

# Sterowanie impedancyjne – teoria i podstawy realizacji

Edward Jezierski, Grzegorz Granosik

Spotkanie Konsorcjum RobREx

Poznań, 26 kwietnia 2013 r.



POLITECHNIKA ŁÓDZKA

# Plan wystąpienia

## 1. Impedancja i admitancja elektryczna

(Przypadek wymuszeń sinusoidalnych; idealne i rzeczywiste źródła napięciowe i prądowe; impedancja i admitancja operatorowa)

## 2. Elektryczne analogi podstawowych liniowych elementów mechanicznych

(Podobieństwa pomiędzy dynamicznymi układami mechanicznymi i elektrycznymi; analogia prędkość-prąd; analogia prędkość-napięcie)

## 3. Podstawy sterowania impedancyjnego

(Sterowanie poziomem źródła i jego impedancją/admitancją; impedancja łańcucha kinematycznego robota; sterowanie impedancyjne łańcucha kinematycznego)

## 4. Sterowanie impedancyjne jako nieodzowne uzupełnienie sterowania pozycyjnego i pozycyjno-siłowego.

## 5. Realizacje sterowania impedancyjnego napędów robotów

# Impedancja i admitancja elektryczna (1)

Impedancja elektryczna jest miarą oporu pozornego dwójników zawierających elementy posiadające zdolność gromadzenia energii.

Pojęcie impedancji jest związane z liniowymi układami elektrycznymi podlegającymi pobudzeniom sinusoidalnie zmiennym. Jeżeli częstotliwość pobudzania układu jest stała w czasie, to quasi-ustalone przebiegi czasowe wszystkich prądów i napięć w obwodzie liniowym mają również charakter sinusoidalny.

$$u(t) = U_m \sin(\varphi_u + \omega t) \quad i(t) = I_m \sin(\varphi_i + \omega t)$$

Do jednoznacznego odwzorowywania takich przebiegów mogą być stosowane dwuelementowe wektory, jednak wygodniejsze jest użycie liczb zespolonych.

$$u(\omega) = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \exp(j\varphi_u) \quad i(\omega) = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \exp(j\varphi_i)$$

Prawo Ohma dla stanów quasi-ustalonych:  $u(\omega) = Z(\omega)i(\omega)$

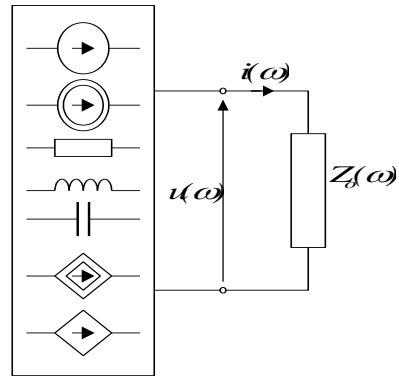
$$Z(\omega) = R + jX(\omega) = |Z(\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$$

$R$  – rezystancja,  $X$  – reaktancja

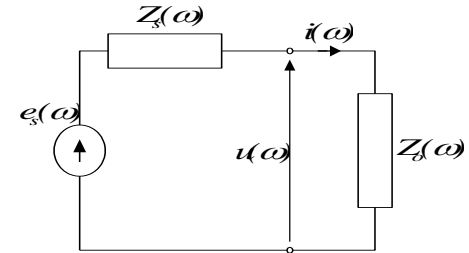
# Impedancja i admitancja elektryczna (2)

Twierdzenie Thevenina; Źródła napięciowe idealne i rzeczywiste, a impedancja źródła.

a)

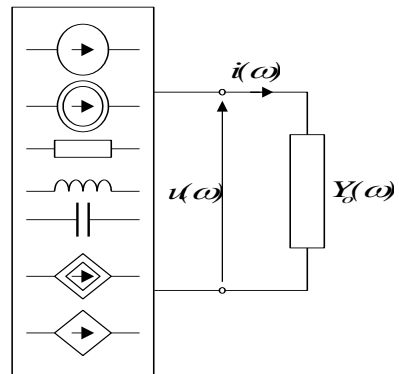


b)

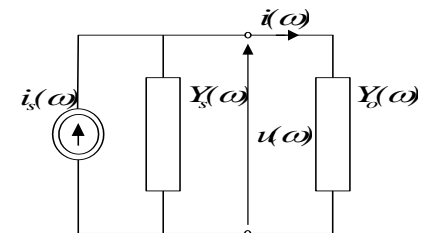


Twierdzenie Nortona; Źródło prądowe idealne i rzeczywiste, a admitancja źródła.

a)



b)

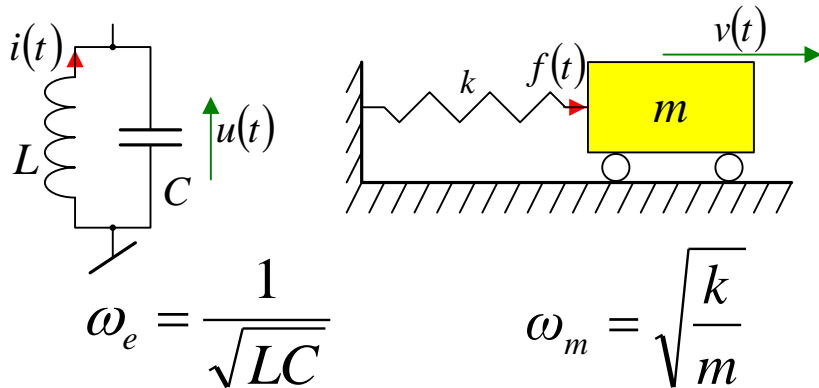


Admitancja dwójnika  
(konduktancja +susceptancja):

