



Adam Miarka  
Damian Kadłuczka

## Kaskadowy Układ Regulacji Napędem Prądu Stałego

Data  
oddania:  
29.04.2016

Rok akademicki:  
2015/2016

Wydział:  
EAIIB

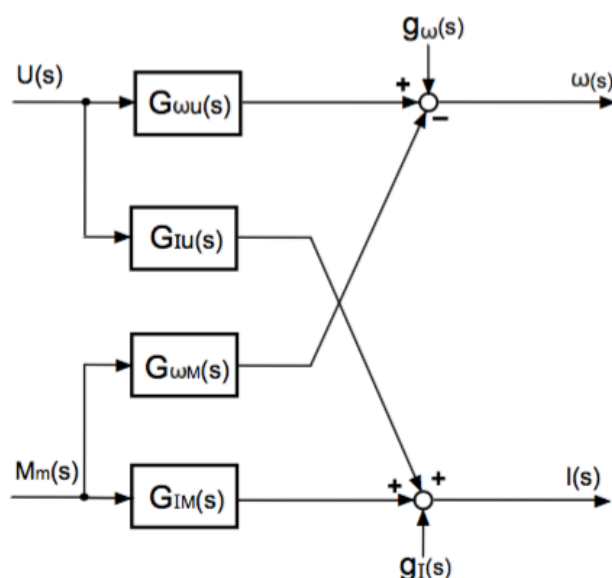
Kierunek :  
Elektrotechnika, moduł C

### 1. Cel Projektu

Celem projektu jest zapoznanie się z modelem matematycznym i symulacjami układu kaskadowej regulacji napędu prądu stałego. Spełnienie założeń projektu wymaga wnikliwej obserwacji procesu rozruchu i stabilizacji prędkości obrotowej napędu, wartości natężeń prądów w poszczególnych punktach regulatora oraz zapoznanie się ze zmiennymi stanu i ich wpływem na stabilność i działanie układu.

### 2. Opis Badanego Obiektu

Obiektem, który poddany zostanie regulacji jest napęd prądu stałego, a konkretnie silnik obcowzbudny. Poniżej przedstawiono schemat blokowy takiego silnika.



Rys. 1 Schemat blokowy silnika obcowzbudnego.

Przed przystąpieniem do analizy obiektu musimy poczynić sobie kilka podstawowych uproszczeń, które pozwolą na stworzenie modelu symulacyjnego. Musimy założyć istnienie idealnie prostopadłego strumienia magnetycznego do kierunku przepływu prądu w tworniku. Pomijamy też zjawiska nieliniowe (takie jak wpływ nasycenia rdzenia, czy histerezy magnetycznej) oraz wpływ temperatury, a co za tym idzie niezmiennosc parametrów silnika w czasie. Założyć też musimy absolutną sztywność wału napędowego silnika.

Ideą pracy naszego regulatora jest istnienie nadrzędnego regulatora prędkości obrotowej silnika, oraz sterowanego nim - podrzędnego regulatora prądu twornika.

Przedstawione w pracy przebiegi posiadają naniesione ograniczenia. Dobór nastaw regulatora przebiegł tak, by nie wykroczyć poza narzucone wartości ograniczeń.

Zastosowany w symulacjach zabieg powinien być przeniesiony do modelu rzeczywistego poprzez uwzględnienie ograniczeń w algorytmie sterowania regulatorem.

Rysunek 1 przedstawia blokowy schemat obcowzbudnego silnika prądu stałego.

Poniżej podano kolejne transmitancje:

1) Regulator Prądu:

$$G_{RI}(s) = \frac{ms + 1}{V_s} = K_{Ri} \left( 1 + \frac{1}{T_{Ri}} \right)$$

2) Twornik:

$$G_t(s) = \frac{I(s)}{U_p(s)} = \frac{1}{R} \frac{Bs}{BTs^2 + Bs + 1}$$

3) Regulator Prędkości (PI, kryterium symetryczne):

$$G_{R\omega}(s) = K_{\omega} \frac{T_{RS} + 1}{T_{RS}}$$

W układzie nadrzędnym regulator bada różnicę zadanej wartości prędkości oraz mierzonej w danej chwili i na tej podstawie zadaje wartość prądu twornika dla podporządkowanego mu regulatora prądu. Kolejny etap regulacji dokonuje się już w przekształtniku tyrystorowym.

Dla ciągłego układu regulacji układ twornika jest elementem inercyjnym pierwszego rzędu z elementem opóźniającym.



Nastawy ciągłego regulatora prędkości liczone z zależności (PI):

$$K_w = \frac{J}{2 \cdot K_t \cdot K_z \cdot \beta \cdot \psi}$$

Dla regulatora prądu było to natomiast:

$$V = \frac{\beta \cdot Y \cdot K_p \cdot B}{(B1 - \beta) \cdot R_t}$$

Poniżej lista parametrów naszego napędu:

$$J_s = 8.25$$

$$R_t = 0.039$$

$$L_t = 0.00046$$

$$n = 1200$$

$$I_n = 124$$

$$U_n = 440$$

$$P_n = 50000$$

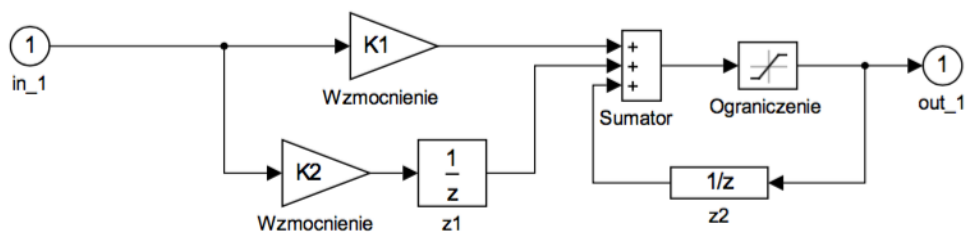
## Dyskretyzacja

Dyskretyzacji symulowanych regulatorów dokonaliśmy metodą *ekstrapolatora zerowego rzędu*. W Simulinku realizowany jest on przez bloki „Zero Order Hold” ich działanie polega na zatrzymaniu wartości sygnału wejściowego przez określony czas (czas próbkowania). Jak się okazuje z kilku przyczyn częstotliwość próbkowania równa dwukrotności częstotliwości granicznej jest tutaj niewystarczająca. Odtworzenie sygnału będzie możliwe dopiero, jeśli czas próbkowania będzie aż dziesięciokrotnie wyższy od częstotliwości granicznej sygnału. Tą z kolei wyznaczymy z częstotliwościowej charakterystyki Bodego.

Transmitancję układu dyskretnego policzymy w następujący sposób:

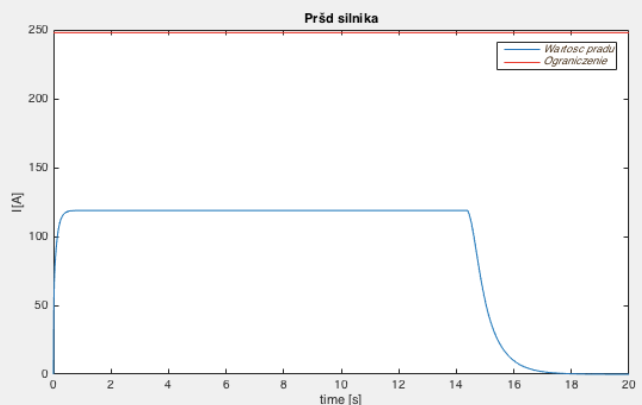
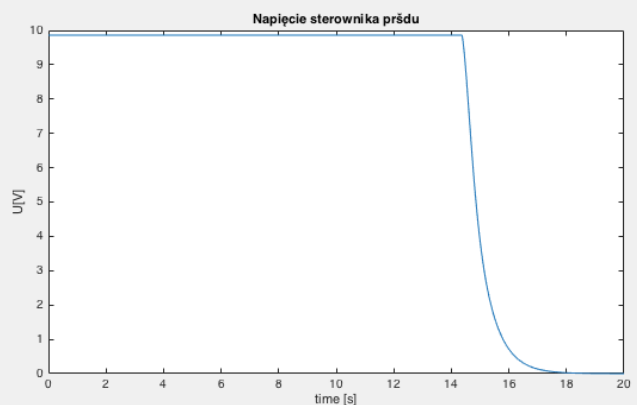
$$G(z) = \frac{z-1}{z} \cdot \mathcal{Z} \left[ \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \right]$$

Oto, jak przedstawia się schemat dyskretnego regulatora prądu:



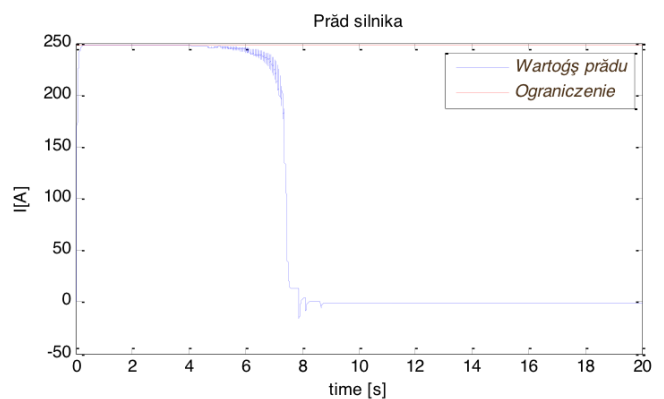
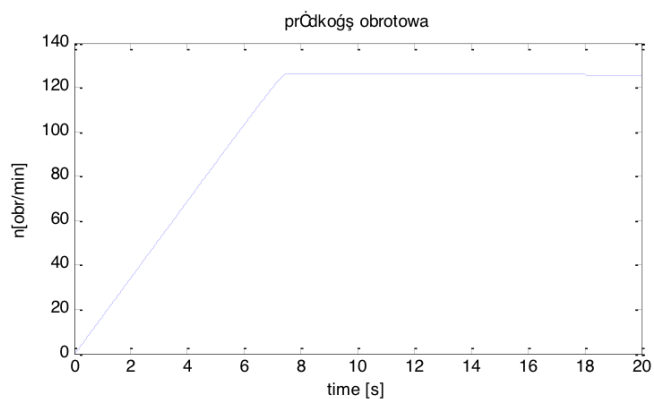
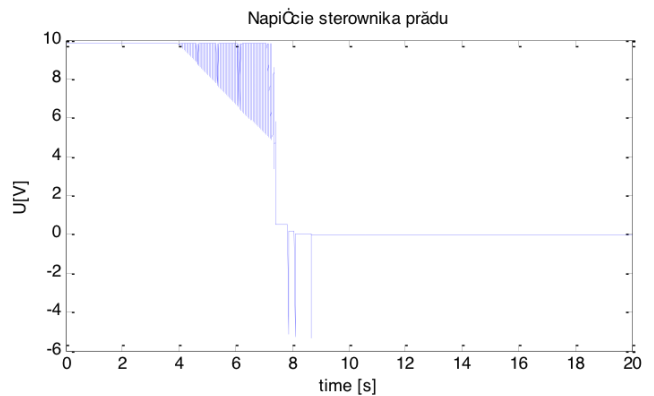
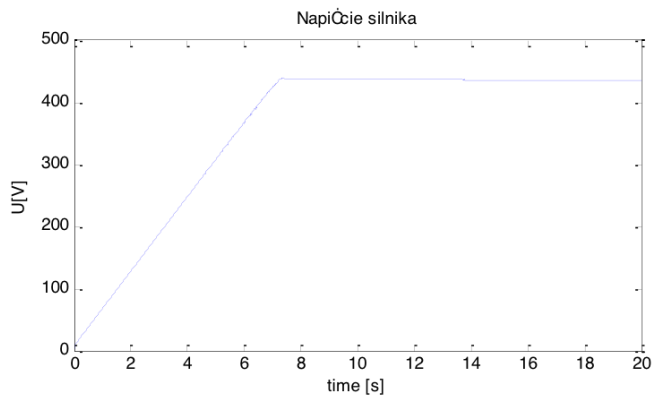
W naszej symulacji przyjęliśmy 100-krotnie większy czas próbkowania (częstotliwość próbkowania 100 razy wyższa od częstotliwości granicznej sygnału). Pozwoliło to regulatorom dyskretnym w pełni spełnić stawiane im założenia, a nasze obserwacje nie dostrzegły obserwowalnych uchybów sprawności ich regulacji względem regulatorów ciągłych.

Obok przedstawiono przebiegi czasowe regulatora dla źle dobranego, zbyt dużego czasu próbkowania.

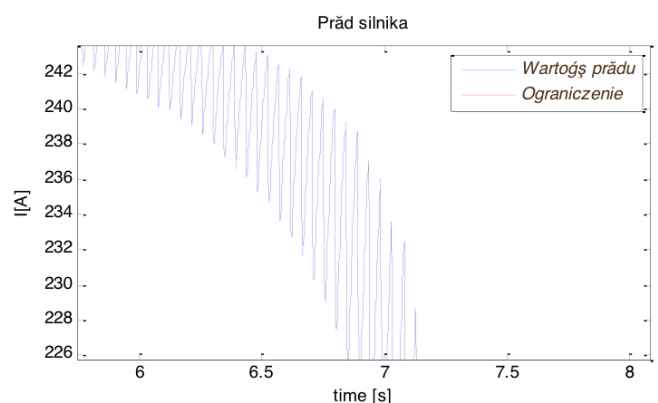
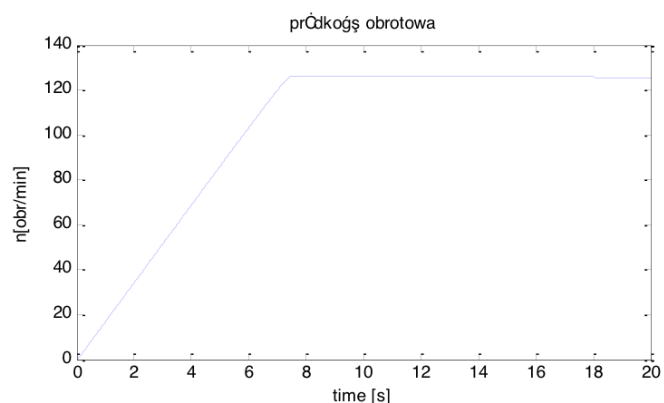
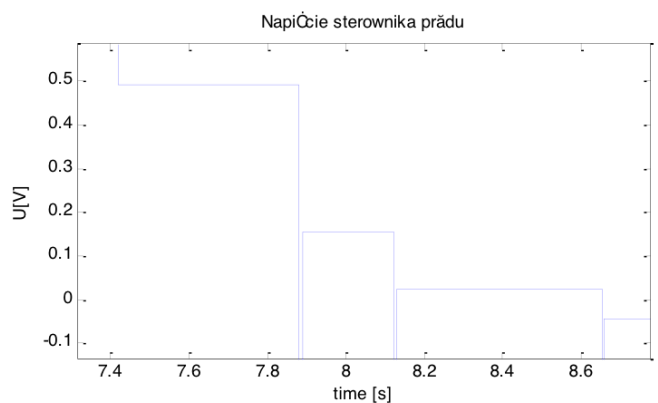
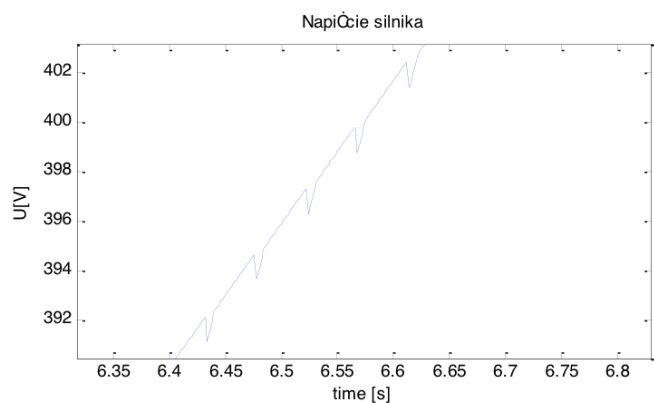


## Kwantyzatory

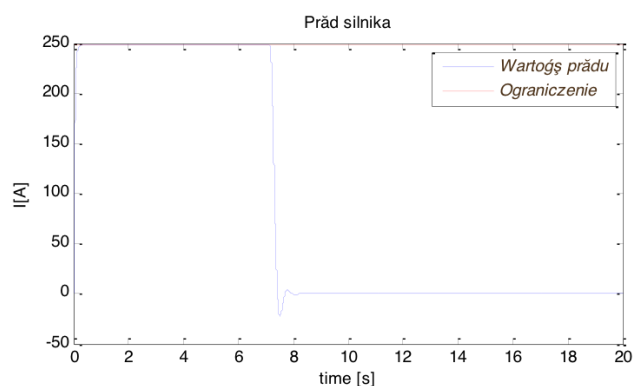
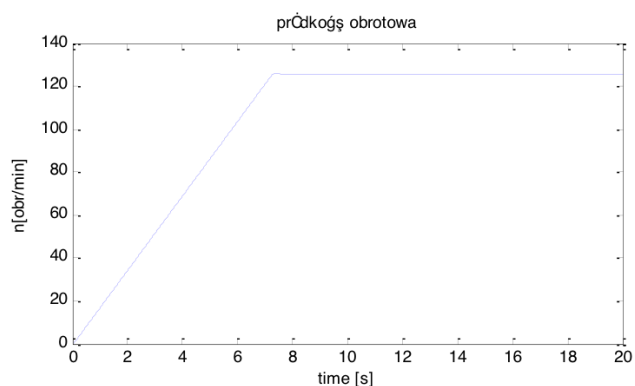
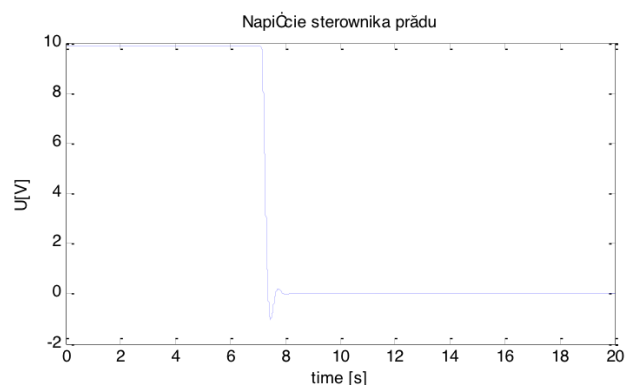
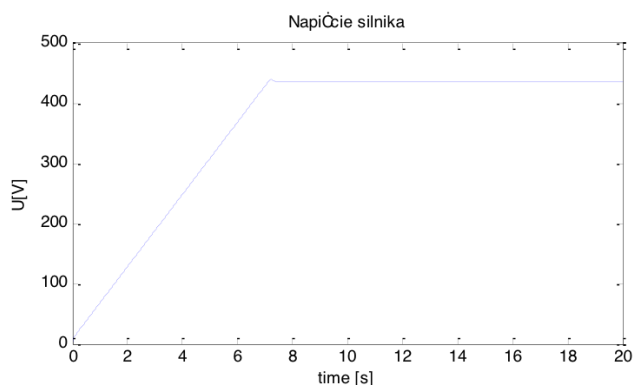
Wykonujemy 2 symulacje dla prawidłowo dobranego czasu próbkowania  $T_p$ . Pierwsza z symulacji jest wykonana dla źle dobranego kwantyzatora (zbyt duży). Układ momentami przestaje działać poprawnie, wpada w oscylacje, skutkiem czego regulacja nie jest przeprowadzona prawidłowo.



