|  |
| --- |
| **Akademia Górniczo-Hutnicza**  im. Stanisława Staszica w Krakowie |
|  |
| **Kaskadowa struktura regulacji napędem**  Projekt z przedmiotu *Komputerowe układy sterowania* |
| |  |  | | --- | --- | | **Autorzy:** | Tomasz Kielar  Tomasz Telesz | | **Wydział:**  **Kierunek:** | EAIiIB  Elektrotechnika | |
|  |
| Kraków, 19.06.2018 |

Celem projektu było zaprojektowanie modelu kaskadowej struktury regulacji napędem prądu stałego, symulacja zaprojektowanego układu za pomocą środowiska *Matlab* z pakietem *Simulink* oraz zapoznanie się ze stanami przejściowymi zmiennych stanu napędu prądu stałego podczas rozruchu i stabilizacji prędkości obrotowej.

1. Wstęp

Silniki prądu stałego, ze względu na rozwój energoelektroniki, są wypierane przez tańsze i bardziej wytrzymałe silniki prądu przemiennego. Jednak zaletą silników prądu stałego jest łatwiejsze sterowanie, ponieważ mają one znacznie prostszy model matematyczny.

Najczęściej stosowanym silnikiem prądu stałego jest silnik obcowzbudny. Jest to taki silnik, w którym uzwojenie wzbudzające jest zasilane ze źródła napięcia innego niż uzwojenie twornika. Opisany jest on układem równań przedstawionym poniżej:

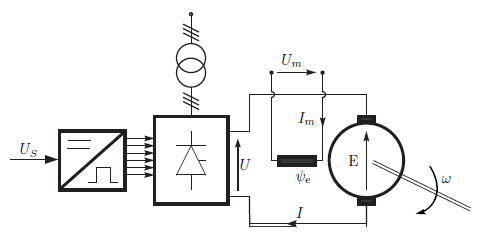
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

gdzie: – prędkość obrotowa silnika  
 – prąd twornika  
 – znamionowy strumień skojarzony rotacyjnie z uzwojeniem twornika  
 – indukcyjność całkowita  
 T – elektromagnetyczna stała czasowa  
 – moment bezwładności napędu i agregatu technologicznego  
 – wzmocnienie wzmacniacza mocy  
 – moment obciążenia  
 – napięcie sterujące wzmacniaczem mocy

Model matematyczny (1) obowiązuje przy następujących założeniach:

* wzmacniacz mocy jest obiektem bezinercyjnym o stałym wzmocnieniu ,
* napęd pracuje w zakresie prądów ciągłych,
* proces komutacji nie wpływa na zewnętrzne mierzalne parametry napędu.

Na rysunku 1 poniżej przedstawiono schemat napędu elektrycznego z obcowzbudnym silnikiem prądu stałego.



Rys.1. Napęd elektryczny z obcowzbudnym silnikiem prądu stałego.

1. Parametry silnika

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tabela 1. Zadane parametry silnika. | | |
|  | 54 kW | Moc znamionowa |
|  | 440 V | Napięcie znamionowe zasilania uzwojenia twornika |
|  | 130,7 A | Prąd znamionowy twornika |
|  | 1450 obr/min | Prędkość znamionowa |
|  | 0,254 Ω | Rezystancja uzwojeń twornika |
|  | 1,63 mH | Indukcyjność uzwojeń twornika |
|  | 0,97 | Moment bezwładności |

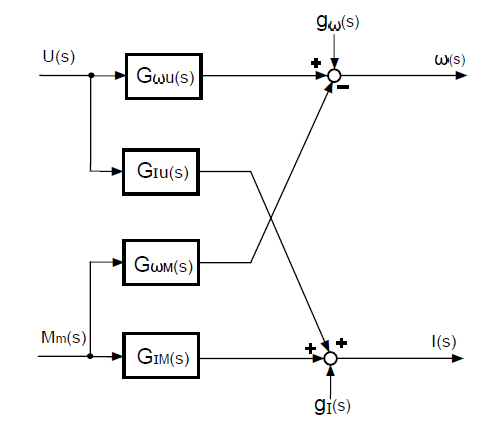
Do realizacji projektu przyjęto dopuszczalną krotność twornika na poziomie oraz dopuszczalną krotność pochodnej prądu twornika na poziomie .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tabela 2. Obliczone parametry silnika | | |
|  | 151,8436 rad/s | Prędkość kątowa |
|  | 2,6791Wb | Strumień elektryczny |
|  | 0,0064 H/Ω | Stała elektromagnetyczna |
|  | 5,82 | Moment bezwładności |
|  | 0,206s | Elektromechaniczna stała czasowa silnika |
|  | 261,4 A | Dopuszczalny prąd twornika |

