

Automatyka napędu elektrycznego (układów elektromechanicznych)

Krzysztof Zawirski pok. 628A - bud. WE

[\(http://zsep.cie.put.poznan.pl/\)](http://zsep.cie.put.poznan.pl/)

materiały dydaktyczne/

AiR stacj. inż. s04/Automatyka napędu elektrycznego

Automatyka napędu elektrycznego

1. Wprowadzenie

- 1.1. Ogólna struktura zautomatyzowanego układu elektromechanicznego (napędowego)
- 1.2. Opis części mechanicznej napędu

2. Regulacja prędkości obrotowej

- 2.1. Struktura obwodu regulacji prędkości
- 2.2. Synteza regulatora prędkości
- 2.3. Dynamika układu dla małych i dużych wymuszeń
- 2.4. Uproszczona analiza procesów rozruchu, hamowania i nawrotu

3. Regulacja położenia kąowego

- 3.1. Struktura obwodu regulacji położenia
- 3.2. Czasooptymalne pozycjonowanie serwomechanizmu
- 3.3. Regulacja nadążna położenia z wyprzedzeniem
- 3.4 Metody cyfrowego pomiaru położenia i prędkości.

4. Układy regulacji prędkości napędu prądu stałego

- 4.1. Metody regulacji prędkości obrotowej silnika obcowzbudnego prądu stałego
- 4.2. Struktura napędu tyrystorowego nienawrotnego
- 4.3. Napęd tyrystorowy nawrotny
 - sposoby zmiany kierunku momentu (nawrotu)
 - układy regulacji z blokadą prądów wyrównawczych
- 4.4. Regulacja dwustrefowa prędkości obrotowej
- 4.5. Regulacja prędkości obrotowej za pomocą sterownika impulsowego napięcia stałego

5. Regulacja prędkości obrotowej silnika indukcyjnego klatkowego

- 5.1. Sposoby regulacji prędkości silnika klatkowego
- 5.2. Częstotliwościowa regulacja skalarna prędkości obrotowej (U/f);
- 5.3. Regulacja wektorowa prędkości obrotowej z odniesieniem strumieniowym
- 5.4. Metoda bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem (DTFC)
- 5.5 Układ łagodnego rozruchu

6. Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych

- 6.1. Model matematyczny silnika synchronicznego o magnesach trwałych
- 6.2. Zasada regulacji częstotliwościowej – strategię sterowania
- 6.3. Struktury układów regulacji silnika

7. Sterowanie silnikami o komutacji elektronicznej**7.1. Sterowanie silnikiem bezszczotkowym prądu stałego (BLDCM)**

- zasada działania i opis matematyczny
- układ regulacji prędkości obrotowej BLDCM

7.2. Sterowanie silnikiem reluktancyjnym przełączalnym (SRM)

- opis matematyczny, zasada działania
- struktura przekształtnika, sterowanie napięciowe i prądowe
- struktura układu regulacji

7.3. Napędy z silnikiem krokowym

- charakterystyka kątowa momentu
- zależność momentu od częstotliwości impulsów
- sterowanie pełno-krokowe i ułamkowo-krokowe

8. Sterowanie bezczujnikowe

8.1 Metody sterowania bezczujnikowego;

8.2 Odtwarzanie (estymacja) wybranych zmiennych stanu silnika indukcyjnego klatkowego

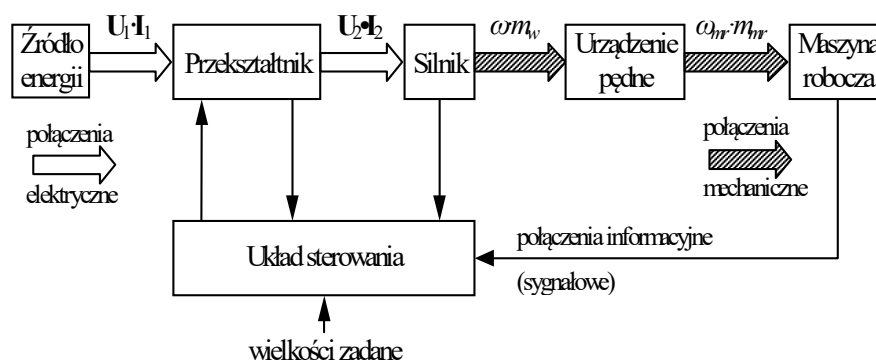
8.3 Sterowanie bezczujnikowe silnikiem BLDC.