$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = G + jB(\omega)$$

# Analogie pomiędzy układami elektrycznymi i mechanicznymi

Oscylacyjne układy liniowe:



$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \omega^2 z(t) = 0$$

Moc chwilowa w układach elektrycznych i mechanicznych:

$$p_e(t) = u(t)i(t) \quad p_m(t) = f(t)v(t)$$

Istnieją dwie możliwości zdefiniowania tych analogii, biorąc pod uwagę podobieństwo powyższych wzorów:

- analogia prędkość-prąd,
- analogia prędkość-napięcie.

# Analogia prędkość-prąd

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \Leftrightarrow i(t) = \frac{dq}{dt}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_L = \frac{1}{2}Li^2$$

przepływ

Zmienna lub parametr mechaniczny	Zmienna lub parametr elektryczny
Prędkość $v(t)$	Prąd $i(t)$
Siła $f(t)$	Napięcie $u(t)$
Masa $m$	Indukcyjność $L$
Współczynnik sprężystości $k$	Odwrotność pojemności $1/C$

# Analogia prędkość-napięcie

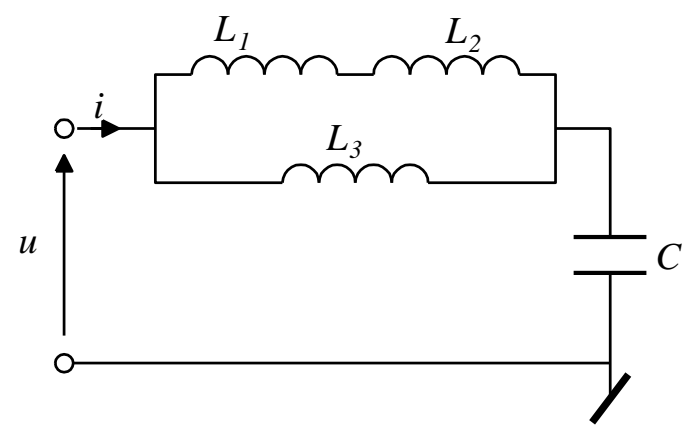
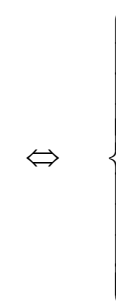
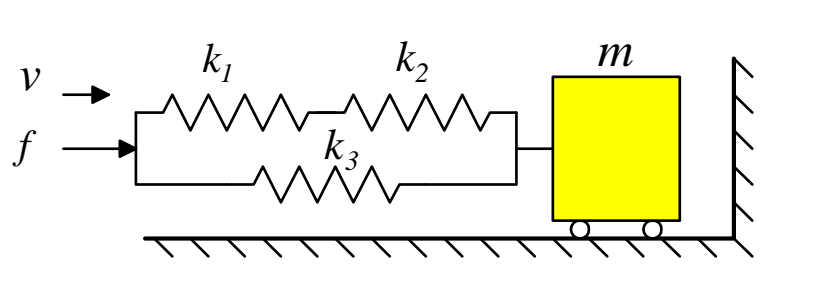
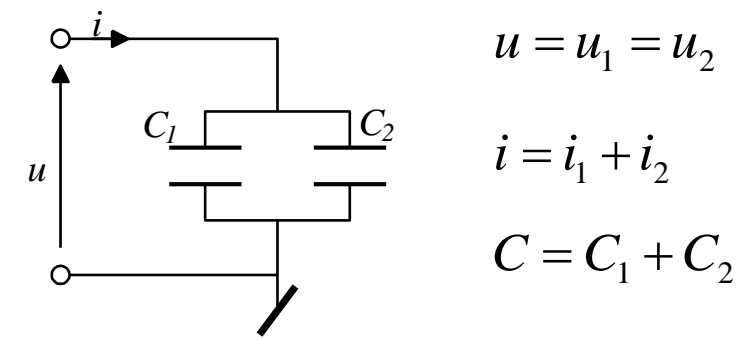
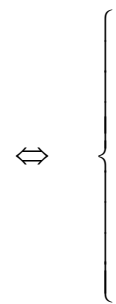
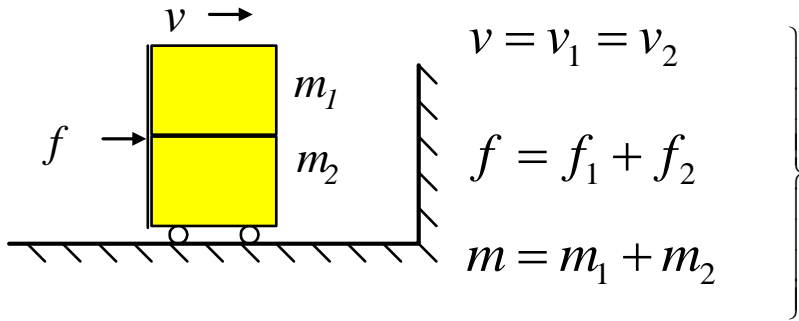
Podstawowe relacje:

