Wprowadzenie do technik regulacji automatycznej

prof nzw. dr hab. inż. Krzysztof Patan

Czym jest AUTOMATYKA?

Automatyka to dziedzina nauki i techniki zajmująca się teorią i praktycznym zastosowaniem urządzeń sterujących różnymi procesami bez udziału człowieka, lub przy jego ograniczonym udziale

Działy automatyki

- regulacja liniowa i nieliniowa
- regulacja ciągła i impulsowa
- regulacja jednej i wielu zmiennych
- regulacja analogowa i cyfrowa
- regulacja bez i w obecności sygnałów stochastycznych

Podstawowe pojęcia

Sygnał – w automatyce pod pojęciem sygnał rozumie się przebieg dowolnej wielkości fizycznej występującej w procesie regulacji

Element układu automatyki – układ, w którym wyróżnia się sygnał wejściowy i sygnał wyjściowy

Układ automatyki konwencjonalnej – układ, w którym występuje sygnał regulowany, sygnał regulujący oraz sygnały zakłócające

Regulator – układ, którego zadaniem jest zmienianie sygnału sterującego tak, aby sygnał błędu był jak najmniejszy

System automatyki kompleksowej – system złożony z grupy procesów jednostkowych podporządkowanych jednemu wspólnemu celowi, np. proces wielkopiecowy, walcownia blachy, proces kierowania oddziałami firmy transportowej

Cele regulacji automatycznej

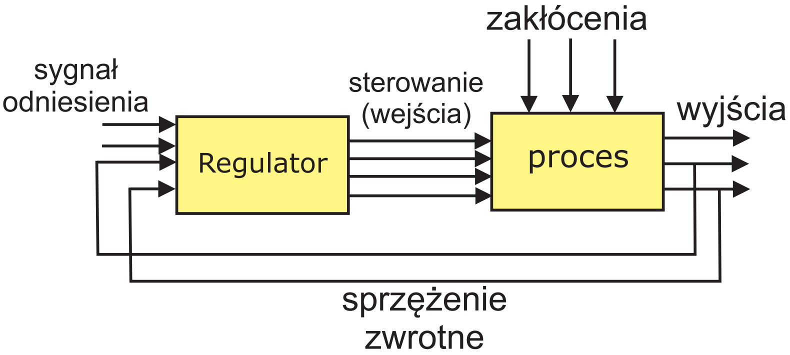
Zaprojektowanie systemów, które:

- utrzymują założone wymagania jakościowe
- minimalizują wpływ zakłóceń lub
- zmian w regulowanym układzie lub jego otoczeniu

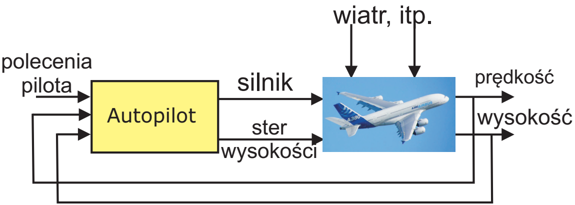
Podstawowe sposoby regulacji:

- sprzężenie zwrotne
- zmiana zachowania układu poprzez elementy wykonawcze

Elementy układu regulacji



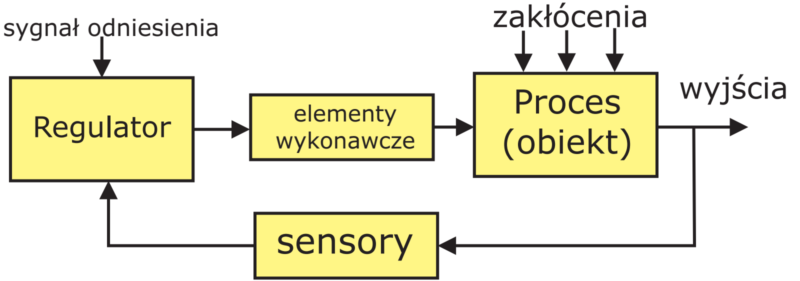
Przykład: Autopilot samolotu



Właściwości:

- mniejsze obciążenie pilota
- poprawa komfortu pasażerów
- mniejsze zużycie paliwa

Elementy układu regulacji –c.d.



