Regulator położenia dla układu dwumasowego oparty o metodę ADRC

Bartłomiej Wicher

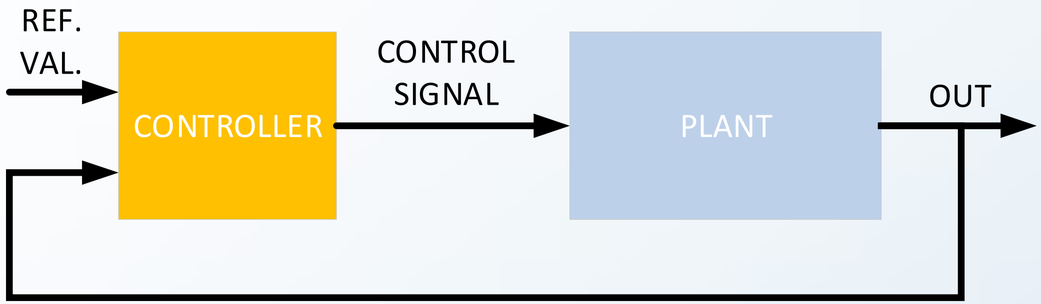
10.05.2019
Seminarium ZSiEP

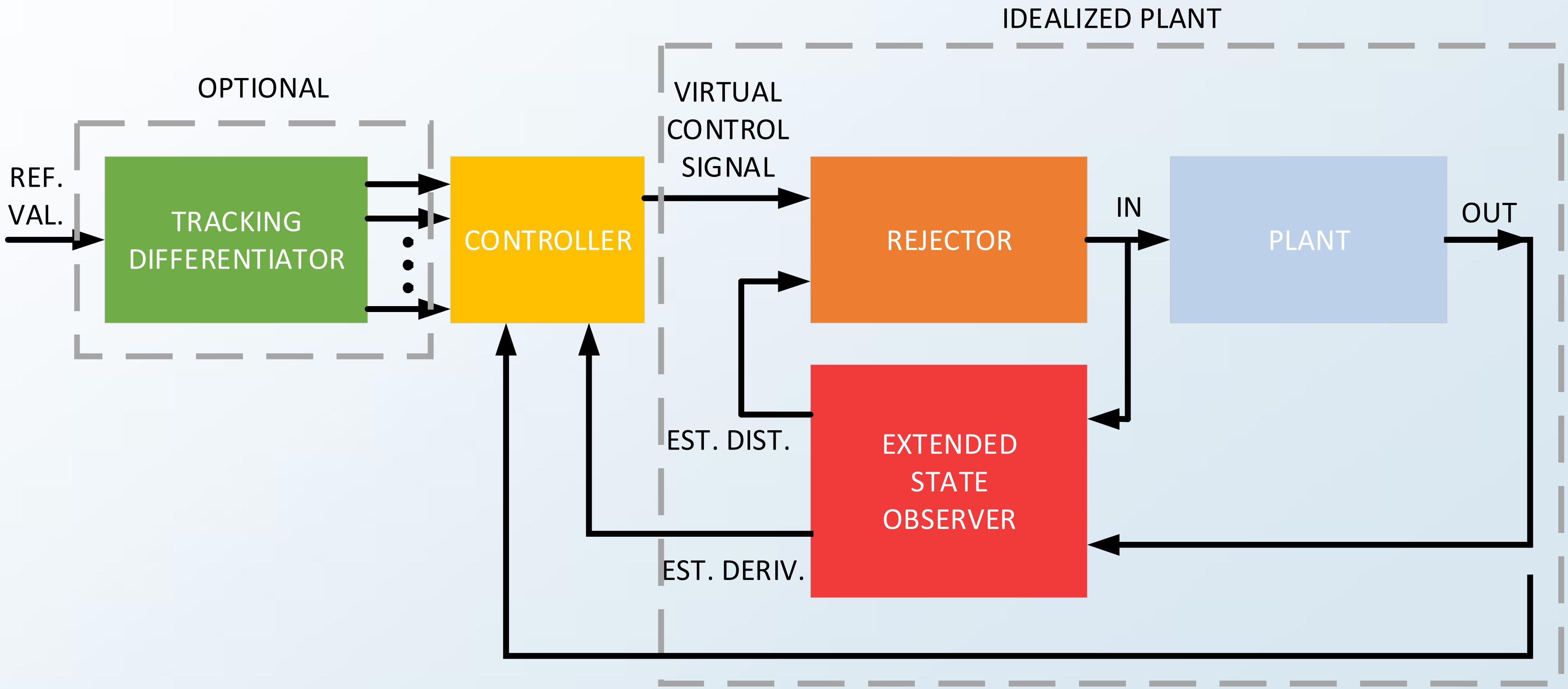
PLAN

1. Wprowdzenie.
2. Model obiektu sterowania.
3. Układ regulacji położenia.
4. Wyniki symulacji.
5. Podsumowanie i wnioski.

