

## OPTIMALIZACJA DECYZJI W STEROWANIU

*Obserwując rozwój układów sterowania i zarządzania widoczne jest, że w coraz większej liczbie zastosowań wprowadzana jest - stosowana w czasie rzeczywistym - optymalizacja decyzji. Do przeprowadzania powtarzanej optymalizacji decyzji wykorzystywane są modele procesu bądź systemu sterowanego, prognozy wejść swobodnych, metody estymacji stanu i adaptacji modeli; wreszcie odpowiednie metody optymalizacji. Algorytm określający na bieżąco decyzje sterujące jest złożony, skomplikowany i wymagający intensywnych obliczeń przeprowadzanych w czasie rzeczywistym, zaś jego badanie i strojenie wymaga komputerowego eksperymentu symulacyjnego. Uzyskanie powodzenia w projektowaniu układu sterowania bądź zarządzania wyposażonego w taki algorytm zależne jest od wielu czynników; w tym od dobrego sformułowania zadania decyzyjnego, od dysponowania efektywną i niezawodną w działaniu metodą optymalizacji oraz od prawidłowego przeprowadzenia poprzedzających właściwe zastosowanie eksperymentów symulacyjnych.*

*Słowa kluczowe: sterowanie, zarządzanie, decyzje sterujące, prognoza, optymalizacja, symulacja komputerowa.*

## OPTIMIZATION OF ON-LINE CONTROL DECISIONS

*Development of control and management systems demonstrates that in a rapidly increasing number of applications one introduces mechanisms for on-line optimization of operative control decisions. In such control schemes appropriate models must be used, together with forecasts of free inputs, and effective optimization techniques are needed. On-line decision algorithm becomes much more complicated than in the past, in previous control applications; and this algorithm has to be tuned by performing computer simulation of operation of the control system. To achieve a successful implementation of such control system one must address several key issues concerning its development; some of those are discussed in this paper.*

*Keywords: control, management, control decision, forecast, optimization, computer simulation.*

### 1. WPROWADZENIE

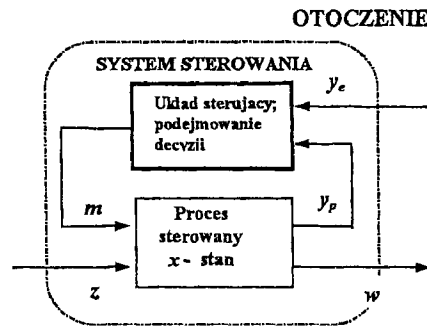
Potrzeba podejmowania powtarzanych w czasie możliwie najlepszych decyzji - decyzji operacyjnych, sterujących - występuje obecnie w licznych zastosowaniach. Obejmują one, dla przykładu: regulację złożonego obiektu przemysłowego, wystrzelenie w przestrzeń satelity przy pomocy rakiety wieloczołowej, przeprowadzenie przez system zbiorników i koryt rzecznych fali powodziowej, planowanie produkcji oddziały przedsiębiorstwa, obronę ważnego celu podczas ataku powietrznego, bieżące ustalanie opłat za ruch w sieci komputerowej, określanie cen detalicznych paliw i innych produktów, czy wreszcie wprowadzanie na rynek

nowego filmu. We wszystkich tych przypadkach mamy także do czynienia z wzrostem stale gromadzonej różnorodnej informacji oraz z coraz szybszym dostępem do tej informacji. Chcemy dobrze tę informację wykorzystywać i dysponujemy coraz lepszymi do tego celu środkami. W nowej rzeczywistości rewolucji informacyjnej zasadniczej zmianie ulega podstawowe założenie, które – mniej lub bardziej świadomie – dotychczas zwykle czyniono przy projektowaniu układów sterowania a także przy konstrukcji reguł decyzyjnych do celów operacyjnego sterowania i zarządzania. Przyjmowano mianowicie, że prawo sterowania czy też reguła decyzyjna powinny być proste, podobne do regulatora PI lub PID, bądź wzorowane na prostej sztucznej sieci neuronowej. Tymczasem obecnie istnieją zarówno wszelkie warunki jak i potrzeby, a często wręcz konieczność, po temu, by operacyjne decyzje dotyczące sterowania instalacją przemysłową, wystrzelenia rakiety, prowadzenia czynnej akcji przeciwpowodziowej, obrony przeciwlotniczej, wprowadzania nowych produktów na rynek, zarządzania produkcją średniego lub dużego przedsiębiorstwa, zarządzania przychodem tego przedsiębiorstwa, itp., były podejmowane przy użyciu zaawansowanych technik obliczeniowych, wykorzystujących bieżącą identyfikację modeli i ich parametrów, prognozowanie wejść swobodnych, symulację i optymalizację. Tworzenie takich systemów sterowania lub zarządzania (także systemów dowodzenia) wymaga nowego, zintegrowanego, podejścia do projektowania, budowy i testowania tych systemów. Wymaga obejmowania analizą coraz liczniejszych aspektów działania będących przedmiotem naszego zainteresowania obiektów i procesów; może prowadzić do tworzenia rozbudowanych hierarchicznych układów sterowania. Kolejne wyzwania nowa rzeczywistość stawia pod adresem analizy i eksperymentu mających udzielić odpowiedzi na wiele pytań dotyczących proponowanych mechanizmów decyzyjnych oraz poczynić mających prowadzić do ulepszenia tych mechanizmów jeszcze przed ich właściwym zastosowaniem. Coraz większą rolę, obok wciąż potrzebnej lecz w nowych warunkach mniej wydolnej analizy teoretycznej, odgrywa eksperyment komputerowy, a szczególnie symulacja działania całości układu sterowania bądź zarządzania.

