



# KOMPUTEROWE SYSTEMY STEROWANIA

## Sterowanie predykcyjne

Robert Piotrowski, dr inż.

Katedra Inżynierii Systemów Sterowania

Studia I stopnia inżynierskie, Semestr VI

### Trochę historii (1/4)

**Fakt:** algorytmy sterowania predykcyjnego - zapotrzebowanie przemysłu, głównie chemicznego i petrochemicznego

Połowa lat 70. XX wieku

**Model Predictive Heuristic Control (MPHC)** (później: **Model Algorithmic Control (MAC)**)

**Autorzy:** Richalet J. i współpracownicy (firma Adersa)

**Cechy:** liniowy model obiektu-skończona odpowiedź impulsowa, **heurystyczny sposób uwzględniania ograniczeń**, funkcja celu: suma kwadratowych składników kary za zmianę sterowania (tzw. kwadratowe zadanie optymalizacji)

Koniec lat 70. XX wieku

**Dynamic Matrix Control (DMC)**

**Autorzy:** Cutler C.R., Ramaker B.L. (firma Shell Oil)

**Cechy:** liniowy model obiektu oparty na odpowiedzi skokowej, **heurystyczny (przybliżony) sposób uwzględniania ograniczeń**, funkcja celu: suma kwadratowych składników kary za zmianę sterowania

## Trochę historii (2/4)

Połowa lat 80. XX wieku

### Quadratic Dynamic Matrix Control (QDMC)

**Autorzy:** Garcia C.E. i współpracownicy

**Cechy:** liniowy model obiektu oparty na odpowiedzi skokowej, liniowe ograniczenia na sterowania i wyjścia, funkcja celu: suma kwadratowych składników kary za zmianę sterowania

Koniec lat 80. XX wieku

### Generalized Predictive Control (GPC)

**Autorzy:** Clarke D.W. i współpracownicy

**Cechy:** liniowy model obiektu (równania różnicowe), uwzględnianie szerszej klasy zakłóceń, liniowe ograniczenia na sterowania i wyjścia, funkcja celu: suma kwadratowych składników kary za zmianę sterowania

## Trochę historii (3/4)

Koniec lat 80. XX wieku

### Constrained Receding Horizon Predictive Control (CRHPC)

**Autorzy:** Clarke D.W., Scattolini R.

**Cechy:** rozwinięcie GPC poprzez sformułowanie zadania optymalizacji ze skończonym przesuwającym horyzontem

Koniec lat 80. XX wieku

### Shell Multivariable Optimizing Controller (SMOC)

**Autorzy:** Marquis P., Broustail J.P. (firma Shell)

**Cechy:** model obiektu w przestrzeni stanu, uwzględnienie obserwatora stanu dla estymacji nieznanymi współrzędnych wektora stanu, podział na regulowane i mierzone zmienne wyjściowe obiektu

## Trochę historii (4/4)

Lata 90. XX wieku - dzisiaj

- nieliniowe obiekty sterowania
- odporność sterowania (tzw. sterowanie krzepkie) - niepewność modeli obiektów, niepewność estymacji zakłóceń
- badania stabilności

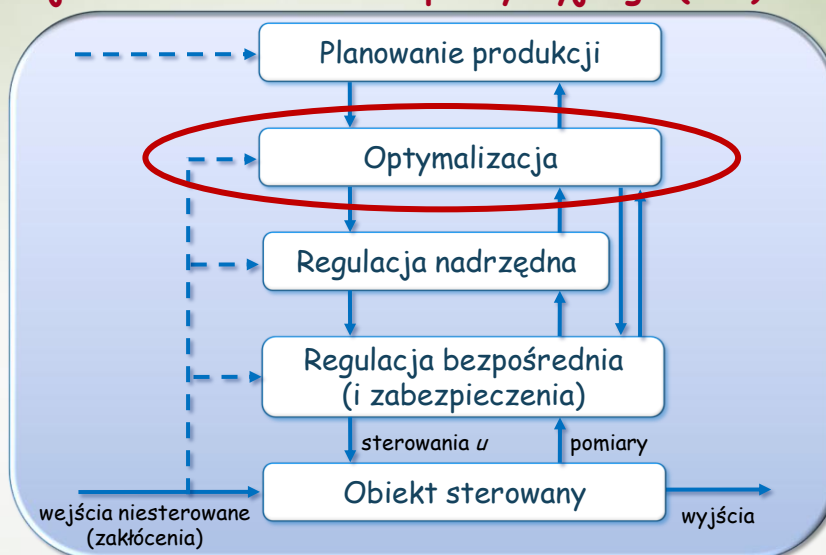
### UWAGA:

Różne metody implementacji algorytmów predykcyjnych, często jedna nazwa: **Model Predictive Control (MPC)**.

Szczegóły dotyczące rozwoju algorytmów sterow. predykc., np.:

- Camacho E.F., Bordons C. (2004). *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, London Limited.
- Qin S.J., Badgwell T.A. (2003). *A survey of industrial model predictive control technology*. Control Engineering Practice 11 (2003) 733-764.
- Tatjewski P. (2002). *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, Struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.

## Umiejscowienie sterowania predykcyjnego (1/2)



## Umiejscowienie sterowania predykcyjnego (2/2)

Sterowanie predykcyjne należy do grupy zaawansowanych metod sterowania (ang. advanced control).

### UWAGA 1:

Podstawowa cecha warstwy bezpośredniej: bezpośredni dostęp do obiektu sterowanego.

### UWAGA 2:

Warstwa sterowania nadrzędnego nie musi występować. Główny wyznacznik to: cele sterowania, cechy obiektu sterowania (np. różna dynamika procesów).

### UWAGA 3:

Czasami warstwa optymalizacji połączona z warstwą sterowania bezpośredniego, np. wyznaczenie trajektorii zadanych dla regulatorów PID warstwy bezpośredniej.

## Istota sterowania predykcyjnego (1/5)

### Oznaczenia:

$k \cdot T_s$  - dyskr. chwila czasu  $\rightarrow$  Uproszczenie zapisu:  
 $T_s$  - okres próbkowania  $k, k + 1, k + 2 \dots$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ )

$H_p$  - horyzont predykcji  $H_s$  - horyzont sterowania,  $H_s \leq H_p$

$u$  - wartość sterowania, np.:

$u(k|k)$  - wyznaczenie w chwili  $k$  sterowania na chwilę  $k$

$\Delta u$  - zmiana (przyrost) wartości sterowania, np.:

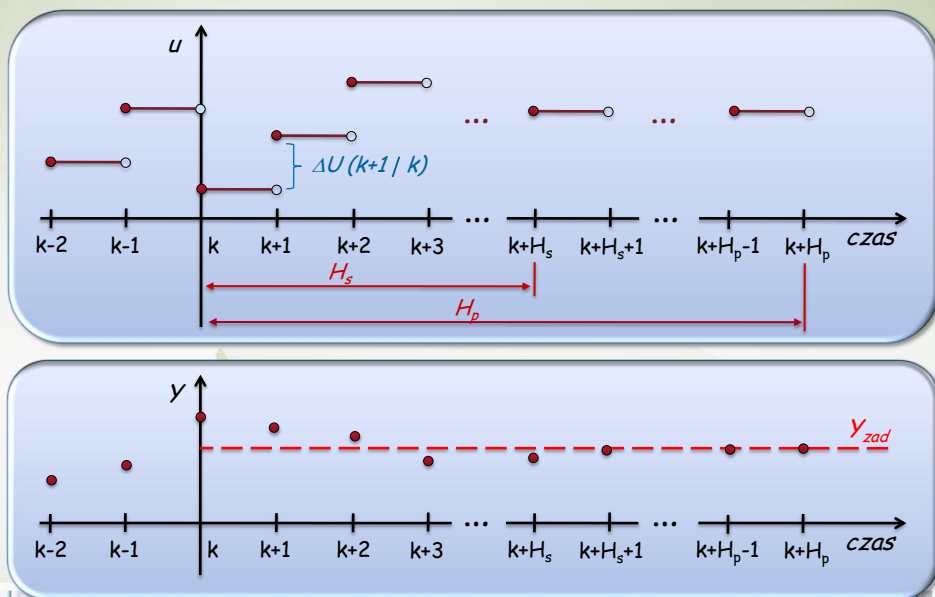
$\Delta u(k+1|k)$  - wyznaczn. w chwili  $k$  zmiany sterowania na chwilę  $k + 1$

$y$  - wartość wyjścia, np.:

$y(k+1|k)$  - wyznaczenie w chwili  $k$  wyjścia na chwilę  $k + 1$

$y_{\text{zad}}$  - wartość (trajektoria) zadana

## Istota sterowania predykcyjnego (2/5)



## Istota sterowania predykcyjnego (3/5)

### Dane:

- dynamiczny model obiektu wraz z modelem zakłóceń
- pomierzone (lub estymowane) wartości wyjścia z obiektu  $y$  w chwili bieżącej i chwilach poprzednich
- wartości sterowań  $u$  w chwilach poprzednich
- wartość (trajekt.) zadana  $y_{zad}$  w chwili bieżącej i następnych

### Zadanie w chwili $k$ :

1. Dokonaj pomiaru wyjścia z obiektu.
2. Korzystając z modelu obiektu wyznacz wartości sterowań  $u(k|k)$ ,  $u(k+1|k)$ ,  $\dots$ ,  $u(k+H_s|k)$ , w taki sposób, aby spełnić cele sterowania, np. minimalizuj różnice między przewidzianym w chwili  $k$  wyjściem z obiektu  $y(k+p|k)$  ( $p=0, 1, \dots, H_p$ ) a wartościami zadanymi  $y_{zad}(k+p|k)$ .
3. Przyłóż do obiektu tylko pierwszą wartość sterowania  $u(k|k)$ .

## Istota sterowania predykcyjnego (4/5)

### Zadanie w chwili $k+1$ :

1. Dokonaj pomiaru wyjścia z obiektu.
2. Wyznacz z modelu wartości sterowań  $u(k+1|k+1)$ ,  $u(k+2|k+1)$ ,  $\dots$ ,  $u(k+H_s|k+1)$ , tak, aby spełnić cele sterowania.
3. Przyłóż do obiektu tylko pierwszą wartość sterowania  $u(k+1|k+1)$ .

Powtórz zadanie dla całego horyzontu predykcji  $H_p$ .

### UWAGA 1:

Algorytm MPC - sterowanie z przesuwającym horyzontem (ang. receding horizon control).

### UWAGA 2:

W algorytmie MPC zakłada się, że po  $H_s$  zmiany wartości sterowań są praktycznie równe zero.

## Istota sterowania predykcyjnego (5/5)

Najczęściej funkcja kryterialna (funkcja celu) postaci:

$$\min J(k) = \sum_{p=1}^{H_p} \{y_{zad}(k+p|k) - y(k+p|k)\}^2 + \sum_{p=0}^{H_p-1} \{\Delta u(k+p|k)\}^2$$

Pierwszy składnik: błąd (uchyb) sterowania

Dругi składnik: zmiana wartości sterowania

### UWAGA:

Czasami dodatkowo w funkcji kryterialnej umieszcza się wagi:

$$\min J(k) = w_1 \cdot \sum_{p=1}^{H_p} \{y_{zad}(k+p|k) - y(k+p|k)\}^2 + w_2 \cdot \sum_{p=0}^{H_p-1} \{\Delta u(k+p|k)\}^2$$

## Podstawowe cechy sterowania predykcyjnego (1/2)

- dla obiektów liniowych i nieliniowych
- układy sterowania typu SISO (ang. Single Input Single Output) i MIMO (ang. Multiple Input Multiple Output)
- uwzględnienie ograniczeń:
  - ✓ na wartości sygnałów sterujących:

$$u_{min} \leq u(k+p/k) \leq u_{max}$$

- ✓ na wartości zmian (przyrostów) sygnałów sterujących:

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k+p/k) \leq \Delta u_{max}$$

- ✓ na wartości wyjść:

$$y_{min} \leq y(k+p/k) \leq y_{max}$$

## Podstawowe cechy sterowania predykcyjnego (2/2)

- optymalizacja wskaźników ekonomicznych związanych ze sterowaniem, np.:
  - ✓ maksymalizacja zysków związanych z produkcją
  - ✓ minimalizacja strat dotyczących uszkodzeń urządzeń pomiarowych, wykonawczych
  - ✓ minimalizacja kosztów sterowania dotyczących przełączania urządzeń wykonawczych
- uwzględnienie zmiennych opóźnień czasowych obiektów
- uwzględnienie uszkodzeń urządzeń pomiarowych, wykonawczych
- uwzględnienie wewnętrznych interakcji w obiekcie dzięki wykorzystaniu modelu obiektu (regulator poprzez model obiektu ma wiedzę o obiekcie)

## Czy uwzględnianie ograniczeń jest istotne ?

- na wartość amplitudy sygnału sterującego, np.:
  - ✓ otwarcie zaworu:  $\varphi_{\min} - \varphi_{\max}$
  - ✓ prędkość obrotowa dmuchawy:  $n_{\min} - n_{\max}$
  - ✓ częstotliwość falownika:  $f_{\min} - f_{\max}$
- na szybkość zmian sygnału sterującego, np.:
  - ✓ czas zmiany położenia zaworu z  $\varphi_1$  do  $\varphi_2$
  - ✓ czas zmiany prędkości obrotowej pompy z  $n_1$  do  $n_2$
  - ✓ prędkość przesuwania się podajnika taśmowego
- na wartość wyjścia, np.:
  - ✓ temperatura w pomieszczeniu:  $t_{\min} - t_{\max}$
  - ✓ ciśnienie w rurociągu:  $< p_{\max}$

## Regulatory PID a nieliniowości i ogranicz. obiektu

Fakt 1: Układy sterowania z regulatorami PID najlepsze do pracy w otoczeniu punktu pracy

Układy sterowania z PID a obiekty nieliniowe:

- linearyzacja obiektów
- podział układu sterowania na podukłady z lokalnymi PID

**Jak przełączać się pomiędzy lokalnymi podukładami sterowania ?**

Fakt 2: W większości przypadków w układach sterowania z regulatorami PID nie uwzględnia się ograniczeń

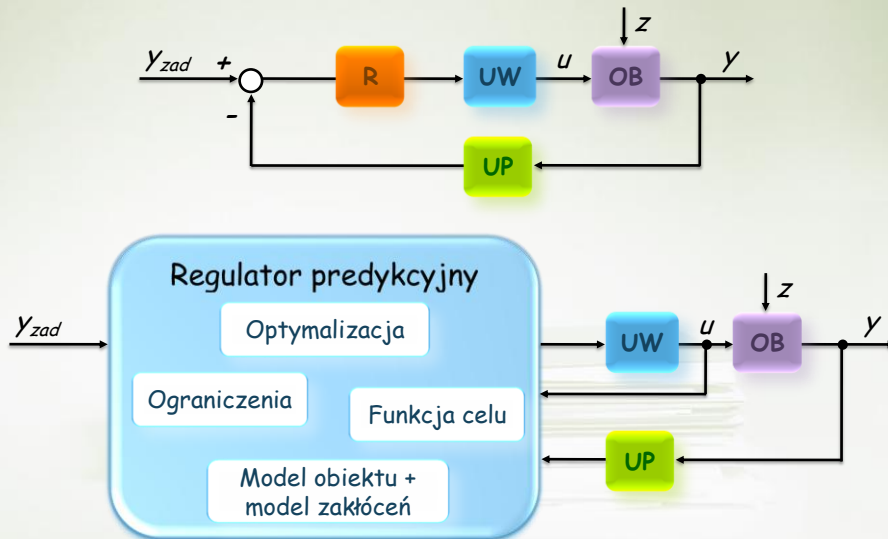
Układy sterowania z PID a ograniczenia:

- dobudowanie dod. układu uwzględniającego nasycenia urząd. wykonawczego (ang. anti-windup) (patrz poprzednie wykłady)

**Jak uwzględnić ograniczenia na wyjściu ?**



## Sterowanie klasyczne a sterowanie predykcyjne



## Podstawowe ograniczenia sterowania predykcyjnego

- stosunkowo złożona implementacja algorytmu MPC, szczególnie dla obiektów nieliniowych
- czas obliczeń i złożoność obliczeniowa, szczególnie dla obiektów nieliniowych
- konieczność budowy możliwie dokładnego modelu obiektu/procesu sterowanego (czas, nakład pracy, wiedza o obiekcie/procesie, itd.)
- model a obiekt, np. spełnienie ograniczeń w modelu a w obiekcie - czasami konieczność budowy krzepkiego (odpornego) algorytmu MPC
- obawa nie automatyków (np. technolodzy, operatorzy) przed nowymi nie klasycznymi (np. PID) algorytmami regulacji

## MPC z modelem w postaci równań stanu (1/6)

Równania stanu i wyjścia obiektu (**założenie: pomiar pełnego wektora stanu, brak zakłóceń**):

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k)\end{aligned}$$

gdzie:

$x$  - wektor stanu,  $y$  - wektor wyjść mierzonych regulowanych

W wyniku działania rekurencyjnego mamy:

$$x(k+1|k) = Ax(k) + Bu(k|k) = Ax(k) + B(\Delta u(k|k) + u(k-1))$$

$$\begin{aligned}x(k+2|k) &= Ax(k+1|k) + B(\Delta u(k+1|k) + \Delta u(k|k) + u(k-1)) = \\ &= A^2x(k) + (A+I)B\Delta u(k|k) + B\Delta u(k+1|k) + (A+I)Bu(k-1)\end{aligned}$$

...

## MPC z modelem w postaci równań stanu (2/6)

...

$$\begin{aligned}x(k+H_s|k) &= Ax(k+H_s-1|k) + B(\Delta u(k+H_s-1|k) + \dots + \Delta u(k|k) + u(k-1)) = \\ &= A^{H_s}x(k) + (A^{H_s-1} + \dots + A+I)B\Delta u(k|k) + (A^{H_s-2} + \dots + A+I)B\Delta u(k+1|k) + \dots + \\ &\quad + B\Delta u(k+H_s-1|k) + (A^{H_s-1} + \dots + A+I)Bu(k-1)\end{aligned}$$

...

$$\begin{aligned}x(k+H_p|k) &= A^{H_p}x(k) + (A^{H_p-1} + \dots + A+I)B\Delta u(k|k) + \\ &\quad (A^{H_p-2} + \dots + A+I)B\Delta u(k+1|k) + \dots + (A^{H_p-H_s} + \dots + A+I)B\Delta u(k+H_p-1|k) + \\ &\quad + (A^{H_p-1} + \dots + A+I)Bu(k-1)\end{aligned}$$

### MPC z modelem w postaci równań stanu (3/6)

przechodząc do postaci macierzowej dla stanu uzyskujemy ( $p = p_1, \dots, H_p$ ):

$$X(k) = \begin{bmatrix} x(k + H_{p1}|k) \\ \dots \\ x(k + H_p|k) \end{bmatrix}, \quad \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \dots \\ \Delta u(k + H_s - 1|k) \end{bmatrix}$$

$$X(k) = \begin{bmatrix} A^{H_{p1}} \\ \dots \\ A^{H_s} \\ \dots \\ A^{H_p} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} (A^{H_{p1}-1} + \dots + A + I)B \\ \dots \\ (A^{H_s-1} + \dots + A + I)B \\ \dots \\ (A^{H_p-1} + \dots + A + I)B \end{bmatrix} u(k-1) +$$

### MPC z modelem w postaci równań stanu (4/6)

$$+ \begin{bmatrix} (A^{H_{p1}-1} + \dots + A + I)B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (A^{H_s-1} + \dots + A + I)B & \dots & B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (A^{H_p-1} + \dots + A + I)B & \dots & (A^{H_p-H_s} + \dots + A + I) \end{bmatrix} \Delta U(k)$$

czyli:

$$X(k) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}u(k-1) + P\Delta U(k)$$

## MPC z modelem w postaci równań stanu (5/6)

przechodząc do postaci macierzowej dla wyjścia mamy:

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} C & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C \end{bmatrix}$$

$$y^{pred}(k) = \tilde{C}X(k) = [\tilde{C}\tilde{A}x(k) + \tilde{C}\tilde{B}u(k-1)] + \tilde{C}P\Delta U(k) = y^0(k) + \Delta y(k)$$

lub rozbijając wyjście na poszczególne chwile predykcji:

$$y(k+p|k) = CA^p x(k) + C \sum_{j=0}^{p-1} A^j B u(k-1) + C \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{p-1-i} A^j B \Delta u(k-i|k) \quad \text{dla } p \leq H_s$$

$$y(k+p|k) = CA^p x(k) + C \sum_{j=0}^{p-1} A^j B u(k-1) + C \sum_{i=0}^{H_s-1} \sum_{j=0}^{p-1-i} A^j B \Delta u(k-i|k) \quad \text{dla } p > H_s$$

## MPC z modelem w postaci równań stanu (6/6)

UWAGA 1:

Model zakłóceń:

$$\begin{aligned} z(k+1) &= A_z z(k) \\ v(k) &= C_z z(k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + v(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned}$$

UWAGA 2:

Jeżeli nie wszystkie zmienne stanu mierzone - dołączenie do modelu obiektu obserwatora stanu.