Poniżej w przybliżeniu obserwujemy oscylacje oraz przebieg związany z wielkością kwantu, czy też dokładnością, z jaką zapisujemy dane.

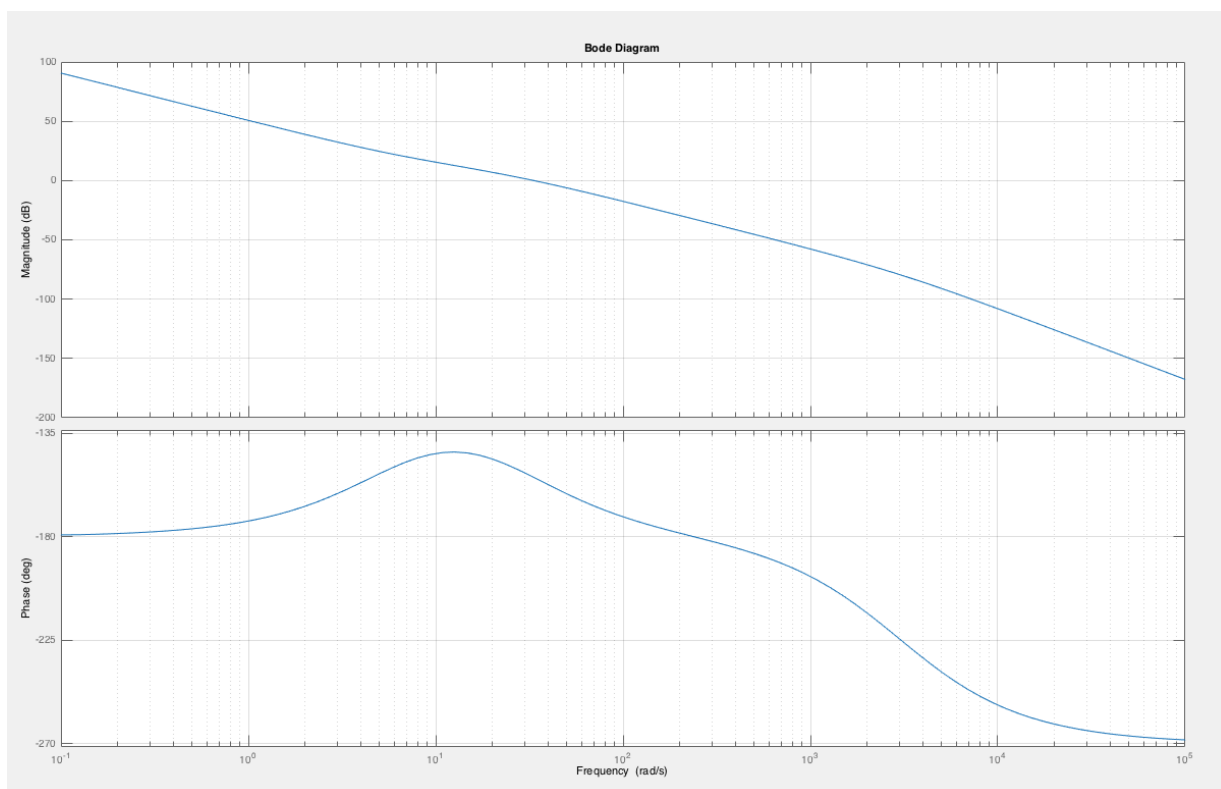


Następnie wykonujemy symulację dla poprawnie dobranego kwantyzatora, czyli na tyle małego aby błąd zapisu numerycznego był na tyle mały, aby został niedostrzegalny.

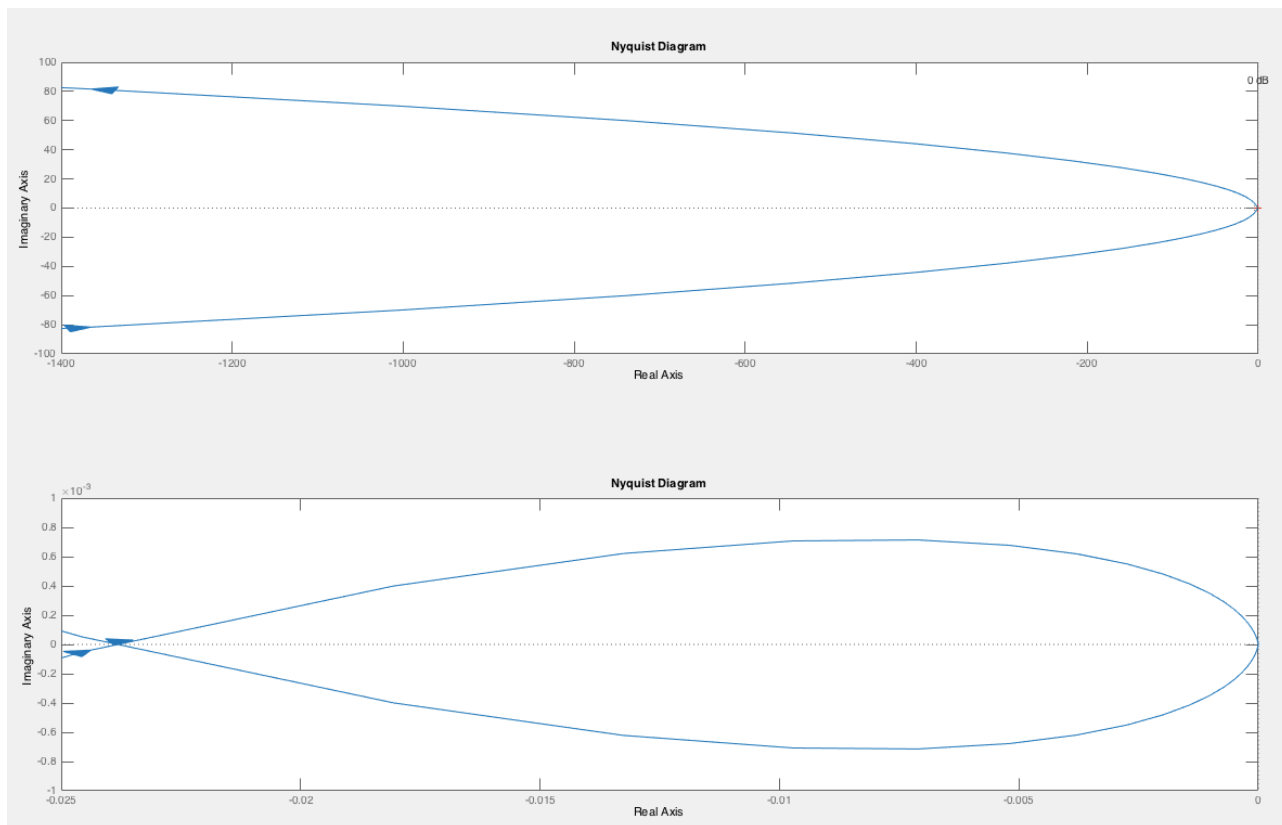


## Kryterium Nyquista

Z definicji owego kryterium wiemy, iż do zbadania stabilności układu zamkniętego z jakim mamy do czynienia konieczna nam będzie charakterystyka amplitudowo częstotliwościowa układu z otwartą pętlą. Po wyznaczeniu transmitancji układu otwartego wyznaczaliśmy niezbędne charakterystyki.



Aby jednak jednoznacznie określić stabilność układu odwołamy się do graficznych charakterystyk. Zobrazujemy je na płaszczyźnie zespolonej ( charakterystyki Nyquista ). Musimy jedynie upewnić się, że wyznaczona charakterystyka ( dla dobranych wcześniej nastaw regulatorów ) nie zawiera w sobie punktu  $(-1, j0)$ .



Powyżej przedstawiono charakterystykę Nyquista. Dolny wykres to powiększony fragment całej charakterystyki, w którym przebiegi się przecinają. Zauważmy, że do przecięcia dochodzi przed punktem  $-0.025$  na osi rzeczywistej co wskazuje na stabilność układu

Zakładając zgodnie z definicją, że punkt  $(-1, j0)$  będzie granicą stabilności układu, możemy wyznaczyć sobie zapas modułu ( bazując na naszej charakterystyce ).

Zapas modułu dla zamkniętego układu regulacyjnego to **41,75 ( razy )** oraz zapas fazy **26,78 [deg]**.

