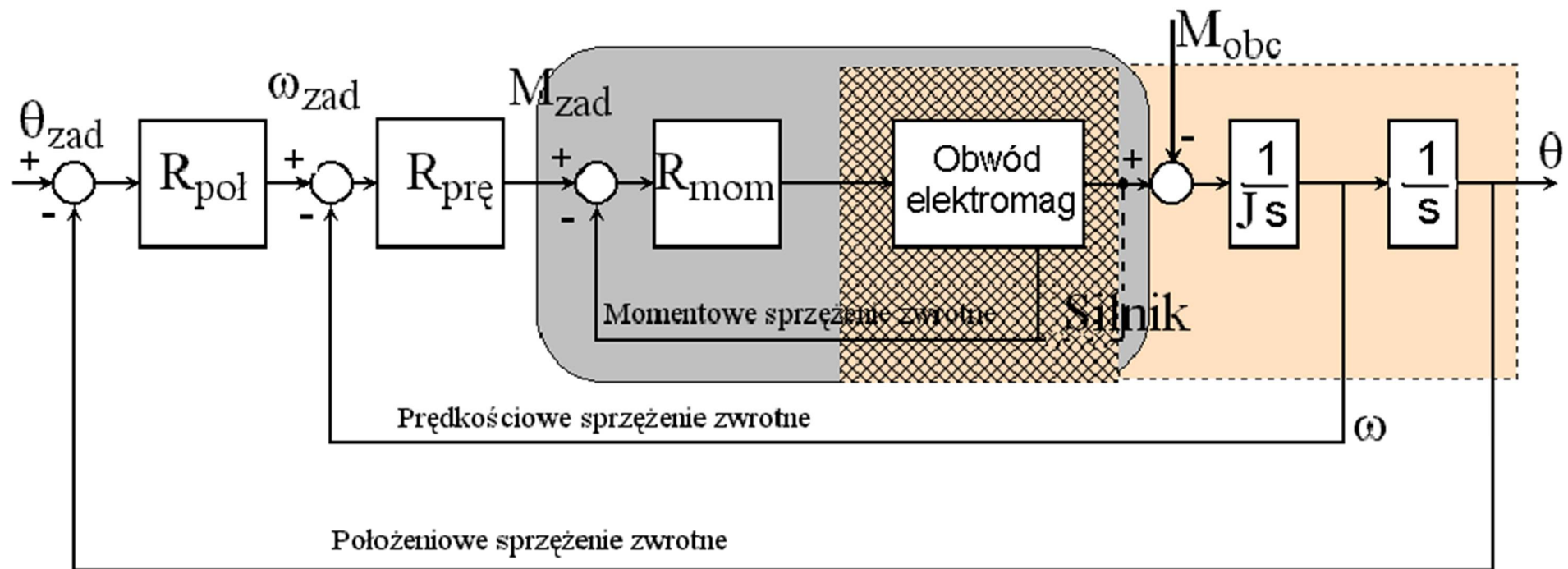


Wymagania stawiane układom regulacji prędkości i położenia

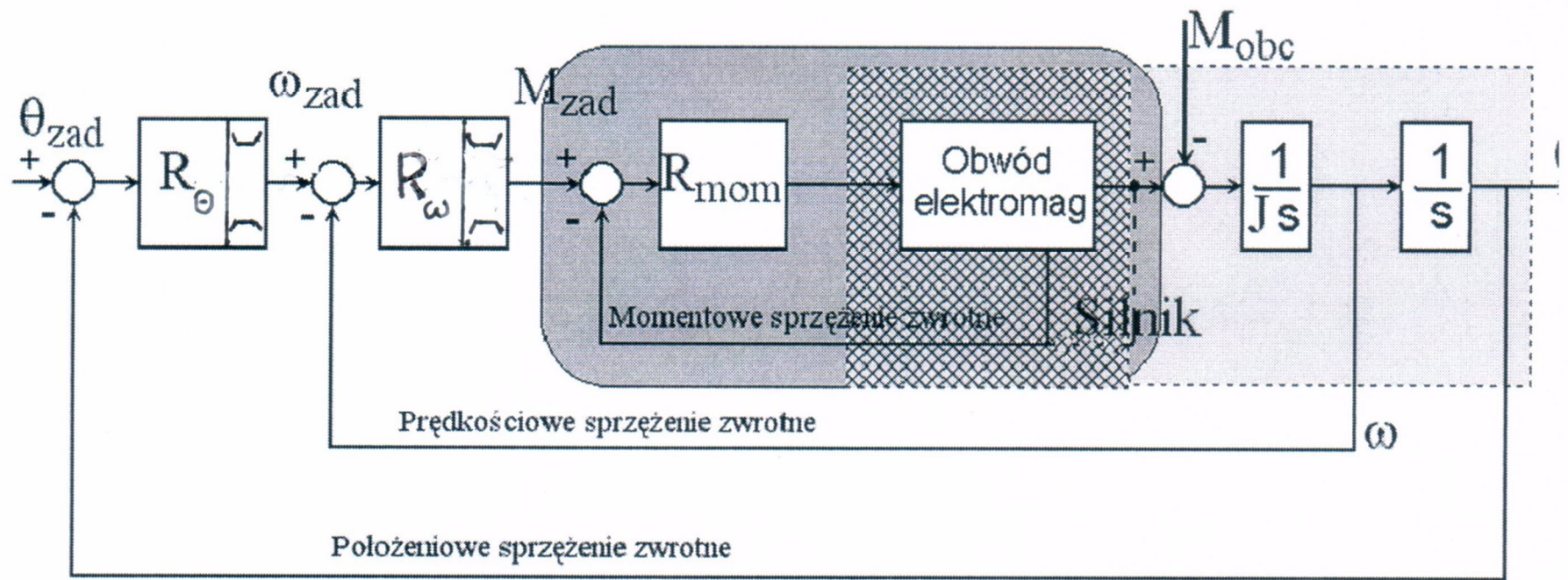
- brak uchybów prędkości i położenia w stanach ustalonych
- nieduża wartość całki uchybu prędkości przy obciążeniu momentem oporowym
- ograniczenie maksymalnych wartości prądu, momentu, przyspieszenia i prędkości
- brak przeregulowania w odpowiedziach skokowych
- szybkie nadążanie za zmianami sygnałów zadanych innych niż skokowe
- odporność na zmiany parametrów układu napędowego
- niewrażliwość na zakłócenia i szumy pomiarowe

Regulacja prędkości - *materiały pomocnicze*

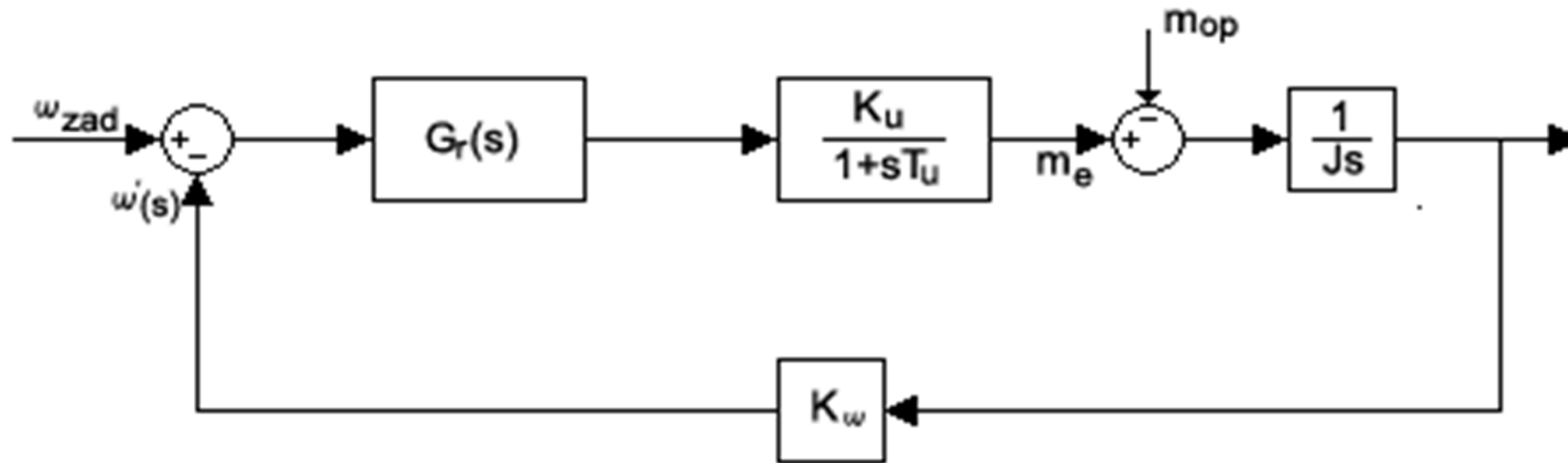


Schemat blokowy układu regulacji położenia o strukturze kaskadowej

Schemat blokowy układu regulacji położenia o strukturze kaskadowej



Dobór regulatora prędkości wg Kesslera



Schemat blokowy obwodu regulacji prędkości kątowej

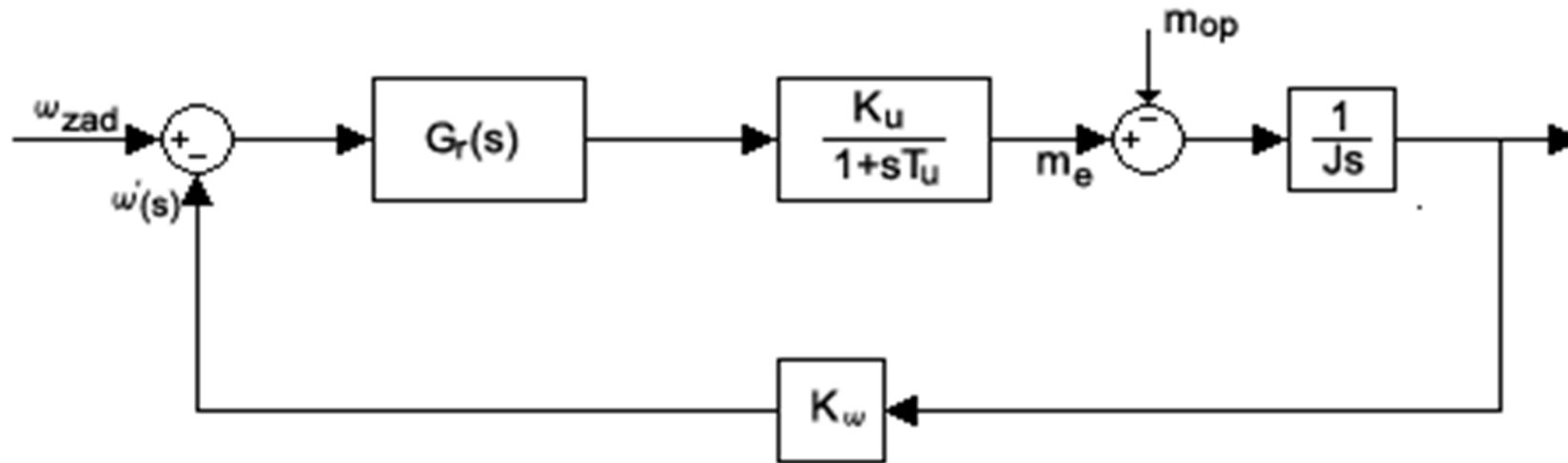
Transmitancja zamkniętego obwodu regulacji:
momentu. - uproszczona