Przedstawione powyżej zagadnienia i pytania były przedmiotem rozważań w pracach [12,13]. W niniejszym referacie, po skrótowym powtórzeniu najważniejszych pojęć i kwestii, kierujemy większą uwagę na przykłady zadań i mechanizmów optymalizacji bieżącej w kilku zastosowaniach.

## 2. POWTARZANA OPTYMALIZACJA DECYZJI

Rozważmy system sterowania przedstawiony na rys. 1. Będący przedmiotem naszego zainteresowania proces sterowany (lub zarządzany) podlega umyślnym oddziaływaniom  $m$  ze strony decydenta bądź układu sterowania oraz oddziaływaniom poprzez niezależne od decydenta wejścia swobodne  $z$ . Zainteresowania, cele sterowania, dotyczą odpowiednich efektów prowadzenia procesu wyrażanych poprzez jego wielkości wyjściowe  $w$ . 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  $y_e$ , tworzących łącznie wektor pomiarów  $y$  pozwala na gromadzenie informacji  $I$ , wykorzystywanej w podejmowaniu decyzji.



Rys. 1. System sterowania;  $m$  - decyzje sterujące,  $z$  - wejścia swobodne,  $w$  - istotne efekty prowadzenia procesu,  $y_p$  - wielkości mierzone procesowe,  $y_e$  - wielkości mierzone dot. Zachowania się otoczenia.

### 2.1. Zadanie powtarzanej optymalizacji

Jak już zostało powiedziane we wprowadzeniu, 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.

Mechanizm decyzyjny z wykorzystaniem optymalizacji można formułować na różne sposoby. Na przykład, operując czasem dyskretnym, z podziałem przedziału sterowania na etapy pomiędzy poszczególnymi chwilami, mechanizm ten można określić następująco:

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

Podstawowy mechanizm decyzyjny opisanego powyżej typu - Podstawowy Sterownik Predykcyjny (PSP) - obejmuje zadanie optymalizacji ciągu sterowań, sformułowane jako zadanie optymalizacji w układzie otwartym i wykorzystujące pojedynczą prognozę wejść swobodnych. Algorytm decyzyjny PSP określony jest dla kolejnych chwil  $k, k=0, \dots, K-1$ , poprzez następujące czynności:

1. Wykorzystując aktualnie dostępną informację  $I_k$  odnośnie zachowania się procesu oraz wejść swobodnych do chwili  $k$  wyznaczyć *estymowaną* wartość  $\bar{x}_k$  stanu procesu  $x_k$  w tej chwili oraz *prognozę* wejść swobodnych w postaci pojedynczej trajektorii przewidywanych przyszłych wartości tych wejść  $\bar{z}_k^{k, k+L_k-1} = \{\bar{z}_{k,k}, \bar{z}_{k,k+1}, \dots, \bar{z}_{k,k+L_k-1}\}$ , gdzie  $\bar{z}_{k,j}$  oznacza wartość  $z_j$  - prognozowaną w chwili  $k, k \leq j$ .

2. Rozwiąż deterministyczne, oparte na prognozie, deterministyczne zadanie optymalizacji sterowań:

DZOS<sub>k</sub>: wyznacz ciąg wartości decyzji (sterowań)  $\bar{m}_{k,k}, \bar{m}_{k,k+1}, \dots, \bar{m}_{k,k+K_k-1}$ , taki że

$$\bar{m}_{k,k}, \bar{m}_{k,k+1}, \dots, \bar{m}_{k,k+K_k-1} = \arg \min_{m_k, m_{k+1}, \dots, m_{k+K_k-1}} [G_{k+K_k}(x_{k+K_k}) + \sum_{j=k}^{k+K_k-1} W_j(x_j, m_j, \bar{z}_{k,j})]$$

gdzie  $x_{j+1} = f_j(x_j, m_j, \bar{z}_{k,j})$ ,  $x_k = \bar{x}_k$  oraz  $m_j \in M_j, j = k, \dots, k+K_k-1$ ;

stan końcowy  $x_{k+K_k}$  jest swobodny lub zadany.

3. Zastosuj sterowanie  $m_k = \bar{m}_{k,k}$  podczas etapu  $k$  i poczekaj do końca tego etapu, to jest do chwili  $k+1$ , kiedy to czynności 1,2,3 zostaną powtórzone.