9. Sterowanie silnikami PMSM i SynRM w napędach pojazdów**10. Generatory wiatrowe**

Literatura

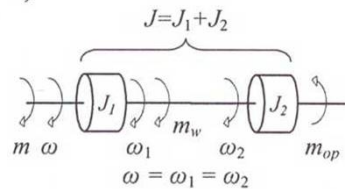
1. Zawirski K., Deskur J., Karczmarek T.: Automatyka napędu elektrycznego, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2012.
2. Grzesiak L., Kaszewski A., Ufnalski B.: Sterowanie napędów elektrycznych. Analiza, modelowanie, projektowanie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
3. Sieklucki G., Bisztyga B., Zdrojewski A., Orzechowski T., Sykulski R.: Modele i zasady sterowania napędami elektrycznymi, Wydawnictwo AGH, Kraków 2014.
4. Leonhard W.: Control of Electrical Drives, Springer, Berlin, New York, 2001.
5. Kaźmierkowski M.P, Tunia H.: Automatic Control of Converter-Fed Drives, ELSEVIER, Amsterdam, London, New York, Tokyo, Warszawa, 1994.

Ogólna struktura sterowanego napędu elektrycznego



Równania ruchu

$$E_e = E_u + E_k$$



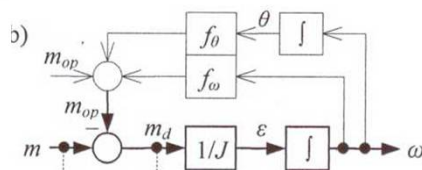
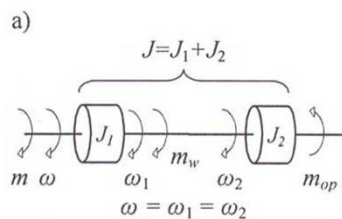
$$\int_0^t P_e dt = \int_0^t P_u dt + J \frac{\omega^2}{2}$$

$$m_e \omega = m_{op} \omega + J \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}$$

$$m_e - m_{op} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}$$

Schematy układu z sztywnym połączeniem:

a) kinematyczny, b) blokowy

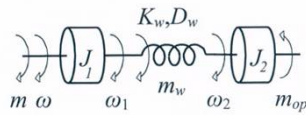


$$m_d = J\epsilon$$

$$\text{lub } m_d = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$m_d = m - m_{op}$$

Równania opisujące układ napędowy z połączeniem elastycznym



$$\omega = \omega_1 \neq \omega_2$$

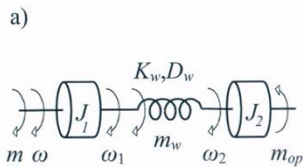
$$m - m_w = J_1 \frac{d\omega}{dt}$$

$$m_w - m_{op} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}$$

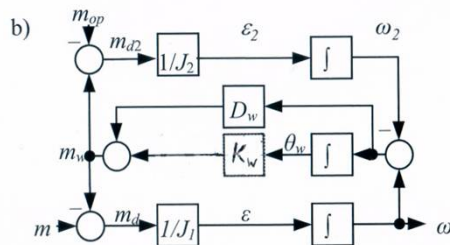
$$m_w = K_w \int_0^t (\omega - \omega_2) d\tau + D_w (\omega - \omega_2)$$

gdzie: K_w – współczynnik sprężystości wału (Nm/rad),
 D_w – współczynnik tłumienia (Nm/rad/s).

