



Napęd elektryczny mechanizmu z luzem i elastycznością w połączeniu silnika z urządzeniem wykonawczym

Krzysztof Nowopolski, Bartłomiej Wicher

Seminarium ZSiEP

22.04.2016

Plan prezentacji

1. Zarys problemu

- obecność połączeń elastycznych w maszynach i jej na pracę mechanizmów
- model matematyczny połączenia sprężystego z luzem

2. Identyfikacja parametrów stanowiska

- współczynnik sprężystości, tłumienia, momenty bezwładności

3. Badania laboratoryjne struktur sterowania

- strojenie metodą symetrii
- regulator PID-2DOF

4. Badania symulacyjne

- optymalizacja sterowania rozmytego

5. Wnioski i dalsze prace

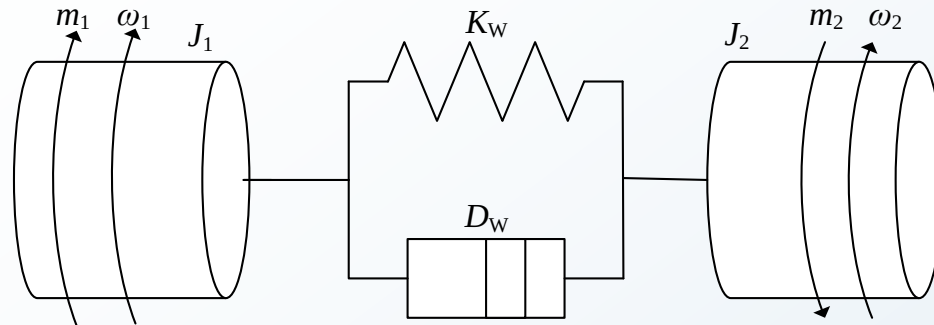
Problem elastyczności w napędzie elektrycznym



Wpływ elastyczności

- Skończona sztywność połączenia pomiędzy silnikiem a jego obciążeniem daje sposobność do powstawania dyslokacji obu końcówek wału.
- W stanach dynamicznych dyslokacje te przekładają się na powstawanie drgań skrętnych.
- Amplituda drgań skrętnych zmienia się w funkcji częstotliwości, cechując się występowaniem co najmniej jednej pary rezonans - antyrezonans.
- Występowanie drgań skrętnych wpływa negatywnie na żywotność i niezawodność mechanizmu, a także jakość sterowania.
- Ponieważ często niemożliwe lub nieopłacalne jest zastosowanie odpowiednich modyfikacji mechanicznych, zadanie eliminacji występowania drgań skrętnych jest cedowane na układ sterowania.

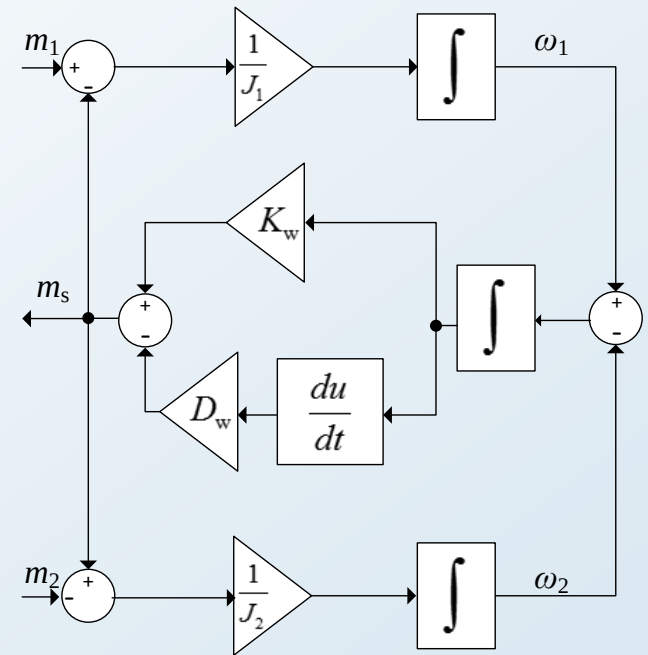
Minimalny układ ze sprężystością: model dwumasowy



$$\frac{d}{dt} \omega_1 = \frac{1}{J_1} (m_1 - m_s)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_2 = \frac{1}{J_2} (m_2 + m_s)$$

$$\frac{d}{dt} m_s = K_w (\omega_1 - \omega_2) + \frac{D_w (\omega_1 - \omega_2)}{dt}$$



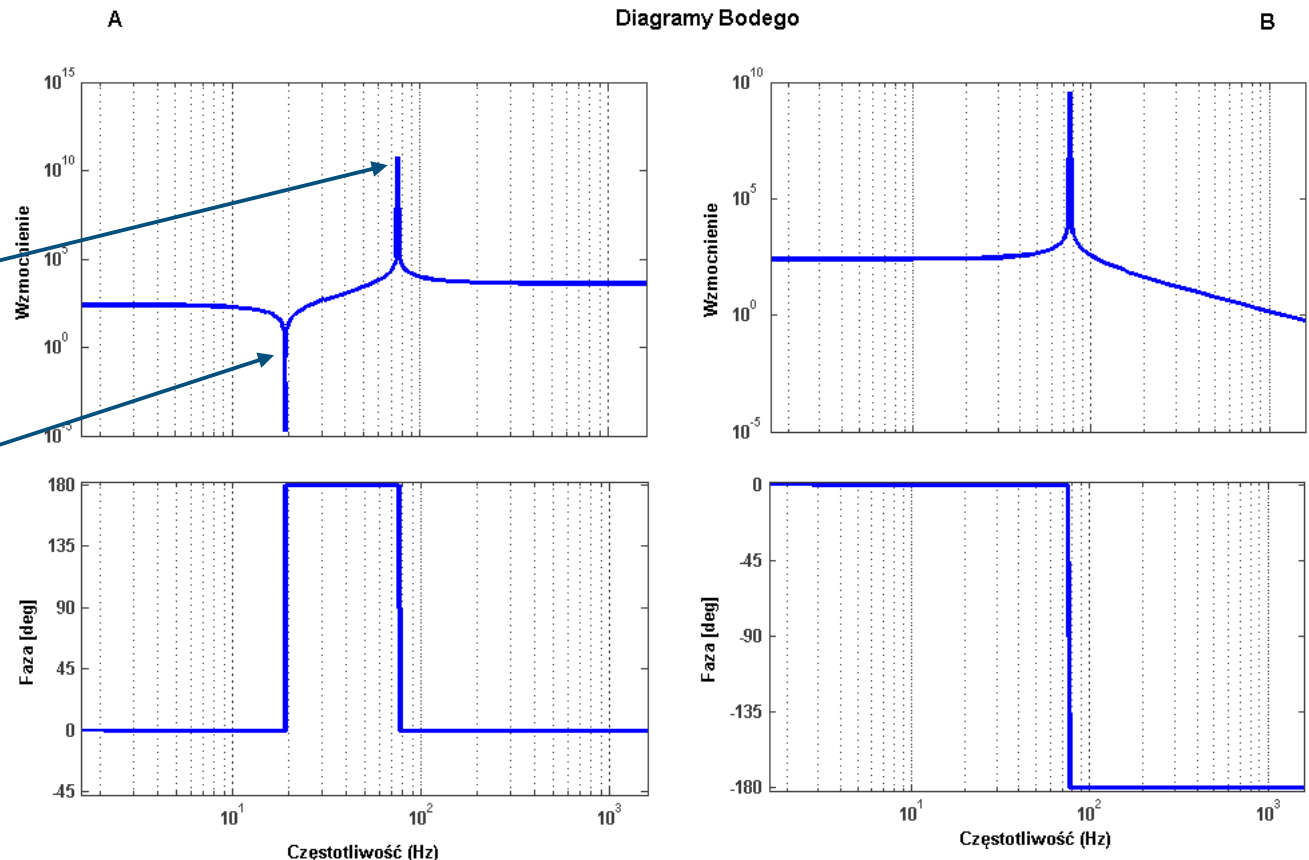
ω_1 – prędkość silnika, ω_2 – prędkość obciążenia, J_1 – moment bezwładności strony silnika, J_2 – moment bezwładności strony obciążenia, K_w – współczynnik sprężystości, D_w – współczynnik tłumienia

Transmitancja operatorowa i widmowa układu dwumasowego

Częstotliwości
(anty)rezonansowe:

$$NTF = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_w J}{J_1 J_2}}$$

$$ARF = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_w}{J_2}}$$



Transmitancje
operatorowe:

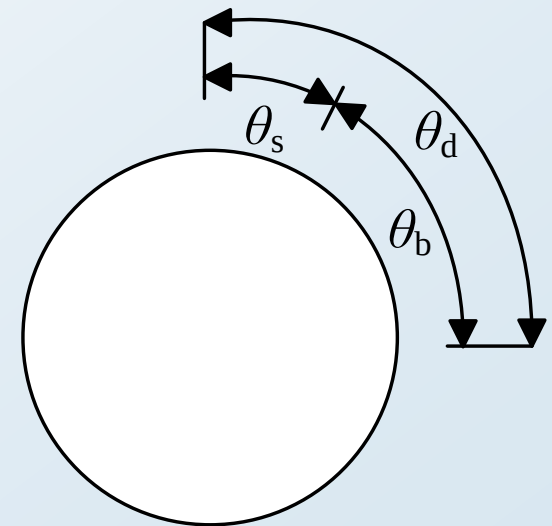
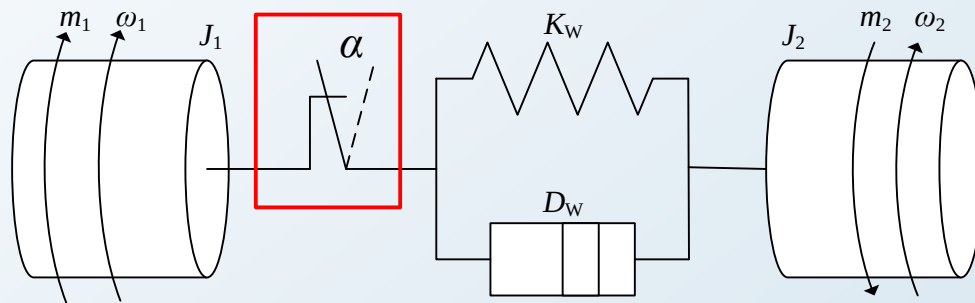
$$G_1 = \frac{\dot{\Omega}_1(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_1} \cdot \frac{s^2 + (2\pi ARF)^2}{s^2 + (2\pi NTF)^2}$$

$$G_2 = \frac{\dot{\Omega}_2(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_1} \cdot \frac{(2\pi ARF)^2}{s^2 + (2\pi NTF)^2}$$