Parametry przedstawione w tabeli 2 powyżej policzono ze wzorów 2-7 poniżej.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

1. Modele w postaci transmitancji

  
Rys. 2 Schemat blokowy silnika obcowzbudnego

Wyznaczono następujące modele silnika obcowzbudnego przedstawionego na rysunku 2 w postaci transmitancji (8-11):

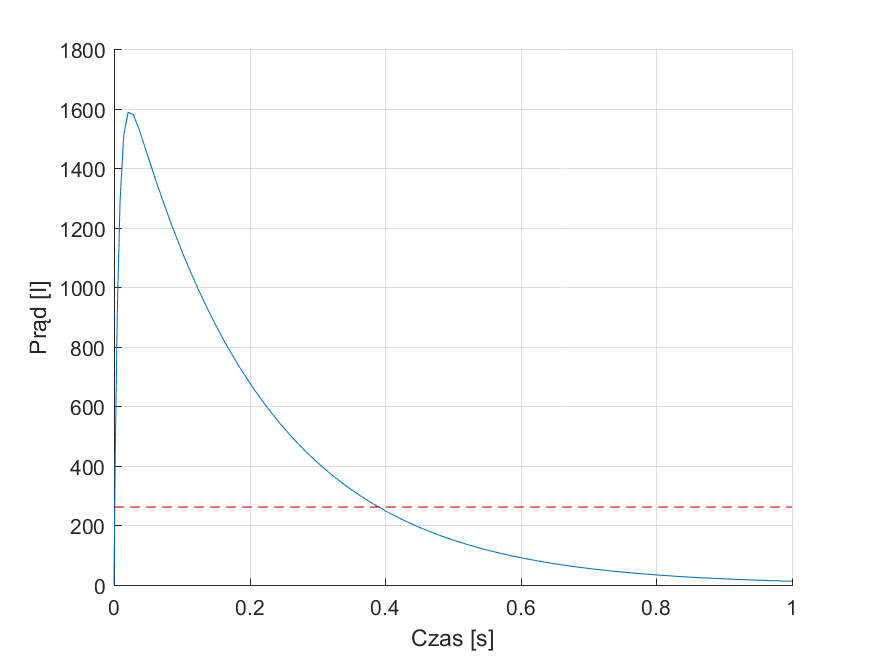
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

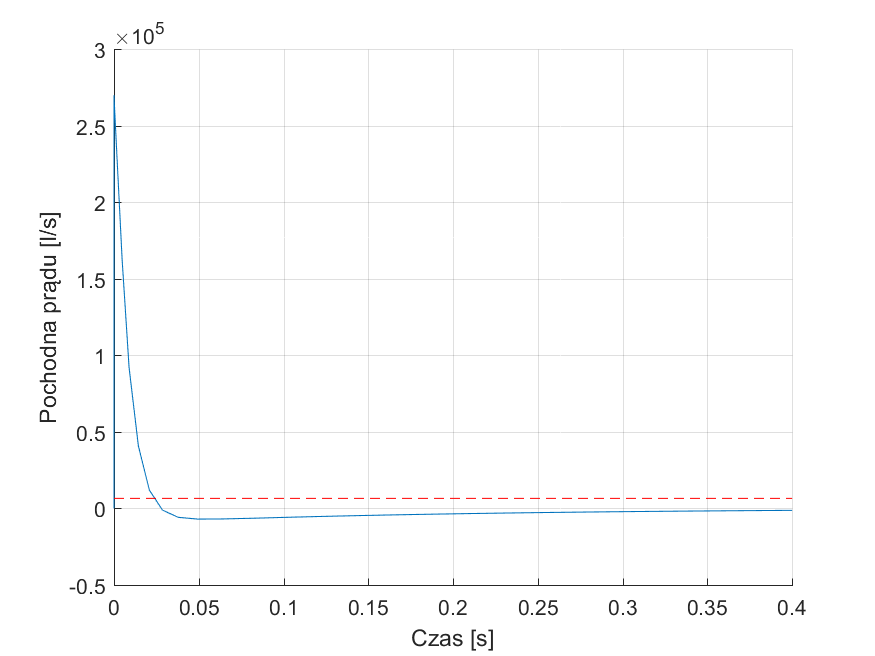
Zastosowano ograniczenia do prawidłowej pracy układu (12-14):

