

**Witold BYRSKI, Wojciech GREGA, Andrzej TURNAU**

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI, KATEDRA AUTOMATYKI

**Zaawansowane algorytmy przetwarzania sygnałów, cyfrowego sterowania i optymalizacji w systemach dynamicznych****Dr hab.inż. Witold BYRSKI**

Od 1998r. zastępca kierownika Katedry Automatyki. Profesor ndz. AGH, uzyskał habilitację w zakresie automatyki i robotyki w 1994. Zakres zainteresowań komputerowe systemy sterowania procesami przemysłowymi. Zajmuje się metodami dokładnego odwzorowania stanu przy pomocy obserwatorów całkowitych i identyfikacją systemów dynamicznych z wykorzystaniem filtrów spłotowych i funkcji modulujących.



e-mail: wby@ia.agh.edu.pl

**Prof. dr hab.inż. Wojciech GREGA**

Ukończył AGH w Krakowie (1972), gdzie także uzyskał doktorat, habilitację i tytuł. Autor i współautor ok. 120 publikacji. Zajmuje się rozproszonymi układami sterowania, sterowaniem i modelowaniem systemów produkcji i przesyłu energii oraz przemysłowymi zastosowaniami informatyki. Kieruje Laboratorium Sterowania Katedry Automatyki AGH.



e-mail: wgr@ia.agh.edu.pl

**Dr hab.inż. Andrzej TURNAU**

Ukończył AGH w Krakowie. Od końca studiów pracuje w Katedrze Automatyki. Tam doktoryzował się (1975) i habilitował (2002) w zakresie automatyki i robotyki. Zajmuje się konstrukcją i aplikacjami algorytmów optymalnych i inteligentnych dla sterowania systemami mechatronicznymi w czasie rzeczywistym.



e-mail: atu@ia.agh.edu.pl

**Streszczenie**

Artykuł przedstawia prace badawcze prowadzone w ostatnich latach w zespole Laboratorium Sterowania, Katedry Automatyki. Prace dotyczą nowych zagadnień i algorytmów przetwarzania sygnałów pomiarowych dla celów dokładnej obserwacji stanu oraz nowych metod sterowania rozproszonego i sterowania optymalnego w układach nieliniowych, takich jak kompleksowe procesy wymiany masy i energii (proces destylacji, proces dystrybucji energii cieplnej, układ zbiorników, nagrzewnica powietrza), lewitacja magnetyczna, wahańdo zawieszona na wózku, ciężki łańcuch obciążony masą, trójwymiarowa suwnica i manipulator-robot.

**Słowa kluczowe:** dokładna obserwacja stanu, komputerowe systemy sterowania rozproszonego, systemy nieliniowe.

**Advanced algorithms for signal processing, digital control and optimization in dynamical systems****Abstract**

The paper presents research works conducted during last years by the team of Control Laboratory in the Department of Automatics. Researches are concerned with new algorithms of measurement signal processing for exact state observation as well as new distributed control methods and optimal control of nonlinear systems such as: mass and energy exchange systems (distillation process, heat energy distribution process, tank system, air blow heater), magnetic levitation, pendulum on a cart system, heavy chain with payload, 3D crane and robot - manipulator.

**Keywords:** exact state observation, distributed computer control systems, nonlinear systems.

**1. Wstęp**

Problematyka badawcza zespołu Laboratorium Sterowania jest bardzo obszerna i obejmuje: metody optymalizacji dynamicznej i statycznej dla układów o parametrach skupionych, rozłożonych i z opóźnieniem, optymalizację parametryczną regulatorów, algorytmy stabilizacji procesów dynamicznych, nowe algorytmy

dokładnej obserwacji stanu i identyfikacji parametrów, komputerowe sterowanie procesami w czasie rzeczywistym i systemy wizualizacji dla procesów chemicznych i energetycznych (proces destylacji, proces wielkopieczowy), algorytmy rozproszonego sterowania cyfrowego z zastosowaniem do komputerowego sterowania centralną siecią grzewczą i systemami energetyki cieplnej, metody i algorytmy sterowania układami magnetycznej lewitacji z zastosowaniami dla łożysk magnetycznych, metody szybkiego prototypowania, w tym rozwój oprogramowywania wspierającego automatyczne generowanie kodu sterowników cyfrowych, stabilność i sterowanie optymalne systemami nieliniowymi (wahańdo odwrócone, 3D suwnica, połączenie łańcuchowe), wielopozomowe i wielowarstwowe systemy komputerowego sterowania z wykorzystaniem systemu operacyjnego czasu rzeczywistego, matematyczna teoria sterowania dla układów abstrakcyjnych, metody sterowania systemami ruchu i transportu. Zespół ma na koncie szereg wdrożeń takich jak komputerowy system sterowania procesem destylacji węglowodorów, centralny system sterowania siecią grzewczą AGH czy systemy sterowania ruchem drogowym.

Badania te przyczyniły się do stworzenia w Laboratorium Sterowania wielu własnych stanowisk badawczych zaprojektowanych i zbudowanych przez pracowników Laboratorium. Niektóre z tych stanowisk są wykorzystywane również w procesie dydaktycznym z odpowiednio dostosowanym programem dla studiów inżynierskich, magisterskich, doktoranckich i podyplomowych.

Niniejszy artykuł prezentuje właśnie wybrane zagadnienia z bogatego dorobku zespołu, związane bezpośrednio z implementacją sterowania cyfrowego w fizycznych modelach procesów dynamicznych i szeroko pojętych systemach mechatroniki.

**2. Metody dokładnej obserwacji stanu**

Nowoczesne układy sterowania dynamiką obiektu coraz częściej wykorzystując regulatory stabilizujące wektor stanu, potrzebują informacji o wartościach jego składowych. Wymiar wektora stanu jest ściśle związany z rzędem obiektu, a więc z ilością jego niezależnych magazynów energii. W rozwiązaniach technologicznych nie zawsze możliwym jest pomiar wszystkich składowych stanu. Dla układów obserwowalnych, możliwym jest jednak ich programowe odtworzenie, tylko na podstawie pomiaru wektora wyjścia obiektu i jego i sterowania. Fakt odtwarzania zmiennych niemierzalnych poprzez algorytmy obliczeniowe uzasadnia dla obserwatorów nazwę „softsensory”. Stosowanie tych algorytmów umożliwia też wykonywanie innych zadań takich jak filtracja szumów, identyfikacja parametrów czy diagnostyka błędów. Stąd pojawiają się zastosowania obserwatorów np. w diagnostyce torów pomiarowo-kontrolnych.

Do estymacji wektora stanu od lat 60-tych używany był filtr Kalmana (lub obserwator Luenbergera), których struktura oparta jest o równanie różniczkowe lub różnicowe. W oparciu o bieżący pomiar wejścia i wyjścia obiektu obserwator generuje estymatę

stanu zmierzającą z czasem asymptotycznie do stanu rzeczywistego. Brak jest informacji o rzeczywistej wartości stanu.

Nowoczesna teoria sterowania i możliwości komputerów umożliwiają zastosowanie dokładnych metod obserwacji. W tych metodach struktura obserwatora związana jest bezpośrednio z definicją obserwowalności, a do opisu modelu i obserwatora wykorzystuje się operatory całkowe na skończonym odcinku czasu. Dodatkową pozytywną cechą takich operacji całkowych jest pomijanie wpływu dawnych zakłóceń, które występowały w przeszłości, a które już nie zakłócają przebiegu procesu. W równaniu różniczkowym taki okresowy wpływ zakłócenia skutkuje teoretycznie aż do nieskończoności. Obserwator całkowy działający na odcinku  $[0, T]$  odtwarza dokładną wartość stanu  $x(T)$ . Dla czasów  $t \geq T$  obserwator całkowy działający w formie przesuwanego okna pomiarowego, zbudowany tylko w oparciu o pomiar wejścia i wyjścia na zadanym odcinku czasu  $[t-T, t]$ , odtwarza dokładnie stan  $x(t)$ .

## 2.1. Całkowe dokładne obserwatory stanu

Przypomnijmy niektóre formuły dokładnego odtwarzania nieznannej, końcowej wartości wektora stanu  $x(T)$  za pomocą obserwatora całkowego, na podstawie pomiarów wejścia  $u$  i wyjścia  $y$  na skończonym odcinku czasu  $[0, T]$ .

Wektor stanu  $x(t)$  ma skończony wymiar  $n$ . Zakłada się, że liniowy, stacjonarny system jest znany (zidentyfikowany) i jest obserwowalny, ale warunek początkowy nie jest znany.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

gdzie  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^r$  i  $y(t) \in R^m$  dla  $\forall t \geq 0$ ,  $m < n$ . Macierze  $A$ ,  $B$ ,  $C$  mają odpowiednie wymiary.

Załóżmy, że mierzone są sterowanie  $u$  i wyjście  $y$  na przedziale  $[0, T]$ , gdzie  $T$  jest ustalonym przedziałem obserwacji. Naszym celem jest określenie stanu  $x(T)$ .

Przyjmuje się: przestrzeń stanów  $X = R^n$ , funkcyjną przestrzeń wyjść  $Y = (L^2(0, T))^m$ , i przestrzeń sterowań  $U = (L^2(0, T))^r$ .

Równanie dokładnego obserwatora całkowego, działającego w trybie on-line i odtwarzającego dokładną wartość aktualnego stanu  $x(t)$  ma postać dwóch całek

$$x(t) = \int_{t-T}^t G_1(T, T-t+\tau) y(\tau) d\tau + \int_{t-T}^t G_2(T, T-t+\tau) u(\tau) d\tau,$$

lub w wersji równoważnej:

$$x(t) = \int_0^T G_1(T, \tau) y(t-T+\tau) d\tau + \int_0^T G_2(T, \tau) u(t-T+\tau) d\tau.$$

Macierze funkcyjne obserwacji  $G_1^o(T, \tau)$ ,  $G_2^o(T, \tau)$  mają wymiary  $(n \times m)$  i  $(n \times r)$ , a ich elementy są funkcjami dwóch parametrów – ustalonego czasu obserwacji  $T$  i zmiennej  $\tau \in [0, T]$ . Z ostatniej postaci wynika, że taki obserwator reprezentuje okno o stałej szerokości  $T$  związane z macierzowymi funkcjami obserwacji  $G$ , przesuwane na tle pomiarów wzdłuż osi czasu i po obliczeniu całek dające stan  $x(t)$  dla  $t \geq T$ . Macierze  $G_1$ ,  $G_2$  nie zależą od bieżącego czasu  $t$  i muszą być policzone w przedziale  $[0, T]$  tylko raz (off-line), a następnie zapamiętane wystarczająco gęsto, aby zagwarantować dokładność numeryczną liczenia całek. Użyty sprzęt komputerowy musi być wystarczająco szybki, aby w jednym przedziale dyskretyzacji zdążyły się policzyć na przedziale  $T$  iloczyn funkcji  $G_1 y$  i  $G_2 u$  oraz ostateczne wartości dwóch całek (np. procedurą Simpsona).

Spośród wielu możliwych macierzy obserwacji  $G_1$  i  $G_2$  można wybrać parę  $G_1$  i  $G_2$ , która gwarantując dokładne odtwarzanie, będzie dodatkowo posiadała najmniejszą normę w sensie przestrzeni  $L^2$ . Norma taka będzie symbolizowała maksymalny możliwy błąd obserwacji, w przypadku pojawienia się zakłóceń

w pomiarach  $u$  i  $y$  (zakłóceń najgorszych, ograniczonych, znormalizowanych do kuli jednostkowej). Definiuje się postać normy obserwatora:

$$J = \int_0^T \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_1^{ij}(\tau))^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (g_2^{ij}(\tau))^2 \right] d\tau$$

$$\Phi(t) = e^{Wt} = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(t) & \Phi_{12}(t) \\ \Phi_{21}(t) & \Phi_{22}(t) \end{bmatrix}$$

gdzie  $g_1^{ij}$ ,  $g_2^{ij}$  są elementami macierzy  $G_1$ ,  $G_2$ .

$W$  jest macierzą Hamiltona (prim oznacza transpozycję)

$$W = \begin{bmatrix} A & BB' \\ C'C & -A' \end{bmatrix}.$$

Optymalne macierze obserwacji mają ostatecznie postać:

$$G_1^o(T, \tau) = M^{-1} \Phi_{11}'(\tau) C', \quad G_2^o(T, \tau) = M^{-1} \Phi_{21}'(\tau) B.$$

Odwrotność macierzy Grama  $M^{-1}$  dana jest formułą

$$M^{-1} = e^{AT} \left[ \int_0^T \Phi_{11}'(\tau) C' C e^{A\tau} d\tau \right].$$

Macierze funkcyjne  $G_1$ ,  $G_2$  dla wybranego czasu obserwacji  $T$  można policzyć off-line na przedziale  $[0, T]$  i następnie stosować on-line w wersji obserwatora z ruchomym oknem.

Norma obserwatora jest malejącą funkcją czasu obserwacji  $T$ , co oznacza, że dla krótkich czasów obserwacji posiada ona dużą wartość. Jest to potencjalnie niebezpieczne dla dokładnego odtwarzania stanu, gdyż w przypadku zjawienia się zakłóceń, zwiększy się też błąd odtwarzania stanu, szacowany wartością normy obserwatora. Dla minimalizacji błędów, okno obserwacyjne powinno, więc być jak najdłuższe. Zwiększa się jednak wtedy ilość obliczeń wewnątrz takiego okna i opóźnia się moment wyliczenia pierwszej obserwacji (realizacja pierwszego okna). Jeśli zakłócenia pomiarowe są nieobecne, lub pomijalnie małe, to okno można przyjąć tak małe jak to jest możliwe, bez wpływu na dokładne odtwarzanie stanu.

Formalnie obserwatory całkowe posiadają, więc same zalety. Ich teorię sformułowano w pracach [1, 2] i rozbudowywano sukcesywnie w wielu pracach np. [3, 4]. Dokładne obserwatory całkowe mają jednak również jedną wadę. Dla otrzymania on-line dokładnej wartości stanu wymagana jest duża ilość obliczeń wykonywanych na bieżąco. Dla wolnozmiennych procesów przemysłowych takich jak procesy chemiczne, w których zmienne procesowe próbkowane są np. raz na sekundę i dla mocy obliczeniowych nowoczesnych komputerów - nie stanowi to problemu. Istnieją jednak procesy szybkozmiennne (np. mechaniczne) w których częstotliwości próbkowania wynoszą kilkadziesiąt kHz a akcja sterująca ma być realizowana co 1 milisekundę (np. sterowanie głowicą dysku twardego wymaga częstotliwości próbkowania 14kHz). Mogą więc wystąpić ograniczenia możliwości obliczeniowych dla omawianych obserwatorów całkowych i obiektów wysokiego rzędu, gdy wartość całki w każdym przesuwającym oknie pomiarowym, wymaga obróbki tysięcy próbek/milisekundę.