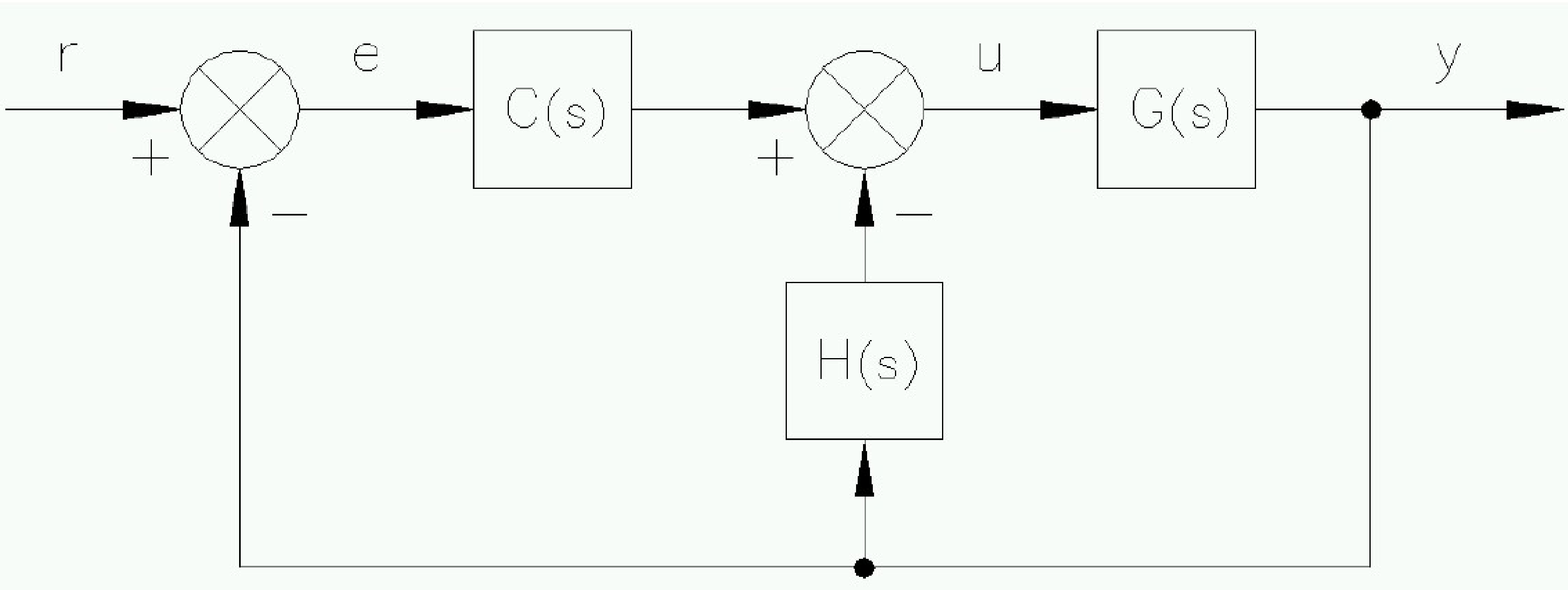
Wprowadzenie

Struktura klasyczna





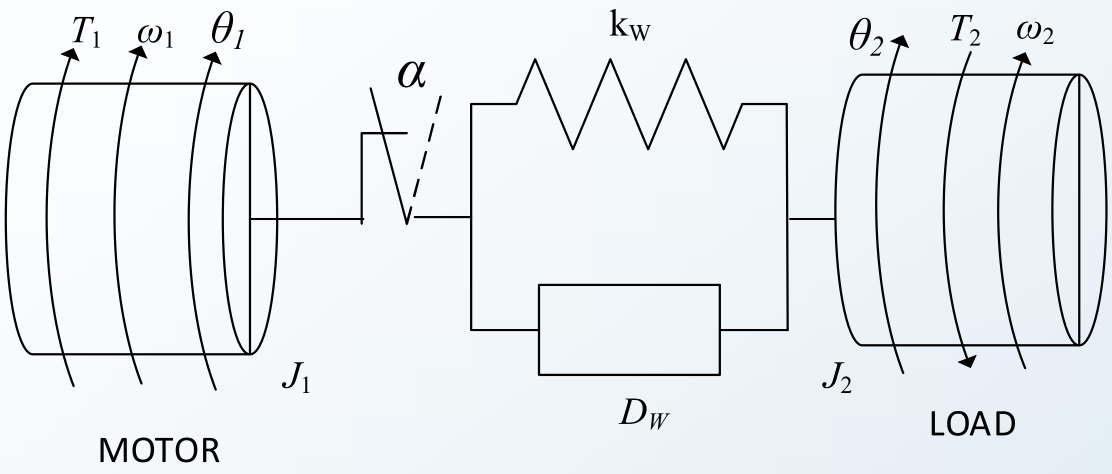
Wprowadzenie



$$C(s) = k_{j-1}s^{j-1}, \quad H(s) = k_j s^j + \cdots + k_{n-1}s^{n-1}$$

MODEL OBIEKTU STEROWANIA

Układ dwumasowy

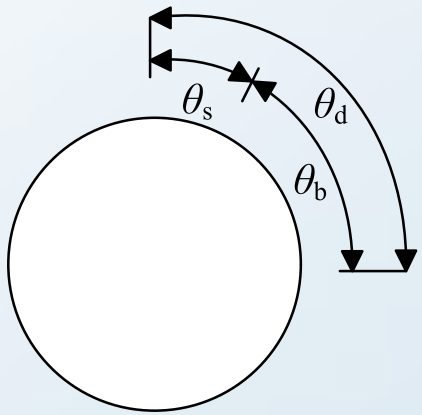


$$\begin{cases} J_1\dot{\omega}_1 = T_m - T_T \\ J_2\dot{\omega}_2 = T_T - T_L \\ T_T = k_W\left(\theta_1 - \theta_2\right) + D_W\left(\omega_1 - \omega_2\right) \end{cases} \quad (1)$$

ω_1 – motor speed, ω_2 – load speed, θ_1 – motor position, θ_2–load position J_1 – motor moment of intertia, J_2 – load moment of inertia, k_W – stiffness coefficient, D_W – damping factor, α – backlash width

Model luzu

Dislocation of the shafts ends θ_d is the sum of the torsional angle θ_s and the backlash width θ_b within the backlash area ($-\frac{1}{2}\alpha < \theta_d < \frac{1}{2}\alpha$) .



$$\dot{\theta}_b = \begin{cases} \max\left(0,\ \dot{\theta}_d + \dfrac{K_w}{D_w}(\theta_d - \theta_b)\right) & \text{if } \theta_b = -\dfrac{1}{2}\alpha \quad (m_s \le 0) \\ \dot{\theta}_d + \dfrac{K_w}{D_w}(\theta_d - \theta_b) & \text{if } |\theta_b| < \dfrac{1}{2}\alpha \quad (m_s = 0) \\ \min\left(0,\ \dot{\theta}_d + \dfrac{K_w}{D_w}(\theta_d - \theta_b)\right) & \text{if } \theta_b = \dfrac{1}{2}\alpha \quad (m_s \ge 0) \end{cases} \qquad (2)$$

Parametry modelu

- Parametry odpowiadają parametrom stanowiska laboratoryjnego.
- Struktura silnika może być traktowana jako bryła sztywna.
- Czujnik położenia nie wprowadza błędu.
- Pętla regulacji prądu oraz przekształtnik zostały uproszczone do obiektu inercyjnego oraz opóźnienia transportowego.
- Moment elektromagnetyczny silnika jest proporcjonalny to prądu.

Tab. 1: Parametry modelu

Parameter	Value	Unit
J_1	0.00162	kg·m^2
J_2	0.006	kg·m^2
α	0,1,2,5,10	deg.
k_W	29.42	Nm·s/rad
D_w	0.01	Nm/rad
Ts (sampling time)	10^{-4}	s

SYSTEM STEROWANIA

Control system block diagram

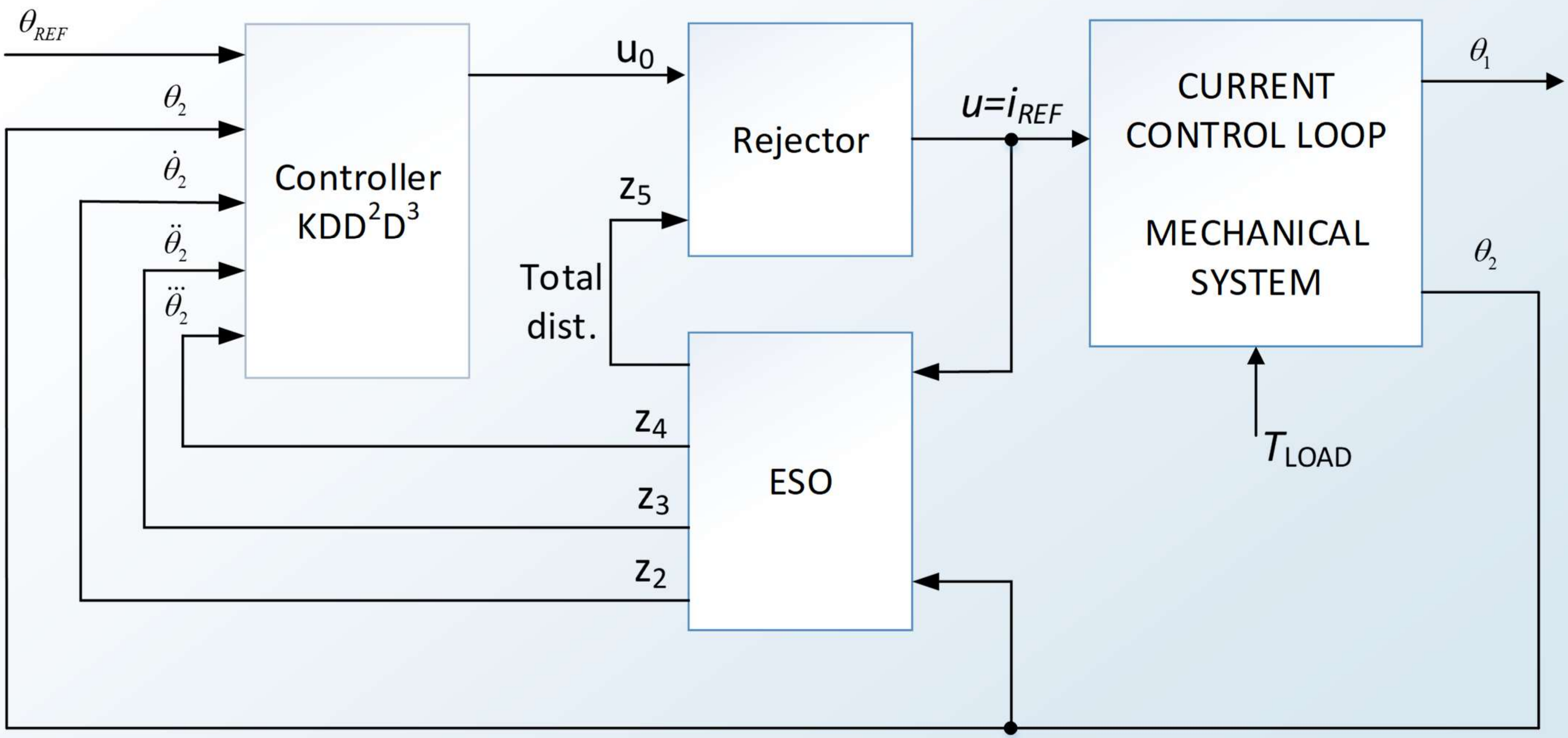


Fig. 1: Schemat blokowy układu regulacji położenia

Układ sterowania – opis matematyczny (1)

$$\begin{cases} J_1\dot{\omega}_1 = k_\varphi i_{REF} - k_w\left(\theta_1-\theta_2\right) - D_W\left(\omega_1-\omega_2\right) \\ J_2\ddot{\theta}_2 = k_w\left(\theta_1-\theta_2\right) + D_W\left(\omega_1-\omega_2\right) - T_L \end{cases} \quad (3)$$