## Główne parametry regulatora predykcyjnego (1/2)

### ➤ horyzont predykcji $H_p$

Dobór długości  $H_p$  - uzależniony od dynamiki obiektu

Właściwy wybór  $H_p$  = prawidłowa praca układu sterowania

Dalszy wzrost  $H_p$  = niewielka poprawa wskaźników jakości działania układu sterowania

**Szczegóły - laboratorium**

### ➤ horyzont sterowania $H_s$

Im dłuższy  $H_s$  tym większa liczba zmiennych decyzyjnych zadania optymalizacji ( $H_s \cdot n$ )

Im dłuższy  $H_s$  tym dłuższy czas obliczeń

**Szczegóły - laboratorium**

## Główne parametry regulatora predykcyjnego (2/2)

### ➤ współczynniki wag w funkcji kryterialnej (funkcji celu)

Istotny stosunek wag  $w_1$  do  $w_2$  między dokładnością nadążania za wartością (trajektorią) zadaną, a kosztem sterowania

Im większe  $w_1$  w stosunku do  $w_2$  tym wolniejsze, ale lepsze wskaźniki jakości sterowania

**Szczegóły - laboratorium**

### ➤ okres próbkowania $T_s$

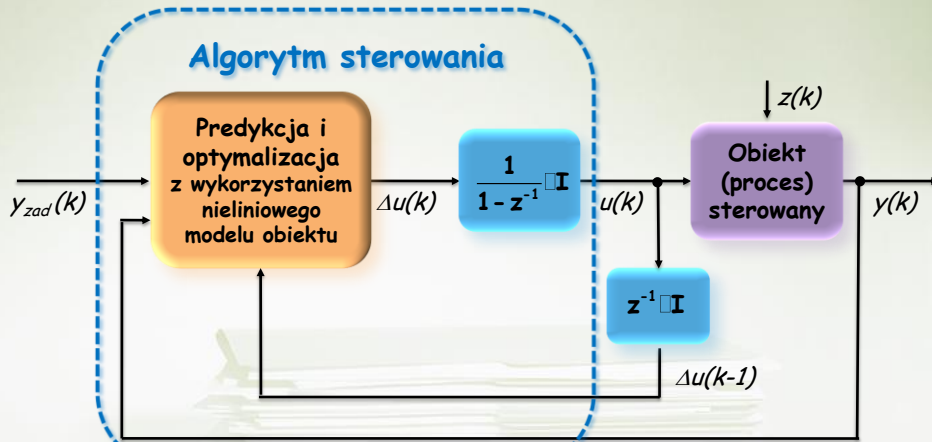
Im mniejszy  $T_s$  tym większy wymiar zadania optymalizacji

Im mniejszy  $T_s$  tym dłuższy czas obliczeń

Im większy  $T_s$  tym gorsza dynamika układu sterowania (większe opóźnienia)

**Szczegóły - laboratorium**

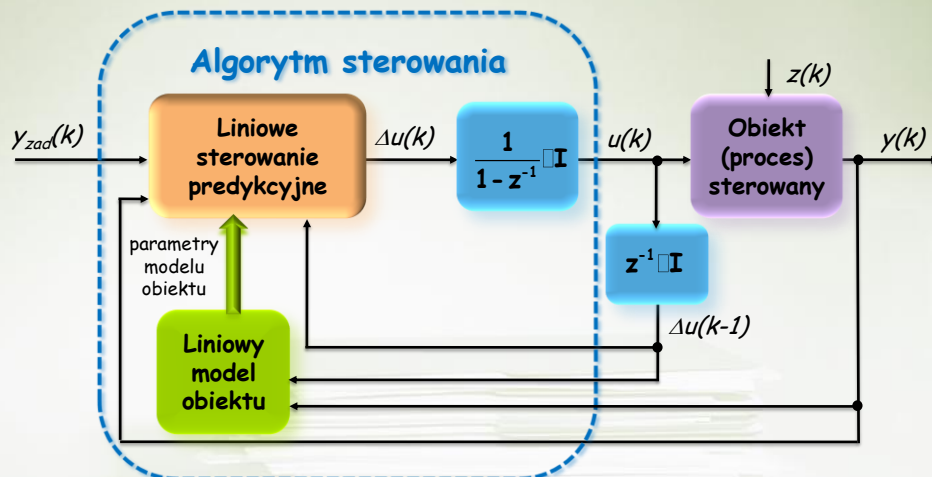
## Nieliniowe sterowanie predykcyjne (1/2)



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Tatjewski P. (2002). *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, Struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.

Szczegóły - studia II stopnia magisterskie

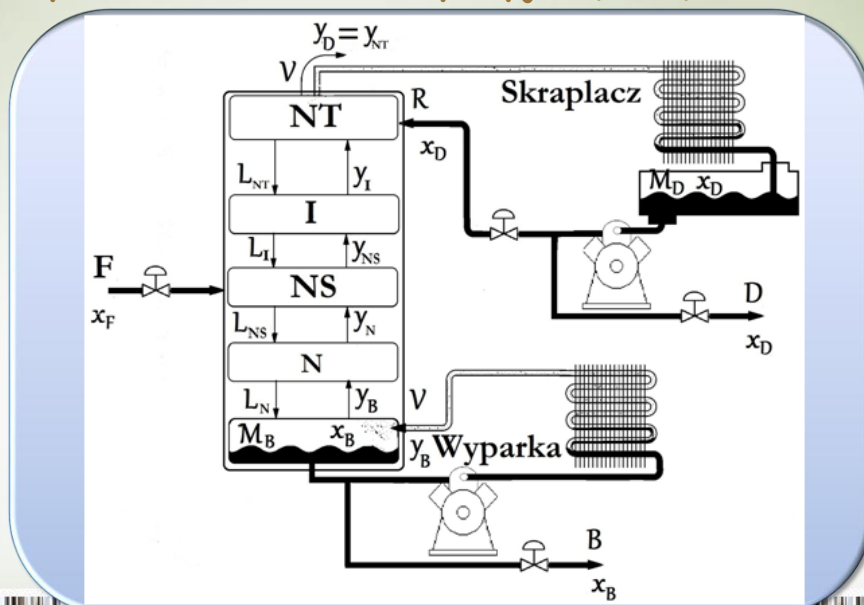
## Nieliniowe sterowanie predykcyjnego (2/2)



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Tatjewski P. (2002). *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, Struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.

