

ALGORYTMY DO STEROWANIA NADRZĘDNEGO I INTELIGENTNEGO NADZORU¹

(Projekt KBN nr 3 P40301 706)

Piotr Tatjewski

Politechnika Warszawska

Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Streszczenie. Opracowanie przedstawia prace badawcze prowadzone w ramach wymienionego wyżej projektu (kierownik projektu: Piotr Tatjewski, termin realizacji: 01.04.1994 - 31.12.1995). Celem projektu jest opracowanie wybranych algorytmów i narzędzi do sterowania nadrzędnego w warstwowej strukturze sterowania procesami ciągłymi. Badania obejmują projektowanie algorytmów regulacji dla obiektów nieliniowych, zastosowanie metod inżynierii wiedzy do konstrukcji złożonych algorytmów regulacji z nadzorem, algorytmy sterowania optymalizującego punkty pracy układów regulacji, konstrukcję maszyny wnioskującej do celów inteligentnego sterowania z wykorzystaniem bazy wiedzy.

1 Wprowadzenie

Prace przedstawione w niniejszym referacie wpisują się w nurt problematyki sterowania procesami w strukturze warstwowej. Mimo wielu niedostatków i braków w zakresie metod projektowania sterowanie w takiej strukturze to powszechnie stosowana praktyka, stąd i od lat przedmiot zainteresowania środowisk naukowych. Znaczący jest tu wkład polskiego środowiska badawczego, w tym zapoczątkowanych w zespole prof. W. Findeisena prac pracowników Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej (dawniej Instytut Automatyki) Politechniki Warszawskiej, zob. np. monografie [13, 21, 11]. Przedstawione w pracy rezultaty są efektem kolejnego etapu badań prowadzonych od lat przez głównych realizatorów projektu (P. Tatjewski, J. Pułaczewski), jak i badań wykonywanych przez młodszych kolegów (P. Domański, T. Traczyk, studenci) – w ramach kierowanego przez autora niniejszego opracowania Zespołu Sterowania Procesami w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej.

Z inżynierskiego punktu widzenia podstawowe warstwy układu sterowania procesami ciągłymi scharakteryzować można następująco:

- *Warstwa instrumentacji i regulacji bezpośredniej*, której celem jest podstawowa kontrola i stabilizacja procesu. Składa się na nią oprzyrządowanie pomiarowe i typowe przemysłowe regulatory bezpośredniego działania. Podstawowym zadaniem tej warstwy jest zapewnienie niezawodności i bezpieczeństwa prowadzenia procesu. Pętle regulacyjne są z reguły jednowymiarowe (SISO), odpowiadające zmiennym procesowym (pomiarowym) o stosunkowo szybkiej dynamice.
- *Warstwa regulacji nadrzędnej* (zaawansowanej – "advanced control"), której celem jest realizacja bardziej złożonych funkcji regulacyjnych, jak kontrola ograniczeń wynikających z wymagań technologicznych (np. na jakość produktu), nadążanie za trajektoriami czy

¹Pełny tekst referatu wygłoszonego na I Konferencji *Granty-Automatyka*, Warszawa, czerwiec 1995.

bezpieczna i efektywna realizacja zmian punktów pracy podstawowych zmiennych procesowych. Układy regulacji tej warstwy są projektowane z reguły dla trudnych obiektów, nieliniowych, wielowymiarowych, z ograniczeniami, oraz często trudnych, niekonwencjonalnych zadań regulacji.

- *Warstwa sterowania optymalizującego*, której celem jest bezpośrednia realizacja ekonomicznych kryteriów prowadzenia procesu poprzez wyznaczanie optymalnych, stałych w dłuższych odcinkach czasu (sterowanie optymalizujące stanem ustalonym) lub częściej zmiennych (sterowanie optymalizujące dynamiczne) punktów pracy procesu, tj. wartości zadanych dla regulatorów nadrzędnych i określonych regulatorów bezpośredniego działania.
- *Warstwa sterowania nadzorującego*, której zadaniem jest nadzór i adaptacja pracy algorytmów przedstawionych powyżej warstw niższych, oraz reagowanie na sytuacje awaryjne, nieprzewidziane. Funkcjonalnie warstwa ta jest nadrzędna wobec wszystkich warstw niższych - ma jednakże bezpośredni dostęp do każdej z nich (ale nie do procesu). Zadaniem tej warstwy jest wykrywanie i przetwarzanie zmian powodowanych przez otoczenie procesu, w tym zmian wymagań pochodzących z warstw zarządzania, na odpowiednie zmiany (parametrów, struktur, itp.) w warstwach podlegających nadzorowi. Klasycznie warstwa ta nazywana była warstwą adaptacji, zob. np. [13]. Jednak obecnie, ze względu na szerszy zakres zadań i możliwości ich realizacji niż to wynika z ogólnie rozumianego znaczenia słowa "adaptacja" powszechnie zaczęto stosować określenie "warstwa sterowania nadzorującego", szczególnie w literaturze angielskiej ("supervisory control layer").