Zmienne ω_1 oraz Θ_1 muszą zostać wyrugowane z układu (3)

$$\ddot{\ddot{\theta}}_2 = b_0 i_{REF} + f \quad (4)$$

$$f = -\frac{k_W^2}{J_1 J_2}\left(\theta_1-\theta_2\right) - \frac{D_W k_w}{J_1 J_2}\left(\omega_1-\omega_2\right) + A \quad (5)$$

$$b_0 = \frac{k_W k_\varphi}{J_1 J_2} \quad (6)$$

$$A = -\frac{k_W}{J_2}\dot{\omega}_2 + \frac{D_W}{J_2}\ddot{\omega}_1 - \frac{D_W}{J_2}\ddot{\omega}_2 - \frac{1}{J_2}\ddot{T}_L \quad (7)$$

Układ sterowania – opis matematyczny (2)

Używając zapisu w przestrzeni zmiennych stanu: $u=i_{REF}$, $y=\Theta_2$ razem z dodatkowym (rozszerzonym) stanem x_5:

$$\begin{cases} x_1 = \theta_2 \\ x_2 = \dot{\theta}_2 \\ x_3 = \ddot{\theta}_2 \\ x_4 = \dddot{\theta}_2 \\ x_5 = f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = b_0 u + f \\ \dot{x}_5 = \dot{f} \\ y = x_1 \end{cases} \tag{8}$$

Układ sterowania – opis matematyczny (3)

$$
\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= z_2 + \beta_1 \left(\theta_2 - z_1\right) \\
\dot{z}_2 &= z_3 + \beta_2 \left(\theta_2 - z_1\right) \\
\dot{z}_3 &= z_4 + \beta_3 \left(\theta_2 - z_1\right) \\
\dot{z}_4 &= z_5 + \beta_4 \left(\theta_2 - z_1\right) + b_0 i_{REF} \\
\dot{z}_5 &= \beta_5 \left(\theta_2 - z_1\right)
\end{aligned}
\tag{9}
$$

Zmienna z_1 estymuje Θ_2 natomiast z_5 estymuje całkowite zakłócenie f.
Stałe $\beta_1, \dots, \beta_5$ są wzmocnieniami obserwatora (met. lokalizacji biegunów)

$$
\beta_k = \binom{n+1}{k} \omega_0^k \tag{10}
$$

Układ sterowania – opis matematyczny (4)

Równanie odsprzęgacza (Rejector):

$$u = \frac{u_0 - z_5}{b_0} \tag{11}$$

$$\ddddot{\theta}_2 = b_0 \frac{u_0 - z_5}{b_0} + f = u_0 - z_5 + f \tag{12}$$

W przypadku, gdy ESO poprawnie estymuje zakłócenie:

$$z_5 \approx f \tag{13}$$

Obiekt z punktu widzenia regulatora:

$$\ddddot{\theta}_2 = u_0 \tag{14}$$

Układ sterowania – opis matematyczny (5)

Regulator PDD²D³:

$$u_0 = k_P\left(\theta_{REF} - \theta_2\right) - k_D\dot{\theta}_2 - k_{DD}\ddot{\theta}_2 - k_{DDD}\dddot{\theta}_2 \qquad (15)$$

Użycie estymowanych pochodnych zamiast różniczkowania sygnału położenia:

$$u_0 = k_P\left(\theta_{REF} - \theta_2\right) - k_D z_2 - k_{DD} z_3 - k_{DDD} z_4 \qquad (16)$$

Wzmocnienia regulatora:

$$k_i = \binom{n}{i}\omega_C^{n-i} \qquad \begin{cases} k_P = k_0 \\ k_D = k_1 \\ k_{DD} = k_2 \\ k_{DDD} = k_3 \end{cases} \qquad (17)$$

WYNIKI SYMULACJI

Scenariusze symulacyjne

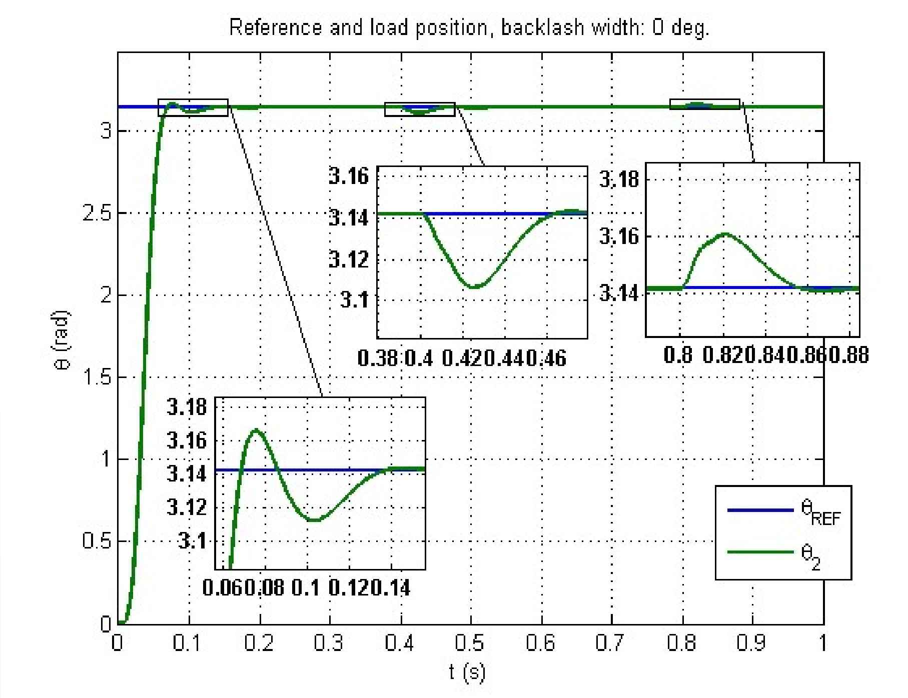
a) Odpowiedź na skokową zmianę wartości zadanej $\theta_{REF} = \pi$rad w chwili t = 0s,

b) odpowiedź na zewnętrzne zakłócenia w postaci skoku momentu obciążenia w stanie ustalonym: 3.6Nm między t = 0.4s a 0.8s,

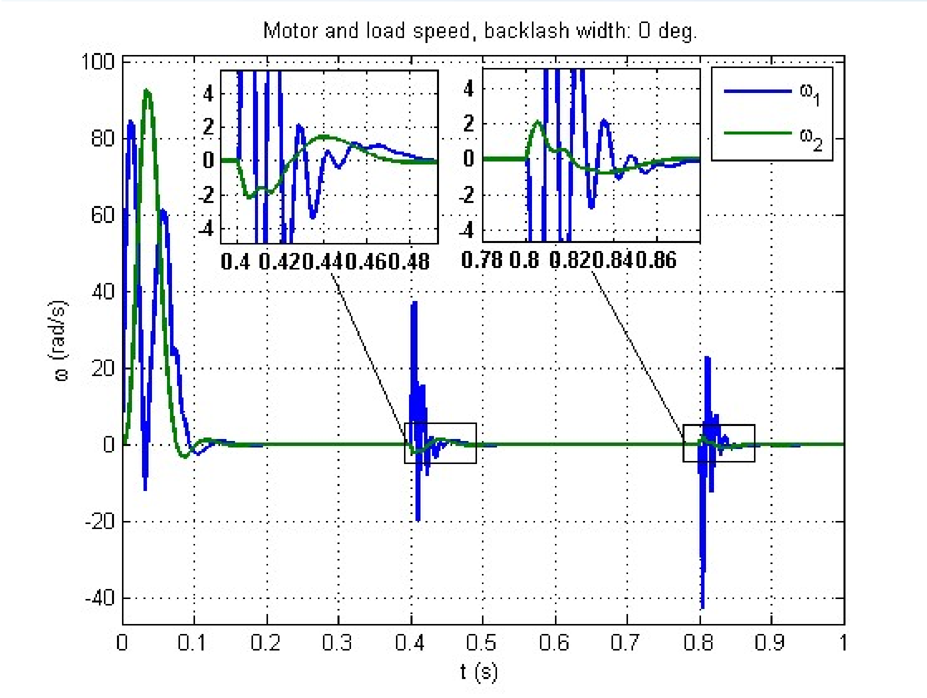
c) Odpowiedź na sygnał zadany w postaci rampy (1, 10 and 100rad/s) oraz w postaci sinusoidy (amplituda π, częstotliwość 2Hz) (bez momentu obciążającego),

