



**PROJEKT**

**Kaskadowa struktura regulacji  
napędu prądu stałego**

**Autorzy:**  
Jakub Sala  
Bartłomiej Dyląg

# Spis treści

<b>1. Cel projektu</b>	<b>3</b>
<b>2. Wstęp teoretyczny</b>	<b>3</b>
2.1. Zasada działania silnika obcowzbudnego	3
2.2. Model matematyczny silnika obcowzbudnego	4
2.3. Idea kaskadowej regulacji	5
<b>3. Model matematyczny napędu (silnika)</b>	<b>5</b>
3.1. Dane znamionowe silnika	5
3.2. Transmittancje silnika obcowzbudnego	6
3.3. Ograniczenia zmiennych stanu	7
3.4. Odpowiedzi skokowe modelu silnika	7
3.5. Podsumowanie	9
<b>4. Wyznaczenie parametrów regulatorów</b>	<b>10</b>
4.1. Założenia przyjęte przy doborze regulatora prądu:	10
4.2. Dobór parametrów regulatora prądu (regulator PI) przy wykorzystaniu kryterium modułowego	10
4.3. Założenia przyjęte przy doborze regulatora prędkości:	12
4.4. Dobór parametrów regulatora prędkości (regulator typu P)	12
4.5. Dobór parametrów regulatora prędkości (regulator typu PI) przy wykorzystaniu kryterium symetrycznego	13
4.6. Podsumowanie	15
<b>5. Wyznaczenie zapasu modułu i fazy za pomocą charakterystyk bodego i nyquista</b>	<b>16</b>
5.1. Układ z regulatorem P ze statyzmem 2%	16
5.2. Układ z regulatorem P ze statyzmem 5%	17
5.3. Układ z regulatorem PI	19
5.4. Podsumowanie	20
<b>6. Symulacje rozruchu w programie simulink</b>	<b>21</b>
6.1. Rozruch bez momentu obciążenia i obciążenie udarowe	21
6.2. Rozruch ze znamionowym momentem czynnym	23
6.3. Rozruch ze znamionowym momentem biernym	25
6.4. Podsumowanie	27

# 1. Cel projektu

Celem projektu jest:

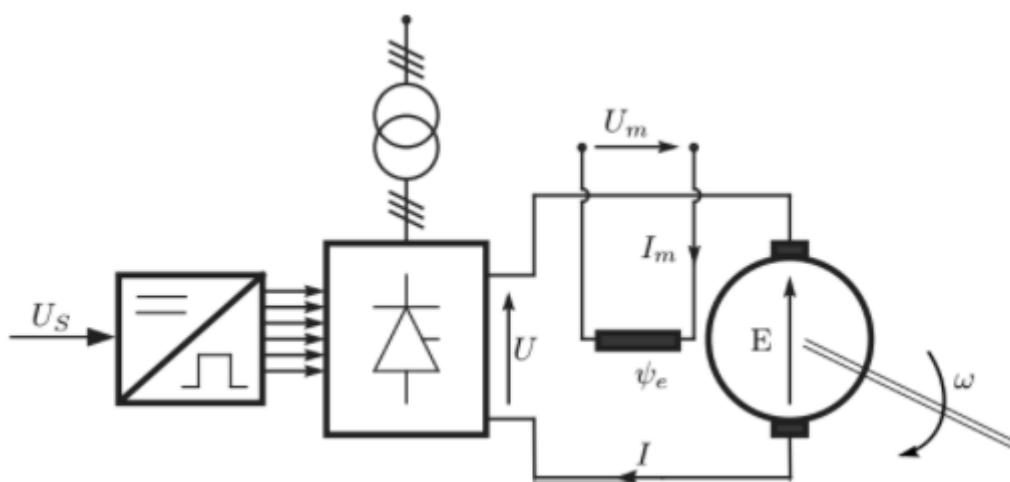
- wyznaczenie transmitancji silnika prądu stałego (obcowzbudnego) dla podanych parametrów silnika oraz zbadanie odpowiedzi skokowej prądu twornika  $I$ , pochodnej prądu twornika  $\frac{dI}{dt}$  oraz prędkości kątowej  $\omega$
- określenie zasadności stosowania kaskadowej struktury regulacji
- wyznaczenie transmitancji kaskadowej struktury układu regulacji napędu prądu stałego
  - wyznaczenie nastaw regulatora prędkości i prądu, w oparciu o odpowiednie kryteria: symetryczne oraz modułowego
  - zbadanie stabilności układu z uwzględnieniem wyznaczonych regulatorów
- symulacyjne zbadanie zachowania układu dla kaskadowej struktury regulacji z zastosowaniem środowiska simulink

## 2. Wstęp teoretyczny

### 2.1. Zasada działania silnika obcowzbudnego

Silniki prądu stałego swoją popularność zawdzięczają w sporej mierze swojej nieskomplikowanej budowie, co przekłada się na prosty model matematyczny, a więc również stosunkowo prosty układ sterowania.

Aby włączyć silnik obcowzbudny potrzeba go wzbudzić, czyli podać napięcie na uzwojenie wzbudzenia z niezależnego źródła zasilania. Wówczas w uzwojeniu zaczyna płynąć prąd wytwarzający strumień. Następnie wykonujemy rozruch poprzez podanie napięcia na uzwojenie twornika.



Rys. 1 Schemat napędu elektrycznego z obcowzbudnym silnikiem prądu stałego

W silniku obcowzbudnym sterowanie prędkością jest możliwe w szerokich zakresach, a sam proces regulacji można przeprowadzić się na dwa sposoby:

- regulując strumień magnetyczny (prąd wzbudzenia) - odbywa się przy stałej wartości napięcia twornika
- regulując siłę elektromotoryczną poprzez zmianę napięcia na zaciskach twornika - częściej stosowane, odbywa się przy stałym strumieniu magnesów

## 2.2. Model matematyczny silnika obcowzbudnego

Model matematyczny silnika obcowzbudnego wraz z modelem zasilającego wzmacniacza mocy możemy opisać za pomocą równań stanu:

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}(t) \\ \dot{I}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \psi_{eN}/J \\ -\psi_{eN}/L & -1/T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/J & 0 \\ 0 & K_p/L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_m(t) \\ U_s(t) \end{pmatrix}$$

gdzie:

$\psi_{eN}$  - znamionowy strumień skojarzony rotacyjnie z uzwojeniem twornika,

L - indukcyjność całkowita,

J - moment bezwładności napędu i agregatu technologicznego,

T - elektromagnetyczna stała czasowa,

$\omega$  - prędkość obrotowa silnika,

I - prąd twornika,

$K_p$  - wzmocnienie wzmacniacza mocy,

$M_m$  - moment obciążenia,

$U_s$  - napięcie sterujące wzmacniaczem mocy.

Inne oznaczenia wykorzystane w projekcie:

$U_N$  - napięcie znamionowe zasilania uzwojenia twornika,

$I_N$  - znamionowy prąd twornika,

$M_N$  - znamionowy moment obciążenia,

$\omega_0$  - prędkość idealnego biegu jałowego,

B - elektromechaniczna stała czasowa silnika.

## 2.3. Idea kaskadowej regulacji

Kaskadowa regulacja w silniku obcowzbudnym polegać będzie na podzieleniu jego obiektu sterowania, przez co regulacja silnika odbywać się będzie za pomocą dwóch regulatorów:

- podrzędnego regulatora prądu twornika
- nadrzędnego regulatora prędkości obrotowej silnika

Istotą idei kaskadowej regulacji jest podział odpowiedzi układu na dwie wielkości  $\omega(t)$  oraz  $i(t)$ , które mają odpowiednio dłuższy i krótszy czas odpowiedzi. Odpowiedź skokowa prądu jest zależna od małej stałej czasowej układu elektrycznego twornika. Dysponując pomiarem prądu można odpowiednio szybko reagować na zmiany jej wartości. Co umożliwia:

- polepszenie parametrów sterowania wartością prądu
  - zmniejszyć czas ustalania
  - zmniejszyć przesterowania
- dodanie elementów nasycających się - uwzględniających wartości krytyczne
- zmniejszyć wpływ prędkości obrotowej na wartość prądu, w stanach przejściowych, (np. podczas rozruchu) pozwoli to na utrzymywanie prądu na wyższym poziomie
- zmniejszyć wpływ zakłóceń na wartość prądu, np spadki napięć zasilający przekształtnik (kompensowanie zakłóceń)

### 3. Model matematyczny napędu (silnika)

#### 3.1. Dane znamionowe silnika

Moc:  $P_N = 17 [kW]$

Prędkość obrotowa:  $n_N = 1500 [obr/min]$

Napięcie twornika:  $U_N = 220 [V]$

Prąd twornika:  $I_N = 88 [A]$

Moment bezwładności wirnika:  $J_s = 0.275 [kgm^2]$

Rezystancja twornika:  $R_t = 0.15 [\Omega]$

Indukcyjność twornika:  $L_t = 18.75 [mH]$

Prędkość kątowna:  $\omega_N = n_N \frac{2\pi}{60} = 1500 * 2\pi/60 = 157.08 [rad/s]$

Strumień wzbudzenia:  $\psi_{eN} = \frac{U_N - R_t I_N}{\omega_N} = \frac{220 - 0.15 * 88}{157.08} = 1.32 [Wb]$

Moment obciążenia:  $M_N = \psi_{eN} I_N = 1.32 * 88 = 116.2 [Nm]$

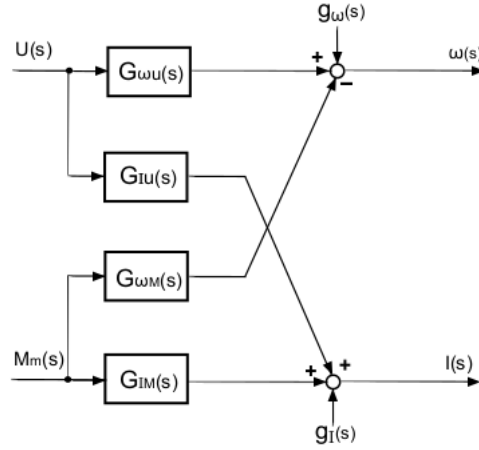
Moment bezwładności obciążenia:  $J_o = 10 J_s$

Moment bezwładności całego napędu:  $J = J_s + J_{RB} = J_s + 10 * J_s = 3.025 [kgm^2]$

Oraz przyjęto następujące współczynniki:

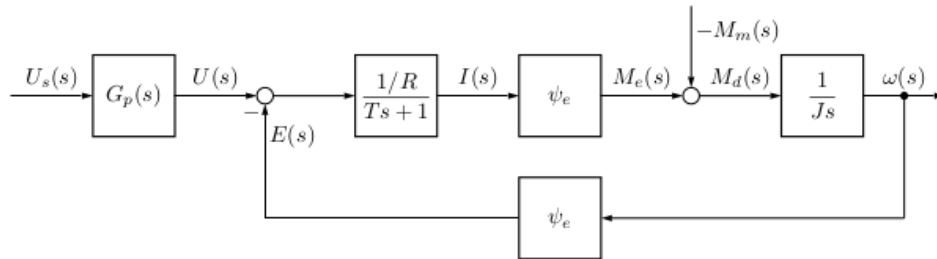
$$\lambda_N = 2, p = 50$$

### 3.2 Transmitancje silnika obcowzbudnego



rys. 2 Schemat blokowy silnika obcowzbudnego

Powyższy schemat ideowy możemy przekształcić do postaci wygodniejszej przy obliczaniu poszczególnych transmitancji:



rys. 3 Schemat blokowy napędu prądu stałego,  
gdzie  $G_p(s)$  jest transmitancją przekształtnika tyrystorowego