$$e(t) = Blv(t);$$

$$f(t) = Bli(t)$$

Wielkości mechaniczne	Wielkości elektryczne
<p data-bbox="305 544 455 589">Inercja</p> $f(t) = m \frac{dv}{dt} \quad \tau(t) = J \frac{d\omega}{dt}$ $E = \frac{1}{2} mv^2 \quad E = \frac{1}{2} J\omega^2$	<p data-bbox="1213 534 1456 579">Pojemność</p> $i(t) = C \frac{du}{dt}$ $E = \frac{1}{2} Cu^2$
<p data-bbox="247 876 529 922">Elastyczność</p> $v(t) = c \frac{df}{dt} \quad \omega(t) = c \frac{d\tau}{dt}$ $E = \frac{1}{2} cf^2 \quad E = \frac{1}{2} c\tau^2$	<p data-bbox="1199 873 1479 919">Indukcyjność</p> $u(t) = L \frac{di}{dt}$ $E = \frac{1}{2} Li^2$

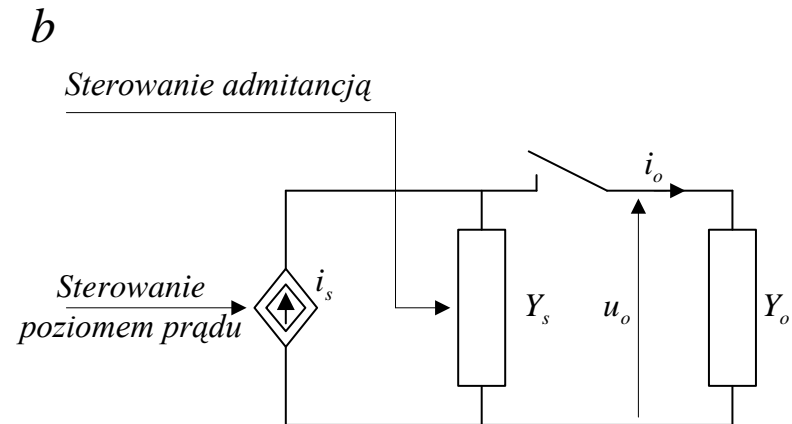
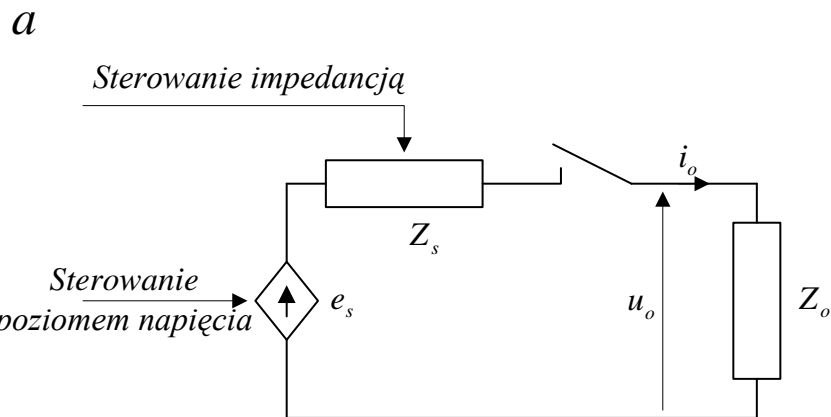
# Analogia prędkość-napięcie - układy równoważne (2)





# Sterowanie impedancyjne

Def.: Sterowanie impedancyjne to kontrolowanie przekazywania energii do odbiornika przez zmiany nie tylko poziomu źródła ale również jego impedancji (lub admitancji).



Przykłady układów elektronicznych, w których wykorzystywane jest aktywne oddziaływanie na właściwości impedancyjne źródła:

- tranzystory polowe, których sterowanie polega na zmianie konduktancji kanału;
- trójstanowa bramka logiczna z wejściem strobuującym.

# Impedancja i admitancja w robotyce

Pojęcia impedancji i admitancji w robotyce mogą być rozumiane jako bezpośrednie przeniesienie pojęć „elektrycznych”.

## Uwagi:

- manipulator jest dynamicznym obiektem nieliniowym, można mówić jedynie o lokalnej impedancji lub admitancji mechanicznej (zachodzi potrzeba linearyzacji lub doświadczalnego wyznaczenia parametrów)
- manipulator jest obiektem operującym w przestrzeni, należy posługiwać się pojęciami macierzy impedancji (admitancji).
- definicja tych pojęć zależy od wyboru analogii pomiędzy układami mechanicznymi a elektrycznymi.