Ponieważ mikrokontrolery DSP mogą realizować algorytmy sterowania oparte o rozwiązywanie równań różniczkowych, (metoda Eulera nie wymaga dużej ilości obliczeń), to powstaje pytanie, czy jest możliwym zbudowanie algorytmu **dokładnej** obserwacji stanu on-line w oparciu o bieżący pomiar wyjścia i wejścia obiektu sterowanego oraz różniczkowe (a nie całkowe) formuły przetwarzania sygnałów.

## 2.2. Różniczkowe dokładne obserwatory stanu

Analizując wzory na dokładny obserwator całkowy można wprowadzić różniczkową postać obserwatora z przesuwającym oknem. W tym celu zauważmy, że w każdej chwili czasu obserwator z przesuwającym oknem o szerokości  $T$  może być formalnie rozważany jako różnica dwóch obserwatorów z rozszerzaniem na bieżąco oknem. Początki obu okien zaczynają się w chwili  $t_0 = 0$ . Jeden z obserwatorów ma koniec w  $t$ , drugi w  $t-T$ . Otrzymuje się zależność:

$$x(t) = M^{-1} \cdot \left[ \int_{t-T}^t [\Phi_{11}'(T-t+\tau) C' y(\tau) + \Phi_{21}'(T-t+\tau) B u(\tau)] d\tau \right].$$

Jest to równoważne różnicy dwóch całek

$$x(t) = M^{-1} \left[ \int_0^t [\Phi_{11}'(T-t+\tau) C' y(\tau) + \Phi_{21}'(T-t+\tau) B u(\tau)] d\tau - M^{-1} \int_0^{t-T} [\Phi_{11}'(T-t+\tau) C' y(\tau) + \Phi_{21}'(T-t+\tau) B u(\tau)] d\tau \right]$$

Można pokazać, że po wprowadzeniu dwóch nowych  $n$ -wymiarowych zmiennych wektorowych  $\eta_1(t)$  i  $\eta_2(t)$ , spełniają one macierzowe równanie różniczkowe pierwszego rzędu o wymiarze macierzy stanu  $[2n \times 2n]$ , z zerowymi warunkami początkowymi:  $\eta_1(0) = 0$  i  $\eta_2(0) = 0$ ,

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1(t) \\ \dot{\eta}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A' & , & -C'C \\ -BB' & , & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C' y(t) \\ B u(t) \end{bmatrix} = -W' \eta(t) + \begin{bmatrix} C' y(t) \\ B u(t) \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} A & , & BB' \\ C'C & , & -A' \end{bmatrix},$$

którego rozwiązanie dla chwili  $t$  ma postać

$$\eta(t) = \int_0^t e^{-W'(t-\tau)} \begin{bmatrix} C' y(\tau) \\ B u(\tau) \end{bmatrix} d\tau,$$

a dla chwili wcześniejszej  $t-T$

$$\eta(t-T) = \int_0^{t-T} e^{-W'(t-T-\tau)} \begin{bmatrix} C' y(\tau) \\ B u(\tau) \end{bmatrix} d\tau$$

Z własności macierzy fundamentalnej wiadomo, że zachodzi

$$\Phi'(T-t+\tau) = e^{W'(T-t+\tau)} = e^{W'T} \cdot e^{-W'(t-\tau)}$$

Oznaczając wektor  $X(t)$  o wymiarze  $[2n \times 1]$  jako różnicę

$$X(t) = e^{W'T} \eta(t) - \eta(t-T),$$

można zauważyć, że stan oryginalny  $x(t)$  jest pierwszą składową ( $n$ -wymiarową) takiego wektora  $X(t)$  pomnożoną przez macierz  $M^{-1}$ .

$$X(t) = e^{W'T} \int_0^t e^{-W'(t-\tau)} \begin{bmatrix} C' y(\tau) \\ B u(\tau) \end{bmatrix} d\tau - \int_0^{t-T} e^{-W'(t-T-\tau)} \begin{bmatrix} C' y(\tau) \\ B u(\tau) \end{bmatrix} d\tau$$

$$x(t) = [M^{-1}, 0] X(t) = [M^{-1}, 0] e^{W'T} \cdot \eta(t) - [M^{-1}, 0] \eta(t-T)$$

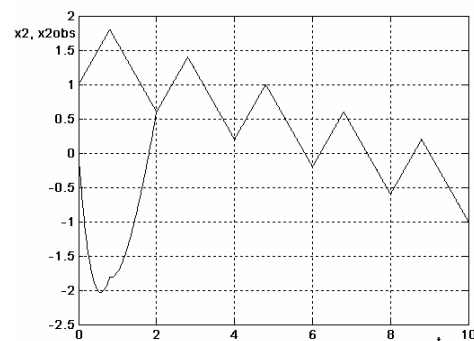
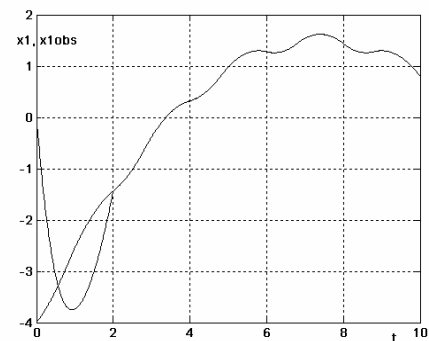
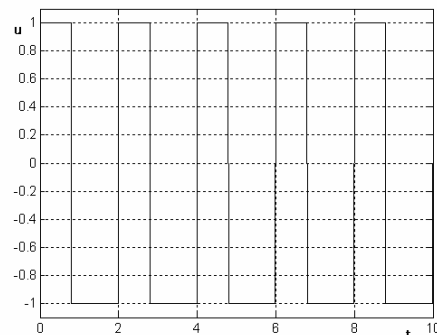
Stąd ostatecznie dla  $t \geq T$  otrzymuje się dwa równania do opisu *różniczkowego obserwatora dokładnego*:

$$\dot{\eta}(t) = -W' \eta(t) + \begin{bmatrix} C' y(t) \\ B u(t) \end{bmatrix}, \quad \eta(0) = 0$$

$$x(t) = [M^{-1}, 0] e^{W'T} \cdot \eta(t) - [M^{-1}, 0] \eta(t-T)$$

Równania te dają równoważną do całkowej różniczkową postać obserwatora z przesuwającym oknem. Równanie różniczkowe stanu obserwatora jest bez opóźnienia. Opóźnienie występuje tylko w algebraicznym równaniu wyjścia obserwatora. Dla każdego  $t$  równanie różniczkowe musi być rozwiązywane na bieżąco, a wartości  $\eta(t)$  w przedziale  $[t-T, t]$  muszą być pamiętane i użyte do obliczenia stanu dokładnego z równania wyjścia obserwatora.

Szczegóły dotyczące zagadnienia dokładnych obserwatorów różniczkowych będą przedmiotem publikacji w najbliższym numerze półrocznika Automatyka, zeszyt 2/06 (wyd. AGH). Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki przebiegu sterowania i dokładnego odtwarzania stanu za pomocą obserwatora różniczkowego dla układu II-go rzędu w oknie  $T = 2$ . Widać perfekcyjną jakość odtwarzania dla  $t > T$ .



Rys. 1. Efekty dokładnego odtwarzania stanu  
Fig. 1. The results of exact state observation

### 2.3. Stanowisko kolumny destylacyjnej

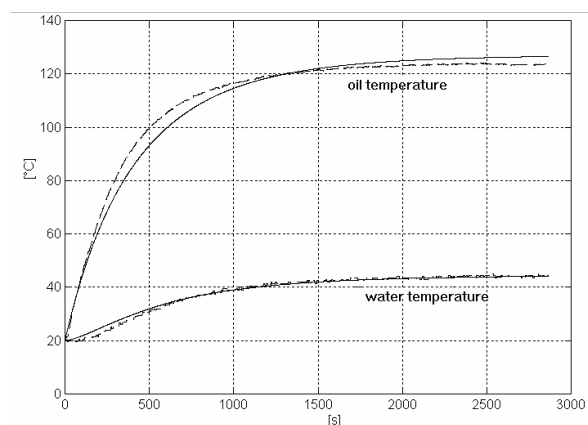
Doświadczenie, jakie część pracowników zespołu Laboratorium Sterowania uzyskała przy wdrażaniu komputerowego systemu sterowania rektyfikacją węglowodorów [5-8] oraz możliwości pozyskania funduszy w ramach programu TEMPUS spowodowały, że w połowie lat 90-tych zaprojektowano i zbudowano laboratoryjny model instalacji destylacji dwuskładnikowej. Duża ilość zmiennych pomiarowych (około 50), różnorodność czujników i moc aparatu wyparnego procesu 13.5 kW, spowodowały, że powstał skomplikowany układ wymiany masy i energii o rekonfigurowalnej strukturze, dla którego powstał też komputerowy system sterowania nadrzędnego z bezpośrednią warstwą sterowników PLC, nadrzędnym komputerem przemysłowym i siecią terminali dydaktycznych. W ramach prac dyplomowych powstawały różne wersje aplikacji oprogramowania do wizualizacji i sterowania typu SCADA, oraz do zdalnego dostępu przez Internet. Instalacja stała się obiektem, na którym testowano zaawansowane algorytmy filtracji, obserwacji, identyfikacji i sterowania, a wyniki stały się podstawą wielu publikacji np. [9, 10] i zostały wykorzystane w obronionych pracach habilitacyjnych, doktorskich i magisterskich.

Opis stanowiska.

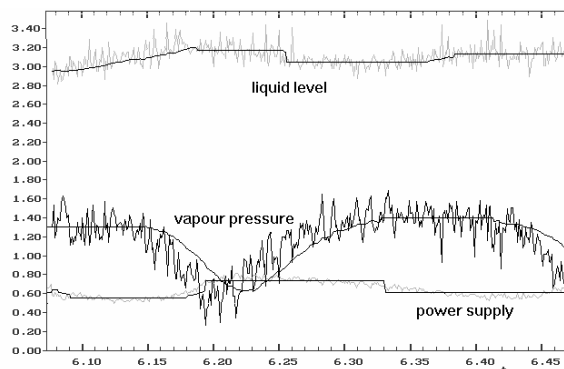
- szklana kolumna destylacyjna o 15 półkach, wysokości 1.8 m i średnicy 7 cm,
- wyparka olejowo-elektryczna o mocy 13,5 kW (3 sekcje po 3 grzałki 1.5 kW – prąd trójfazowy),
- tyrystorowy sterownik mocy,
- 5 szklanych skraplaczy wodnych dla par destylatu,
- 3 szklane wodne chłodnice dla cieczy wyczerpanej,
- wodna instalacja chłodzenia z sieci wodociągowej,
- powietrzna instalacja chłodzenia wody chłodzącej,
- trzy zbiorniki na surowiec, destylat i ciecz wyczerpaną,



Rys. 2. Schemat wyparki  
Fig. 2. Evaporator diagram



Rys. 3. Przykładowe odpowiedzi wyparki na skok mocy  
Fig. 3. Exemplary step responses of the electrical-oil evaporator



Rys. 4. Algorytm wykrywania zmian w sygnale, dla identyfikacji stanu ustalonego wyparki

Fig. 4. Application of change detection algorithms to data selection for evaporator steady-state model identification

Wszystkie sygnały pomiarowe są elektryczne i są transmitowane do sterowników PLC firmy GE Fanuc. Sterowniki komunikują się z nadrzędnym komputerem przemysłowym firmy Advantech. Testowane były systemy operacyjne QNX, Windows NT, Windows 2000. Zainstalowane są czujniki temperatury (Pt100), turbinkowe czujniki przepływu, czujniki ciśnienia i dwa czujniki składu destylatu i cieczy wyczerpanej (jedna konstrukcja działa w oparciu o pomiar szybkości przepływu fali ultradźwiękowej w próbce pomiarowej, a druga w oparciu o pomiar częstotliwości drgań rezonansowych U-rurki wypełnionej próbką i pobudzonej elementem piezoelektrycznym). Sterowanie przepływami odbywa się z wykorzystaniem pomp i mikrozaworów firmy Platon. Aplikacje SCADA wykonywano z użyciem pakietu Wonderware InTouch.

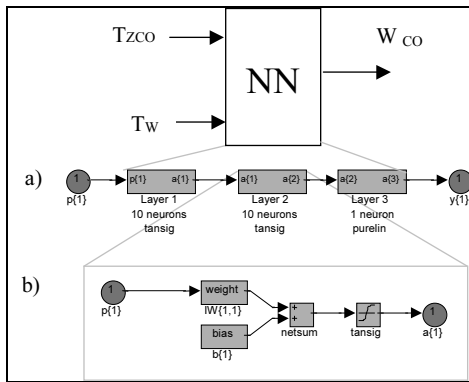


Rys. 5. Widok na instalację destylacji  
Fig. 5. The view on distillation rig

Stanowisko destylacji jest na bieżąco konserwowane, wymieniane są zużyte części i powstaje nowe oprogramowanie.

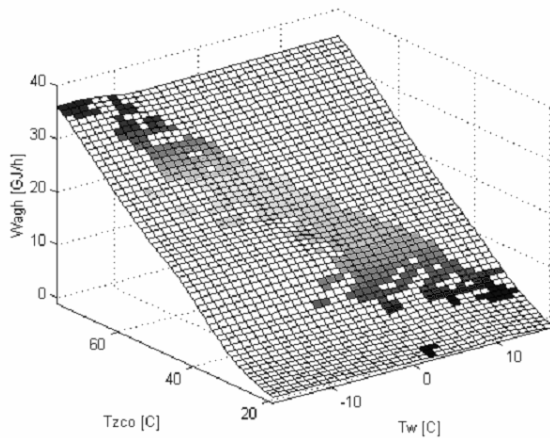


danych obejmujących stany quasi-ustalone, a następnie przeprowadzono na ich podstawie nauczanie sieci neuronowej. Struktura zastosowanej sieci przedstawiona jest na rysunku 7.