Szerokość luzu 0^0 – *odpowiedź skokowa*

Położenie

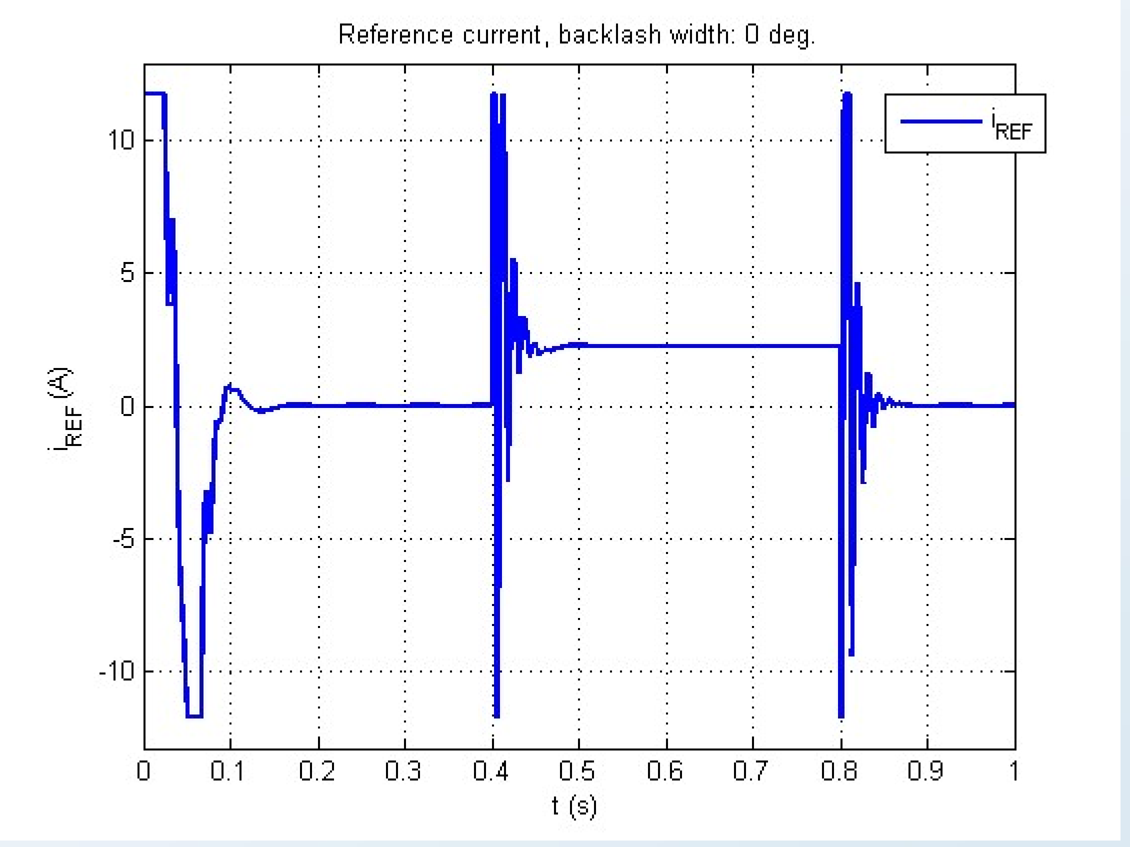


Prędkość



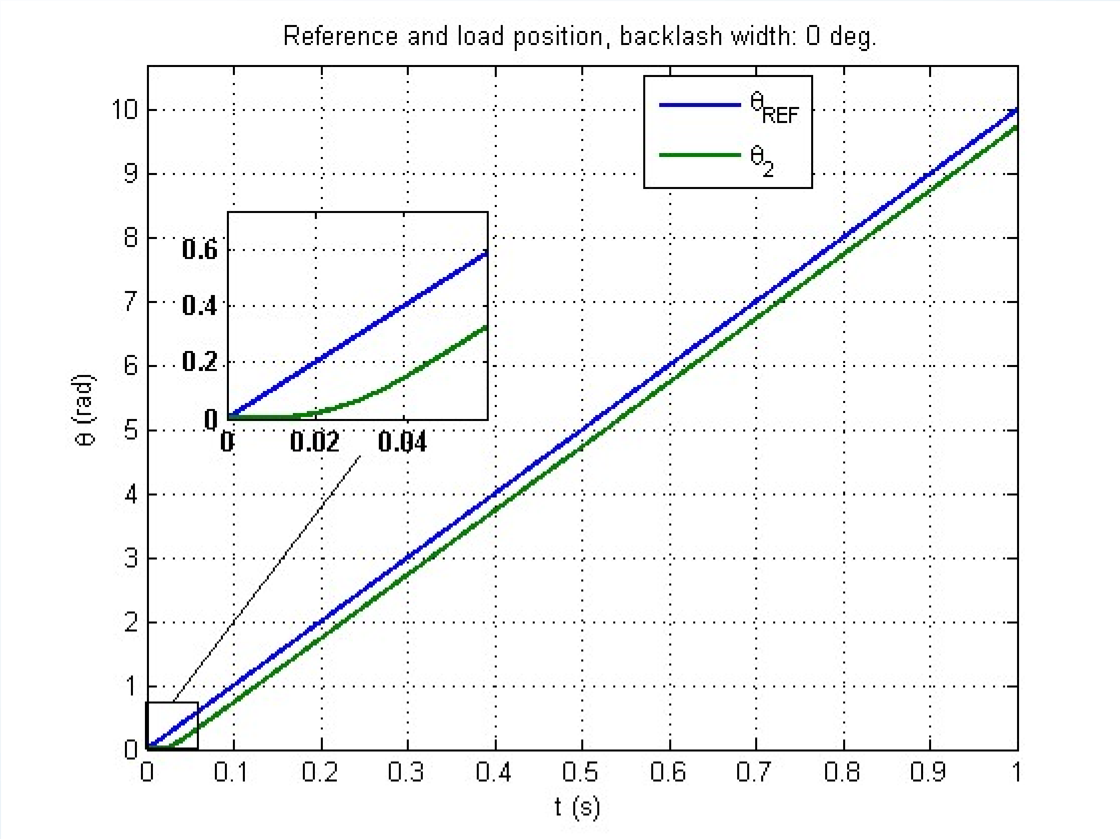
Szerokość luzu 0^0 – *odpowiedź skokowa*

Prąd zadany



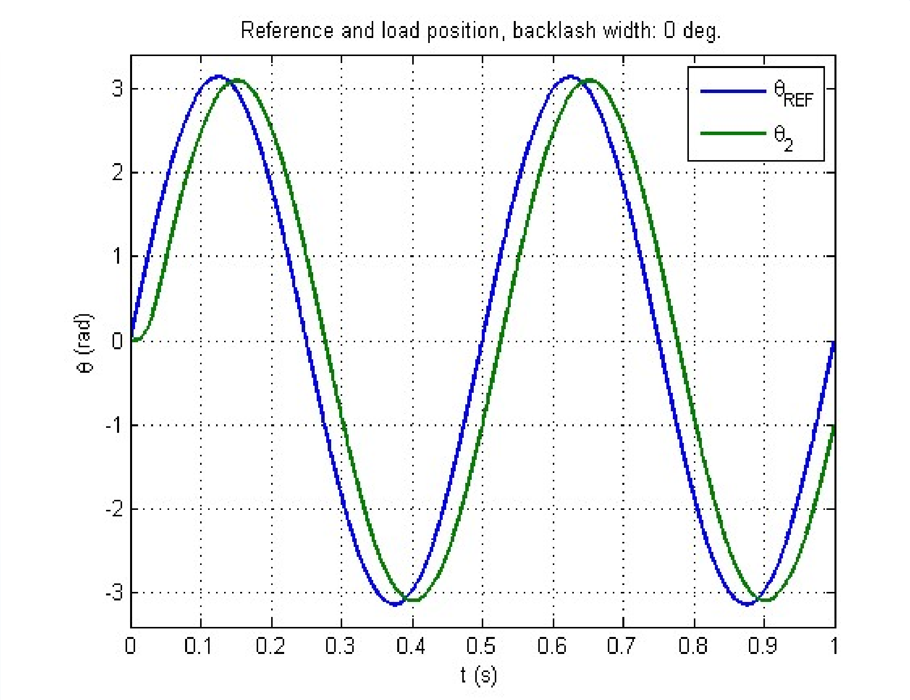
Szerokość luzu 0^0 – *10rad/s odpowiedź na sygnał rampowy*