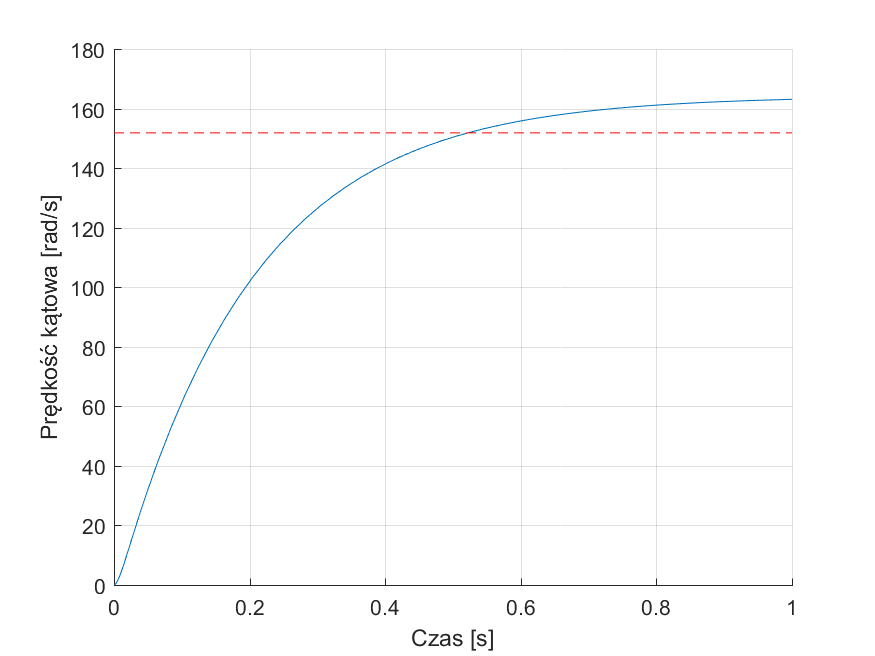
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

Na rysunkach 3-5 poniżej przedstawiono odpowiedzi skokowe prądu twornika, jego pochodnej oraz prędkości kątowej przy napięciu zasilania równym . Na wykresy naniesiono również wyżej obliczone ograniczenia.

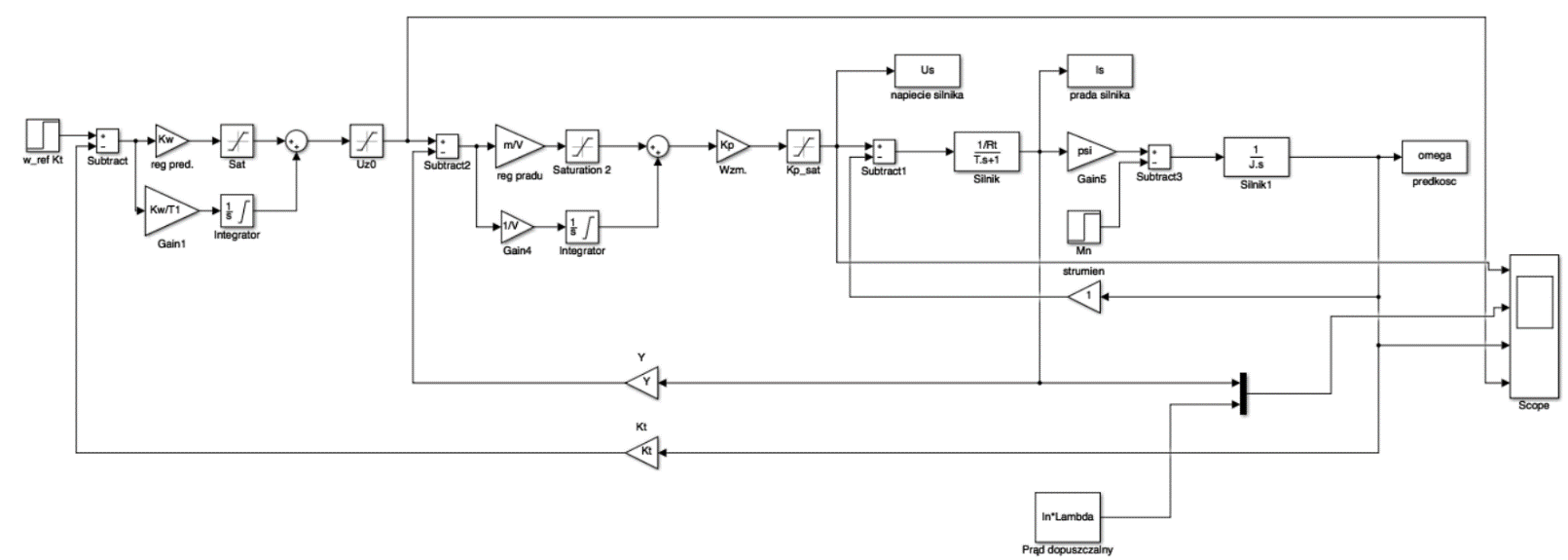
Zastosowana regulacja kaskadowa pozwala lepiej kontrolować zmienne stanu silnika, na które nałożone są ograniczenia. W przypadku tego projektu są ograniczenia prądu i jego pochodnej oraz obrotów. W przypadku niespełnienia wspomnianych założeń silnik zepsułby się (np. na skutek przepalenia uzwojeń).