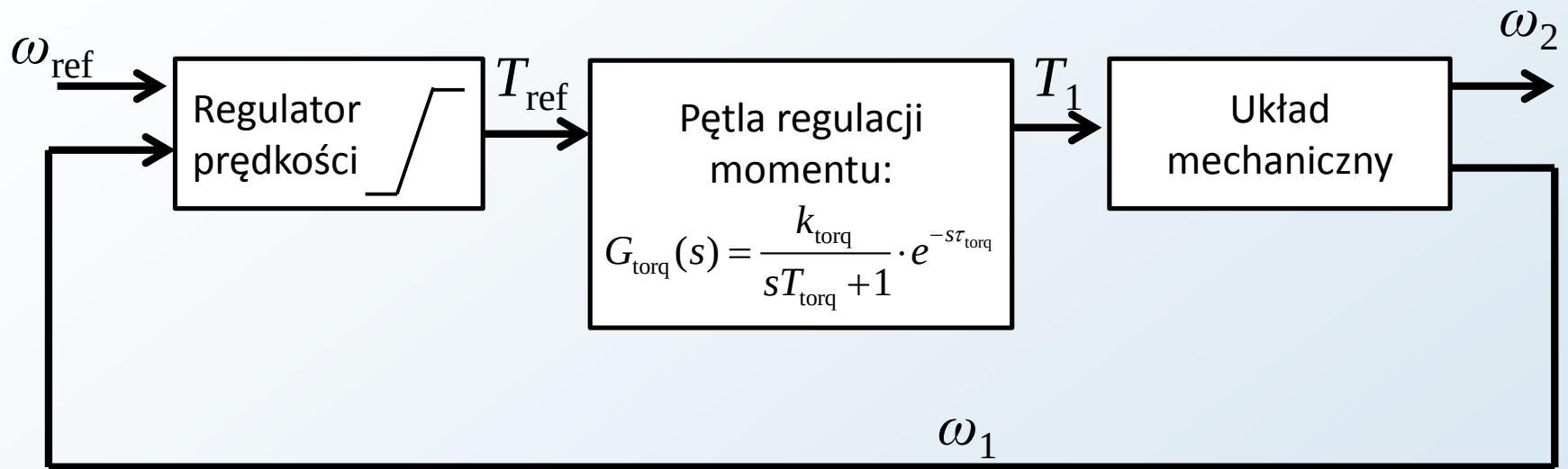
Przyjęty model luzu

Dla modelu sprężystego z luzem, dyslokacja końców wału θ_d jest sumą kąta skręcenia wału θ_s i przemieszczenia w obrębie obszaru luzu θ_b ($-\frac{1}{2}\alpha < \theta_d < \frac{1}{2}\alpha$). Poniższe równanie stanu, opisujące układ dwumasowy z luzem, sprowadza się do całki z ograniczeniem $\pm\frac{1}{2}\alpha$.

$$\dot{\theta}_b = \begin{cases} \max\left(0, \dot{\theta}_d + \frac{K_w}{D_w} \theta_s\right) & \text{if } \theta_b = -\frac{1}{2}\alpha \ (m_s \leq 0) \\ \dot{\theta}_d + \frac{K_w}{D_w} \theta_s & \text{if } |\theta_b| < \frac{1}{2}\alpha \ (m_s = 0) \\ \min\left(0, \dot{\theta}_d + \frac{K_w}{D_w} \theta_s\right) & \text{if } \theta_b = \frac{1}{2}\alpha \ (m_s \geq 0) \end{cases}$$



Schemat układu regulacji



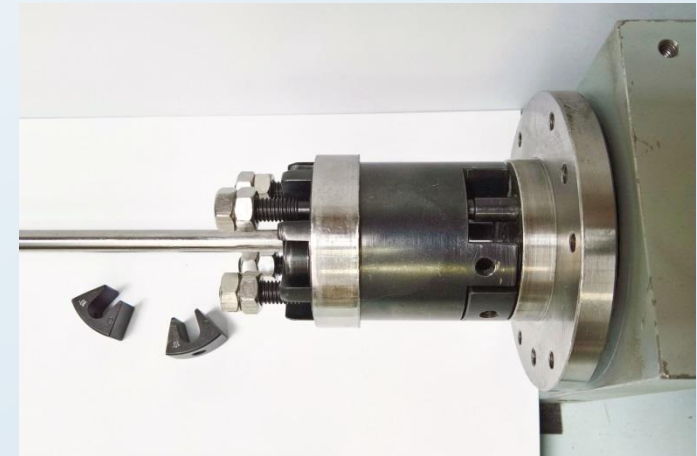
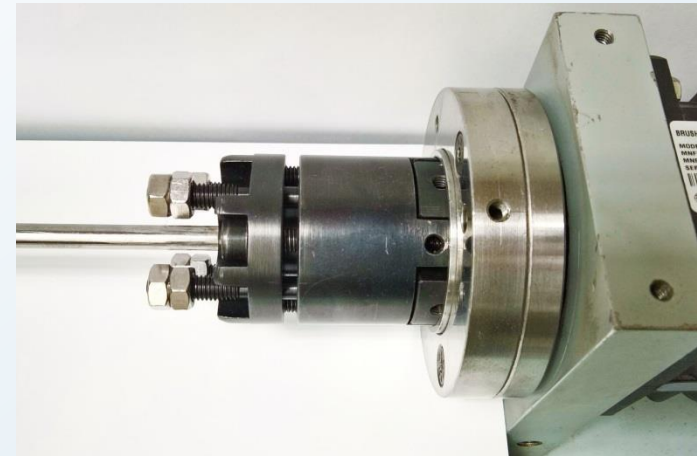
Założenia dotyczące badań



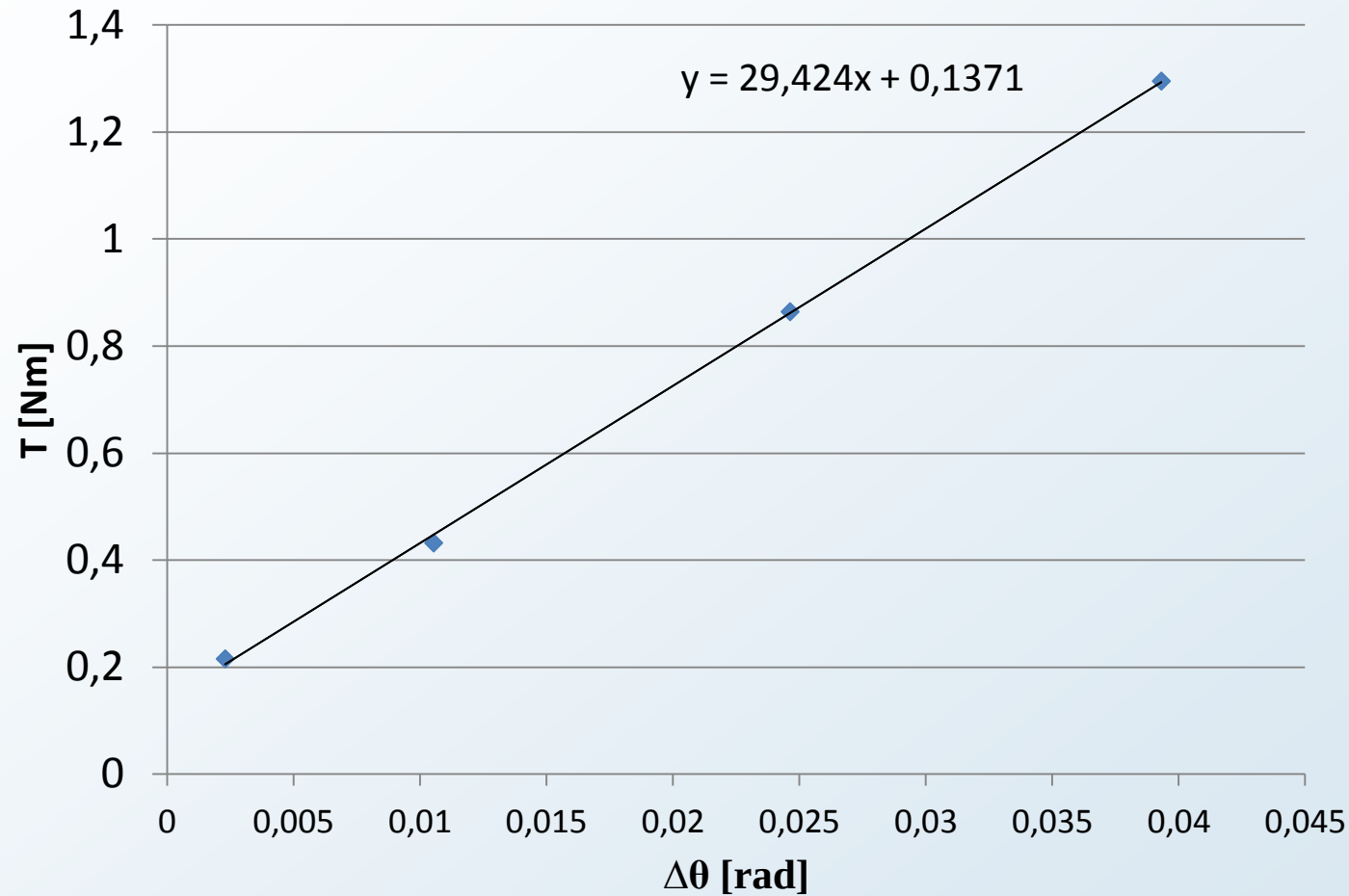
- Badania skupiały się na układzie regulacji prędkości pracującym w warunkach występowania sprężystości i luzu mechanicznego.
- Pętlę regulacji prądu uproszczono do połączenia inercji i opóźnienia, co jest uprawnione ze względu na inną skalę czasową jej dynamiki.
- Badania eksperymentalne poprzedzone zostaną identyfikacją parametrów stanowiska.
- Moment bezwładności połączenia silnika i obciążenia jest zerowy.
- Wewnętrzne struktury silnika i obciążenia są doskonale sztywne.
- Zależność prądu silnika w osi q i wytwarzanego momentu przy zerowym prądzie i_d jest liniowa.

Założenia dotyczące badań

- Parametry stanowiska przyjęte na podstawie danych katalogowych:
 - $k_{\text{torq}} = 1.6 \text{ Nm/A}$: współczynnik wzmocnienia pętli regulacji momentu tj. przelicznik prądu silnika na wytwarzany przez niego moment,
 - $\alpha = 0, 1, 2.5, 5, 10^0$: szerokość luzu,
 - $\tau_{\text{torq}} = 100 \mu\text{s}$: opóźnienie wprowadzane przez częstotliwość pracy przekształtnika
- Parametry wyznaczane na drodze identyfikacji:
 - $T_{\text{torq}} = 580 \mu\text{s}$: stała czasowa zamkniętego układu regulacji momentu,
 - $J_1 = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $J_2 = 6.0 \cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$: momenty bezwładności po stronie silnika i obciążenia,
 - $K_w = 29.43 \text{ Nm/rad}$: współczynnik sprężystości wału,
 - $D_w = 9.3 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}\cdot\text{s/rad}$: współczynnik tłumienia wału.