Równania definicyjne impedancji i admitancji oparte o transformaty wektorów prędkości kartezyjskich efektora i uogólnionych sił, przy stosowaniu analogii prędkość-napięcie:

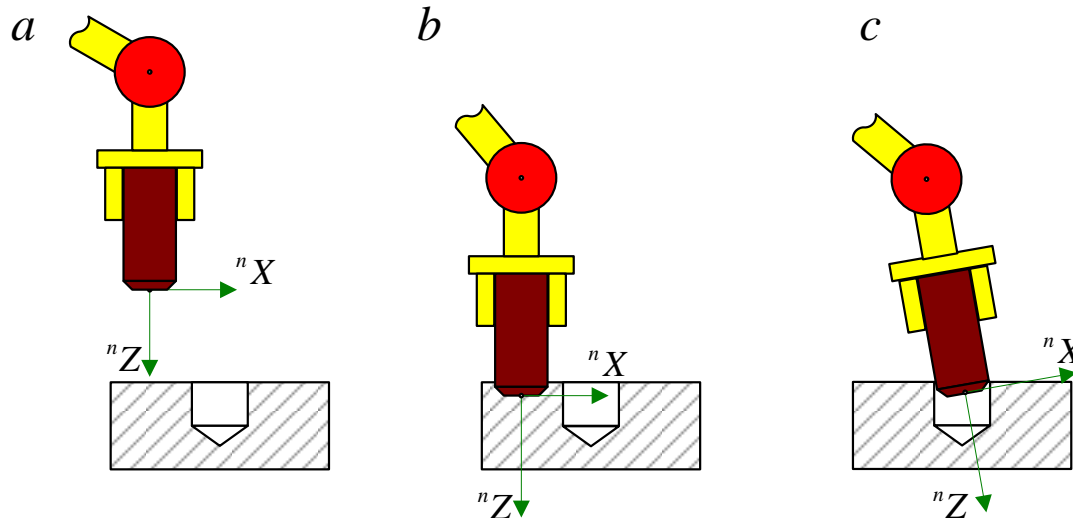
$$\mathbf{v}_x = \mathbf{Z}_x \mathbf{f}_x$$

$$\mathbf{f}_x = \mathbf{Y}_x \mathbf{v}_x$$

# Problemy występujące przy sterowaniu pozycyjno-siłowym

Przy praktycznych realizacjach sterowania hybrydowego mogą wystąpić kolizje mechaniczne lub niestabilności kontaktu efektora z elementami otoczenia. Podstawowe przyczyny:

- niedokładności w oszacowaniu położenia efektora względem elementów otoczenia,
- zmiana właściwości dynamicznych manipulatora po dojściu efektora do sztywnej powierzchni,
- opóźnienia czasowe w torze regulacji.



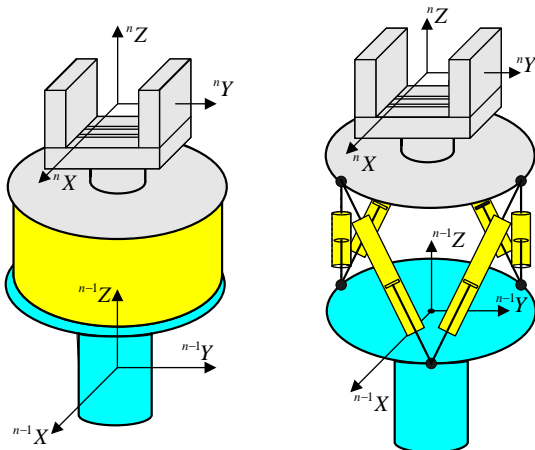
# Pasywne sterowanie podatne (1)

Wszystkie te nieprawidłowości mają mniejsze znaczenie w manipulatorach, które charakteryzują się zmniejszoną podatnością łańcucha kinematycznego.

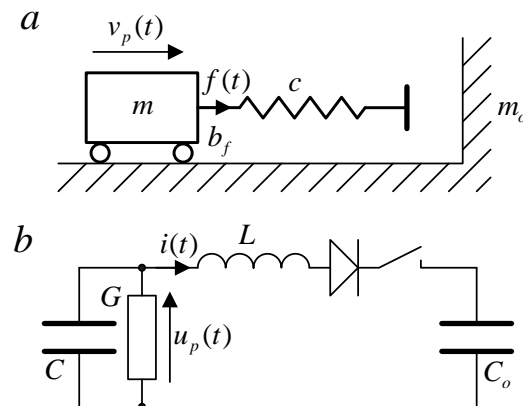
Podatność w  $i$ -tym kierunku:  $\gamma_i = \frac{\partial x_i}{\partial f_i}$ , przy  $\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$  i  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ .

Sztywność w  $i$ -tym kierunku:  $\kappa_i = 1/\gamma_i$

Pasywne elementy pośrednie służące do kontrolowanego powiększenia podatności łańcucha kinematycznego (elastyczne przekładki, tłumiki):



Modele do analizy stanów przejściowych:



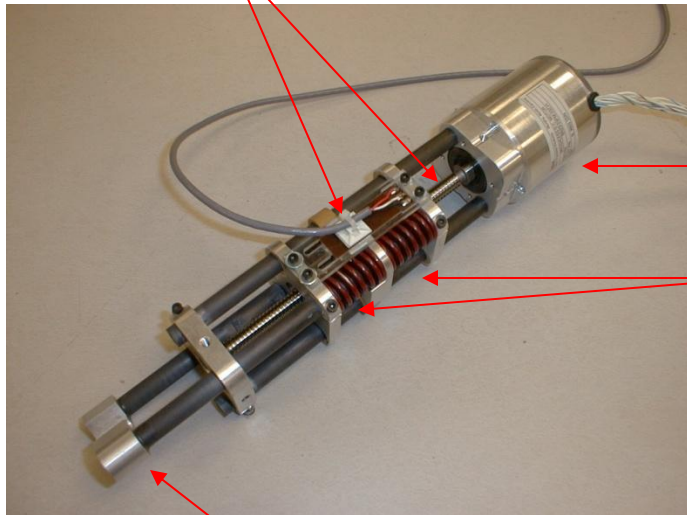
# Pasywne sterowanie podatne (2)

Elementy podatne mogą być także umieszczane bezpośrednio w zespołach napędowych.