  
Rys.3. Odpowiedź skokowa prądu twornika dla napięcia .

  
Rys.4. Pochodna prądu twornika dla napięcia .

  
Rys.5. Odpowiedź skokowa prędkości kątowej dla napięcia .

1. Wyznaczenie nastaw regulatorów prądu i prędkości dla regulacji ciągłej.

  
Rys. 6 Schemat kaskadowej struktury regulatora zrealizowany w programie SIMULINK

W projekcie przyjęto:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

## Regulator prądu

Napęd spełnia warunek , założono więc regulator o transmitancji (19):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Wyznaczono:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

Obliczono wzmocnienie , parametry regulatora i oraz ograniczenie (23-26).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

* 1. Regulator prędkości

W projekcie rozważono dwa rodzaje regulatora prędkości - P oraz PI, dla których wyznaczono nastawy przedstawione poniżej.

* + 1. Regulator P

Współczynnik wzmocnienia regulatora P wynosi (27):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

* + 1. Regulator PI

Założono regulator o transmitancji (28):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

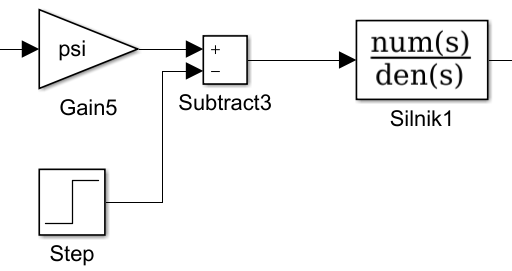
Wyznaczono parametry i według kryterium symetrycznego (29-30):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

* 1. Symulacje

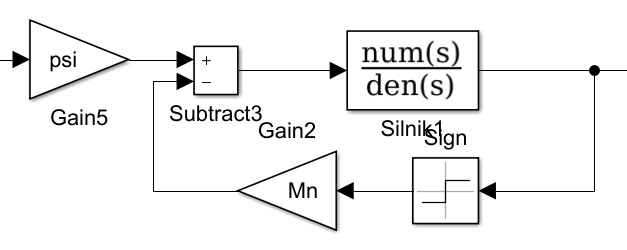
Wykonano symulacje rozruchu bez momentu obciążenia, rozruchu z obciążeniem udarowym, rozruchu ze znamionowym momentem czynnym oraz rozruchu ze znamionowym momentem biernym dla opcji z regulatorem prędkości P oraz PI. Wyniki oraz fragmenty schematów blokowych przedstawiono na rysunkach 7-13 poniżej.

Rys. 7. Rozruch bez momentu obciążenia



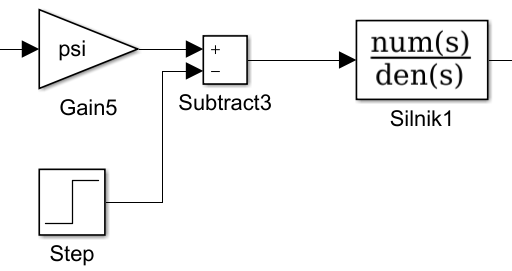
Rys.8. Obciążenie momentem czynnym

  
Rys. 9. Rozruch ze znamionowym momentem czynnym



Rys.10. Obciążenie momentem biernym

  
Rys. 11. Rozruch ze znamionowym momentem biernym



Rys.12. Obciążenie momentem udarowym w 5s (Step time = 5s)

  
Rys. 13. Rozruch z momentem udarowym w 5 sekundzie

1. Wyznaczanie zapasu modułu, fazy oraz dopuszczalnego opóźnienia, które doprowadzi do niestabilności układu regulacji – na podstawie charakterystyk Nyquista i Bodego

Przyjmując matematyczny model przekształtnika tyrystorowego (31), wyznaczono zapas modułu i fazy układu regulacji.

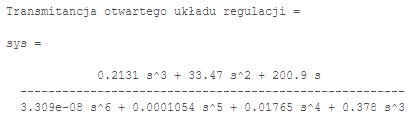
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

gdzie ms

Posłużono się charakterystykami Nyquista i Bodego (wyznaczonych dla układów otwartych). Przedstawiono je na rysunkach 14-15.