Pomiar współczynnika elastyczności



Pomiar współczynnika tłumienia i wartości momentów

Znając częstotliwości rezonansu i antyrezonansu oraz współczynnik sprężystości układu, możliwe jest wyznaczenie momentów bezwładności dla obu stron mechanizmu:

$$J_1 = \left(\frac{4\pi^2 \cdot NTF^2}{K_w} - J_2^{-1} \right)^{-1} \quad J_2 = \frac{K_w}{(2\pi \cdot ARF)^2}$$

Podczas poszukiwania częstotliwości rezonansowych, należy wziąć pod uwagę także wartość tłumienia układu, która znacząco wpływa na charakterystykę obiektu oscylacyjnego. Jego zachowanie jest charakteryzowane trzema różnymi częstotliwościami:

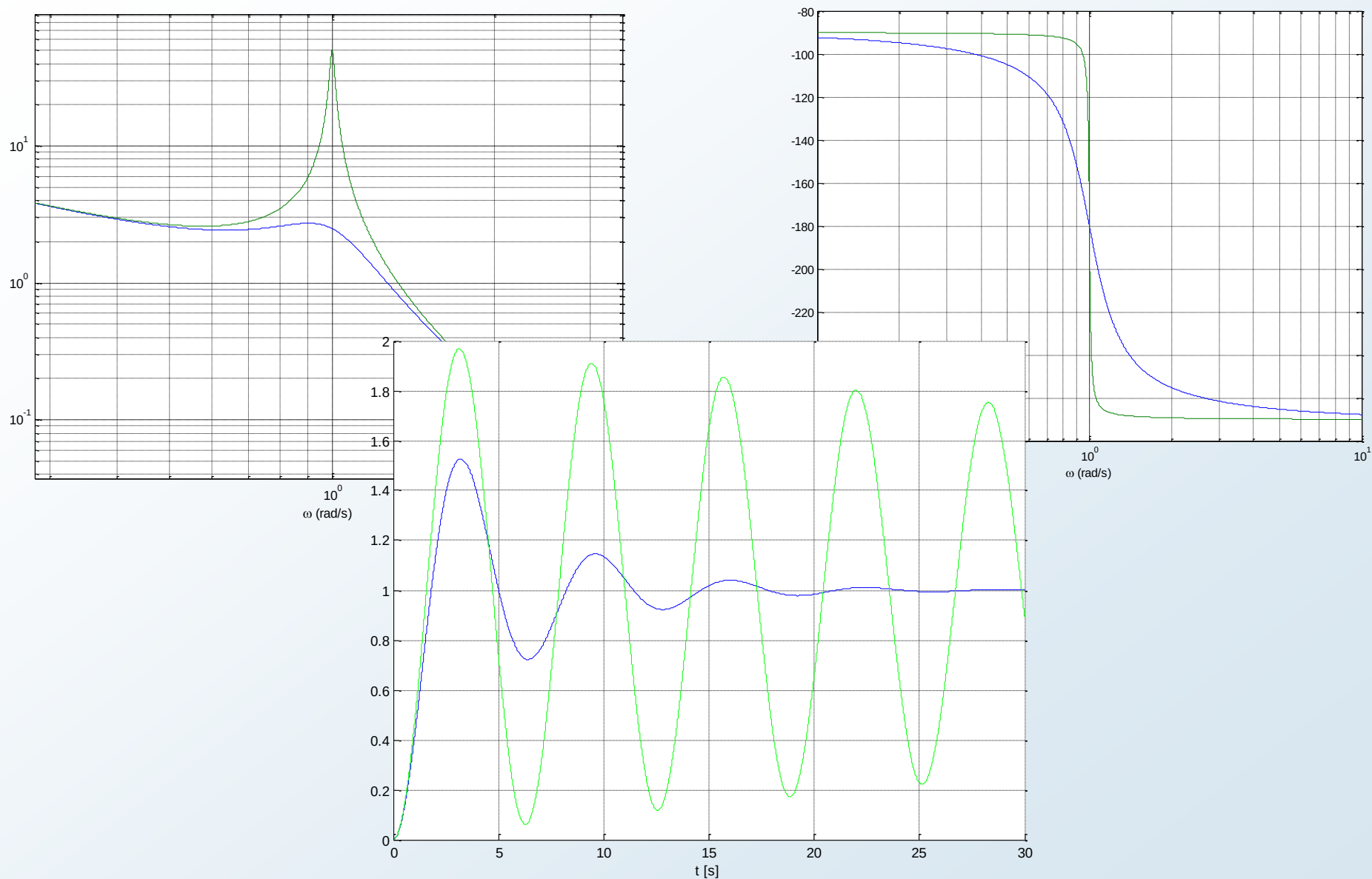
- częstotliwość ω_0 , przy której wymuszenie i odpowiedź są przesunięte o 90 stopni,
- częstotliwość ω_1 dla której amplituda odpowiedzi układu jest maksymalna,
- częstotliwość ω_2 tłumionych drgań swobodnych.

$$G(s) = \frac{k}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - 2\xi^2}$$

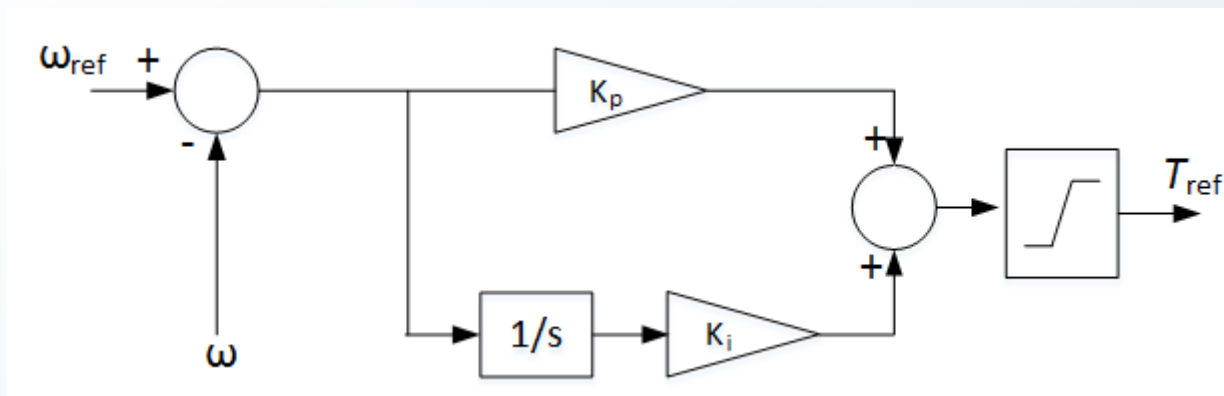
$$\omega_2 = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$$

Pomiar współczynnika tłumienia i wartości momentów

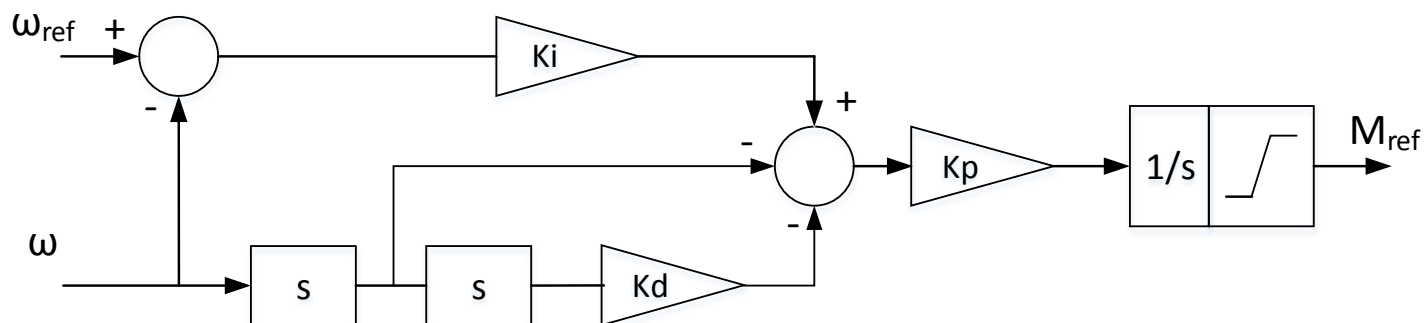


Struktury regulacji

Regulator PI



Regulator PID-2DOF



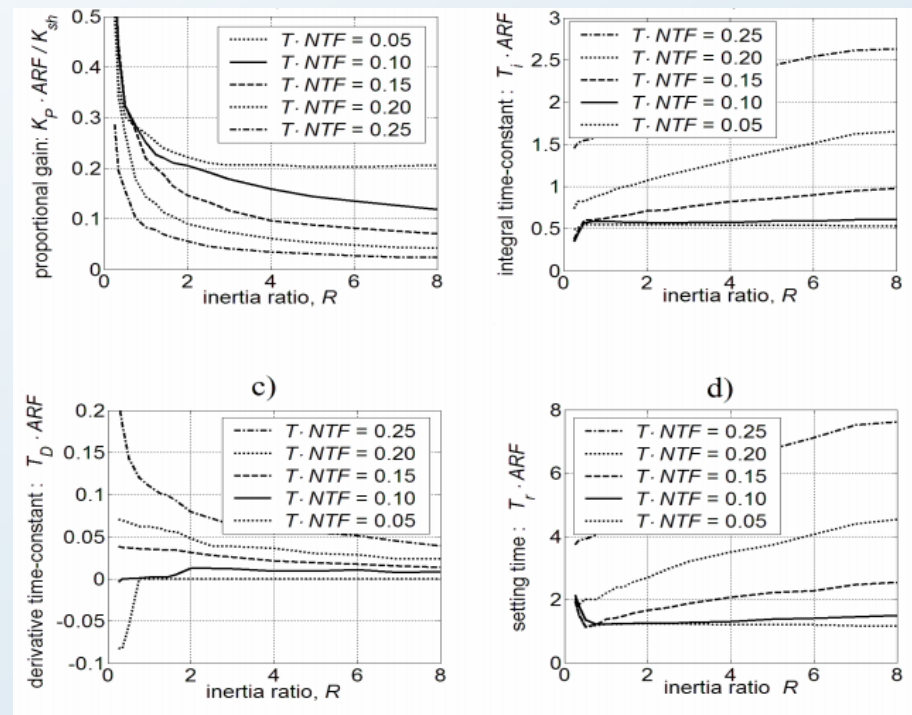
Metody strojenia regulatorów

Nastawy regulatora dobrane wg kryterium symetrii:

$$K_I = \frac{1}{4T_\sigma}$$

$$K_P = \frac{J}{2KT_\sigma}$$

Regulator PID o dwóch stopniach swobody umożliwia niezależne kształtowanie charakterystyk odpowiedzi na skok wartości zadanej i zakłócenia. Dobór nastaw został przeprowadzony na podstawie badań opublikowanych w [1].