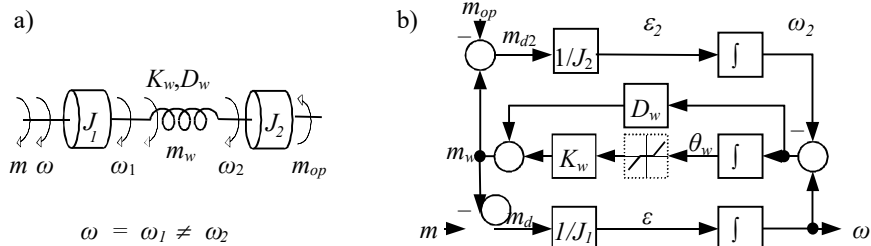
Schematy układu z połączeniem elastycznym: a) kinematyczny, b) blokowy



$$\omega = \omega_1 \neq \omega_2$$



Schematy układu z połączeniem elastycznym:
a) kinematyczny, b) blokowy



Równania opisujące układ napędowy z połączeniem elastycznym

$$\frac{d\omega}{dt} = \varepsilon$$

$$J_1 E(s) = M(s) - M_w(s) \quad (1)$$

$$J_2 E_2(s) = M_w(s) - M_{op}(s) \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \varepsilon_2$$

$$M_w(s) = k_w \frac{E(s) - E_2(s)}{s^2} \quad (3)$$

$$D = 0$$

$$J_1 E(s) = M(s) - \frac{k_w E(s)}{s^2} + \frac{k_w E_2(s)}{s^2} \quad (4)$$

$$J_2 E_2(s) = \frac{k_w E(s)}{s^2} - \frac{k_w E_2(s)}{s^2} - M_{op}(s) \quad (5)$$

$$M_{op} = 0$$

$$E_2(s) \left(J_2 + \frac{k_w}{s^2} \right) = \frac{k_w E(s)}{s^2} \quad (6)$$

$$E_2(s) = \frac{k_w E(s)}{s^2} \frac{1}{\left(J_2 + \frac{k_w}{s^2} \right)} \quad (7)$$

Równania opisujące układ napędowy z połączeniem elastycznym

$$E_2(s) = \frac{k_w E(s)}{s^2} \frac{1}{\left(J_2 + \frac{k_w}{s^2}\right)} \quad (7) \quad J_1 E(s) = M(s) - \frac{k_w E(s)}{s^2} + \frac{k_w E_2(s)}{s^2} \quad (8)$$

$$E(s) \left[J_1 + \frac{k_w}{s^2} - \left(\frac{k_w}{s^2} \right)^2 \frac{1}{\left(J_2 + \frac{k_w}{s^2} \right)} \right] = M(s) \quad (9)$$

$$E(s) \left[J_1 J_2 + J_1 \frac{k_w}{s^2} + J_2 \frac{k_w}{s^2} + \left(\frac{k_w}{s^2} \right)^2 - \left(\frac{k_w}{s^2} \right)^2 \right] = M(s) \left(J_2 + \frac{k_w}{s^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{E(s)}{M(s)} = \frac{J_2 + \frac{k_w}{s^2}}{J_1 J_2 + (J_1 + J_2) \frac{k_w}{s^2}} \quad (11)$$

$$\frac{E(s)}{M(s)} = J_1 \frac{s^2 + \frac{k_w}{J_2}}{s^2 + \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} k_w} = J_1 \frac{s^2 + \omega_{AR}^2}{s^2 + \omega_{NT}^2} \quad (12)$$

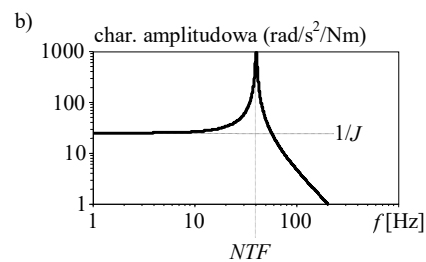
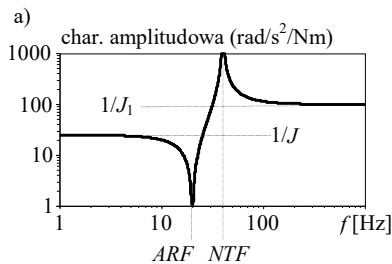
Logarytmiczne charakterystyki częstotliwościowe układu z połączeniem sprężystym:

a) dla transmitancji $G_{m \rightarrow \varepsilon}(j2\pi f)$, b) dla transmitancji $G_{m \rightarrow \varepsilon 2}(j2\pi f)$