$$G_{zm}(s) = \frac{K_u}{1 + sT_u}$$

$$K_u = \frac{m_e}{m_{zad}} \quad - \text{z opisu programu sterowania}$$

T_u - z katalogu: podaje się graniczną
częstotliwość sterowania momentem

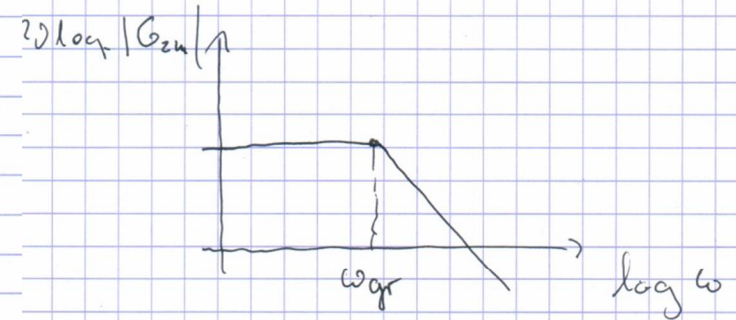
Dobór regulatora prędkości wg Kesslera



Schemat blokowy obwodu regulacji prędkości kątowej

Transmitancja zamkniętego obwodu regulacji:
momentu. - uproszczona

$$G_{zm}(s) = \frac{K_u}{1 + sT_u}$$



$$K_u = \frac{m_e}{m_{zad}} \quad - \text{z opisu programu sterowania}$$

T_u - z katalogu: podaje się graniczną częstotliwość sterowania momentem

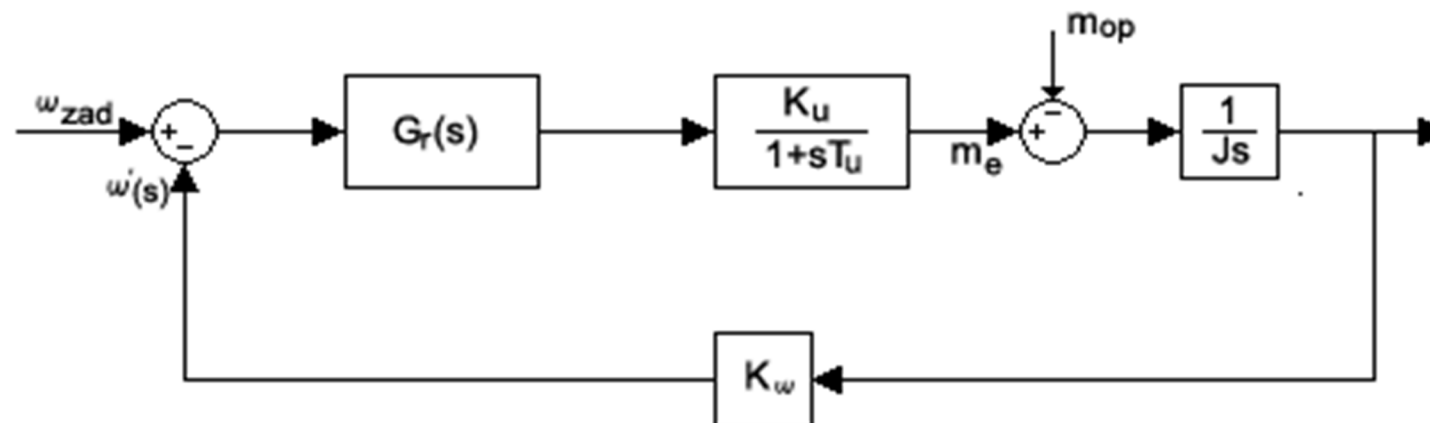
$$\omega_{gr} = 2\pi f_{gr}$$

$$T_u = \frac{1}{\omega_{gr}} = \frac{1}{2\pi f_{gr}}$$

Dobór regulatora prędkości wg kryterium modułu

Regulator typu P

$$K_P = \frac{J}{2T_\mu k_\omega k_\mu}$$



$$G_{zw}(s) = \frac{G_o(s)}{w_{zad}(s)} \Big|_{m_{op}=0} = \frac{k_p \cdot \frac{k_\mu}{1+sT_\mu} \cdot \frac{1}{Js}}{1 + k_p \cdot \frac{k_\mu}{1+sT_\mu} \cdot \frac{1}{Js} \cdot k_w}$$

$$G_{zw}(s) = \frac{k_p \cdot k_\mu}{(1+sT_\mu) \cdot Js + k_p \cdot k_\mu \cdot k_w} = \frac{\frac{1}{k_w}}{\frac{T_\mu}{k_p k_\mu k_w} s^2 + \frac{J}{k_p k_\mu k_w} s + 1}$$

$$\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi \frac{1}{\omega_0} s + 1$$

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{T_\mu}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_w} \\ \frac{2\xi}{\omega_0} = \frac{J}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_w} \end{cases}$$

$$k_p = ?$$

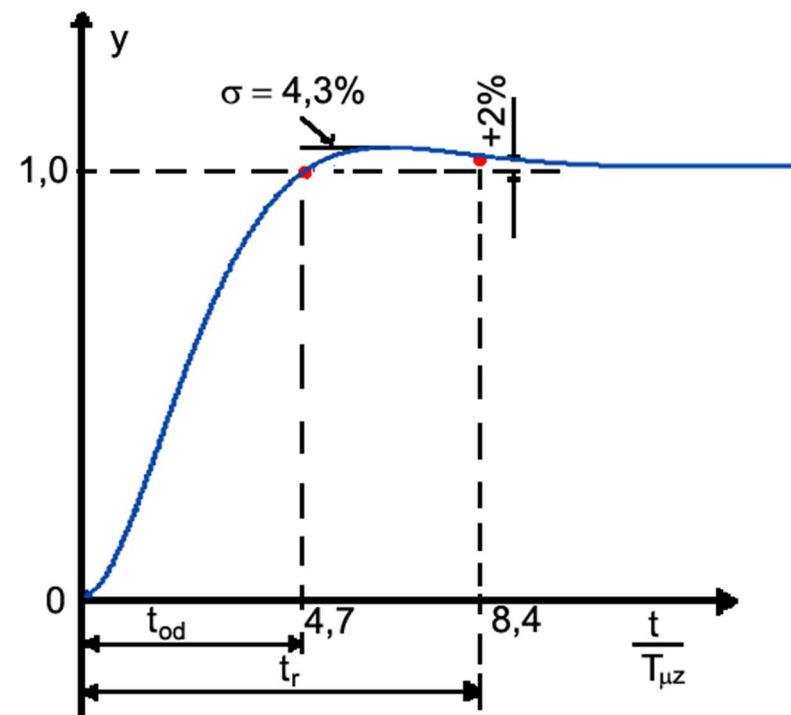
Dobór regulatora prędkości wg kryterium modułu

$$\frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\gamma T_{\mu}}{k_p \cdot k_{\mu} \cdot k_{\omega}}}$$

$$2\zeta \cdot \sqrt{\frac{\gamma T_{\mu}}{k_p \cdot k_{\mu} \cdot k_{\omega}}} = \frac{\gamma}{k_p \cdot k_{\mu} \cdot k_{\omega}} \quad |^2$$

$$4\zeta^2 \frac{\gamma T_{\mu}}{k_p \cdot k_{\mu} \cdot k_{\omega}} = \frac{\gamma^2}{k_p^2 \cdot k_{\mu}^2 \cdot k_{\omega}^2}$$

$$4\zeta^2 \frac{\gamma T_{\mu}}{k_p \cdot k_{\mu} \cdot k_{\omega}} = \frac{\gamma^2}{k_p^2 \cdot k_{\mu}^2 \cdot k_{\omega}^2}$$



Dobór regulatora prędkości wg kryterium modułu

$$\frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{\gamma T_\mu}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_\omega}}$$

$$2\zeta \cdot \sqrt{\frac{\gamma T_\mu}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_\omega}} = \frac{\gamma}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_\omega} \quad /^2$$

$$\zeta^2 \frac{\gamma \cdot T_\mu}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_\omega} = \frac{\gamma^2}{k_p^2 \cdot k_\mu^2 \cdot k_\omega^2}$$

$$\zeta^2 \frac{\gamma T_\mu}{k_p \cdot k_\mu \cdot k_\omega} = \frac{\gamma^2}{k_p^2 \cdot k_\mu^2 \cdot k_\omega^2}$$