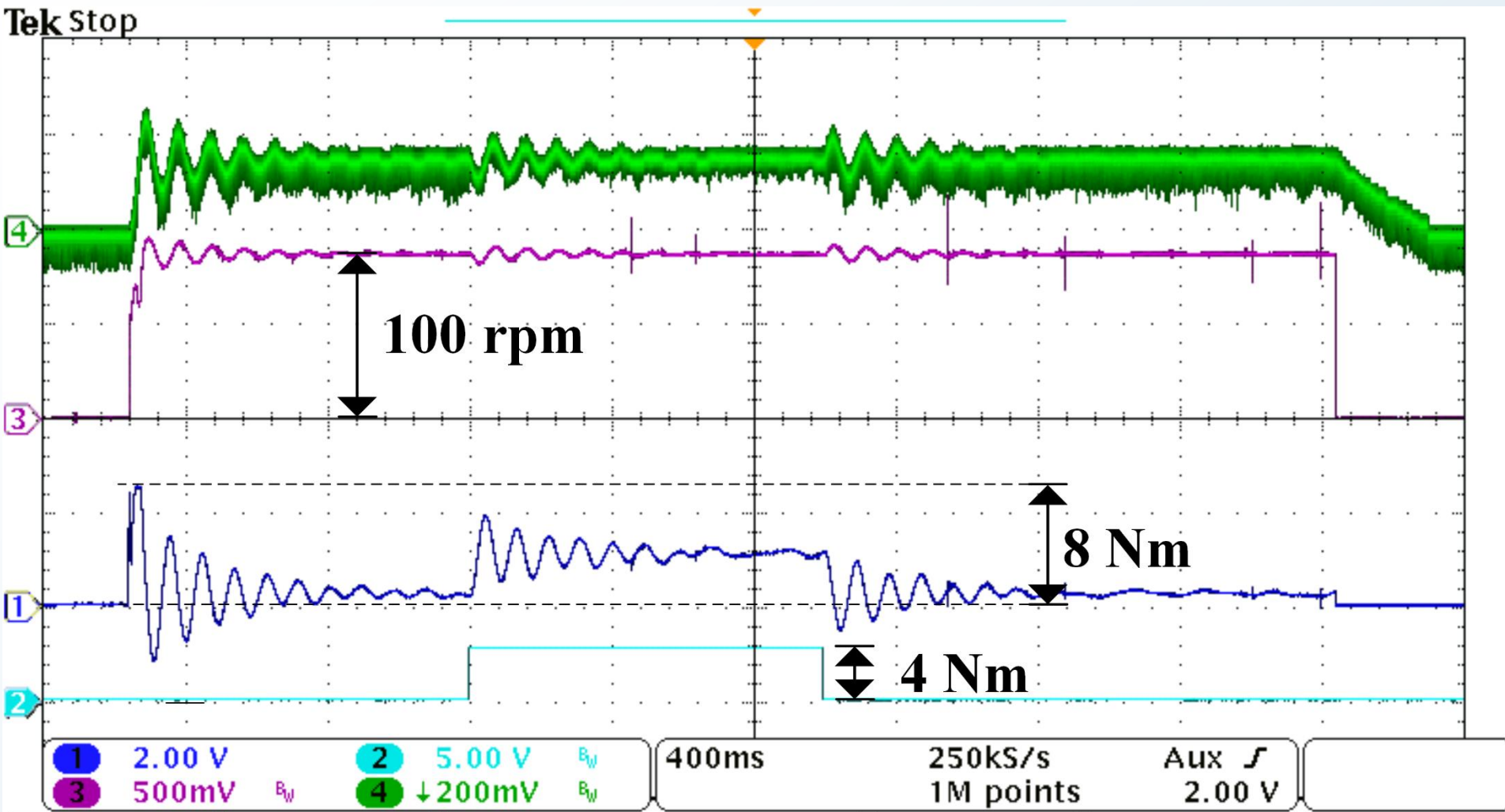
Wskaźniki regulacji

1. Czas regulacji: odstęp czasowy od zadania niezerowej wartości referencyjnej do ograniczenia oscylacji w odpowiedzi układu poniżej poziomu $\pm 5\%$ wartości zadanej.
2. Czas kompensacji zakłócenia: odstęp czasowy od przyłożenia momentu obciążającego po stronie wału przeciwnego do silnika do ograniczenia oscylacji poniżej $\pm 2\%$ wartości zadanej.
3. Przeregulowanie (w procentach względem wartości zadanej)
4. Wskaźnik ITAE uchybu $e(t)$

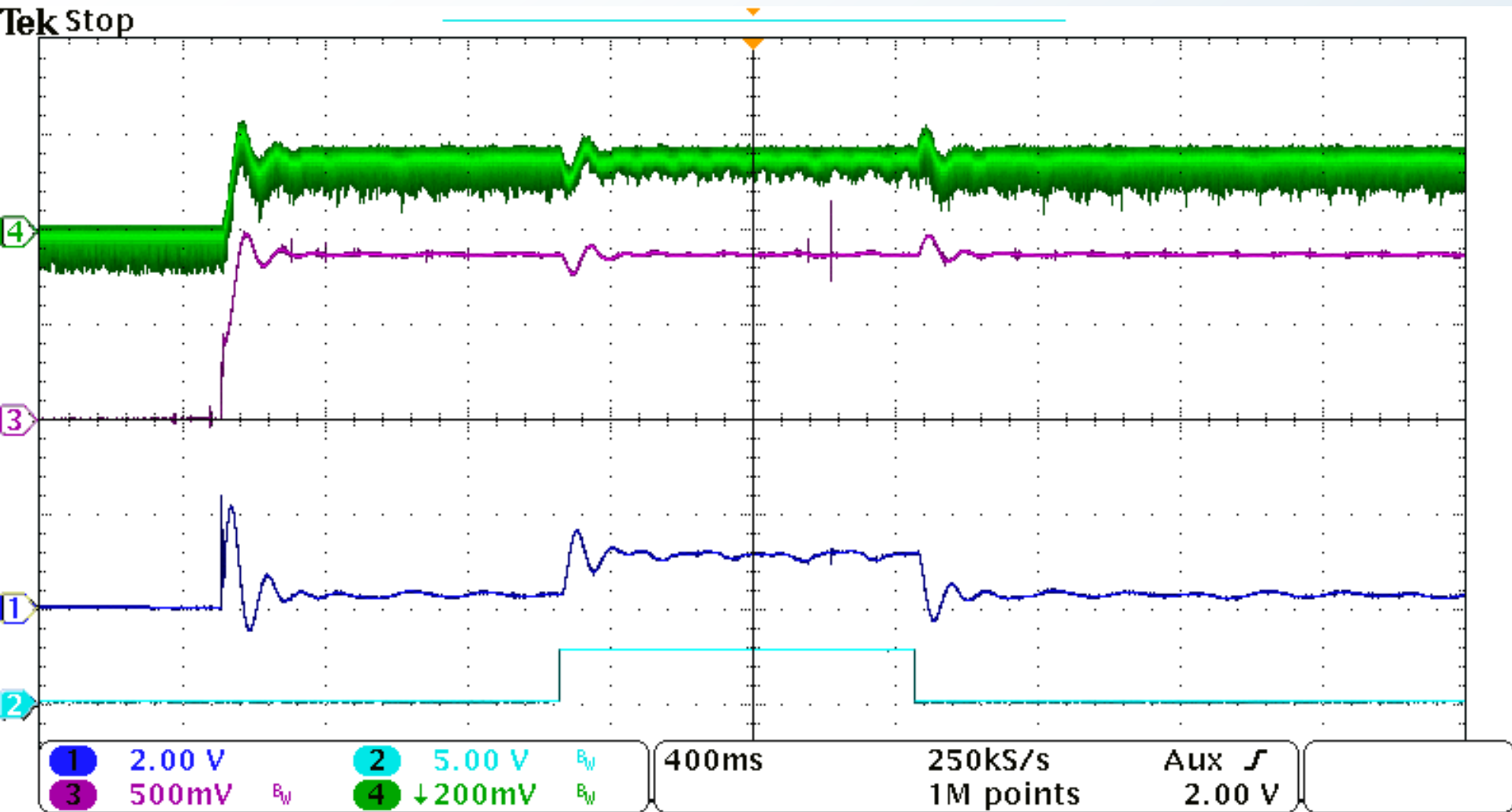
$$ITAE(t) = \int_0^T t \cdot |e(t)| dt$$

Powyższe wskaźniki wyznaczono dla obu stron napędu (strony silnika i obciążenia).

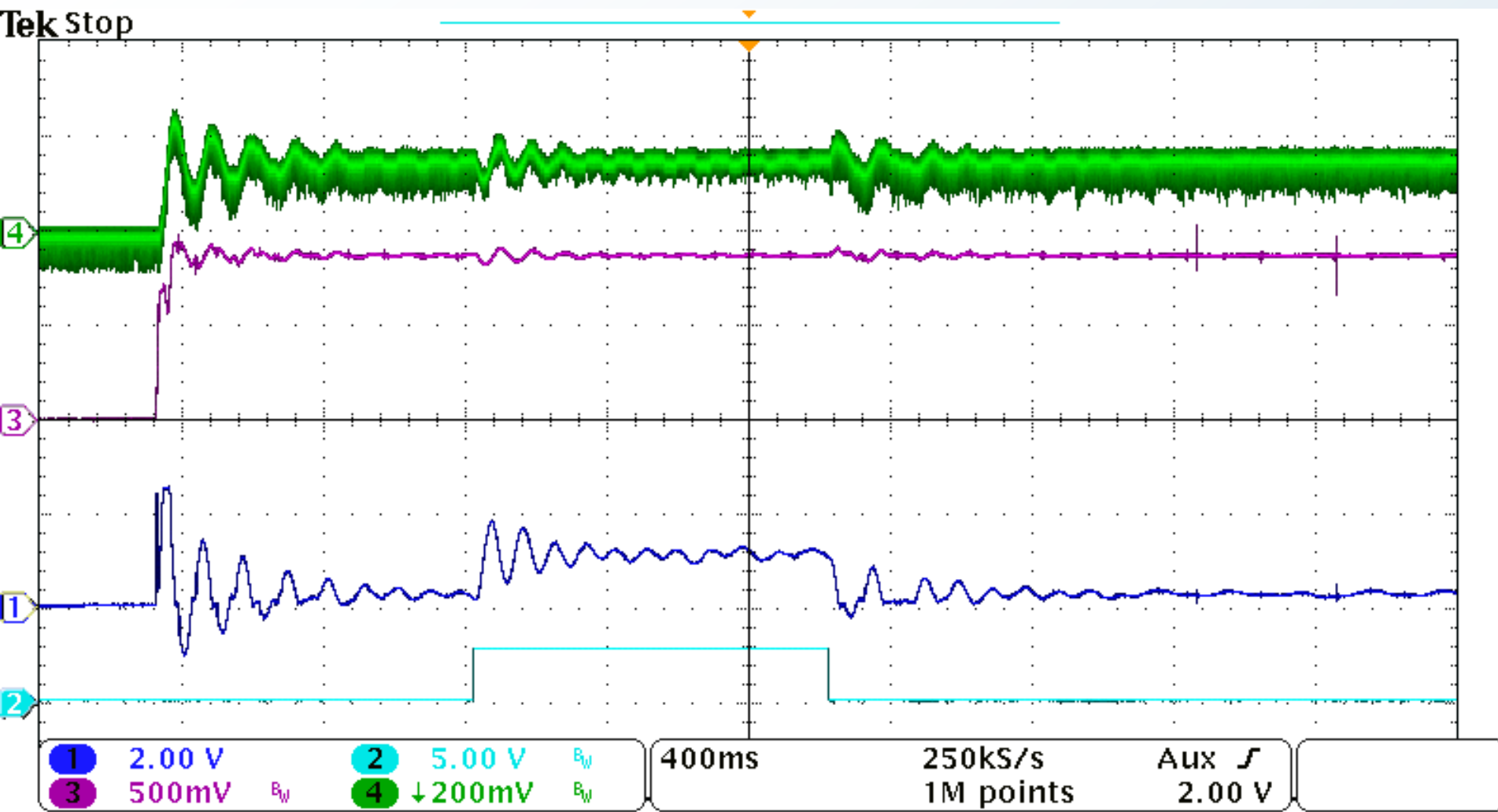
Struktura PI, $\alpha = 0^\circ$, $n_{REF} = 100$ rpm, $J_1/J_2 = 0,27$



