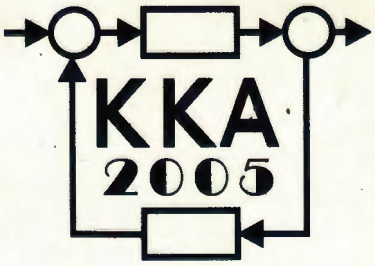
XV Krajowa Konferencja Automatyki

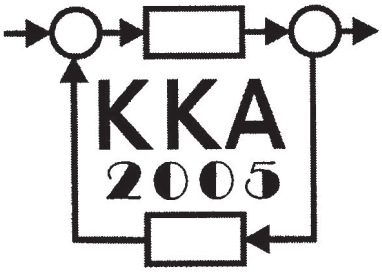
Tom I



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

WSPÓŁORGANIZATORZY

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 naukowi	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-00-6

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

REFERATY PLENARNE

MECHANIZMY WSPÓŁPRACY: KOORDYNACJA PERIODYCZNA I ITERACYJNA

Krzysztof MALINOWSKI

Politechnika Warszawska, e-mail: k.malinowski@ia.pw.edu.pl
oraz Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa (NASK)

Streszczenie: Rozwój układów sterowania i zarządzania, wprowadzanie rozbudowanych systemów różnorodnego przeznaczenia, takich jak systemy zaopatrzenia, ochrony przeciwpowodziowej, obrony przeciwlotniczej i przeciwrakietowej, wreszcie ogarniających całą naszą planetę sieci komunikacyjnych, powoduje potrzebę stosowania mechanizmów umożliwiających współpracę elementów składowych tych systemów. Referat przedstawia kilka takich mechanizmów, wraz z przykładami zastosowań, przy założeniu, że elementy składowe systemów, podsystemy, wyposażone są w jednostki decyzyjne stosujące lub mogące stosować mechanizmy bieżącej optymalizacji decyzji. Odpowiednią współpracę podsystemów może zapewnić wprowadzenie jednostki nadrzędnej i odpowiednich procedur koordynacji, w szczególności koordynacji periodycznej. Jeśli wprowadzenie jednostki nadrzędnej nie jest możliwe, na przykład w sytuacji, w której mamy do czynienia ze zbiorem podsystemów a właściwie systemów autonomicznych, to pozostaje stworzenie mechanizmów wzajemnego uzgadniania decyzji lokalnych. Rozproszona koordynacja iteracyjna przy pomocy mechanizmów cenowych zapewnia jedną z możliwości takiego uzgadniania, w szczególności w zastosowaniu do eksploatacji sieci telekomunikacyjnych złożonych z wielu elementów autonomicznych i suwerennych w swoich decyzjach.

Słowa kluczowe: Sterowanie, zarządzanie, system złożony, koordynacja periodyczna, koordynacja iteracyjna, ochrona przeciwpowodziowa, obrona przeciwrakietowa, sieci komputerowe.

1. WPROWADZENIE

Otaczająca nas rzeczywistość charakteryzuje się stale rosnącą liczbą złożonych systemów składających się z podsystemów składowych, wyposażonych w swoje jednostki decyzyjne. Oczywiste jest, że istnieje praktyczna potrzeba zarówno usprawniania działania samych tych jednostek i podległych im podsystemów poprzez stosowanie coraz lepszych, opartych o stosowanie optymalizacji mechanizmów decyzyjnych, jak i potrzeba zapewniania odpowiedniej współpracy poszczególnych podsystemów – tym większa, im bardziej zależy nam na dobrym wykorzystaniu całości rozpatrywanego systemu. Jako przykłady ważnych zastosowań mogą służyć, omawiane w tym referacie: system sterowania przejściem fali powodziowej przez zespół zbiorników retencyjnych i odcinków koryt rzecznych, system obrony przeciwrakietowej składający się z kilku sektorów obrony, wreszcie sieć komputerowa złożona z wielu systemów autonomicznych, a także szereg innych systemów, w tym zaopatrzenia w energię elektryczną, gaz, system transportu drogowego i wiele innych. Oczywiście, szczególne cechy i zadania poszczególnych systemów są odmienne, jednak wszystkie one charakteryzują się wieloma jednostkami decyzyjnymi odpowiedzialnymi za podległe im części systemu i we wszystkich występuje potrzeba współpracy tych lokalnych jednostek decyzyjnych. Na dwie zasadnicze kwestie należy w tym miejscu od razu zwrócić uwagę. Po pierwsze inna jest sytuacja, w której możliwe jest wprowadzenie i wyposażenie w odpowiednie kompetencje nadrzędnej jednostki decyzyjnej, będącej w stanie zapewnić bądź wymusić odpowiednią współpracę podsystemów, a inna w przypadku, gdy takiej jednostki nie ma i być nie może. Z pierwszą z tych sytuacji mamy do czynienia, na przykład, w przypadku systemu zbiorników retencyjnych – o ile podlegają one wspólnej władzy wodnej – oraz w przypadku systemu obrony przeciwrakietowej, z drugą zaś w przypadku sieci komputerowej, składającej się z wielu systemów (podsystemów) autonomicznych. Inne źródło różnicowania systemów stanowi natura powiązań pomiędzy podsystemami; powiązania te mogą mieć miejsce poprzez: bezpośredni wpływ decyzji danego podsystemu na wskaźniki innych (wzajemny wpływ poprzez funkcje celu), bezpośredni wpływ danego podsystemu na wielkości wejściowe do innego podsystemu, wreszcie poprzez ograniczenia na wspólnie wykorzystywane zasoby. Poza tymi głównymi cechami charakterystycznymi ważną role odgrywają: dynamika rozpatrywanych zjawisk, w tym częstość podejmowanych decyzji, wymagania dotyczące pozyskiwania, przesyłania i przetwarzania informacji i wiele innych czynników.