Przykłady siłowników z szeregowymi elementami podatnymi firmy Yobotics:

a) elektryczny

przekładnia śrubowo-toczna

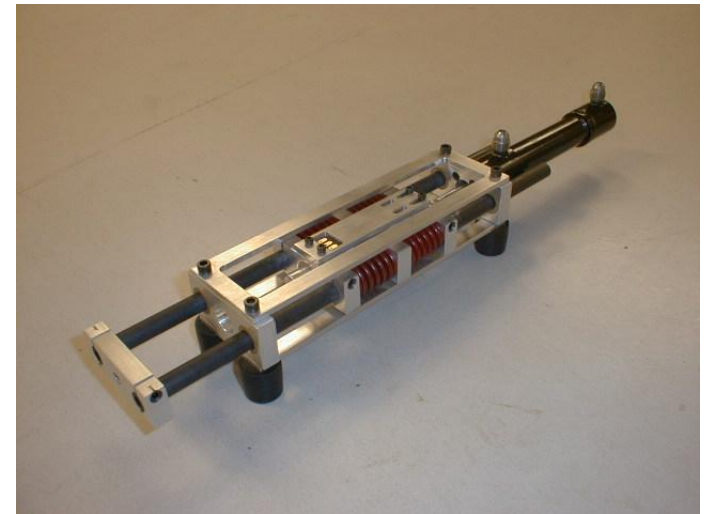


silnik

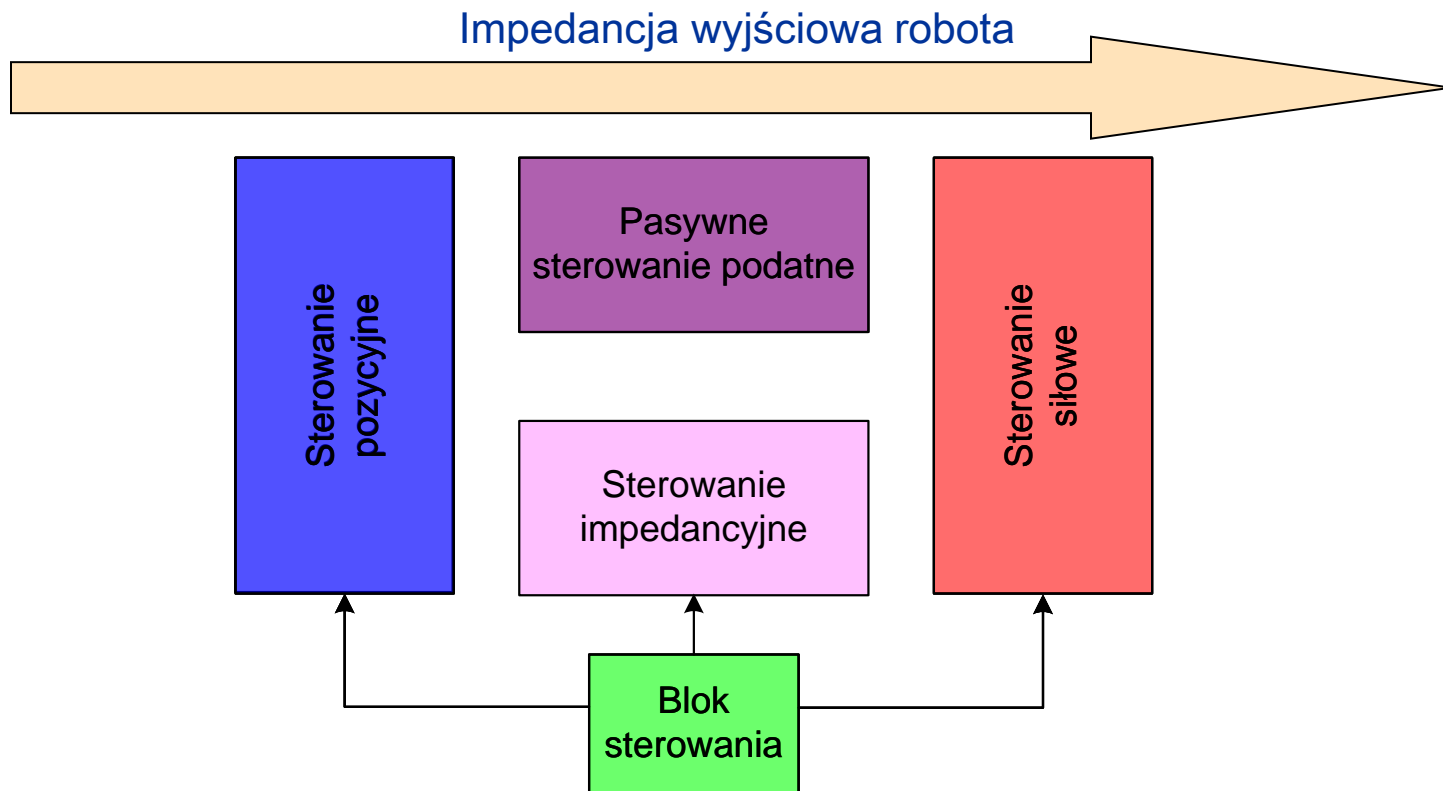
zespół sprężyn

wyście

b) hydrauliczny



# Od sterowania pozycyjnego do sterowania impedancyjnego robotów



Sterowanie impedancyjne = aktywne sterowanie podatne; wpływające na komponenty impedancji źródeł napędu.

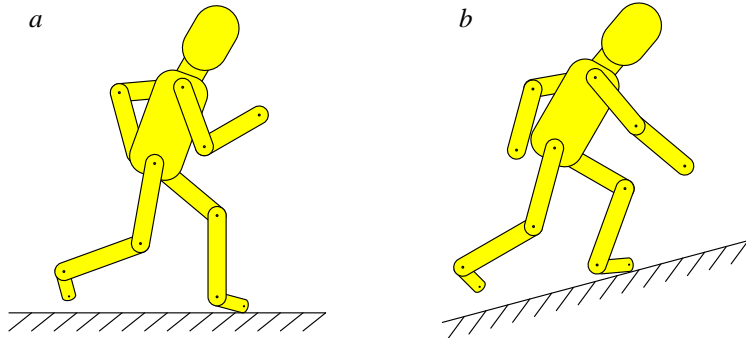
# Zastosowanie sterowania impedancyjnego w robotyce

Obszary zastosowań:

- testowanie właściwości otoczenia robota;
- wspólna realizacja operacji przez grupę robotów;
- roboty dwuręczne;
- roboty rehabilitacyjne;
- roboty usługowe współpracujące z człowiekiem;
- roboty kroczące, biegające i skaczące.

Zmiana impedancji powoduje zmianę częstotliwości naturalnych oscylacji łańcucha kinematycznego i zachowanie płynności ruchów.

Przykład aplikacji - RABBIT  