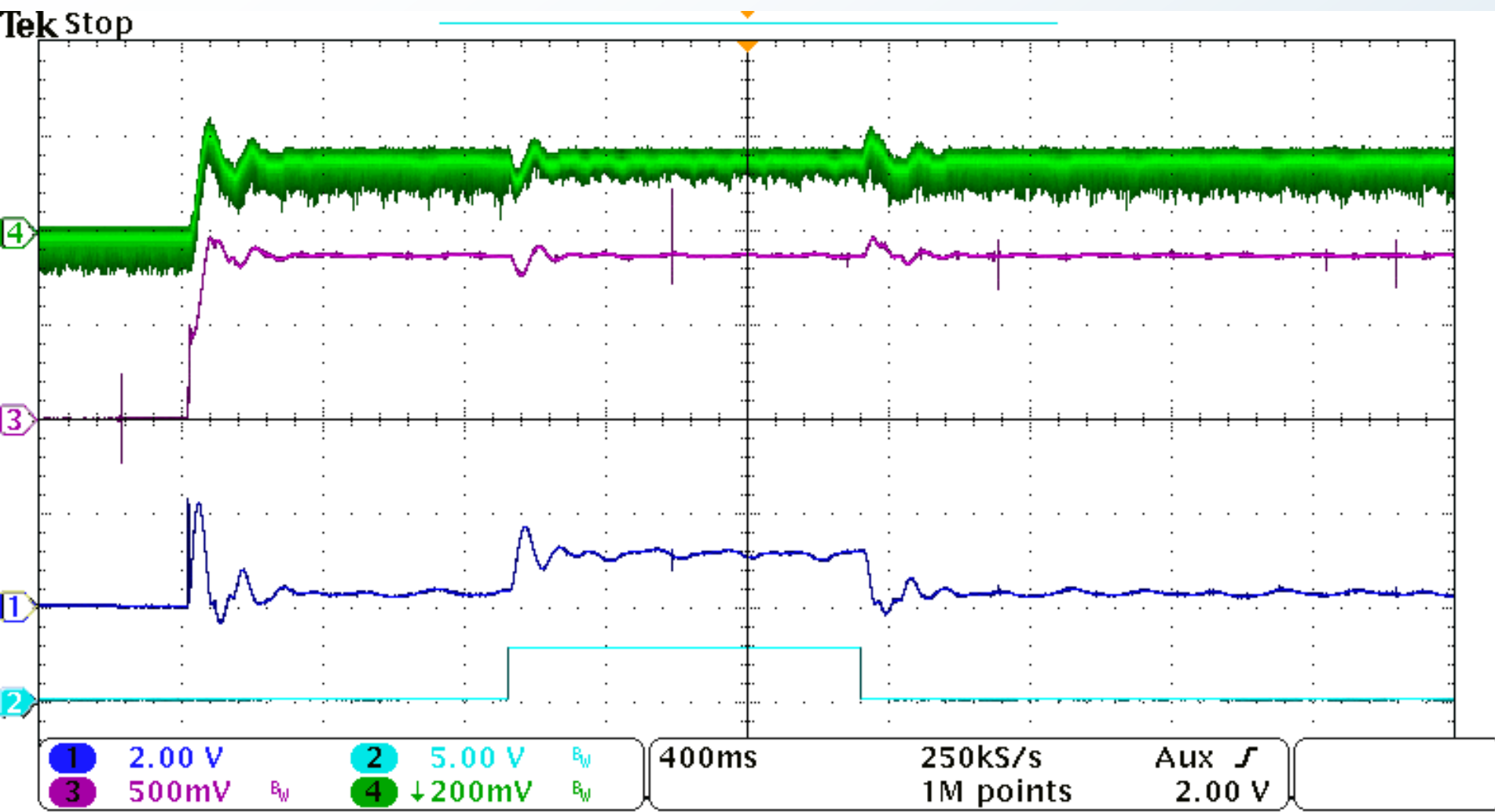
Struktura PI-2DOF, $\alpha = 0^\circ$, $n_{\text{REF}} = 100 \text{ rpm}$, $J_1/J_2 = 0,27$



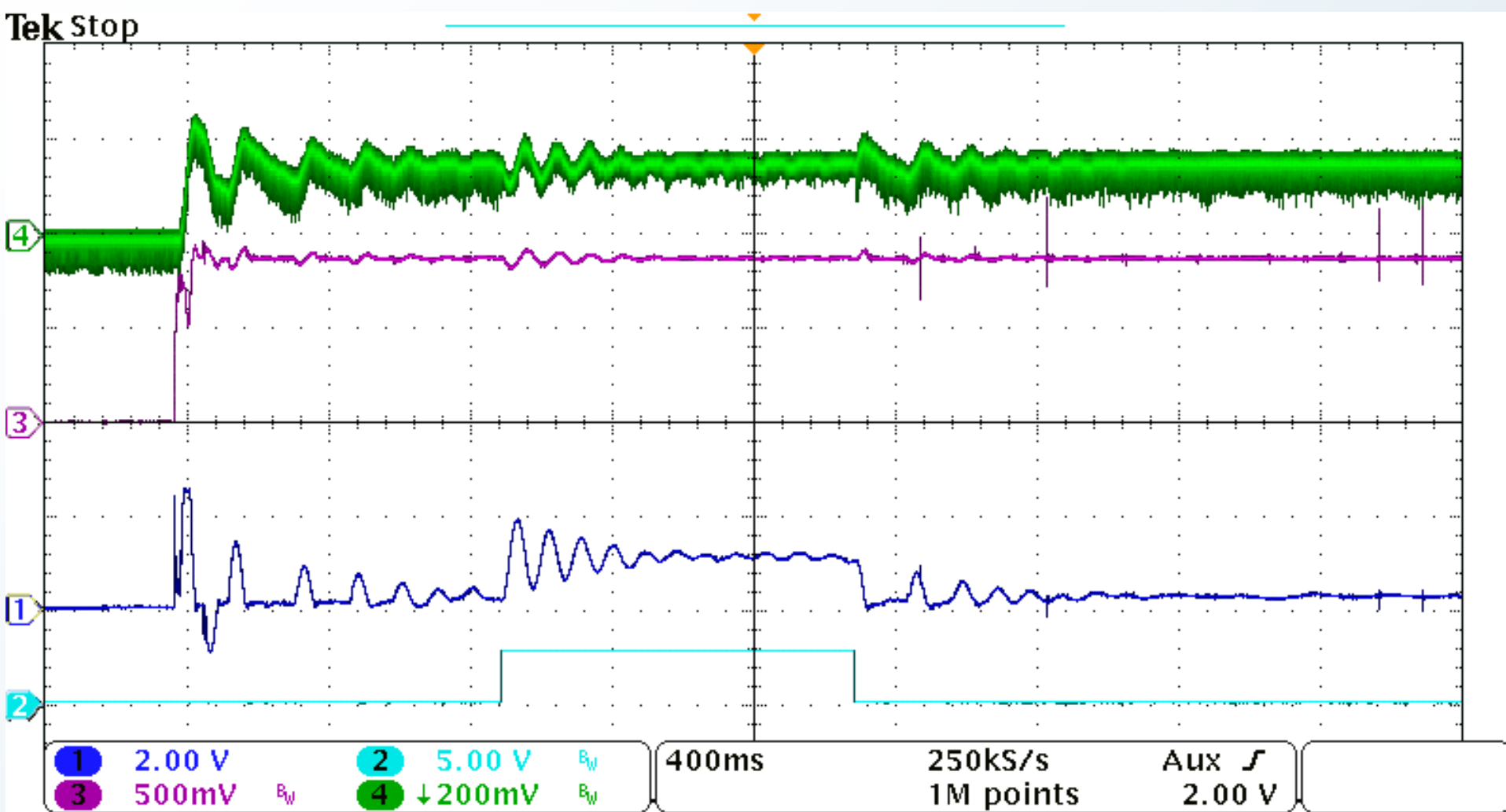
Struktura PI, $\alpha = 1^0$, $n_{REF} = 100$ rpm, $J_1/J_2 = 0,27$



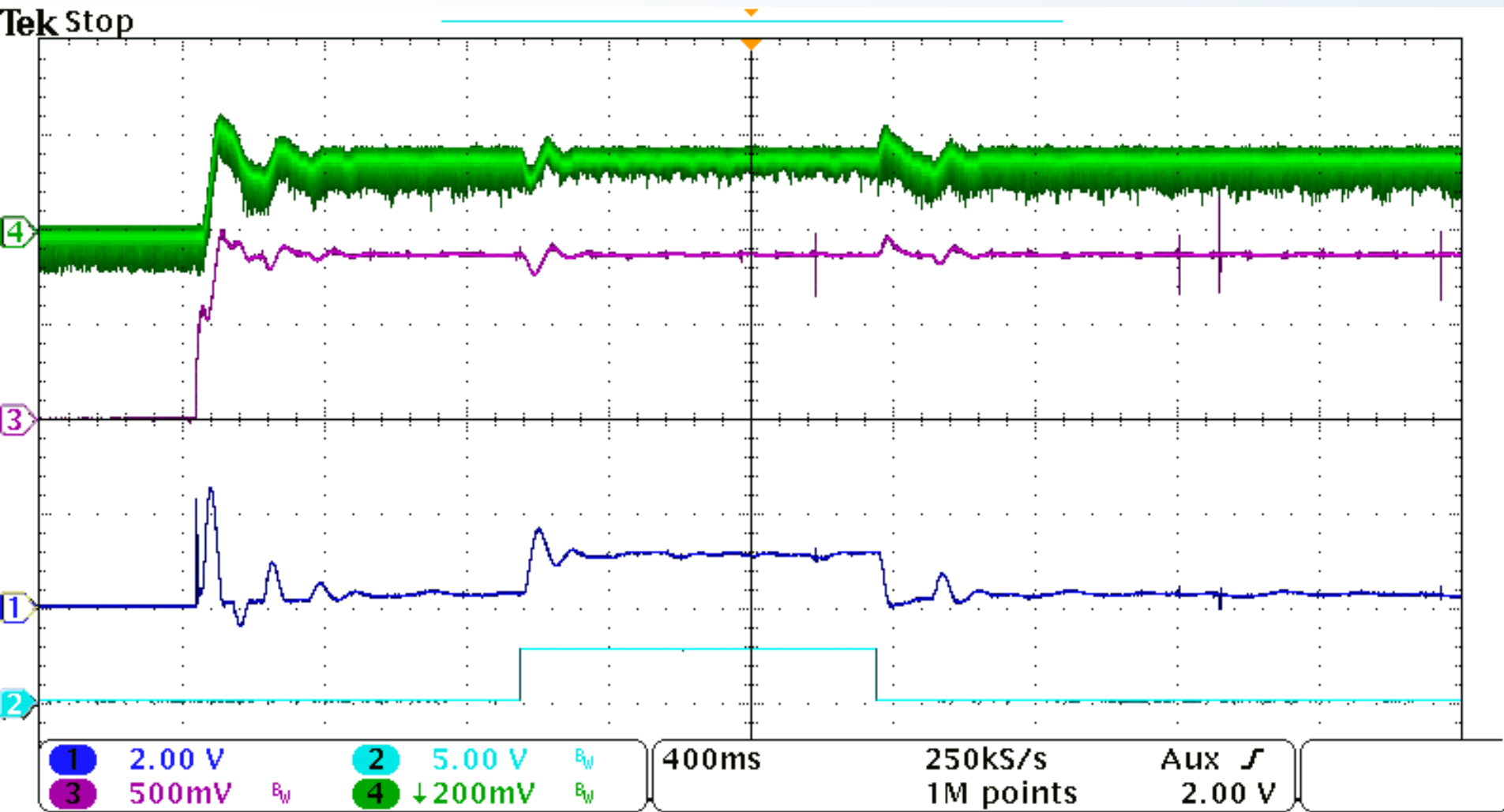
Struktura PI-2DOF, $\alpha = 1^\circ$, $n_{\text{REF}} = 100 \text{ rpm}$, $J_1/J_2 = 0,27$