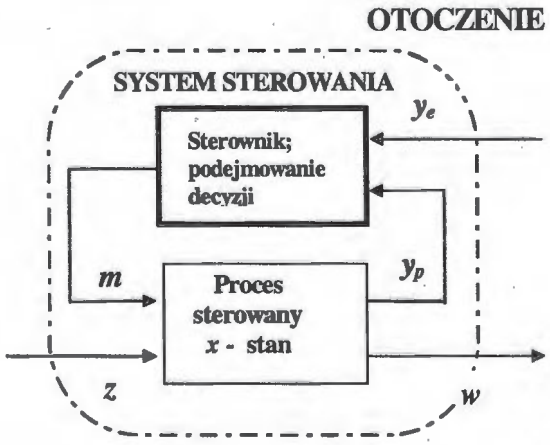
W kolejnych punktach referatu przedstawione zostaną, nawiązujące do zaproponowanego podziału, mechanizmy koordynacji dla przypadku, gdy istnieje jednostka nadrzędna, a w szczególności mechanizm koordynacji periodycznej realizowanej poprzez modyfikacje lokalnych celów działania (sterowanie falą powodziową) lub poprzez zmieniany w czasie przydział zadań i zasobów (system obrony przeciwrakietowej), a następnie mecha-

nizmy zapewniania współpracy wzajemnie powiązanych systemów autonomicznych na przykładzie sterowania przepływem danych w sieci komputerowej.

Wypływające z wieloletnich badań doświadczenia wskazują na to, że bardzo trudne jest uzyskanie istotnych rezultatów ogólnych, dotyczących właściwości złożonych układów wyposażonych w optymalizacyjne mechanizmy decyzyjne, na drodze analizy teoretycznej; w szczególności założenia upraszczające umożliwiające dokonanie takiej analizy muszą iść bardzo daleko [21]. Dlatego też badanie własności takich układów wymaga odpowiedniej analizy komputerowej opierającej się o eksperymenty symulacyjne. Muszą towarzyszyć one każdemu projektowi; powodzenie w przypadku tworzenia hierarchicznej struktury sterowania zależne jest zarówno od pomysłowości i doświadczenia projektanta jak i od dobrze przeprowadzonego eksperymentu symulacyjnego.

2. POWTARZANA OPTYMALIZACJA DECYZJI, KOORDYNACJA PERIODYCZNA

Rozważmy system sterowania przedstawiony na rys. 1. Będący przedmiotem naszego zainteresowania proces sterowany (lub zarządzany) podlega świadomym oddziaływaniom m ze strony decydenta (układu sterowania) oraz oddziaływaniom poprzez niezależne od decydenta wejścia swobodne z. Zainteresowania, cele sterowania, dotyczą odpowiednich efektów prowadzenia procesu wyrażanych poprzez wielkości w. Cele te mogą przybierać postać ograniczeń narzucanych na wskazane wielkości lub postać wskaźników jakości. Cele stawiane przed urządzeniem sterującym trzeba stawiać w sposób uwzględniający niepewność dotyczącą przyszłych a częstokroć i obecnych wartości wejść swobodnych. Konstruując mechanizm decyzyjny trzeba brać pod uwagę bieżące wykorzystanie dostępnej informacji o zachowaniu się procesu - wielkości y_p - oraz o zachowaniu się otoczenia tego procesu - wielkości y_e. Wielkości y_e pozwalają na formułowanie operacyjnych modeli, zwanych prognozami, opisujących przyszłe zachowanie się wejść swobodnych. Obserwacja y_p oraz y_e pozwala na gromadzenie informacji I, wykorzystywanej w podejmowaniu decyzji.



Rys. 1. System sterowania; m - decyzje sterujące, z- wejścia swobodne, w - efekty prowadzenia procesu.

2.1. Zadanie powtarzanej optymalizacji

W coraz większej liczbie różnorodnych zastosowań pojawia się potrzeba wprowadzania optymalizacji decyzji sterujących. Chodzi tutaj o - wielokrotnie powtarzane - wypracowywanie sterowań (decyzji sterujących) dotyczących danego procesu w warunkach znaczącej niepewności związanej z zachowaniem się wejść swobodnych. Warto zauważyć, że w ogólnym przypadku wejścia swobodne mogą reprezentować zarówno niepewność rzeczywiście zewnętrzną w stosunku do procesu jak i niepewność wewnętrzną związaną z jego zachowaniem się.

Powtarzany proces decyzyjny oparty o wykorzystującą prognozy optymalizację można, operując czasem dyskretnym, z podziałem przedziału sterowania na etapy pomiędzy poszczególnymi chwilami, sformułować następująco:

- w danej chwili k wypracowywana jest prognoza jedno- lub wielowariantowa, ewentualnie prognoza w postaci rozkładów prawdopodobieństwa lub w postaci modelu niepewności ograniczonej, dotycząca zachowania się przyszłych wartości wejść swobodnych; dla etapów $j=k,k+1,...,k+L_k-1$, gdzie L_k jest horyzontem prognozy w chwili k,
- dokonywana jest optymalizacja decyzji sterujących dla etapów $i= k,k+1,...,k+K_k-1$; K_k jest horyzontem optymalizacji w chwili k (oczywiście $L_k \geq K_k$),
- wykorzystujemy obliczone wartości decyzji m_k w etapie k-tym, od chwili k do chwili $k+1$, etc.

Podstawowy mechanizm decyzyjny opisanego powyżej typu obejmuje zadanie optymalizacji ciągu sterowań, sformułowane jako zadanie optymalizacji w układzie otwartym i wykorzystujące pojedynczą prognozę wejść swobodnych. Jest to sformułowanie wykorzystywane także w bardzo już rozpowszechnionych regulatorach predykcyjnych [5, 28].

Inne możliwe sformułowania zadania wieloetapowej optymalizacji decyzji obejmują, m. in.:

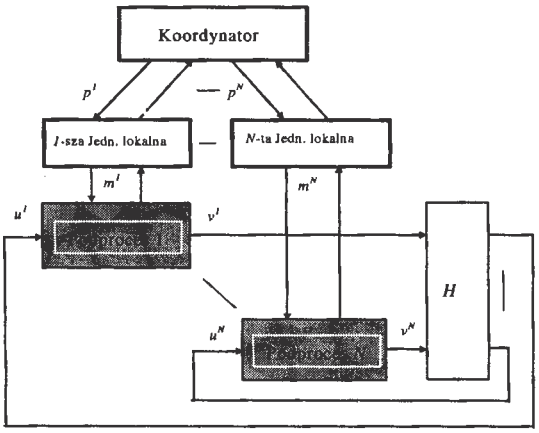
1. zadanie optymalizacji stochastycznej w układzie zamkniętym - jest to w istocie zadanie syntezy optymalnej reguły decyzyjnej,
2. zadanie optymalizacji stochastycznej w układzie otwartym postawione jako zadanie optymalizacji wartości oczekiwanej wskaźnika jakości względem ciągu sterowań $\overline{m}_{k,k}, \overline{m}_{k,k+1}, \ldots, \overline{m}_{k,k+K_k-1}$,
3. zadanie wykorzystujące prognozowany rozkład przyszłych wartości wejść swobodnych lub prognozę kilkuwariantową i przewidywanie jednej (lub większej liczby) kolejnych interwencji.