(Chevallerau, Abba i inni; 2003):



# Realizacja sterowania impedancyjnego robotów

Realizacja sterowania impedancyjnego robotów polega na odpowiednim sterowaniu zespołów napędowych.

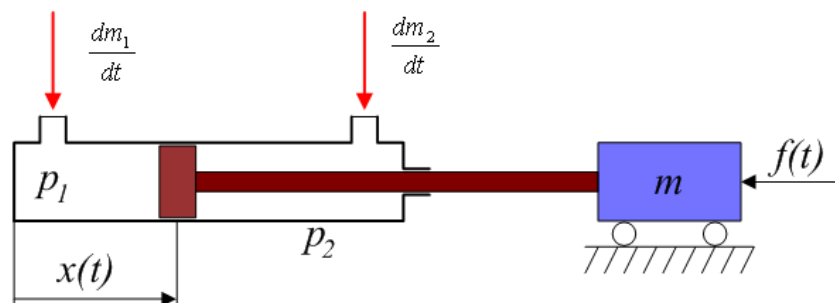
Najprostsze jest sterowanie impedancyjne napędów, które charakteryzują się naturalną podatnością. Dobrym przykładem są siłowniki pneumatyczne lub mięśnie pneumatyczne. Wówczas możemy mówić o parametrycznej regulacji impedancji zespołu napędowego.

Sterowanie impedancyjne napędów elektrycznych jest znacznie trudniejsze. Do jego realizacji trzeba stosować układ regulacji sztywności napędu (zwykle z silnikiem PMDC lub PMAC). Musi on w trybie on-line przetwarzać informacje o aktualnej prędkości ruchu obrotowego silnika i wytwarzanym momencie napędowym oraz odpowiednio generować fale PWM zasilające poszczególne uzwojenia fazowe silnika.



# Dynamika napędu pneumatycznego

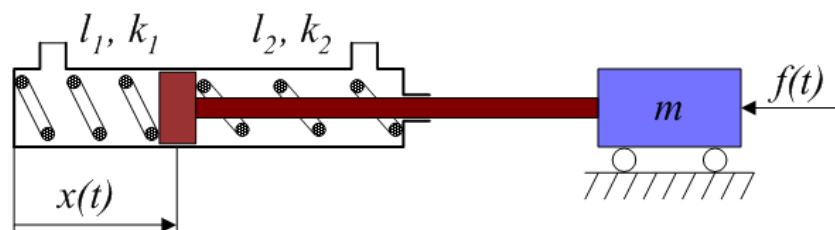
a)