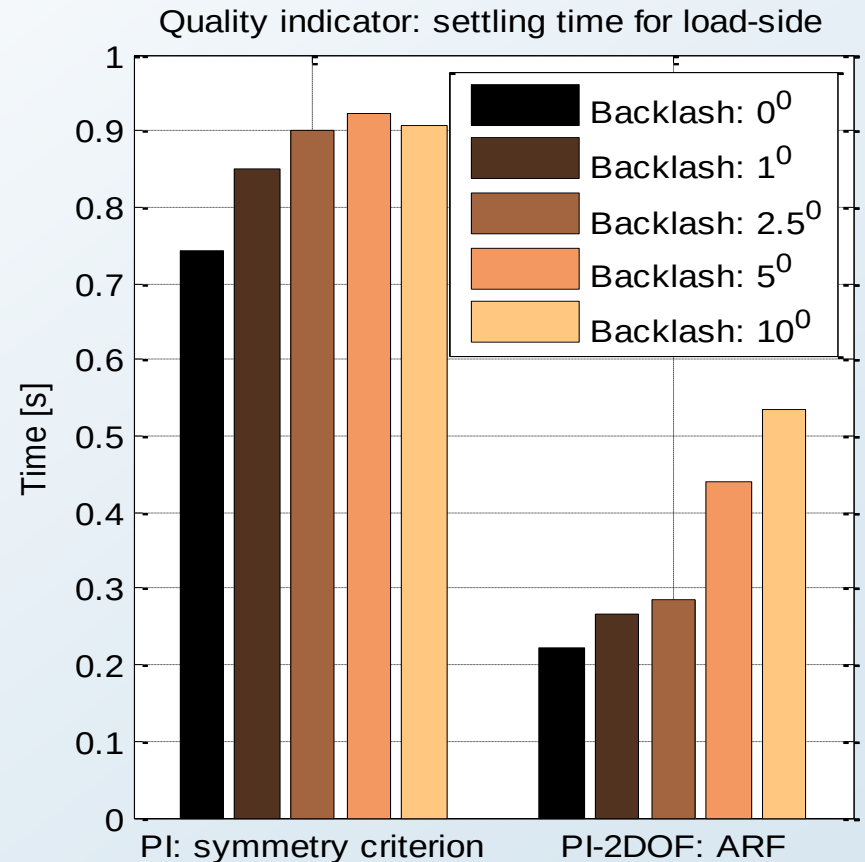
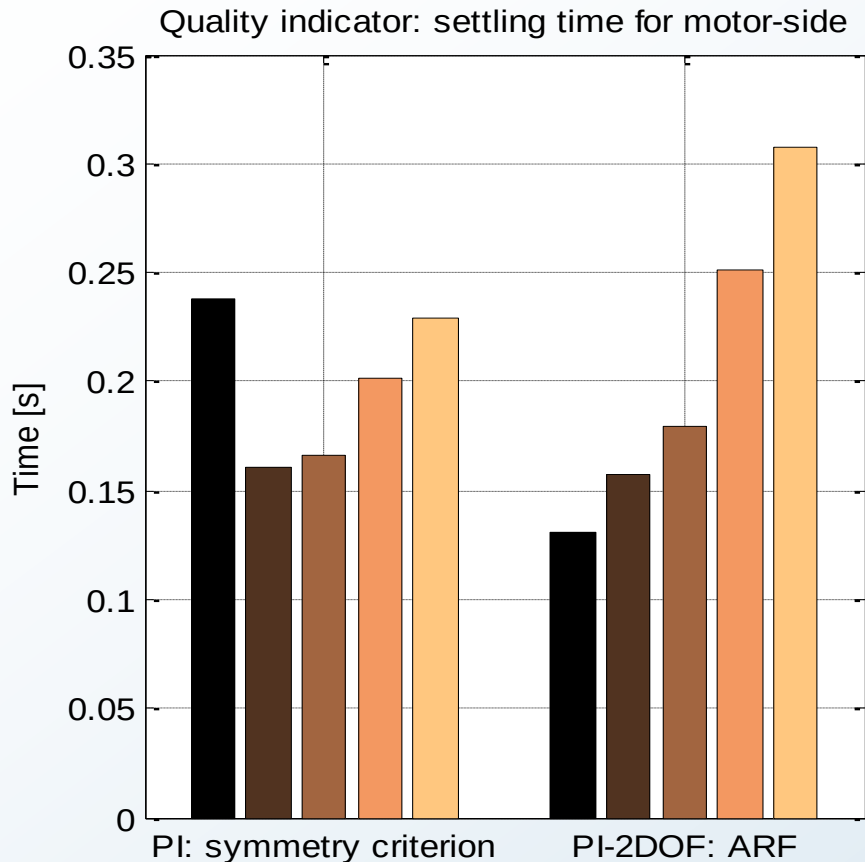
Struktura PI, $\alpha = 5^\circ$, $n_{REF} = 100$ rpm, $J_1/J_2 = 0,27$



Struktura PI-2DOF, $\alpha = 5^\circ$, $n_{\text{REF}} = 100 \text{ rpm}$, $J_1/J_2 = 0,27$

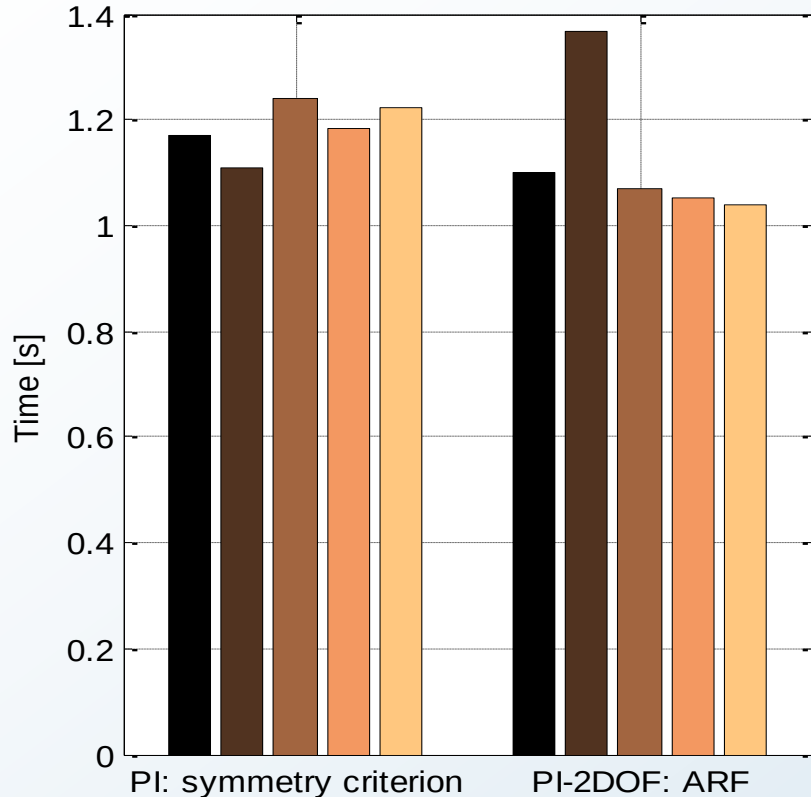


Wartość wskaźnika czasu regulacji (5%)

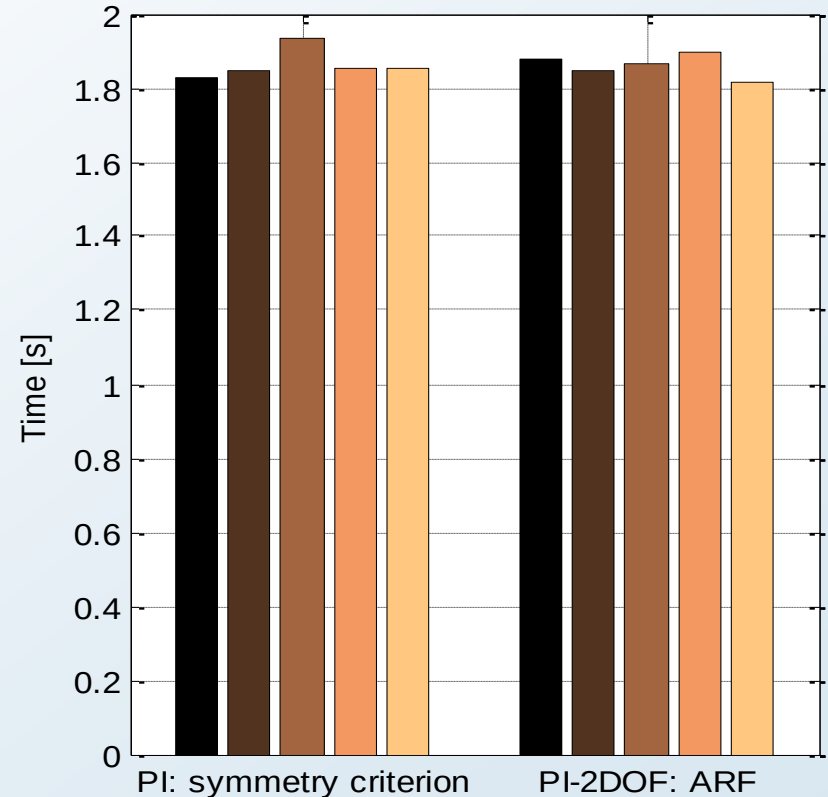


Czas kompensacji zakłócenia (2%)

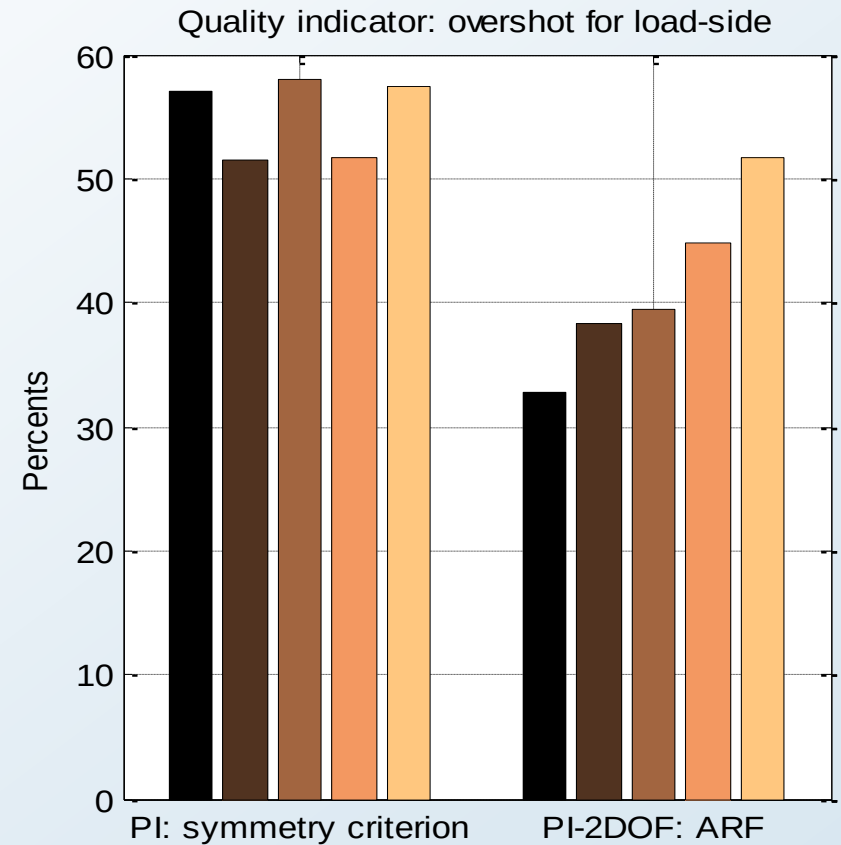
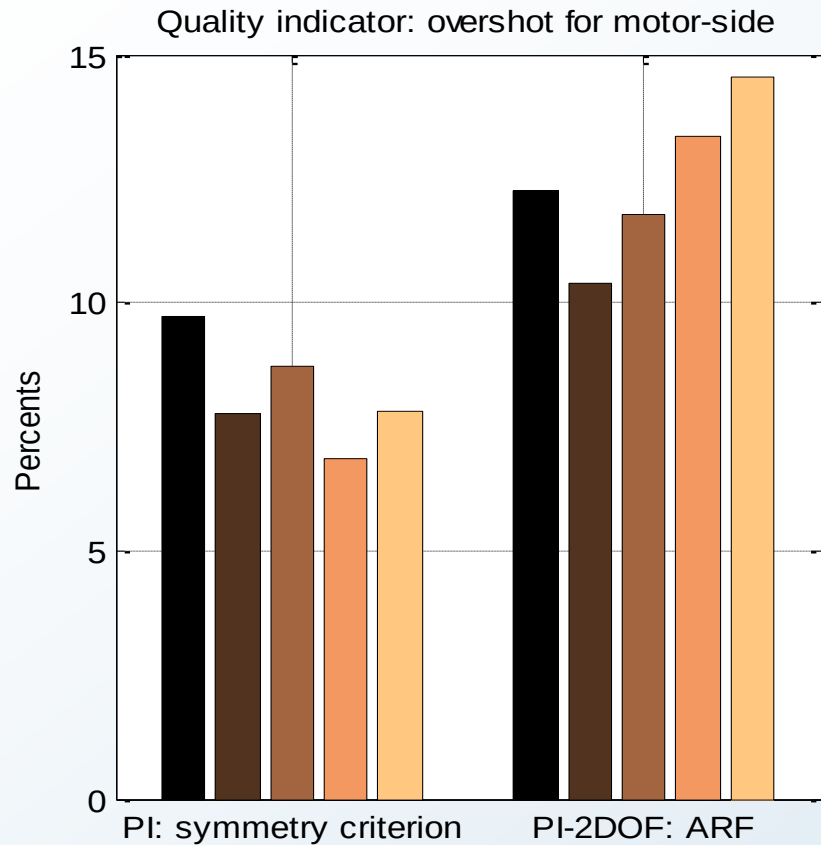
Quality indicator: disturbance compensation for motor-side