W powyższym schemacie optymalizacja przeprowadzana w kroku 2 wykorzystuje jedynie model samego procesu, dany funkcją przejścia stanu  $f_i(\dots)$ . Prognozowanie przyszłego przebiegu wejść swobodnych może być oparte o użycie jakiegokolwiek dostępnego modelu tych wejść. W powyższym sformułowaniu przyjęto jako typowy przykład addytywną funkcję celu o wartościach rzeczywistych, będącą sumą kosztów etapowych i podlegającą minimalizacji. Możliwe są oczywiście inne sformułowania zarówno funkcji celu - w szczególności także w postaci kryterium wektorowego - jak i bogatsza struktura ograniczeń.

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

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

W wielu sytuacjach zadanie DZOS<sub>k</sub> może przyjmować postać zadania statycznego, jednoetapowego. Są to przypadki ważne, szczególnie dlatego, że sformułowanie a także rozwiązanie zadań optymalizacji statycznej w zastosowaniach w czasie rzeczywistym jest łatwiejsze, z praktycznego punktu widzenia częstokroć jedynie możliwe. Warto przy tym zauważyć, że w różnych ważnych zastosowaniach możemy pozwolić sobie na wprowadzenie zadania statycznego dzięki nałożeniu odpowiednich ograniczeń na wartości zmiennych decyzyjnych oraz na inne wielkości. Przypadek jednoetapowej wersji zadania DZOS<sub>k</sub>, z dodatkowym ograniczeniem dotyczącym przyszłej wartości stanu, można zapisać w następujący sposób:

$$\bar{m}_{k,k} = \arg \min_{m_k} W_k(\bar{x}_k, m_k, \bar{z}_{k,k})$$

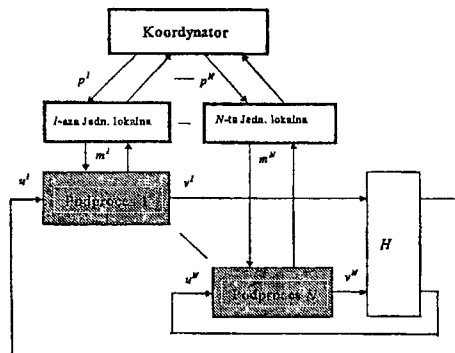
SZOS<sub>k</sub>: gdzie  $f_k(\bar{x}_k, m_k, \bar{z}_{k,k}) \in X_{k+1}$ ,  $x_k = \bar{x}_k$  oraz  $m_k \in M_k$ ;

stan końcowy  $x_{k+K_k}$  jest swobodny lub zadany.

W szczególnych przypadkach może zachodzić potrzeba sformułowania rozproszonego, bądź hierarchicznego, algorytmu służącego do rozwiązania zadania SZOS<sub>k</sub> lub zadania podobnego. Struktury i algorytmy hierarchiczne omawiane są krótko w kolejnym podrozdziale; przykład rozproszonego algorytmu do służącego do optymalizacji strumieni danych w sieci przedstawiony jest w rozdziale 3.

## 2.2. Złożony proces sterowany, układy z koordynacją iteracyjną i periodyczną

W przypadku gdy złożony proces sterowany podlega podziałowi na  $N$  wzajemnie powiązanych podprocesów składowych naturalne staje się wprowadzenie - dla potrzeb optymalizacji decyzji sterujących - hierarchicznej struktury obejmującej lokalne jednostki decyzyjne oraz jednostkę koordynującą. Struktura taka przedstawiona jest na rys. 2. Można realizować w niej różne strategie postępowania.



Rys. 2. Hierarchiczna struktura dwupoziomowa

Bardzo ważna z praktycznego punktu widzenia struktura hierarchiczna wyposażona jest w mechanizm koordynacji periodycznej. W wielkim skrócie działanie tej struktury jest następujące ([11]):

- **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 - przestrzajanych przy pomocy wielkości koordynujących  $p^i$ ,  $i=1, \dots, N$ , wyznaczanych przez koordynatora; w szczególności zadania lokalne mogą mieć taką postać jak zadania DZOS<sub>k</sub> lub zadanie SZOS<sub>k</sub>,
- **Poziom górny:** koordynator modyfikuje w odpowiednich chwilach lokalne mechanizmy decyzyjne w celu uzyskania pożądanego efektów w skali całego systemu - **koordynacja periodyczna** realizowana jest jako powtarzana optymalizacja decyzji dotyczących wartości wielkości koordynujących  $p^i$  ustalanych do następnej interwencji koordynatora.

Przykład zastosowania struktury z koordynacją periodyczną w postaci układu sterowania przejściem fali powodziowej przez system zbiorników omówiony jest krótko w rozdziale 3 (szczegółowy opis można znaleźć w pracy [14]).

Również w szeregu zastosowań ważne są mechanizmy rozproszone i hierarchiczne z koordynacją iteracyjną. Mamy wówczas do czynienia z rozwiązywaniem na przykład zadania SZOS<sub>k</sub> lub zadania podobnego; definiujemy potrzebną liczbę zadań lokalnych a następnie rozproszony lub skupiony algorytm koordynacji iteracyjnej. Przykład takiego algorytmu, z rozproszonym algorytmem koordynacji cenowej do ustalania cen za przesyłane strumienie danych [9], przedstawiony jest w rozdziale 3.