W przypadku złożonego systemu występuje częstokroć potrzeba lub wręcz konieczność wprowadzenia kilku lub większej liczby jednostek decyzyjnych. Wówczas omówione powyżej podstawowe sposoby formułowania i następnie, realizacji rozwiązań, zadań wieloetapowej optymalizacji decyzji wplatają się w projekt zdecentralizowanej lub hierarchicznej struktury sterowania.

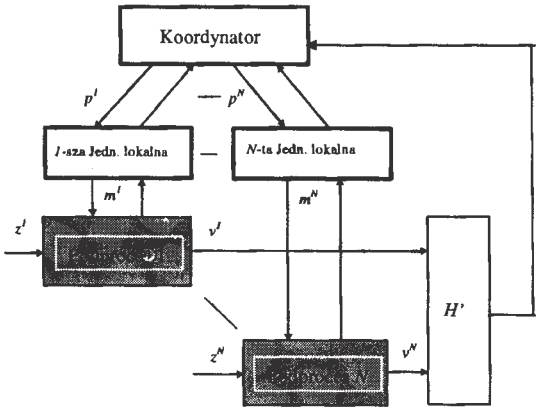
2.2. Struktura hierarchiczna z koordynacją periodyczną

W pierwszym interesującym nas w tym referacie przypadku, gdy złożony proces sterowany znajdujący się w gestii jednego decydenta nadrzędnego podlega podziałowi na N podprocesów wyposażonych w lokalne jednostki decyzyjne, naturalne staje się wprowadzenie - dla potrzeb optymalizacji decyzji sterujących - hierarchicznej struktury obejmującej lokalne jednostki decyzyjne oraz jednostkę koordynującą. Struktura taka przedstawiona na rys. 2. dotyczy sytuacji, w której powiązania pomiędzy podsystemami mają miejsce poprzez bezpośredni wpływ wyjść jednych podsystemów na wejścia innych. Na rys 3. przedstawiona jest z kolei struktura dwupoziomowa, w której łączny efekt działania – oceniany przez jednostkę nadrzędną - jest pochodną działań podejmowanych w poszczególnych podsystemach.

Kolejny ważny przypadek odpowiadający rys. 3 stanowi struktura, w której do troski o wspólny efekt działania jednostek lokalnych dochodzi potrzeba rozdziału wspólnie ograniczonego zasobu (zasobów), z którego korzystają poszczególni użytkownicy (jednostki lokalne).



Rys. 2. Hierarchiczna struktura dwupoziomowa; wzajemne powiązania interakcyjne pomiędzy podsystemami.



Rys. 3. Hierarchiczna struktura dwupoziomowa; wzajemne powiązania poprzez wspólną funkcję celu lub wspólne ograniczenia.

Najważniejsza z punktu widzenia praktycznych zastosowań jest struktura hierarchiczna wyposażona w mechanizm koordynacji periodycznej. W skrócie, działanie tej struktury jest następujące [21]:

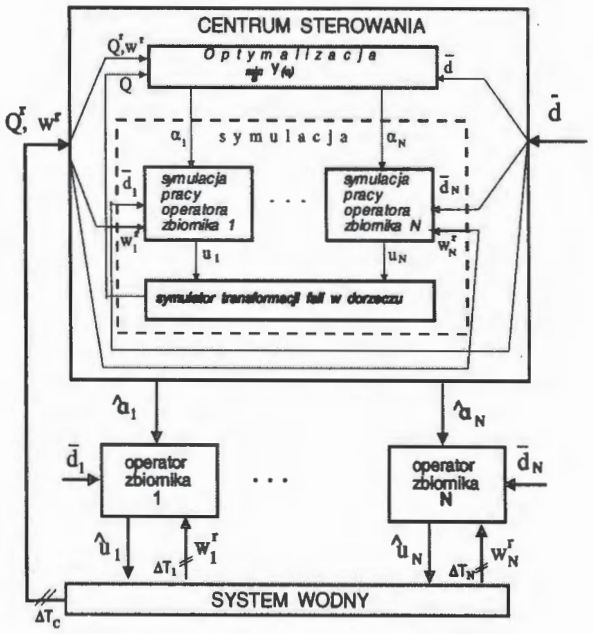
- Poziom dolny: lokalne jednostki decyzyjne wypracowują swoje decyzje m^i dotyczące poszczególnych podprocesów; działanie ich charakteryzuje duża częstość podejmowania decyzji. Możliwe jest zastosowanie na tym poziomie prostych reguł decyzyjnych - przestrajanych przy pomocy wielkości koordynujących p^i, i=1,...,N, wyznaczanych przez koordynatora. Inną możliwość stanowi sformułowanie rozwiązywanych szybko, w niewielkich odstępach, czasu lokalnych zadań optymalizacji decyzji z ograniczeniami narzucanymi przez koordynatora.
- Poziom górny: koordynator modyfikuje w odpowiednich chwilach lokalne mechanizmy decyzyjne w celu uzyskania pożądanych efektów w skali całego systemu – **koordynacja periodyczna** realizowana jest jako powtarzana optymalizacja decyzji dotyczących wartości wielkości koordynujących p^i ustalanych do następnej interwencji koordynatora. Wielkościami koordynującymi mogą być zarówno parametry lokalnych funkcji celu jak przydzielane podsystemom zasoby.

Warto w tym miejscu zadać pytanie o to, jakie względy mogą skłaniać do budowy struktur hierarchicznych – w szczególności z koordynacją periodyczną – w sytuacji, w której można wprowadzić jedną centralną jednostkę decyzyjną i, przynajmniej teoretycznie, powierzyć jej wszystkie decyzje związane z rozpatrywanym zakresem działań. Trzeba podkreślić, że stale rosnące możliwości zarówno sprzętu obliczeniowego jak i sieci komunikacyjnych pozwalają tworzyć coraz bardziej rozbudowane, niezawodne i szybko działające systemy sterowania. Wydaje się, że w coraz większym stopniu podstawowe uzasadnienie dla tworzenia struktur hierarchicznych stanowi czynnik, który i w przeszłości miał decydujący wpływ na rozwój sterowania i zarządzania hierarchicznego, a mianowicie czynnik ludzki. Jeżeli na poziomie podsystemów działają, w trybie decyzyjnym bądź nawet tylko w trybie nadzoru nad funkcjonowaniem lokalnych mechanizmów decyzyjnych, ludzie, to struktura hierarchiczna lub zdecentralizowana staje się koniecznością. W takim przypadku pojawiają się nieuchronnie opóźnienia decyzyjne towarzyszące podejmowaniu lub akceptacji decyzji przez operatorów (kierowników instalacji, dowódców jednostek, itp.), tym większe im bardziej skomplikowana jest natura procesu decyzyjnego. Wydaje się, że stale podstawowym uzasadnieniem i przesłanką do budowy struktury hierarchicznej z koordynacją periodyczną [21] jest potrzeba wprowadzenia przejrzystych mechanizmów decyzyjnych na szczeblu lokalnym, wymagających małych, możliwie pomijalnych, opóźnień decyzyjnych na tym szczeblu oraz – jeśli to konieczne - wprowadzenia nadrzędnego mechanizmu decyzyjnego zapewniającego w wystarczającym stopniu współpracę pomiędzy jednostkami lokalnymi.