Zastosowania układów regulacji

Układy regulacji, choć często niewidoczne, stanowią ważny element większości współczesnych systemów i procesów (od maszyny parowej po stacje kosmiczne):

- elektronika powszechnego użytku, np. DVD
- procesy przemysłowe, robotyka
- komputery, sieci komputerowe, systemy łączności
- systemy transportowe: samochody, samoloty, statki kosmiczne

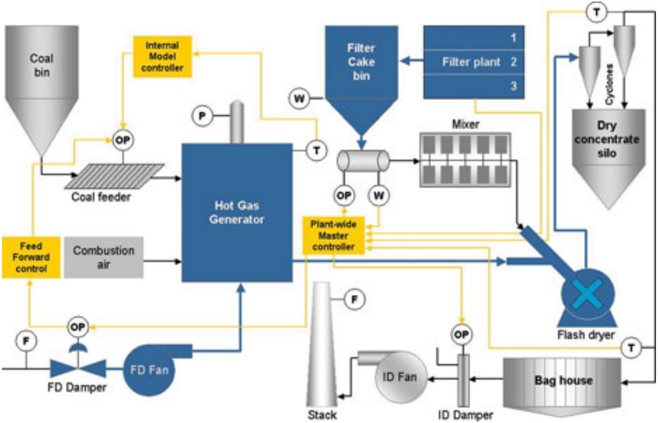
Ważne!

Sprzężenie zwrotne jest również podstawowym mechanizmem obserwowanym u żywych organizmów

Robotyka

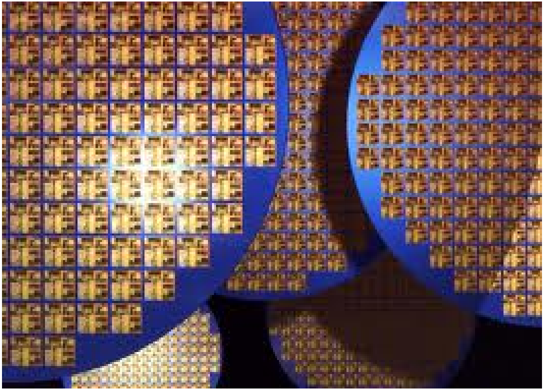
- Sterowanie manipulatorami robotycznymi
- Sterowanie robotami mobilnymi

Sterowanie procesami przemysłowymi



- Sterowanie procesów wsadowych
- Statystyczne sterowanie procesami przemysłowymi (SPC)

Produkcja przemysłowa



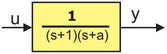
- masowe wytwarzanie układów półprzewodnikowych

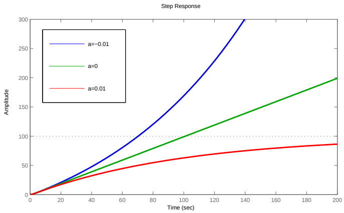
Kontrola ruchu i transport

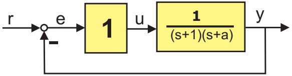
- Sterowanie ruchem pojazdów
- Systemy wspomagania kierowcy
- Autonomiczne pojazdy

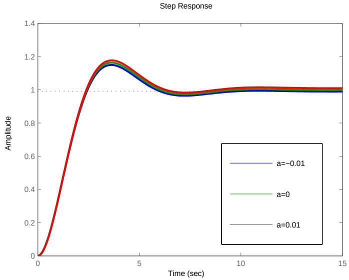
Zawody Urban DARPA

Sprzężenie zwrotne często pomaga ...

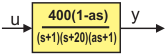


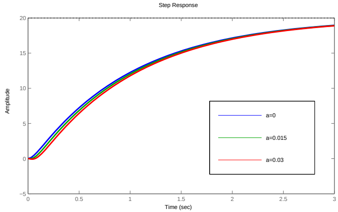


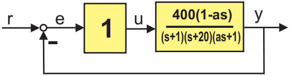


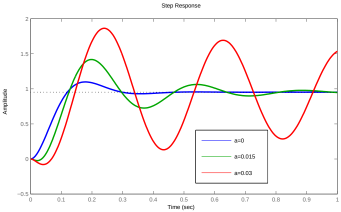


... ale może również zaszkodzić





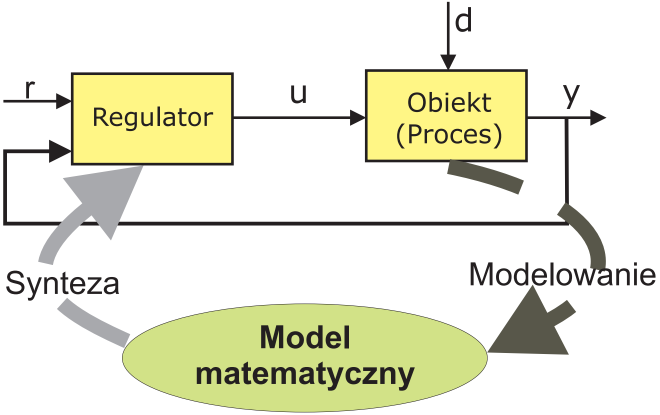




Kluczowe składniki technik regulacji automatycznej

- Zrozumienie dynamiki i metod analizy złożonych systemów
- Zastosowanie właściwych metod projektowania regulatorów
- Wykorzystanie metod matematycznych oraz opisu fizycznego regulowanych procesów
- Podejście oparte na modelu procesu (ang. *model-based approach*)