Rys. 7. Struktura sieci neuronowej (a) oraz struktura pojedynczej warstwy (b)  
Fig. 8. Structures of the neural network (a) and of the single layer (b)

Jako wynik procesu nauczania uzyskano przedstawioną na rysunku 8 płaszczyznę obrazującą zależność mocy  $W_{CO}(T_w, T_{zco})$ .



Rys. 8. Zależność mocy wymaganej w stanie ustalonym od temperatury zasilania oraz od temperatury zewnętrznej  
Fig. 8. Dependence of steady state power as a function of temperature of supply water and external temperature

Fragmety zaznaczone kolorami (ciemniejsze na rysunku czarno-białym) przedstawiają punkty pracy, w których rzeczywiście znajdowała się instalacja w rozpatrywanym okresie. Fragmenty białe uzyskano dzięki uogólniającemu działaniu sieci neuronowej. Model był wykorzystany dla uzyskania oszacowania zapotrzebowania na moc w prognozowanych warunkach temperaturowych. Jest również wykorzystywany do obliczenia oszczędności energii za okresy obniżenia temperatury zasilającej poniżej pogodowej temperatury referencyjnej, w okresach niewykorzystywania pomieszczeń uczelni.

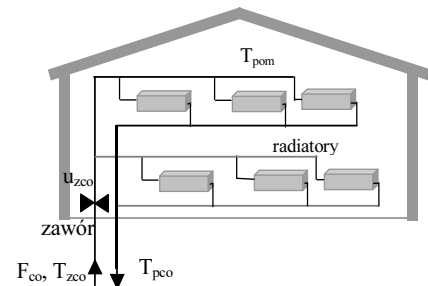
### 3.3. Model poboru energii przez budynek i sterowanie lokalne poborem energii

W pracach [14, 18] przedstawiono model dynamiczny poboru energii przez budynek. Model zawiera część liniową i nieliniową. Przy oznaczeniach jak na rys. 9, dobre przybliżenie dał model zawierający w części liniowej standardowy, dyskretny model ARMAX:

$$T_{pco}(i) = \frac{B_1}{A} z^{-k_1} F_{zco}(i) + \frac{B_2}{A} z^{-k_2} T_{zco}(i) + \frac{B_3}{A} z^{-k_3} T_{pom}(i),$$

$$A = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{nA} z^{-nA}, \quad B_1 = b_0 + b_1^1 z^{-1} + \dots + b_{nB1}^1 z^{-nB1}, \\ B_2 = b_0^2 + b_1^2 z^{-1} + \dots + b_{nB2}^2 z^{-nB2}, \quad B_3 = b_0^3 + b_1^3 z^{-1} + \dots + b_{nB3}^3 z^{-nB3}.$$

o strukturze:  $nA = 2$ ,  $nB_1 = 2$ ,  $nB_2 = 2$ ,  $nB_3 = 2$ ,  $k_1 = 2$ ,  $k_2 = 1$ ,  $k_3 = 6$ .



Rys. 9. Model systemu grzewczego pojedynczego budynku  
Fig. 9. Model of heating system for a single building

Pozostałe parametry modelu były identyfikowane na podstawie danych historycznych zarejestrowanych dla poszczególnych budynków.

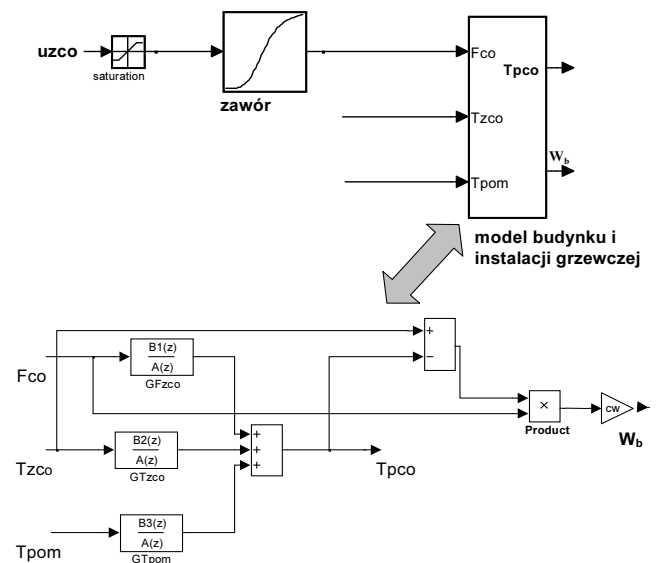
Część nieliniowa modelu (zawór, rys. 10) była modelowana jako funkcja:

$$F_{CO}(u) = \frac{k_1 - k_2}{1 + (u/u_0)^p} + k_2$$

gdzie  $u_0$  jest maksymalnym przepływem głównego zaworu budynku, a  $k_1$ ,  $k_2$  i  $p$  są parametrami. W ten sposób, modelowe zużycie energii przez budynek można określić jako:

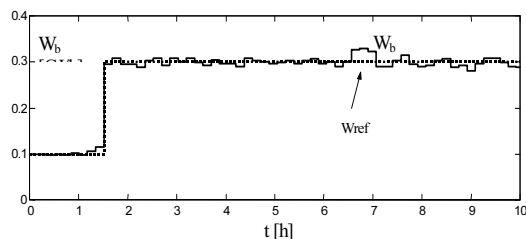
$$W_b(i) = F_{zco}(i) c_w (T_{zco}(i) - T_{pco}(i)).$$

Powyższy model wykorzystano dla syntezy lokalnego regulatora predykcyjnego. Regulator ten umożliwiał sterowanie nadążne za skokowymi zmianami  $W_{prof}$  (rys. 11) bez przeregulowania, a zatem bez nadmiernego poboru mocy grzewczej przez poszczególne budynki. Analizowano także problem stabilności nieliniowego regulatora predykcyjnego [14].



Rys. 10. Model symulacyjny budynku i instalacji grzewczej,  $T_{pom}$  – temperatura w pomieszczeniach,  $W_b$  – energia pobierana przez budynek,  $F_{co}$  – przepływ medium grzewczego

Fig. 10. Simulation model of a building and heating installation,  $T_{pom}$  – temperature in rooms,  $W_b$  – energy consumed,  $F_{co}$  – flow of the heating water



Rys. 11. Śledzenie za zadanym profilem energii dla pojedynczego budynku  
Fig. 11. Tracking a desired profile of energy consumption for single building

### 3.4. Realizacja nadrzędnego algorytmu sterowania optymalnego

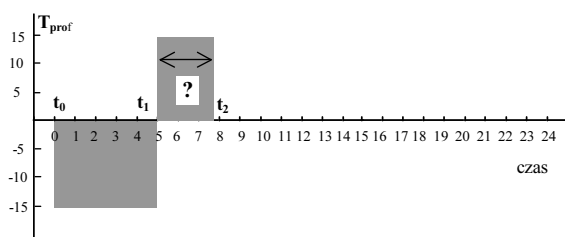
Problem optymalnego sterowania nadrzędnego można sformułować w sposób następujący [13].

Wykorzystując modele przesyłu i odbioru energii oraz predykcję temperatur  $T_{ZM}(t_1)$  i  $T_W(t_1)$  należy określić sterowanie nadrzędne (w przedziale czasu  $[t_0, t_2]$ , gdzie  $t_1$  przyjęto jako chwilę rozpoczęcia odtwarzania temperatury w budynkach (rys. 12)):

- minimalizujące zużycie energii ciepłej w przedziale  $[t_0, t_2]$ ,
- umożliwiające odtwarzanie średniego komfortu cieplnego budynków w chwili  $t_2$ , który to stan jest oceniany jako różnica pomiędzy energią pobieraną w stanie ustalonym ( $W_{CO}(t_2)$  w modelu poboru mocy), a energią pobieraną przez budynki:

$$|\hat{W}_{CO}(t_2) - W_{CO}(t_2)| \leq \varepsilon$$

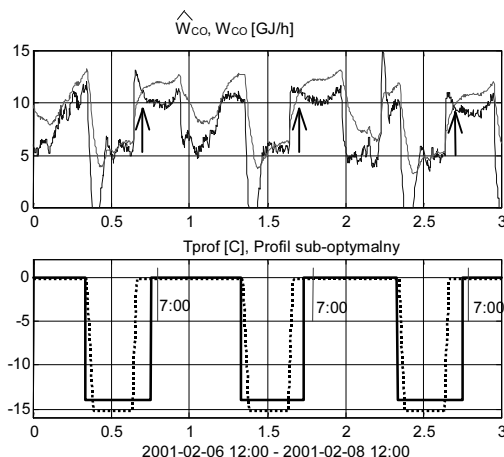
Oszacowanie energii pobieranej w danej chwili stanu przejściowego  $\hat{W}_{CO}(t_2)$  jest uzyskiwane jako suma poboru energii w poszczególnych budynkach (model dynamiczny z rozdz. 3.3). Podstawowymi zakłóceniami dla tego procesu są: zmienna temperatura zasilania z sieci miejskiej  $T_{ZM}$  oraz zmienna temperatura zewnętrzna  $T_W$ .



Rys. 12. Przykładowa sekwencja sterowania nadrzędnego węzłem cieplnym  
Fig. 12. An example supervisory control sequence

Sterowanie nadrzędne odtwarzające komfort termiczny rozpoczyna swoje działanie w nieznannej chwili  $t_1(i) = t_0 + (k - i)\Delta t$  (gdzie  $\Delta t$  jest przyjętym krokiem dyskretyzacji przedziału  $[t_1, t_2]$ ), przy ustalonym sterowaniu  $T_{ref} = T_{FXO} + T_{prof}$ ,  $T_{prof} > 0$ ,  $t_0 + k\Delta t = t_2$ ).

Na podstawie predykcji temperatur  $T_{ZM}$  i  $T_W$  w rozszerzonym w poszczególnych krokach przedziale czasu  $[t_1(i), t_2] = [t_0 + (k - i)\Delta t, t_0 + k\Delta t]$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , odbywa się badanie warunku spełnienia odtworzenia średniego komfortu cieplnego budynków przy końcu przedziału, przy ograniczeniu na  $T_{ZM}$ . Spełnienie tego warunku pozwala określić chwilę  $t_1$  rozpoczęcia odtwarzania komfortu termicznego. Szczegóły tego algorytmu podano w pracy [13], a na rys. 13 przykładowy wynik działania.



Rys. 13. Wyniki działania algorytmu optymalizacji  
(profil sub-optymalny – linia ciągła)

Fig. 13. Results of optimization algorithm operation  
(suboptimal profile – continuous line)

### 3.5. Ocena efektywności zastosowanego sterowania

W tej części badań próbowano znaleźć odpowiedź na pytanie o bilans energetyczny zastosowanej strategii obniżenia temperatury. Wspomniane w poprzednim punkcie modele umożliwiają wyznaczenie hipotetycznego zużycia energii w przypadku braku obniżenia.

Wyniki wstępnych eksperymentów prowadzonych w sezonie grzewczym 2002/03 dla kompleksu 10 budynków podano w tabeli 1 [20]. Zastosowanie nadrzędnego algorytmu sterowania sub-optymalnego dla systemu dystrybucji energii ciepłej o mocy szczytowej ok. 5 MW dało w efekcie oszczędności w postaci zmniejszenia zużycia energii, średnio, o ok. 10 %, przy zachowaniu komfortu cieplnego w budynkach.

Tab. 1. Przykładowe wyniki zastosowania sub-optymalnego algorytmu sterowania nadrzędnego [20]. Początek danych 1 października 2002, koniec sezonu 17 kwietnia 03

	Średnia $T_w$ [C]	Średnia $T_{zco}$ [C]	Energia Odczyt [GJ]	Liczba dni sterowania	Szacowana oszczędność [GJ]
X	8,67	35,28	5938	23	819
XI	7,60	37,39	5028	29	1283
XII	-3,46	51,44	11916	21	908
I	-0,46	49,35	11806	10	620
II	-2,36	55,17	10975	0	0
III	4,42	42,62	7092	27	926
IV	8,97	32,64	3759	3	62
		SUMA:	<b>56515</b>		<b>4618</b>

$T_w$  – temperatura zewnętrzna,  $T_{zco}$  – temperatura zasilania

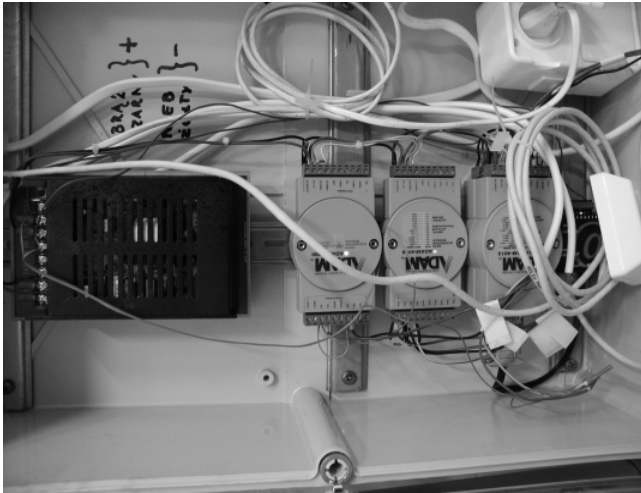
### 3.6. Rozproszony system monitorowania i sterowania dystrybucją energii ciepłej

Praktyczna weryfikacja opracowanych algorytmów i modeli odbywała się z wykorzystaniem rozproszonego systemu monitorowania i sterowania dystrybucją energii ciepłej w AGH w Krakowie. System ten został zrealizowany w latach 2000-2002

jako projekt zamawiany AGH. W roku 2005 ten ciągle rozbudowywany system obejmował już swoim zasięgiem 18 budynków dydaktycznych i administracyjnych AGH [17, 21].