Szczegóły - studia II stopnia magisterskie

### Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (1/10)



### Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (2/10)

#### Opis procesu:

1. Destylacja - proces rozdzielenia ciełego roztworu na składniki (odparowanie roztworu i skroplenie powstałych oparów)
2. Roztwór - substancje o różnych temperaturach wrzenia - odparowanie substancji o niższej temperaturze wrzenia
3. Podział surowca na dwie części: destylat  $D$  (skroplona para) i ciecz wyczerpana  $B$  (nieodparowana ciecz)
4. Fazy ciekła i gazowa roztworu są w przeciwnym kierunku - ciecz spływa grawitacyjnie na dół, a gaz płynie do góry w sposób wymuszony
5. Częściowe odparowanie cieczy spływającej z góry w wyparce
6. Skroplenie gazów (oparów) odpływających z kolumny w skraplaczu (rodzaj chłodnicy)
7. Część cieczy i pary płynących przeciwnie do siebie w kolumnie tworzy obieg zamknięty, krążący stale między wyparką a skraplaczem

### Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (3/10)

#### Oznaczenia:

Ozn.	Nazwa
$F$	strumień cieczy zasilającej (surówki) [kmol/min]
$x_F$	stężenie molowe cieczy zasilającej kolumnę [ułamek molowy etanolu]
$B, D$	strumienie cieczy wyczerpanej i destylatu [kmol/min]
$x_B, x_D$	stężenie molowe cieczy wyczerpanej i destylatu [ułamek molowy etanolu]
$M_B, M_D$	zatrzymanie cieczy w zbiorniku cieczy wyczerpanej i powrotu [kmol]
$R, V$	strumień refluxu i pary [kmol/min]
$M_i$	zatrzymanie cieczy na płycie o numerze $i$ [kmol]
$L_i, V_i$	strumień cieczy spływający i strumień pary odpływający z płytki o nr $i$ [kmol/min]
$x_i, y_i$	stężenie molowe cieczy i pary na płycie o numerze $i$ [ułamek molowy etanolu]

### Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (4/10)

#### Parametry procesu:

Wartość	Nazwa
$M_{i0} = 5$ kmol	nominalna wartość zatrzymania cieczy na płycie o numerze $i$
$L_{i0} = 1$ kmol/min	nominalny przepływ cieczy na płycie o numerze $i$
$\beta = 0,006$ min	stała reprezentująca warunki hydrauliczne
$N_i = 31$	liczba pól teoretycznych kolumny (obliczona)

Model obiektu: dyskretny, dynamiczny i nieliniowy (układ kilkunastu równań różniczkowych i algebraicznych)

Cel sterowania: oczyszczenie (rozdziół) dwuskładnikowej mieszaniny etanolu i wody, destylat (główny produkt destylacji) musi zawierać określoną ilość (stałą/zmienną) etanolu



### Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (5/10)

#### Wielkość wyjściowa (sterowana):

- $x_D$ : stężenie destylatu

#### Wielkości wejściowe (zakłócenia):

- $F$ : strumień cieczy zasilającej kolumnę (surówka)
- $x_F$ : stężenie molowe cieczy zasilającej kolumnę (surówka)

#### Wielkości sterujące:

- $R$ : strumień refluksu
- $V$ : strumień pary

#### Ograniczenia:

- min i max wartość  $R$  (0 - 15 kmol/min) i  $V$  (0 - 15 kmol/min)
- zbiornik powrotu nie może być opróżniony:  $R(k+p|k) < V(k+p|k) + 4$ ;  $p = 1, \dots, H_p$
- ograniczenia wynikające z modelu obiektu sterowania

### Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (6/10)

#### Funkcja celu:

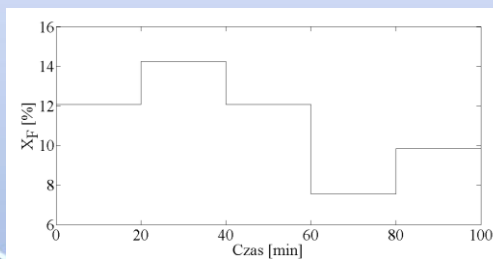
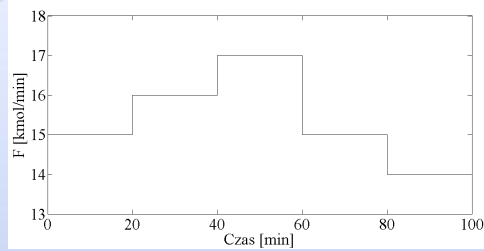
$$J = \min \left\{ \begin{aligned} & q_1 \cdot \sum_{p=1}^{H_p} \|x_D^{zad}(k+p|k) - x_D(k+p|k)\|^2 + \\ & + q_2 \cdot \sum_{p=1}^{H_p} \|\Delta V(k+p|k)\|^2 + q_3 \cdot \sum_{p=1}^{H_p} \|\Delta R(k+p|k)\|^2 \end{aligned} \right\}$$

#### gdzie:

- pierwszy składnik: uchyb regulacji
- drugi składnik: kara za zmianę sterowania  $V$
- trzeci składnik: kara za zmianę sterowania  $R$
- $q_1, q_2, q_3$  - wagi składowych funkcji celu

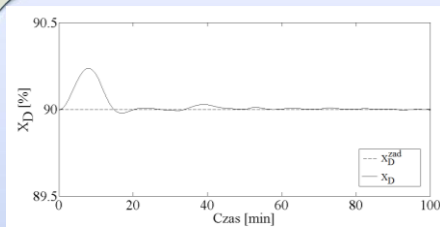
## Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (7/10)

Wyniki: zakłócenia

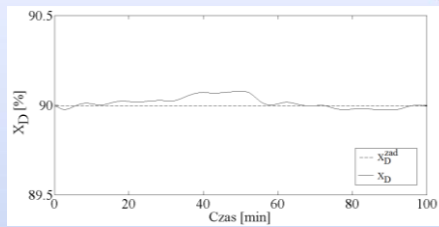


## Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (8/10)