$$k_p = \frac{\gamma}{\zeta^2 \gamma T_\mu k_\mu k_\omega}$$

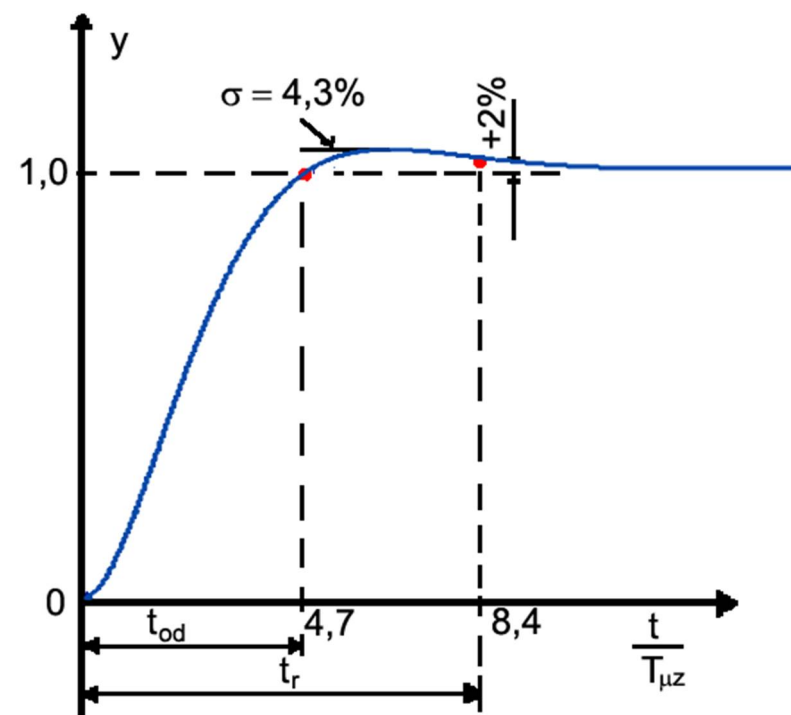
$$\zeta = ?$$

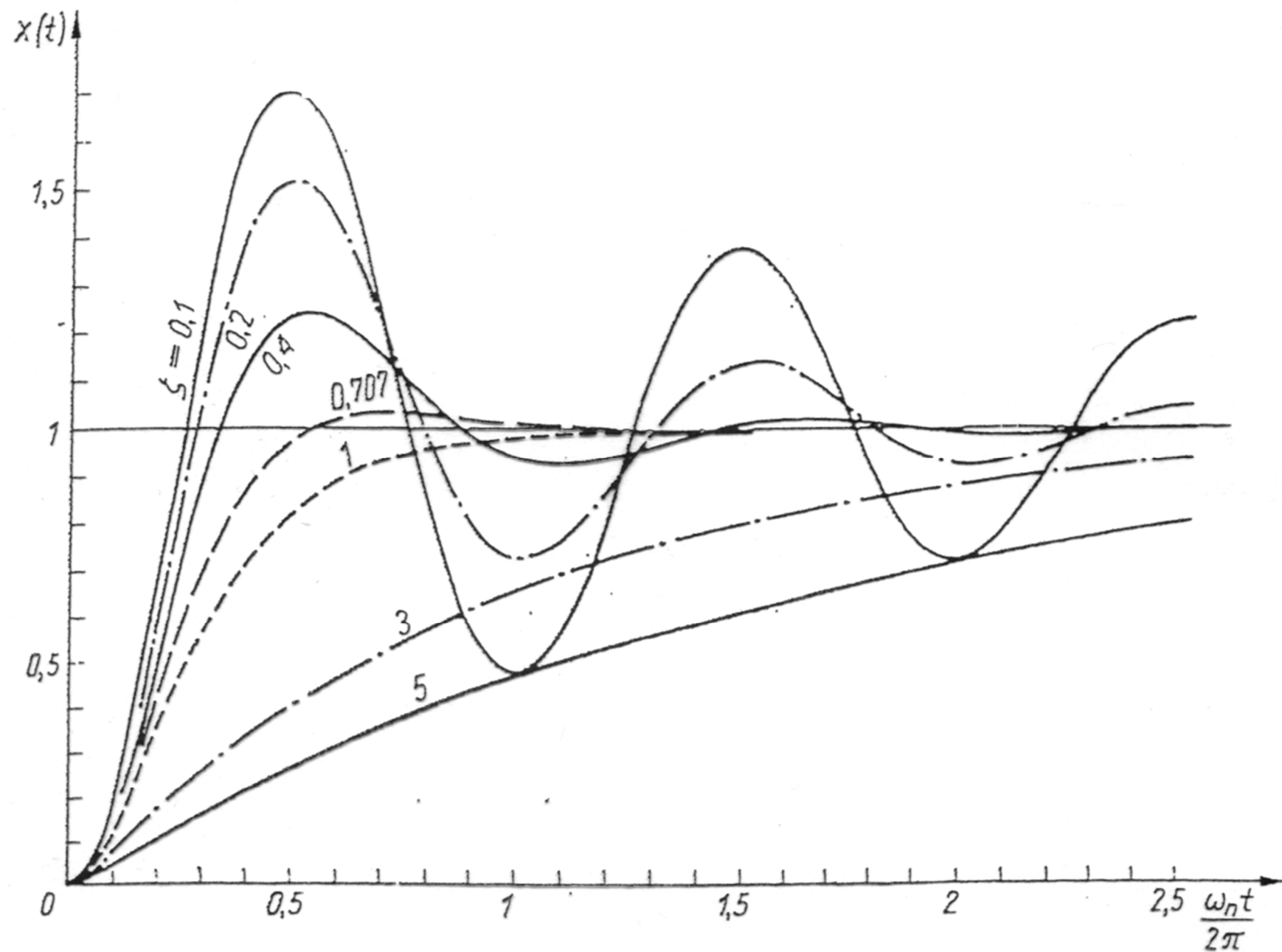
$$\zeta = 1 \leftrightarrow \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$k_p = \frac{\gamma}{2 T_\mu \cdot k_\mu \cdot k_\omega}$$

$$G_{\omega z}(s) = \frac{\frac{1}{k_\omega}}{\frac{\gamma \cdot T_\mu}{2 T_\mu \cdot k_\mu \cdot k_\omega} s^2 + \frac{\gamma}{2 T_\mu \cdot k_\mu \cdot k_\omega} s + 1}$$

$$G_{\omega z}(s) = \frac{1/k_\omega}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1}$$

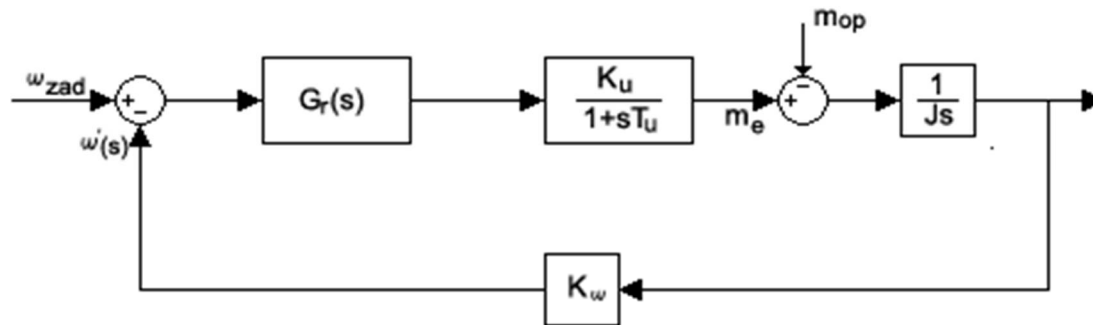




Rys. Przebieg odpowiedzi skokowej układu II rzędu dla różnych wartości współczynnika tłumienia ξ

Dobór regulatora prędkości wg kryterium symetrii

Regulator typu PI



$$G_{R\omega}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{k_p (1 + sT_i)}{sT_i}$$

$$K_P = \frac{J}{2T_\mu k_\omega k_\mu}$$

$$T_I = 4T_\mu$$

$$G_{zw}(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_{zad}(s)} \Big|_{m_{op}=0} =$$

$$= \frac{k_p \frac{(1 + sT_i)}{(sT_i)} \cdot \frac{k_\mu}{(1 + sT_\mu)} \cdot \frac{1}{Js}}{1 + k_w \cdot k_p \frac{(1 + sT_i)}{(sT_i)} \cdot \frac{k_\mu}{(1 + sT_\mu)} \cdot \frac{1}{Js}} = \frac{k_p \cdot k_\mu (1 + sT_i)}{J T_i s^2 (1 + sT_\mu) + k_w \cdot k_p \cdot k_\mu (1 + sT_i)}$$

$$= \frac{k_p \cdot k_\mu (1 + sT_i)}{J \cdot T_i T_\mu \cdot s^3 + J T_i s^2 + k_w k_p \cdot k_\mu T_i s + k_w k_p k_\mu}$$

Dobór regulatora prędkości wg kryterium symetrii

Regulator typu PI

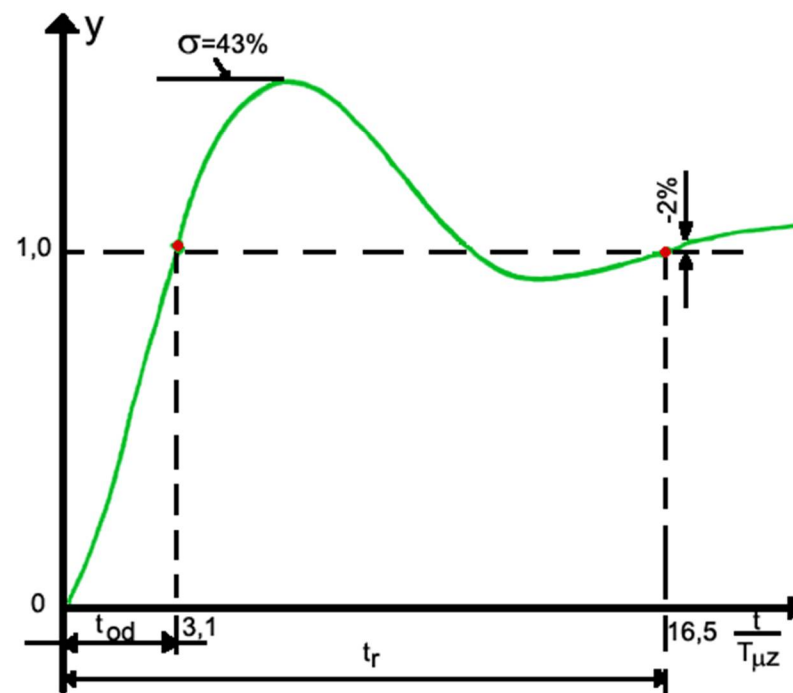
$$\frac{1}{k_{\omega}} (1 + sT_i) \quad \leftarrow T_{\mu}$$

$$\frac{\gamma \cdot T_i T_{\mu}}{k_p \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}} s^3 + \frac{\gamma \cdot T_i}{k_p \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}} s^2 + T_i s + 1 \quad \leftarrow 4T_{\mu}$$

$$\frac{\gamma \cdot T_i T_{\mu}}{k_p \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}} = 8T_{\mu}^3 \quad \leftarrow \left(\frac{\gamma}{2T_{\mu} \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}} \right) \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}$$

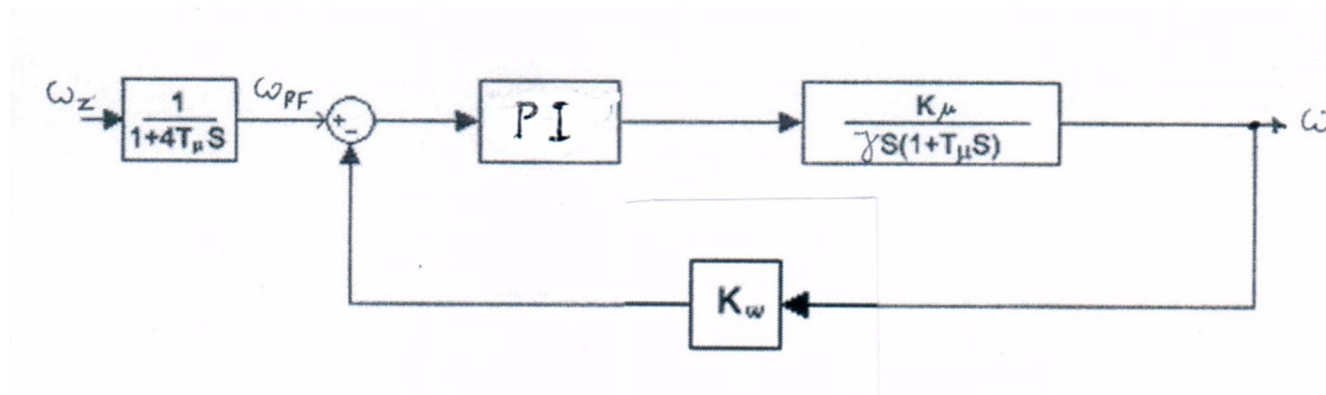
$$\frac{\gamma \cdot 4T_{\mu}}{\left(\frac{\gamma}{2T_{\mu} \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}} \right) \cdot k_{\omega} \cdot k_{\mu}} = 8T_{\mu}^2$$

$$G_{\omega z}(s) = \frac{\frac{1}{k_{\omega}} (1 + 4T_{\mu} s)}{8T_{\mu}^3 s^3 + 8T_{\mu}^2 s^2 + 4T_{\mu} s + 1}$$