Poszczególne transmitancje dla przyjętych parametrów wynoszą:

$$G_{\omega U}(s) \Big|_{M_m=0} = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{\psi_e}}{BTs^2 + Bs + 1} = \frac{0.7576}{0.030s^2 + 0.0237s + 1}$$

$$G_{\omega M}(s) \Big|_{U=0} = \frac{\omega(s)}{M_m(s)} = \frac{\frac{R}{\psi_e^2}(Ts+1)}{BTs^2 + Bs + 1} = \frac{0.0854(0.125s+1)}{0.030s^2 + 0.0237s + 1}$$

$$G_{IU}(s) \Big|_{M_m=0} = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{B}{R}s}{BTs^2 + Bs + 1} = \frac{1.578s}{0.030s^2 + 0.0237s + 1}$$

$$G_{IM}(s) \Big|_{U=0} = \frac{I(s)}{M_m(s)} = \frac{\frac{1}{\psi_e}}{BTs^2 + Bs + 1} = \frac{0.759}{0.030s^2 + 0.0237s + 1}$$

gdzie:

$$B = J \frac{R_t}{\Psi_{eN}^2} = 3,025 * \frac{0.15}{1.32^2} = 0,2618 \text{ s}$$

$$T = \frac{L_t}{R_t} = \frac{0.01875}{0.15} = 0,125 \text{ s}$$

### 3.3 Ograniczenia zmiennych stanu

Ograniczenie wartości prądu:

$$|I(t)| \leq I_d = \lambda_N I_N = 2 \cdot 88 = 176 \text{ A}$$

$$|\frac{dI(t)}{dt}| \leq p I_N = 50 \cdot 88 = 4400 \frac{\text{A}}{\text{s}},$$

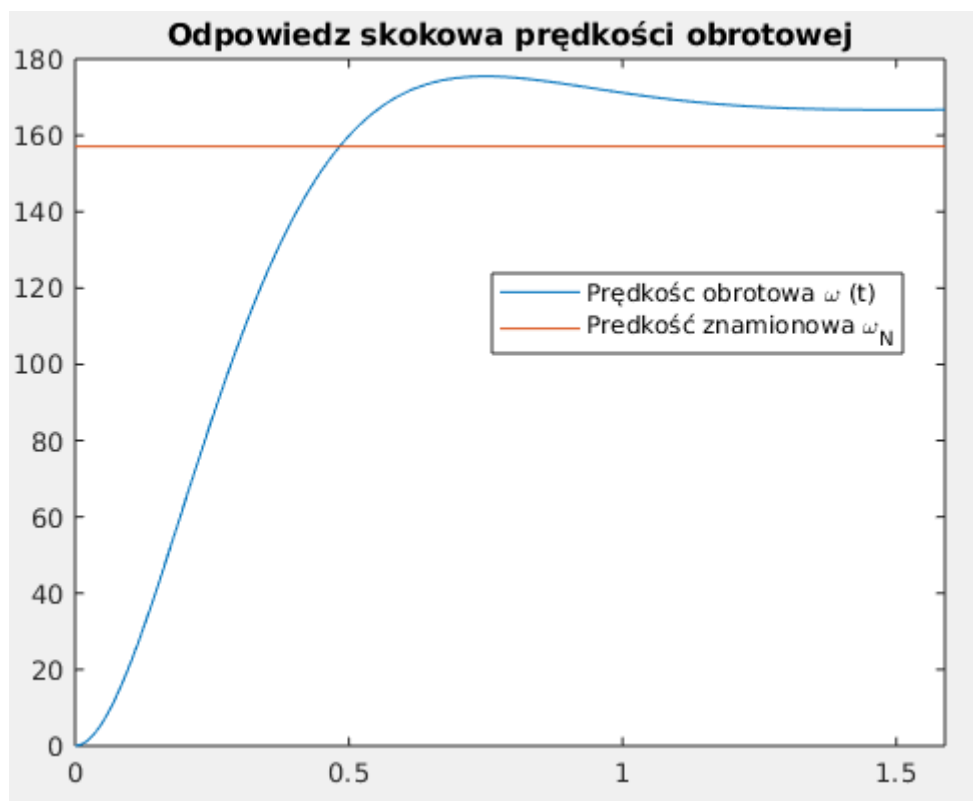
gdzie p - dopuszczalna krotność prądu znamionowego w czasie 1 sekundy.

Ograniczenie prędkości obrotowej silnika:

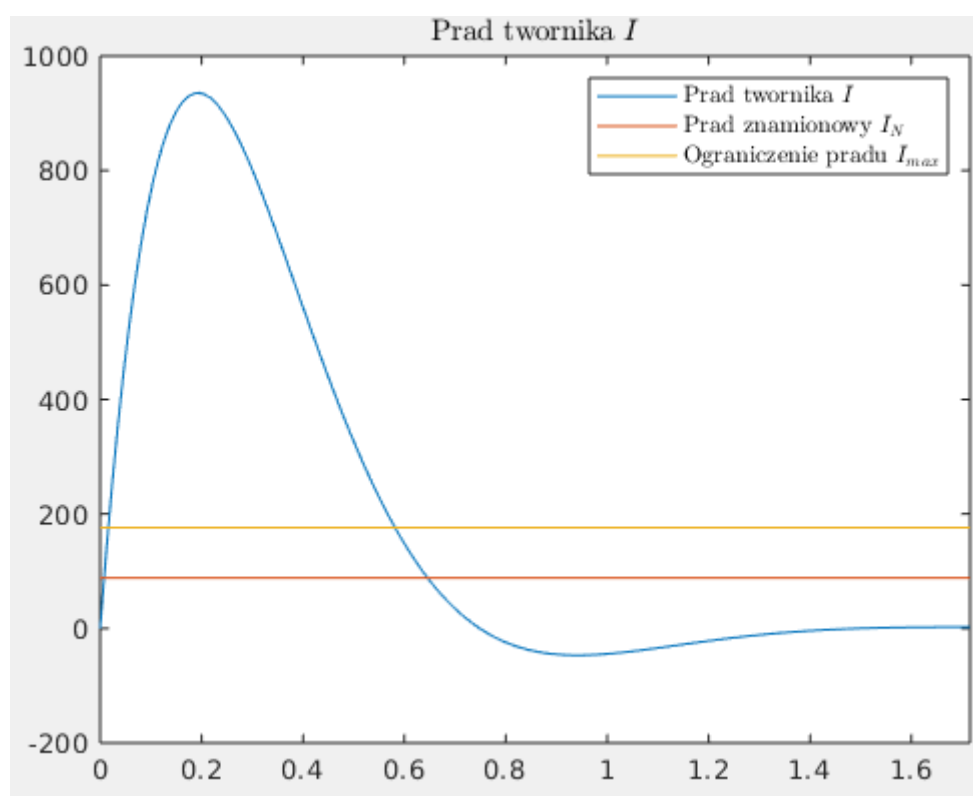
$$|\omega(t)| \leq \omega_d = 158,07 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

### 3.4 Odpowiedzi skokowe modelu silnika

W programie Matlab wyznaczono odpowiedzi na skok jednostkowy napięcia zasilania twornika przy nieobciążonym silniku. Wyznaczono odpowiedź skokową prądu  $I(t)$ , prędkości  $\omega(t)$  oraz pochodnej prądu. Na wykresie naniesione ograniczenia zmiennych stanu.

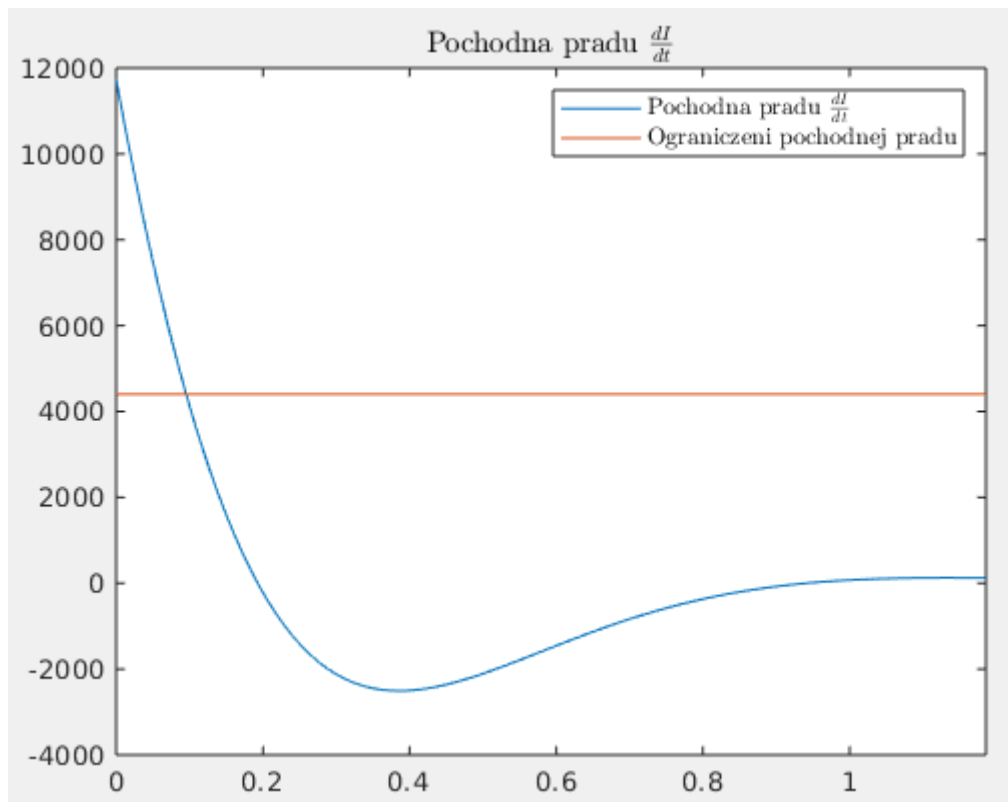


Rys. 4 Przebieg prędkości kątowej przy wymuszeniu skokowym



Rys. 5 Przebieg prądu twornika przy wymuszeniu skokowym





Rys. 6 Przebieg pochodnej prądu twornika przy wymuszeniu skokowym

### 3.5 Podsumowanie

Skok napięcia silnika do wartości znamionowej powoduje że wartość prędkości przekracza wartość znamionową. Zastosowanie regulatora prędkości pozwoli na zmniejszenie przesterowania oraz likwiduje uchyb.

Prąd oraz jego pochodna znacznie przekracza wartości bezpieczne. W celu ograniczenia tego prądu i jej pochodnej należy zastosować człon inercyjny łagocący skok napięcia. Pogorszy to jednak znacząco właściwości dynamiczne układu. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie zamkniętego układu regulacji mierzącego prąd. Z faktu, że mierzony jest prąd reakcja regulatora będzie szybka, co umożliwia dobranie regulatora umożliwiającego uzyskanie dobrej dynamiki przy małym przesterowaniu.