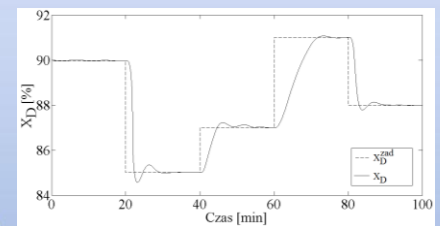
Wyniki: wielkość wyjściowa



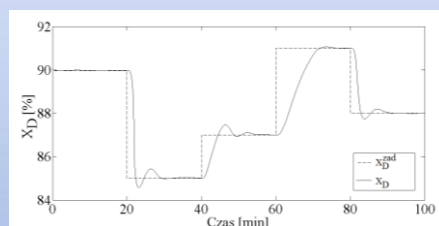
zakłócenia mierzone



zakłócenia niemierzone



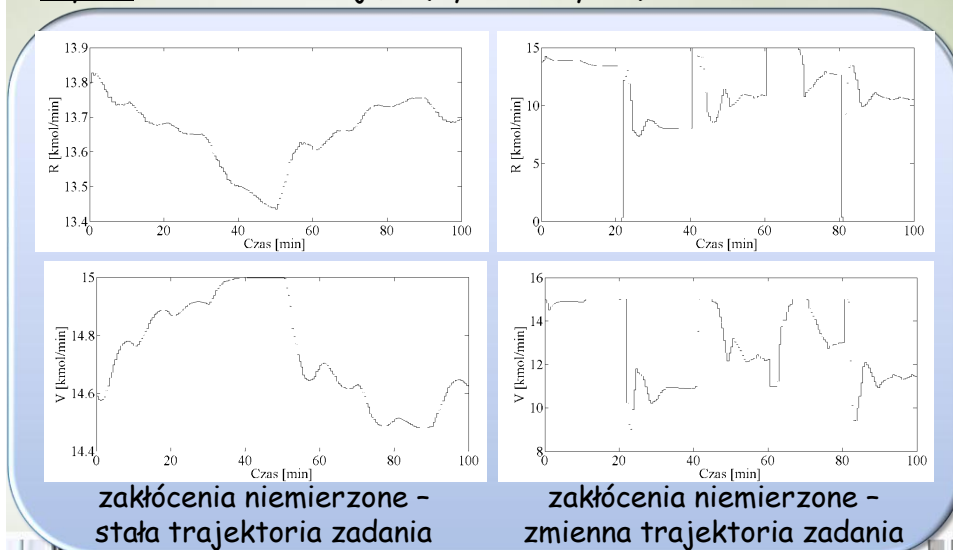
zakłócenia mierzone



zakłócenia niemierzone

## Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (9/10)

Wyniki: wielkości sterujące (wybrane wyniki)



## Przykład 1 - Kolumna destylacyjna (10/10)

Wyniki: błędy sterowania (średni błąd bezwzględny i błąd RMS - Root Mean Square)

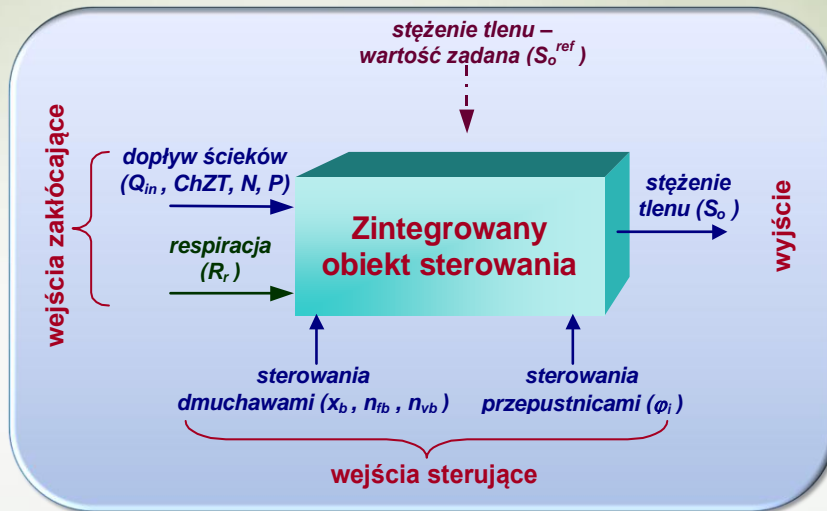
$$\Delta_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_D - x_D^{zad})^2}{n}}$$

gdzie:

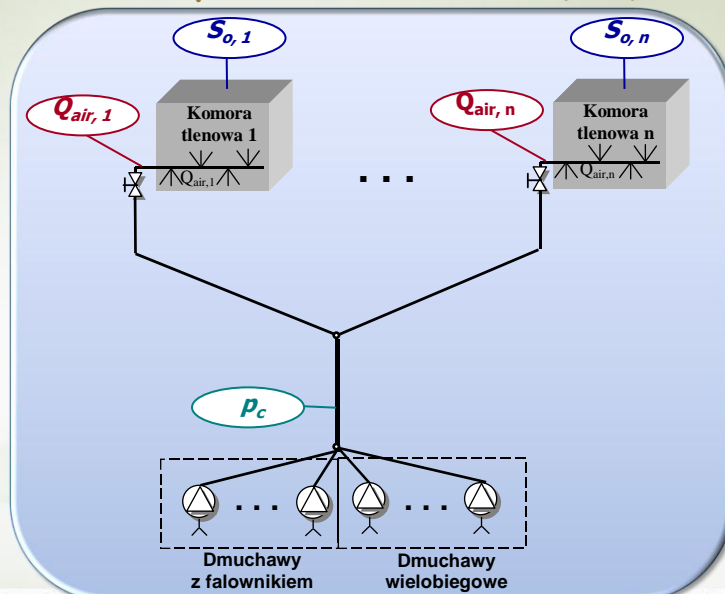
- n - liczba próbek

Staća traj. zadana - zakł. mierzone		Staća traj. zadana - zakł. niemierzone	
Śr. błąd bezwzględny	Błąd RMS	Śr. błąd bezwzględny	Błąd RMS
0,0237	0,0489	0,0258	0,0548
Zm. traj. zadana - zakł. mierzone		Zm. traj. zadana - zakł. niemierzone	
Śr. błąd bezwzględny	Błąd RMS	Śr. błąd bezwzględny	Błąd RMS
0,4648	1,1319	0,4752	1,1355