$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f(t) = p_1 A_1 - p_2 A_2 - f_{fr}$$

$$\dot{p}_1 = -\frac{\kappa p_1 \dot{V}_1}{V_1} + \frac{\kappa R T_1 \dot{m}_1}{V_1}$$

b)



$$\dot{p}_2 = -\frac{\kappa p_2 \dot{V}_2}{V_2} + \frac{\kappa R T_2 \dot{m}_2}{V_2}$$

Przybliżone właściwości „sprężyn pneumatycznych” w otoczeniu ustalonego punktu pracy:

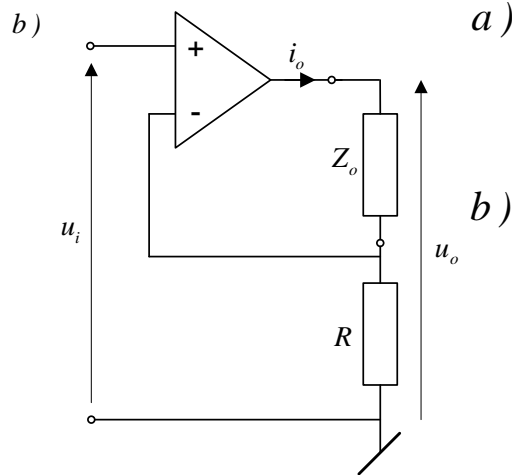
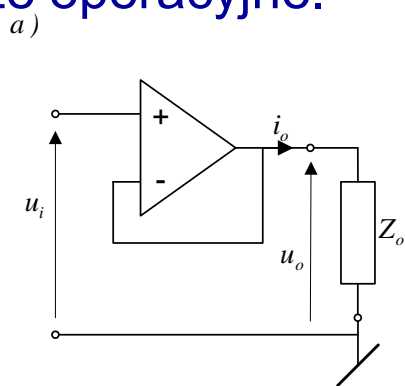
$$f_p(x) - f_{p_o} \cong -(k_{1_o} + k_{2_o})(x - x_o)$$

$$k = (k_{1_o} + k_{2_o}) \cong d(p_{1_o} + p_{2_o})$$

Wzrost poziomu ciśnienia powoduje usztywnienie napędu oraz wzrost tarcia. Zmieniane są jednocześnie dwa spośród trzech komponentów impedancji napędu. Zmiany sztywności mają dość ograniczony zakres.

# Sterowanie impedancyjne napędów elektrycznych (1)

Idea metody wywodzi się z analizy układów zbudowanych w oparciu o wzmacniacze operacyjne.



a)

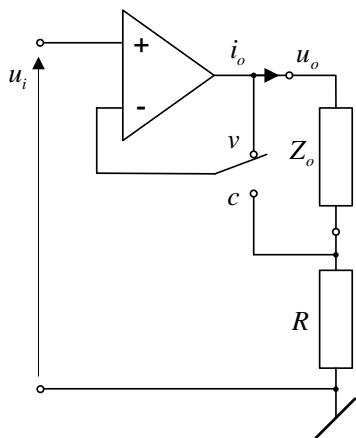
$$u_s = u_o = u_i, \quad Z_s = 0$$

b)

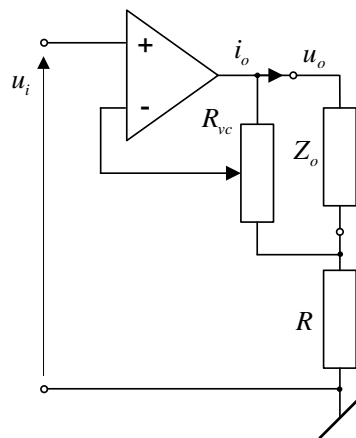
$$i_s = i_o = \frac{u_i}{R}, \quad Y_s = 0$$

Sterowane napięciowo układy z WO o wyjściach a) napięciowym; b) prądowym.

a)

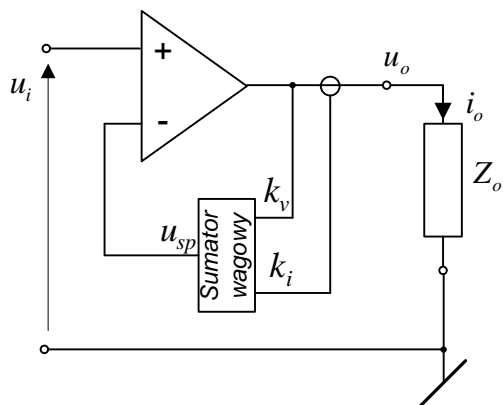


b)



Układ o wyjściu napięciowo-prądowym przełączanym a) skokowo; b) w sposób płynny

# Sterowanie impedancyjne napędów elektrycznych (2)



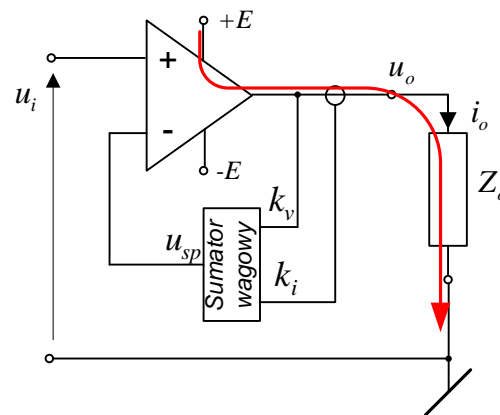
$$u_{sp} = k_v u_o + k_i i_o$$

$$e_s = \frac{u_i}{k_v} \quad Z_s = \frac{k_i}{k_v} \quad Y_s = \frac{k_v}{k_i}$$