### 2.3. Projektowanie układu sterowania z powtarzaną optymalizacją sterowań

Wprowadzenie układu sterowania wyposażonego w mechanizm powtarzanej optymalizacji sterowań może zostać uwieńczone sukcesem pod warunkiem starannego rozważenia i rozwiązania szeregu zagadnień. Należą do nich:

- sformułowanie zadania optymalizacji decyzji,
- przygotowanie i sprawdzenie metod obliczeniowych służących do wyznaczania wymaganych przez zadanie optymalizacji decyzji prognoz oraz do rozwiązywania tego zadania w czasie rzeczywistym,
- teoretyczna analiza działania poszczególnych elementów oraz aspektów systemu sterowania,
- wykonanie eksperymentu symulacyjnego, weryfikacja działania poszczególnych części składowych oraz całości systemu sterowania, strojenie mechanizmów prognostycznych i decyzyjnych.

#### 2.3.1. Formułowanie zadania optymalizacji decyzji

Prawidłowe sformułowanie zadania optymalizacji wymaga współgrających ze sobą, odpowiednio zapisanych:

- celów działania (sterowania), w postaci wskaźników jakości i ograniczeń,
- modelu procesu sterowanego oraz, jeśli wymaga tego postawienie zadania optymalizacji, modelu systemu zbierania informacji bieżącej,
- modelu wejść swobodnych, reprezentacji prognozy wejść swobodnych wykorzystywanej dla potrzeb powtarzanej optymalizacji.

Należy podkreślić, że etap formułowania zadania optymalizacji decyzji ma znaczenie krytyczne i, na ogół, pozwala na dużą swobodę. W szczególności, istniejące dostępne dane pozwalają zwykle na różne sformułowania modelu niepewności. W grę może wchodzić opis mechanizmu kształtowania się wejść przy pomocy rozkładów prawdopodobieństwa (w postaci prawdopodobieństw przejść pomiędzy poszczególnymi wartościami stanu lub w postaci modelu dynamicznego pobudzanego szumem białym), przy pomocy zbiorów, do których należą chwilowe wartości wejść swobodnych, bądź też przy pomocy zbiorów rozmytych. Model niepewności musi być dopasowany do - podlegających optymalizacji - celów działania. Dla przykładu, ocena a priori realizacji celu może być zapisana w postaci wartości oczekiwanej tego celu (wskaźnika) - wymaga to probabilistycznego opisu wejść swobodnych [2]. Ocena ta może być jednak również ujęta w postaci ograniczenia rozmytego [16] - wymaga ona wówczas podobnego opisu (modelu rozmytego) wejść swobodnych.

Do celów praktycznych często wystarcza, przedstawione powyżej w podrozdziale 2.1, podejście polegające na opisie przyszłych przebiegów wejść swobodnych w postaci jednego lub większej liczby scenariuszy. Podejście takie stosowane jest powszechnie u algorytmach regulacji predykcyjnej [3] oraz w nadrzędnych mechanizmach sterowania i zarządzania [6,7,8]. Konieczne jest jednak zawsze przeprowadzenie odpowiednich badań symulacyjnych w celu stwierdzenia, czy rzeczywiście takie sformułowanie zadania optymalizacji sterowań pozwala na uzyskanie wystarczająco dobrych efektów działania całego systemu sterowania.

#### 2.3.2. Metody obliczeniowe.

Praktyczna realizacja układu z powtarzaną optymalizacją sterowań wymaga dysponowania metodami obliczeniowymi, przede wszystkim metodami optymalizacji, o dużej szybkości i niezawodności działania. Mogłoby się wydawać, że intensywnie rozwijany od wielu lat arse-

nał metod optymalizacji, ciągle doskonalone programy komputerowe, pozwala w niemal każdym przypadku praktycznym na w miarę łatwe dokonanie wyboru i zastosowanie właściwej dla tego przypadku metody obliczeniowej. Tak jednak w istocie nie jest. Poza algorytmami służącymi do rozwiązywania zadań programowania liniowego (Metoda Simplex i jej różne warianty) nie istnieją odpowiednio szybkie i niezawodne algorytmy *uniwersalne* służące do rozwiązywania zadań optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami. Praktyczne doświadczenia wskazują na to, że niemal zawsze w przypadku danego konkretnego zastosowania konieczne jest stworzenie specjalizowanej metody obliczeniowej, metody wykorzystującej charakterystyczne cechy obiektu i zadania, dopasowanej do wymagań stawianych przez układ sterowania. Oczywiście specjalizowana metoda może powstać na bazie istniejących procedur uniwersalnych - po ich odpowiednim dostosowaniu; jednakże częstokroć trzeba stworzyć całkiem nowy specjalizowany algorytm.