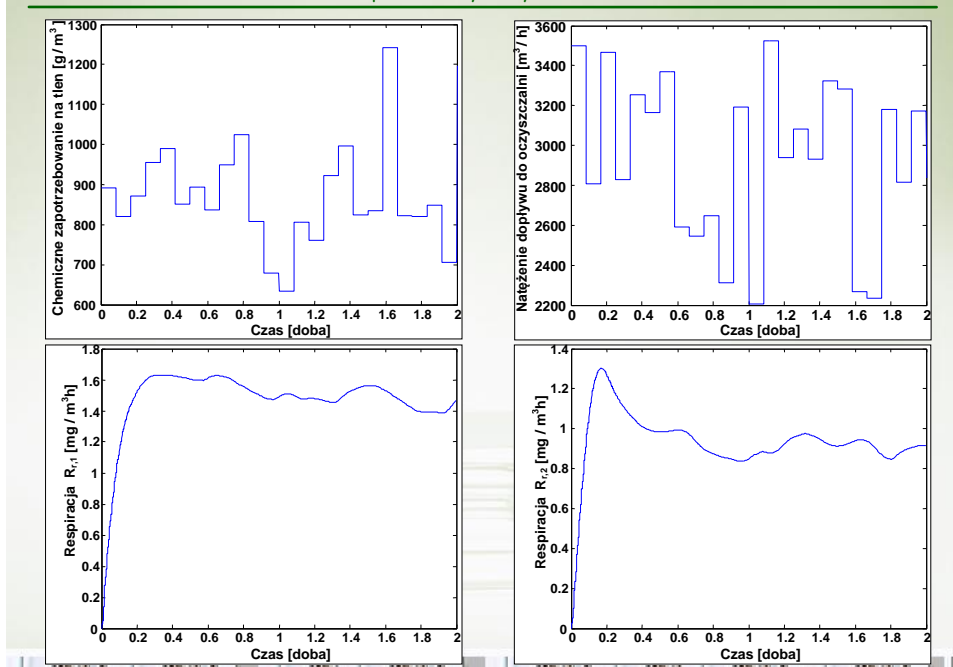
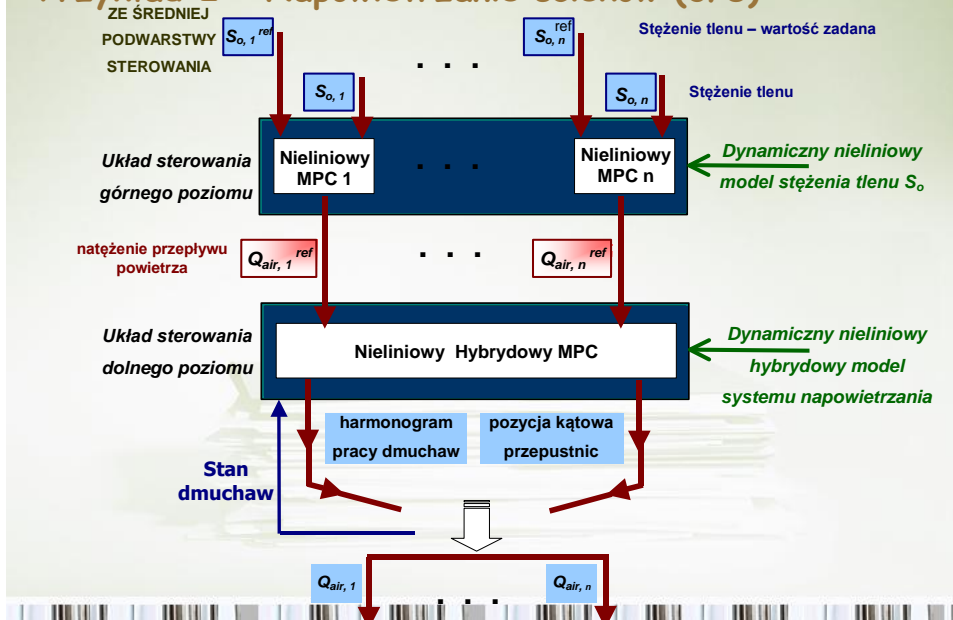
## Przykład 2 - Napowietrzanie ścieków (1/8)



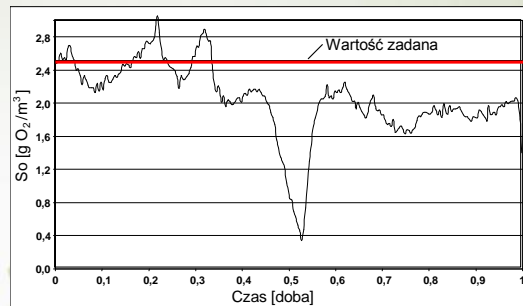
## Przykład 2 - Napowietrzanie ścieków (2/8)



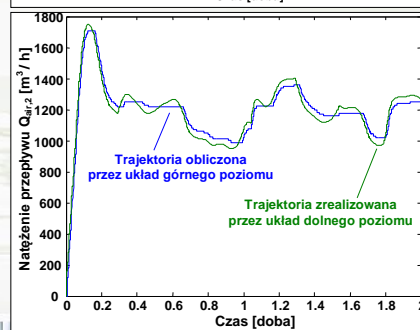
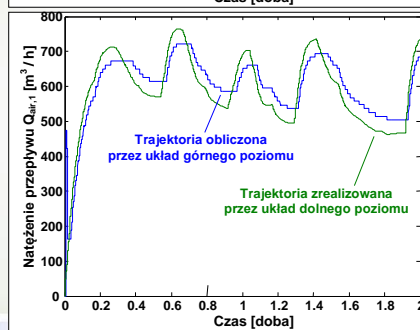
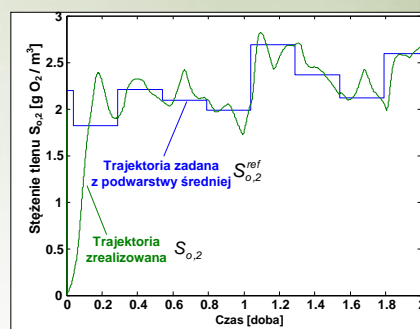
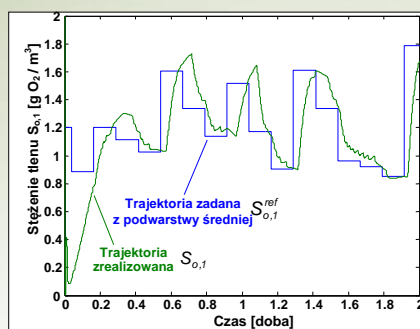
## Przykład 2 - Napowietrzanie ścieków (3/8)



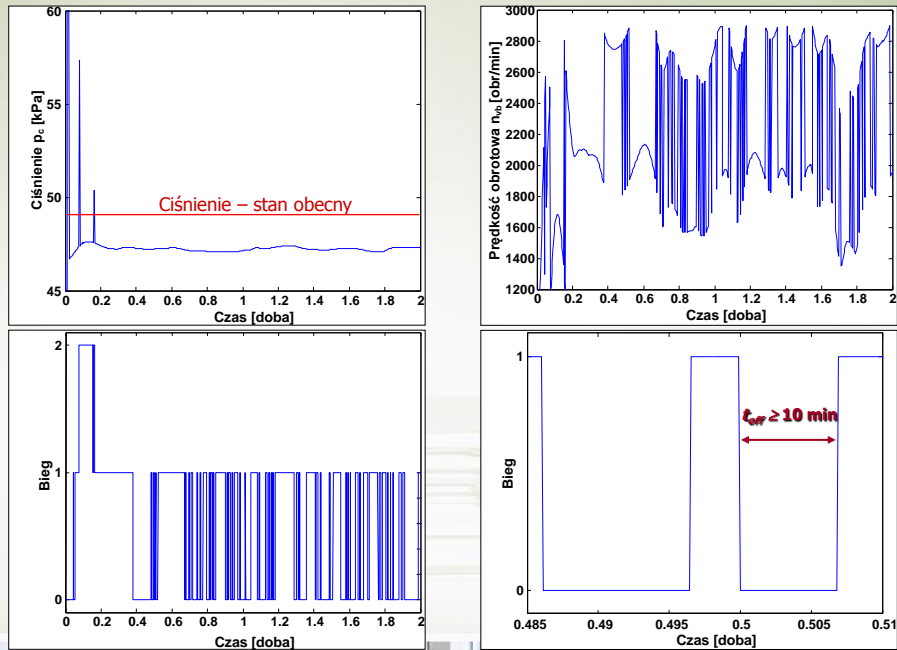
## Przykład 2 - Napowietrzanie ścieków (5/8)