Należy podkreślić, że wciąż trwający dynamiczny rozwój technologii komputerowej stwarza możliwości stosowania w czasie rzeczywistym (on-line) coraz bardziej złożonych algorytmów i systemów sterowania i jest jednym z głównych czynników stymulujących rozwój algorytmów sterowania nadrzędnego oraz nadzorującego.

Celem omawianych badań jest opracowanie wybranych algorytmów i narzędzi dla warstwowej struktury sterowania. Prace obejmują następujące zagadnienia:

- Opracowanie algorytmów regulacji predykcyjnej obiektów nieliniowych, o trudnej dynamice, dla zastosowań odpowiadających regulacji nadrzędnej procesów w strukturze warstwowej, pracujących w szerokim zakresie zmian punktów pracy.
- Zastosowanie metod inżynierii wiedzy do nadzoru i konstrukcji algorytmów regulacji. Zastosowanie struktur regulacji z układem nadrzędnym typu "fuzzy", wykorzystanie algorytmu genetycznego do generacji bazy reguł układów rozmytych, wykorzystanie rozmytych sieci neuronowych do projektowania układów regulacji.
- Analiza i rozwój algorytmów sterowania optymalizującego. Przedmiotem badań są algorytmy zintegrowanej optymalizacji i adaptacji parametrów, do sterowania nadrzędnego optymalizującego on-line stan ustalony w warunkach niedokładnego modelu procesu i zakłóceń.
- Opracowanie maszyny wnioskującej do inteligentnego sterowania, w tym nadzoru. Celem jest zaprojektowanie i implementacja programowa prototypowej wersji maszyny, różniącej się od stosowanych w typowych systemach ekspertowych oparciem procesu wnioskowania nie o fakty, a o zmienne i związane ze zmiennymi zdarzenia.

Wymienione zagadnienia badawcze zostaną krótko omówione w kolejnych rozdziałach niniejszego opracowania. Przedstawiona zostanie ogólna charakterystyka prowadzonych prac i na jej tle, bliżej, wybrane fragmenty, dotyczące głównie prac już zakończonych. Obok tytułu każdego z rozdziałów podane też zostanie nazwisko (głównego) wykonawcy.

2 Projektowanie algorytmów regulacji dla obiektów nieliniowych (*J. Pułaczewski*)

Prace dotyczą projektowania algorytmów regulacji dla obiektów nieliniowych, o trudnej dynamice, pracujących w szerokim zakresie zmian punktów pracy (istotne w strukturze warstwowej z bieżącą optymalizacją). W szczególności, badano możliwości różnorodnego wykorzystania techniki zbiorów rozmytych. Prace można następująco pogrupować:

- Opracowanie algorytmów regulacji dla obiektów nieliniowych z wykorzystaniem modelu odwrotnego,
- Projektowanie algorytmów regulacji typu "fuzzy" w oparciu o proces uczenia (identyfikacja lingwistyczna).

Ponadto, kontynuowano prace nad dość specyficznym, ale ważnym dla praktyki problemem rzeczywistym - projektowaniem dwuwarstwowego układu energo-oszczędnej regulacji temperatury w przechowalni ziemniaków z wykorzystaniem prognoz pogody [28].

Algorytmy regulacji wykorzystujące modele odwrotne to ważna klasa obejmująca regulację w strukturze IMC (Internal Model Control), algorytmy predykcyjne. W przypadku regulatorów nieliniowych kluczowym problemem jest zagadnienie opracowania metodyki odwracania modeli nieliniowych, problem trudny również dla wielu klas modeli liniowych. Zagadnienie to proponuje się rozwiązywać przez wykorzystanie podejść jakościowych (typu "fuzzy"), zarówno poprzez konstrukcje złożone z wykorzystaniem zbioru modeli liniowych, jak i poprzez tworzenie bezpośrednio modeli jakościowych obiektów [17, 18].

W pierwszym przypadku proponuje się wykorzystanie struktury Takagi-Sugeno [20], tj. w istocie ważonej w sposób rozmyty sumy modeli liniowych, aproksymującej model nieliniowy. Dla takiej postaci modelu zaproponowano sposób konstrukcji modelu odwrotnego oraz układu sterowania obiektem [18]. Projektowanie może być prowadzone jedynie w oparciu o ciągi danych wejściowych i wyjściowych, zawierając w sobie proces identyfikacji. Prace są w toku, uzyskane wyniki wydają się być bardzo obiecujące.