Maksymalne opóźnienie to natomiast **0.01354 [s]**.



Powyższe kroki wykonano dla układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. W takim układzie sygnał wejściowy nie zależy od aktualnego stanu wyjścia, a jedynie od wewnętrznego stanu obiektu (regulatora).

Transmitancja otwartego układu regulacji =

sys =

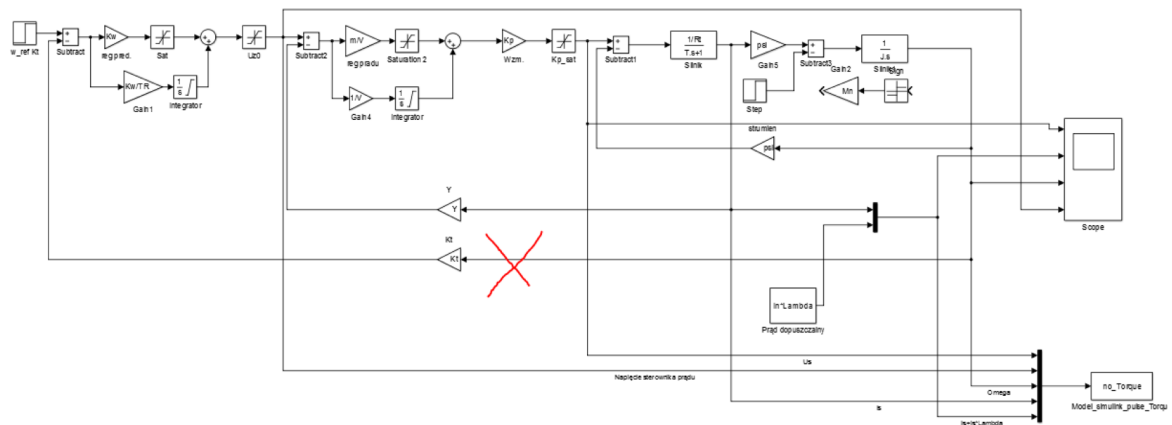
$$2.334 s^3 + 196.7 s^2 + 1138 s$$

---


$$5.661e-07 s^6 + 0.001763 s^5 + 0.177 s^4 + 3.346 s^3$$

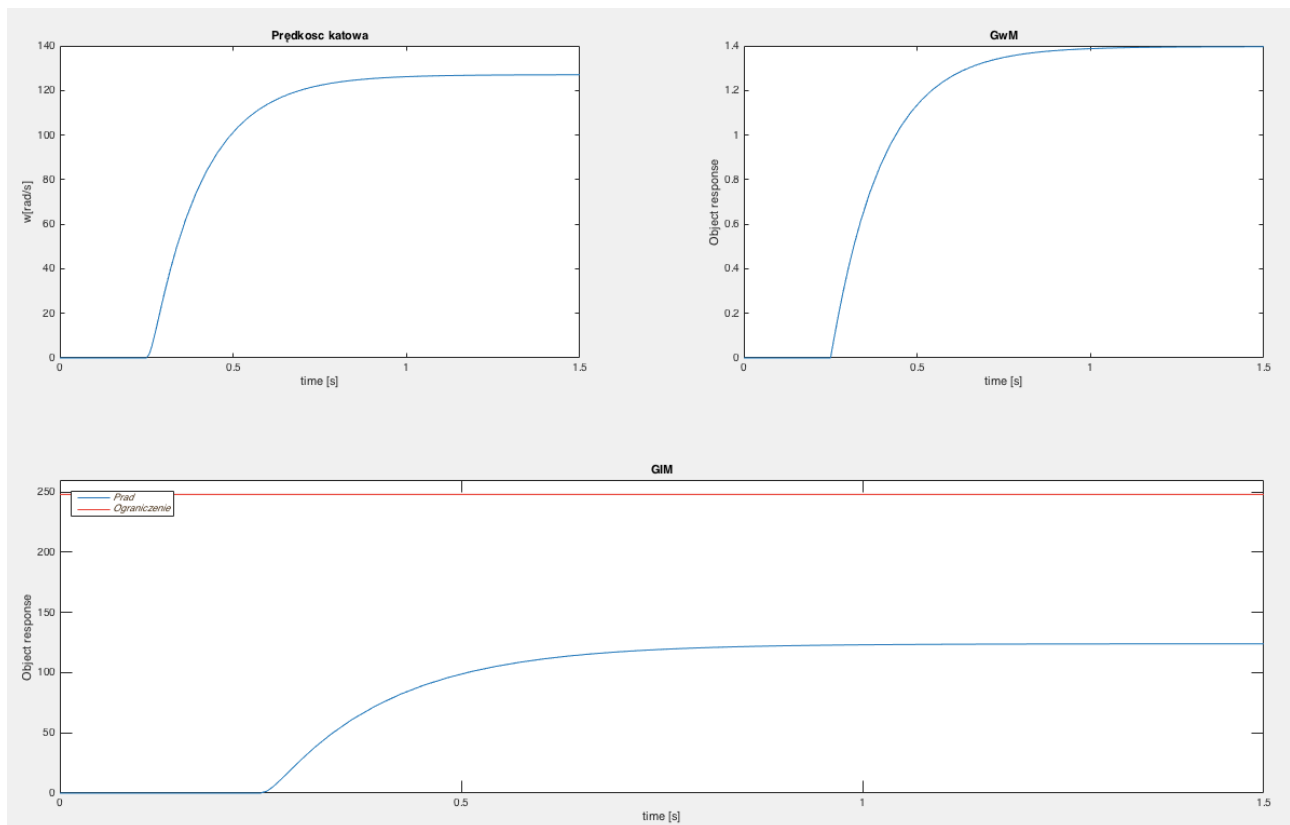
Continuous-time transfer function.

Miejsce otwarcia pętli sprzężenia zwrotnego



### 3. Uzyskane w symulacjach przebiegi

Pierwszym z prezentowanych przebiegów niech będzie odpowiedź regulatora na skok jednostkowy.



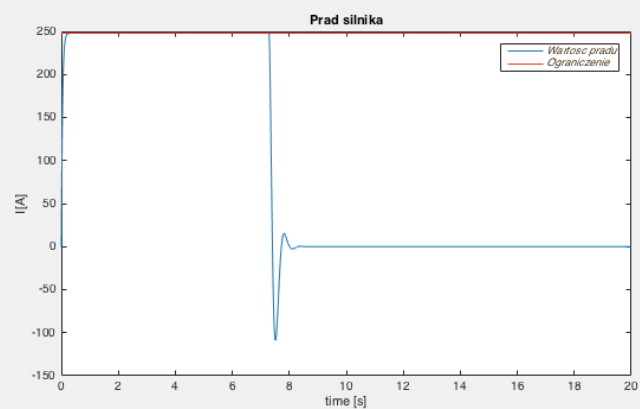
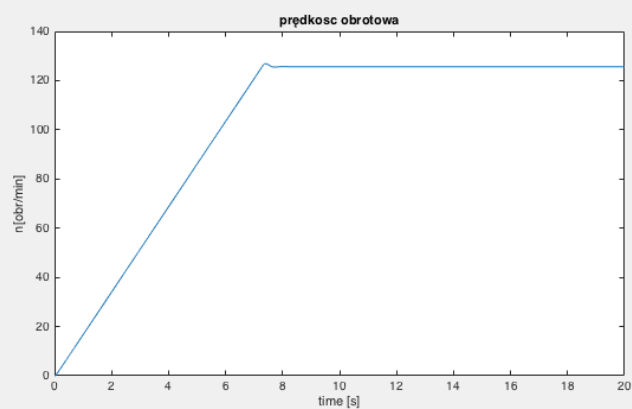
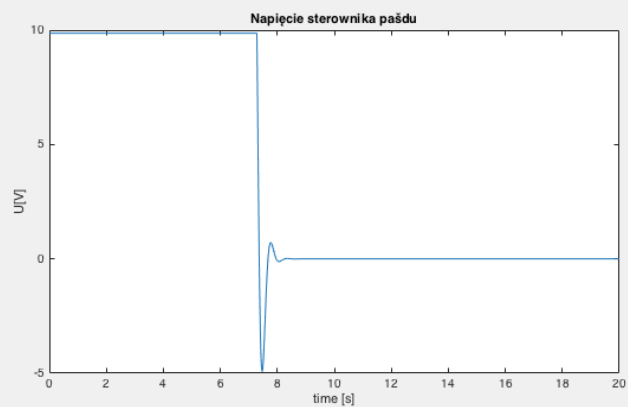
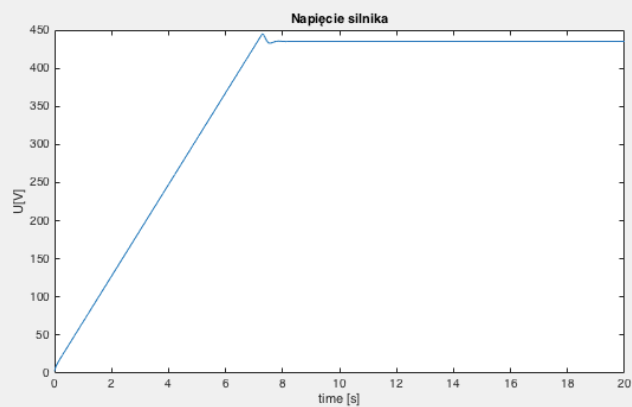
*Odpowiedz na skok jednostkowy.*

Na pierwszy rzut oka widać, że nieco powyżej 0.5s układ stabilizuje się ( odpowiedź na skok jednostkowy), wartość prądu twornika jest poniżej nakreślonej na wykresie linii ograniczenia znamionowego.