### 2.3.3. Teoretyczna analiza systemu sterowania

Wobec dużej złożoności systemu sterowania (zarządzania) z powtarzaną optymalizacją decyzji, teoretyczna analiza własności tego systemu, zwłaszcza najważniejszych z praktycznego punktu widzenia własności ilościowych, możliwa jest jedynie w odniesieniu do niektórych elementów i 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 [11]. Niemniej jednak wyniki analizy teoretycznej mogą mieć i miewają duże znaczenie dla zrozumienia działania systemu sterowania i jego własności. Analiza taka stanowi zatem bardzo ważny etap w badaniu proponowanych rozwiązań; jej oczywistą zaletę, w porównaniu z eksperymentem rzeczywistym lub symulacyjnym, stanowi uniwersalność względem danych - wyniki analizy teoretycznej nie są związane z konkretnymi wartościami parametrów, wejść swobodnych, decyzji itp., co zawsze ma miejsce w przypadku eksperymentu.

### 2.3.4. Eksperyment symulacyjny

Oparta na symulacji komputerowej, tj. wykonywanym w komputerze eksperymencie [4], komputerowa analiza sterowania pozwala na niezbędne, poprzedzające faktyczne wdrożenie, badania własności proponowanych mechanizmów decyzyjnych oraz na ocenę możliwych skutków mogących towarzyszyć praktycznemu zastosowaniu tych mechanizmów. Analiza komputerowa pozwala na uwzględnienie złożoności zjawisk występujących w rzeczywistym systemie, w tym nieliniowości, ograniczeń oraz wzajemnego oddziaływania systemu i otoczenia. Szczególną rolę wówczas, gdy nie jesteśmy w stanie zaproponować odpowiednich mechanizmów sterowania i wykazać ich efektywności wykorzystując jedynie metody formalne. Zadaniem analizy komputerowej nie jest przy tym zastępowanie badań teoretycznych, lecz wspomaganie analizy formalnej - gdy zadania przed nią postawione są zbyt trudne do rozwiązania na drodze teoretycznej. Analiza komputerowa wymaga bardzo poważnego zaangażowania ze strony projektanta. Aby wysiłek decydenta i nakład czasu potrzebny na przeprowadzenie wymaganych eksperymentów komputerowych ograniczyć do rozsądnych rozmiarów konieczne jest wyposażenie go w odpowiednie narzędzia i metodykę postępowania.

## 3. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ OPTIMALIZACJI STEROWAŃ

W drugiej części referatu warto przedstawić kilka wybranych przykładów zastosowań mechanizmów podejmowania decyzji z powtarzaną optymalizacją sterowań.

### 3.1. Układ regulacji predykcyjnej, dobór punktu pracy instalacji przemysłowej

Prostym i typowym dla zastosowań automatyki przykładem zadania budowy układu sterowania jest zadanie projektowania układu regulacji dla mniej lub bardziej złożonego procesu, gdzie cel stanowi utrzymanie pewnych wielkości na zadanym poziomie lub nadażanie przez te wielkości za zadanymi przebiegami. Zadanie takie może zaistnieć w sposób naturalny - jako od razu w takiej postaci postawione zadanie projektowe - lub też pojawić się jako zadanie dotyczące *warstwy sterowania bezpośredniego* w warstwowej strukturze sterowania - po przeprowadzeniu dekompozycji pionowej pierwotnego, złożonego zadania sterowania [7,8]. Typową praktykę stanowi stworzenie układu regulacji z wykorzystaniem tradycyjnych algorytmów regulacji, np. PI lub PID, nie wymagających bieżącego użycia modelu procesu i skomplikowanych metod obliczeniowych. Niemniej, coraz częściej stosowane są algorytmy sterowania predykcyjnego [3], wykorzystujące w powtarzanym trybie model procesu oraz - najczęściej bardzo prostą - deterministyczną jednowariantową prognozę przyszłych wartości wejść swobodnych, zwanych w tym przypadku zakłóceniami.

Jeśli zadanie regulacji powstało w wyniku wprowadzenia struktury dwuwarstwowej, dla przykładu struktury obejmującej warstwę wyższą określającą w dużych odstępach czasu pożądaną przebieg trajektorii wyjścia w procesie oraz warstwę regulacji odpowiedzialną za nadażanie za tą trajektorią, to przy dzisiejszych możliwościach może się zdarzyć, że - wykorzystujący nieliniowy model procesu układ z powtarzaną optymalizacją sterowań - jest w stanie zastąpić z powodzeniem obydwie warstwy i - jednocześnie - pozwolić na uzyskanie lepszego zachowania się procesu. Jest to bardzo istotne zjawisko, obserwowane również w innych sytuacjach, prowadzące do zmniejszania liczby warstw w wielowarstwowych układach sterowania i zarządzania.

Powtarzana optymalizacja punktu pracy instalacji przemysłowej, pracującej w stanie ustalonym lub reżimie okresowym, stanowi od dawna propagowany [6,7] i wprowadzany w coraz większej liczbie przypadków sposób postępowania. Upowszechnił się on już w przemyśle chemicznym, w szczególności w przemyśle petrochemicznym. Wkracza także do innych zastosowań, w tym do przemysłu ochrony środowiska. Sformułowania zadań decyzyjnych dotyczących optymalizacji wartości zadanych wielkości regulowanych są znane i stosowane od wielu lat. Nie ma więc potrzeby przedstawiania ich w tym miejscu w bardziej szczegółowy sposób.

