Zasada dekompozycji trajektorii wyjść w algorytmie MPC-NPL



Rys. 6. Struktura regulacji MPC-NPL

Realizacja algorytmu MPC-NPL jest szczególnie prosta, jeśli nieliniowy model procesu jest liniowy o nieliniowo zmiennych współczynnikach – wówczas dokonywana w każdym kroku linearyzacja jest niemal natychmiastowa. Dla przykładu, model nieliniowy rozmyty

Takagi-Sugeno, o funkcjach następników wszystkich reguł liniowych i o takiej samej strukturze, może być traktowany jako model liniowy o zmiennych współczynnikach.

Algorytm MPC-NPL jest przykładem prostego algorytmu nieliniowego MPC suboptymalnego, ale efektywnego i pewnego numerycznie, nadającego się do implementacji on-line. Propozycji różnych nieliniowych algorytmów predykcyjnych, konstruowanych pod kątem efektywności obliczeniowej czy gwarantowanej stabilności, można znaleźć wiele w literaturze, odsyłamy czytelnika do bibliografii zawartych w artykułach przeglądowych, np. [12, 11], czy książkach [4, 8, 13].

6. WSPÓLDZIAŁANIE WARSTW REGULACJI NADRZĘDNEJ MPC i OPTYMALIZACJI

Optymalizacja punktów pracy procesu (tzn. wartości zadanych dla regulatorów warstw regulacji) w klasycznej strukturze warstwowej (rys. 1) jest uzasadniona i prowadzi do pracy procesu bliskiej optymalnej jeśli zmienność zakłóceń wpływających na efektywność ekonomiczną procesu (natężenia dopływu i parametry strumieni surowców, półproduktów, mediów grzewczych itp.) jest wielokrotnie wolniejsza od dynamiki samego procesu regulowanego. Jednakże dla bardzo wielu procesów warunek ten nie jest spełniony, w przeważających okresach czasu lub w pewnych okresach zmienności cech strumieni zasilających i energetycznych. Zastosowanie sterowania stanem ustalonym w klasycznej strukturze warstwowej, zakładające pracę procesu w sekwencji długo trwających stanów ustalonych, może wówczas prowadzić do znaczącej utraty efektywności ekonomicznej. 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. Jest to bowiem zagadnienie bardzo trudne, dotyczące problematyki z natury nieliniowej, o zastosowaniach do bieżącego (on-line) sterowania dyskretnego. Stąd trudno tu o ogólną, pogłębioną analizę teoretyczną, podstawową jest tu technika badań strukturalnych i symulacyjnych.

W przedstawionej sytuacji możliwe są dwa podejścia w celu utrzymania wysokiej efektywności ekonomicznej:

- Pozostając przy strukturze warstwowej, zwiększamy częstotliwość interwencji warstwy optymalizacji, nawet do granicznej częstotliwości równej częstotliwości interwencji regulatora nadrzędnego. W pracy [6] przedstawiono analizę takiego podejścia.
- Dążymy to integracji warstw optymalizacji i nadrzędnej regulacji predykcyjnej, formułując jedno zadanie optymalizacji zawierające zarówno składniki

regulacyjne jak i optymalizacyjne. Badaniom w tym zakresie poświęcona jest praca [7].