Można przytoczyć ważne praktyczne sytuacje, gdy analityczne sformułowanie zadania regulacji jest trudne, a wprawny operator poprawnie steruje procesem - czyli dysponujemy ciągiem sygnałów wejściowych i wyjściowych nieznanego analitycznie "regulatora". Badano metodykę konstrukcji regulatora rozmytego na podstawie takich danych pomiarowych [17], m.in. testując podejście zaproponowane w [29]. Rozważany problem to w istocie problem identyfikacji lingwistycznej, mający zastosowanie zarówno do modelowania procesów jak i regulatorów.

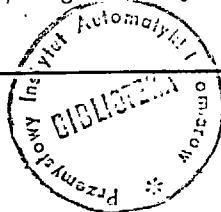
Przedstawione prace mieszczą się w nurcie badań mających na celu opracowanie metodyki projektowania nieliniowych, predykcyjnych algorytmów regulacji w strukturze IMC (z modelem wewnętrznym).

3 Zastosowanie metod inżynierii wiedzy dla nadzoru i konstrukcji algorytmów regulacji (*P. D. Domański*)

Celem prac jest zastosowanie metod tzw. inteligentnych do konstrukcji algorytmów regulacji. Rozważane są metody jakościowe, z odpowiednim wykorzystaniem technik optymalizacji genetycznej i sieci neuronowych. Można tu wydzielić trzy szczegółowsze, ale silnie ze sobą powiązane, tematy badawcze.

Projektowanie warstwowych struktur regulatorów z nadzorem inteligentnym

W dolnej warstwie układu znajduje się klasyczna pętla regulacji z regulatorem cyfrowym, nad którą dołączona jest warstwa nadzoru inteligentnego. Badane były układy nadzoru oparte na konstrukcjach z bazą wiedzy wykorzystujące do wnioskowania zasady logiki rozmytej. Zostały zaproponowane i przebadane różne struktury regulacji, z regulatorem cyfrowym PID



i cyfrowym regulatorem predykcijnym IMC w warstwie podrzędnej. Istnieją dwie możliwości wykorzystania układu warstwy nadzorczej, jeśli jako wyróżniającą cechę traktować sposób interwencji na podstawowy układ regulacji parametrycznej. I tak układ nadzoru można interpretować rozłącznie jako układ strojenia lub łącznie z pętlą regulacji jako jeden nieliniowy regulator niestacjonarny. To drugie podejście było przedmiotem badań.

- Niestacjonarny regulator typu PID [5, 6].

Regulator PID implementowano w wersji cyfrowej. Wejściem do układu nadzoru są: uchyb regulacji, prędkość zmian uchybu regulacji i całka uchybu regulacji. Wyjściem są parametry regulatora PID: K_p , T_i , T_d . Układ nadzoru składa się z pojedynczej bazy wiedzy o trzech wejściach i trzech wyjściach. Szczegółowy opis realizacji i uzyskanych wyników zamieszczony jest w cytowanych powyżej publikacjach.

- Niestacjonarny regulator predykcyjny IMC [5, 7].

Jako regulator predykcyjny implementowano cyfrową wersję algorytmu IMC (Internal Model Control), gdzie model obiektu jest w postaci dwuinercyjnej z opóźnieniem, a predyktor i człon kształtujący wartość zadaną to człony oscylacyjne. Układ nadzoru ma trzy wejścia: rzeczywistą wartość zadaną, wartość zadaną po przejściu przez układ formujący, wyjście procesu. Następnie układ oblicza rzeczywiste wejścia do układów wnioskujących: uchyb regulacji, uchyb sygnału wartości zadanej wynikający z przejścia przez człon kształtujący, wariancję sygnału wyjściowego. Układ wnioskujący składa się z dwu niezależnych baz wiedzy. Jedną z nich jest odpowiedzialna za zadanie tłumienie zakłóceń - jej wejściami są wariancja sygnału wyjściowego i uchyb regulacji. Natomiast wyjściem są parametry predyktora $P(s)$. Drugi układ wnioskowania ma takie same wejścia ale inną Bazę Regul, a jego wyjściami są parametry członu kształtującego $H(s)$, odpowiedzialnego za zadanie nadążania. Sygnał uchybu wartości zadanej odpowiednio decyduje, która z baz wiedzy jest aktywna.