### 3.2. Sterowanie intensywnością przepływu strumienia danych w sieci komputerowej; zastosowanie mechanizmu rozproszonej koordynacji iteracyjnej przy pomocy instrumentów cenowych

Rozważmy sieć przesyłu danych składającą się ze zbioru  $L=\{1,\dots,L_m\}$  jednokierunkowych łączy. W podstawowym sformułowaniu zadania każde łącze ma założoną pojemność  $c_l$ ,  $l \in L$ . Z sieci korzysta zbiór  $S=\{1,\dots,S_m\}$  użytkowników rozumianych jako źródła ruchu; źródło  $s$  określone jest poprzez czwórkę  $(L(s), U_s(\cdot), x_{s,min}, x_{s,max})$ . Zbiór  $L(s) \subseteq L$  zawiera te łącza, z których źródło  $s$  korzysta przysyłając informacje do jednego lub wielu punktów docelowych.  $U_s(\cdot)$  stanowi funkcję użyteczności źródła określoną na przedziale  $I_s = [x_{s,min}, x_{s,max}] \subseteq \mathbb{R}_+$ , o wartościach rzeczywistych, gdzie  $x_{s,min}, x_{s,max}, x_{s,min} < x_{s,max}$ , są, odpowiednio, minimum i maksimum intensywności strumienia danych, które źródło  $s$  może chcieć transmitować, zaś  $U_s(x_s)$ , dla  $x_s \in I_s$ , oznacza użyteczność postrzeganą przez źródło, gdy nadaje ono z intensywnością  $x_s$ . Niech  $I = I_1 \times \dots \times I_{S_m}$  i niech dla każdego łącza  $l$  zbiór  $S(l) = \{s \in S: l \in L(s)\}$  oznacza



zbiór tych źródeł, które korzystają z tego łącza. Zauważmy, że  $l \in L(s)$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $s \in S(l)$ .

Zadanie optymalizacji przepływu (ZOP) danych w sieci może być sformułowane [9] w następujący sposób:

$$\text{ZOP: } \begin{aligned} & \max_{x_s \in I_s} \sum_s U_s(x_s) \\ & \sum_{s \in S(l)} x_s \leq c_l, \quad l \in L \end{aligned}$$

Jest szczególna postać zadania SZOS<sub>k</sub>; zadanie ZOP może ulegać zmianie w kolejnych etapach czasowych w skutek zmian funkcji użyteczności poszczególnych źródeł ruchu, zmian zbiorów  $I_s$  itp. Jeśli dopuszczalny zbiór decyzji w zadaniu ZOP jest niepusty (tj. jeśli

$$\sum_{s \in S(l)} x_{s, \min} \leq c_l) \text{ i funkcja celu jest ściśle wklęsła - w szczególności jeżeli każda z funkcji } U_s(\cdot)$$

jest ściśle wklęsła na przedziale  $I_s$  - wówczas istnieje jednoznaczne rozwiązanie  $\hat{x}$ , nazywane dalej optymalnym rozwiązaniem prymalnym.

Powyższe zadanie, z addytywnie separowalną funkcją celu i ograniczeniami na pojemność łączy przesyłowych stanowi szczególny przykład zadania, które można rozwiązać przy pomocy Metody Cen (metody dualnej) z koordynacją wykorzystującą instrumenty cenowe [6]. Lokalne zadania związane ze źródłami ruchu można sformułować wówczas w postaci:

$$\text{ZL}_s: \begin{aligned} & \max_{x_s \in I_s} U_s(x_s) - p^s x_s \\ & \text{gdzie } p^s = \sum_{l \in L(s)} p_l \end{aligned}$$

Każde źródło może, niezależnie od innych, rozwiązać powyższe zadanie dla danej ceny  $p^s$ ; ważne jest to, że lokalna funkcja użyteczności  $U_s(\cdot)$  może być nie: nana innym użytkownikom a także operatorowi sieci. Rozwiązanie zadania ZL<sub>s</sub> oznaczmy jako  $\hat{x}_s(p^s)$ , zaś związaną z nim wartość lokalnej funkcji celu tego zadania jako  $B_s(p^s)$ .