Łącząc regulator prędkości z regulatorem prądu otrzymuje się kaskadową strukturę regulacji. Struktura daje nam poniższe korzyści:

- duży prąd rozruchowy bez przekraczania wartości maksymalnych
- duża dynamikę uzyskiwania zadanej prędkości, która wynika z szybkiego uzyskiwania zadanego prądu
- niskie przesterowanie prędkości

- możliwość uwzględnienia ograniczeń osobno dla prędkości i osobno dla prądu

## 4. Wyznaczenie parametrów regulatorów

### 4.1 Założenia przyjęte przy doborze regulatora prądu:

- $Y = \frac{10}{2.5 \cdot I_N} = \frac{10}{2.5 \cdot 88} = 0.0455$  - wzmacnienie toru pomiarowego prądu twornika
- $K_P = \frac{1.5 \cdot U_N}{10} = \frac{1.5 \cdot 220}{10} = 33$  - wzmacnienie przekształtnika tyrystorowego
- $\sigma = \tau_0 = 3,3 \cdot 10^{-3} s$  - średnie opóźnienie przekształtnika tyrystorowego w stosunku

### 4.2 Dobór parametrów regulatora prądu (regulator PI) przy wykorzystaniu kryterium modułowego

Kryterium modułowe stosuje się do obiektów charakteryzujących się jedną dużą stałą czasową  $T$  i kilkoma mniejszymi stałymi czasowymi  $\tau_i$ , przy czym stałe czasowe

$\tau_i$  zastępuje się stałą  $\sigma = \sum_{i=1}^n \tau_i$ . Istotą kryterium modułowego jest kompensowanie

bieguna  $s_b = -\frac{1}{T}$  przez zero regulatora  $s_0 = -\frac{1}{T_R}$ , gdzie  $T = T_R$ .

Otrzymuje się otwarty układ regulacji o transmitancji:

$$G_O(s) = K_R K_O * \frac{T_R s + 1}{T_R s} * \frac{1}{T s + 1} * \frac{1}{\sigma s + 1}$$

Transmitancja układu zamkniętego (uwzględniająca kompensowanie głównego bieguna obiektu przez regulator) ma postać:

$$G_Z(s) = \frac{G_o(s)}{1+G_o(s)} = \frac{K_R K_o}{T\sigma s^2 + Ts + K_R K_o}$$

W celu uzyskania warunków optymalnego śledzenia sygnału wzmocnienie regulatora dobiera się tak aby spełnić warunek:

$$G_Z(s) = 1 \text{ lub } |G_Z(j\omega)|^2 = 1$$

dla którego optymalne wzmocnienie regulatora określa wzór:

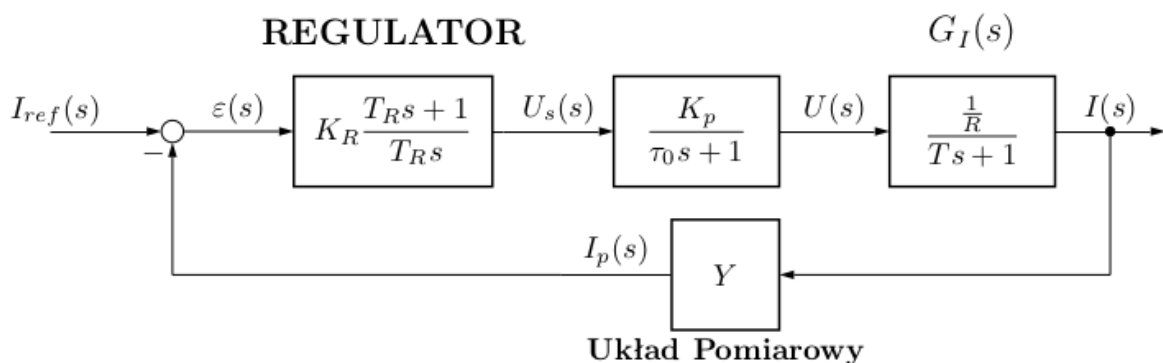
$$K_R = \frac{T}{2K_o\sigma}$$

W przypadku napędu prądu stałego przyjmuje się założenie że siła elektromotoryczna silnika zmienia się znacznie wolniej w stosunku do szybkości narastania prądu twornika, wtedy transmitancja prądowa silnika upraszcza się do postaci:

$$G_{IU}(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{1}{R}}{Ts+1}$$

Natomiast przekształtnik tyrystorowy aproksymuje się układem inercyjnym o stałej czasowej  $\tau_0$  i wzmocnieniu  $K_p$

$$G_p(s) = \frac{U(s)}{U_s(s)} = \frac{K_p}{\tau_0 s + 1}$$



Rys. 7 Schemat blokowy układu regulacji prądu silnika - kryterium modułowe

Nastawy regulatora oblicza się z zależności

$$K_{Ri} = \frac{T_R}{2K_p Y \tau_0}, \quad T_{Ri} = T = 0.125$$

$$K_{Ri} = \frac{TR}{2K_p Y \tau_0} = \frac{0.125 \cdot 0.15}{2 \cdot 33 \cdot 0.0455 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3}} = 1,892$$

Ostatecznie transmitancja regulatora wyniesie:

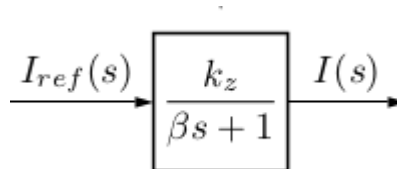
$$G_{Pi}(s) = K_{Ri} \frac{T_{Ri}s+1}{T_{Ri}s} = \frac{15.136(0.125s+1)}{s}$$

Natomiast transmitancja układu zamkniętego, który będzie uwzględniany w dalszej analizie jako regulator prądu twornika wyniesie:

$$G_c(s) = \frac{I(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\frac{1}{Y}}{2\tau_0^2 s^2 + 2\tau_0 s + 1}$$

dla  $\tau_0 = 3,3 \cdot 10^{-3} s \Rightarrow \tau_0^2 \approx 0$  skąd też przyjmuje się uproszczenie:

$$G_c(s) = \frac{I(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\frac{1}{Y}}{2\tau_0 s + 1} = \frac{\frac{1}{0.0455}}{2 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3} s + 1}$$



$$k_z = \frac{1}{Y} = 21.98 \approx 22$$

$$\beta = 2\tau_0 = 6.6 \cdot 10^{-3} s$$

Rys. 8 Układ regulacji prądu twornika, model uwzględniany w dalszej analizie oraz symulacji układu

### 4.3 Założenia przyjęte przy doborze regulatora prędkości:

- $K_T = \frac{10}{1.2 \cdot \omega_N} = \frac{10}{1.2 \cdot 157.08} = 0.0531$  - wzmacnienie toru pomiarowego prędkości
- $k_z = \frac{1}{Y}$  oraz  $\beta \approx 2\tau_0$  - parametry układu regulacji prądu twornika  $G(s) = \frac{I(s)}{I_{ref}(s)}$
- $\Delta\omega_m$  - statyzm odpowiednio 2% i 5% prędkości znamionowej  $\omega_N$

### 4.4. Dobór parametrów regulatora prędkości (regulator typu P)

Regulator prędkości typu P jest określony przez konkretny wzór:

$$K_\omega = \frac{M_N}{\psi_{eN} \cdot k_z \cdot K_T \cdot \Delta\omega_m}$$

Regulator dobrano dla dwóch wartości statyzmu:

a) statyzm = 5%

$$\Delta\omega_m = 5\% * \omega_n = 0.05 * 157.08 = 7.85 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$K_{\omega 5\%} = \frac{M_N}{\psi_{eN} \cdot k_z \cdot K_T \cdot \Delta\omega_m} = \frac{116.2}{1.32 \cdot 21.978 \cdot 0.0531 \cdot 7.85} = 9.61$$

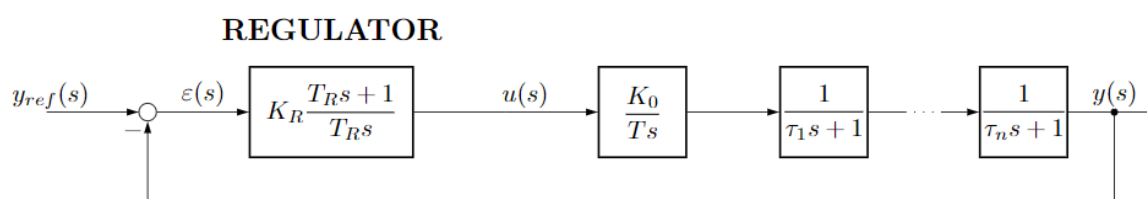
b) statyzm = 2%

$$\Delta\omega_m = 2\% * \omega_n = 0.02 * 157.08 = 3.14 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$K_{\omega 2\%} = \frac{M_N}{\psi_{eN} \cdot k_z \cdot K_T \cdot \Delta\omega_m} = \frac{116.2}{1.32 \cdot 21.978 \cdot 0.0531 \cdot 3.14} = 24.02$$

## 4.5. Dobór parametrów regulatora prędkości (regulator typu PI) przy wykorzystaniu kryterium symetrycznego

Kryterium symetryczne jest wykorzystywane jeśli mamy do czynienia z obiektami, w których oprócz dominującego elementu całkującego o czasie całkowania T, mamy do czynienia z wieloma elementami inercyjnymi o małych stałych czasowych. Ze względu na te niewielkie wartości stałych czasowych dokonujemy aproksymacji elementów inercyjnych zastępując je tylko jednym elementem o pewnej stałej czasowej.



Rys. 9 Schemat układu regulacji - kryterium symetryczne

Transmitancja układu zamkniętego:

$$G_C(s) = \frac{K_R K_0 (T_R s + 1)}{T_R T_0 s^3 + T_R T s^2 + K_R K_0 T_R s + K_R K_0}$$

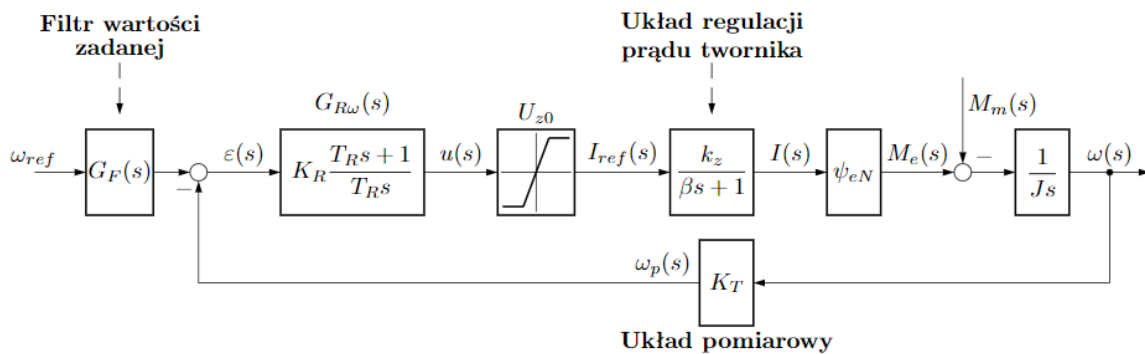
Po podstawieniu  $s=j\omega$  oblicza się moduł transmitancji widmowej  $|G_c(j\omega)|^2$  i dokonuje się rozwinięcia w szereg Maclaurina w otoczeniu punktu  $\omega=0$ . Następnie w celu spełnienia postulatu optymalnego śledzenia ( $G_c(s)=1$ ) przyrównuje się wszystkie wyrazy rozwinięcia do zera oprócz wyrazu pierwszego, który przyrównuje się do 1. Wówczas uzyskujemy parametry nastawy regulatora:

$$T_R = 4\sigma, K_R = \frac{T}{2K_0\sigma}$$

Jak się okazuje przebieg przejściowy przy wymuszeniu skokowym charakteryzuje się dużym przeregulowaniem (ponad 40%), dlatego też stosujemy filtr dolnoprzepustowy sygnału wyjściowego  $y_z$  o transmitancji:

$$G_F(s) = \frac{1}{4\sigma s + 1}$$

Dla naszego układu kryterium symetryczne wykorzystujemy do optymalizacji parametrycznej regulatora PI prędkości kątowej napędu prądu stałego.