Zastosowanie powyższych schematów nadzoru typu "fuzzy" umożliwia poprawę pracy podstawowych pętli regulacji z regulatorem PID oraz IMC. Dzieje się tak dzięki temu, że wynikowo otrzymujemy niestacjonarny i nieliniowy regulator, będący pewną alternatywą dla klasycznych regulatorów adaptacyjnych. Jeśli rozważyć problem stabilności tak projektowanego regulatora, to można do niego podejść dwójako. Tak dobrać bazę danych, aby zmieniające się parametry regulatora nigdy nie wyszły ze stabilnej przestrzeni nastaw dla układów stacjonarnych. Jednakże tak zaprojektowany układ będzie konserwatywny. Gdy pozwolimy na krótkotrwałe, niestacjonarne wchodzenie w zakres niestabilnych nastaw parametrów uzyskamy mechanizm polepszenia zachowania się układu (skrócenie czasu przestawiania, zmniejszenie przeregulowania - podobnie jak przy regulatorach PID z nieliniowo zmiennym wzmocnieniem), kontrolując stabilność całego układu przez odpowiednie sformułowanie bazy regul.

Do tej części projektu zostało napisane oprogramowanie do badania struktur regulatorów niestacjonarnych z warstwą nadzoru jakościowego (program ICON).

Automatyczna generacja bazy regul z wykorzystaniem metod genetycznych

Podstawowym problemem przy projektowaniu układów rozmytych (modele, regulatory, układy nadzoru) jest zbudowanie bazy regul. Najczęściej robi się to w oparciu o wiedzę ekspercką, jednakże często nie jest ona wystarczająca lub wręcz nie jest dostępna. Prezentowane rozwiązanie pozwala wygenerować reguły typu "jeśli-to" w oparciu o dane liczbowe wejściowe i wyjściowe (traktując modelowany układ jako czarną skrzynkę). Zostało ono przetestowane w zadaniu modelowania jakościowego opartego na zasadach logiki rozmytej.

Założenia do stosowania metody są następujące: równania i układy dynamiczne traktujemy na zasadzie czarnej skrzynki, dysponujemy danymi jedynie w postaci ciągu wartości wejścia i wyjścia. Otrzymujemy model jakościowy (reguły wnioskowania rozmytego) z możliwością dostrajania (optymalizacji).

Podstawowy schemat modelowania jest następujący:

1. grupowanie rozmyte (fuzzy clustering) przestrzeni wejść i wyjść, np. w oparciu o algorytm Fuzzy Isodata wg. Bezdeka,
2. genetyczne tworzenie reguł: kodowanie reguł w chromosomie w oparciu o podejście typu Pittsburgh (każdy osobnik ma informację o całej bazie reguł),
3. optymalizacja algorytmem genetycznym ze zmienną liczebnością populacji (GAVaPS), dla wersji ze stałą liczbą reguł w bazie lub dla wersji optymalizującej jednocześnie reguły oraz ich liczbę,
4. dostrojenie: np. prostym algorytmem optymalizacji bezgradientowej.

Powyższe podejście zostało przeanalizowane i przebadane dla zadania modelowania równań nieliniowych [8], układów dynamicznych [9] oraz zostało porównane z podejściem wykorzystującym rozmyte sieci neuronowe [10].

Projektowanie regulatorów w oparciu o rozmyte sieci neuronowe

Badania dotyczą projektowania regulatorów konstruowanych w postaci struktur tzw. rozmytych sieci neuronowych ("fuzzy neural networks"), uczonych na podstawie ciągów wejść i wyjść układu nauczyciela (wzorcowo działającego układu regulacji). Prace dotyczą projektowania regulatora rozmytego "klasycznego" [10], jak i regulatora PID hierarchicznego z rozmytym przełączaniem (o strukturze Takagi-Sugeno). Sieci neuronowe uczą się zarówno przesłanek (obszary obowiązywania poszczególnych reguł) jak i konsekwencji.

Oceniając i porównując pierwsze rezultaty [10] dotyczące technik automatycznych do generowania układów rozmytych, w oparciu o algorytm genetyczny oraz rozmyte sieci neuronowe, należy stwierdzić, że oba podejścia mają swoje wady i zalety. Układy z rozmytymi sieciami neuronowymi są szybsze i dokładniejsze w uczeniu, jednak wymagają dobrze przygotowanej próbki do uczenia. Mają one tendencje do zgniatania obszarów o małej liczbie punktów i w takich obszarach mogą źle się uczyć dynamiki. Natomiast modelowanie w oparciu o zastosowane techniki ewolucyjne jest niewrażliwe na rozkład punktów w próbkach uczących, ale jest czasochłonne (choć opracowano algorytmy efektywniejsze od publikowanych przez innych autorów).