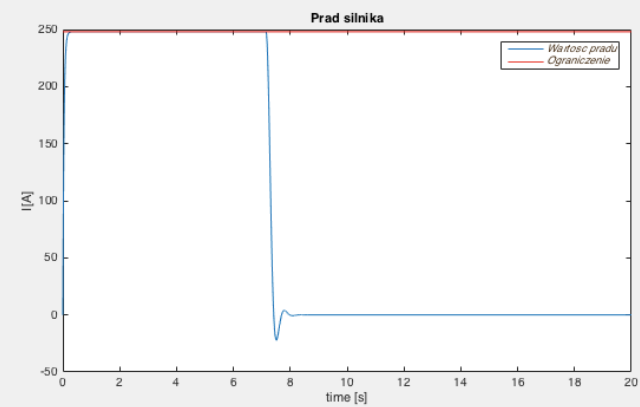
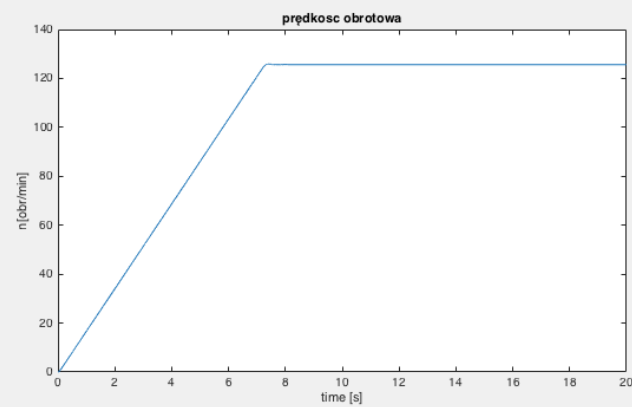
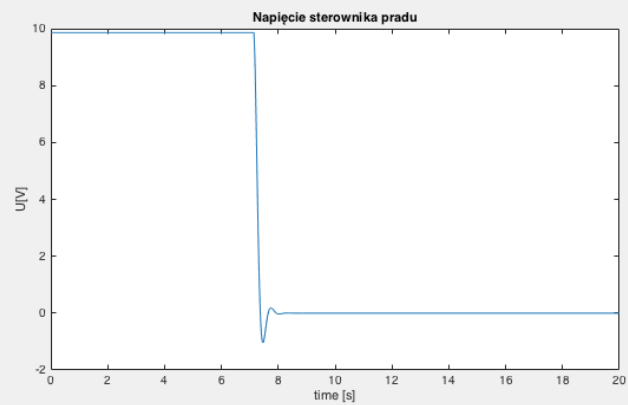
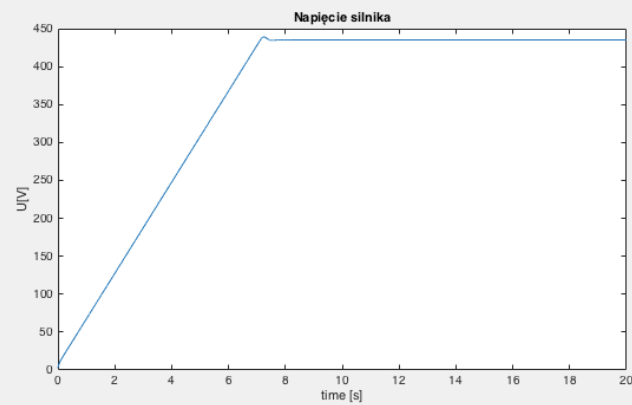
Poniżej przedstawiono rozruch i stabilizację regulatora dla silnika bez momentu obciążenia. Dla porównania wykres obok prezentuje ten sam przebieg dla dyskretnego regulatora prądu.

Wykresy pokazują płynne przejście z fazy rozruchu do wartości ustalonej prądu. Obydwa sposoby regulacji spełniają stawiane im założenia.

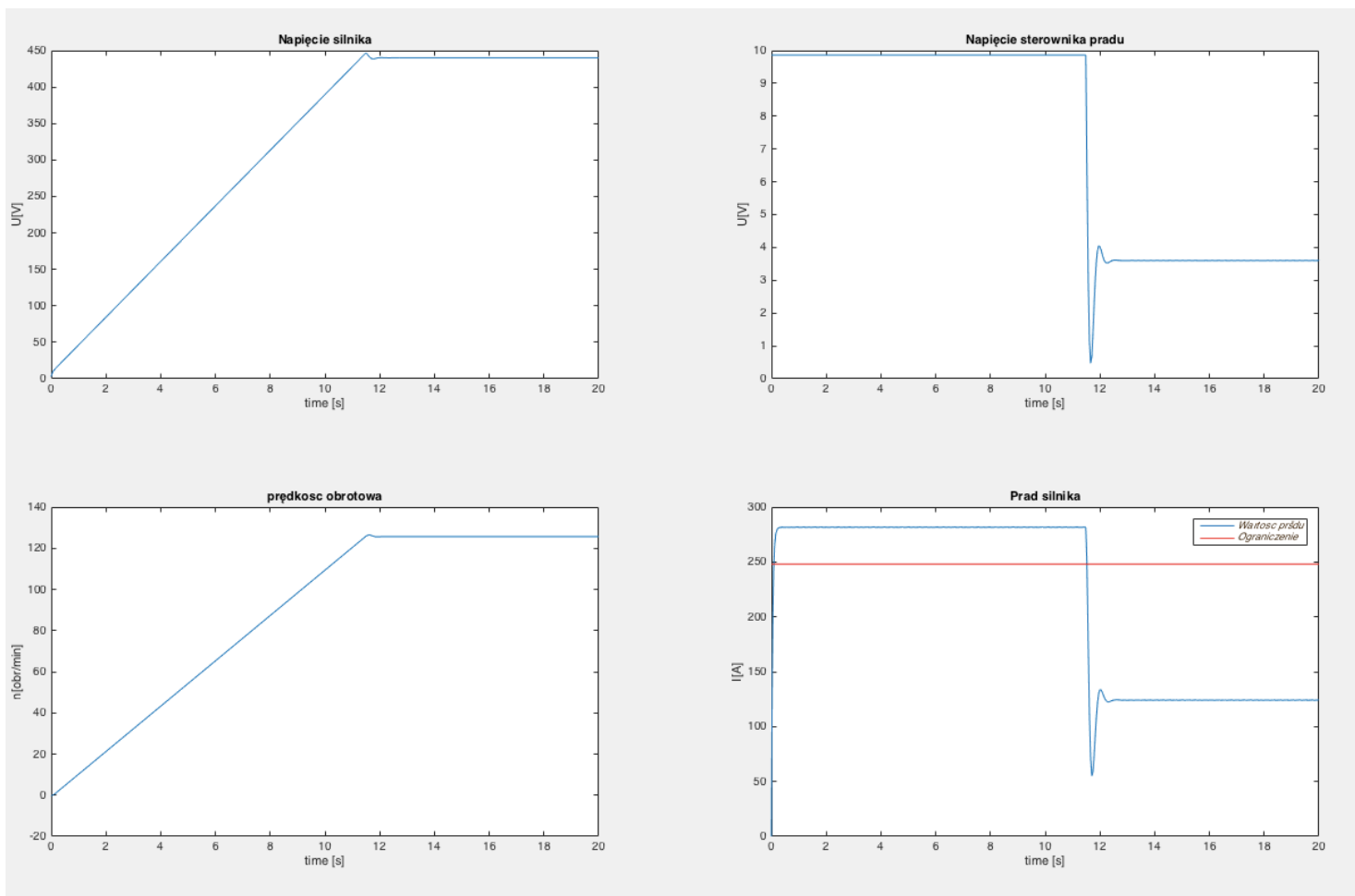
Porównajmy teraz przebiegi dla obydwu typów regulatora w przypadku, kiedy silnik obciążony zostanie momentem znamionowym (czynnym).