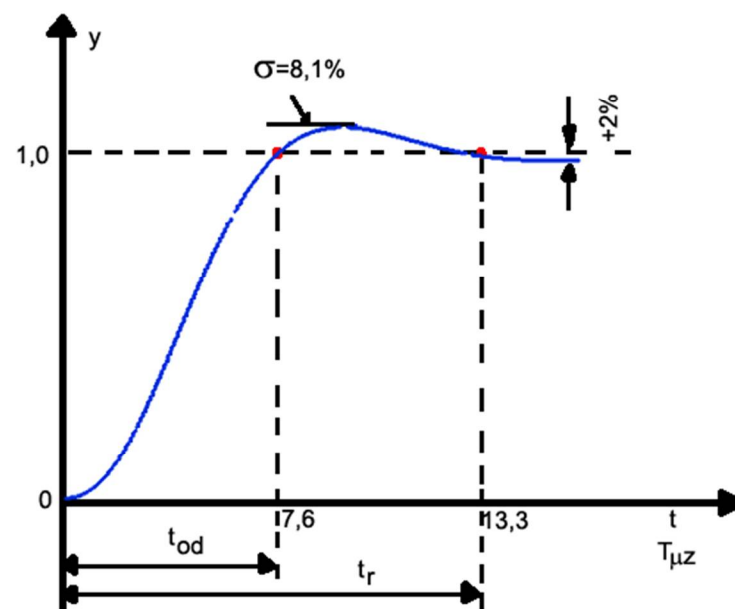
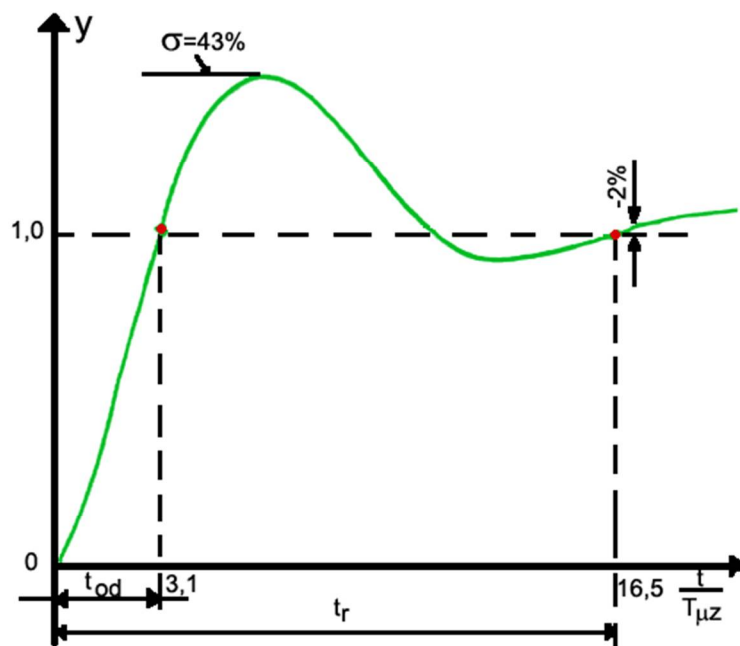
Dobór regulatora prędkości wg kryterium symetrii

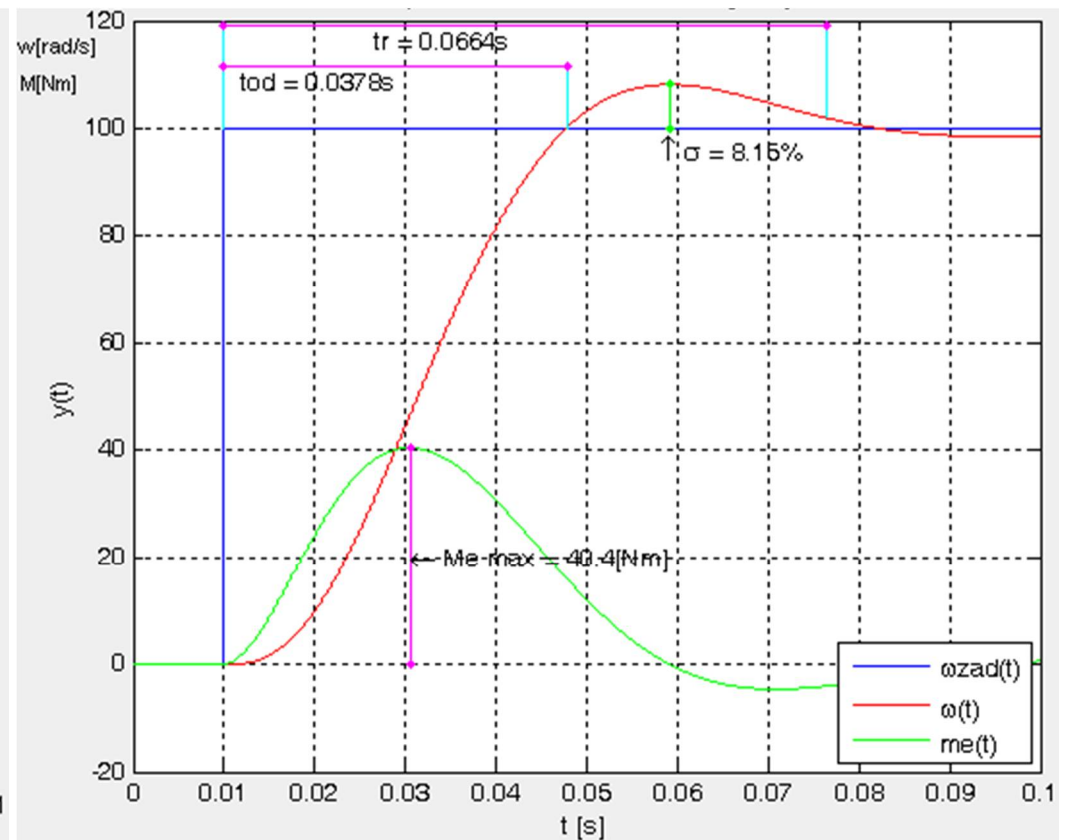
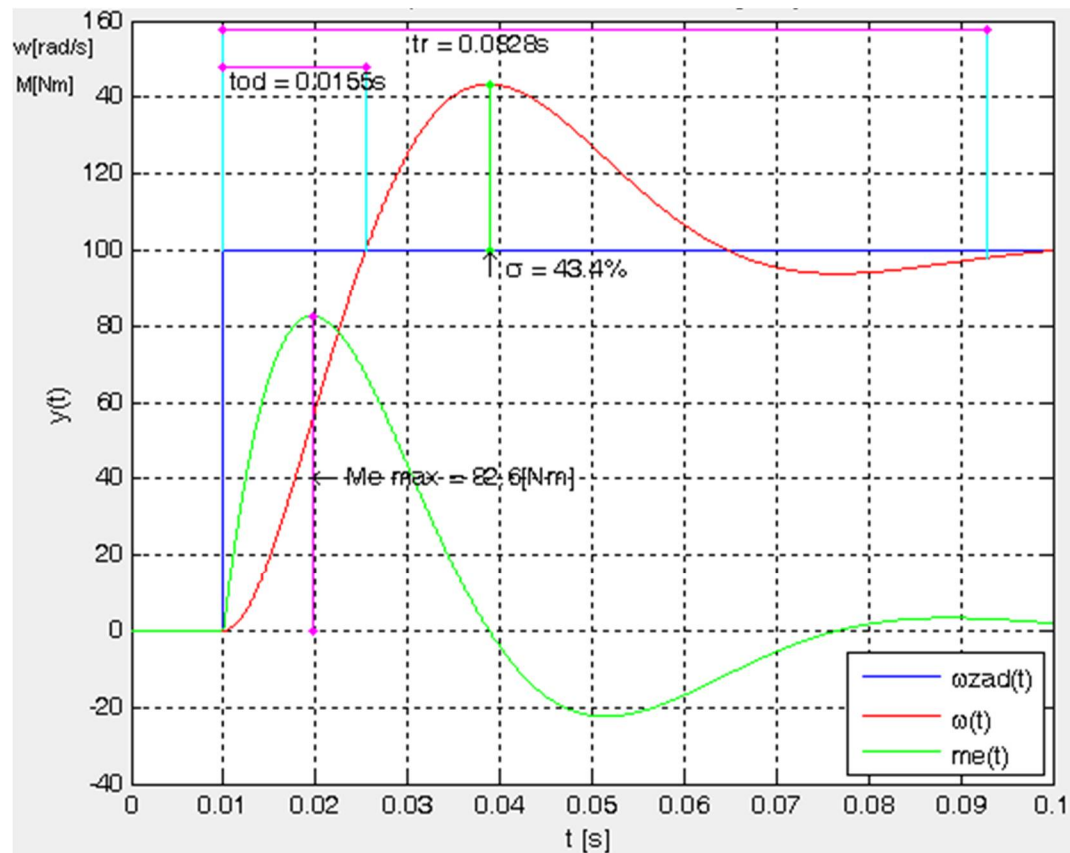
regulator z prefiltrem



$$G_{\omega z}(s) = \frac{\frac{1}{k_{\omega}} (1 + 4T_{\mu} s)}{8T_{\mu}^3 s^3 + 8T_{\mu}^2 s^2 + 4T_{\mu} s + 1}$$

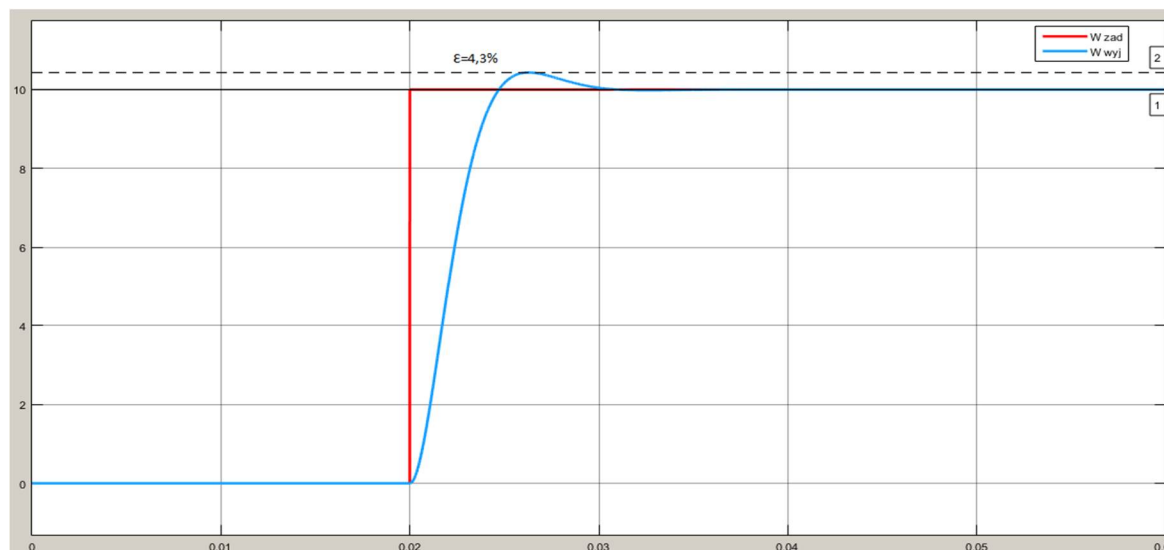
$$G_{\omega z}(s) = \frac{1/k_{\omega}}{8T_{\mu}^3 s^3 + 8T_{\mu}^2 s^2 + 4T_{\mu} s + 1}$$



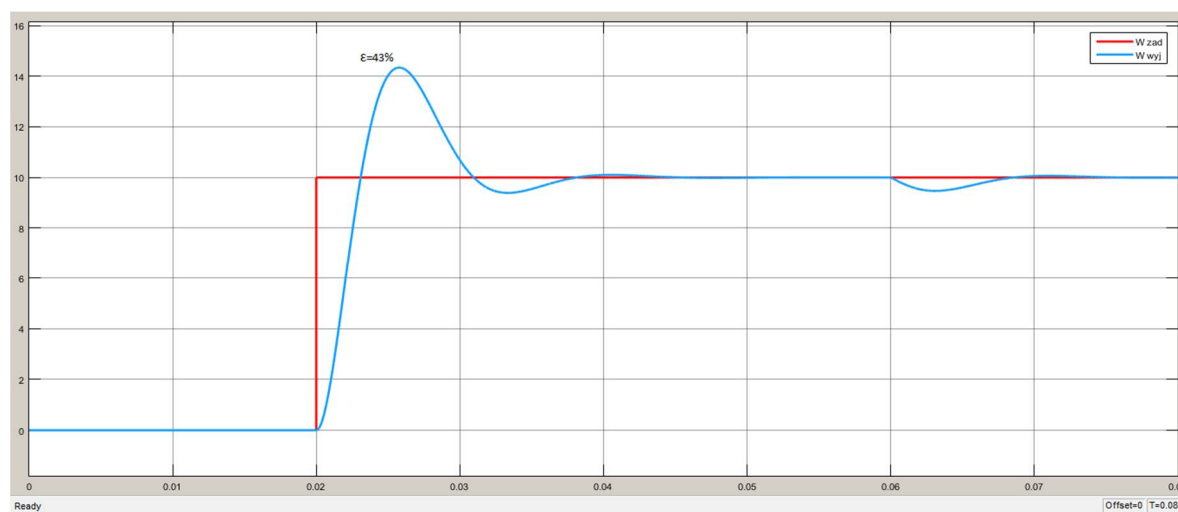


Odpowiedź na zmianę skokową prędkości zadanej dla regulatora prędkości dobraneo wg kryterium symetrii; bez i z filtrem wejściowym (prefiltrem)