4 Projektowanie algorytmów sterowania optymalizującego (*P. Tatjewski*)

Prace dotyczą algorytmów dla warstwy sterowania optymalizującego. Przedmiotem badań są iteracyjne (z pomiarowym sprzężeniem zwrotnym) algorytmy optymalizujące stan ustalony metodą Zintegrowanej Optymalizacji i Adaptacji Parametrów (MZOAP). Metoda ta jest niezwykle atrakcyjna, gdyż umożliwia, w wyniku odpowiednio zorganizowanego procesu iteracyjnego z wykorzystaniem optymalizacji modelowych i pomiarowego sprzężenia zwrotnego, osiągnięcie rzeczywistego optimum procesowego - mimo niedokładności modelu i estymat zakłóceń [19, 3, 23]. Prace dotyczą dwóch następujących zagadnień:

- Opracowanie i implementacja algorytmu dualnego MZOAP,
- Opracowanie i analiza algorytmu MZOAP dla struktury sterowania z wymuszaniem spełnienia ważnych ograniczeń technologicznych na określone wyjścia procesu za pomocą dedykowanych układów regulacji nadrzędnej.

Koncepcja algorytmu dualnego MZOAP [4] jest zupełnie nowa i usuwa podstawową wadę dotychczasowych algorytmów tej klasy, jaką był brak efektywnego i w miarę niezawodnego sposobu estymacji on-line pochodnych rzeczywistej charakterystyki statycznej wyjść procesu w zależności od wartości zadanych regulatorów (tzn. sterowań warstwy optymalizującej).

Przedstawimy pokrótce ideę algorytmu. Niech $F_*(c)$ oznacz wspomniane rzeczywiste odwzorowanie nieliniowe, zaś $c \in R^n$ wektor zmiennych decyzyjnych (sterowań) warstwy sterowania

optymalizującego, tj. wartości zadanych dla regulatorów warstw niższych. Założmy ponadto, rozważając i-tą iterację algorytmu, że poprzednio wygenerowanych n punktów ($n = \dim c$) spełnia warunek

$$\det(S^i \stackrel{\text{def}}{=} [\Delta c^{i1} \Delta c^{i2} \dots \Delta c^{in}]^T) \neq 0. \quad (1)$$

gdzie

$$\Delta c^{ik} \stackrel{\text{def}}{=} c^i - c^{i-k}. \quad (2)$$

Jeśli punkty c^{i-k} są dostatecznie bliskie aktualnemu punktowi c^i , to wówczas [4], dla każdego $j = 1, \dots, m$ ($m = \dim F_*$),

$$\nabla F_{*j}(c^i) \cong (S^i)^{-1} \begin{bmatrix} F_{*j}(c^i) - F_{*j}(c^{i-1}) \\ \vdots \\ F_{*j}(c^i) - F_{*j}(c^{i-n}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

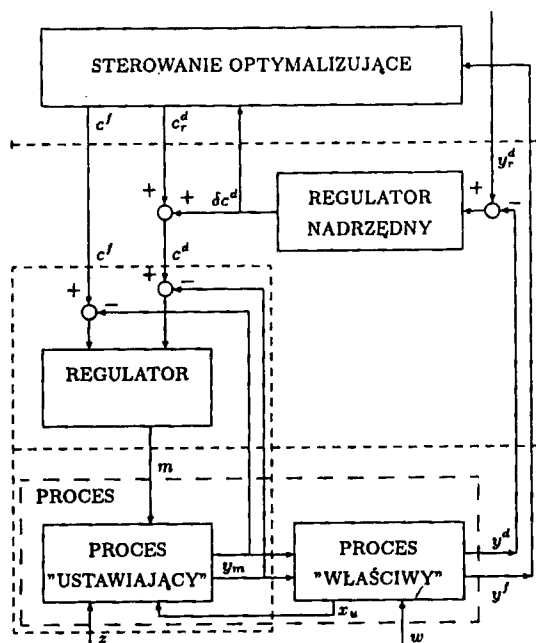
Przedstawiony pomysł jest stosunkowo prosty, ale istota trudności leży w fakcie, że kolejne punkty c^i są wyliczane w rezultacie skomplikowanego procesu optymalizacji i korekcji - stąd okazuje się nie tak prostym zagwarantowanie, aby macierz S^i była w każdej iteracji nieosobliwa i, co więcej oraz konieczne z praktycznego punktu widzenia, miała odpowiedni wskaźnik uwarunkowania. Połączenie przedstawionego pomysłu estymacji pochodnych z nową strukturą algorytmu MZOAP zapewniającą wymagane uwarunkowanie macierzy prowadzi do algorytmu MZOAP dualnego (MZOAPD) [4]. Dualność pochodzi stąd, że każdy kolejny punkt c^{i+1} generowany jest w sposób uwzględniający nie tylko optymalność w danej iteracji, ale i przyszłe (w następnej iteracji) potrzeby estymacji pochodnych wyjść procesu. Prowadzić to może do gorszego chwilowo wskaźnika jakości - ale ze znaczną korzyścią dla efektywności całego procesu sterowania optymalizującego, jak to pokazały pierwsze rezultaty badań symulacyjnych.