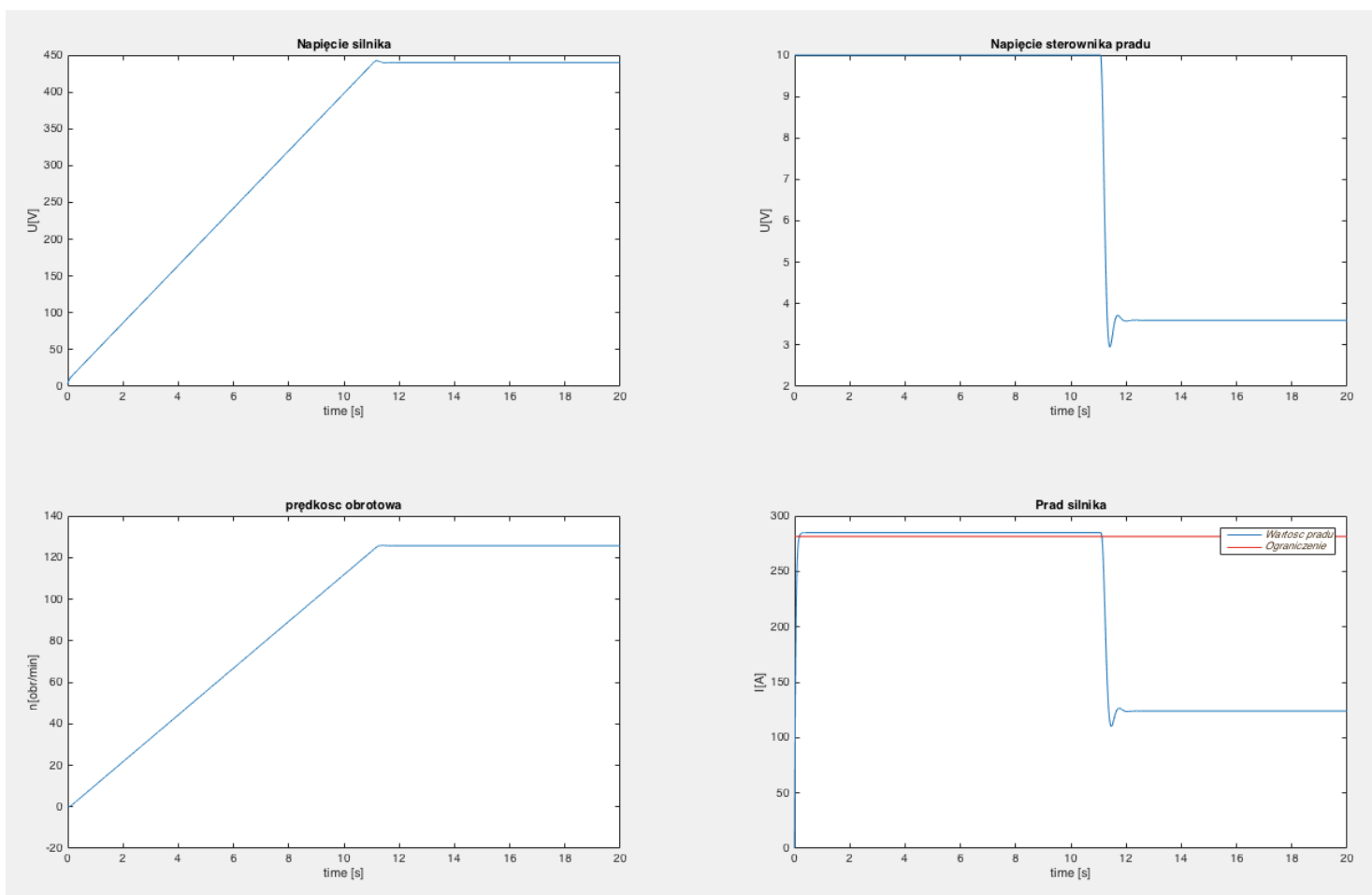
*Przebiegi dla regulatora ciągłego przy braku momentu obciążenia.*



*Przebiegi dla regulatora dyskretnego przy braku momentu obciążenia.*



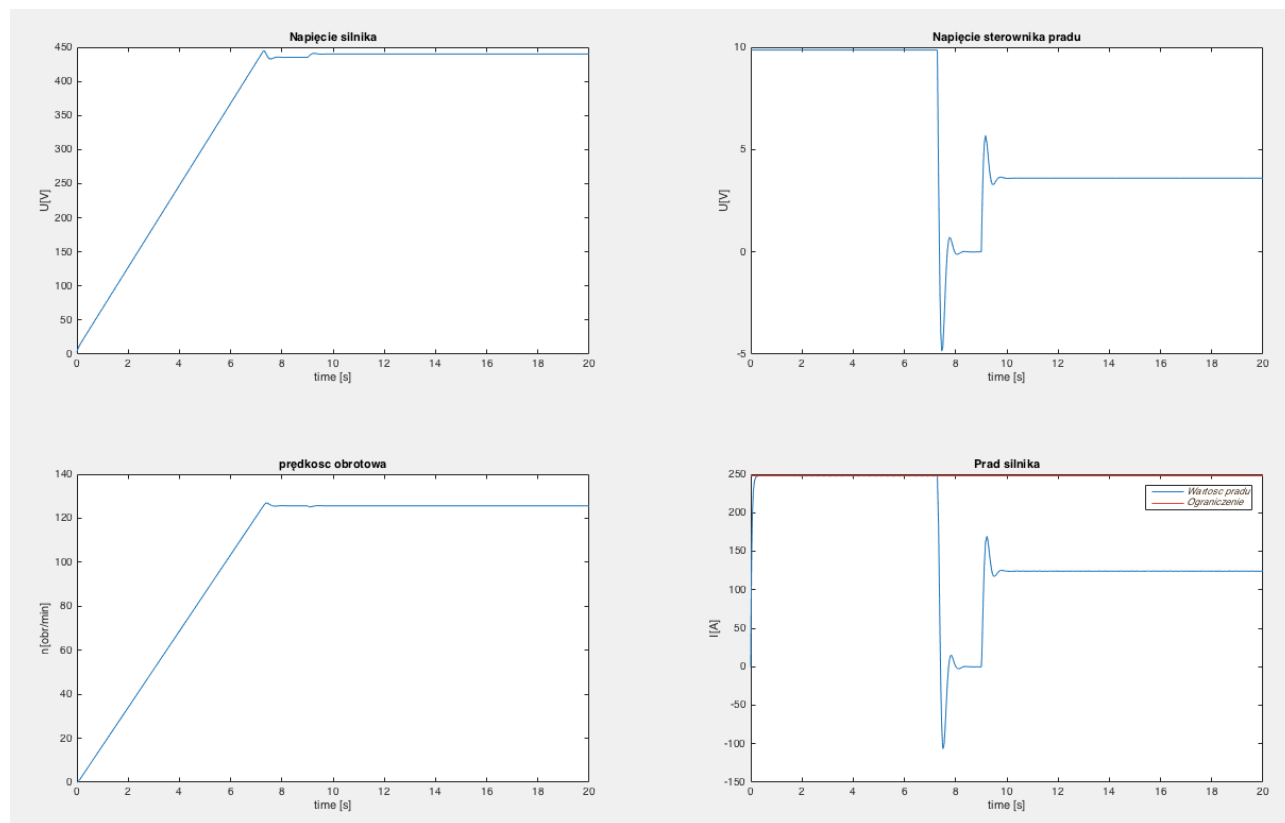
*Przebiegi dla regulatora ciągłego przy znamionowym momencie obciążenia*



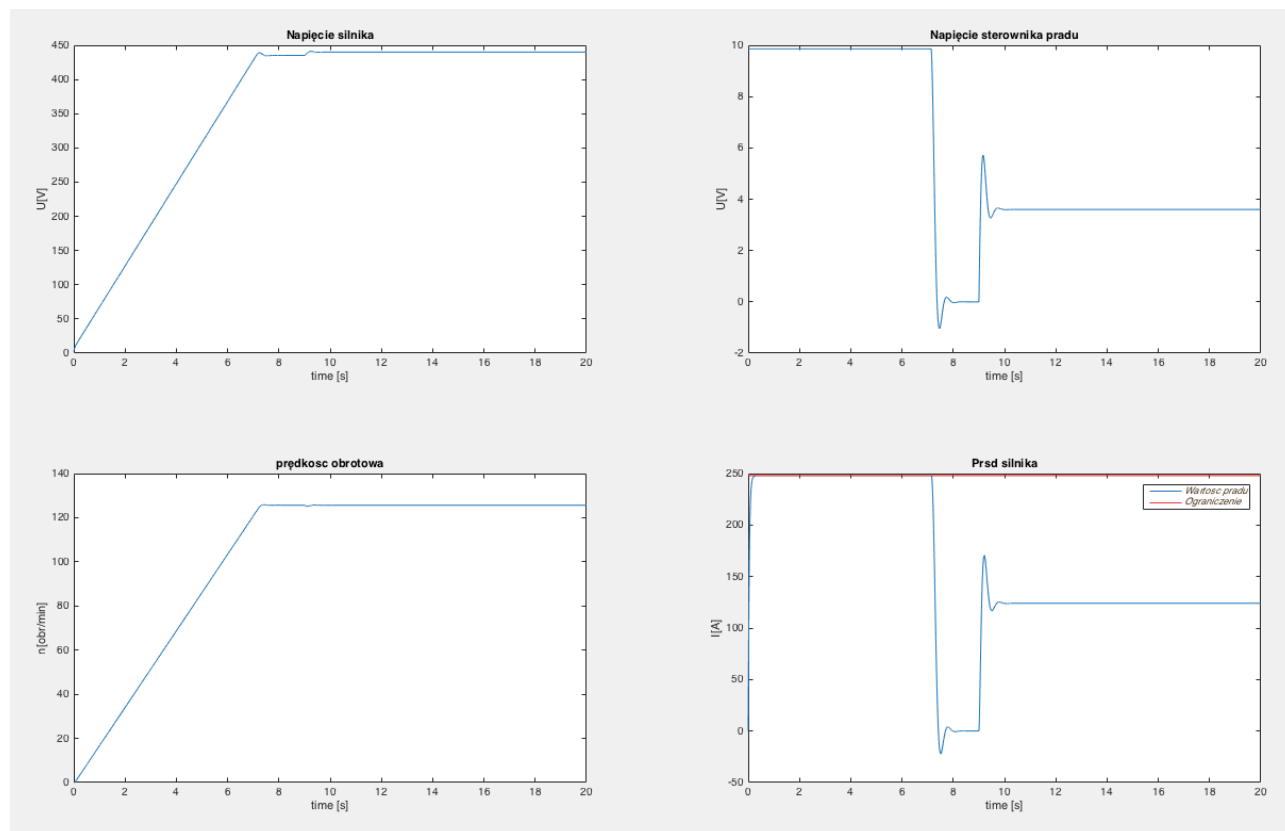
*Przebiegi dla regulatora dyskretnego przy znamionowym momencie obciążenia*

Kolejne przebiegi prezentują zachowanie układu regulacji ciągłej w przypadku kiedy zostaje on obciążony krótkim momentem uderowym.