Procedura projektowania regulatorów



Algorytm postępowania

- Modelowanie procesu
  (na podstawie fizycznych własności lub identyfikacji)
- Analiza własności modelu
  (stabilność, odpowiedź modelu)
- Projektowanie regulatora tak, aby osiągnąć założone wymagania jakościowe regulacji
  (w dziedzinie częstotliwości lub czasu)
- Implementacja regulatora
  (przy pomocy komputera lub sterownika PLC)

Modelowanie dynamiki procesu

Dla systemów ciągłych

1. Równania różniczkowe (dziedzina czasu)
2. Transmitancja (dziedzina operatorowa, transformata Laplace'a)
3. Opis w przestrzeni stanów

Dla systemów dyskretnych

1. Równania różnicowe (dziedzina czasu)
2. Transmitancja (dziedzina operatorowa, przekształcenie Z)
3. Opis w przestrzeni stanów

Reprezentacje 2 i 3 stanowią podstawowe podejścia do analizowania i projektowania układów regulacji

Transformata Laplace'a

Przekształca sygnał z dziedziny czasu do dziedziny zmiennych zespolonych (dziedzina-s)

$$f(t) \overset{\mathcal{L}}{\overbrace{\longrightarrow}} F(s)$$

$$F(s) = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt$$

Transformata Laplace'a posiada wiele użytecznych właściwości

Własności transformaty Laplace'a

Różniczkowanie: $f^{(n)}(t) \longrightarrow s^n F(s)$

Zastąpienie równań różniczkowych

$$b_m y^{(m)}(t) + b_{m-1} y^{(m-1)}(t) + \ldots + b_1 y^1(t) + b_0 y(t) =$$
$$a_n u^n(t) + a_{n-1} u^{n-1}(t) + \ldots + a_1 u^1(t) + a_0 u(t)$$

liniowymi równaniami algebraicznymi

$$\left(b_m s^m + b_1 s^{m-1} + \ldots + b_1 s + b_0\right) Y(s) =$$
$$\left(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0\right) U(s)$$

Transmitancja

$$\Big(b_m s^m + b_1 s^{m-1} + \ldots + b_1 s + b_0\Big) Y(s) =$$

$$\Big(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0\Big) U(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_1 s^{m-1} + \ldots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0}$$

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \ldots \text{transmitancja}$$

Transmitancja – własności

- Transmitancja to matematyczny model układu - postać operatorowa równania różniczkowego reprezentującego relację wyjścia do wejścia układu
- Transmitancja jest niezależna od sygnału pobudzającego (sterującego)
- Transmitancja nie odwzorowuje fizycznej struktury układu (wiele układów - jedna transmitancja).
- Jeśli transmitancja jest znana to możemy analizować odpowiedzi układu na zadane pobudzenia (sterowania).
- Jeśli nie znamy transmitancji to możemy ją ekperymentalnie wyznaczyć poprzez pobudzanie układu znanymi sygnałami i analizowaniem odpowiedzi na te sygnały.

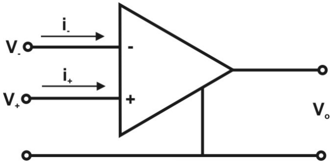
Modele układów elektrycznych – c.d.

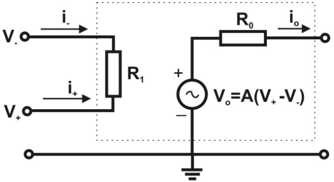
Impedancje elementów elektrycznych

Element	Dz. czasu	Tr. Laplace	Impednacja
Rezystor	$V(t) = RI(t)$	$V(s) = RI(s)$	$Z = R$
Kondensator	$V(t) = \frac{1}{C}\int I(t)dt$	$V(s) = \frac{1}{C}\frac{I(s)}{s}$	$Z = \frac{1}{sC}$
Cewka	$V(t) = L\frac{d}{dt}I(t)$	$V(s) = LsI(s)$	$Z = sL$

Modele układów elektrycznych – c.d.

Wzmacniacz operacyjny



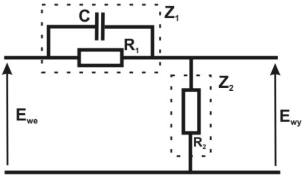


Idealny wzmacniacz operacyjny

- $R_1 = \infty$, $R_0 = 0$ *i* $A = \infty$
- $i_+ = i_- = 0$
- $v_+ - v_- = 0$

Modele układów elektrycznych – c.d.