Rys. 10 Uproszczony schemat blokowy napędu z regulatorem prędkości PI w przypadku wykorzystania kryterium symetrycznego

Jako, że regulator prądu jest podrzędnym regulatorem w stosunku do regulatora prędkości, konieczne jest jego uwzględnienie przy wyznaczaniu optymalnych nastaw dla regulatora prędkości.

Tak jak zostało to wspomniane w punkcie 4.2 projektu, transmitancja obwodu regulacji prądu twornika przedstawia się zależnością:

$$G_C(s) = \frac{I(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\frac{1}{\gamma}}{2\tau_0^2 s^2 + 2\tau_0 s + 1},$$

którą aproksymujemy z racji, że  $2\tau_0^2 s^2 \ll 2\tau_0 s$  do postaci:

$$G_C(s) = \frac{I(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\frac{1}{\gamma}}{2\tau_0 s + 1}$$

Ostatecznie parametry regulatora i filtra wyznaczamy z zależności:

- $T_R$

$$\beta = 2\tau_0$$

$$T_R = 4\beta = 4 \cdot 2\tau_0 = 8\tau_0 = 8 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3} s = 0.0264 s$$

- $K_\omega$

$$k_z = \frac{1}{Y} \text{ i } \beta = 2\tau_0$$

$$K_\omega = \frac{J}{2K_T \cdot k_z \cdot \beta \cdot \psi_{eN}} = \frac{JY}{4 \cdot K_T \cdot \tau_0 \cdot \psi_{eN}} = \frac{3.025 \cdot 0.0455}{4 \cdot 0.0531 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3} \cdot 1.32} = 149,14$$

Transmitancja regulatora PI dla kryterium symetrycznego:

$$G_{PI\omega}(s) = K_\omega \frac{T_R s + 1}{T_R s} = 149,14 \frac{0.0264s + 1}{0.0264s} = \frac{149.14(s + 37.879)}{s}$$

Filtr wartości zadanej prędkości o transmitancji:

$$G_F(s) = \frac{1}{4\beta s + 1} = \frac{1}{8\tau_0 s + 1} = \frac{1}{8 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3} \cdot s + 1} = \frac{1}{0.0264s + 1} \text{ lub } \frac{37.879}{s + 37.879}$$

## 4.6. Podsumowanie

- Regulator prądu (typu PI)

$$G_{PIi}(s) = \frac{1.892(s+8)}{s}$$

- Regulator prędkości typu P

Dla statyzmu = 5%

$$K_{\omega 5\%} = 9.61$$

Dla statyzmu = 2%

$$K_{\omega 2\%} = 24.02$$

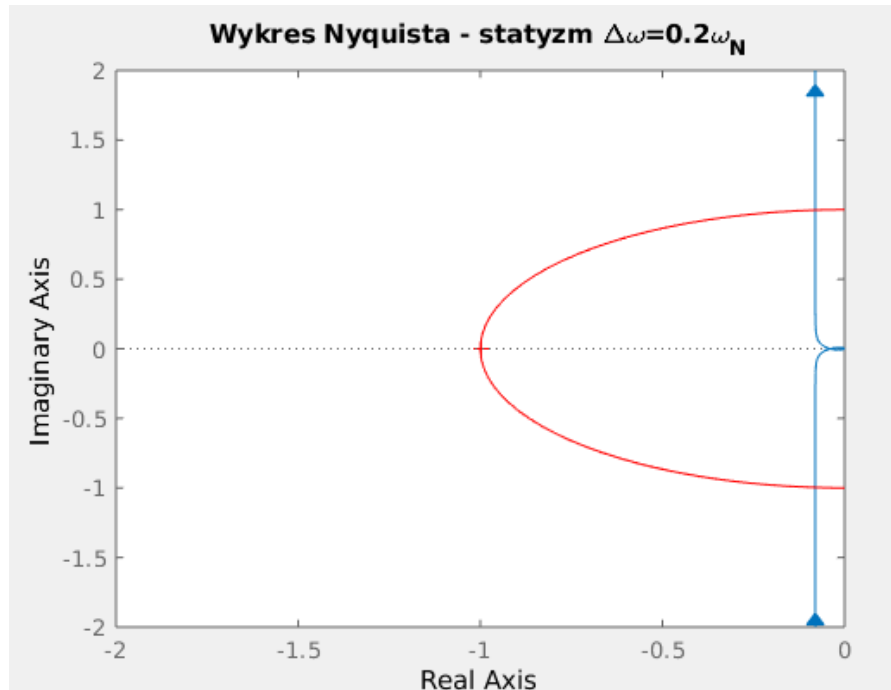
- Regulator prędkości typu PI (i filtr)

$$G_{R\omega}(s) = \frac{149.14(s+37.879)}{s}$$

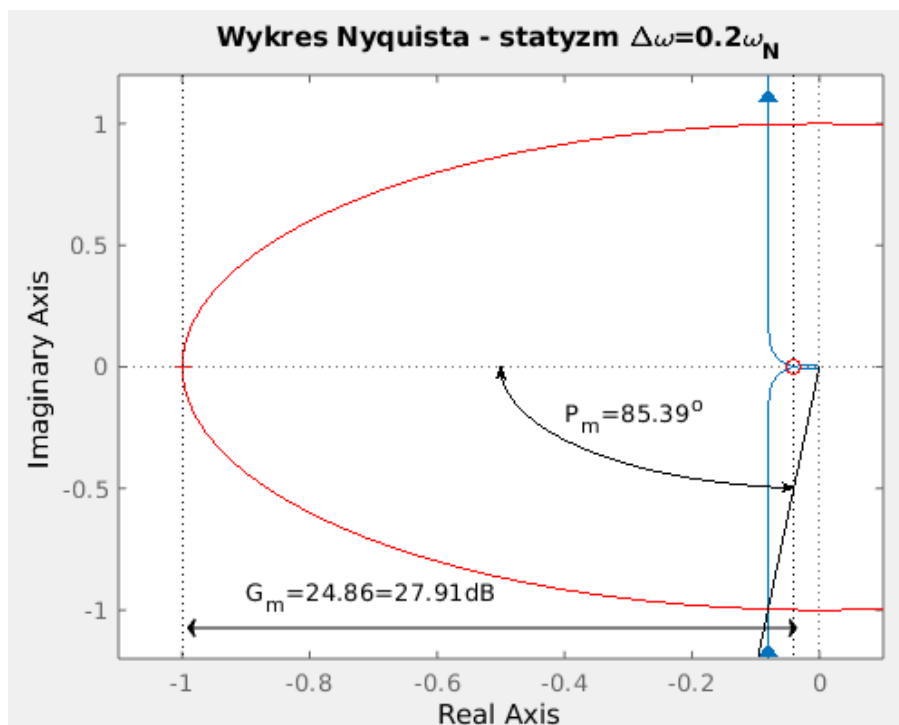
$$G_F(s) = \frac{1}{0.0264s + 1}$$

## 5. Wyznaczenie zapasu modułu i fazy za pomocą charakterystyk bodego i nyquista

### 5.1 Układ z regulatorem P ze statyzmem 2%

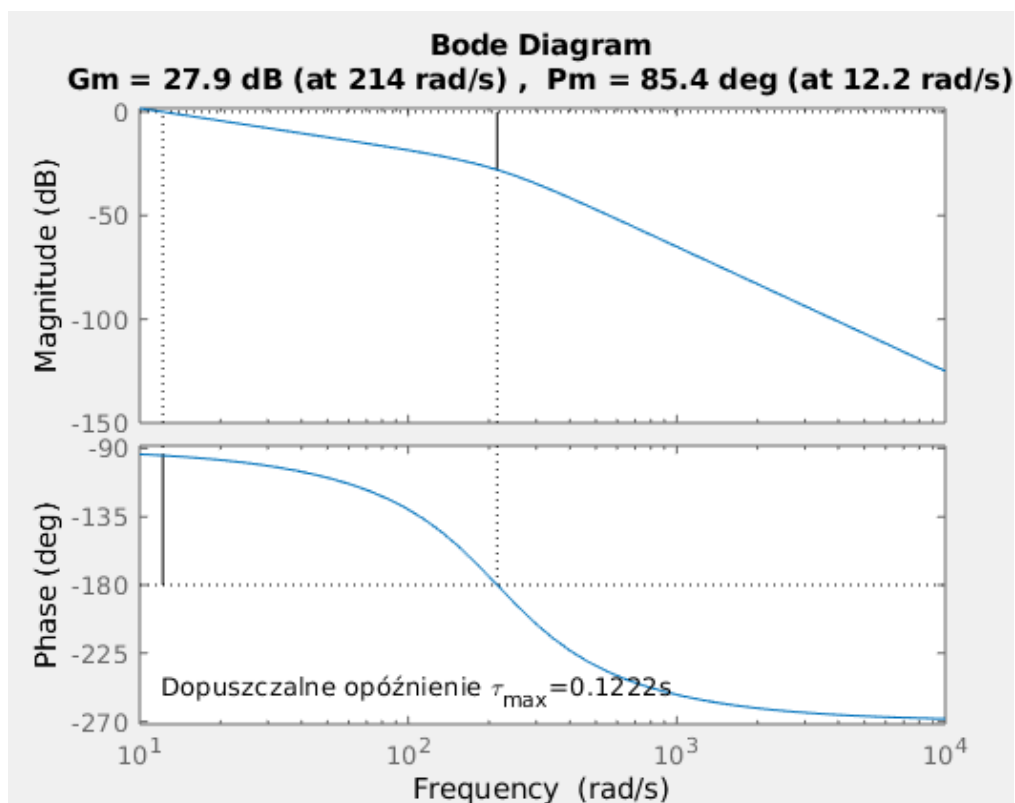


Rys. 11 Charakterystyka Nyquista dla układu z regulatorem P ze statyzmem 2%



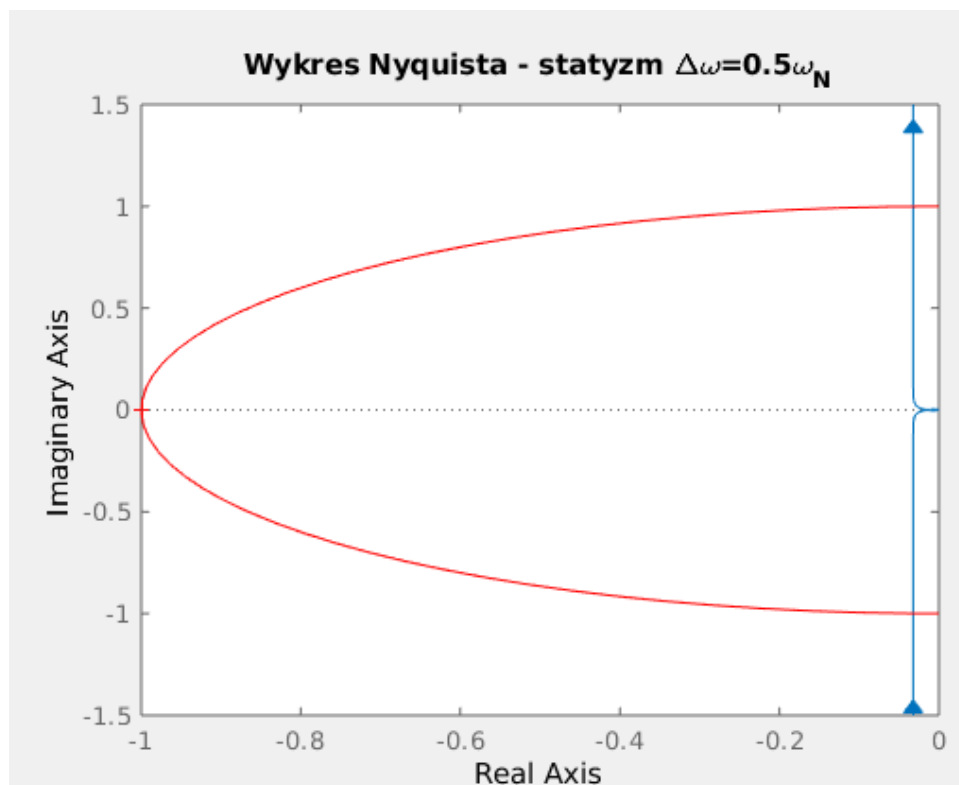
Rys. 12 Charakterystyka Nyquista dla układu z regulatorem P ze statyzmem 2% z zaznaczonym zapasem modułu  $G_M$  oraz fazy  $P_M$