Wahnięcie wartości prądu twornika szybko powraca do wartości ustalonej. Kiedy przyjrzymy się zmianom prędkości dostrzeżemy jedynie lekką niestabilność. Oznacza to, iż układ dobrze radzi sobie z wysokim momentem obciążenia, także wtedy kiedy ma on charakter impulsowy.

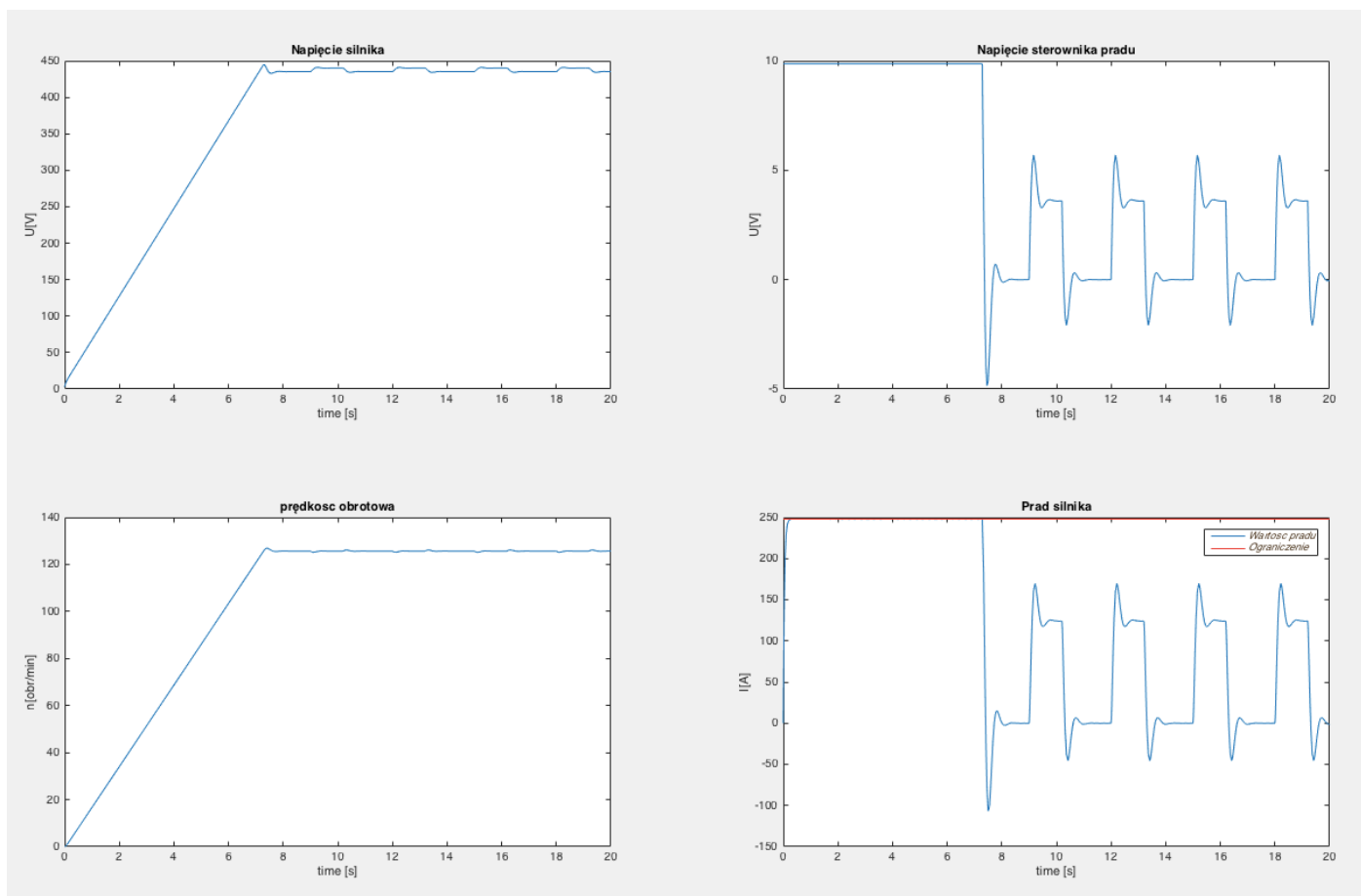


*Reakcja regulatora ciągłego na moment uderowy.*



*Reakcja regulatora dyskretnego na moment uderowy.*

Postanowiliśmy sprawdzić nasz układ regulacji dla przypadku, kiedy silnik obciążany będzie stale krótkimi impulsowymi momentami. Symulacja polegała na powtarzaniu obciążenia uderowego za każdy razem kiedy tylko regulator doprowadził prąd twornika do założonej wartości ustalonej. Oto efekt symulacji:



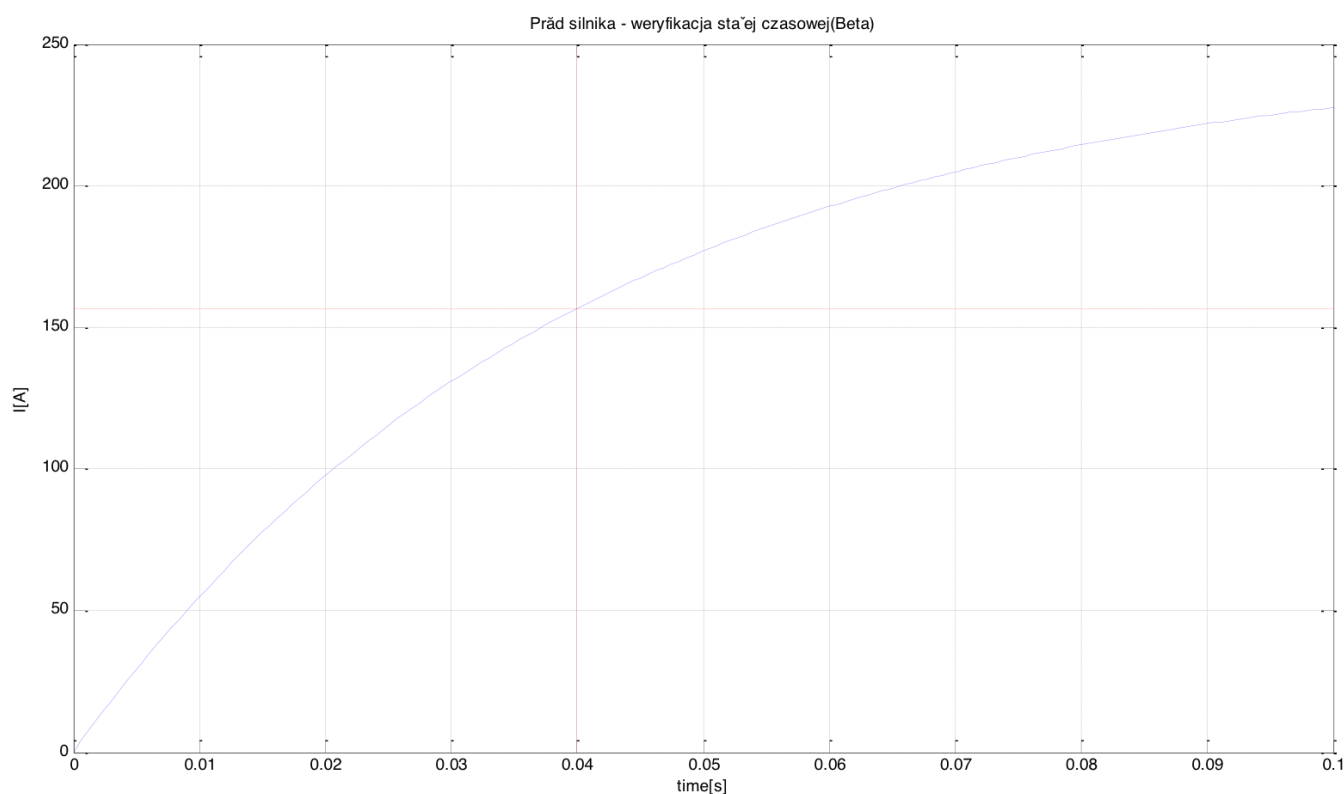
### *Zachowanie układu w przypadku obciążenia „impulsowym” momentem.*

Regulator jak widać zachowuje się w sposób w pełni przewidywalny dążąc po każdym „skoku” momentu obciążenia do stabilności. Na przebiegu obserwujemy jedynie niewielkie zawahania wartości napięcia silnika, natomiast wartość prędkości podczas obecności obciążenia uderowego zmienia się bardzo nieznacznie. Zarówno nadrzędny, jak i podrzędny regulator dbają o to, by zadana prędkość obrotowa pozostawała na tym samym poziomie poprzez zwiększanie wartości prądu twornika, a co za tym idzie momentu magnetycznego w chwilach, kiedy moment obciążenia zmienia swoją wartość.