Zrealizowany system sterowania ma rozproszoną strukturę wielowarstwową i integruje w sobie wiele nowoczesnych technologii, standardów przemysłowych reprezentatywnych dla współczesnej automatyki przemysłowej, wśród których należy wymienić:

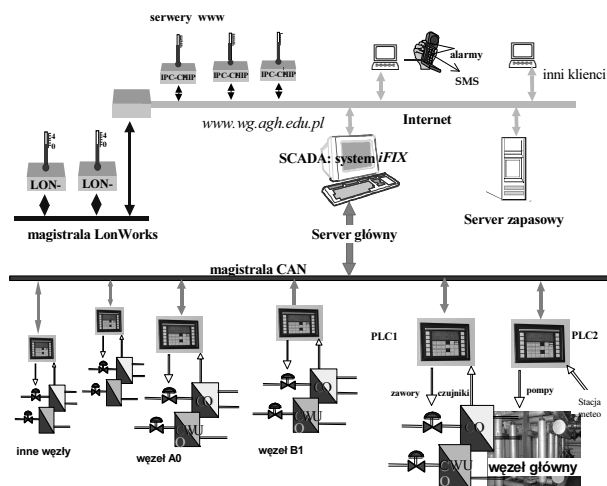
- magistrale przemysłowe CAN i LonWorks dla połączenia sterowników PLC i koncentratorów danych w odległych węzłach ciepłych,
- sieć Internet dla zdalnego monitorowania odległych węzłów, z wykorzystaniem modułowych węzłów pomiarowo-sterujących wykorzystujących technologię *IPC@Chip*. Prototyp takiego serwera skonstruowano dla zastosowań tego systemu, rys. 14, [22],



Rys. 14. Internetowy system pomiarowy  
Fig. 14. Internet measurement system

- przemysłowy, obiektowo zorientowany system SCADA (*iFIX*) wraz z przemysłową bazą danych (*iHistorian*).

Zrealizowany system monitorowania i sterowania składa się z następujących poziomów i podsystemów (rys. 15):

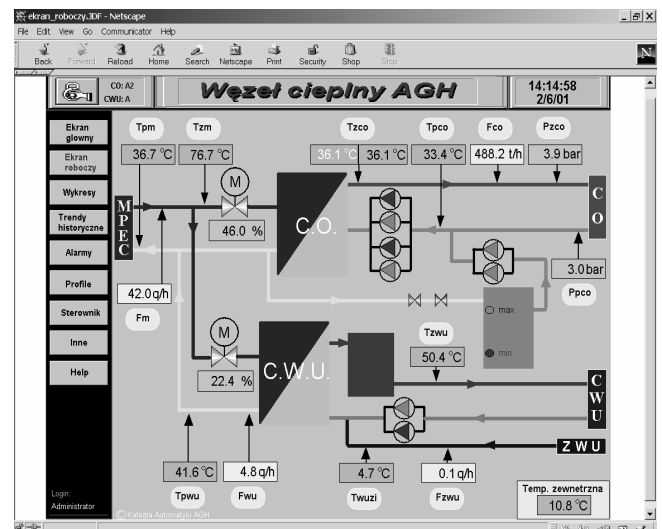


Rys. 15. System monitorowania i sterowania sieci grzewczej AGH  
Fig. 15. Monitoring and control system of AGH heating network

- warstwy bezpośredniego sterowania/zbierania danych z lokalnych węzłów ciepłych, której kluczowymi elementami są sterowniki PLC (12 szt.) wyposażone w interfejsy lokalnej sieci przemysłowej standardu CAN. Na tym poziomie odczytywane są cyklicznie dane o pracy węzłów, tutaj też realizowane są podstawowe urządzenia automatyki bezpośredniego sterowania:

stabilizacja temperatury w instalacji grzewczej i instalacji ciepłej wody, nadążanie za zadanymi przez warstwę nadrzędną parametrami, wykrywanie i sygnalizacja przekroczeń nominalnych parametrów pracy węzła,

- stacji zbierania danych i monitorowania („Serwer Główny”) zlokalizowanej w Dziale Technicznym AGH. Jest to komputer klasy PC o wysokich parametrach, na którym zainstalowano przemysłowy system SCADA. Zainstalowany system *iFIX* realizuje zadania typowe dla dyspozytorni energetycznej: zbieranie bieżących danych pomiarowych, gromadzenia danych o pracy węzła w bazach danych, wizualizacja stanu procesu (rys. 16) oraz wykrywanie i raportowanie stanów alarmowych. Zainstalowany jest także komponent dostarczający usługi interaktywne dla administratorów systemów energetycznych (Internet, sieć telefonii komórkowej). Serwer Główny realizuje także przepływ danych z lokalnych koncentratorów danych znajdujących się w budynkach poza zasięgiem sieci CAN,



Rys. 16. Ekran operatora systemu, [www.wg.agh.edu.pl](http://www.wg.agh.edu.pl)  
Fig. 16. System operator interface, [www.wg.agh.edu.pl](http://www.wg.agh.edu.pl)

- Zainstalowany na Serwerze Głównym komponent programowy *M2F* umożliwia realizację koncepcji szybkiego prototypowania algorytmów sterowania, czyli automatycznej generacji plików wykonywalnych czasu rzeczywistego odbywa się na podstawie graficznie budowanych modeli programu Simulink [23],
- lokalna sieć LonWorks monitorująca temperaturę w poszczególnych pomieszczeniach w budynku B1 i innych,
- serwer zapasowy – tworzący bazy danych, realizujący analizę danych i udostępniający dane o pracy węzła użytkownikom sieci Internet.

### 3.7. Podsumowanie

Kilkuletnie eksperymenty pokazały, iż optymalne prowadzenie procesu dystrybucji energii ciepłej, z wykorzystaniem możliwości jakich dostarcza istniejąca w AGH infrastruktura pomiarowo-sterująca, jest źródłem istotnych oszczędności.

Omówiony układ sterowania dużym, rzeczywistym systemem dystrybucji ciepła prezentuje potencjał tkwiący w zastosowaniu kompleksowego rozwiązania integrującego nowoczesne narzędzia automatyki i informatyki przemysłowej z modelami procesu. W szczególności, modele procesu identyfikowane dzięki danym historycznym umożliwiają osiągnięcie celu sterowania przy znacznym obniżeniu opłat za energię cieplną.

Zrealizowany układ sterowania umożliwia eksperymentalną weryfikację wyników prac badawczych, a także wspiera dydaktykę w zakresie metod i algorytmów sterowania komputerowego [24].



#### 4. Projektowanie odpornych algorytmów sterowania rozproszonego

Rozwój systemów komputerowych i metod transmisji danych spowodował, iż współczesne układy sterowania rzadko występują jako samodzielne jednostki sterujące. Zazwyczaj są one połączone poprzez sieci teletransmisyjne, wymieniając dane z innymi urządzeniami automatyki i tworzą systemy sterowania rozproszonego.

Tendencja ta jest wynikiem coraz większej dostępności wydajnych węzłów pomiarowo-sterujących, zawierających poza procesorem i układami peryferyjnymi, interfejsy sieciowe. Liczne zalety takiego rozwiązania i coraz niższe koszty „inteligentnych węzłów” w układach automatyki spowodowały ewolucję systemów sterowania ze struktury scentralizowanej do rozproszonej. Ewolucja ta w dalszym ciągu trwa [25, 26]. Aplikacje wykorzystujące sprzęt i oprogramowanie sieciowe do sterowania i monitorowania procesów pojawiają w coraz większej liczbie i w coraz bardziej zróżnicowanych zastosowaniach w całym przemyśle [27, 28], transporcie a nawet w zastosowaniach domowych. Obserwuje się dążenie do standaryzacji przemysłowych sieci przesyłu danych, zwiększania ich szybkości, uniezależniania się od rodzaju nośnika (sieci bezprzewodowe).

Rozproszone rozwiązania automatyki wnoszą do modelu dynamiki systemu sterowania pewne komplikacje, związane opóźnieniami transmisji danych lub nawet możliwością utraty danych. Wystąpienie tych zjawisk i ich charakter zależą od protokołu transmisji wykorzystywanej sieci telekomunikacyjnej, a w szczególności od stosowanej w tej sieci metody kontroli dostępu do magistrali. Zjawiska te można identyfikować, a następnie formułować problemy uodpornienia rozproszonego układu automatyki na tego typu zakłócenia, poprzez modyfikacje protokołów transmisji lub doskonalenie algorytmów sterowania. To ostatnie podejście wynika z obserwacji, iż pewne niedotrzymanie ograniczeń czasu rzeczywistego lub przejściowy deficyt informacji o stanie procesu nie dyskwalifikują rozproszonego systemu sterowania, a tylko obniżają jakość sterowania. A jakość tę można w pewnym zakresie przywrócić, poprzez właściwy wybór i strojenie algorytmu sterowania.

Poprawa jakości sterowania (w tym przywrócenie stabilności) w systemie rozproszonym może nastąpić poprzez [29]:

- zwiększanie przepustowości,
- poprawę determinizmu,
- właściwy dobór okresu próbkowania,
- algorytmiczną kompensację efektów wnoszonych przez sieć.

Szeroko opisane w literaturze metody formalnej analizy i syntezy algorytmów sterowania dla rozproszonych układów sterowania wykorzystują zarówno ciągłe, dyskretne jak i mieszane (hybrydowe) modele procesu i układu sterowania. Nawiązuje się do rezultatów rozwijanej od lat teorii układów z opóźnieniem oraz metod dynamicznych systemów odpornych. Podstawową własność rozproszonych układów sterowania – stabilność – najczęściej analizuje się z wykorzystaniem funkcji Lapunowa [29, 30]. Wykorzystuje się bądź ciągły model procesu i dyskretny model transmisji sygnału pomiarowego i sterującego ( traktowany jako periodyczne lub losowe zakłócenie), lub też dyskretny model procesu i dyskretny model transmisji sygnałów (pomiarowego). Dynamikę systemu liniowego, sterowanego poprzez sieć, w której występuje zjawisko utraty pakietów modeluje się jako asynchroniczny system dynamiczny (ADS *Asynchronous Dynamical Systems*).

Z bardziej specjalizowanych metod zastosowanych do analizy i projektowania regulatorów dla rozproszonych układów sterowania należy wymienić:

- predykcję stanu, często w powiązaniu z buforowaniem pakietów [31, 40],
- optymalne metody stochastyczne (LQG, łańcuchy Markowa),
- metody wykorzystujące model procesu (MRC- *Model Reference Control*), [36],
- harmonogramowanie okresów próbkowania STS (*Sampling Time Scheduling*),

- metody nawiązujące do teorii układów o niepewnych parametrach [30].

W Laboratorium Sterowania Katedry Automatyki zaprojektowano i zbudowano szereg badawczych i dydaktycznych stanowisk laboratoryjnych umożliwiających eksperymentalne testowanie metod i algorytmów sterowania rozproszonego. Są to systemy sterowania:

- układem zbiorników przez sieć LonWorks [33],
- układem zbiorników przez sieć GPRS [34],
- modelem helikoptera przez sieć CAN [35],
- nagrzewnicą powietrza przez sieć Ethernet i LonWorks [36],
- kwasowością mieszaniny (pH) przez sieć WorldFIP [25],
- monitorowanie i sterowanie klimatem w szklarni (przez sieć Internet).

Opis i przykład wykorzystania jednego ze stanowisk przedstawiono poniżej. Eksperymenty prowadzi się również z wykorzystaniem rozproszonego systemu monitorowania i sterowania dystrybucją energii cieplnej [37].

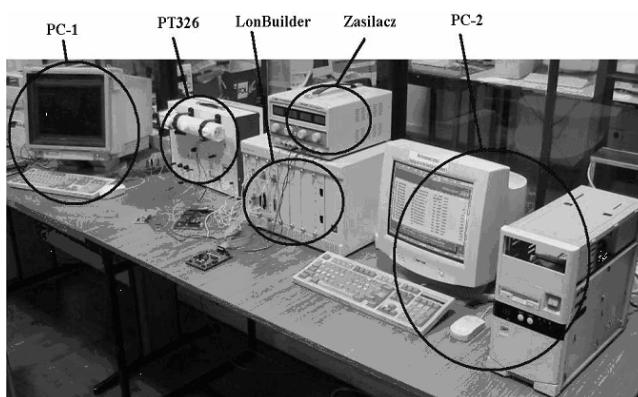
##### 4.1. Rozproszone sterowanie modelem nagrzewnicy powietrza

Typowe stanowisko laboratoryjne wymaga integracji kilku komponentów:

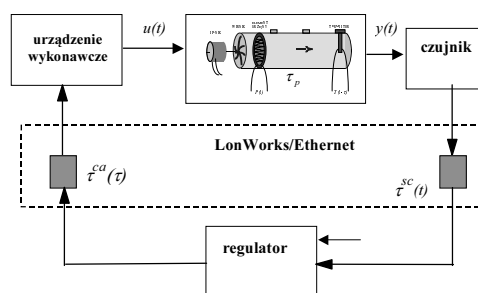
- sterowanego procesu (laboratoryjnego modelu), zawierającego także interfejs we/wy,
- kanału transmisji danych (przewodowego lub bezprzewodowego),
- zdalnego regulatora,
- węzła sieci generującego ruch w sieci (zakłócenie).

Oprogramowanie obejmuje: moduły integracji podsystemów (np. interfejsy OPC, ActiveX itp), środowisko do projektowania i symulacji algorytmów sterowania, narzędzia do monitorowania ruchu w sieci.

Przykład takiego stanowiska przedstawiony jest na rys. 17 i rys. 18.



Rys. 17. Sterowanie nagrzewnicą przez sieć LonWorks  
Fig. 17. Controlling a heating tube via LonWorks network



Rys. 18. Schemat laboratoryjnego stanowiska badawczego  
Fig. 18. Example configuration of the laboratory experiment

W tym przypadku chodzi o sterowanie rozproszone modelem nagrzewnicy powietrza, z wykorzystaniem sieci LonWorks lub Ethernet. Zadaniem zdalnego regulatora jest wypracowanie sterowania, umożliwiającego nadążanie temperatury powietrza wylotowego z nagrzewnicy za żądanym, zmiennym w czasie profilem temperatury.

Uzależnienie opóźnienia w sieci Ethernet od obciążenia jest często używane jako argument wykluczający ten standard z zastosowań przemysłowych. Jednak liczne zalety tego standardu spowodowały, że podjęto próby opracowania rozwiązań, w znacznym stopniu eliminujących powyższe wady i zbliżających ten standard do rozwiązań czasu rzeczywistego [36]. Proponowane usprawnienia to:

- wydzielenie sieci Ethernet wyłącznie do celów sterowania,
- ograniczenie opóźnień i zwiększenie przepustowości poprzez podnoszenie szybkości transmisji (100 Mb/s, 1Gb/s),
- poprawa determinizmu, poprzez wprowadzenie przełączników (*switch*), czyli urządzeń umożliwiających chwilowe zestawienie dedykowanego połączenia „punkt-do-punktu”,
- wykorzystanie szybszego protokołu UDP/IP zamiast TCP/IP,
- wprowadzenie priorytetyzacji pakietów (norma IEEE 802.1p), poprzez uzupełnienie typowej ramki Ethernet polem priorytetu,
- algorytmiczna kompensacja opóźnień.