2.3. Przykład układu z koordynacja periodyczną: sterowanie falą powodziową

Zagadnienie sterowania zbiornikami podczas powodzi wywołanej nawalnymi opadami stanowi jeden z najważniejszych elementów działań przeciwpowodziowych [20] i wymaga stosowania odpowiednich mechanizmów decyzyjnych, uwzględniających dużą niepewność związaną z wartościami przyszłych dopływów - uzależnionych od przyszłych opadów atmosferycznych. Wieloletnie prace i rozległe eksperymenty komputerowe związane z tworzeniem i badaniem scentralizowanych, zdecentralizowanych oraz hierarchicznych struktur sterowania fala powodziową dla zbiorników dorzecza Górnej Wisły pozwoliły wykazać [25], że możliwości oferowane przez układy z powtarzaną optymalizacją decyzji zdecydowanie przewyższają osiągi tradycyjnych mechanizmów decyzyjnych w postaci stałych reguł operatorskich. W przypadku pojedynczego zbiornika działanie mechanizmu z optymalizacją decyzji sterujących polega na powtarzaniu czynności planowania programu zrzutów ze zbiornika na podstawie jedno lub wielowariantowej prognozy dopływu - w taki sposób, aby minimalizować wartość kulminacji zrzutu w czasie trwania powodzi.

W przypadku systemu zbiorników znajdujących się na dopływach do rzeki głównej najlepsze efekty zostały uzyskane przy zastosowaniu struktury hierarchicznej z koordynacją periodyczną. W strukturze tej, przedstawionej na rys. 4 (odpowiadającej ogólnemu przypadkowi układu z rys. 3), funkcje celu jednostek lokalnych przestrajane są przez koordynatora w określonych odstępach czasu, np., co trzy lub sześć godzin, w taki sposób by premiować odpowiednie przesunięcie planowanej kulminacji zrzutu wody ze zbiorników. Jednostki lokalne, operatorzy zbiorników, planują w krótkich odstępach czasu zrzuty wody na podstawie aktualnych prognoz dopływów. Ich zadaniem jest minimalizacja kulminacji zrzutu – z uwzględnieniem wag przypisywanych w czasie do tej kulminacji zgodnie z wytycznymi koordynatora. Cel koordynatora stanowi minimalizacja strat w całym dorzeczu; straty te koordynator ocenia na podstawie przewidywanych zrzutów ze zbiorników i symulowanego przejścia fali przez system koryt rzecznych. Oznacza to, ze mechanizm decyzyjny koordynatora wymaga dokonywania wielokrotnej symulacji zarówno działania operatorów zbiorników jak i obliczenia przepływów w korytach. Mechanizm ten jest skomplikowany i wymagający obliczeniowo; trzeba jednak zauważyć, że – zgodnie z ogólnymi zaleceniami dotyczącymi budowy układów z koordynacją periodyczną [21] – ważne jest, by procedury decyzyjne jednostek lokalnych były szybkie, zaś opóźnienia decyzyjne na poziomie koordynatora odgrywają mniejszą rolę [24]. Warto także zauważyć, że mechanizm decyzyjny na poziomie koordynatora może w ogóle nie podlegać aktywacji i byc uruchamiany tylko w razie wystąpienia odpowiedniej potrzeby (tzw. zarządzanie w drodze wyjątku, ang. *management by exception*); jest to ważna z praktycznego punktu widzenia własność struktury.

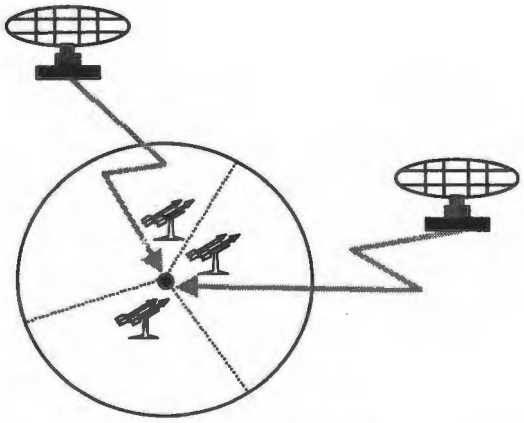


Rys. 4. Struktura sterowania falą powodziową z koordynacją periodyczną

2.4. Przykład układu z koordynacja periodyczną: sterowanie obroną przeciwrakietową

Przedstawiony w szczegółach w towarzyszącym referacie [2], także, w wersji wcześniejszej, w artykule Arabasa i Malinowskiego [2], układ hierarchicznego sterowania obrona przeciwrakietową dotyczy przedstawionego na rys. 5 systemu z podziałem na sektory obrony, odpowiedzialne za zwalczanie przydzielonych im celów (zadań) przy pomocy dysponowanych zasobów broni. Cały układ odpowiedzialny jest za obronę celu skupionego (lotniska, ważnej bazy lub zakładu przemysłowego) i składa się z kilku sektorów obrony dowodzonych przez lokalnych dowódców sektorów. Każdy z nich odpowiada za powierzony mu sektor i dysponuje przydzielonymi przez centralny ośrodek dowodzenia (koordynatora) jednostkami broni. Warto zauważyć, że rozmiary, zakres sektora, mogą być także zmieniane przez koordynatora. Dowódca sektora podejmuje, z wymagana częstością, decyzje dotyczące strzelania do zaobserwowanych w danym sektorze celów. Zarówno dowódcy sektorów jak i koordynator dążą do minimalizacji liczby pocisków przeciwnika, które nie zostaną zniszczone przed trafieniem w broniony obiekt.