Ważnym przypadkiem występującym w warstwowej strukturze sterowania jest sytuacja, kiedy pewne spośród technologicznych wyjść procesowych leżą na istotnych, ważnych z ekonomicznego punktu widzenia ograniczeniach (np. maksymalna czy minimalna dozwolona zawartość określonego składnika w produkcie wyjściowym). Jeśli ograniczenie takie jest zawsze aktywne, to korzystnym rozwiązaniem może być zastosowanie odrębnego regulatora w warstwie regulacji nadrzędnej ("advanced control") do dynamicznej kontroli tego ograniczenia, nawet (a może przede wszystkim) jeśli cały proces prowadzony jest w stanie ustalonym. Warstwowa struktura regulacji odpowiadająca tej sytuacji przedstawiona jest na rys.4 (zaczepniętym z [24]). Przedstawiona struktura, ważna z praktycznego punktu widzenia, stawia określone, nowe wymagania przed projektantem algorytmów warstwy sterowania optymalizującego. W szczególności, algorytmy MZOAP w ich standardowej postaci (zarówno klasycznej jak i dualnej [19, 3, 4]) nie są tu stosowalne.

Przedmiotem badań było takie sformułowanie algorytmu MZOAP, aby był on stosowalny w przedstawionej strukturze. Sformułowanie to jest nietrywialne, wymagając sformułowania i identyfikacji nowego odwzorowania procesowego zawierającego w sobie pętlę regulacji kontrolowanych na ograniczeniach wyjść. Algorytm taki został sformułowany, łącznie z analizą warunków implementacji i warunków stosowalności w jego podstawowej wersji. Przeprowadzono też z powodzeniem wstępne badania symulacyjne, wykorzystując jako obiekt dwuskładnikową kolumnę destylacyjną [24].

5 Maszyna wnioskująca do inteligentnego sterowania, nadzoru (T. Traczyk)

Celem jest stworzenie prostego narzędzia umożliwiającego prowadzenie eksperymentów nad sterowaniem z wykorzystaniem bazy wiedzy. Programy wnioskujące nadające się do sterowania różnią się od systemów eksperckich ogólnego przeznaczenia:



Rys. 1: Struktura warstwowa z nadrzędną regulacyjną kontrolą ograniczeń

- podstawowym nośnikiem wiedzy nie są fakty, ale zmienne,
- zmienne mają wartości zmieniające się w czasie i mogące ulec przeterminowaniu,
- działanie systemu jest pobudzane zdarzeniami (zdarzeniem może być np. zmiana wartości zmiennej albo jakieś działanie zewnętrzne),
- system zapewnia obsługę historii i predykcji zmiennych (jest to wykorzystywane w konstruowaniu reguł sterujących),
- system działa w czasie rzeczywistym, co powoduje konieczność odpowiedniego zorganizowania wnioskowania, np. zrównoleglenia wnioskowania, postawienia limitów na czas trwania łańcuchów wnioskowania itp.

W pracy przyjęto następujące założenia:

- użycie rozwiązań możliwie najprostszych, ale w pełni funkcjonalnych,
- przygotowanie programu do badań w czasie symulowanym i rozpoczęcie badań, a następnie wykorzystanie zdobytych doświadczeń do konstrukcji systemu wnioskującego czasu rzeczywistego,
- maksymalne wykorzystanie możliwości istniejących narzędzi, w szczególności oparcie bazy wiedzy o relacyjną bazę danych i wykorzystanie istniejących mechanizmów dostępu do bazy danych.

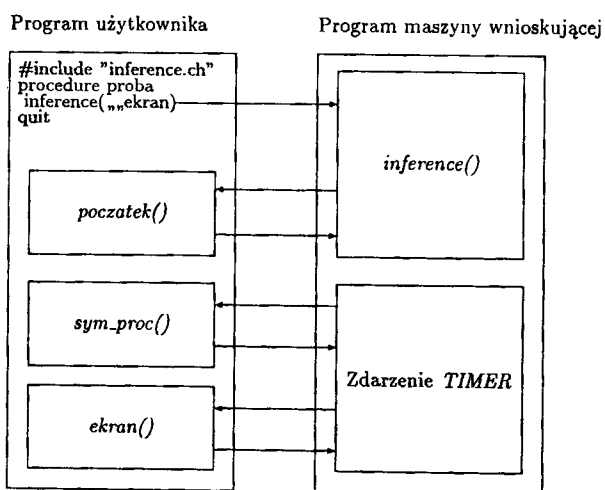
W toku prowadzonych prac opracowano założenia konstrukcyjne programu wnioskującego działającego w czasie symulowanym, opracowano i zrealizowano szczegółową strukturę bazy wiedzy, przygotowano program wnioskujący i zrealizowano następujące funkcje: wnioskowanie w przód, wnioskowanie wstecz, obsługę zdarzeń, podział bazy wiedzy na obiekty, obsługę historii

i predykcji, możliwość komunikacji z programami działającymi współbieżnie, obsługę logiki rozmytej. Ponadto wykonano podstawowe eksperymenty sprawdzające prawidłowość działania systemu wnioskującego, zaawansowano badania zastosowań systemu wnioskującego do sterowania złożonymi obiektami oraz rozpoczęto prace nad maszyną wnioskującą działającą w czasie rzeczywistym i tworzenie symulatora złożonego obiektu chemicznego, przeznaczonego do badań nad inteligentnym sterowaniem.