Położenie

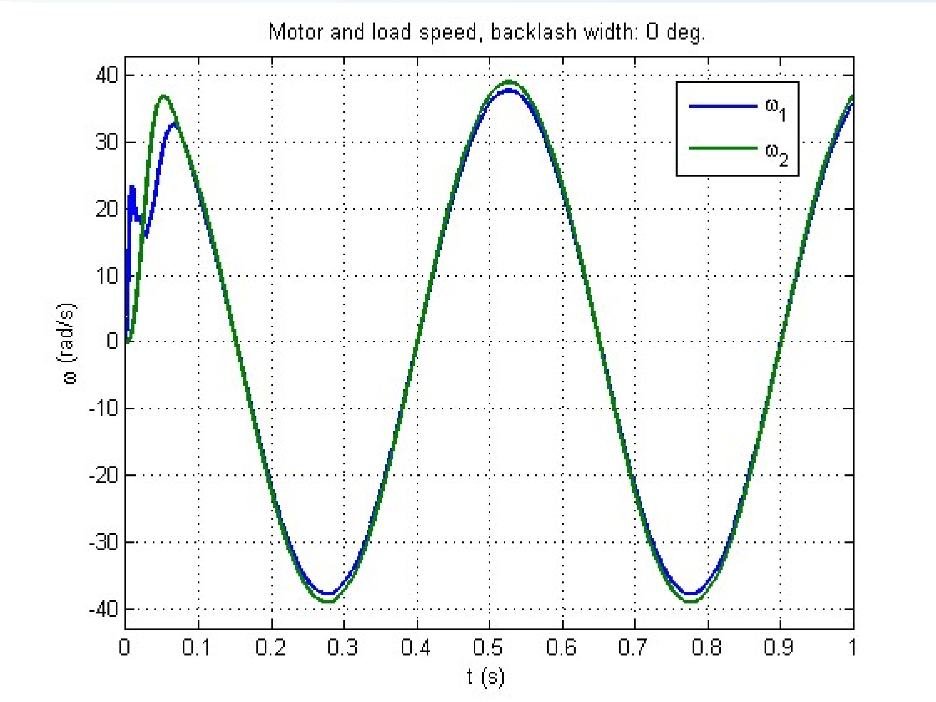


Szerokość luzu 0^0 – *odpowiedź na sygnał sinusoidalny*

Położenie

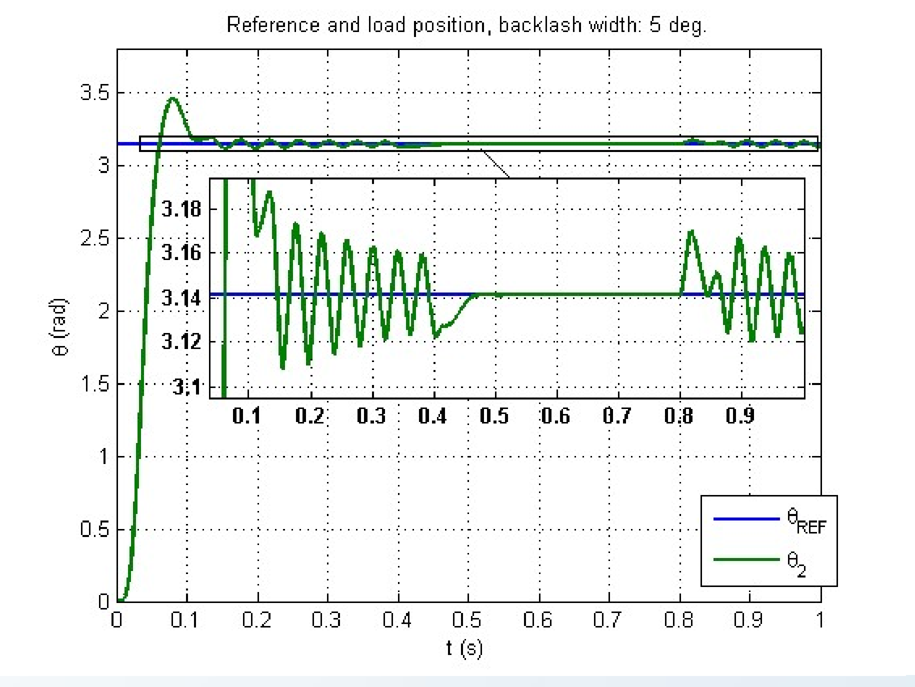


Prędkość

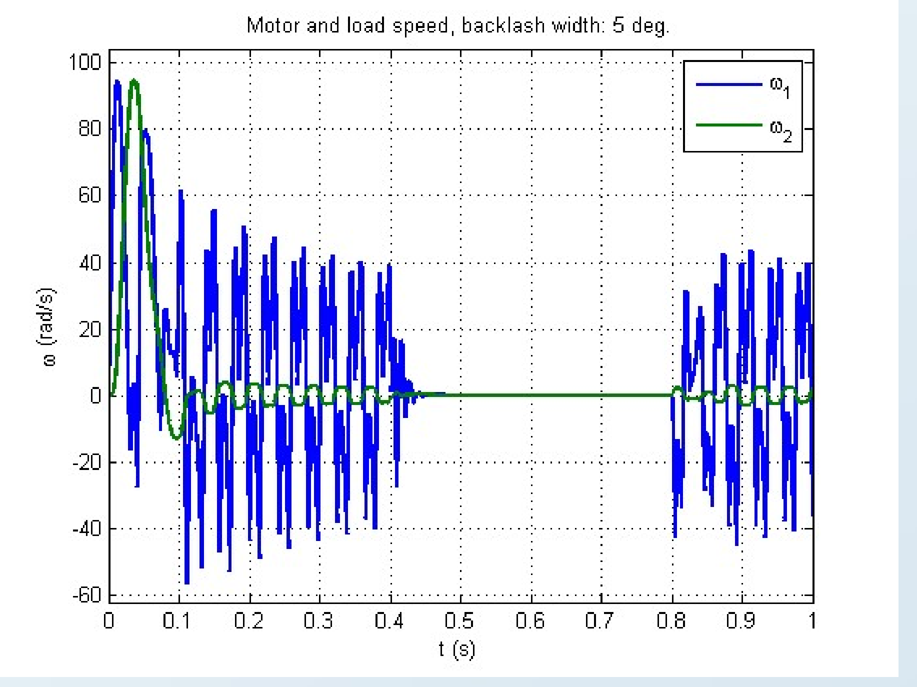


Szerokość luzu 5^0 – *odpowiedź skokowa*

Położenie

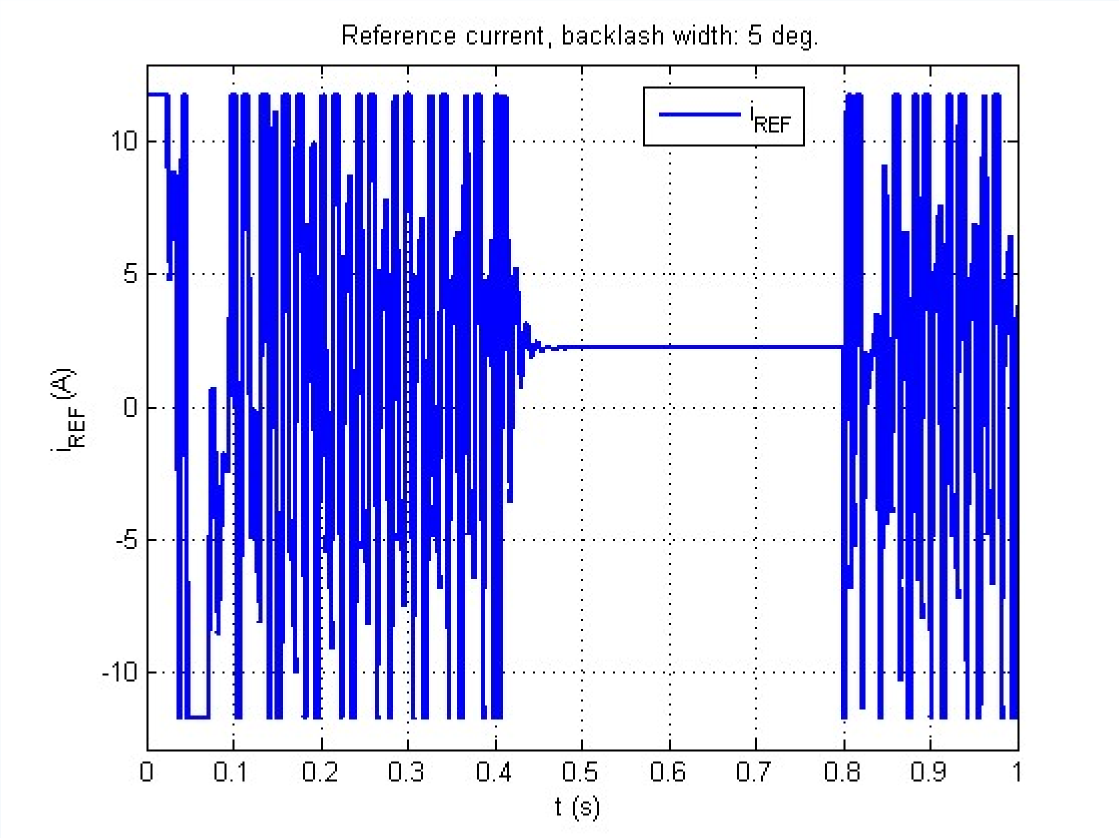


Prędkość



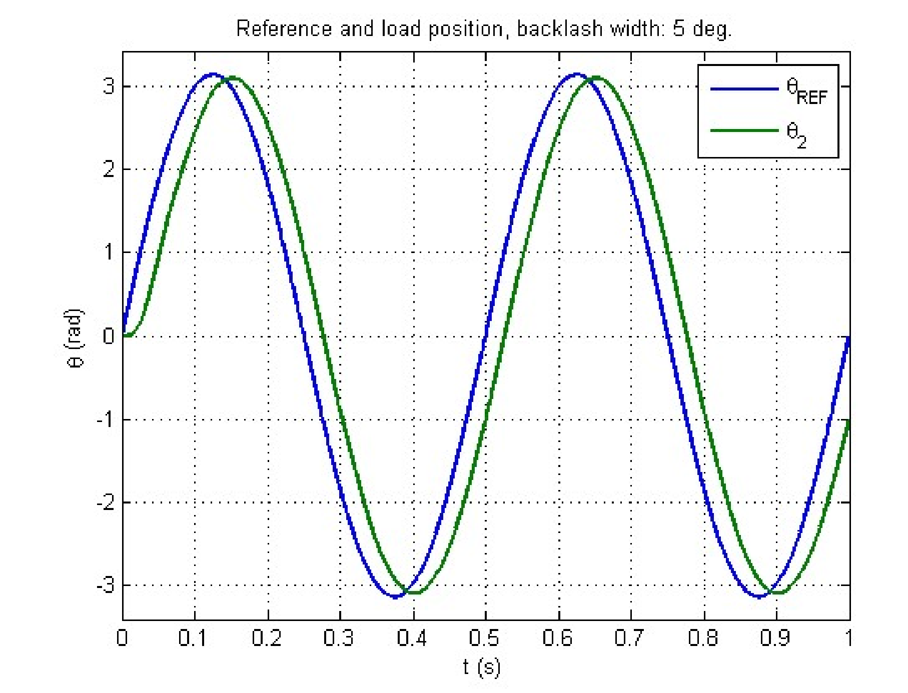
Szerokość luzu 5^0 – *odpowiedź skokowa*