W takiej strukturze decyzje podejmowane przez koordynatora wymagają oceny przyszłych możliwych wydarzeń w obrębie sektorów, w szczególności obliczania różnych możliwych decyzji dowódców sektorów. Zaproponowane i zbadane mechanizmy decyzyjne sektorów reprezentują duży zakres możliwych reguł decyzyjnych, począwszy od reguł wyznaczanych z wykorzystaniem stochastycznego programowania dynamicznego do prostszych zadań wykorzystujących uproszczone funkcje strat i liniowe modele opisujące procesy niszczenia celów. Niepewność dotycząca przyszłych zamiarów przeciwnika reprezentowana jest przez wielowariantowe prognozy nalotu.



Rys. 5. Wielosektorowy system obrony przeciwrakietowej celu skupionego.

Dla potrzeb efektywnej koordynacji zaproponowane zostały i zbadane algorytmy decyzyjne o różnym stopniu złożoności. Interwencje koordynatora mogą także mieć miejsce w różnych fazach obrony i następować z różną częstością. Zbadane zostały warianty z jednokrotną koordynacją, w początkowej fazie ataku, z koordynacja powtarzaną w sposób regularny oraz z koordynacją „na żądanie", w sytuacji, gdy zaobserwowane zostały istotne zmiany planu ataku w stosunku do prognozy pierwotnej. Eksperymenty symulacyjne potwierdziły celowość stosowania powtarzanej koordynacji i, ogólniej, dobre potencjalne możliwości zaproponowanego hierarchicznego systemu obrony.

Przedstawione przykłady ukazują możliwości koordynacji działania podsystemów wyposażonych w lokalne jednostki decyzyjne w sytuacji, gdy możliwe jest wprowadzenie centralnej jednostki koordynującej i wyposażenie jej w odpowiednie kompetencje decyzyjne. Badanie własności i dostrajanie układów z koordynacją periodyczną jest pracochłonne, wymaga przeprowadzenia rozbudowanych eksperymentów komputerowych.

Trudniejszy od opisanych powyżej przypadków koordynacji podsystemów powiązanych poprzez funkcje celu oraz/lub zasoby jest przypadek, w którym powiązania mają charakter połączeń sztywnych. Narzucanie wartości tych połączeń poprzez jednostkę centralną (koordynacja przy pomocy instrumentów bezpośrednich) może nie być wówczas możliwe, zaś inne sposoby koordynacji mogą, szczególnie w warunkach niepewności [21] także okazać się nieodpowiednie - jeśli jednostka centralna nie zdecyduje się na pełne przejęcie całej odpowiedzialności za sterowanie całością i wyłączenie działań jednostek lokalnych. To jednak, z kolei, prowadzi, na ogół, do znacznych opóźnień w podejmowaniu decyzji i do przeciążenia centralnego decydenta.

3. ROZPROSZONA KOORDYNACJA ITERACYJNA NIEZALEŻNYCH PODSYSTEMÓW

W przypadku, gdy podsystemy stanowią byty autonomiczne, niepodlegające jakiejkolwiek jednostce nadrzędnej, mamy do czynienia z sytuacją jakościowo inną; pytania, które wówczas się pojawiają dotyczą szeregu ważnych kwestii, w szczególności różnych sposobów zapewnienia współpracy takich systemów. Wchodzimy w tym miejscu w obszar zagadnień, którymi interesuje się teoria gier, zarówno kooperacyjnych jak i niekooperacyjnych; ostatnio zagadnienia współpracy jednostek (systemów) autonomicznych są rozpatrywane również w kontekście tzw. gier behawioralnych [4], w tym przy wykorzystaniu podejścia polegającego na osiąganiu ewoluujących w kolejnych etapach poziomów aspiracji jednostek lokalnych [14, 27]. Pełne możliwości zastosowania tych różnorakich koncepcji do zdecentralizowanego sterowania złożonym systemem, zapewniającego jednocześnie zadawalającą współpracę niezależnych aczkolwiek wzajemnie powiązanych elementów tego systemu, nie są jeszcze – pomimo znacznych postępów, w pełni zbadane. Warto jednakże zwrócić uwagę na to, że od dawna znany i wykorzystywany mechanizm iteracyjnej koordynacji przy pomocy zmiennych dualnych (cen) może funkcjonować w sposób w istocie zdecentralizowany w celu rozproszonej koordynacji w środowisku oddziałujących na siebie niezależnie sterowanych podsystemów. Ważne i ciekawe możliwe zastosowania rozproszonych mechanizmów cenowych pojawiły się i w ostatnich latach w zastosowaniu do sterowania sieciami danych, w szczególności transmisją danych w sieci Internet.

3.1. Sterowanie siecią; mechanizmy cenowe

W wielu zaproponowanych w ostatnich latach metodach sterowania szybkością transmisja w sieci danych [15, 17, 16, 23], możemy przedstawić sieć jako zbiór S o liczności n niezależnych źródeł ruchu, reprezentujących w istocie wyróżnione relacje typu nadawca-odbiorca oraz zbiór połączeń L, o liczności m; połączenia te mogą wchodzić w skład systemów autonomicznych należących i pozostających w gestii różnych operatorów. Poszczególne połączenia, wraz z wchodzącymi w ich skład urządzeniami (ruterami) stanowią zasoby sieciowe o ograniczonej (aczkolwiek w miarę upływu czasu szybko rosnącej) przepustowości c_l. Wartości c_l można wyrażać w różnych jednostkach, odpowiadających możliwościom transmisji w warunkach stosowania danego protokołu komunikacyjnego, pojemności buforów i zdolności do multipleksowania danych; w szczególności można c_l wyrazić w jednostkach pasma efektywnego lub w liczbie standardowych pakietów danych przesyłanych np. w czasie jednej sekundy. Każde źródło przesyła swój ruch wykorzystując zbiór połączeń $L(i) \subseteq L$. Zbiory $L(i)$ definiują macierz rutingu R (o wymiarach $m \times n$), zakładamy w tym miejscu stały ruting; zastosowanie metod cenowych wraz ze zmiennym rutingiem stanowi ważny przedmiot badań, pominięty jednak w niniejszym referacie Jaskóły i Malinowskiego [11, 12]. Element R_{li} macierzy R jest równy 1, jeśli $l \in L(i)$, w przeciwnym przypadku jest równy 0. Każde źródło i nadaje w okresie t, z intensywnością $x_i(t)$ (wyrażaną w tych samych jednostkach, w jakich określamy c_l); zestaw szybkości transmisji źródeł determinuje strumienie danych przepływające przez poszczególne łącza, zgodnie z zależnością (Low i in. 2002):

$$y_l(t) = \sum_i R_{li} x_i(t - \tau_{li}^f),$$

gdzie τ^{f}_{li} oznacza opóźnienie na drodze od źródła i do łącza l. Następnie mechanizm sprzężenia zwrotnego przekazuje do źródeł informacje o stopniu obciążenia (przeciążenia) łączy. Ta informacja ma postać nieujemnej „ceny" $p_l(t)$ związanej z łączem l. Podstawowe założenie polega na tym, że źródło ma dostęp do zagregowanej ceny związanej z wykorzystywanym przez daną transmisję zestawem łączy:

$$q_i(t) = \sum_l R_{li} p_l(t - \tau^b_{li})$$

Uwzględniamy w tym miejscu opóźnienia informacyjne τ^b_{li}.