Quality indicator: disturbance compensation for load-side

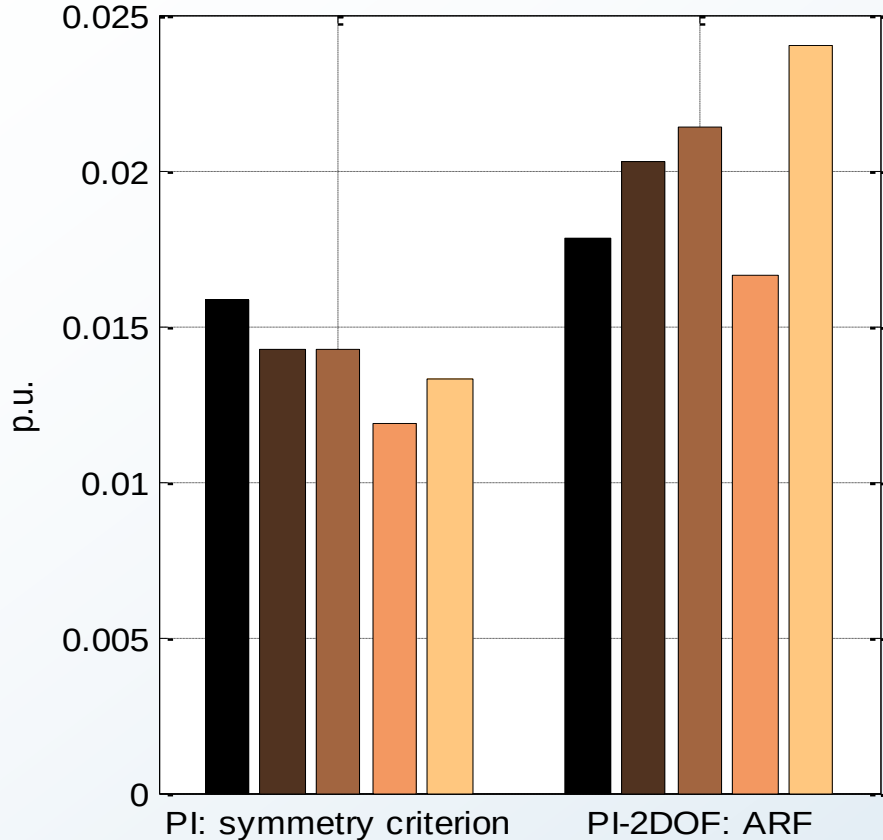


Przeregulowanie po skoku wartości zadanej

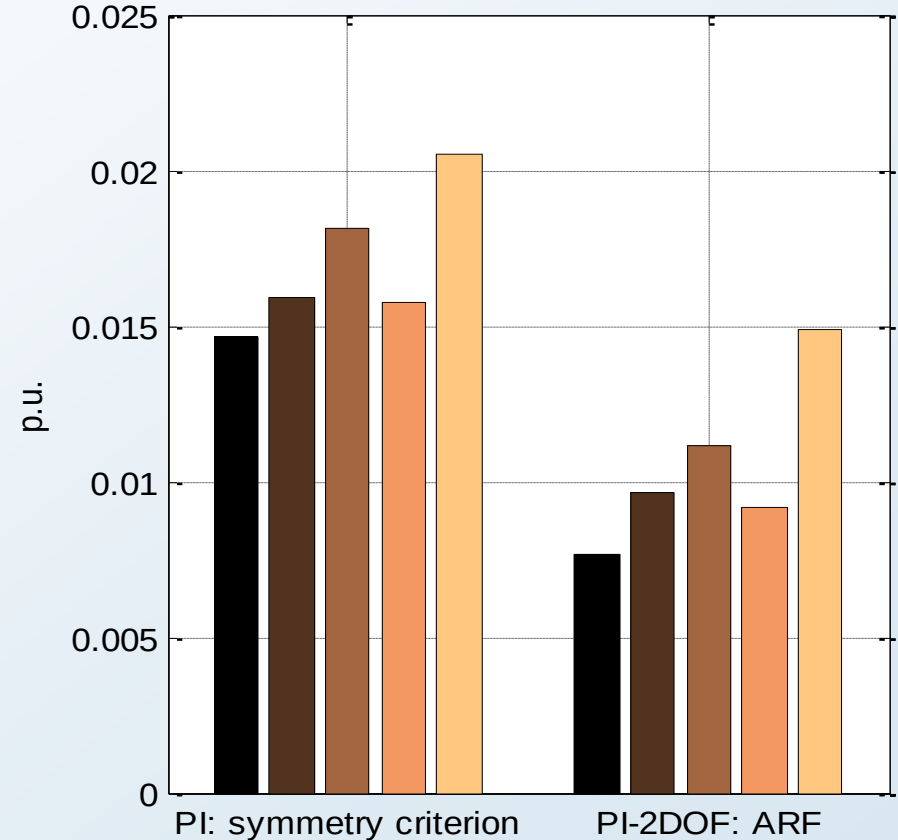


Całka z uchybu pomnożonego czas (ITAE)