Prąd zadany

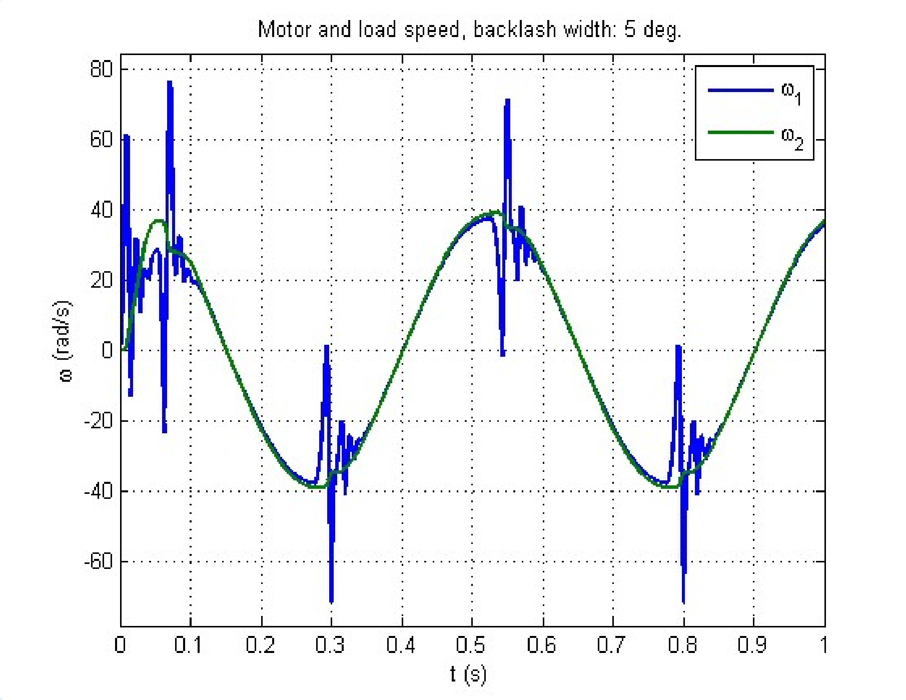


Szerokość luzu 5^0 – *odpowiedź na sygnał sinusoidalny*

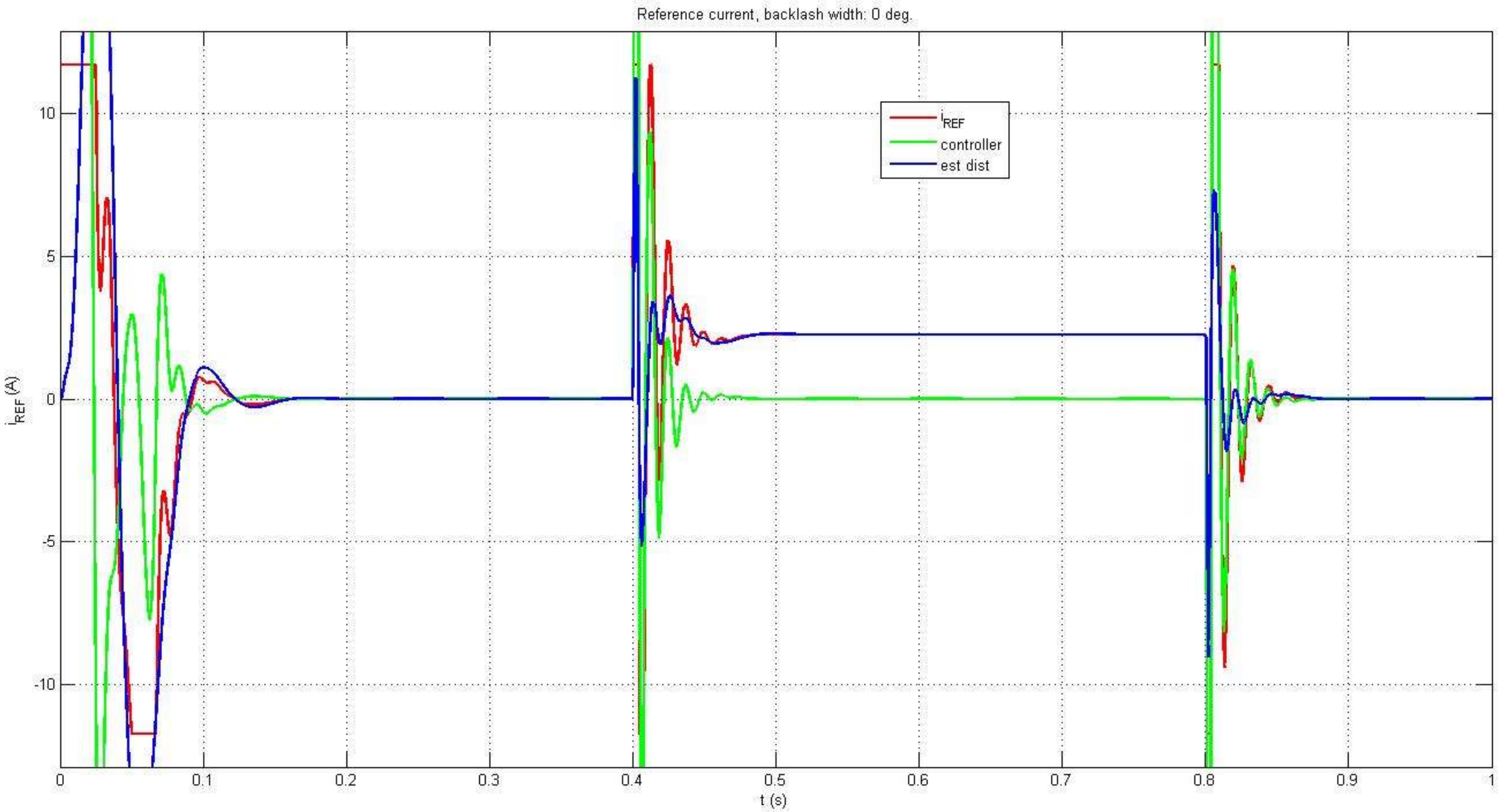