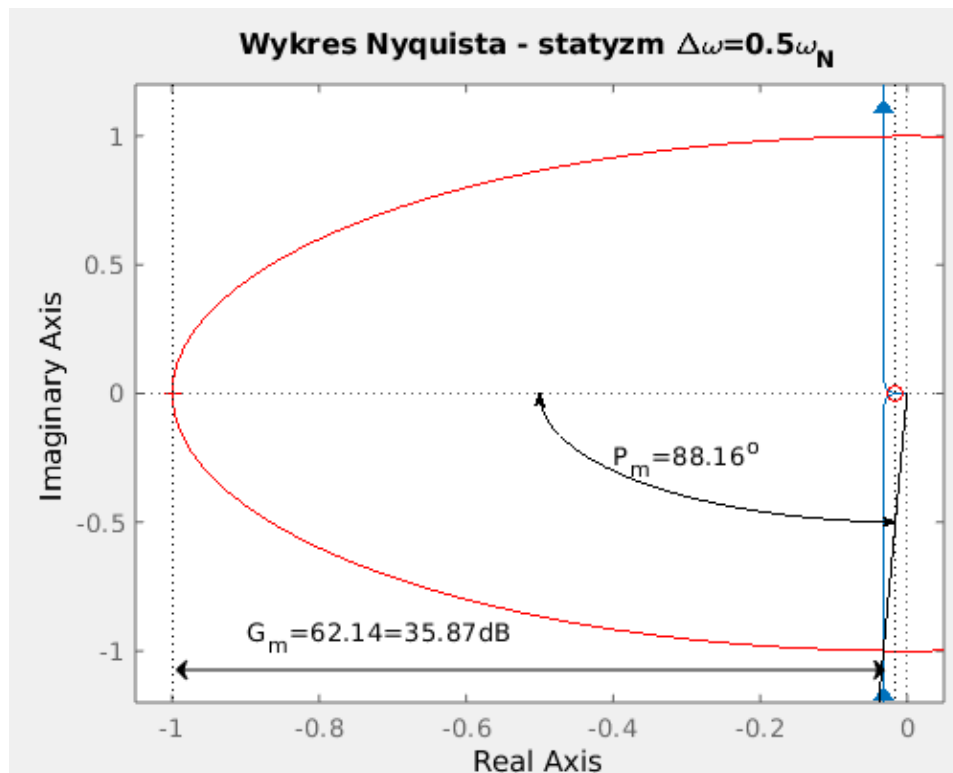


Rys. 13 Charakterystyka Bodego dla układu z regulatorem P ze statyzmem 2%

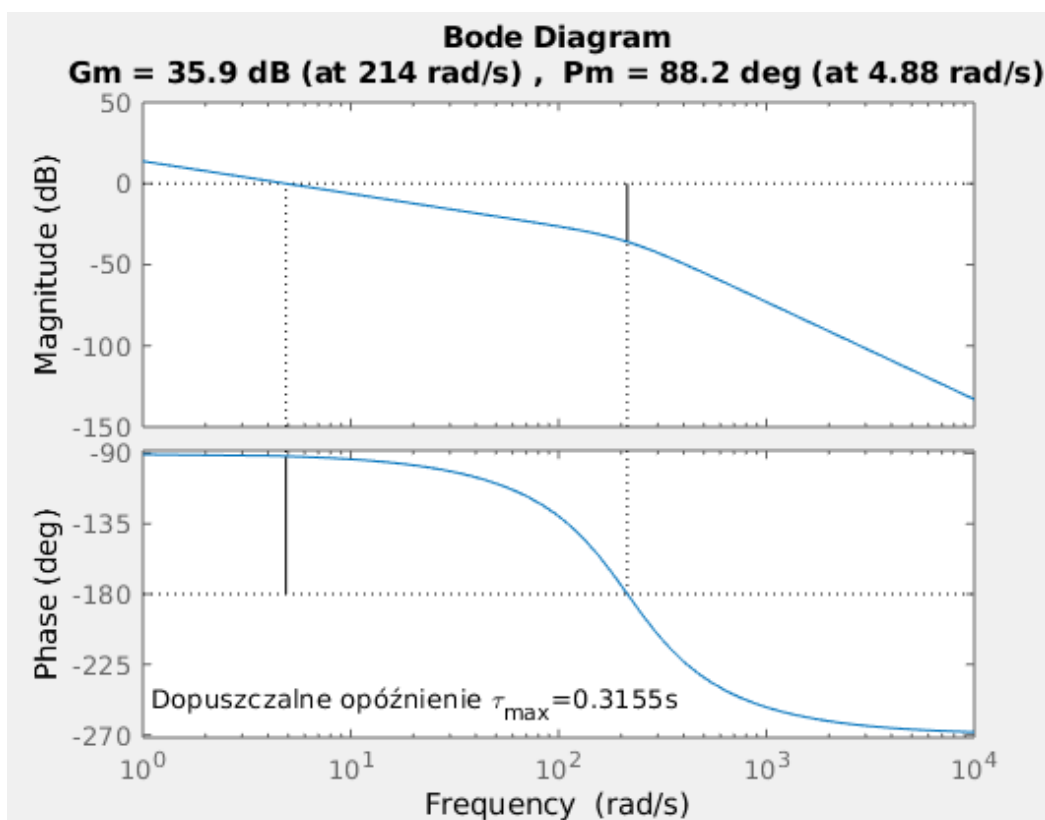
## 5.2 Układ z regulatorem P ze statyzmem 5%



Rys. 14 Charakterystyka Nyquista dla układu z regulatorem P ze statyzmem 5%

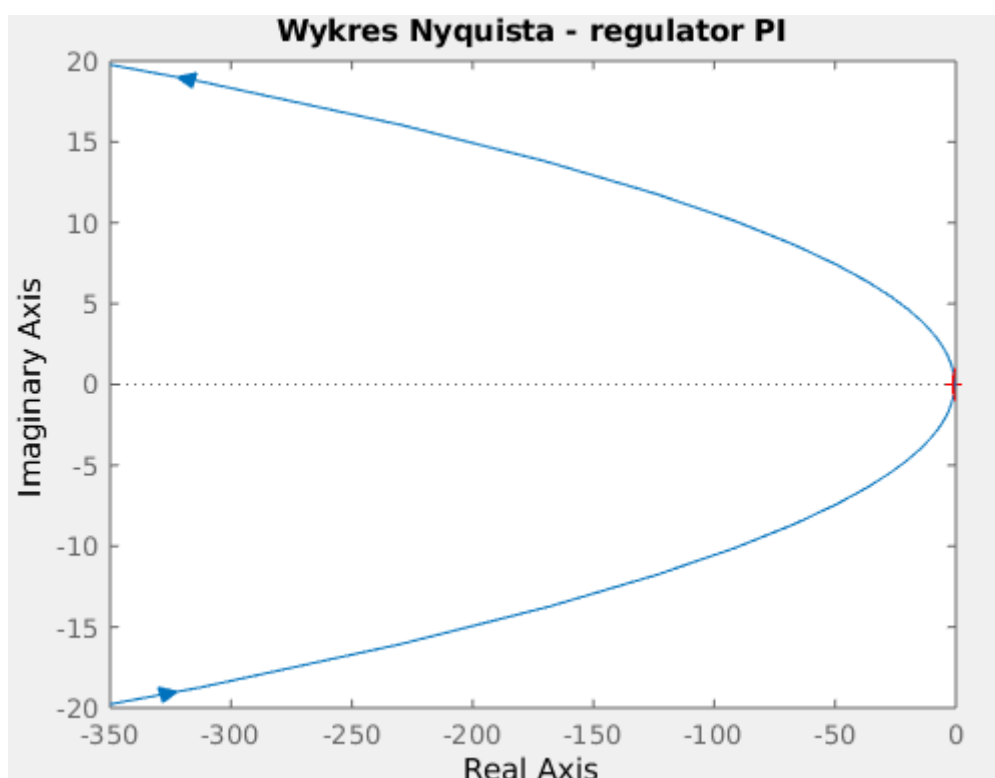


Rys. 15 Charakterystyka Nyquista dla układu z regulatorem P ze statyzmem 5% z zaznaczonym zapasem modułu  $G_M$  oraz fazy  $P_M$