Porównanie odpowiedzi skokowej regulatora prędkości typu P i PI

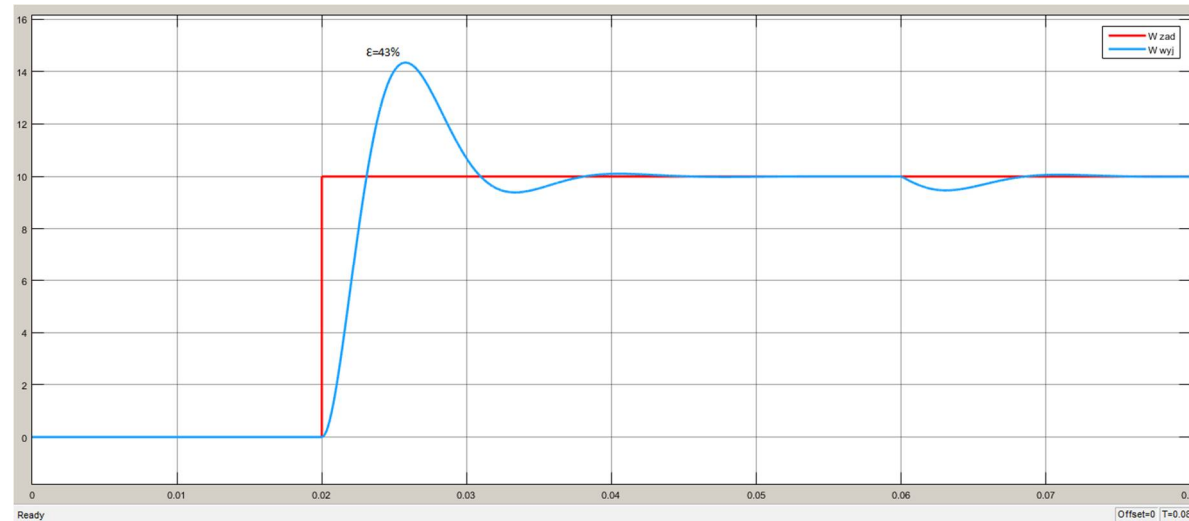


Odpowiedź regulatora prędkości typu P (kr. modułu) na skok 10 rad/s

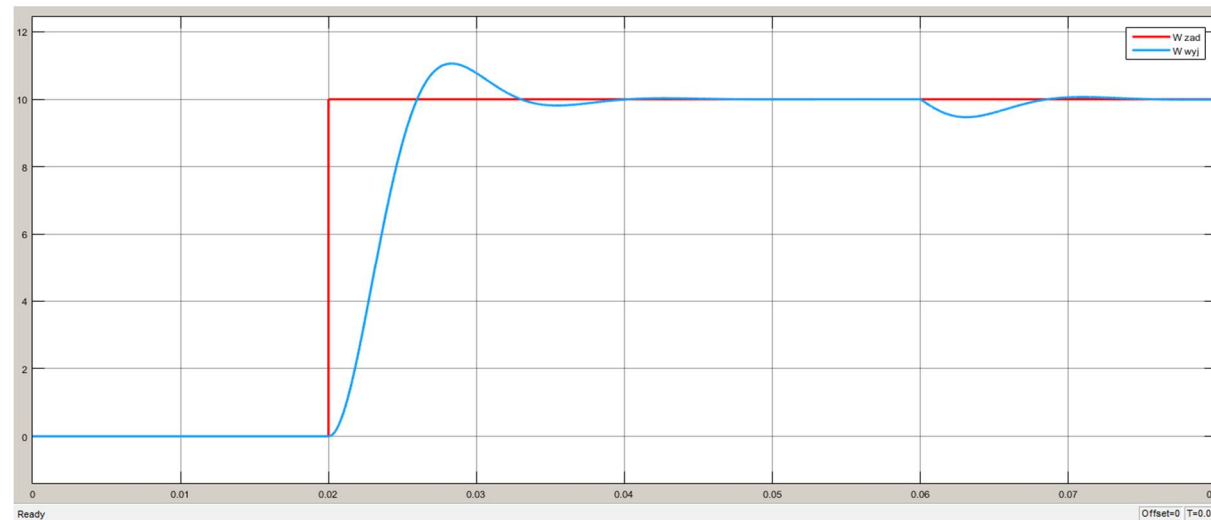


Odpowiedź regulatora prędkości typu PI (kr. symetrii) na skok 10 rad/s.

Wpływ „prefiltru” na odpowiedź skokową regulatora prędkości typu PI

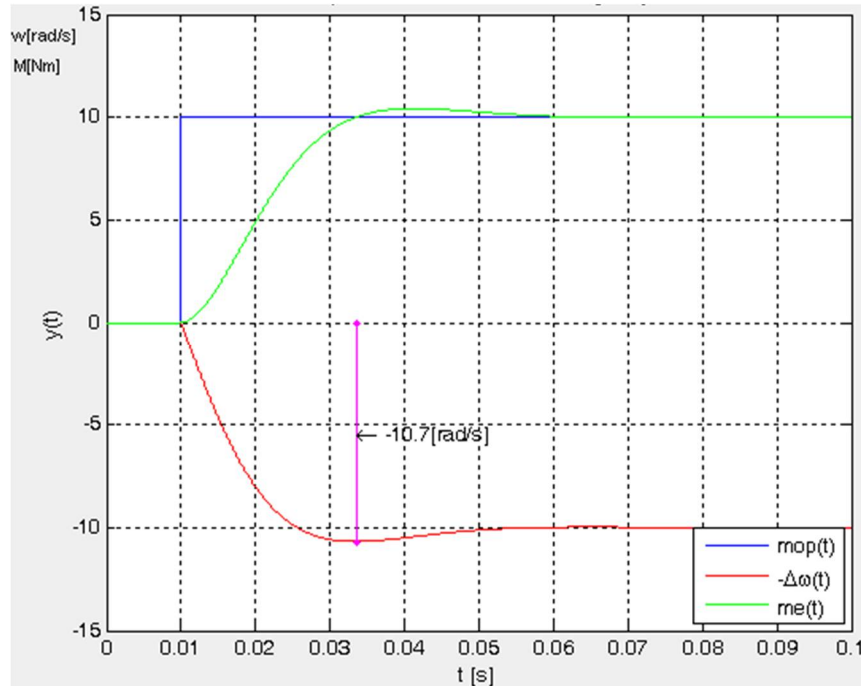


Odpowiedź regulatora prędkości typu PI na skok 10 rad/s.

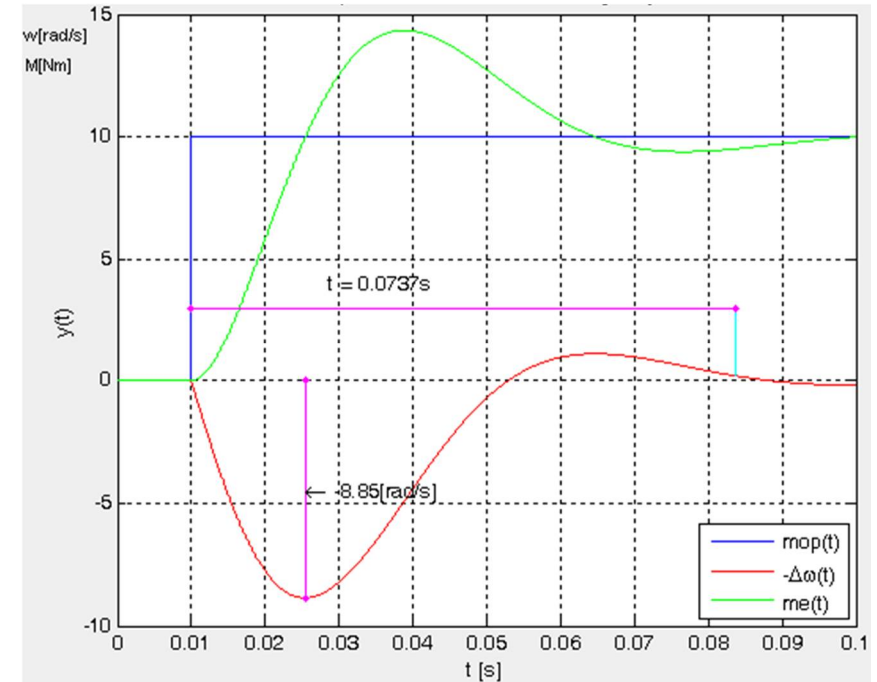


Odpowiedź regulatora PI + prefiltr na skok 10 rad/s,

Odpowiedź na zmianę skokową momentu oporowego

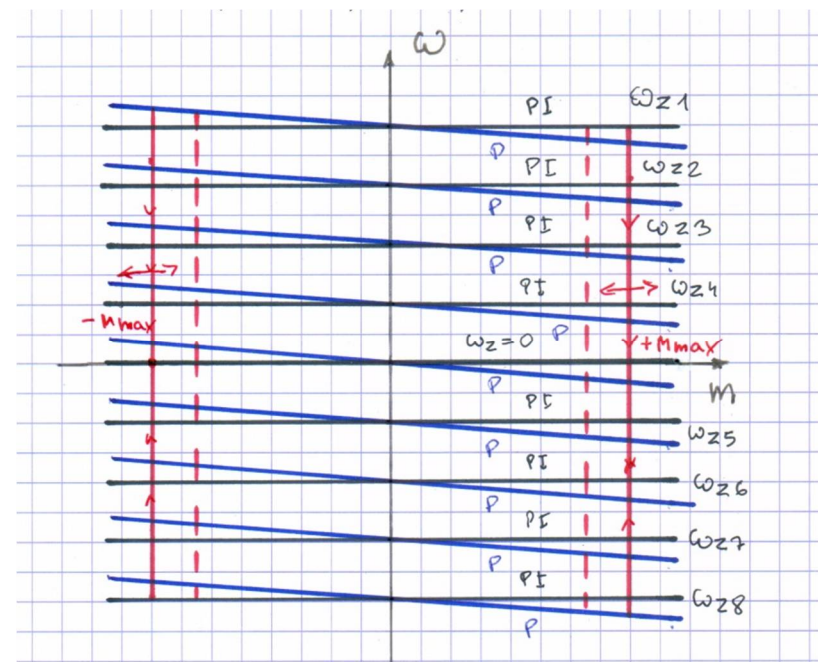


regulator dobranego wg kryterium modułu

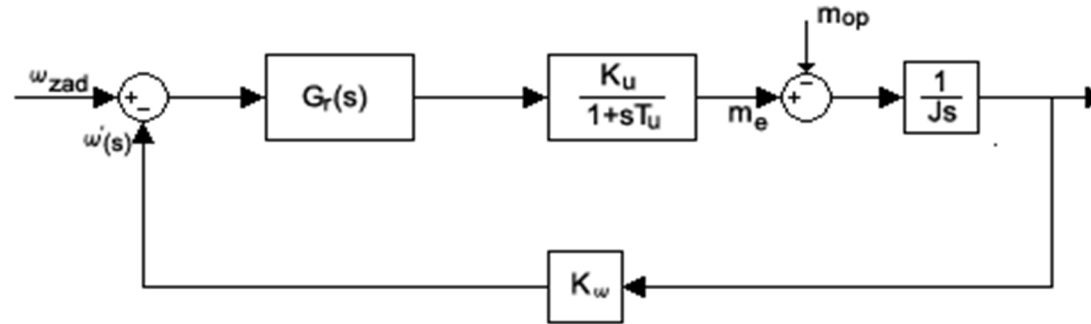


regulator dobranego wg kryterium symetrii

Charakterystyka mechaniczna napędu z regulacją prędkości



Odpowiedź na zmianę skokową momentu oporowego



$$G_{op}(s) = \left. \frac{\omega(s)}{m_{up}(s)} \right|_{\omega_{zad}=0} = \left. \frac{\Delta \omega(s)}{\Delta m_{up}(s)} \right|_{\Delta \omega_{zad}=0}$$