3.2. Protokół TCP, interpretacja nawiązująca do optymalizacji

Powyższy opis ruchu zawiera (Low i in. 2002) mechanizmy obecne w szeregu istniejących obecnie wariantach protokołów komunikacyjnych, z różną interpretacją „cen" w tych protokołach (np. prawdopodobieństwem utraty pakietów w TCP Reno i oceną opóźnienia wnoszonego przez kolejkowanie w TCP Vegas). W celu zdefiniowania mechanizmu sterowania przepływem danych pozostaje określić sposób, w jaki źródła zmieniają szybkości transmisji w zależności od zagregowanych cen (uogólniony algorytm TCP), a także określić, w jaki sposób zmieniane są wartości cen (w ramach zarządzania działaniem ruterów; uogólniony AQM (Active Queue Management) algorytm. Low i in. (2002) proponują następujące sterowniki dynamiczne:

na poziomie źródła:

$$d/dt(z_i) = F_i(z_i,q_i),\ x_i = G_i(z_i,q_i)$$

na poziomie łącza:

$$d/dt(w_l) = H_l(y_l,w_l),\ \ p_l = K_l(y_l,w_l),$$

gdzie podstawową rolę odgrywa fakt, że te prawa sterowania muszą być rozproszone. Wielkości z_i i w_l reprezentują, odpowiednio, stany źródeł i łącz.

Rozpatrując sieć w stanie ustalonym możemy przyjąć, że powyższe zależności określają w ustalone wartości x^*, y^*, p^*, q^*, przy czym zachodzą oczywiste relacje: $y^* = R\,q^*$ oraz $q^* = R^T p^*$. W stanie równowagi możemy także przyjąć, że szybkości transmisji źródeł kształtują się w funkcji sygnałów cenowych, tj.: $x_i^* = f_i(q_i^*)$, gdzie $f_i(\cdot)$ jest dodatnią, malejącą, funkcją. To założenie pozwala traktować działanie źródła w stanie ustalonym jako wynik optymalizacji. Mianowicie, jeżeli wprowadzimy lokalną funkcję użyteczności źródła $U_i(x_i)$, to możemy określić tę funkcję jako, w odpowiednich granicach, całkę z $f_i^{-1}(x_i)$; inaczej rzecz ujmując $U_i'(x_i) = f_i^{-1}(x_i)$. Oznacza to, że szybkość nadawania x_i^* stanowi jakby rozwiązanie następującego zadania lokalnego:

$$\max_{x\ge 0} [U_i(x_i) - q_i^* x_i]$$

To zadanie ma oczywistą interpretacje ekonomiczną – w stanie równowagi każde źródło maksymalizuje swoją użyteczność pomniejszoną o wyrażoną w jednostkach tej użyteczności "opłatę" za transfer danych. Ważne jest, aby pamiętać o tym, że taką "optymalizacyjną" interpretację można przyjąć dla dowolnego rozsądnego protokołu kontroli przepływu danych.

Rola cen p (oraz $q = R^T p$) w stanie ustalonym polega na koordynacji działań źródeł; w istocie polega na tym, by zapewnić, że rozwiązania powyższych zadań lokalnych stanowią łącznie rozwiązanie następującego zadania optymalizacji przepływów danych w sieci:

$$\max_{x\ge 0} \sum_i U_i(x_i)$$

gdzie $Rx \le c,\ c^T = (c_1,...,c_L)$.

Łatwo zauważyć, że powyższe zadanie stanowi szczególny przypadek złożonego zadania optymalizacji (Findeisen et al. 1980), mianowicie zadania ze wspólnym ograniczeniem zasobów.

Należy podkreślić, że zadanie to odpowiada, w ogólnym przypadku, jedynie "optymalizacyjnej" interpretacji osiągania stanu ustalonego w sieci dzięki zastosowaniu odpowiedniego stabilnego protokołu sterującego przepływem danych. Nie oznacza to, że użytkownicy sieci (źródła ruchu) muszą uświadamiać sobie swoje funkcje użyteczności lub wykazywać chęć maksymalizacji tych funkcji płacąc za wykorzystanie łączy. Szybkości transmisji x_i określane są w istocie przez odpowiednie mechanizmy sieciowe, takie jak TCP Reno lub TCP Vegas, lub inne. Jednakże, to „optymalizacyjne" ujęcie pokazuje, że lokalna optymalizacja decyzji, w połączeniu z rozproszoną koordynacją przy pomocy instrumentów cenowych może pozwolić na lepsze zrozumienie działania sieci. W szczególności, Low i in.[18, 19] podają odpowiednie „funkcje użyteczności" dla szeregu protokołów komunikacyjnych.

3.3. Źródła świadome funkcji użyteczności; koordynacja iteracyjna przy pomocy instrumentów cenowych.