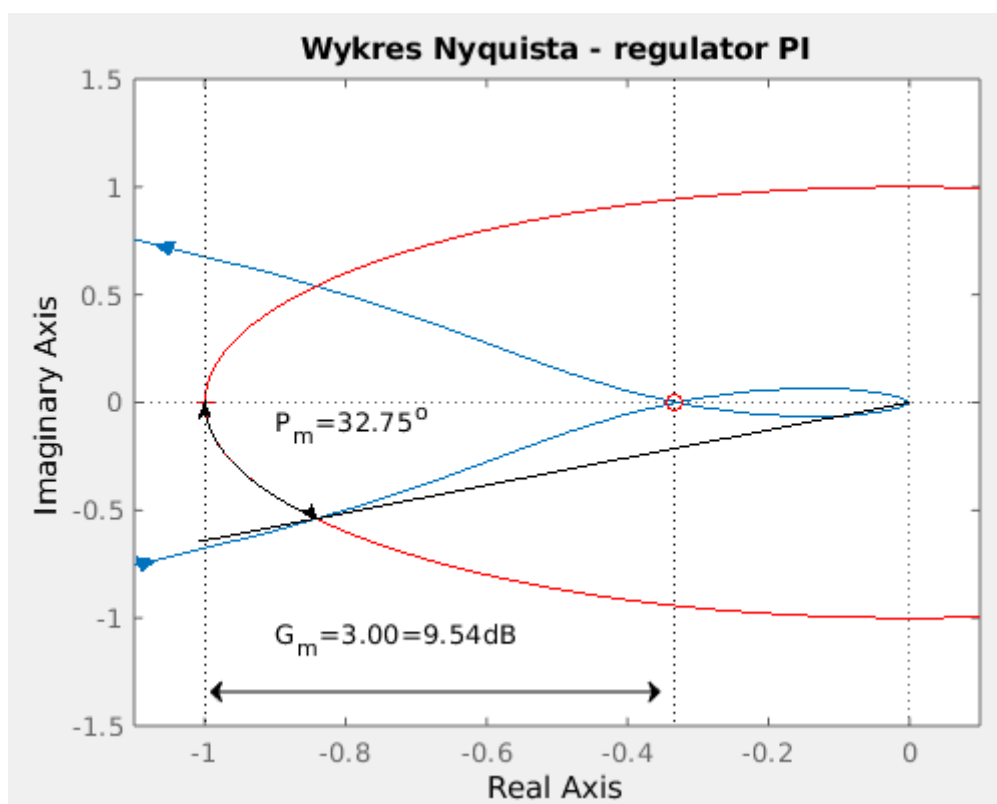


Rys. 16 Charakterystyka Bodego dla układu z regulatorem P ze statyzmem 5%

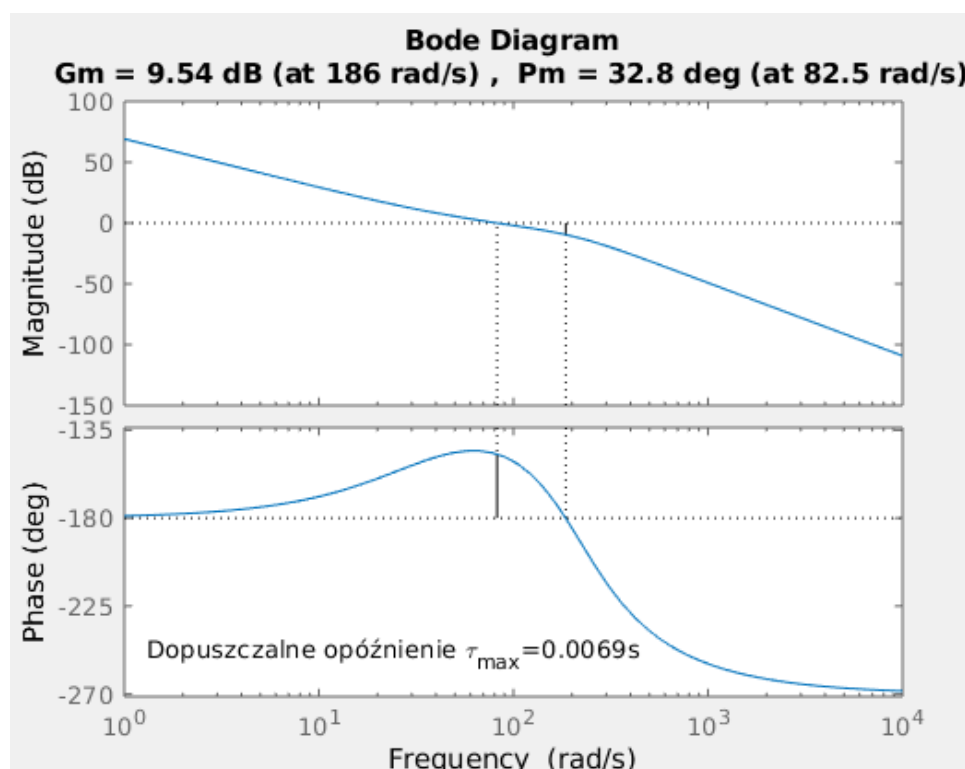
### 5.3 Układ z regulatorem PI



Rys. 17 Charakterystyka Nyquista dla układu z regulatorem PI



Rys. 18 Charakterystyka Nyquista dla układu z regulatorem PI z zaznaczonym zapasem modułu  $G_M$  oraz fazy  $P_M$



Rys. 19 Charakterystyka Bodego dla układu z regulatorem PI

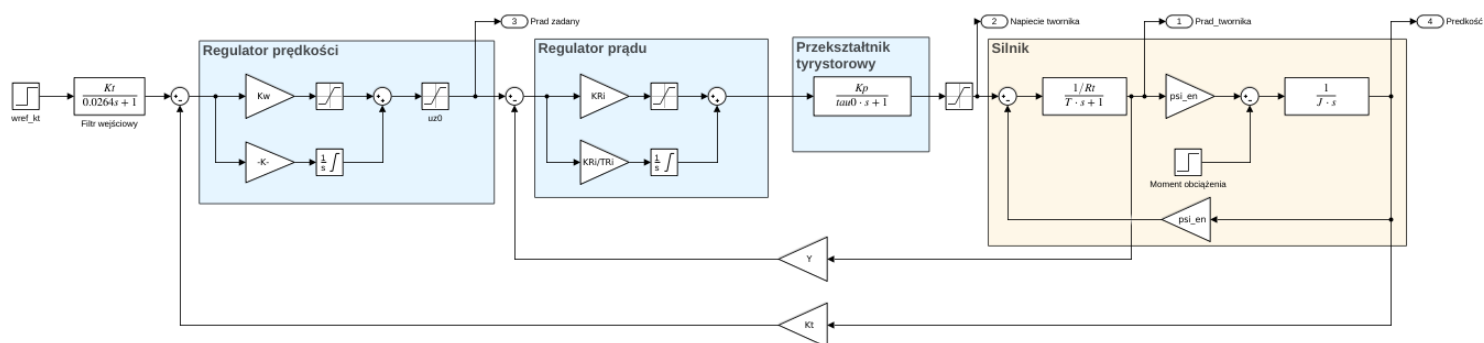
## 5.4 Podsumowanie

Tab. 1 Zapas stabilności dla różnych regulatorów prędkości

Regulator prędkości	Zapas modułu $\Delta L_m$ [dB]	Zapas fazy $\Delta \varphi_m$ [°]	Dopuszczalne opóźnienie $\tau_{max}$ [ms]
typ P statyzm 2%	27.9	85.4	122.2
typ P statyzm 5%	35.9	88.2	315.5
typ PI	9.5	32.8	6.9

Badanie otwartego układu regulatora kaskadowego z silnikiem wykazało odpowiedni zapas stabilności: układ zamknięty będzie stabilny. Układ będzie stabilny gdy zapas fazy będzie większy od 0 oraz zapas modułu będzie większy od zera. Dla rzeczywistym regulatorów, których parametry mogą zmieniać się w czasie oraz nie są elementami idealnymi, przyjmuje się, że zapas modułu powinien być większy od 6dB oraz zapas fazy będzie większe od 30°. Badany układ dla wszystkich typów regulatora spełnia ten warunek:  $\Delta L_m > 6dB$  oraz  $\Delta \varphi_m > 30^\circ$ . Najmniejszy zapas stabilności posiada regulator PI ma on też najmniejsze dopuszczalne opóźnienie.

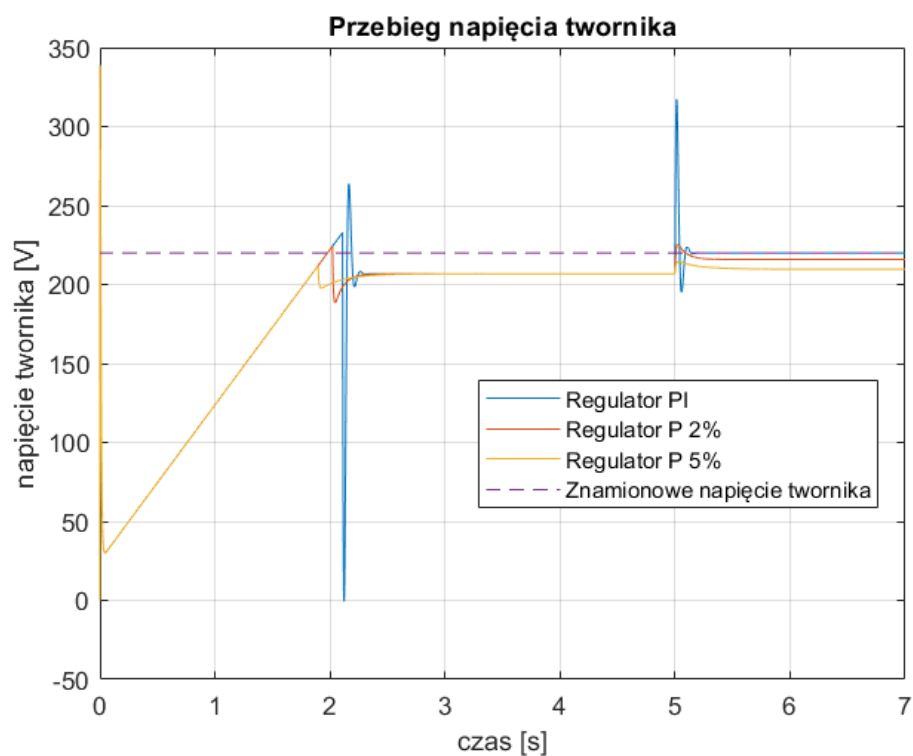
## 6. Symulacje rozruchu w programie simulink



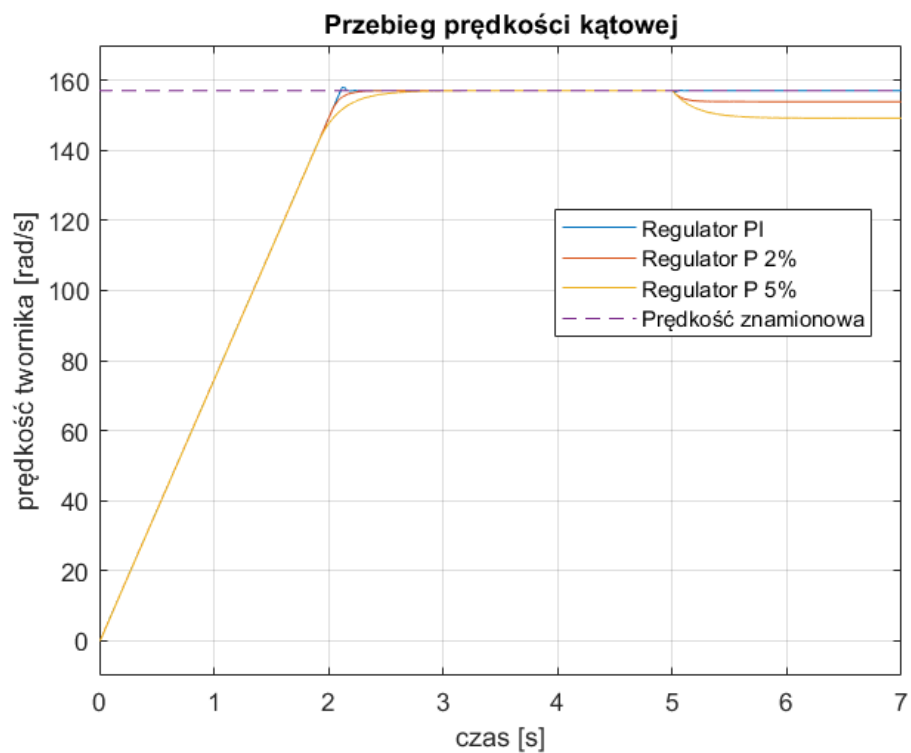
Rys. 20 Schemat symulacyjny układu kaskadowej regulacji silnika obcowzbudnego

### 6.1 Rozruch bez momentu obciążenia i obciążenie udarowe

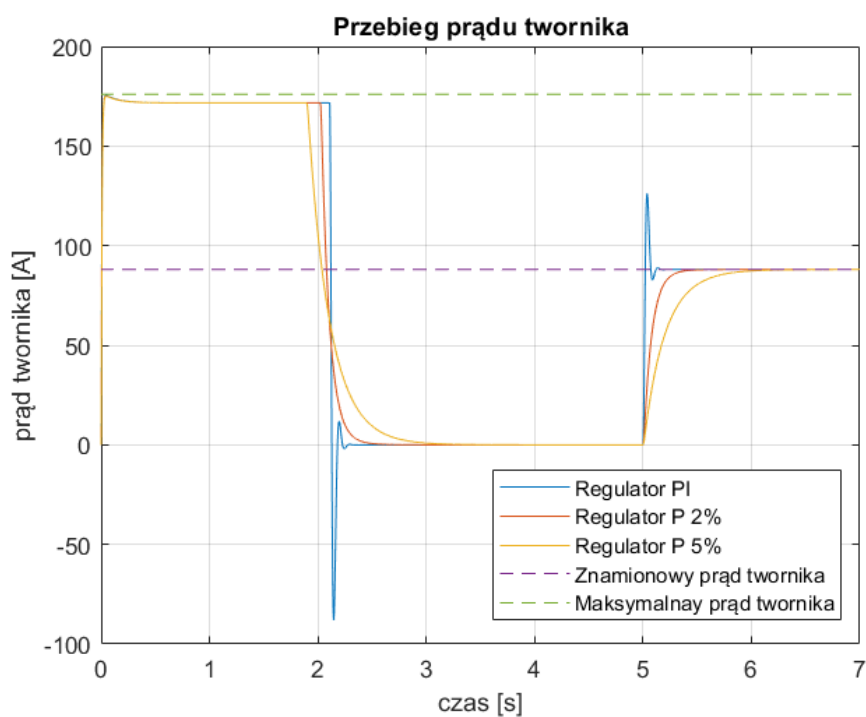
Symulacje rozruchu bez początkowego momentu obciążenia i zadany obciążeniem udarowym po 5 s.