Projektując i przeprowadzając symulacje dla regulatora o strukturze kaskadowej udało nam się poznać metodykę jego działania. Zastosowana struktura i dobrane przez nas w oparciu o kryterium modułowe / kryterium symetrii nastawy w pełni spełniają stawiane regulatorowi założenia. Testowany różnymi momentami obciążenia układ regulacji zarówno ciągłej, jak i dyskretniej zawsze dąży do ustalonych i zadanych wartości, a jego zmienne stanu pozostają zawsze poniżej narzuconym im znamionowym ograniczeniom.

Odwołując się do charakterystyk częstotliwościowych i kryterium Nyquista udało nam się też jednoznacznie stwierdzić stabilność układu. W granicach swojej stabilności regulator posiada ponad 40-krotny zapas modułu.

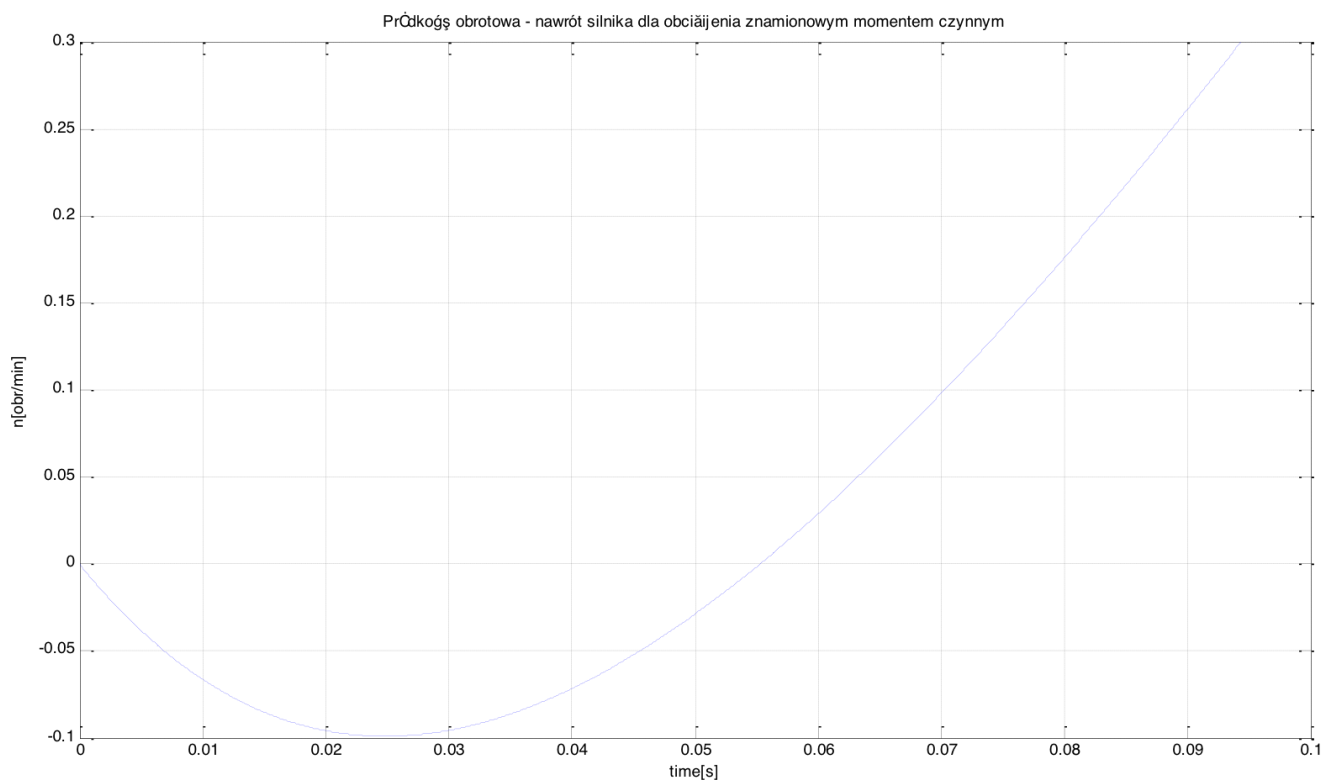
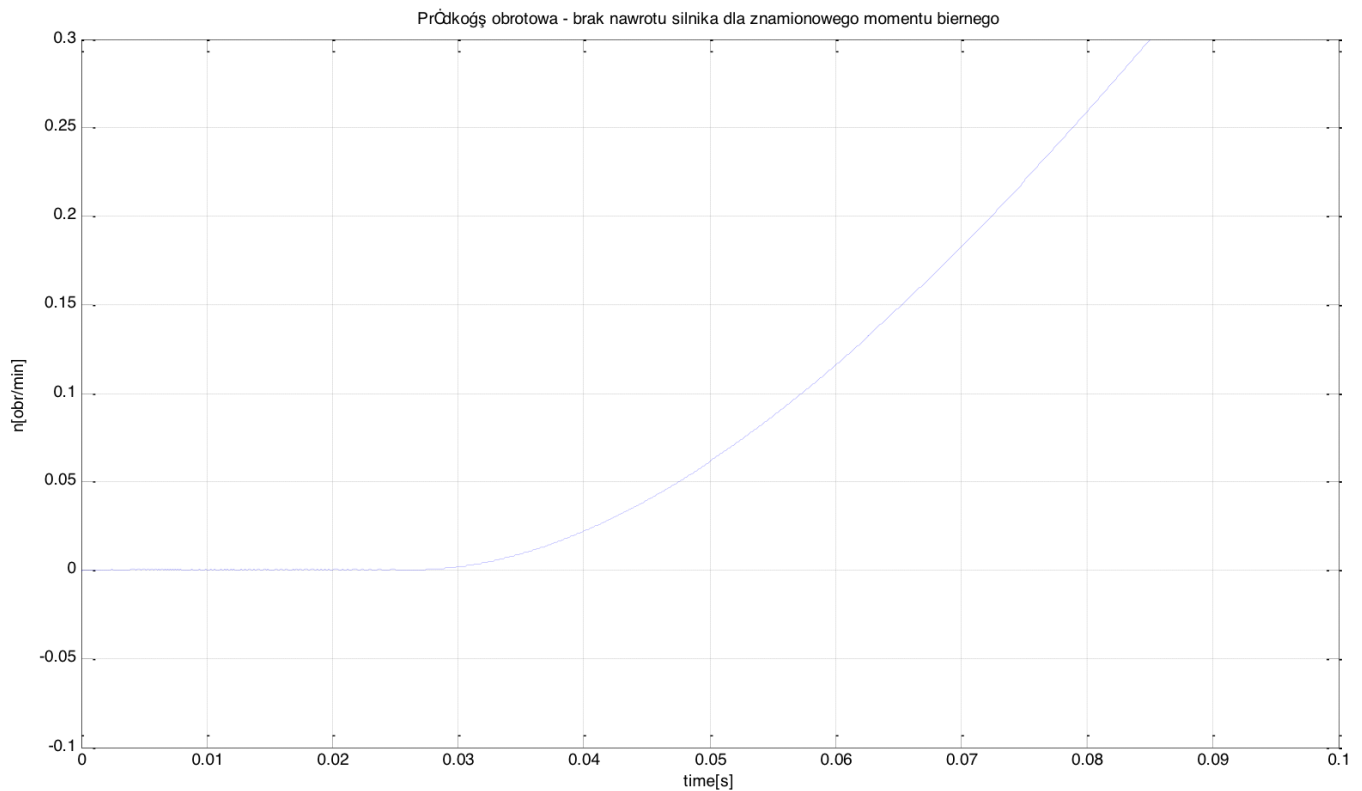
Prędkość silnika niezależnie od narzuconego obciążenia (brak, znamionowe, udarowe, pulsowe) pozostaje na stałym poziomie, dzięki regulacji prądu twornika dokonywanej przez regulator podrzędny omawianej struktury.



Na rysunku widzimy wyznaczoną stałą czasową odpowiedzi regulatora  $\beta = 0,04[s]$ . Dla czasu równego  $0.04s$  układ powinien osiągnąć wartość obliczaną wzorem  $2 \cdot \ln 0.632$ , czyli równą  $156,7[A]$ .

Uzyskany przebieg zgadza się z teorią, przez co układ uznajemy za skonstruowany poprawnie, a nastawy regulatorów za obliczone zgodnie ze wzorami.

Na poniższym przebiegu obserwujemy nawrót silnika(zmianę kierunku obracania) dla początkowych chwil regulacji. Wiąże się ona z przyłożonym momentem siły zmuszającym układ do obracania się w przeciwnym kierunku aniżeli pożądanym.



Umieszczony wyżej wykres przedstawia zależność prędkości obrotowej od czasu obiektu obciążonego znamionowym momentem biernym. W przeciwieństwie do momentu czynnego nie obserwujemy na przebiegu zmiany kierunku obracania się silnika. Wiąże się to z charakterem obciążenia, który zależy od prędkości kątowej. Zauważamy analogię pomiędzy obciążeniem biernym a oporem powietrza, która dobrze obrazuje to zjawisko.