Sformułowanie zadania dualnego do zadania ZOP, zdefiniowane przy pomocy rozwiązań zadań ZL<sub>s</sub>,  $s = 1, \dots, S_m$ , stanowi klucz do wprowadzenia rozproszonego algorytmu koordynacji, w tym przypadku rozproszonego algorytmu służącego do korygowania cen  $p^s$ . Ponieważ Lagrangian zadania ZOP ma postać:

$$Lg(x, p) = \sum_s U_s(x_s) + \sum_l p_l (c_l - \sum_{s \in S(l)} x_s) = \sum_s (U_s(x_s) - x_s \sum_{l \in L(s)} p_l) + \sum_l p_l c_l,$$

to ceny związane z wykorzystaniem łączy  $p_l$  (tj. mnożniki Lagrange'a związane z ograniczeniami na pojemności łączy) mogą być wyznaczone poprzez minimalizację funkcji dualnej. Zadanie dualne ma postać:

$$\text{ZD: } \begin{aligned} & \min_{p_l \geq 0, l=1, \dots, L_m} \sum_s B_s(p^s) + \sum_l p_l c_l, \\ & \text{where } p^s = \sum_{l \in L(s)} p_l \end{aligned}$$

Podstawowy rozproszony synchroniczny algorytm doboru cen za połączenia, zaproponowany przez Low'a i Lapsley'a [9], który w istocie jest niczym innym jak algorytmem gradientu prostego dla zadania minimalizacji funkcji dualnej z rzutowaniem gradientu na  $R_+^{S_m}$ , jest następujący:

$$A_l: \quad p_l(t+1) = [p_l(t) + \gamma (\sum_{s \in S(l)} \hat{x}_s(p^s(t)) - c_l)]_+,$$

Gdzie  $[y]_+ = \max(y, 0)$ . W algorytmie  $A_l$   $p_l(t)$  oznacza wartość ceny  $l$ -tego łącza w iteracji (chwili)  $t$ ; taka sama notacja zastosowana jest dla  $p^s(t)$ . Tak więc, w przedstawionej synchronicznej wersji rozproszonego algorytmu korekcji cen wszystkie źródła otrzymują w danej chwili ceny  $p_l(t)$ , obliczają odpowiadające im ceny za ruch z danego źródła  $p^s(t)$  a następnie wyznaczają rozwiązania zadań  $ZL_s$ ,  $s = 1, \dots, S_m$ . Nowe wartości intensywności strumieni ruchu  $\hat{x}_s(p^s(t))$  są przekazywane jednostkom (router'om) nadzorującym pracę łącza, gdzie z kolei wyznaczane są nowe wartości  $p_l(t+1)$ ,  $l = 1, \dots, L_m$ , zgodnie z algorytmem  $A_l$ , indeks iteracji jest zwiększany o jeden itd. Przedstawiony rozproszony algorytm bilansowania obciążeń w sieci przy pomocy „uczciwego” mechanizmu cenowego (fairness pricing) stanowi przykład propozycji zastosowania optymalizacji decyzji podejmowanych przez wielu decydentów w złożonym systemie.

### 3.3. Układ sterowania przejściem fali powodziowej przez system zbiorników retencyjnych

Zagadnienie sterowania zbiornikami podczas powodzi wywołanej nawałnymi opadami stanowi jeden z najważniejszych elementów działań przeciwpowodziowych [10] 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 falą powodziową dla zbiorników dorzecza Górnej Wisły pozwoliły wykazać (zob. np. [14]), że możliwości oferowane przez układy z powtarzaną optymalizacją decyzji znacznie 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. Rozwiązane zadanie decyzyjne jest w postaci zadania DZOS<sub>k</sub>. W przypadku systemu zbiorników znajdujących się na dopływach do rzeki głównej najlepsze efekty zostały uzyskane przy zastosowaniu struktury hierarchicznej z koordynacją periodyczną.

### 3.4. Hierarchiczny system dowodzenia obroną punktową

Przedstawiona w [1] propozycja systemu dowodzenia przeciw rakietową obroną punktową ważnego obiektu stanowi kolejny przykład wykorzystania odpowiedniej dekompozycji procesu, w tym wypadku procesu obrony, oraz koordynacji periodycznej. Zakłada się, że strefa wokół obiektu bronionego podzielona zostaje na  $N$  sektorów obrony. Każdy z tych sektorów otrzymuje od koordynatora przydział bronionej przestrzeni oraz przydział środków przeznaczonych do zwalczania celów atakujących. Zakładając różne możliwe scenariusze ataku lokalne jednostki decyzyjne rozwiązują zadania dynamiczne optymalizacji z prognozami kilkuwariantowymi (odpowiednio zmodyfikowane zadania typu DZOS<sub>k</sub>). Decyzje dotyczące najbliższych chwil czasowych są następnie wprowadzane w życie; po uzyskaniu kolejnych obserwacji dotyczących obiektów atakujących oraz skuteczności ich zwalczania przez środki własne, wypracowywane są nowe ustalenia. W większych odstępach czasu podejmowane są decyzje koordynujące dotyczące zmiany przydziału zadań i środków dla jednostek lokalnych. Analiza tych decyzji na szczeblu koordynacji pozwala, jak wynika to z przedstawionych w [1] wyników obliczeń symulacyjnych, na uzyskanie lepszych wyników niż przy zastosowaniu stałych przydziałów zadań i środków.