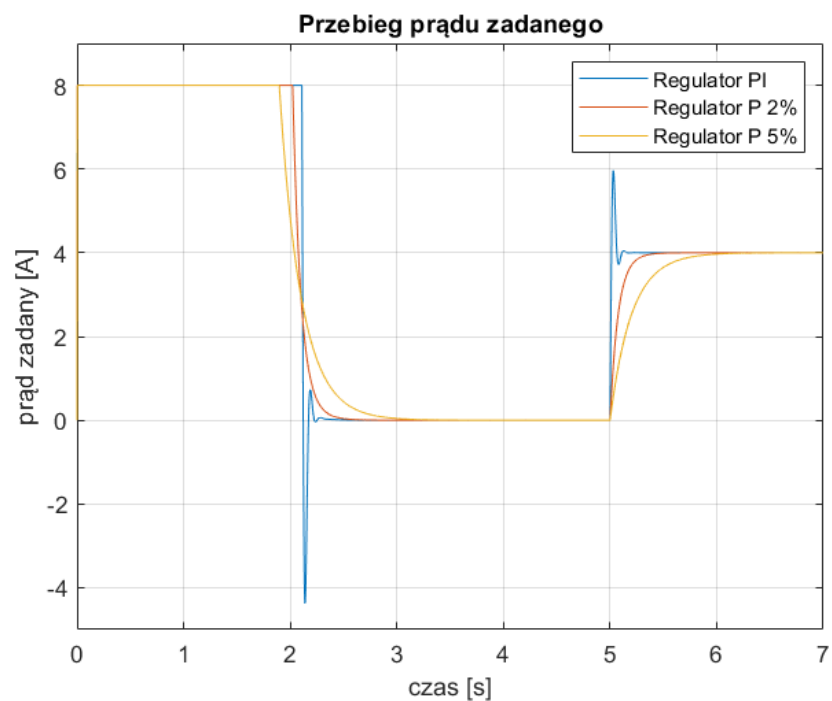
Rys. 21 Przebieg napięcia twornika  
rozruch bez obciążenia i z obciążeniem udarowym



Rys. 22 Przebieg prędkości obrotowej  
rozruch bez obciążenia i z obciążeniem udarowym

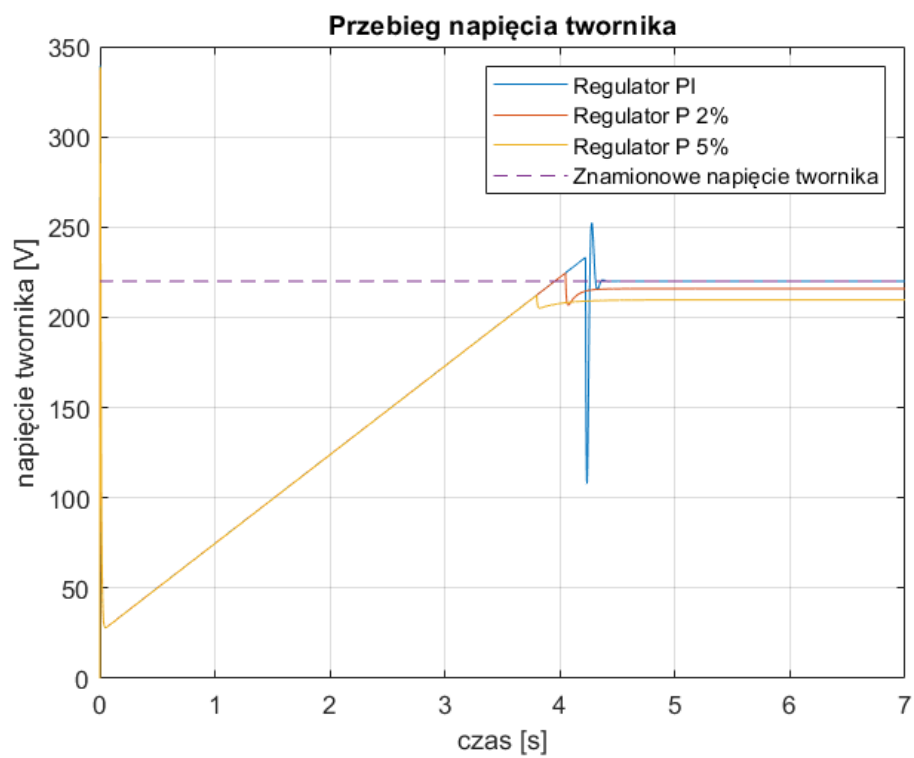


Rys. 23 Przebieg prądu twornika  
rozruch bez obciążenia i z obciążeniem udarowym

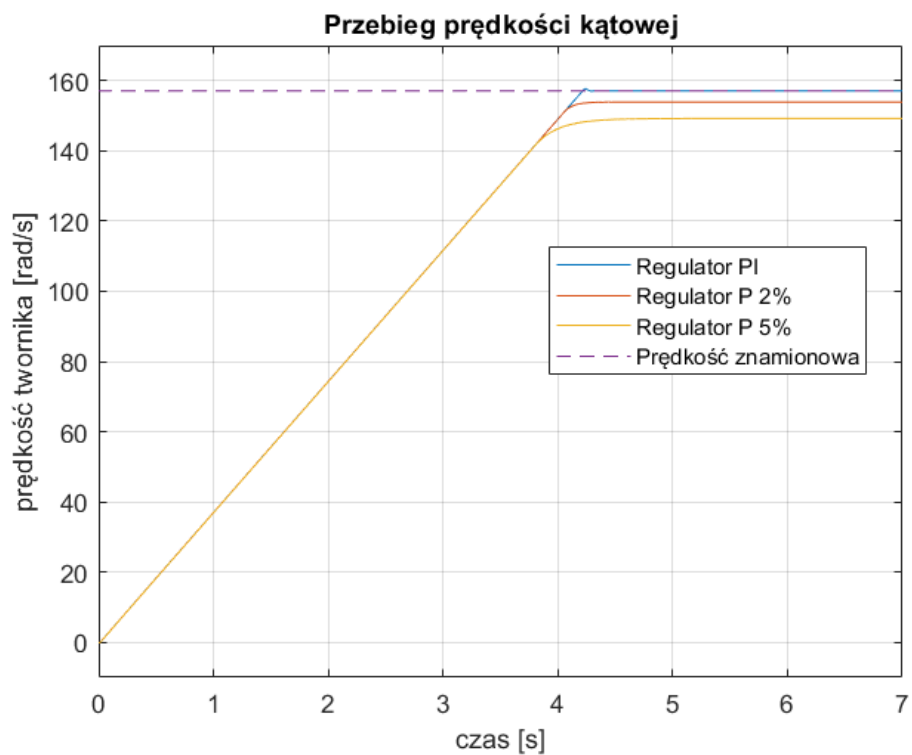


Rys. 24 Przebieg prądu zadanego  
rozruch bez obciążenia i z obciążeniem udarowym

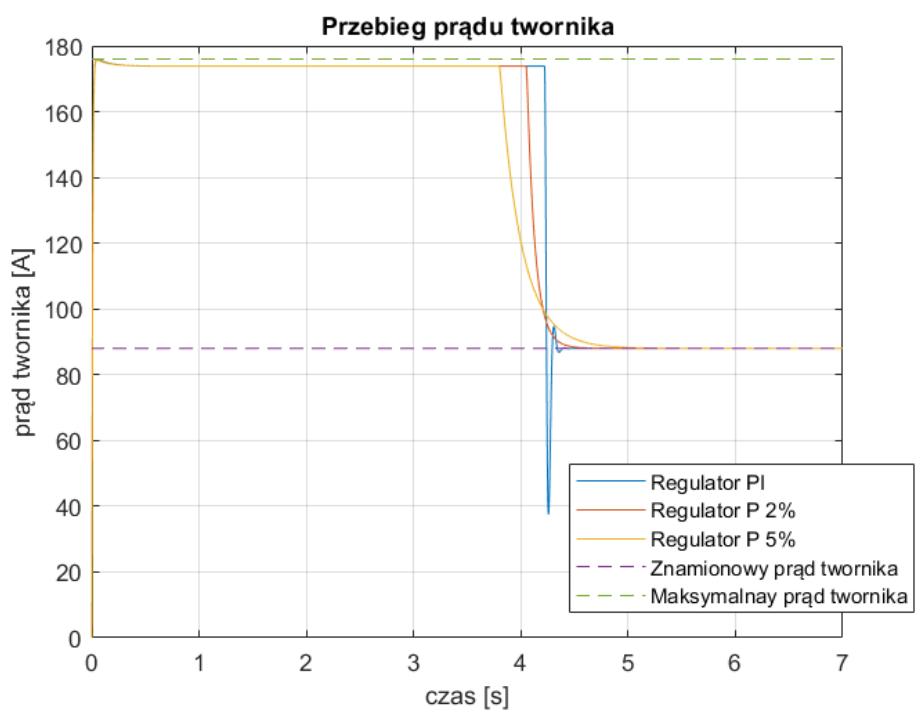
## 6.2 Rozruch ze znamionowym momentem czynnym