## 4.2. Projektowanie algorytmu zdalnego regulatora

Algorytmiczną kompensację opóźnień zastosowano w przypadku omówionego poniżej rozproszonego układu sterowania nagrzewnicą powietrza. Przy projektowaniu rozproszonego algorytmu sterowania zrealizowano następujące kroki:

- KROK 1: wybór modelu dynamiki rozproszonego układu sterowania i identyfikację jego parametrów (w tym identyfikację opóźnień wnoszonych przez sieć).
- KROK 2: oszacowanie maksymalnych opóźnień kanału transmisji danych i innych istotnych parametrów układu sterowania.
- KROK 3: wybór i strojenie regulatorów z wykorzystaniem metod kompensacji opóźnień.
- KROK 4: implementacja i testowanie wpływu efektów wnoszonych przez sieć na jakość sterowania.

### KROK 1:

Zlinearyzowany model nagrzewnicy można przedstawić w postaci równań stanu lub w postaci transmitancji [36], gdzie sterowaniem jest moc dostarczona do elementu grzejnego, a wyjściem jest temperatura powietrza w punkcie zamocowania czujnika.

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-s\tau^p}$$

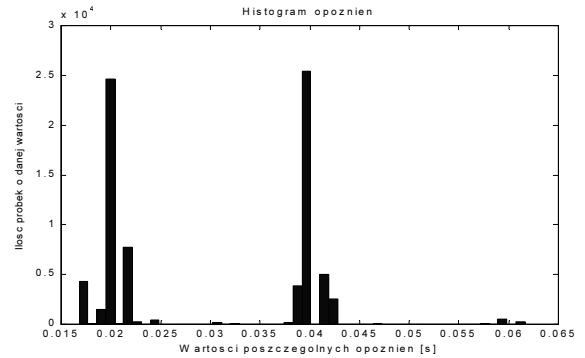
Rozważany model nagrzewnicy charakteryzował się następującymi parametrami:  $T_1 = 1.2$  s,  $T_2 = 0.036$  s,  $\tau^p = 0.24$  s,  $K = 6.7$ .

### KROK 2:

Rys. 19 przedstawia uzyskane doświadczalnie statystyki czasu przesyłu danych w przez sieć laboratoryjną Ethernet.

Stwierdzono doświadczalnie, że zmiany w czasie opóźnień wnoszonych przez sieć, szczególnie dla przypadku z rys. 19 są wolne w stosunku do dynamiki procesu. W związku z tym, do dalszej analizy przyjęto model układu z opóźnieniem stałym, lecz niepewnym, o postaci:

$$\tau^{\min} \leq \tau \leq \tau^{\max}, \quad \tau = \tau^{sc} + \tau^{ca} + \tau^p.$$



Rys. 19. Sieć słabo obciążona,  $\tau^{\min} = 0.016$ ,  $\tau^{\max} = 0.062$

Fig. 19. Weak loaded network,  $\tau^{\min} = 0.016$ ,  $\tau^{\max} = 0.062$

### KROK 3:

Jako regulator wybrano predyktor Smitha [25, 36, 39, 40]. Transmitancja tak zmodyfikowanego regulatora jest w postaci:

$$R^*(s) = \frac{R(s)}{1 + R(s)H(s)(1 - e^{-s\tilde{\tau}})}$$

$\tilde{H}(s)$  - oznacza umieszczony w regulatorze model części procesu bez opóźnienia, a  $\tilde{\tau}$  - model opóźnienia,  $R(s)$  - to model regulatora liniowego.

Analizę wrażliwości predyktora Smitha na zmiany opóźnienia przeprowadzono wykorzystując wskaźnik:

$$Q(s) = \frac{R(s)\tilde{H}(s)}{1 + R(s)\tilde{H}(s)},$$

który jest transmitancją stabilnego układu zamkniętego, w przypadku pełnej zgodności modelu z procesem.

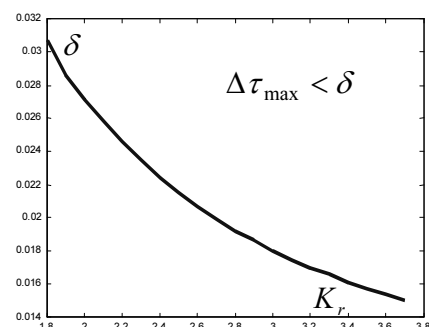
Wykorzystano także następujące twierdzenie [4.12]:

Gdy dla układu zamkniętego z dokładnym modelem ( $H(s) = \tilde{H}(s)$ ) spełnione jest

$$|Q(j\omega)| < 1 \quad \forall \omega \geq 0 \quad \text{oraz} \quad \lim_{\omega \rightarrow \infty} |Q(j\omega)| < 1/2$$

to istnieje takie dodatnie  $(\Delta\tau)_{\max}$ , że układ jest asymptotycznie stabilny dla każdego  $|\Delta\tau| < (\Delta\tau)_{\max}$ , gdzie  $\Delta\tau = \tau - \tilde{\tau}$ .

Rysunek 20 przedstawia oszacowanie dopuszczalnego zakresu niepewności opóźnienia zakres  $\Delta\tau$ , dla danej wartości współczynnika wzmocnienia regulatora PID.

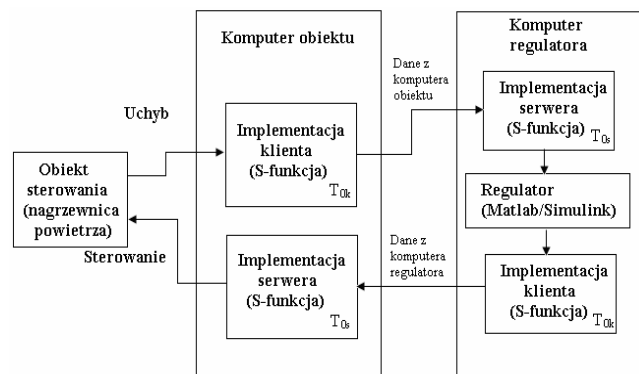


Rys. 20. Maksymalne odchylenie opóźnienia od wartości średniej

Fig. 20. Estimation of the delay mismatch

**KROK 4:**

Eksperymenty potwierdzające stabilne zachowanie się układu sterowania były prowadzone w układzie przedstawionym na rys. 21, z wykorzystaniem środowiska czasu rzeczywistego Simulink/RTW/RTWT.



Rys. 21. Schemat przesyłania danych w układzie sterowania rozproszonego [41]

Fig. 21. Data flow for distributed control system [41]

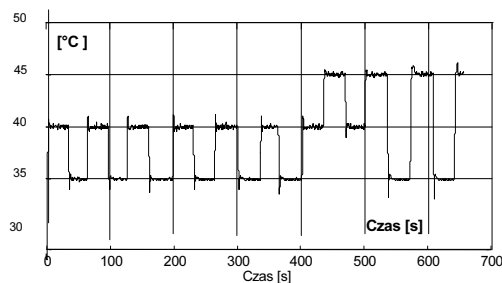
Dla zapewnienia prawidłowego przesyłu danych w czasie rzeczywistym zrealizowano następujące moduły przetwarzania danych.

**Implementacja klienta** – S-funkcja w Matlab/Simulink zawierająca implementację klienta TCP lub UDP. Jej zadaniem jest wysyłanie danych z czasem próbkowania  $T_{0k} = 0.01s$  z komputera regulatora do komputera obiektu, po zakodowaniu ich w odpowiednim formacie.

**Implementacja serwera** – S-funkcja w Matlab/Simulink zawierająca implementację serwera TCP lub UDP. Jest odpowiedzialna za odbieranie danych z okresem próbkowania  $T_{0s}$ , które wysyła do niej klient z komputera obiektu, po zdekodowaniu ich, podaje uchyb oraz średnie opóźnienie.

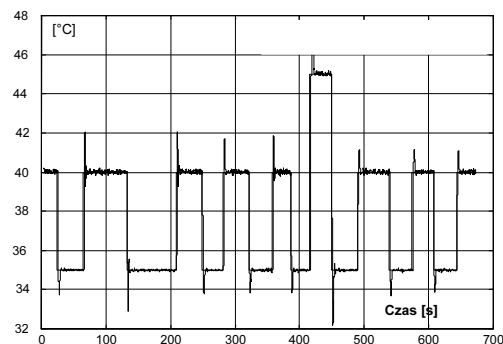
**Regulator** – zbudowany w środowisku Matlab/Simulink, jako predyktor Smith'a. W obu przypadkach zastosowano protokół TCP/IP, ale z wyłączonym algorytmem Nagle'a, który powoduje zbędne opóźnienia przy przesyłaniu krótkich komunikatów.

Na rysunku 22 przedstawiono wyniki eksperymentu – zadania śledzenia za zadanym prostokątnym profilem temperatury przy stałym opóźnieniu  $\tau = 0.3s$  i predyktorze Smitha w konfiguracji scentralizowanej.



Rys. 22. Nadążanie za profilem temperatury dla stałego opóźnienia  
Fig. 22. Tracking the temperature profile for fixed delay

Dla przykładu z rys. 23 zastosowano konfigurację rozproszoną z wolnozmennym w czasie opóźnieniami losowymi o charakterystyce z rys. 20 i regulatorze uodpornionym dla  $|\Delta\tau| = 0.028s$ . Wynik ten potwierdza odporną stabilność układu.



Rys. 23. Nadążanie za profilem temperatury dla niepewnego opóźnienia  
Fig. 23. Tracking the temperature profile for uncertain delay

### 4.3. Podsumowanie

Sterowanie z wykorzystaniem przewodowych i bezprzewodowych technologii telekomunikacyjnych jest kolejnym etapem rozwoju układów sterowania i tworzy nową ich klasę.

Zalety tych rozwiązań przeważają nad niekorzystnymi zjawiskami, jakich niekiedy doświadczamy stosując układy rozproszone, takimi jak opóźnienia transmisji danych lub utrata danych. Wystąpienie tych zjawisk, ich charakter i intensywność zależą od protokołu transmisji w wykorzystywanej sieci a także od warunków środowiska, w którym transmisja się odbywa.

Na przykładzie popularnego protokołu Ethernet, pokazano, że może on z powodzeniem zostać wykorzystany do sterowania procesami o stosunkowo krótkich stałych czasowych. Warunkiem jest przeprowadzenie analizy wpływu rozproszenia w różnych aspektach (opóźnienia, zagubienie pakietów, odwrócenie kolejności dostarczania pakietów), próbując w kolejnych krokach projektowania uzyskać odpowiedź na pytanie: czy i w jakim stopniu można układ sterowania uodpornić na te niekorzystne efekty?

Zastosowanie predyktora Smith'a jako algorytmu kompensacji opóźnień wraz z odpowiednią procedurą uodpornienia układu na niezgodność czasową dało dobre wyniki kompensacji opóźnień i stabilną pracę układu sterowania.

W pracy [41] przedstawiono wykorzystanie opisanego wyżej stanowiska badawczego do eksperymentów sterowania nagrzewnicą powietrza przez sieć LonWorks, a w pracy [42] omówiono wykorzystanie tych stanowisk w dydaktyce.

### 5. Sterowanie układami mechatronicznymi

Mechatronika to gałąź inżynierii zajmująca się układami mechaniczno-elektronicznymi wyposażonymi w oprogramowanie sterujące. W urządzenia mechaniczne wmontowuje się mikrosterowniki i inne zaawansowane elektroniczne komponenty. Tak więc mechatronika obejmuje sobą każdy nowy aspekt inżynierii. Wykorzystywane układy elektryczne i elektroniczne to moduły mocy, silniki elektryczne, karty wejścia/wyjścia, specjalizowane przemysłowe układy sterujące, czujniki pomiarowe oraz komputery PC. Istotnymi elementami obiektów są składniki informatyczne, a więc systemy operacyjne oraz oprogramowanie do sterowania w czasie rzeczywistym, przeważnie MS Windows z pakietem MATLAB/Simulink, z przybornikami RTW i RTWT lub RT-CON. Sterowane obiekty różnią się charakterystykami elementów mechanicznych, szczególnie ze względu na tarcie oraz sposób przekazywania napędu. Ilość sygnałów sterujących może być równa lub mniejsza od liczby stopni swobody układu.

Przy budowie stanowisk badawczych mechatroniki przedmiotem zainteresowania jest nie tylko sama konstrukcja mechaniczna urządzenia, wspomaganą lub zastępowaną elektroniką, ale przede wszystkim warstwa algorytmiczna, programowa stanowiąca główne jądro urządzenia, a także jej umiejscowienie i realizacja sprzętowa. Przyjrzyjmy się zatem różnym metodom sterowania

oraz dostępnym w Katedrze Automatyki stanowiskom badawczym i obiektom.

## 5.1. Sterowanie optymalnoczasowe

Szybki rozwój sprzętu komputerowego stwarza realną szansę sięgnięcia do złożonych i skomplikowanych metod regulacji. Nie chodzi tu bynajmniej o popisywanie się w nauce możliwością użycia trudnej teorii w praktyce, lecz o odniesienie prawdziwych korzyści przy rozwiązywaniu na bieżąco problemów optymalizacyjnych, gdy regulatorem staje się komputer działający w środowisku czasu rzeczywistego, lub przynajmniej spełniający w przybliżeniu wymagania czasu rzeczywistego. W wielu przypadkach osiągnięcie celu sterowania w możliwie krótkim czasie ma pierwszorzędne znaczenie. Za przykład może posłużyć robot-manipulator wykonujący wielokrotnie te same czynności (w procesach spawania, malowania czy klejenia). Minimalizacja cyklu repetycji pozwala zwiększyć efektywność jego wykorzystania. Podobnie pozycjonowanie głowicy czytającej dysku ma być nie tylko dokładne, ale przede wszystkim szybkie. Regulator optymalnoczasowy może pracować efektywnie dla systemu nieliniowego wysokiego rzędu, tak jak pokazano w pracy [48] dla trójwymiarowej suwnicy będącej układem rzędu dziesiątego. Szczególnie interesujące są badania algorytmów optymalnych uzyskiwanych dla modeli dynamicznych systemów mechatronicznych zbudowanych jako systemy otwarte do prowadzenia pomiarów stanu i generowania sterowań.