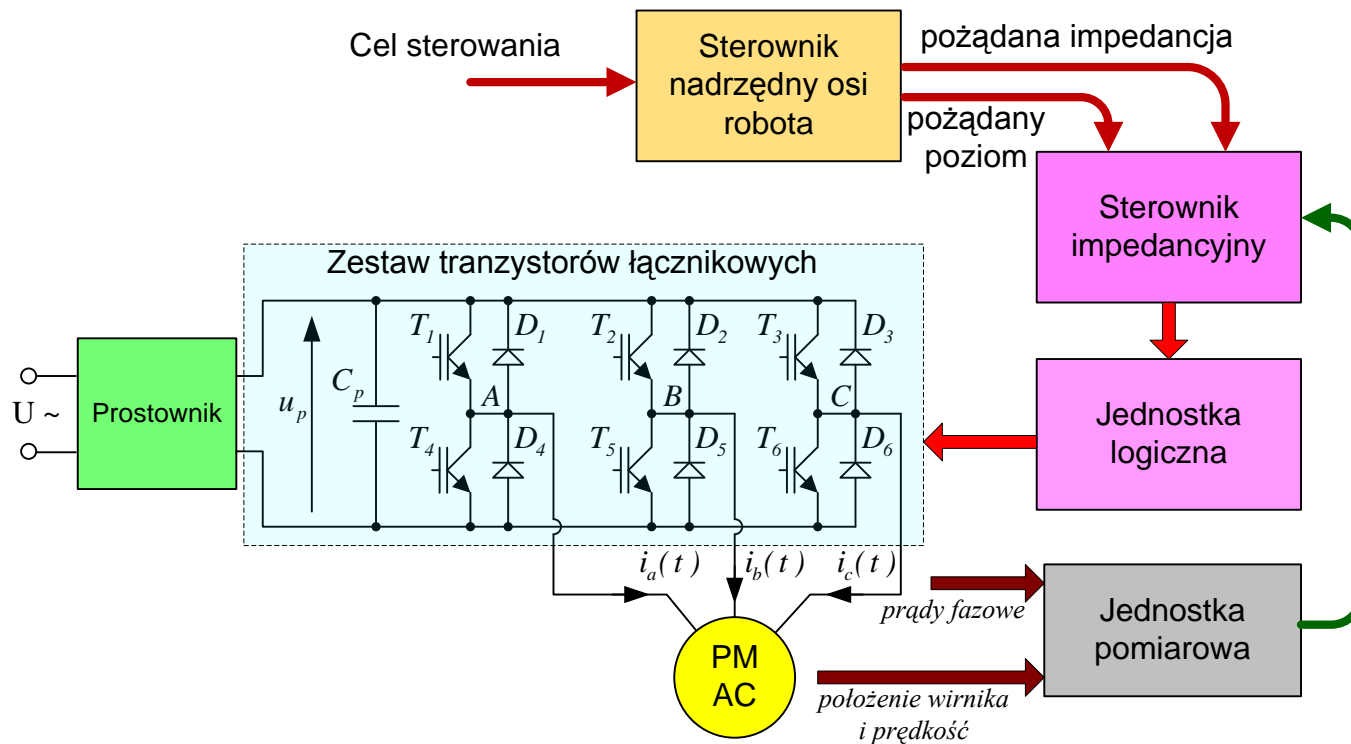
a)  $k_v \neq 0, \quad k_i = 0 \quad \Rightarrow \quad Z_s = 0$

b)  $k_v = 0, \quad k_i \neq 0 \quad \Rightarrow \quad Z_s = \infty$

Ilustracja przepływu prądu do obciążenia, powodującego straty mocy w WO.



# Sterowanie impedancyjne napędów elektrycznych (3)



Zastosowanie metody modulacji szerokości impulsów zmniejsza straty energii źródła.

Przekształtnik oraz sterowniki wprowadzają opóźnienia czasowe, spowalniające szybkość zmian impedancji napędu w porównaniu do układów parametrycznej regulacji impedancji.

## Uwagi ogólne

1. W robotyce wygodnym jest posługiwanie się pojęciami impedancji oraz admitancji przeniesionymi z obszaru inżynierii elektrycznej.
2. Sterowanie impedancyjne może być rozumiane jako stan pośredni pomiędzy sterowaniem pozycyjnym a siłowym. Pozwala na łagodną tranzycję pomiędzy tymi dwoma klasycznymi sposobami sterowania efektora robota.
3. Natura dowiodła, że sterowanie impedancyjne jest nieodzowne, zapewnia bezpieczeństwo ruchu i zwiększa efektywność energetyczną chodu/biegu.
4. Realizacja pożądanej impedancji napędu pneumatycznego jest stosunkowo prosta, jednak powoduje duże straty energii.
5. Realizacja sterowania impedancyjnego robotów wyposażonych w napędy elektryczne sprowadza się do kontrolowania w czasie rzeczywistym relacji prędkość-moment napędowy silnika.