$$G_{m \rightarrow \varepsilon}(s) = \frac{E(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_1} \cdot \frac{s^2 + (2\pi \cdot ARF)^2}{s^2 + (2\pi \cdot NTF)^2} \quad ARF = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_w}{J_2}}, \quad NTF = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_w J}{J_1 J_2}}, \quad J = J_1 + J_2$$

$$G_{m \rightarrow \varepsilon 2}(s) = \frac{E_2(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_1} \cdot \frac{(2\pi \cdot ARF)^2}{s^2 + (2\pi \cdot NTF)^2}$$

Częstotliwość rezonansowa NTF
(Natural Torsional Frequency)
częstotliwość antyrezonansowa ARF
(Anti-Resonance Frequency)



Schemat blokowy układu o momencie bezwładności zależnym od kąta obrotu

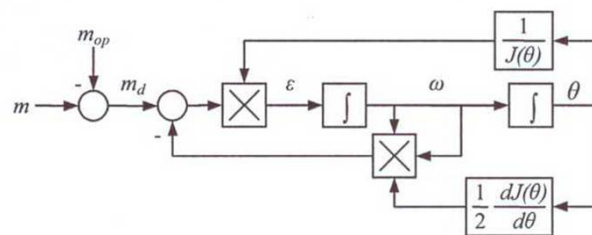
$$m_d = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{dt}$$

$$m_d = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\theta}$$

$$J(\theta) = J_{st} + J_{zm}(\theta)$$

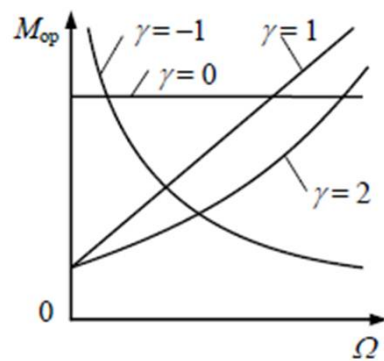
$$J(\theta)\varepsilon = m_d - \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ(\theta)}{d\theta}$$

$$\varepsilon = \left(m_d - \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ(\theta)}{d\theta} \right) \frac{1}{J(\theta)}$$



CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE MASZYN ROBOCZYCH

$$m_{op} = m_0 + m_1 \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^\gamma$$



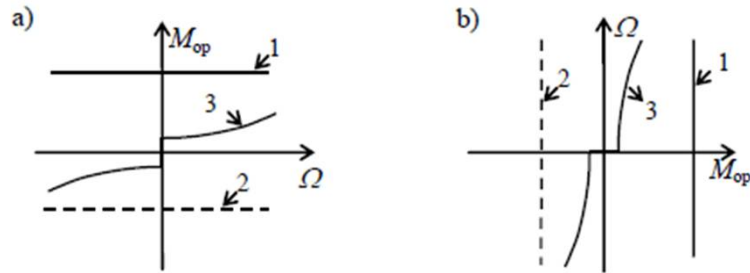
$$\gamma = -1$$

$$P = vF = \text{const}$$

$$\Omega = \frac{v}{R}$$

$$M_{op} = FR = Fv \frac{1}{\Omega}$$

$\gamma = -1$ – urządzenia zwijająco-rozwijające (przy stałym naciągu nawijanej taśmy)
 $\gamma = 0$ – wciągarki (dźwigi pionowe, mechanizmy podnoszenia suwnic, maszyny wyciągowe z liną zrównoważoną, itp.) $m_{op} = \text{const.}$
 $\gamma = 1$ – prądnica obcowzbudna obciążona stałą rezystancją, kalandry i walcarki w przemyśle gumowym, tworzyw sztucznych i hutniczym.
 $\gamma = 2$ – wszystkie mechanizmy wykorzystujące zasadę sił odśrodkowych, jak pompy wirowe, turbosprężarki, wentylatory, dmuchawy i wirówki.
 $\gamma > 2$ – opory ruchu pojazdów trakcyjnych oraz niektórych urządzeń technologicznych.



Przykłady charakterystyk momentu oporowego czynnego (1,2) i biernego (3)