Sterowanie w pętli otwartej i regulację optymalnoczasową stosowano przede wszystkim dla systemu wahałda na wózku (rys. 24) i tu zebrano najbogatsze doświadczenia [50, 52, 53]. Stan systemu jest wektorem czterowymiarowym  $x = \text{col}(x_1, x_2, x_3, x_4)$ , gdzie  $x_1$  jest położeniem wózka mierzonym (w metrach) od środka szyny;  $x_2$  jest kątem (w radianach) między kierunkiem „pionowo do góry” a wahałdem. Dolnemu położeniu ramienia wahałda odpowiada  $x_2 = \pm\pi$  rad;  $x_3$  jest prędkością wózka (mierzona w metrach na sekundę);  $x_4$  jest prędkością kątową wahałda (w radianach na sekundę);  $u$  jest siłą sterującą przyłożoną do wózka (w niutonach), przyjmującą wartości z przedziału  $[-u_{\max}, u_{\max}]$ . Można przyjąć z niewielkim błędem, że siła  $u$  jest proporcjonalna do momentu obrotowego silnika elektrycznego, a moment jest proporcjonalny do prądu płynącego przez uzwojenie wirnika. Zatem silnik przetwarza proporcjonalnie prąd na siłę;  $m$  jest sumaryczną masą wahałda i wózka,  $l$  jest odległością pomiędzy środkiem masy układu a osią obrotu wahałda, która jest równocześnie środkiem masy wózka.  $T_c$  jest siłą tarcia wózka,  $D_p$  jest momentem tarcia ruchu obrotowego wahałda. Równania dynamiki mają następującą postać:

$$\ddot{x}_1 = \frac{(J/m + l^2)(u - T_c - ml\dot{x}_2^2 \sin x_2) + l \cos x_2 (mlg \sin x_2 - D_p)}{J + ml^2 \sin^2 x_2}$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{(u - T_c - ml\dot{x}_2^2 \sin x_2) l \cos x_2 + mlg \sin x_2 - D_p}{J + ml^2 \sin^2 x_2}$$

Parametry systemu wahałda na wózku przedstawiają się następująco:  $m = 0.56$  kg – masa wózka i wahałda,  $m_c = 0.47$  kg – masa wózka,  $m_p = 0.09$  kg – masa wahałda,  $l = 0.0143$  m – odległość pomiędzy środkiem masy wózka i wahałda a osią wahałda,  $F_s = 1.7$  N – tarcie statyczne (nie używane w modelu!),  $f_c = 0.22$  Ns/m – współczynnik tarcia ruchu liniowego wózka,  $f_p = 2.5 \cdot 10^{-4}$  Nms/rad – współczynnik tarcia ruchu obrotowego wahałda,  $J = 0.0025$  kgm<sup>2</sup> – moment bezwładności wózka i wahałda względem ich środka masy,  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> – przyspieszenie ziemskie,  $v_c$  – prędkość wózka w m/s, SEM =  $-1.4v_c$  V – siła

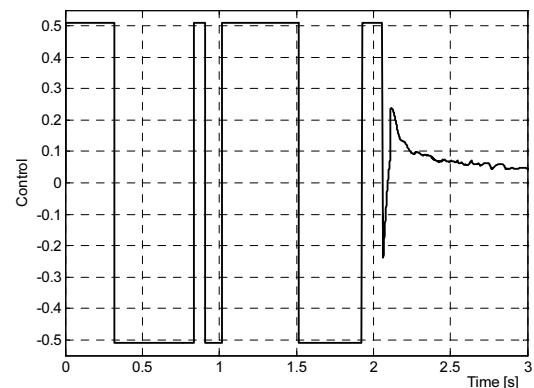
elektro-motoryczna silnika,  $u$  (PWM) =  $24 \cdot 0.5V$  – napięcie z zasilacza PWM (0.5 to wypełnienie sygnału PWM na wyjściu wzmacniacza),  $u_{\max} = (24 \cdot 0.5 - 1.4v_c) \cdot 0.31$  N – bezwzględna wartość maksymalnej siły sterującej.



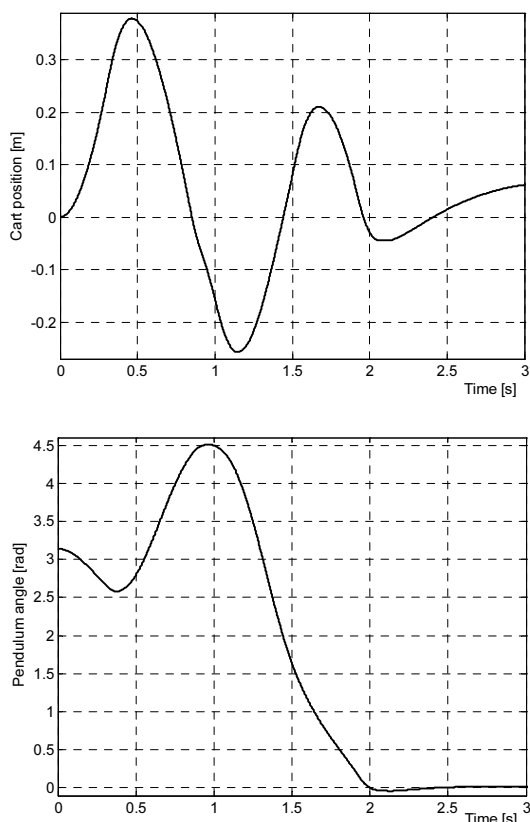
Rys. 24. Stabilizowany system wahałda na wózku (w górnym niestabilnym punkcie równowagi) jest odporny na zakłócenie  
Fig. 24. The stabilized pendulum-cart system in an upright unstable equilibrium point is robust while disturbed by a finger

Nadmienić trzeba, że system ten mimo pozornej prostoty jest silnie nieliniowym układem sterowania czwartego rzędu, a zadania sterowania przy wyborze celu w niestabilnych punktach równowagi, stają się trudnymi i złożonymi numerycznie procedurami. Nie wchodząc w szczegóły algorytmu numerycznego zilustrujemy kształt sterowania optymalnego i trajektorii optymalnoczasowych będących odpowiedziami układu na to sterowanie. W końcowej fazie sterowania po czasie 2.1 sekundy sterowanie układem przejmuje regulator LQ i utrzymuje wahałdo w górnym niestabilnym punkcie równowagi a wózek sprowadza na środek szyny. Tę fazę sterowania pokazano właśnie na rys. 24. Uczestnik pokazu wytrąca ręką wahałdo z położenia równowagi, a regulator LQ skutecznie temu przeciwdziałają.

Rys. 25 pokazuje sterowanie optymalnoczasowe, które przeprowadza wahałdo ze zwisu do górnej niestabilnej stójki z równoczesnym zachowaniem położenia wózka na środku szyny i utrzymaniem zerowych prędkości wózka i wahałda w początku i na końcu ruchu. Sterowanie to jest stosowane w pętli otwartej. Po osiągnięciu horyzontu  $T=2.1$  s rozpoczyna pracę regulator liniowy. Na rys. 26 pokazano trajektorie optymalnoczasowe położenia wózka i wahałda przedłużone regulacją LQ na końcowym odcinku. A na rys. 27 przedstawiono trajektorie optymalnoczasowe dla  $t \leq 2.1$  i trajektorie LQ dla  $t > 2.1$ s. Na trajektorie wyliczone bez użycia obserwatorów nałożono trajektorie generowane przez obserwatory prędkości wózka i wahałda.

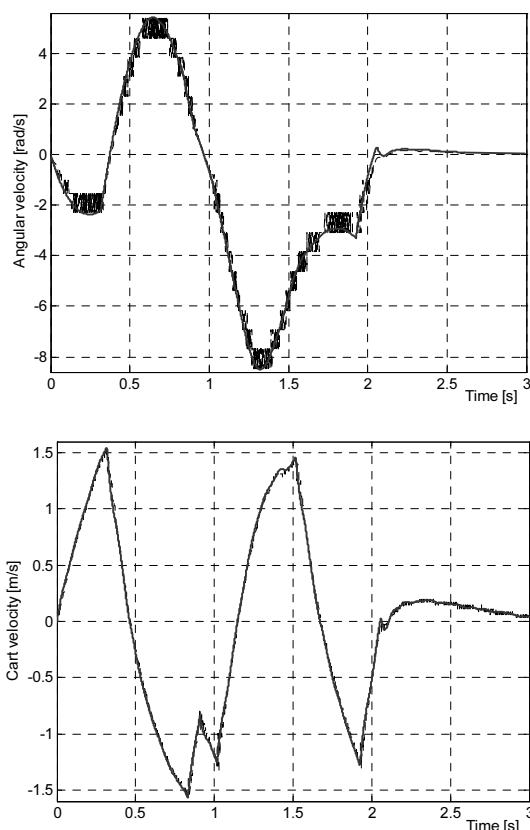


Rys. 25. Sterowanie optymalnoczasowe kontynuowane sterowaniem LQ w otoczeniu stanu  $\text{col}(0, 0, 0, 0)$ ,  
Fig. 25. Time-optimal control continued by LQ control at a vicinity of the  $\text{col}(0, 0, 0, 0)$  state



Rys. 26. Trajektorie optymalnoczasowe położenia wózka i wahadła przedłużone regulacją LQ na końcowym odcinku

Fig. 26. Time-optimal trajectories of the cart and pendulum positions continued by the LQ control at the final interval



Rys. 27. Trajektorie optymalnoczasowe dla  $t \leq 2.1$  i LQ dla  $t > 2.1$  s. Bez obserwatora (linia przerywana), z obserwatorem (linia gruba)

Fig. 27. Time-optimal trajectories for  $t \leq 2.1$  and LQ for  $t > 2.1$  s. Without the observer (dashed) and with the observer (bold)

W wyniku sterowania optymalnego o charakterze „bang-bang” zastosowanego w systemie wózka i wahadła otrzymuje się dobre trafienie w stan docelowy  $\text{col}(0, 0, 0, 0)$ . Za utrzymanie systemu w celu (stabilizację) odpowiada regulator LQ, który rozpoczyna działanie po osiągnięciu horyzontu przez sterowanie optymalne, a więc w chwili czasowej 2.1 s.

Jak zaznaczono, w realizacjach rzeczywistych w systemie z uwagi na dużą wrażliwość rozwiązań na zakłócenia i zmiany parametrów modelu, generowane sterowanie musi podlegać uodpornianiu. Samo wyznaczenie sterowania na podstawie modelu dynamicznego nie wystarcza, nawet gdy dysponujemy szybkim komputerem, który nadaża z odczytem pomiarów, generacją sterowań i rozwiązywaniem problemu optymalnoczasowego w jednym okresie próbkowania (w przypadku systemu wahadła na wózku czas próbkowania wynosi 10 ms). Proponuje się uodpornienie sterowania. Polega ono na przesunięciu trajektorii optymalnoczasowej, tak by uzyskać mniejszą wrażliwość rozwiązań. To podejście promowano w pracy [53]. Inny sposobem jest włączenie do wskaźnika jakości horyzontu i ograniczenie amplitudy sterowania w otoczeniu stanu docelowego. W tym przypadku używa się zmodyfikowanego wskaźnika jakości na trajektoriach będących rozwiązaniami modelu dynamicznego

$$S_{\rho}(u, T) = T + \frac{1}{2} \alpha(x_0) \int_0^T u(t)^2 dt + \frac{1}{2} \rho \left( \|x(T) - x^f\|^2 + \int_T^{T+T_1} \|x(t) - x^f\|^2 dt \right),$$

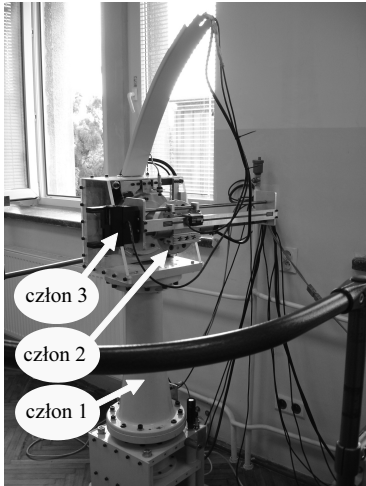
gdzie zmienne decyzyjne: sterowanie  $u$  i horyzont  $T$  są ograniczone  $T \geq 0$ ,

$$|u(t)| \leq 1 \text{ for } t \leq T, \quad u(t) = 0 \text{ for } t > T.$$

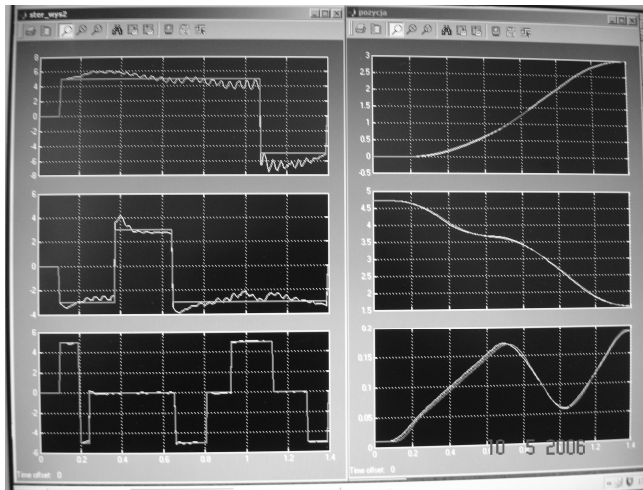
Procedura numeryczna odrzuci „niebezpieczne”, a więc nieodporne sterowania. Stała  $T_1$  jest nieujemna, a stała  $\rho$  jest dodatnia. Jeśli  $x_0$  oddala się od stanu docelowego  $x^f$  to współczynnik wagi  $\alpha(x_0)$  maleje monotonicznie (zmiana współczynnika zaczyna się od wartości dodatniej). Dla  $\|x_0 - x^f\|$  większego od pewnej wartości progowej  $\alpha(x_0)$  staje się identycznie równy zero. Taka konstrukcja gwarantuje regularność rozwoju struktury sterowania przy przejściu od sterowania z punktu do punktu do sterowania w postaci stabilizującego sprzężenia zwrotnego w punkcie.