Układy RLC



$$Z_1 = \frac{R_1}{R_1 C s + 1}, Z_2 = R_2$$

Transmitancja

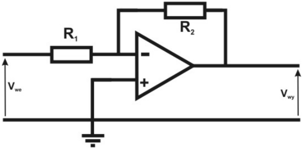
$$\frac{E_{wy}}{E_{we}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_1 C s + 1}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C s + 1}$$

Jeśli $R_1 C = T$ i $\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \alpha$ to

$$\frac{E_{wy}}{E_{we}} = \alpha \frac{T s + 1}{\alpha T s + 1}$$

Modele układów elektrycznych – c.d.

Układy ze wzmacniaczem operacyjnym



$$\frac{V_- - V_{we}}{R_1} + \frac{V_- - V_{wy}}{R_2} = 0$$

czyli

$$\frac{0 - V_{we}}{R_1} + \frac{0 - V_{wy}}{R_2} = 0$$

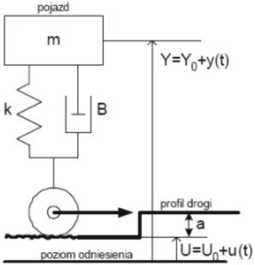
oraz

$$V_{wy} = \frac{-R_2 V_{we}}{R_1}$$

Transmitancja

$$\frac{-R_2}{R_1}$$

Modele układów mechanicznych



- m - masa pojazdu
- k - współczynnik sprężystości zawieszenia
- B - współczynnik tłumienia

Suma sił w układzie

$$m\frac{d^2Y(t)}{dt^2}+B\left(\frac{dY(t)}{dt}-\frac{dU(t)}{dt}\right)+k(Y(t)-U(t))=mg$$

W stanie ustalonym

- położenie drogi $U_0 = \mathrm{const}$,
- położenie zawieszenia $Y_0 = \mathrm{const}$,
- brak zmian oznacza, że pochodne $= 0$.

Modele układów mechanicznych – c.d.

W stanie ustalonym

$$k(Y_0 - U_0) = mg$$

Przyjmujemy, że

- $Y = Y_0 + y(t)$
- $U = U_0 + u(t)$

Ostatecznie, równanie dynamiki układu to

$$m\frac{d^2y(t)}{dt^2} + B\frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = B\frac{du(t)}{dt} + ku(t)$$

Modele układów mechanicznych – c.d.

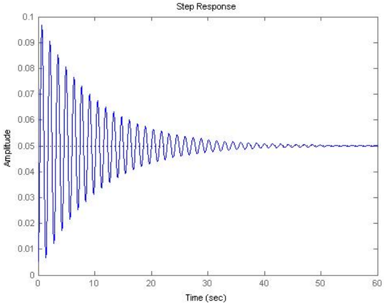
Stosując przekształcenie Laplace'a, otrzymujemy

$$(ms^2 + Bs + k)Y(s) = (Bs + k)U(s)$$

czyli transmitancja

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Bs + k}{ms^2 + Bs + k}$$

Modele układów mechanicznych – c.d.



Przykładowe dane

- $m = 1000$ [kg]
- $B = 200$[Ns/m]
- $k = 20000$[N/m]
- $a = 0.05$ -zmiana profilu drogi o 5 cm

Modele w przestrzeni stanów

Wprowadzamy zmienną stanu $x(t)$ (wektor) w celu parametryzacji 'pamięci' układu

- Stan zawiera wszystkie informacje potrzebne do określenia przyszłego zachowania układu bez odniesienia się do pochodnych zmiennych wejściowych i wyjściowych.
- Wektor stanu jest często określany na podstawie fizycznych własności układów (odniesienie do energii układu)
- Rozmiar wektora stanu jest równoważny rzędowi układu

Modele układów liniowych w przestrzeni stanów

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} & = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y} & = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{D}\boldsymbol{u} \end{cases}$$

gdzie $\boldsymbol{A}$ – kwadratowa macierz stanu o rozmiarze $n \times n$, $\boldsymbol{B}$ – macierz sterowania o rozmiarze $n \times m$, $\boldsymbol{C}$ – macierz wyjściowa o rozmiarze $p \times n$ i $\boldsymbol{D}$ – macierz przejścia o rozmiarze $p \times m$

Podsumowanie

Analizujmy dostępne modele procesu/układu aby:

- zrozumieć zachowanie rozważanego procesu/układu
- określić wymagania dla regulowanego procesu/układu
- dokonać wyboru podstawowych wymagań podczas projektowania regulatora (np. struktura regulatora)

Jesteśmy zainteresowani:

- stabilnością układu otwartego
- odpowiedzią przejściową (na skok jednostkowy lub impuls jednostkowy)
- odpowiedzią w stanie ustalonym (stałe lub sinusoidalne wymuszenie)