Maszyna wnioskująca na podstawie zmiennych – zawierających na przykład pomiary z procesu. Wnioskowanie jest sterowane zdarzeniami (np. zmianą wartości zmiennej) i oparte o *forward chaining*. Mechanizm *backward chaining* jest wykorzystywany do uzyskania zmiennych brakujących przy wnioskowaniu (nie mających jeszcze wartości albo mających wartość nieaktualną). W wyniku wnioskowania system wykonuje pewne akcje, np. ostrzega operatora, wysyła sygnały do sterowanego procesu itp.

Maszyna wnioskująca dla czasu symulowanego została zaprogramowana w języku Clipper, a wszystkie dane potrzebne do jej pracy (baza wiedzy) są zapisywane w bazie danych. Przesłanki i akcje reguł są zapisywane w postaci wyrażeń interpretowalnych przez Clipperowy operator macro. Język Clipper, choć nie jest już obecnie narzędziem nowoczesnym, nadaje się dobrze do realizacji wersji maszyny wnioskującej pracującej w czasie symulowanym, gdyż zawiera obsługę relacyjnej bazy danych wraz z mechanizmami indeksowania i szybkiego wyszukiwania danych oraz zawiera mechanizm macro, którego wykorzystanie pozwala uprościć program — nie jest konieczne tworzenie kodu interpretującego treść przesłanek i akcji.

Maszyna wnioskująca jest przygotowana w postaci biblioteki, zawierającej funkcje realizujące logikę maszyny, oraz bazy danych zawierającej tabelę maszyny. Użytkownik wypełnia tabelę bazy danych, tworząc bazę wiedzy. Tworzy program wnioskujący, wywołujący funkcję rozpoczynającą wnioskowanie. Dołącza do programu bibliotekę maszyny wnioskującej. Program może też zawierać funkcje stworzone przez użytkownika, np. symulujące sterowany proces, wykonujące specjalizowane obliczenia itp. Schemat współpracy programu maszyny wnioskującej z programem użytkownika przedstawia rysunek 2. W czasie uruchamiania programu maszyny



Rys. 2: Współpraca maszyny wnioskującej z programem użytkownika

wnioskującej przeprowadzono szereg prostych eksperymentów, które potwierdziły poprawność wnioskowania. Zaawansowano także prace mające sprawdzić możliwości zastosowania sterowania opartego o bazę wiedzy do złożonych obiektów [25]: reaktora chemicznego, zbiornika wodnego, fragmentu sieci zbiorników wodnych.

6 Podsumowanie

W opracowaniu niniejszym przedstawione zostały prace prowadzone w ramach grantu KBN "Algorytmy do sterowania nadrzędnego i inteligentnego nadzoru". Prace te wpisują się w tematykę konsekwentnie uprawianą w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, dotyczącą metodyki i algorytmów sterowania w strukturze warstwowej, a szczególnie sterowania nadrzędnego. Prace w ramach grantu są jeszcze w toku. Jednak można już powiedzieć, że uzyskano szereg nowych i ciekawych rezultatów, które zostały zasygnalizowane bądź nieco bliżej omówione w niniejszym referacie. Stanowiąc krok do przodu, prace te nie wyczerpują w żadnym razie tematyki, obszernej i nadal zawierającej wiele czekających na rozwiązanie ważnych dla praktyki problemów.