Kolejnym przykładem aplikacji sterowania optymalnoczasowego jest manipulator typu stanfordzkiego (zob. rys. 28). Manipulator jest napędzany specjalizowanymi silnikami *Megatorque* japońskiej firmy NSK, które charakteryzują się niskimi obrotami i dużym momentem napędowym. Nie posiadają przekładni, co ułatwia modelowanie dynamiki robota. Model, mniej istotny w procedurach inteligentnych, staje się nieodzowny w rozwiązywaniu problemów sterowania optymalnoczasowego. Metody numeryczne rozwiązywania zadań optymalnych opisane w pracach [45, 51, 52, 53], a szczególnie metoda *Monotonicznego Rozwoju Struktur* [54], pozwalają na podstawie tzw. kanonicznego modelu dynamiki (który jest złożeniem nieliniowych różniczkowych równań stanu i równań sprzężonych) wyznaczyć sterowanie optymalnoczasowe i trajektorie optymalne stanu. Podobnie jak dla systemu wahadła na wózku otrzymuje się sterowanie optymalne w pętli otwartej [43]. By uczynić wyliczone sterowanie odpornym i zastosować je w rzeczywistym systemie manipulatora wprowadza się niestacjonarny regulator LQ wokół trajektorii optymalnej. Regulator taki nieznacznie pogarsza jakość sterowania optymalnego i wymaga drobnej rezerwy mocy sygnału sterującego. Jest dość oczywistym faktem, że na śledzenie trajektorii optymalnych i pilnowanie by ruch odbywał się po wyznaczonych trajektoriach trzeba wydatkować dodatkową energię. Na rys. 29 pokazano

przebiegi optymalne dla manipulatora. W sterowaniu biorą udział wszystkie człony, chodzi o przeprowadzenie końcówki chwytaka manipulatora z punktu początkowego do końcowego w najkrótszym czasie, przy ograniczeniach nałożonych na momenty napędowe trzech silników.



Rys. 28. Stanowisko laboratoryjne trójczłonowego manipulatora  
Fig. 28. Laboratory stand of three-link manipulator



Rys. 29. Regулacja LQ wokół trajektorii optymalnoczasowej podczas ruchu manipulatora  
Fig. 29. LQ closed loop control in the neighborhood of time-optimal trajectories during motion of the manipulator.

Widoczny jest prostokątny kształt sterowań optymalnych trzech członów robota. Charakterystyczne jest również zachowanie regulatorów LQ, które oscylują wokół zadanych sterowań optymalnych. Gdy spojrzeć na prawą kolumnę rys. 11 to widać poprawne śledzenie trajektorii położenia dla trzech członów robota (krzywe są sobie bliskie).

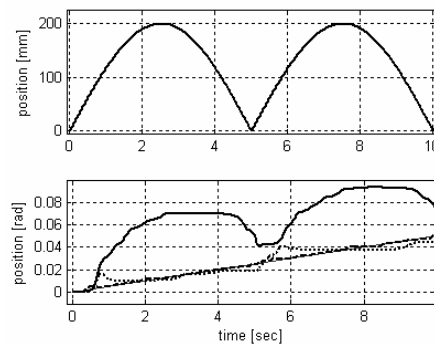
## 5.2. Regulacja inteligentna

Regулacja inteligentna naśladuje metody rozumowania ludzkiego i funkcje zwykle spełniane przez organizmy żywe powinna działać w obecności zakłóceń i w warunkach niepewności. Szuka się najlepszej decyzji w odniesieniu do użytego kryterium. Tak więc regulator zbudowany w logice rozmytej posiada mechanizm wyostrzenia, który ze zbioru rozmytego, powstałego z agregowanych reguł, w optymalny sposób dla danego celu sterowania generuje ostrą wartość wyjścia regulatora. Podobnie, wagi sieci neuronowej w regulatorze neuronowym są zmieniane w trakcie uczenia się sieci tak, by zminimalizować zadany wskaźnik jakości

(przykładowo w sterowaniu robotem może być nim średniokwadratowy błąd śledzenia trajektorii zadanej końcówki robota). Z kolei algorytm genetyczny wypełnia regułę „przeżyć dzięki dopasowaniu”.

Sieci neuronowe, jako modele parametryczne, cechuje łatwość uczenia się i generalizacji na podstawie danych niepełnych. Regulator neuronowy, którego parametry (zmienne wagi sieci neuronowej) gromadziły wiedzę o sterowaniu systemem w trakcie procesu uczenia, powinien działać poprawnie ekstrapolując lub interpolując sterowania – *generalizując* – w przypadkach pojawiania się nowych wartości stanów procesu spoza wzorca uczącego.

Eksperyment adaptacyjnej regulacji neuronowej [44] (sieć neuronowa jest uczona on-line podczas ruchu manipulatora) pokazuje przewagę regulacji inteligentnej nad klasyczną. Eksperyment jest przeprowadzany na stanowisku manipulatora stanfordzkiego o trzech stopniach swobody (rys. 28). W trakcie, gdy drugi człon manipulatora jest w ruchu obrotowym z prędkością 0.005 rad/s jego trzeci człon wykonuje ruch posuwisty – położenie końcówki winno powielać w czasie kształt połówek sinusoidy (zobacz górny rys. 30). Tymczasem z uwagi na zakłócenia wprowadzane przez wysuw członu trzeciego zamiast płynnego ruchu obrotowego członu drugiego (kąta winien narastać po prostej – dolny rys. 30), mamy do czynienia z dużymi błędami śledzenia.



Rys. 30. Wykres górny – położenie chwytaka w mm. Wykres dolny – kąt członu 2 z kompensatorami: NN (linia kropkowana), ANN (linia przerywana), PD (linia gruba)  
Fig. 30. Upper diagram – gripper position in mm. Lower diagram – angle of link 2 with compensators: NN (dot), ANN (dash), PD (bold)

Najlepiej działa kompensacja neuronowa z siecią o specjalnej strukturze (augmented neural network ANN), uczona na bieżąco (wagi sieci adaptują się do wysuwu trzeciego członu). Gorzej wypada typowa sieć neuronowa (neural network NN), a zupełnie fatalnie działa regulator PD. Wykorzystanie potencjału badawczego stanowiska zwraca konstruktorom wysiłek włożony w jego powstanie. Umożliwia ukończenie, kolejnej w tym roku, dysertacji doktorskiej.

Powróćmy na chwilę do systemu wahadła na wózku, jak wiadomo zadanie przeprowadzenia wahadła ze zwisu do górnego niestabilnego punktu równowagi z równoczesnymi położeniami (początkowym i końcowym) wózka na środku szyny i prędkościami zerowymi na początku i końcu sterowania może być dokonywane z wykorzystaniem różnego typu regulatorów inteligentnych: zbudowanych w logice rozmytej, neuronowych i heurystycznych tzw. regułowych [53]. Prosty, ale skuteczny regulator regułowy mógłby być postaci:

Stabilizacja

If  $|x_2| - S < 0$  ( $S$  stała dodatnia – wielkość strefy stabilizacji)  
then

$u_r = K_1(x_1 - x_1^f) + K_2x_2 + K_3x_3 + K_4x_4$  ( $K_i, i = 1..4$ ) współczynniki regulatora liniowego,  $x_1^f$  – położenie końcowe wózka

if  $|u_r| + F_s > u_{\max}$  ( $F_s$  – tarcie statyczne)

```

then  $u = u_{\max} \operatorname{sign} u_r$ ,
else  $u = u_r + F_s \operatorname{sign} u_r$ ,
end
Zwiększanie amplitudy wahań
elseif  $\frac{1}{2}x_4^2 + 9,81 \cdot 3,2(\cos x_2 - 1) > 0$ 
then  $u = 0$ 
else  $u = -u_{\max} \operatorname{sign} \left[ x_4 \left( |x_2| - \frac{\pi}{2} \right) \right]$ 

```

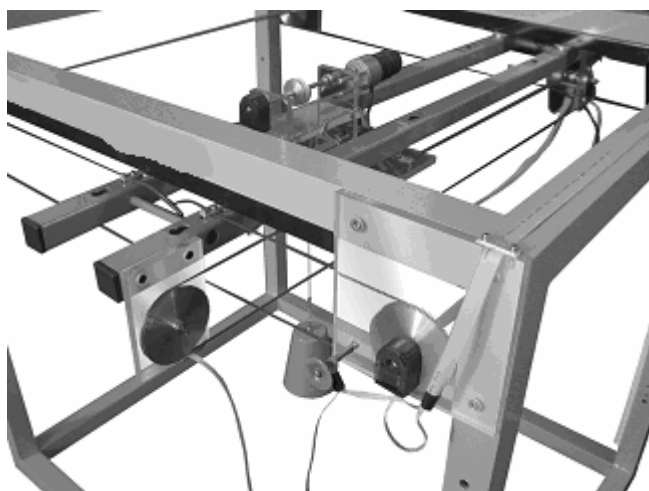
end ■

Algorytm taki wykonuje zadanie sterowania w cztery i pół sekundy, czyli przeszło dwa razy dłużej niż algorytm optymalnoscasowy. Posiada jednak ważną zaletę, jest odporny i niewrażliwy na zakłócenia.

### 5.3. Stanowiska i obiekty mechatroniki

W Katedrze Automatyki powstało kilka, stanowisk laboratoryjnych, które z powodzeniem wykorzystuje się do prowadzenia badań nad algorytmami sterowania. Wśród mechatronicznych systemów badawczych i dydaktycznych interesującym ze względu na złożoność zadań sterowania jest laboratoryjny model suwnicy 3DOF (rys. 31).

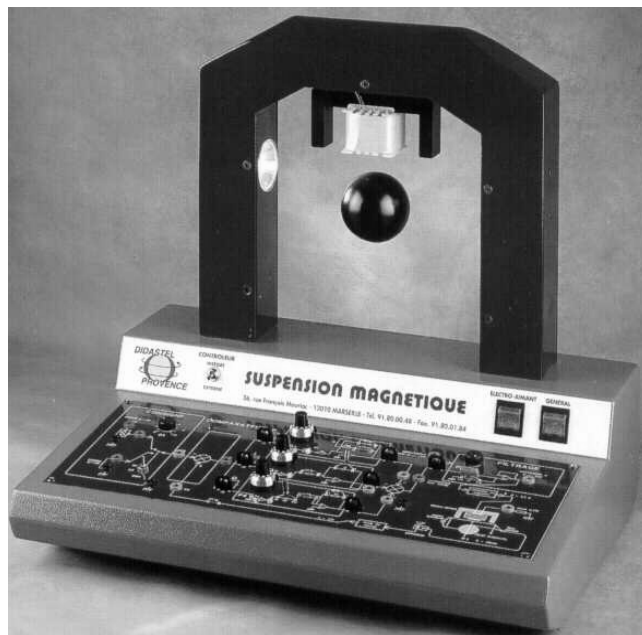
System suwnicy stwarza szerokie możliwości badawcze. Wykorzystywany jest też często w projektach układów regulacji w pracach studentów. Dla systemu utworzono model dynamiczny i przeprowadzono jego pełną identyfikację [48]. Tworzono i testowano na nim algorytmy optymalnoscasowe [48, 49], niestacjonarne LQ [48], algorytmy rozmyte i neuronowe, a także odporne [47]. Za pomocą suwnicy 3DOF można rozwiązywać i ilustrować problemy robotyki jak choćby znajdowanie ścieżki ruchu przy występowaniu przeszkód w przestrzeni ruchu przenoszonego ciężaru. Zadania sterowania i stabilizacji rozwiązane w laboratoryjnym modelu mogą po dokonaniu modyfikacji być przenaszalne i stosowane w rozwiązywaniu problemów sterowania suwnic przemysłowych.



Rys. 31. Laboratoryjny model suwnicy ramowej  
Fig. 31. Laboratory model of the crane

Innym obiektem, w którym ruch odbywa się praktycznie bez zjawiska tarcia jest system magnetycznej lewitacji (rys. 32). Podobnie jak w poprzednich przypadkach generowano całą gamę sterowań podtrzymujących kulę w lewitacji i wymuszających określony ruch zawieszzonej w polu magnetycznym kuli. Miały tu swój udział regulatory klasyczne PID, neuronowe, rozmyte i optymalnoscasowe [46, 53]. Sygnał optyczny, częściowo przysłonięty, pada na czujnik będący źródłem prądu elektromagnesu. Gdy kula opada to odsłania strumień światła. Zwiększa się prąd w elektromagnesie, zwiększa się siła magnetyczna przyciągająca

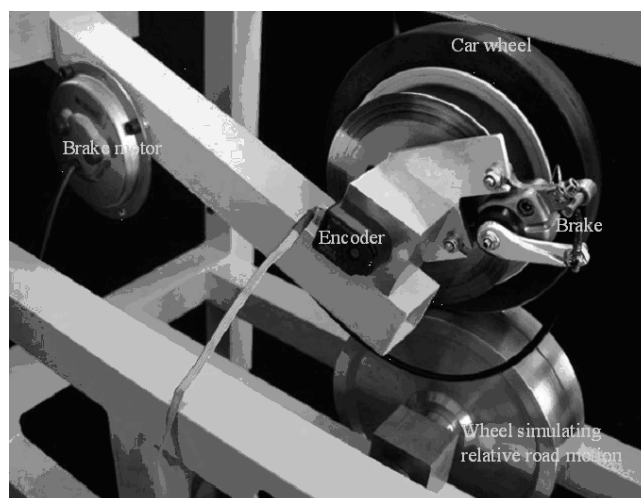
kulę, kula unosi się w górę, bardziej przysłania strumień światła, co powoduje zmniejszenie się prądu płynącego przez elektromagnes i opis zjawiska powraca do początku. Bez odpowiednio szybkiego, ujemnego sprzężenia zwrotnego lewitacja nie będzie zachodzić.



Rys. 32. Magnetyczna lewitacja  
Fig. 32. Magnetic levitation

Charakterystycznym w tym modelu jest wyjątkowo krótki okres próbkowania. Dla poprawnego działania winien on być krótszy od połowy mikrosekundy. Wysoko zostaje uniesiona poprzeczka dla pracy układu w czasie rzeczywistym. Tu ujawniają się wszelkie odstępstwa od determinizmu i punktualności przyborników RTWT czy RT-CON.

Kolejnym modelem, służącym do badań poślizgu koła samochodu toczącego się po powierzchni drogi, jest laboratoryjny ABS (Antilock Braking System) – rys. 33.