Rys. 25 Przebieg napięcia twornika  
rozruch ze znamionowym momentem czynnym

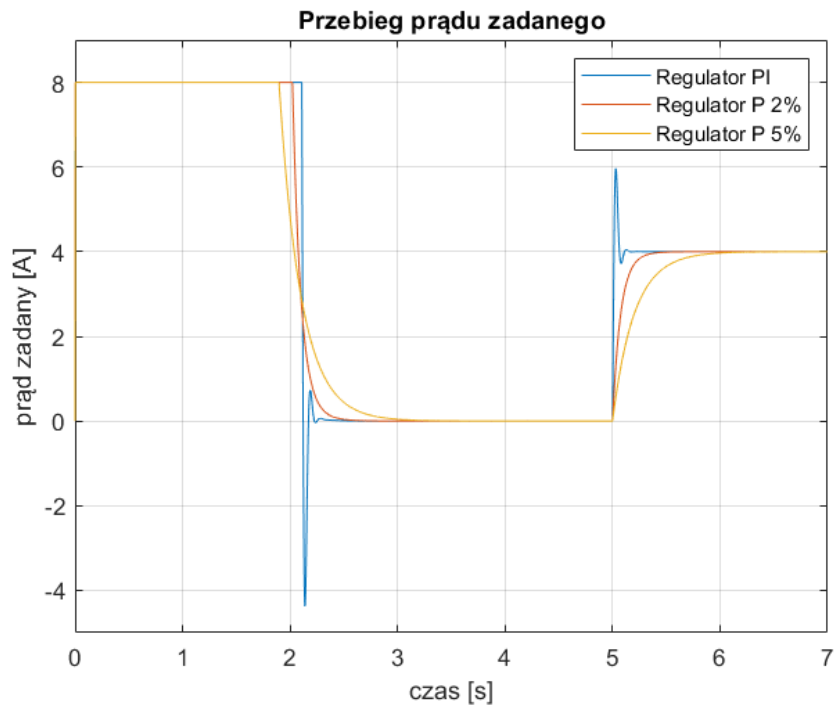


Rys. 26 Przebieg prędkości obrotowej  
rozruch ze znamionowym momentem czynnym



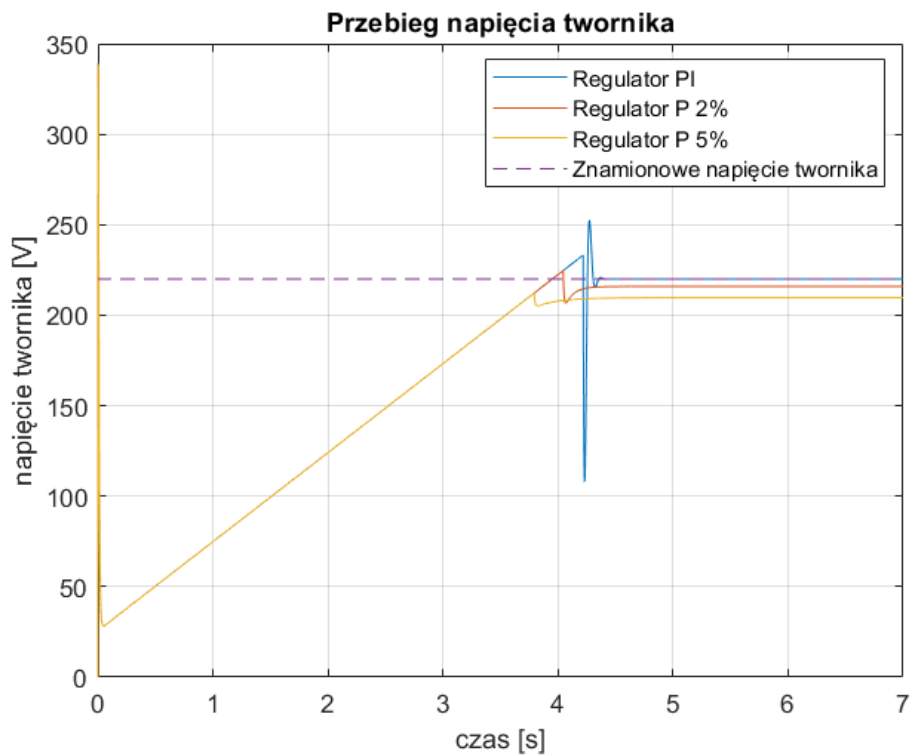
Rys. 27 Przebieg prądu twornika  
rozruch ze znamionowym momentem czynnym



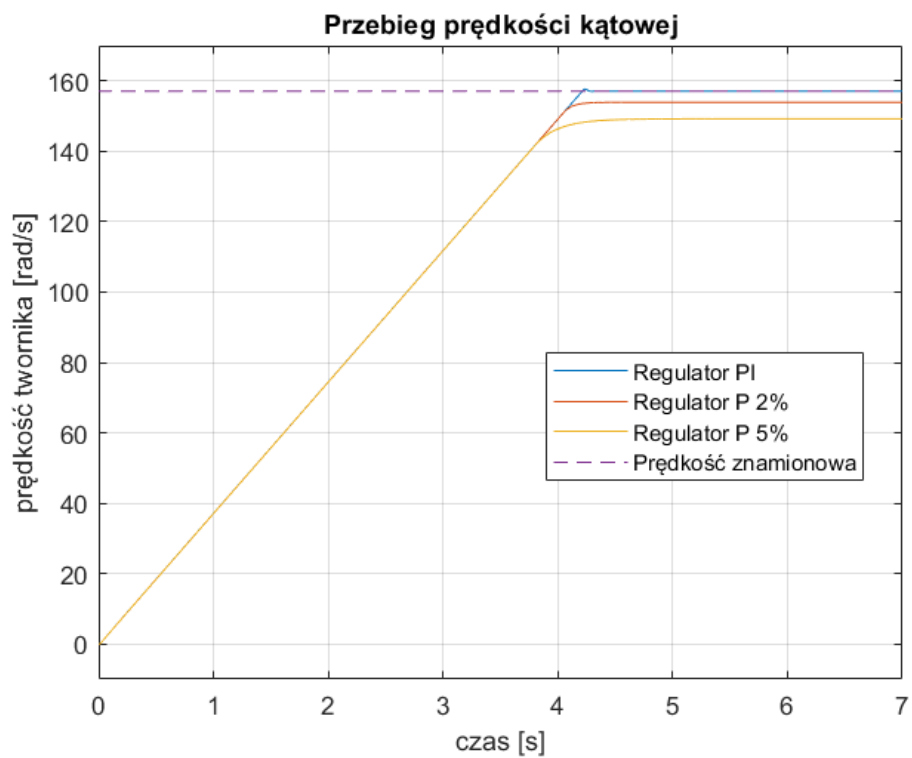


Rys. 28 Przebieg prądu zadanego  
rozruch ze znamionowym momentem czynnym

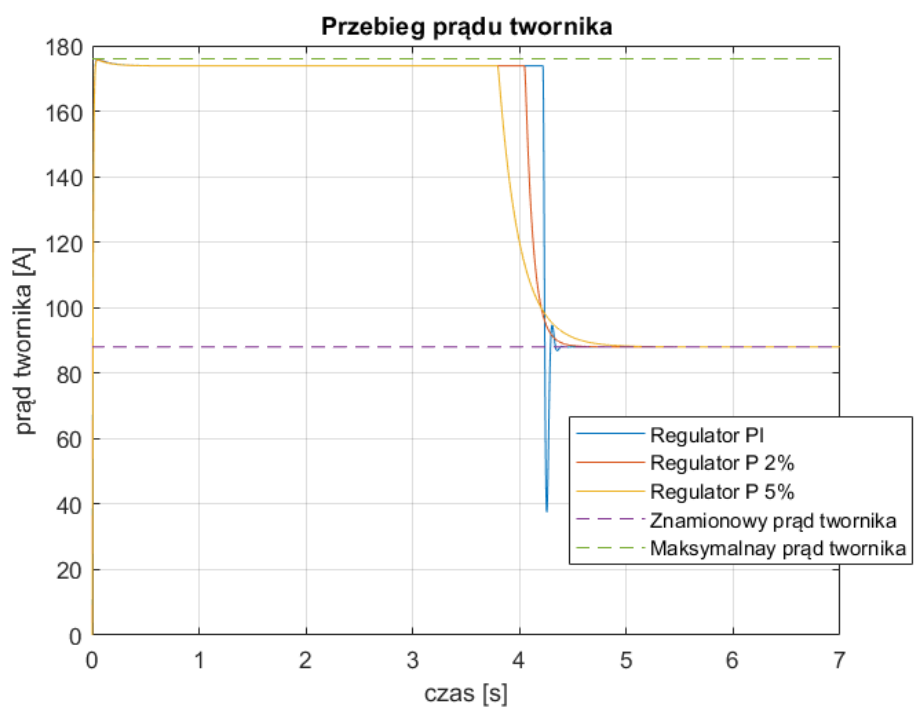
### 6.3 Rozruch ze znamionowym momentem biernym



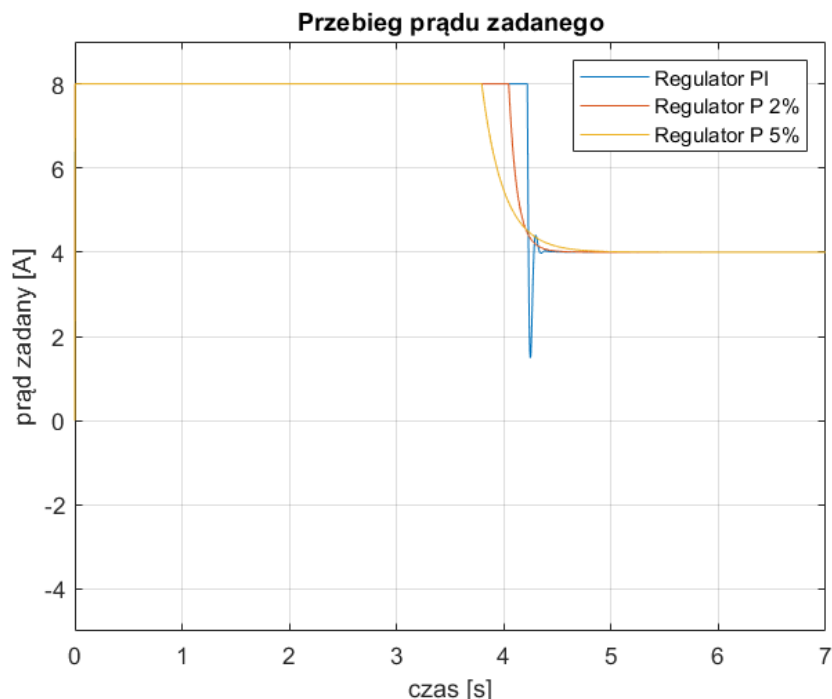
Rys. 29 Przebieg napięcia twornika  
rozruch ze znamionowym momentem biernym



Rys. 30 Przebieg prędkości obrotowej  
rozruch ze znamionowym momentem biernym



Rys. 31 Przebieg prądu twornika  
rozruch ze znamionowym momentem biernym



Rys. 32 Przebieg prądu zadanego  
rozruch ze znamionowym momentem biernym

## 6.4. Podsumowanie

- Prąd twornika w na początku rozruchu nie przekracza prądu dopuszczalnego. Wynika to z działania podrzędnego regulatora prądu - symulacja potwierdza, że nastawy regulatora prądu są dobrane poprawnie, zapewniając niskie przesterowanie i dużą dynamikę. Prąd twornika zależy też od prądu zadanego przez regulator prędkości, w którego obwodzie występuje blok ograniczający  $u_{z0}$ . Ponieważ prąd twornika nie przekracza wartości dopuszczalnych oznacza to, że ograniczenie dobrane prawidłowo.
- Układ z regulatorem prądu PI ma znaczne przeregulowania w stanach przejściowych, jest to wynikiem
  - własności regulatora PI, który może mieć znaczne przeregulowania w stanach przejściowych
  - szybkiej zmiany wartości zadanej za którą regulator PI nadąża - szybko reaguje na zmianę, zaletą jaką jest szybkie ustalanie się wartości prądu, jednak przeregulowanie może być w niektórych sytuacjach niekorzystne
- Układ z regulatorem prędkości P nie ma przeregulowania prądu
- Regulatory prędkości PI, P 2% i P 5% osiągają zadana prędkość w podobnym czasie, jest to wynikiem działania bloku ograniczającego zadany prąd

## **7. Program oraz pliki simulinka**

<https://drive.google.com/file/d/1LvCXRUC0IAivSPI2ybu2x-wajqaFMrt/view?usp=sharing>