$$G_{op}(s) = \frac{-\frac{1}{Js}}{1 + \frac{1}{Js} \cdot K_p \cdot \frac{K_u}{(1+sT_u)} \cdot K_w} =$$

$$= - \frac{1 + sT_u}{Js(1+sT_u) + \frac{K_p \cdot K_u \cdot K_w}{Js} (1+sT_u)} = - \frac{\frac{1}{K_p \cdot K_u \cdot K_w} (1+sT_u)}{\frac{T_u \cdot J}{K_p \cdot K_u \cdot K_w} s^2 + \frac{J}{K_p \cdot K_u \cdot K_w} s + 1}$$

$$K_p = \frac{J}{2T_u \cdot K_u \cdot K_w}$$

Odpowiedź na zmianę skokową momentu oporowego

$$K_p = \frac{\gamma}{2\bar{T}_\mu \cdot K_{pkw}}$$

$$G_{op}(s) = - \frac{\frac{2\bar{T}_\mu \cdot K_{pkw}}{\gamma} (1 + s\bar{T}_\mu)}{2\bar{T}_\mu^2 s^2 + 2\bar{T}_\mu s + 1} = - \frac{\frac{2\bar{T}_\mu}{\gamma} (1 + s\bar{T}_\mu)}{2\bar{T}_\mu^2 s^2 + 2\bar{T}_\mu s + 1}$$

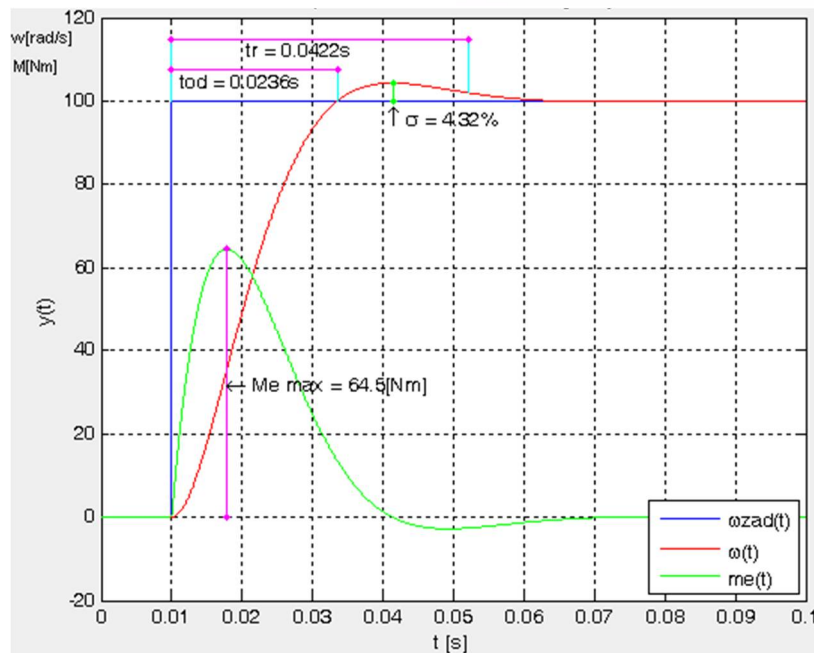
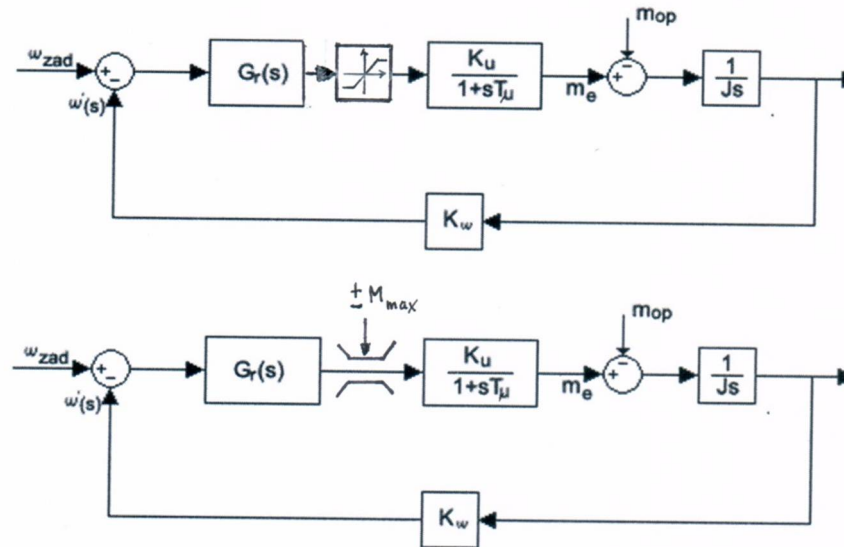
$$\Delta \omega(s) = G_{op}(s) \cdot \Delta M_{op}(s)$$

$$\Delta \omega_{ust} = \lim_{s \rightarrow 0} [\Delta \omega(s) \cdot s] = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \omega(t)$$

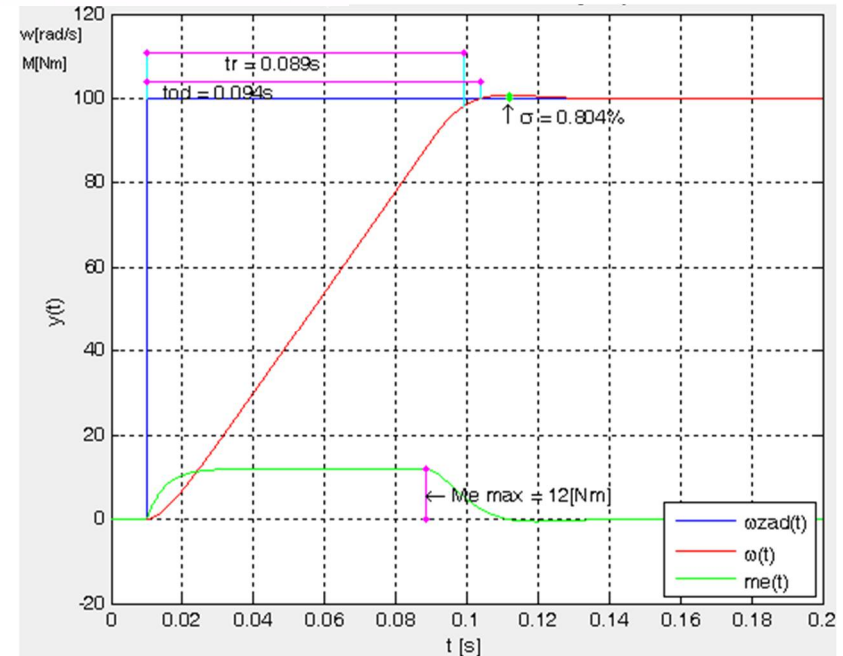
$$\Delta m_{op}(s) = \frac{M_{op}}{s}$$

$$\Delta \omega_{ust} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[- \frac{\frac{2\bar{T}_\mu}{\gamma} (1 + s\bar{T}_\mu)}{2\bar{T}_\mu^2 s^2 + 2\bar{T}_\mu s + 1} \cdot \frac{M_{op}}{s} \cdot s \right] = - \frac{2\bar{T}_\mu}{\gamma} \cdot M_{op}$$

Wpływ ograniczenia sygnału wyjściowego regulatora prędkości na odpowiedź skokową regulatora prędkości typu P