### 3.5. Zarządzanie przychodem

Jednym z szybko rozwijających się nowych obszarów zastosowań nowoczesnych mechanizmów decyzyjnych jest „sterowanie” zachowaniem się różnych segmentów rynku, poprzez odpowiednie ustalanie wartości instrumentów rynkowych, w szczególności cen sprzedawanych towarów i usług - w zależności od miejsca i lokalnych warunków sprzedaży. W tym przypadku proces sterowany tożsamy jest z rozpatrywanym fragmentem rynku, zaś decyzje sterujące polegają na takim doborze instrumentów będących w dyspozycji przedsiębiorcy-decydenta, aby w jak największym stopniu wykorzystać istniejące możliwości - zdobyć większy udział w rynku oraz/lub powiększyć zysk ([5,15]). Jako przykład można wymienić proces ustalania taryf przewozowych przez linie lotnicze z jednoczesnym dynamicznym podziałem oferowanych miejsc w różnych kategoriach rezerwacji. Inny przykład związany jest z rynkiem paliwowym, gdzie - wobec rosnącej konkurencji - sieć stacji benzynowych, która pragnie zarówno utrzymać (lub powiększyć) swój udział w rynku jak i jednocześnie uzyskać godziwy zysk, stoi w obliczu konieczności stosowania wyrafinowanych technik analizy i wspomaganie decyzji, stosowanych do ustalania zmiennych w czasie i dobieranych indywidualnie do warunków działania każdej stacji cen na sprzedawane paliwa oraz na inne produkty dostępne w położonym na terenie stacji sklepie. Wspomaganie decyzji wymaga bieżącej identyfikacji modelu reakcji danego segmentu rynku na ceny własne i ceny u konkurentów oraz optymalizacji propozycji własnych cen. Rozwiązywane jest zadanie w postaci SZOS<sub>k</sub>, przy czym przyszłe, sięgające poza rozpatrywany etap, konsekwencje bieżących decyzji uwzględniane są z pomocą odpowiednich ograniczeń, m.in. dotyczących udziału w rynku (market share). Prowadzenie grupy stacji wymaga stosowania mechanizmów hierarchicznych. Kilka ostatnich lat przyniosło operacyjne wykorzystanie technik z powtarzaną optymalizacją w systemach wspomaganie decyzji cenowych wykorzystywanych przez wielkie kompanie naftowe. Uzyskano wyniki daleko wykraczające ponad oczekiwania. Podobne wyniki uzyskane zostały w innych zastosowaniach: w systemach rezerwacji miejsc lotniczych, także w przedsiębiorstwach zajmujących się wynajmem samochodów. Mechanizmy decyzyjne z powtarzaną optymalizacją testowane są obecnie wprowadzane przez sieci supermarketów a także przez operatorów sieci telekomunikacyjnych.

### LITERATURA

- [1] Arabas, P., K. Malinowski: Hierarchical air defense system; periodic and initial coordination; *mat. Sixth International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, MMAPR 2000*, Międzyzdroje, sierpień 2000, tom 1, str. 199-204.
- [2] Bertsekas, D. P.: *Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987.
- [3] Camacho, E. F., C. Bordons: *Model Predictive Control in the Process Industry*, Springer, Londyn, 1995.
- [4] Cellier, F. E.: *Continuous Process Modeling*, Springer, New York, 1991.
- [5] Cross, R.: *Revenue Management: hard core tactics for profit making and market domination*; Orien Business Books, London, 1997.
- [6] Findeisen, W., F.N. Bailey, M. Brdys, K. Malinowski, P. Tatjewski, A. Woźniak: *Control and Coordination in Hierarchical Systems*; J. Wiley, London, 1980.
- [7] Findeisen, W.: *Wielopoziomowe układy sterowania*, PWN, Warszawa, 1974.
- [8] Findeisen, W.: *Struktury sterowania dla złożonych systemów*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1997.

- [9] Low, S., D. E. Lapsley: Optimization flow control, I: basic algorithm and convergence; *IEEE/ACM Transaction on Networking* 7(6), Grudzień 1999, str. 861-874.
- [10] Malinowski, K., J. Zelaziński: Reservoir systems: Operational flood control; *Systems and Control Encyclopedia*, supplementary vol.1, Pergamon Press, 1990, str. 495-503.
- [11] Malinowski, K.: Practical Issues of Coordination in Control of Large-Scale Stochastic Systems; *Stochastic Large-Scale Engineering Systems* (red. S. G. Tzafestas i K. Watanabe), Marcel Dekker, 1992, str. 195-227.
- [12] Malinowski K.: Sterowanie i zarządzanie; nowa rzeczywistość; *Mat. XIII Krajowej Konferencji Automatyki*, Opole, wrzesień, 1999, tom 2, str. 11-18.
- [13] Malinowski K.: Optimization of operative decisions; computer analysis; *Control and Cybernetics*, vol. 29, no. 1, 2001, str. 257-274.
- [14] Niewiadomska-Szynkiewicz, E., K. Malinowski, A. Karbowski: Predictive methods for real-time control of flood operation of a multireservoir system: Methodology and comparative study. *Water Resources Research*, vol. 32, no. 9, 1996, str. 2885-2895.
- [15] Singh, M., J-C. Bennavil: PriceStrat: a knowledge support system for profitable decision making during price wars; *J. Information and Decision Technologies*, vol. 19, 1993, str. 227-246.
- [16] Zimmermann, H. J.: *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.