Stężenie tlenu w komorze tlenowej 2  
– obiekt rzeczywisty

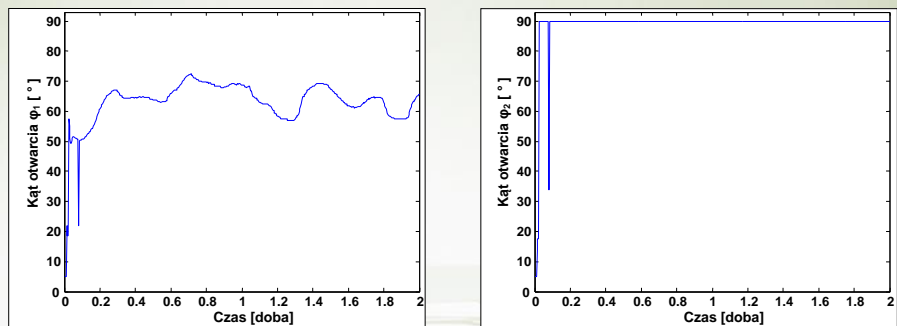


## Komputerowe Systemy Sterowania



## Komputerowe Systemy Sterowania

## Przykład 2 - Napowietrzanie ścieków (8/8)



## Produkty zawierające liniowe MPC

Nazwa firmy	Nazwa produktu	Opis
Adersa	HIECON PFC GLIDE	Hierarchical constraint control Predictive functional control Identification package
Aspen Technology	DCM-plus DCM-plus model	Dynamix matrix control package Identification package
Honeywell Hi-Spec	RMPCT	Robust model predictive control technology
Shell Global Solutions	SMOC-II	Shell multivariable optimizing control
Invensys Systems, Inc.	Connoisseur	Control and identification package

Źródło: Qin S.J., Badgwell T.A. (2003). *A survey of industrial model predictive control technology*. Control Engineering Practice 11 (2003) 733-764.

## Produkty zawierające nieliniowe MPC

Nazwa firmy	Nazwa produktu	Opis
Adersa	PFC	Predictive functional control
Aspen Technology	Aspen Target	Nonlinear MPC package
Continental Controls, Inc.	MVC	Multivariable control
DOT Products	NOVA-NLC	NOVA nonlinear controller
Pavilion Technologies	Process Perfecter	Nonlinear control

Źródło: Qin S.J., Badgwell T.A. (2003). *A survey of industrial model predictive control technology*. Control Engineering Practice 11 (2003) 733-764.

### Przykłady innych firm oferujących rozwiązania MPC:

- **ABB** ([www.abb.pl/industries/seitp406/27ac148f95956fcf5c12573c500502756.aspx](http://www.abb.pl/industries/seitp406/27ac148f95956fcf5c12573c500502756.aspx))
- **Honeywell**  
([www.honeywell.com/sites/portal?smap=honeywell\\_pl&page=Automatyka-i-sterowanie&theme=T4](http://www.honeywell.com/sites/portal?smap=honeywell_pl&page=Automatyka-i-sterowanie&theme=T4))
- **Rockwell Automation**  
([www.rockwellautomation.pl/applications/gs/emea/GSPL.nsf/pages/update\\_2007-11\\_08](http://www.rockwellautomation.pl/applications/gs/emea/GSPL.nsf/pages/update_2007-11_08))



## Sterowanie predykcyjne - podsumowanie

Ciągły rozwój algorytmów sterowania predykcyjnego:

- rozwój teorii sterowania
- doskonalenie cyfrowych (komputerowych) metod sterowania
- zwiększanie mocy obliczeniowych
- wykonywanie obliczeń w czasie rzeczywistym
- rozpowszechnianie (rozwijanie) pakietów optymalizacyjnych
- sukcesy w implementacji na obiektach rzeczywistych
- ...

## Przykładowa literatura związana z MPC

1. Maciejowski J.M. (2002). *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, Pearson Education Ltd. Harlowe, England.
2. Tatjewski P. (2002). *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych, Struktury i algorytmy*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
3. Camacho E.F., Bordons C. (2004). *Model Predictive Control*. Springer-Verlag, London Limited.
4. Agachi P.S., Nagy Z.K., Cristea M.V., Imre-Lucaci A. (2006). *Model Based Control. Case Studies in Process Engineering*. Wiley-VCH Verlag.
5. Tatjewski P. (2007). *Advanced control of industrial processes: structures and algorithms*. Springer-Verlag, London Limited.
6. Re L., Allgöwer F., Glielmo L., Guardiola C., Kolmanovsky I. (2010). *Automotive Model Predictive Control. Models, Methods and Applications*. Springer-Verlag, London Limited.
7. Holkar K.S., Waghmare L.M. (2010). *An Overview of Model Predictive Control*. International Journal of Control and Automation, Vol. 3, No. 4, pp. 47-63.

## Wybrane prace w KISS dotyczące MPC (1/2)

1. Duzinkiewicz K. (2005). *Zintegrowane sterowanie systemami zaopatrzenia w wodę pitną*. Wydawnictwa Naukowo - Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Seria: Rozprawy Monograficzne, nr 147.
2. Piotrowski R., Brdyś M.A., Konarczak K., Duzinkiewicz K., Chotkowski W. (2008). *Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes*. Control Engineering Practice, Vol. 16, No. 1, pp. 114-131.
3. Brdyś M.A., Grochowski M., Gmiński T., Konarczak K., Drewna M. (2008). *Hierarchical predictive control of integrated wastewater treatment systems*. Control Engineering Practice, Vol. 16, No. 6, pp. 751-767.
4. Duzinkiewicz K., Brdyś M.A., Kurek W., Piotrowski R. (2009). *Genetic hybrid predictive controller for optimised dissolved oxygen tracking at lower control level*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 5, pp. 1183-1192.
5. Piotrowski R., Brdyś M.A., Miotke D. (2010). *Centralized dissolved oxygen tracking at wastewater treatment plant: Nowy Dwór Gdański case study*. The 12<sup>th</sup> IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications - LSS 2010, Villaneuve D'Ascq, July 12-14, 2010, France, IFAC Publisher, Elsevier, Vol. 9, Part 1, Austria - Laxenburg.

## Wybrane prace w KISS dotyczące MPC (2/2)

6. Piotrowski R. (2011). *Hierarchiczne sterowanie predykcyjne stężeniem tlenu w reaktorze biologicznej oczyszczalni ścieków*. Monografie 112, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
7. Piotrowski R., Mojsiewicz A. (2011). *Nieliniowy regulator predykcyjny w sterowaniu instalacją napowietrzającą*. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 57, Nr 3, 253-256.
8. Łapiński M., Piotrowski R. (2012). *Sterowanie kolumną rektyfikacyjną z wykorzystaniem nieliniowego algorytmu predykcyjnego*. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 58, Nr 8, 745-749.
9. Tarnawski J. (2013). *Implementacja algorytmu regulacji predykcyjnej MPC w sterownikach programowalnych*. Pomiary Automatyka Robotyka, 6/2013, 100-107.
10. Strojny R., Piotrowski R. (2013). *Optymalizujące sterowanie układem napędowym samochodu z silnikiem spalinowym*. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 59, Nr 12, 1289-1293.
11. Piotrowski R. (2015). *Two-Level Multivariable Control System of Dissolved Oxygen Tracking and Aeration System for Activated Sludge Processes*. Water Environment Research, Vol. 87, No. 1, pp. 3-13.



**Dziękuję za uwagę**