Przypuśćmy teraz, że źródła ruchu (a właściwie podmioty reprezentujące relacje źródło-odbiorca) są w istocie zorientowane na maksymalizację użyteczności i są świadome swoich funkcji celu $U_i(x_i)$. W takiej sytuacji można – przynajmniej w teorii – zaproponować następujący algorytm sterowania ruchem, nazwijmy go CCS-1:

Dla danych cen łączy $p_l(k)$, $l = 1,...,L$, w okresie k, źródła rozwiązują swoje zadania

$$\max_{x_i\in I_i} [U_i(x_i) - q_i(k)x_i],\ \text{gdzie} q_i(k) = \sum_{l\in L(i)} p_l(k)$$

oraz $L(i)$ jest zbiorem połączeń wykorzystywanych przez i-te źródło (relację źródło-odbiorca), zaś $I_i = [x_{i,min}, x_{i,max}]$ określa zakres szybkości, którym dane źródło jest zainteresowane. Rozwiązania $x_i^*(k) = x_i(q_i(k))$ sygnalizowane są angażowanym przez daną relację połączeniom, które dostosowują swoje ceny, na potrzeby kolejnej iteracji k+1, zgodnie z następującym prostym, typowym dla koordynacji iteracyjnej, algorytmem gradientowym z projekcją na ograniczenia znaku:

$$p_l^{(k+1)} = \{p_l^{(k)} + \gamma[\textstyle\sum_{i\in S(l)} x_i^*(k) - c_l]\}_+ \qquad \text{(CCS-1)}$$

gdzie $S(l)$ jest zbiorem źródeł nadających za pośrednictwem łącza l, zaś γ jest dodatnim współczynnikiem kroku, wybranym w taki sposób, by zapewnić zbieżność algorytmu. Następnie nowe ceny sygnalizowane są, w odpowiedni sposób, źródłom, itd.

Law i Lapsley [7] analizowali szczegółowo działanie tego algorytmu. Warto zauważyć, że jest to w istocie prosta rozproszona wersja iteracyjnej koordynacji stanu ustalonego złożonego systemu, nawiązująca do mechanizmów równowagi konkurencyjnej [7]. Warto zauważyć, że jeśli źródła rzeczywiście nadają w etapie k z szybkością $x_i^*(k)$, a nie jedynie sygnalizują taki zamiar, to wówczas rutery związane z przeciążonymi łączami buforują, a w ostateczności gubią pakiety przeznaczone do przesłania przez te łącza.

W artykule Malinowskiego [23] została przedstawiona propozycja modyfikacji powyższego klasycznego schematu. W tej zmodyfikowanej wersji (CCS-2) źródła określają szybkości jak w CCS-1 (rozwiązując zadania lokalne); po wyznaczeniu wartości $x_i^*(k)$ na początku etapu k, ruch jest przesyłany w sieci i rutery monitorują aktualne rzeczywiste przepływy $y_l^r(k)$. Ceny związane z łączami są zmieniane, na kolejny etap, zgodnie z następującym algorytmem (rozproszona koordynacja cenowa ze sprzężeniem od systemu rzeczywistego nawiązująca do metody IBMF [8]:

$$p_l^{(k+1)} = \{p_l^{(k)} + \gamma[\, y_l^r(k) - c_l^*\,]\}_+ , \qquad \text{(CCS_2)}$$

gdzie c_l^* jest wybrane jako wartość mniejsza od faktycznej pełnej pojemności łącza c_l.

Oznacza to, że celem algorytmu CCS-2 jest spełnienie w stanie ustalonym zmodyfikowanych ograniczeń

$$\sum_{l \in S(l)} x_i^*(k) \le c_l^*$$

Pojemność rezerwowa (*headroom*) $h_l = c_l - c_l^*$ jest pozostawiona do przenoszenia nieprzewidywalnych powiększonych wartości ruchu (*traffic bursts*) oraz może być wykorzystana do wczesnego ostrzegania o przeciążeniach poprzez znakowanie pakietów (znakowanie może służyć także do sygnalizowania nowych wartości cen, a właściwie do sygnalizowania podwyżek lub obniżek tych cen). W mechanizmie CCS-2 nie występuje potrzeba, aby źródła sygnalizowały leżącym na ich trasie łączom zamiaru nadawania z zamierzoną szybkością $x_i^*(k)$. Jest to ważna własność, gdyż w praktyce może występować wiele źródeł wykorzystujących jednocześnie dane łącze. Nowe, aktualne, ceny $p_l^{(k+1)}$ muszą być, oczywiście w tym przypadku przesyłane tak samo jak w przypadku CCS-1 do zainteresowanych źródeł.

Warto zauważyć, że poza przedstawionymi powyżej, a także innymi propozycjami mechanizmów koordynacji przy pomocy instrumentów cenowych (zob. np. [7]) powstały również propozycje algorytmów sterowania przepływem w sieci, w których źródła mogą określać swoją ofertę cenową, tj. cenę proponowana za przesłanie jednostki danych; wówczas działanie protokołu sterującego powoduje przydział zasobów i ustalenie przepływów na poziomie odpowiadającym odpowiednio określonego sprawiedliwemu podziałowi tych zasobów (np. z wagami odpowiadającymi wnoszonym opłatom). W szczególności ciekawe algorytmy tego rodzaju zaproponowali Kelly i in. [15] oraz La i Anantharam [16].

Literatura przedmiotu wzbogaca się stale o różne propozycje mechanizmów sterowania przy pomocy koordynacji iteracyjnej, w tym koordynacji dla potrzeb sieci komunikacyjnych.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w tym referacie przesłanki stosowania struktur sterowania z użyciem koordynacji periodycznej i koordynacji iteracyjnej, a szczególnie omówione przykłady takich struktur, możliwe do zastosowania zarówno w przypadku wprowadzenia nadrzędnej jednostki koordynującej (koordynacja periodyczna) jak i w przypadku stosowania mechanizmów rozproszonych przy braku takiej jednostki (rozproszona koordynacja iteracyjna) potwierdzają możliwości sterowania hierarchicznego.

Trzeba jednakże pamiętać, że wprowadzenie układu sterowania wyposażonego w hierarchiczny lub zdecentralizowany mechanizm decyzyjny może zostać uwieńczone sukcesem pod warunkiem starannego rozważenia i rozwiązania kluczowych zagadnień. Należą do nich:

- Dobre sformułowanie zadań optymalizacji decyzji,
- Przygotowanie i sprawdzenie metod obliczeniowych służących do wyznaczania rozwiązań w czasie rzeczywistym,
- Przeprowadzenie, tam gdzie to możliwe, teoretycznej analizy działania poszczególnych elementów oraz wybranych aspektów całości systemu sterowania,
- Wykonanie eksperymentu symulacyjnego, weryfikacja działania poszczególnych części składowych oraz całości systemu sterowania, strojenie mechanizmów prognostycznych i decyzyjnych.

Wobec dużej złożoności systemu sterowania (zarządzania) z powtarzaną optymalizacją decyzji, teoretyczna analiza własności takiego systemu, zwłaszcza najważniejszych z praktycznego punktu widzenia własności ilościowych, możliwa jest, niestety, jedynie w odniesieniu do niektórych elementów i wybranych aspektów działania tego systemu. Jako przykład mogą służyć: badanie warunków zbieżności użytej metody obliczeniowej, analiza stabilności systemu sterowania, oszacowania możliwych do uzyskania wartości wskaźnika jakości.