Literatura

- [1] Aguilar-Martin, J.: "Knowledge based real time supervision of dynamical processes (basic principles and methods)". *Technical Report no. 91148*, LAAS-CNRS, Toulouse, 1991.
- [2] Astrom, K.J.: "Intelligent control", *Proc. of the 1st ECC*, 1991, Grenoble, 2328-2339.
- [3] Brdyś, M., J.E. Ellis, P.D. Roberts: "Augmented integrated system optimization and parameter estimation technique: derivation, optimality and convergence". *IEE Proceedings-D*, **134**, (3), 1987, 201-209.
- [4] Brdyś, M.A., P. Tatjewski: "An algorithm for steady-state optimizing dual control of uncertain plants", *1st IFAC Workshop on New Trends in Design of Control Systems*, Smolenice 1994, 249-254.
- [5] Domański, P.D.: "Knowledge-Based Supervised Non Stationary Controllers", *ASI'94*, Patras, Grecja, czerwiec 1994, 275-282.
- [6] Domański, P.D.: "Fuzzy Logic Non Stationary PID Controller", *4 Fuzzy Dortmund Days*, Dortmund, RFN, 1994.
- [7] Domański, P.D.: "Fuzzy Logic Supervised Predictive Controller", *IASTED J. Control and Computers*, Vol. 22, No. 2, 1994, 51-57.
- [8] Domański, P.D., J. Arabas: "A Genetic Approach to the Linguistic Modelling", *Proc. SMC'95*, Zakopane, maj 1995, 1, 218-223.
- [9] Domański, P.D., J. Arabas: "On Generating the Fuzzy Rule Base by Means of Genetic Algorithm", przyjęte na *EUFIT'95*, Aachen, Niemcy, sierpień 1995.
- [10] Domański, P.D., W. Tadej, J. Arabas: "A Comparison of the Genetic and Neural Approaches to the Fuzzy Logic Based Modelling", przyjęte na *MMAR'95*, Międzyzdroje, wrzesień 1995.
- [11] Duda, J.: "Wybrane zagadnienia syntezy algorytmów sterowania nadrzędnego wolno-zmiennymi ciągłymi procesami przemysłowymi". *Zesz. Naukowe AGH*, zes. 56, Kraków, 1991.

- [12] Duda J., M.A. Brdyś, P. Tatjewski, W. Byrski: "Multilayer decomposition for optimizing control of technological processes", *7th IFAC/IFORS Symposium LSS'95*, London, 1995, 111-116.
- [13] Findeisen, W., F.N. Bailey, M. Brdyś, K. Malinowski, P. Tatjewski, A. Woźniak: *Control and Coordination in Hierarchical Systems*, J.Wiley, Chichester-New York, 1980.
- [14] Findeisen, W., I. Lefkowitz: "Design and application of multilayer control", *IV Congress IFAC*, Warszawa, 1969.
- [15] Lin, J., C. Han, P.D. Roberts and B. Wan: "New approach to stochastic optimizing control of steady-state systems using dynamic information". *Int. J. Control*, **50**, (6), 1989, 2205-2235.
- [16] Pułaczewski, J.: "Regulacja predykcyjna i jej przydatność dla kompensacji zakłóceń". *Arch. Autom. i Telemek.*, **33**, (4), 1988.
- [17] Pułaczewski, J.: "Dobór modelu lingwistycznego do danych doświadczalnych dla regulacji predykcyjno-lingwistycznej". *Raport IAIIS PW*, nr 95-3, Warszawa, styczeń 1995.
- [18] Pułaczewski, J.: "Sterowanie obiektu nieliniowego z odwrotnym modelem rozmytym", opracowanie wewnętrzne IAIIS PW, czerwiec 1995.
- [19] Roberts, P.D.: "An algorithm for steady-state system optimization and parameter estimation". *Int. J. System Science*, **10**, 1979, 719-734.
- [20] Takagi, T., M. Sugeno: "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Trans. on SMC*, **15**.
- [21] Tatjewski, P.: "Hierarchiczne metody rozwiązywania niewypukłych zadań optymalizacji i sterowania stanem ustalonym złożonych procesów". *Prace Naukowe Pol. Warsz., Elektronika*, zesz. 80, Warszawa, 1988.
- [22] Tatjewski, P.(red.): "Komputerowe metody projektowania, sterowania i monitorowania wielopoziomowych układów regulacji". *Sprawozdanie z projektu KBN nr 30607 91 01*, Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, 1992.
- [23] Tatjewski, P. and P.D. Roberts: "Newton-like algorithm for integrated system optimization and parameter estimation technique", *Int. J. Control*, **46**, (4), 1987, 1155-1170.
- [24] Tatjewski, P., M.A. Brdyś, J. Duda: "Optimizing control of uncertain plants with feedback controlled output constraints", *7th IFAC/IFORS Symposium LSS'95*, London, 1995, 123-128.
- [25] Tomkiewicz, J.: "Maszyna wnioskująca do celów sterowania – zastosowanie do sterowania trudnymi obiektami", *Praca dyplomowa IAIIS PW*, 1994.
- [26] Traczyk, T.: "Projekt wstępny maszyny wnioskującej przeznaczonej do sterowania", opracowanie wewnętrzne Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, 1994.
- [27] Traczyk, T.: "Maszyna wnioskująca do celów sterowania", *Raport IAIIS PW*, nr 95-5.
- [28] Wachowicz, E., J. Pułaczewski: "A new control algorithm with weather forecast for energy efficient potato storage", *Archives of Control Sciences*, zgłoszone do publikacji.
- [29] Wang, Li-Xin, J.M. Mendel: "Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples", *IEEE Trans. on SMC*, **22**, (6), 1992.