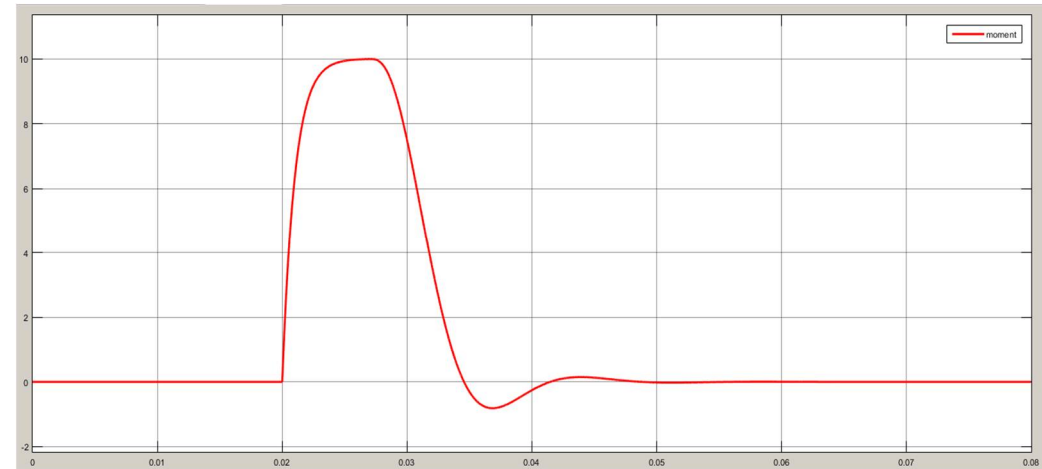
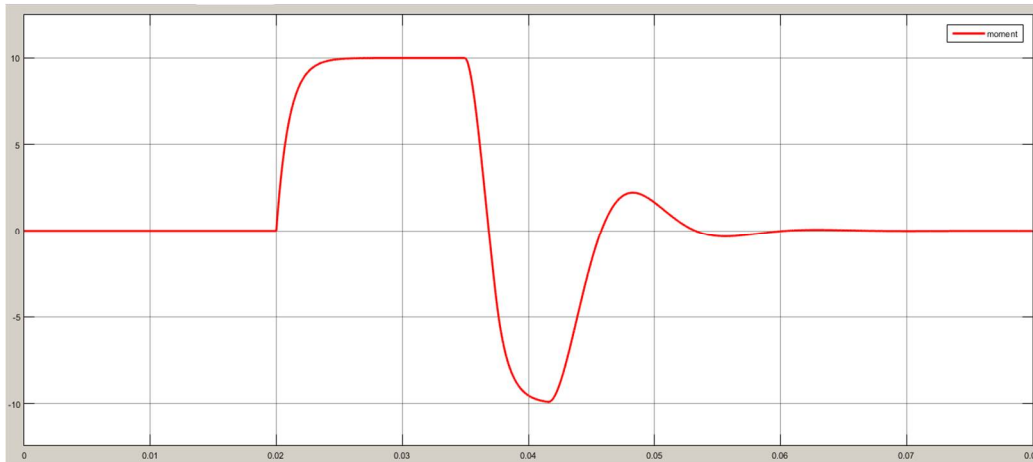
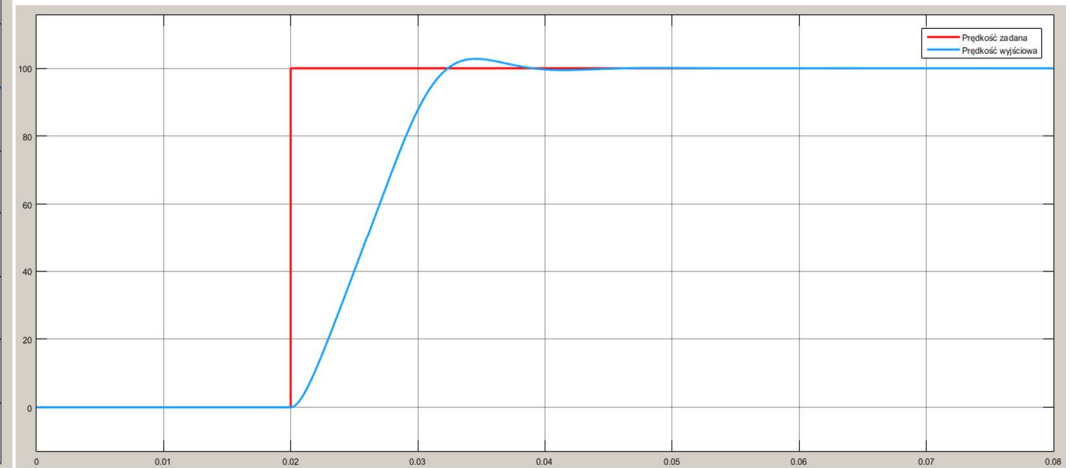
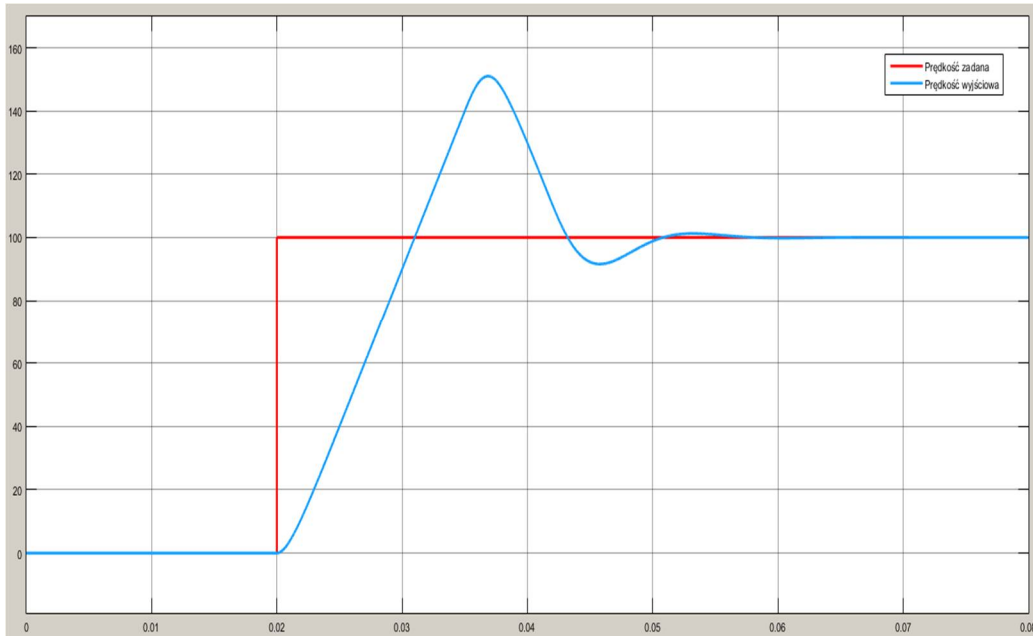


Odpowiedź bez ograniczenia



Odpowiedź z ograniczeniem

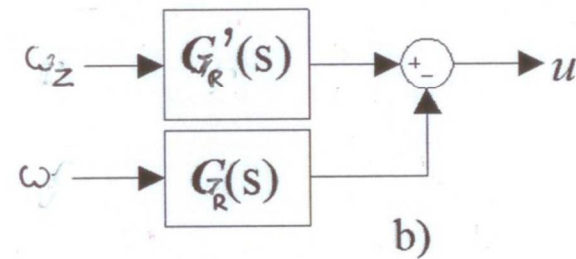
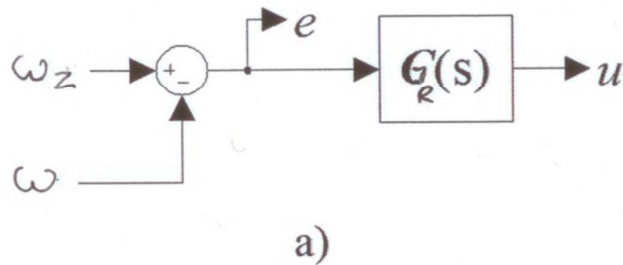
Ilustracja zjawiska windup



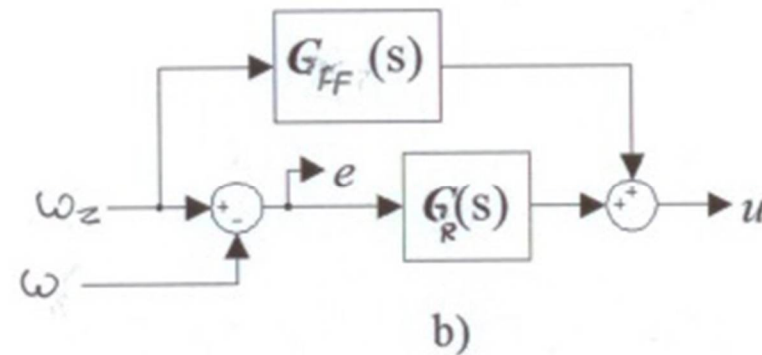
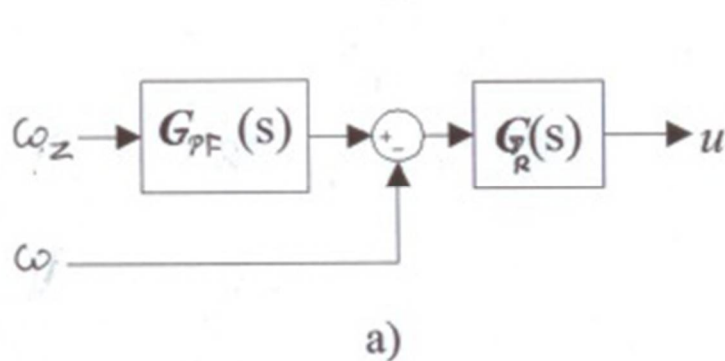
Przebieg prędkości ω , ω_{zad} i momentu silnika m_e w obecności zjawiska windup.

Przebieg prędkości ω , ω_{zad} i momentu silnika m_e z układem anti-windup.

Struktury regulatorów prędkości typu 2DOF (2 Degrees Of Freedom)

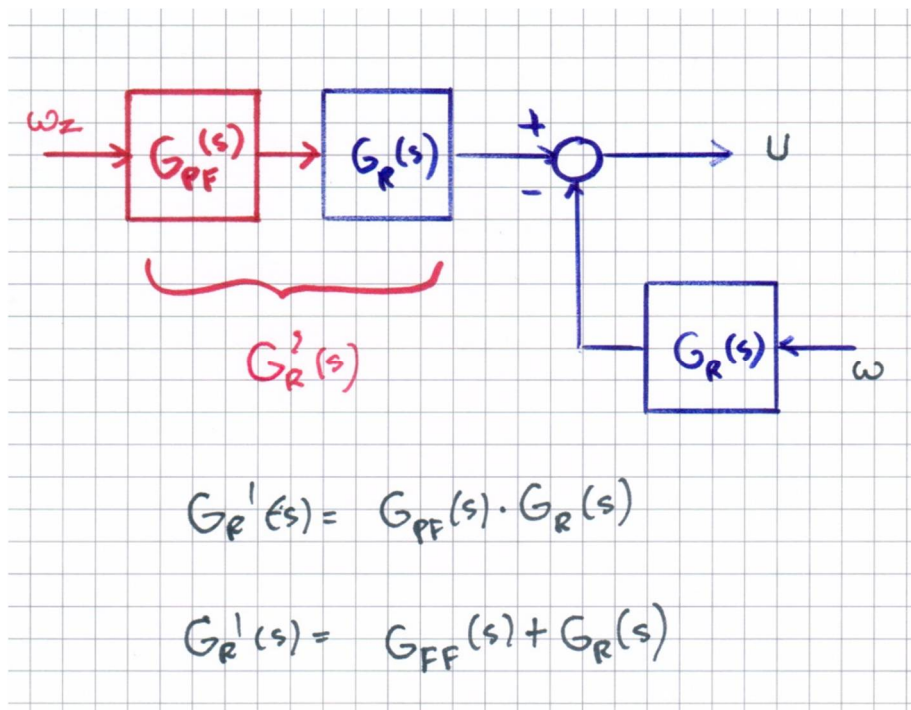
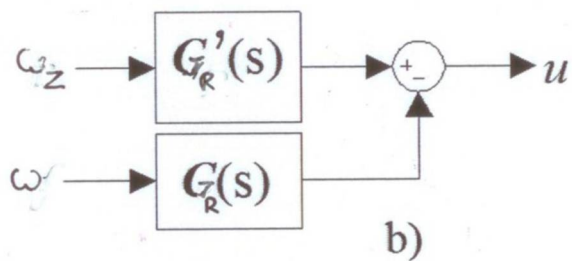
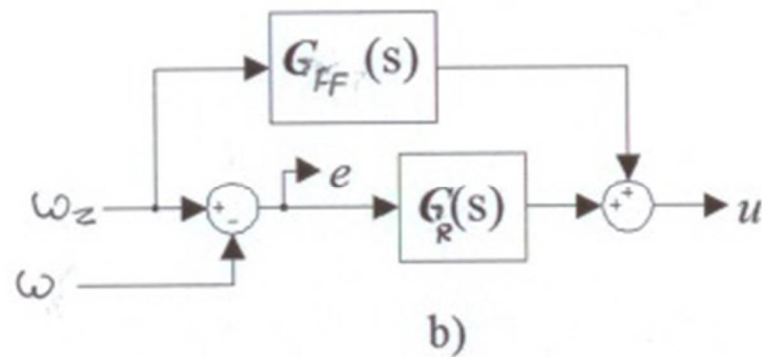
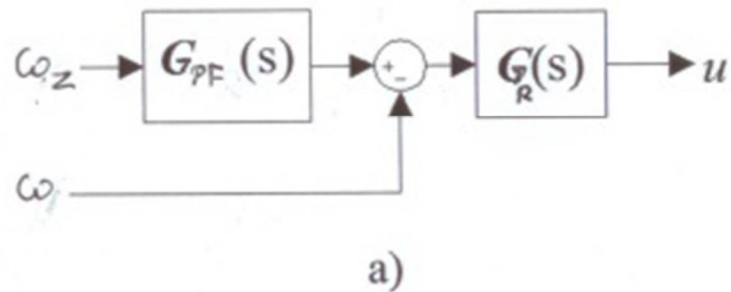


Schematy blokowe regulatorów a) struktura standardowa, z sumatorem na wejściu, b) struktura teoretyczna o dwóch stopniach swobody