Na ogół uzyskanie wyników teoretycznych wymaga wprowadzenia uproszczeń, częstokroć uproszczeń daleko idących [21]. Niemniej jednak wyniki analizy teoretycznej mogą mieć bardzo ważne znaczenie dla zrozumienia działania systemu sterowania i jego własności. Analiza taka stanowi ważny etap w badaniu proponowanych rozwiązań; jej oczywistą zaletą w porównaniu z eksperymentem rzeczywistym lub symulacyjnym stanowi uniwersalność względem danych; wyniki analizy teoretycznej nie są związane z konkretnymi wartościami wejść swobodnych, decyzji itp., co zawsze musi mieć miejsce w przypadku eksperymentu numerycznego.

Cel eksperymentu symulacyjnego, wspomaganego komputerem, stanowi strojenie mechanizmów prognostycznych i decyzyjnych, weryfikacja działania poszczególnych części składowych układu sterowania a przede wszystkim sprawdzenie działania całości systemu sterowania. Należy podkreślić specjalne, kluczowe

znaczenie eksperymentu symulacyjnego w budowie i badaniu systemów sterowania, a szczególnie sterowania hierarchicznego, z powtarzaną optymalizacją decyzji; zagadnieniom związanym z takim eksperymentem poświęcono wiele uwagi i pracy [26]; nadal intensywnie rozwijana jest metodyka i oprogramowanie do eksperymentu symulacyjnego.

COOPERATION OF SUBSYSTEMS: PERIODIC AND ITERATIVE COORDINATION

Abstract: Control of complex systems, consisting of a number of interconnected or otherwise interacting subsystems, requires decentralized or hierarchical structures and decision mechanisms. The examples of such dynamic complex systems, with multiple decision or supervising units, are: flood management in a multiple reservoir system, missile defense of an important object, large scale communication network. The paper presents those example systems endowed with hierarchical control mechanisms and concentrates on the use of periodic or iterative coordination.

Literatura

[1] Arabas P., Malinowski K. (2001) Periodic coordination in hierarchical air defense system. *Int. J. App. Mathematics and Computer Science*, **11**, 2, 493-513.

[2] Arabas P., Malinowski K. (2005) Hierarchiczny system obrony przeciwrakietowej – porównanie strategii koordynacji. *Mat. XV Krajowej Konferencji Automatyki*, Warszawa, czerwiec 2005.

[3] Bertsekas D.P. (1987) *Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

[4] Camerer C.F. (2003) *Behavioral Game Theory*, Princeton University Press.

[5] Camacho E.F., Bordons C. (1995) *Model Predictive Control in the Process Industry*. Springer, Londyn.

[6] Cellier F.E. (1991). *Continuous Process Modeling*. Springer, New York.

[7] Courcoubetis C., Weber R. (2003) Pricing Communication Networks, Economics, Technology and Modelling, Wiley and Sons.

[8] Findeisen W., Bailey F.N., Brdyś M., Malinowski K., Tatjewski P., Woźniak A. (1980) *Control and Coordination in Hierarchical Systems*. J. Wiley, London.

[9] Findeisen W. (1974) *Wielopoziomowe układy sterowania*. PWN, Warszawa.

[10] Findeisen W. (1997) *Struktury sterowania dla złożonych systemów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

[11] Jaskóła P., Malinowski K. (2002) „Shadow Price Routing Metric for MPLS Networks", *mat. konferencji MMAR 2002*, Szczecin, Polska, wrzesień 2002.

[12] Jaskóła P., Malinowski K. (2003) "Two Methods of Optimal Bandwidth Allocation in TCP/IP Networks with QoS Differentiation", *SCS Symposium on Performance Evaluation of Computers and Telecommunication Systems – SPECTS'04*, San Jose, lipiec 2003.

[13] Kapur J.N., Kesavan H.K. (1992) *Entropy Optimization Principles with Applications*. Academic Press, Boston.

[14] Karandikar R., Mookherjee D., Ray D., Vega-Redondo F. (1998). Evolving aspirations and cooperation. *Journal of Economic Theory*, **80**, 292-331.

[15] Kelly F.P., Maulloo A.K., Tan D.K.H. (1998) Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of Operations Research Society*, **49** (3), 237-252.

[16] La R.J., Anantharam V. (2002) Utility-Based Rate Control in the Internet for Elastic Traffic. *IEEE Trans. on Networking*, **10**, 2, 272-286.

[17] Low S., Lapsley D.E. (1999) Optimization flow control, I: basic algorithm and convergence. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **7** (6), 861-874.

[18] Low S.H., Paganini F., and J. C. Doyle (2002) Internet Congestion Control, *IEEE Control Systems Magazine*, February 2002, 28-43.

[19] Low S.H. (2003) A Duality Model of TCP and Queue Management Algorithms. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, **11**, **4**, 525-536.

[20] Malinowski K., Żelaziński J. (1990) Reservoir systems: Operational flood control. *Systems and Control Encyclopedia*, supplementary **1**, 495-503, Pergamon Press.

[21] Malinowski K. (1992) Practical Issues of Coordination in Control of Large-Scale Stochastic Systems. *Stochastic Large-Scale Engineering Systems* (red. S.G. Tzafestas, Watanabe, Marcel Dekker, 195-227.

[22] Malinowski K. (1999) Sterowanie i zarządzanie; nowa rzeczywistość, *mat. XIII Krajowej Konferencji Automatyki*, Opole, czerwiec 1999.

[23] Malinowski K. (2002) Optimization network flow control and price coordination with feedback: proposal of a new distributed algorithm. *Computer Communications*, **25**, 1028-1036.

[24] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Malinowski K. (1994) Decision and transmission delays in complex systems. *Archives of Control Sciences*.

[25] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Malinowski K., Karbowski A. (1996) Predictive methods for real-time control of flood operation of a multireservoir system: Methodology and comparative study. *Water Resources Research*, **32**, 9, 2885-2895.

[26] Niewiadomska-Szynkiewicz E. (2005) Symulacja komputerowa w analizie i projektowaniu złożonych systemów sterowania. *Elektronika*, 150, Oficyna Wydawnicza PW.

[27] Stimpson J.R., Goodrich M.A. (2003) Learning to cooperate in a social dilemma: Asatisfycing approach to bargaining. *International Conference on Machine Learning (ICML'03)*.

[28] Tatjewski P. (2002) *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. EXIT, Warszawa.

[29] Zimmermann H.J. (1996) *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-02-2