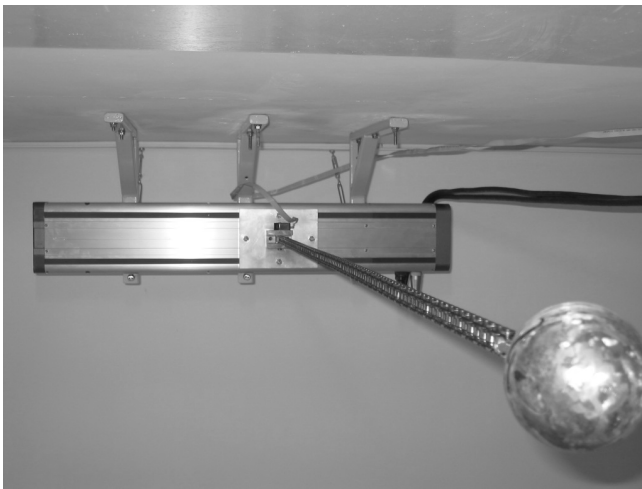


Rys. 33. Przeciwpoślizgowy system ABS  
Fig. 33. Antilock Braking System (ABS)

Model ten, mimo uproszczeń, dobrze oddaje sytuację panującą w rzeczywistym samochodzie, wyposażonym w ABS, podczas hamowania. Dolne, aluminiowe koło animuje kontakt podłoża z górnym kołem samochodu. Poślizg można zmierzyć pośrednio. Mierzmy kąty obrotu obu kół i odtwarzamy ich prędkości. Gdy

zaczynamy hamować górne koło powstaje relatywna różnica prędkości kół (różnica prędkości kół podzielona przez prędkość koła), czyli właśnie poślizg. By przeciwdziałać jego powstawaniu hamujemy impulsowo, ale zadaniem tym obciążamy automat i algorytm, a nie kierowcę. W samochodach stosuje się hydrauliczne systemy przeciw-poślizgowe. Laboratoryjny ABS jest hamowany elektrycznie z hydraulicznym cięgłem 70-krotnie wzmacniającym siłę hamulca tarczowego. Gdy rozważamy algorytm, to zjawiska sterowania poślizgiem w samochodzie i w modelu laboratoryjnym, nie różnią się wiele. Bogaty przemysł motoryzacyjny prowadzi badania systemu ABS używając rzeczywistego samochodu. Uczelniane laboratorium ogranicza się do mniej kosztownych, ale adekwatnych odnośnie algorytmów sterujących rozwiązań.

Ostatnim systemem, który powstał w Laboratorium Sterowania jest układ ciężkiego łańcucha obciążony kulą, powieszony na wózku jak w przypadku suwnicy (rys. 34). Jest to model systemu o parametrach rozłożonych. Proste eksperymenty pokazują, że jest możliwa stabilizacja łańcucha przy bardzo skąnym pomiarze wektora stanu. Mianowicie wystarczy mierzyć kąt pierwszego ogniwa łańcucha (za które powieszono łańcuch do wózka) i położenie wózka na szynie by wygenerować efektywny algorytm stabilizacji łańcucha na całej jego długości. Układ jest sterowany z komputera, pomiar kąta wychylenia pierwszego ogniwa łańcucha jest dokonywany za pomocą enkodera.



Rys. 34. Ciężki łańcuch z kulą, zawieszony na wózku  
Fig. 34. Heavy chain with a load hinged to a cart

## 6. Literatura

- [1] Byrski W., S.Fuksa, Optimal finite parameter observer. An application to synthesis of stabilizing feedback for a linear system, *Control and Cybernetics*, vol. 13, 1984, No.1-2.
- [2] Byrski W., Obserwatory i ich zastosowania w systemach sterowania adaptacyjnego, *Monografie Zeszyty Naukowe AGH, Kraków* 1993.
- [3] Byrski W. „Theory and application of the optimal integral state observers, *Proc. of III European Control Conference, ECC'95, Roma*, vol.1,1995, 526-532
- [4] Byrski W. The survey for the exact and optimal state observers in Hilbert spaces, 2003, Cambridge, GB, *European Control Conference ECC03*.
- [5] W.Byrski, J.Duda : Static Model od Distillation Column and its Simplification for on-line Computer Control; *Proceedings IMACS-IFAC Symp.Modelling, Simulation for Control of Lumped & Distributed Parameters*. 1986. Lille, Francja.
- [6] W.Byrski, J.Duda, J.Gajek, A.Turnau; Komputerowy system sterowania on-line procesem rektyfikacji; *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, nr 12. 1987.
- [7] W.Byrski, J.Duda, A.Turnau: Sterowanie on-line procesem wielostopniowej destylacji; *Zeszyty Naukowe AGH, Elektrotechnika*, Tom 8, z.1, Krakow, 1989.
- [8] W.Byrski, J.Duda, Modelling of distillation columns for control purposes; *International Journal of Systems Science*, 1990, vol.21, No.1, pp.21-31.
- [9] Byrski W., P.Kubik, LQ Control and EKF as the State Observer in Stabilization of Distillation Column. *Proceed. of IFAC/ IMACS Symposium. Large Scale Systems: London*, 1995.
- [10] Górecki H., J.Duda, W.Byrski, K.Janik: Laboratory Distillation Column for Education on Process Control, *Proceedings of The 4th IFAC Symposium on Advances in Control Education, ACE'97, Istanbul*, 1997.
- [11] Grega W.: Współczesne metody automatyki w sterowaniu i monitorowaniu systemów energetycznych, *Energetyka Ciepła i Zawodowa*, nr.1, 2002, 31-35
- [12] Kreft W.: Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania, *Automatyka, Półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie*. t. 9 z. 3, 2005, 436
- [13] Grega W., Kołek K., Bania P.: Optymalne sterowanie węzłem cieplnym, *Prace XIV Krajowej Konferencji Automatyki, Zielona Góra* 2002 vol. I, 2005, 997-1004
- [14] P. Bania, W. Grega: Nonlinear Model Predictive Controller for Heating System, *10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Poland*, 2004, 511-516
- [15] Kołek K., Mitkowski W.: Zastosowanie sieci neuronowych do analizy i sterowania głównego węzła CO AGH, *Informatyka w Technologii*, numer 1, tom 2, 2002, 33-38
- [16] Kreft W. Grega W. Sterowanie dystrybucją energii cieplnej na przykładzie budynków AGH, *4th Intern. Congress on Intelligent Building System - InBus, Krakow* 2006
- [17] Grega W. Kołek K. Monitoring and Control of Heat Distribution, *Proceedings of 3rd International Control Conference ICC'2002, Malenovice*, 2002, s.439 – 444,
- [18] Grega W., Kołek K. Sterowanie nadrzędne węzłem cieplnym, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, vol.5, nr,7, 2001, 18-24
- [19] Grega W., Bania P.: Heating System Control In Commercial Buildings With Peak Demand Adjustment, *Proc. of IASTED Conference Energy And Power Systems, Krabi, April* 2005, 64-69
- [20] Kołek K.: Podsumowanie pracy systemu monitorowania pracy instalacji CO węzle głównym AGH, *Raport Wewnętrzny AGH, Kraków* 2005
- [21] Grega W., Zygmunt H., Kołek K., Bania P., Kwasnowski P.: Sprawozdanie z Uczelnianego Grantu Badawczego Zamawianego AGH: Monitorowanie i optymalizacji zużycia energii cieplnej w AGH, 2002
- [22] Kołek K., Bania P.; Internetowy system pomiarowy, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 2/2002, 5-8.
- [23] W. Grega, K. Kołek Simulation and Real-time Control: from Simulink to Industrial Applications, *Proceedings of 11th IEEE International Conference on Computer Aided Control System Design, Glasgow*, 2002, 104-109
- [24] Grega W.: A Web-based Industrial Control Laboratory, in: *Advances in Control Education, Proceedings of the 6th IFAC Symposium, Oulu, Finland*, 16-18 June 2003, Edited by Lindfors, Elsevier Science Ltd. Oxford, ISBN 0-08-043559-9, 2003
- [25] Grega W.: Sterowanie cyfrowe w systemach skupionych i rozproszonych, *Seria: Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN*, vol.7, Wydawnictwa AGH, Kraków 2004
- [26] Grega W.: Sieci bezprzewodowe w automatyce, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, vol. 9, nr,12, 2005, s. 5-9, 2005
- [27] Grega W., Kołek K.: Rozproszone systemy monitorowania i sterowania w ochronie środowiska, *Chemia Przemysłowa*, nr. 2/2001, 18 –21, 2002
- [28] Grega W.: Współczesne metody automatyki w sterowaniu i monitorowaniu systemów energetycznych, *Energetyka Ciepła i Zawodowa*, nr.1/2002, 31-35, 2002
- [29] Grega W.: Stabilne układy sterowania rozproszonego, *Prace Międzywydziałowej Komisji Nauk Technicznych Polskiej Akademii Umiejętności*, Tom 1, s. 70-109, 2005



- [30]Grega W.: Stability of Distributed Control Systems with Uncertain Delays, 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje 2002, 303 – 307, 2002
- [31]Tutaj A.: Packets Buffering in Network Traffic in Distributed Control Systems, 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje 2006
- [32]Grega W. Compensation of Communication Constraints for Distributed Control Systems, 12th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje 2006
- [33]Rosół M., Grega W.: Three-Tanks Control System Through LonWorks Fieldbus, 10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Poland, 1159-1164, 2004
- [34]Grega W., Rosół M.: Distributed Control Using GPRS Wireless Network, Proc. of the 11th IEEE International Conference on MMAR, 29 August-1 September, Międzyzdroje, Poland, pp. 1025-1030, 2005
- [35]Rosół M., Gorczyca P.: Sterowanie rozproszone laboratoryjnym modelem helikoptera, XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa 2005, 181- 184, 2005
- [36]Grega W. P.: Sterowanie modelem nagrzewnicy powietrza przez sieć Ethernet, XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa 2005, t. III, 193- 198, 2005
- [37]Grega W.: A Web-based Industrial Control Laboratory, in: Advances in Control Education, Proceedings of the 6th IFAC Symposium, Oulu, Finland, 16-18 June 2003, Edited by Lindfors, Elsevier Science Ltd. Oxford, ISBN 0-08-043559-9, 2003
- [38]Grega W., Rotter P.: Regulacja adaptacyjna dla rozproszonego układu sterowania, Automatyka, wyd. AGH, T6, z.2, 219- 235, 2002
- [39]Tutaj A.: Zastosowanie zmodyfikowanych wersji predyktora Smitha w rozproszonych układach Automatyka: Półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Tom 9, Zeszyt 3, 483-497, 2005
- [40]Tutaj A.: Stabilność rozproszonego układu regulacji z predykcją stanu, XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa, Tom 1, 199-204, 2005
- [41]Lewandowski D., Kowalski M.: Sterowanie rozproszone nagrzewnicą powietrza. Praca Dyplomowa, W. Grega opiekun, Wydział EAIiE AGH, Kraków, 2004
- [42]Grega W.: Networks in Control Education, Advances in Control Education Proceedings of the 7th IFAC Symposium, Madrid, 2006
- [43]Marchewka D., Turnau A.: Identification of 3DOF manipulator oriented to time-optimal control. CMS'05, Computer Methods and Systems, Kraków 14-16 November, 125-128, 2005.
- [44]Żabiński T., Turnau A.: Compensation friction in robotic arms and slide tables. 16 IFAC World Congress, 4-8 July, Prague, 6 pages. 2005.
- [45]Turnau A., Szymkat M., Korytowski A., Kolek K.: A robust repetitive scheme with relaxed minimum time criterion. 16 IFAC World Congress, 4-8 July, Prague, 6 pages, 2005.
- [46]Piłat A., Turnau A.: Self-organizing fuzzy controller for magnetic levitation system. CMS'05, Computer Methods and Systems, Kraków 14-16 November, 101-106, 2005.
- [47]Turnau A.: Badanie odpornej stabilności suwnicy przy użyciu twierdzenia Charitonowa. Materiały konferencyjne. IV KK Metody i systemy komputerowe w badaniach naukowych i projektowaniu inżynierskim, Kraków 26-28 listopada, 619-624, 2003.
- [48]Pauluk M., Korytowski A., Turnau A., Szymkat M.: Time optimal control of 3d crane. Proceedings of VII IEEE Int. Conf. "Methods and Models in Automation and Robotics", Międzyzdroje, August 28-31, 927-932, 2001.
- [49]Grega W., Pauluk M., Turnau A.: Projektowanie algorytmów sterowania dla suwnicy ramowej. Zeszyty Naukowe, Politechnika Opolska, z. 64, Nr 265/2001 XIV Konferencja Naukowa Problemy rozwoju maszyn roboczych, Zakopane, 129-136, 2001.
- [50]Turnau A., Korytowski A., Szymkat M.: Time optimal control for the pendulum cart system in real-time. Proceedings IEEE of International Conference on Control Applications, August 22-27, Kohala Coast-Island of Hawai'i, USA, TuP6-3, 1249-1254, 1999.
- [51]Szymkat M., Korytowski A., Turnau A.: Variable control parameterization for time-optimal problems. Proceedings of IFAC Symposium on CACSD 2000, 11-13 September, Salford, UK, 6 pages, 2000.
- [52]Turnau A., Kolek K., Korytowski A., Szymkat M.: Sterowanie optymalnoczasowe w czasie rzeczywistym metodą zmiennej parametryzacji. IV Krajowa Konferencja Automatyki, Zielona Góra, 24-27 czerwca, 209-212, 2002.
- [53]Turnau A.: Sterowanie docelowe układami nieliniowymi w czasie rzeczywistym – algorytmy inteligentne i optymalno-czasowe. Rozprawy Monografie nr 102, AGH, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, 2002.
- [54]Szymkat, M., Korytowski A.: Method of monotone structural evolution for control and state constrained optimal control problems. European Control Conference, University of Cambridge, UK, 2003.

*Artykuł recenzowany*

## INFORMACJE

### Zapraszamy do PRENUMERATY czasopisma PAK w 2007 roku

**Cena prenumeraty rocznej: 180,00 zł/1 egz.  
Cena prenumeraty półrocznej: 90,00 zł/1 egz.**

**Prenumeratę i kolportaż prowadzą:**

**WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,  
tel./fax: 0-22 827 25 40

**Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA**  
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,  
tel./fax: 0-32 237 19 45, e-mail: pak.redaktor@polsl.pl