Położenie



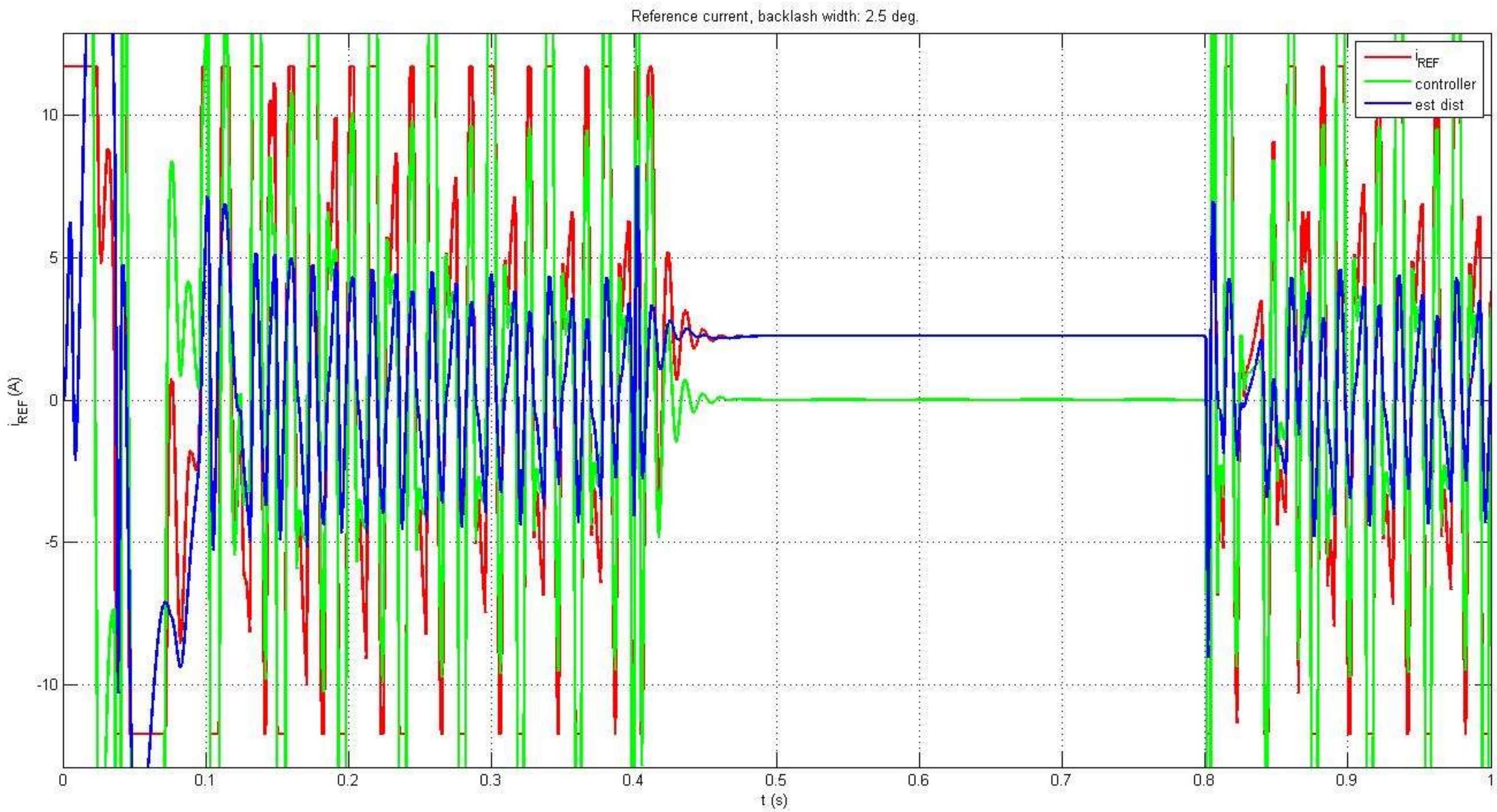
Prędkość



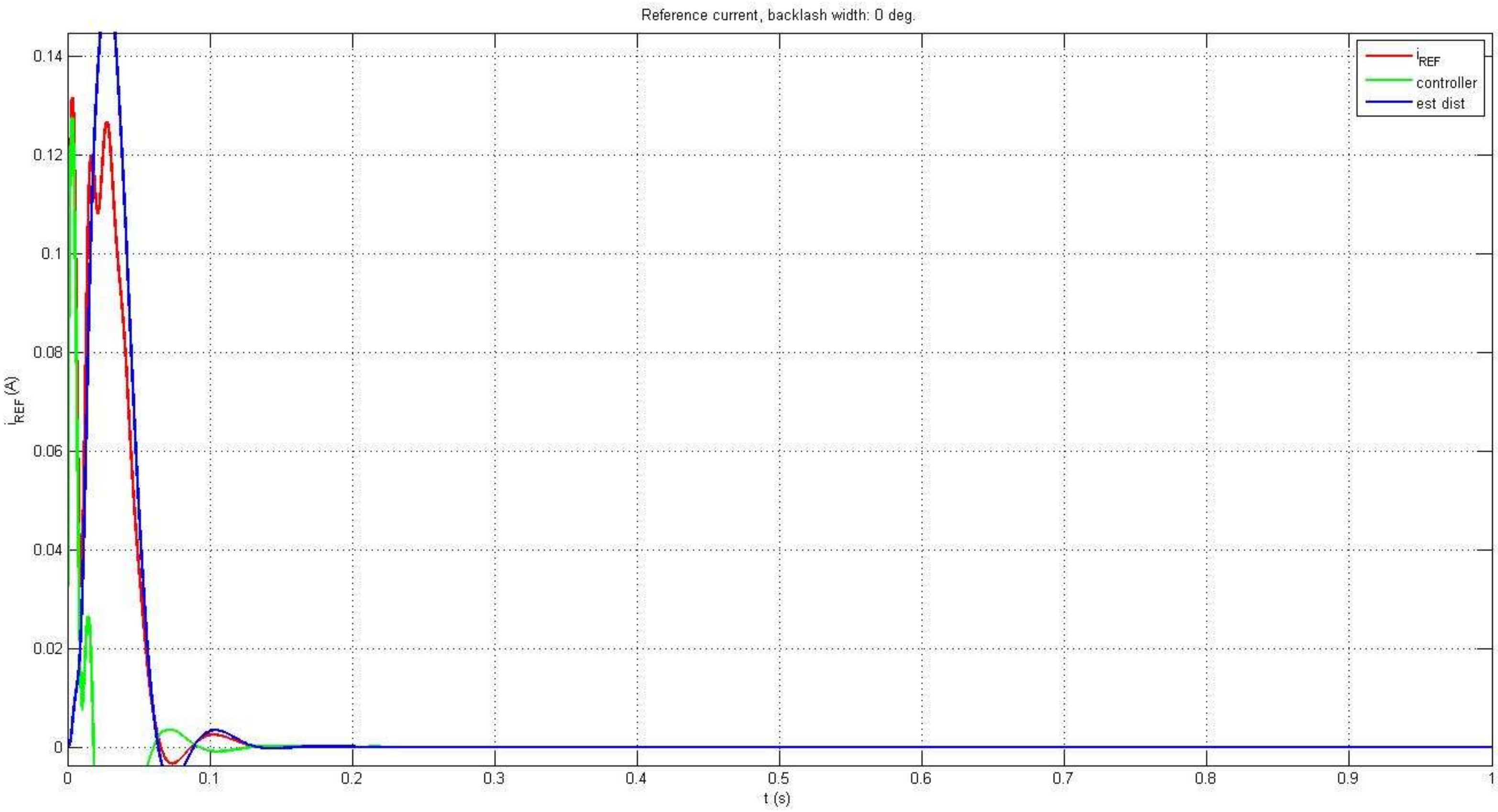
Szerokość luzu 0^0 – *sygnały sterujące, skok*