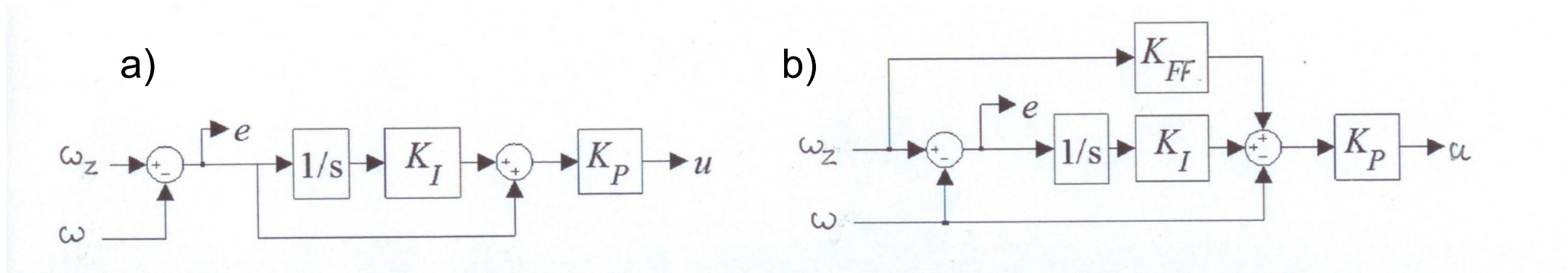


Struktury regulatorów: a) z pre-filtrem w torze wartości zadanej, b) ze sprzężeniem w przód (*feed forward*)

Struktury regulatorów prędkości typu 2DOF



Struktury regulatorów prędkości



a) Konwencjonalny regulatora PI

b) Regulator typu 2DOF- PI+ .

$$G_R(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I} \right)$$

$$G_R(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{K_I}{s} \right)$$

$$G'_R(s) = K_P \cdot \left(K_{FF} + \frac{1}{sT_I} \right) = K_P \cdot \left(K_{FF} + \frac{K_I}{s} \right)$$

$$G_{PF}(s) = \frac{G_R'(s)}{G_R(s)} = \frac{K_P \frac{1+sK_{FF}T_I}{sT_I}}{K_P \frac{1+sT_I}{s}} = \frac{sT_I}{1+sT_I} \cdot \frac{sT_I}{K_P(1+sT_I)}$$

$$G_{PF} = \frac{1+sT_I K_{FF}}{1+sT_I}$$

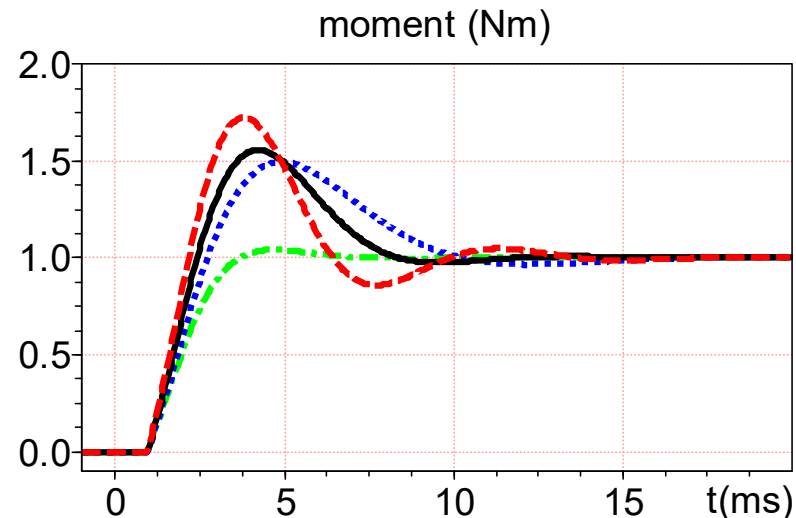
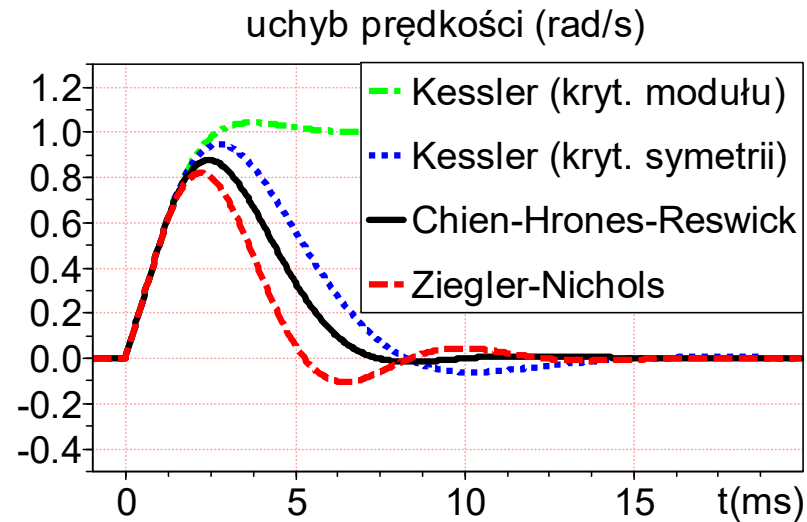
dla $K_{FF} = 0$

$$G_{PF}(s) = \frac{1}{1+sT_I}$$

$$G_{PF}(s) = \frac{sK_{FF} + K_I}{s + K_I} = \frac{1+sT_I K_{FF}}{1+sT_I}$$

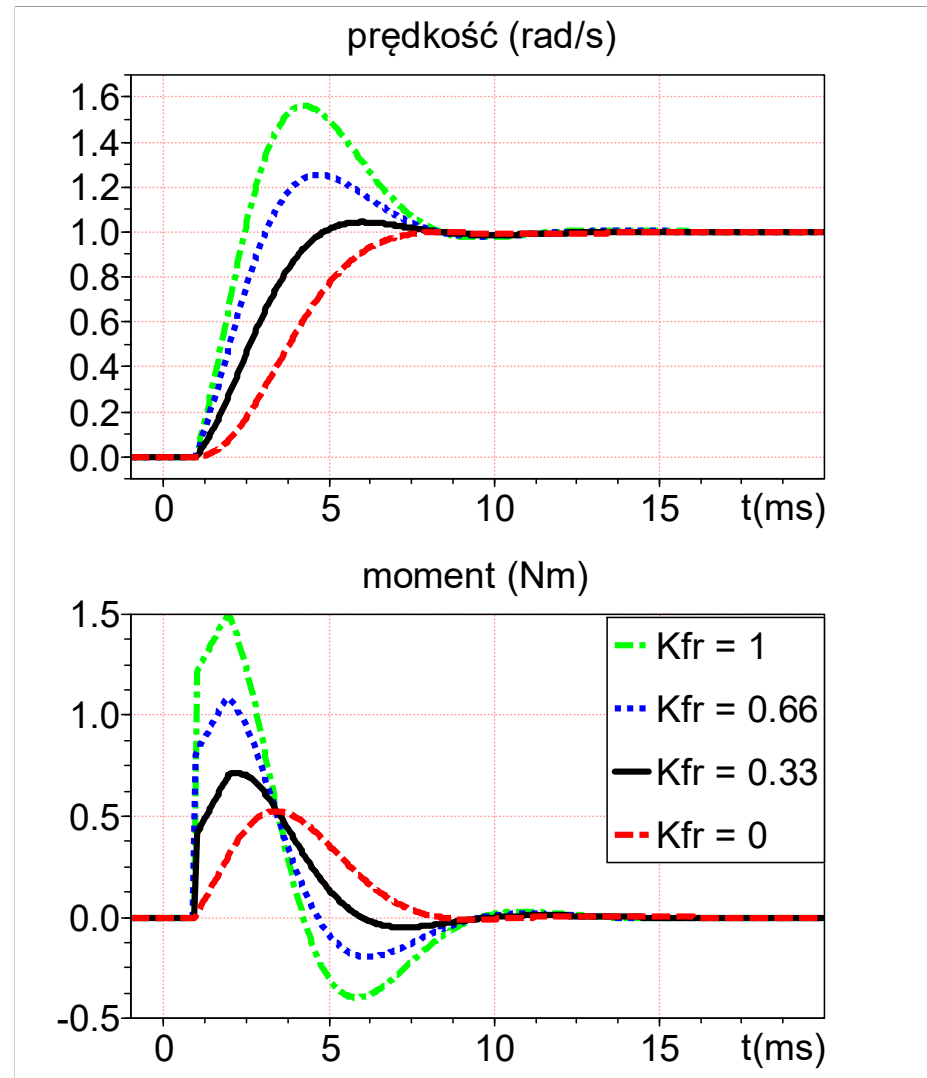
Układ regulacji prędkości

charakterystyki zakłóceniewe (skok momentu oporowego)



Wpływ nastaw regulatora PI na charakterystyki zakłóceniewe układu regulacji prędkości
uchyb prędkości i moment silnika po skokowej zmianie obciążenia o 1Nm.

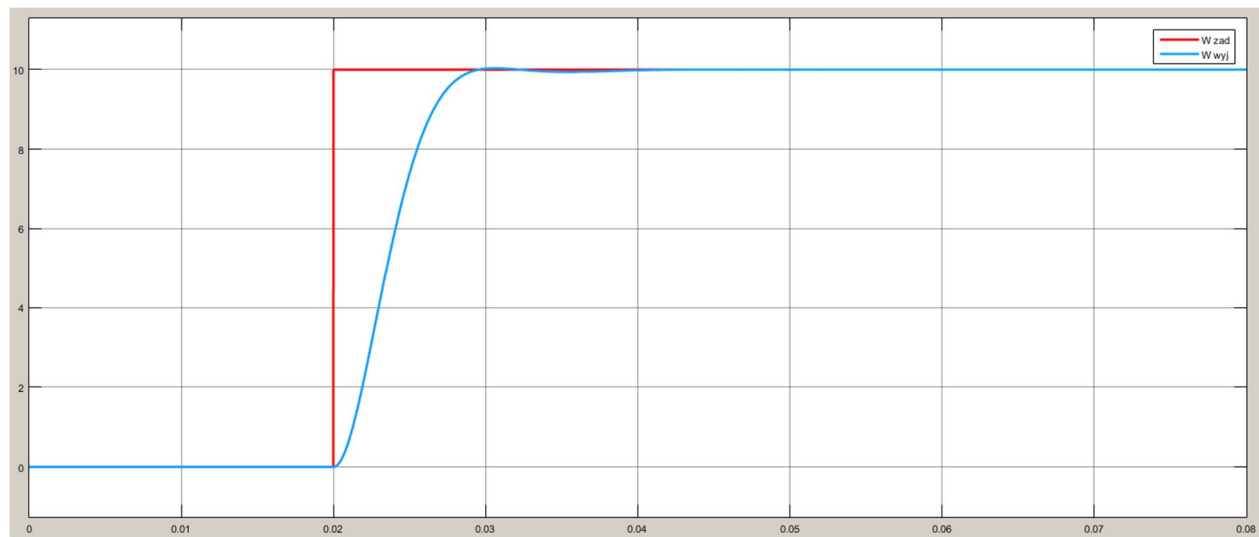
Układ regulacji prędkości charakterystyki wymuszeniowe (skok prędkości zadanej)



regulator PI+

$$K_{FF} = K_{fr}$$

Wpływ współczynnika K_{FF} (K_{fr}) właściwości układu z regulatorem PI+ ($K_P = 1.2 \text{ Nm/rad/s}$, $T_I = 4 \text{ ms}$) przy zmianach prędkości zadanej :
prędkość i moment silnika po skokowej zmianie prędkości zadanej o 1 rad/s



Odpowiedź regulatora PI+ na skok 10 rad/s, $K_{FF}=0,3$