Quality indicator: ITAE for motor-side

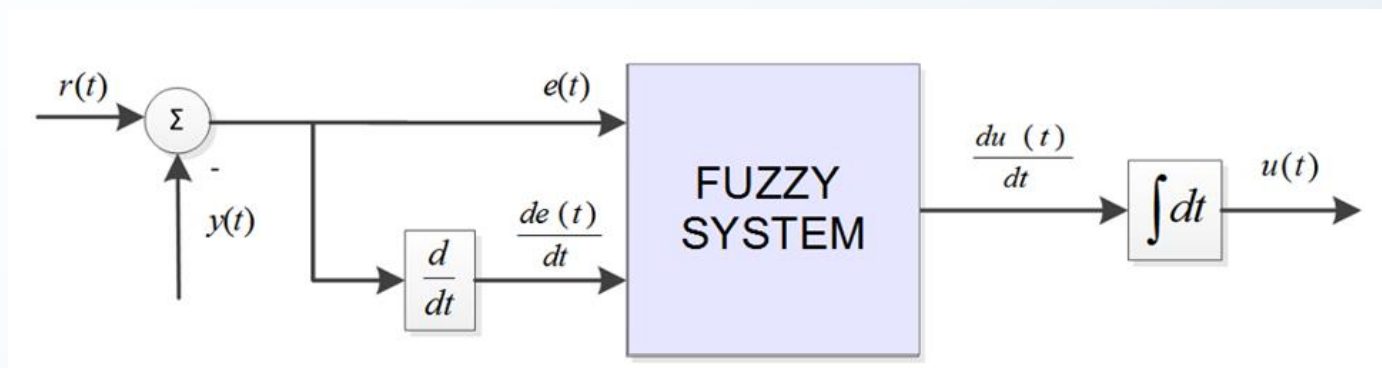


Quality indicator: ITAE for load-side



Regulator rozmyty

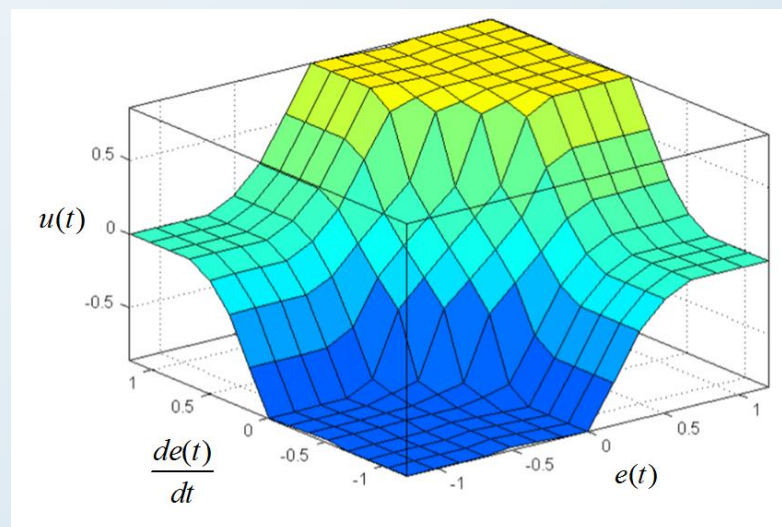
Struktura regulatora



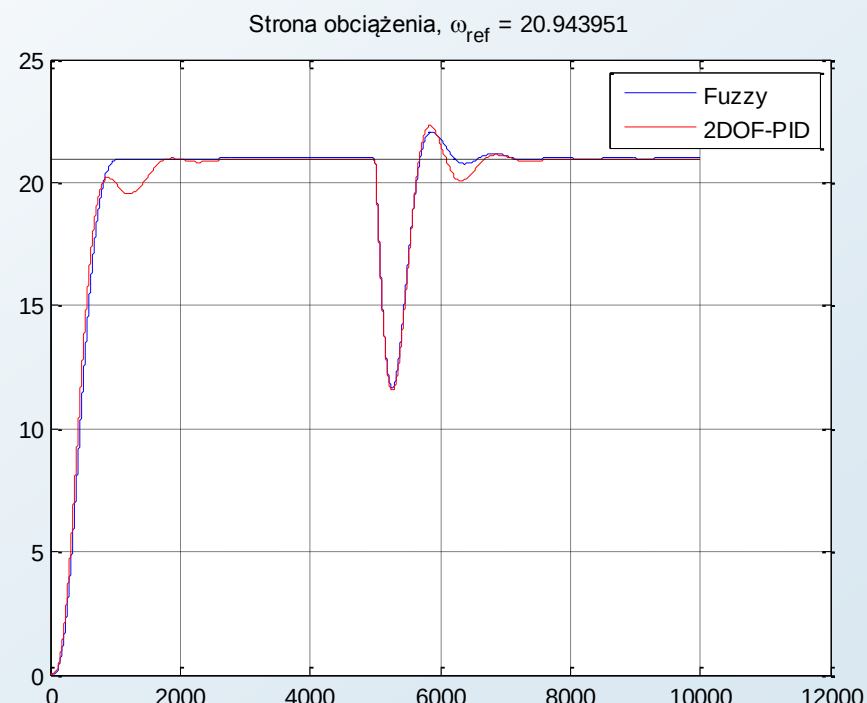
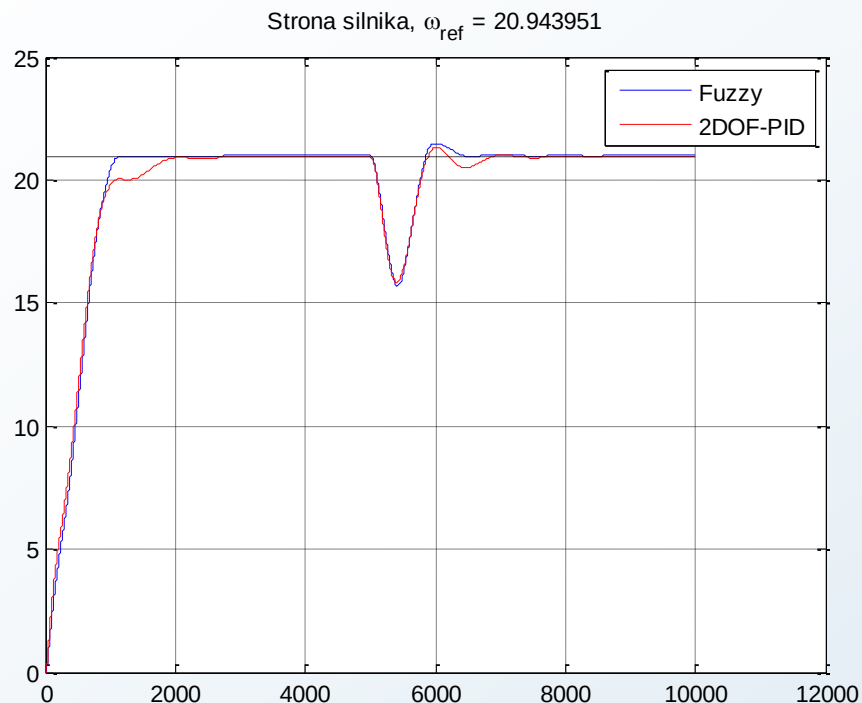
Baza reguł

		$e(t)$						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
$\frac{de(t)}{dt}$	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
	Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

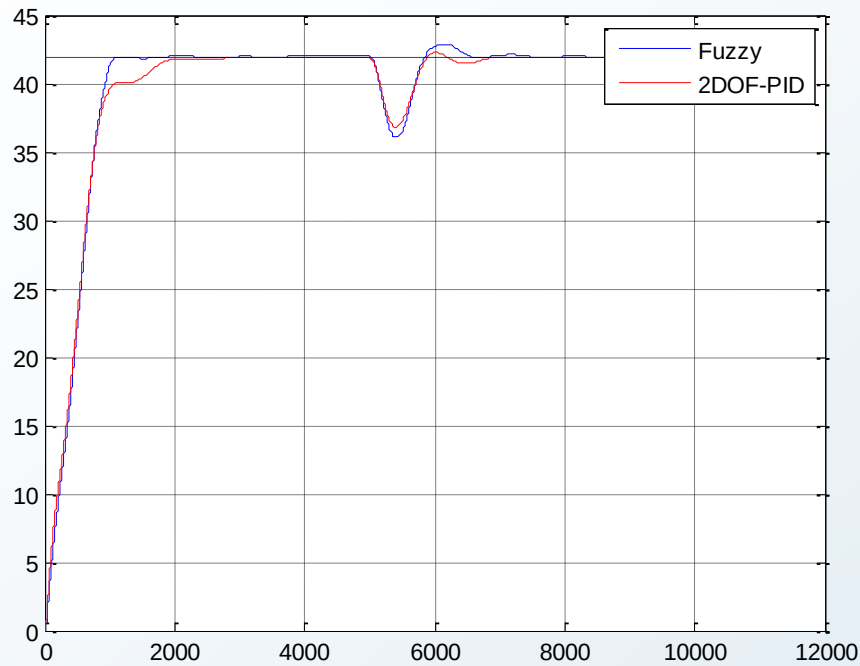
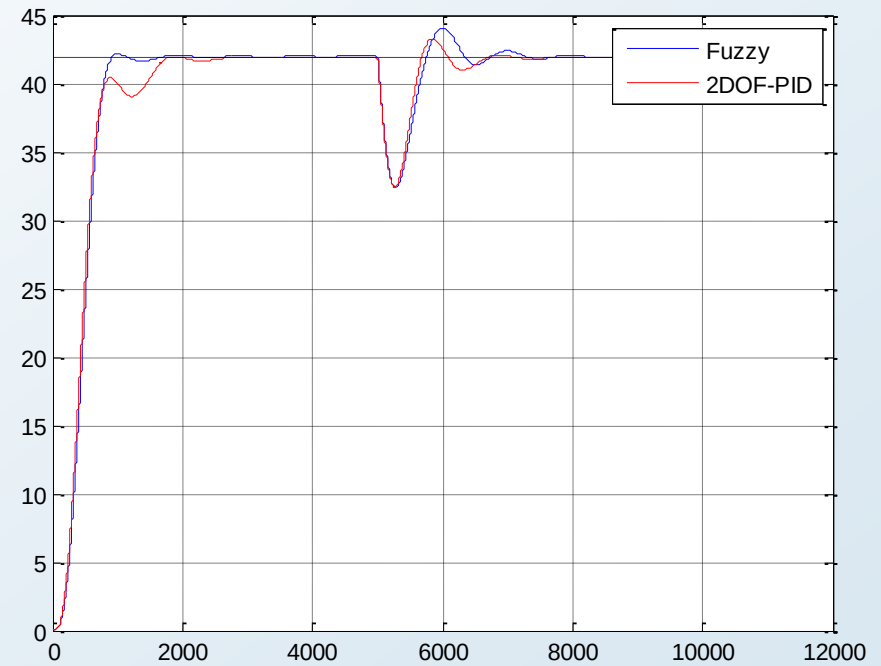
Płaszczyzna sterowania



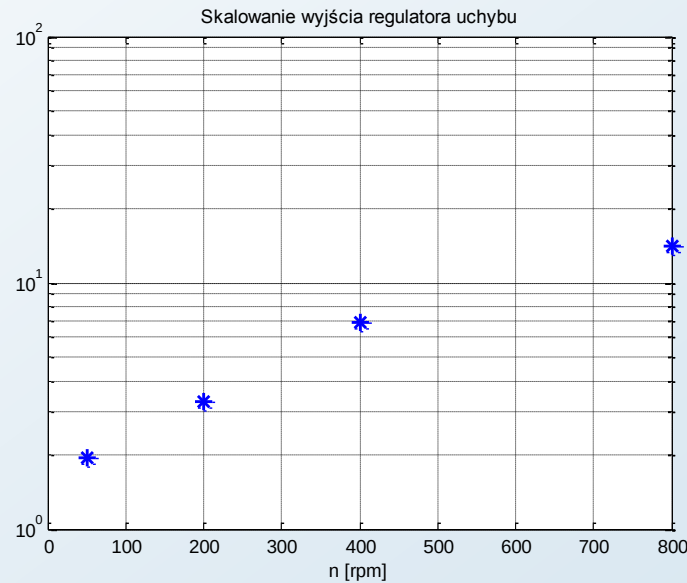
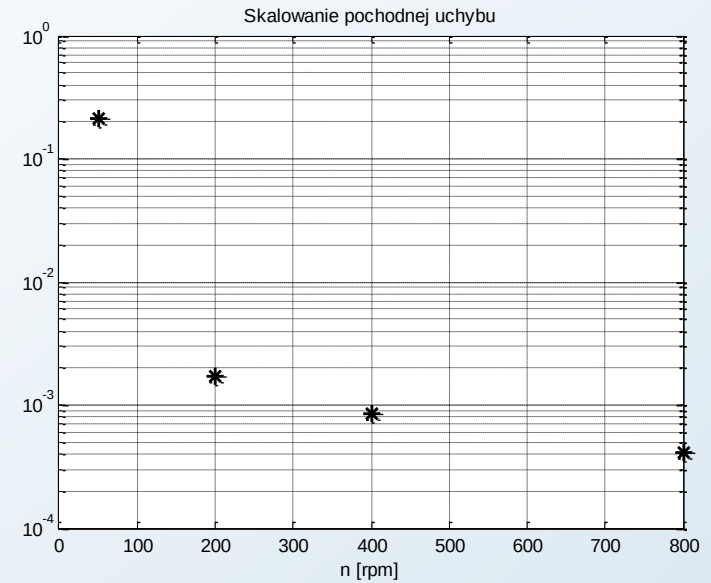
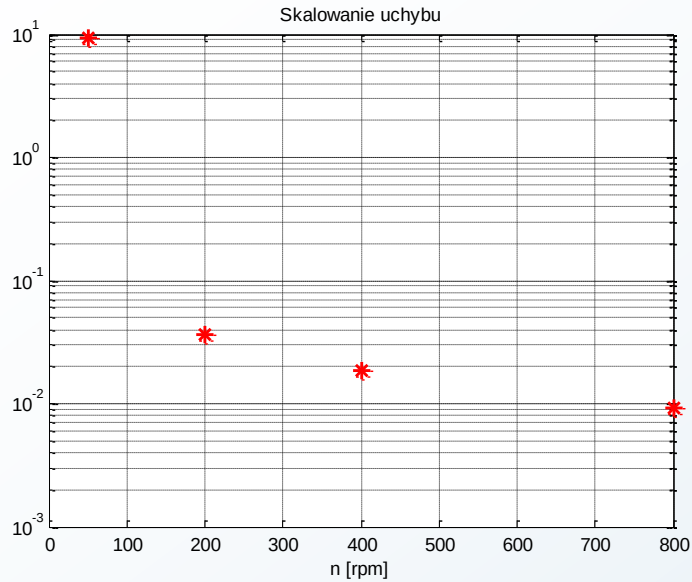
Regulator rozmyty, optymalizacja dla $n_{REF}=200$ rpm



Regulator rozmyty, optymalizacja dla $n_{REF}=400$ rpm

Strona silnika, $\omega_{ref} = 41.887902$ Strona obciążenia, $\omega_{ref} = 41.887902$ 

Zmienność współczynników skalujących



Wnioski

- Wzrost szerokości strefy luzu mechanicznego powoduje obniżenie jakości regulacji.
- Przebadane typy regulatorów wykazywały odmienne tendencje z uwagi na inną strukturę i metody doboru nastaw.
- Regulator PI nastrojony wg kryterium symetrii charakteryzował się lepszymi wskaźnikami regulacji po stronie silnika.
- Regulator PI-2DOF wykazywał lepsze właściwości sterowania dla strony oddziaływania momentu obciążenia.
- Wskaźnik czasu kompensacji zakłócenia wykazuje pomijalną wrażliwość na szerokość strefy luzu mechanicznego.
- Ze względu na to, że w rzeczywistych układach jakość regulacji jest istotniejsza po stronie występowania momentu obciążającego, rekomendowaną strukturą regulacji jest układ PID-2DOF.