7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zagadnienie wyboru algorytmów regulacji predykcyjnej (MPC) dla zastosowania w warstwach regulacji struktury sterowania procesami przemysłowymi. Oprócz wymagań wynikających z celów działania poszczególnych warstw istotnymi czynnikami wyboru są tu ograniczenia sterowań, ograniczenia wielkości wyjściowych i nieliniowości procesu regulowanego. Po przypomnieniu zadań poszczególnych warstw i zasady regulacji predykcyjnej, przedstawia się szybkie i niezawodne realizacje algorytmów predykcyjnych odpowiednie dla warstwy regulacji bezpośredniej, przede wszystkim oparte na modelach liniowych procesu i wynikających stąd analitycznych prawach regulacji (algorytmy suboptymalne w strukturach anti-windup, algorytmy optymalne jawne wieloparametryczne). Dla sytuacji istotnych nieliniowości koniecznych do uwzględniania w warstwie regulacji bezpośredniej proponuje się regulatory analityczne rozmyte typu Takagi-Sugeno. W warstwie regulacji nadrzędnej, gdzie okresy próbkowania są dłuższe a istotnymi wyzwaniami jest wielowymiarowość, występowanie ograniczeń technologicznych oraz nieliniowości, proponuje się odpowiednio sformułowane algorytmy numeryczne (w każdym kroku rozwiązywane jest zadanie optymalizacji sterowań). W końcowej części omawiane jest istotne dla ekonomicznej efektywności sterowania zagadnienie współpracy bieżącej (on-line), a nawet integracji warstw regulacji nadrzędnej i optymalizacji punktów pracy. Z przedstawionego przeglądu wynika, że dysponujemy szerokim zbiorem algorytmów regulacji predykcyjnej umożliwiającym właściwy wybór dla zastosowań w warstwowej strukturze sterowania, dla różnych klas procesów.

PREDICTIVE CONTROLLERS IN MULTILAYER CONTROL STRUCTURES

Abstract: The problem of adequate selection of model-based predictive control (MPC) algorithms for applications in a multilayer control structure is presented in the paper. After recalling basic requirements stemming from the tasks of individual control layers, MPC algorithms adequate for the direct (basic) control layer are presented, first of all *analytical* algorithms based on linear control laws, together with the ways of implementation and design in the presence of control constraints. Next, algorithms for the set-point (advanced) control layer, where interactions and output constraints play often a key role, are discussed. Finally, the problem of mutual cooperation between advanced control and set-point optimization layers, essential for the economical effectiveness of the process, is discussed.

Literatura

- [1] Allgöwer F., Badgwell T.A., Qin J.S., Rawlings J.B., Wright S.J. (1999) Nonlinear Predictive Con-

trol and Moving Horizon Estimation – An Introductory Overview, w: P.M. Frank (ed.): *Advances in Control – Highlights of ECC'99*. Springer, Londyn.

- [2] Bemporad A., Morari M., Dua V., Pistikopoulos E.N. (2002) The explicit linear quadratic regulator for constrained systems. *Automatica*, 38, 3–20.
- [3] Brdys M.A., Tatjewski P. (2005) *Iterative Algorithms for Multilayer Optimizing Control*. Imperial College Press/World Scientific, Londyn.
- [4] Camacho E.F., Bordons C (1999) *Model Predictive Control*. Springer, Londyn.
- [5] Findeisen W. (1997) *Struktury Sterowania dla Złożonych Procesów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [6] Ławryńczuk M., Marusak P., Tatjewski P. (2005) Bieżąca optymalizacja punktu pracy procesów regulowanych algorytmem predykcyjnym. *XV Krajowa Konferencja Automatyki*, Warszawa.
- [7] Ławryńczuk M., Marusak P., Tatjewski P. (2005) Integrating predictive control with set-point optimization. Zgłoszone do: *Joint ECC/CDC05 Conference*, Sevilla.
- [8] Maciejowski J.M. (2002) *Predictive Control*. Prentice Hall, Harlow, England.
- [9] Marlin T.E. (1995) *Process Control*. McGraw-Hill, New York.
- [10] Marusak P., Tatjewski P. (2002) Stability analysis of nonlinear control systems with unconstrained fuzzy predictive controllers. *Archives of Control Sciences*, 12, 267–288.
- [11] Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Scokaert P.O.M. (2000) Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 36, 789–814.
- [12] Morari M., Lee J.H. (1999) Model predictive control: past, present and future. *Computers and Chemical Engineering*, 23, 667–682.
- [13] Tatjewski P. (2002) *Sterowanie zaawansowane procesów przemysłowych, Struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.



Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4