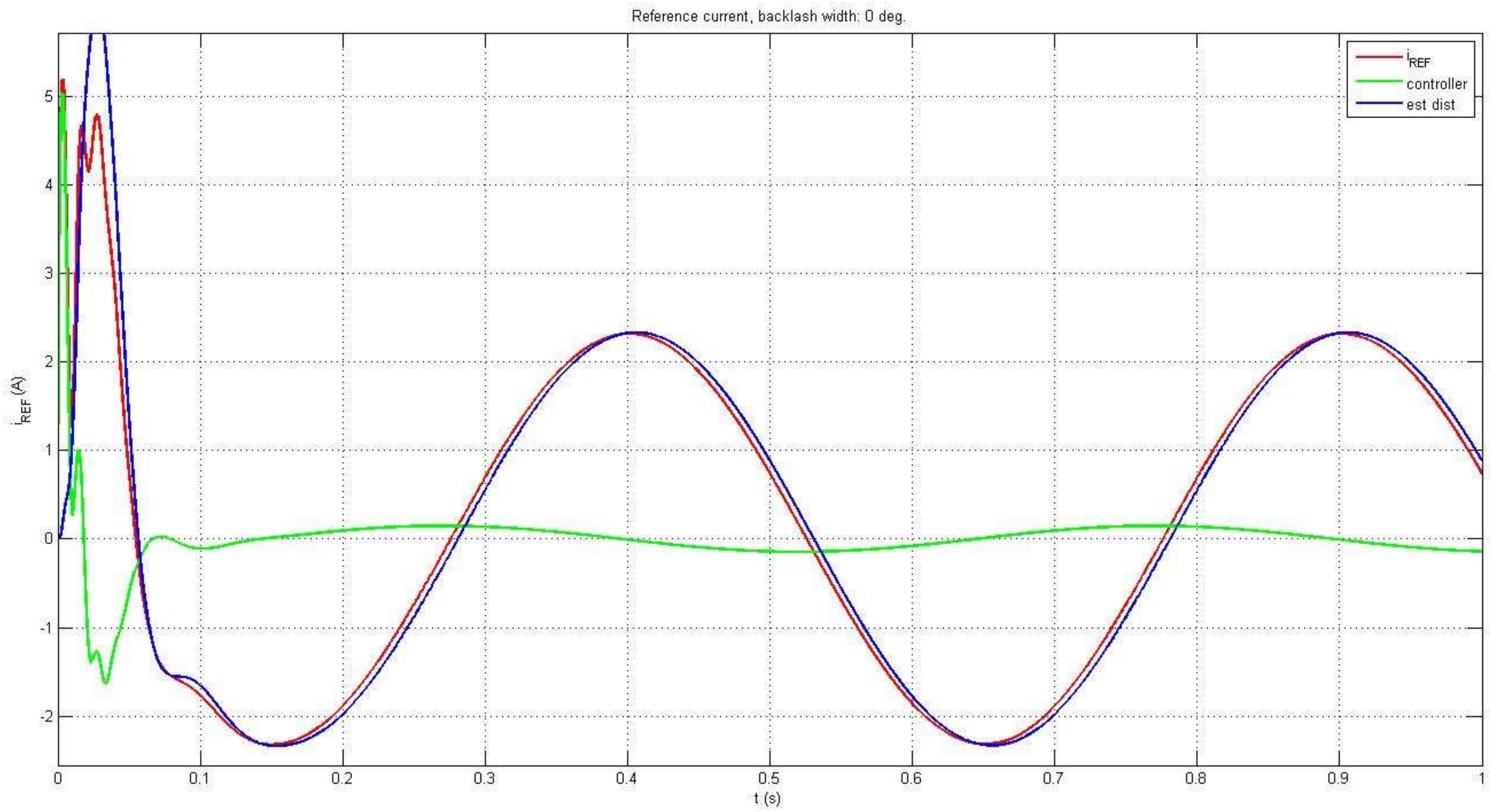
Szerokość luzu 5^0 – *sygnały sterujące, skok*



Szerokość luzu 0^0 – *sygnały sterujące, rampa*



Szerokość luzu 0^0 – *sygnały sterujące, sinus*



Wskaźniki jakości

1. Średni kwadrat błędu

$$MISE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\theta_{REF} - \theta_2\right)^2$$

2. Maksymalny względny uchyb regulacji po pojawieniu się obciążenia

$$\theta_2 D_A = \left.\frac{\max\left(\left|\theta_{REF} - \theta_2\right|\right)}{\theta_{REF}}\right|_{T_L > 0} \cdot 100\%$$

3. Maksymalne odchylenie po usunięciu obciążenia

$$\theta_2 D_R = \left.\frac{\max\left(\left|\theta_{REF} - \theta_2\right|\right)}{\theta_{REF}}\right| \cdot 100\%$$

4. Maksymalne przeregulowanie względne podczas rozruchu

$$\theta_2 O = \left.\frac{\max\left(\left|\theta_{REF} - \theta_2\right|\right)}{\theta_{REF}}\right|_{\theta_2 > \theta_{REF}} \cdot 100\%$$

Wskaźniki jakości – wymuszenie skokowe

Tab. 2: Wskaźniki jakości dla wymuszenia skokowego

α (deg.)	MISE (rad^2)	$\theta_2 O(\%)$	$\theta_2 D_A(\%)$	$\theta_2 D_R(\%)$
0	0.3004	0.78	1.13	0.62
1	0.3013	2.94	1.39	0.90
2	0.3023	5.46	1.26	0.87
5	0.3061	10.01	0.00	0.90
10	0.3144	14.59	0.00	4.15

Wskaźniki jakości – odpowiedź na sygnał rampowy

Tab. 3: Wskaźniki jakości dla sygnału zadanego w postaci rampy

α (deg.)	1rad/s		10rad/s		100rad/s	
	MISE $\cdot 10^{-4}$ (rad^2)	$\sqrt{MISE}$ (rad)	MISE (rad^2)	$\sqrt{MISE}$ (rad)	MISE (rad^2)	$\sqrt{MISE}$ (rad)
0	6.94	0.026	0.069	0.263	6.943	2.636
1	6.95	0.026	0.069	0.263	6.945	2.635
2	6.98	0.026	0.069	0.263	6.947	2.636
5	8.25	0.029	0.069	0.263	6.964	2.639
10	38.25	0.062	0.071	0.267	7.002	2.646

Wskaźniki jakości – odpowiedź na sygnał sinusoidalny

Tab. 4: Wskaźniki jakości dla sinusoidalnego sygnału zadanego

α (deg.)	MISE (rad^2)	$\sqrt{MISE}\,(rad)$
0	0.5122	0.7156
1	0.5122	0.7156
2	0.5123	0.7158
5	0.5165	0.7187
10	0.5115	0.7152

Podsumowanie i wnioski

- W trakcie projektowania układu regulacji tylko współczynnik b_0 obiektu musi być znany.
- Układ regulacji oparty o liniowy ESO pozostaje stabilny jeśli w obiekcie pojawi się luz mechaniczny (badano wartości do 10 stopni).
- Pojawienie się momentu obciążenia powoduje niwelowanie luzu co przekłada się na lepsze właściwości układu regulacji.
- Z uwagi na strukturę układu regulacji – dla sygnałów zadanych innych niż wartość stała pojawia się uchyb w stanie ustalonym.