  
Rys.14. Charakterystyki Bodego dla układu otwartego

  
Rys.15. Charakterystyki Nyquista dla układu otwartego



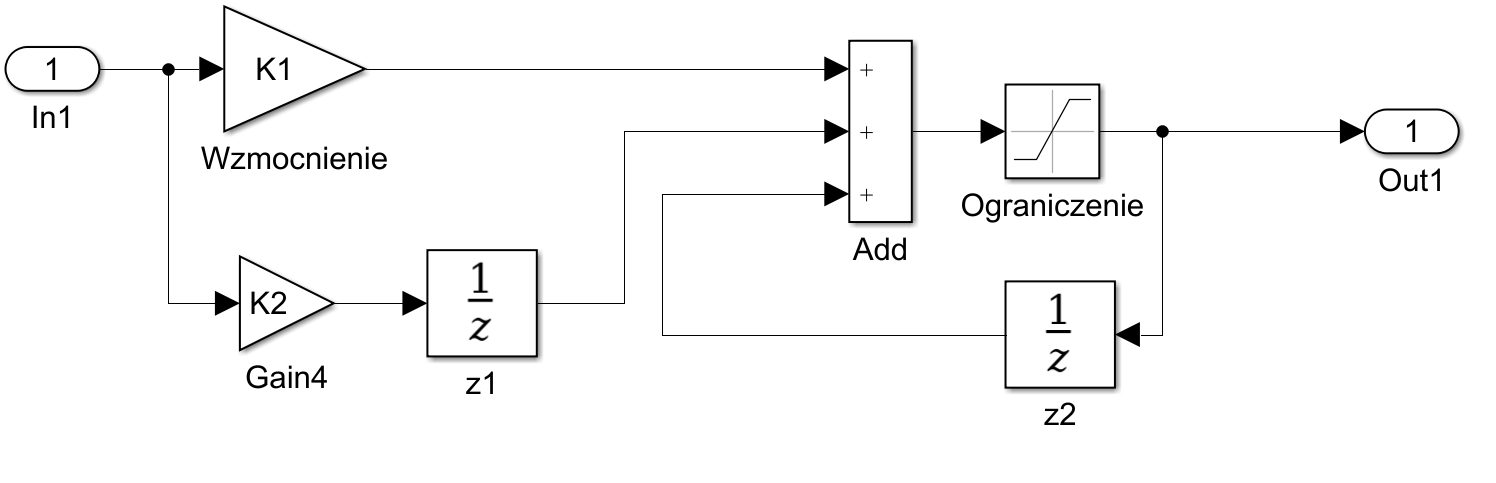
Powołując się na kryterium stabilności Nyquista można sformułować wniosek, że układ zamknięty jest stabilny, ponieważ wykres Nyquista układu otwartego nie obejmuje punktu (-1, j0).

Zapas modułu, fazy i dopuszczalne opóźnienie wyliczono za pomocą funkcji *margin* dostępnej w środowisku *Matlab*. Otrzymano następujące wyniki:

1. Dyskretyzacja regulatorów działania ciągłego – porównanie dla różnych czasów próbkowania

Dokonano dyskretyzacji regulatorów działania ciągłego korzystając ze wzoru (32), a następnie wykonano symulacje dla czasu próbkowania dobranego prawidłowo (Tp=0,004) oraz zbyt dużego (Tp=0,016).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Rys.16. Schemat dyskretnego regulatora prądu

W zależności od czasu próbkowania otrzymano różne przebiegi. Przedstawiono je na rysunku 17.

Rys.17. Charakterystyka porównawcza dla różnych czasów próbkowania.

1. Dyskretyzacja regulatorów działania ciągłego ze stałoprzecinkowym przetwarzaniem sygnałów – doprowadzenie do powstania cyklu granicznego

Do struktury z poprzedniego punktu dodano kwantyzatory i doprowadzono do powstania cyklu granicznego (brak stabilizacji przebiegów). Poniżej załączono wyniki symulacji (rys.18-21) dla 22 bitów, co powoduje cykl graniczny do którego mieliśmy doprowadzić.

Rys.18. Rozruch bez momentu obciążenia - cykl graniczny.

Rys.19. Rozruch ze znamionowym momentem czynnym - cykl graniczny.

  
Rys.20. Rozruch ze znamionowym momentem biernym - cykl graniczny.

Rys.21. Rozruch bez momentu obciążenia i moment udarowy w 2 sekundzie - cykl graniczny.

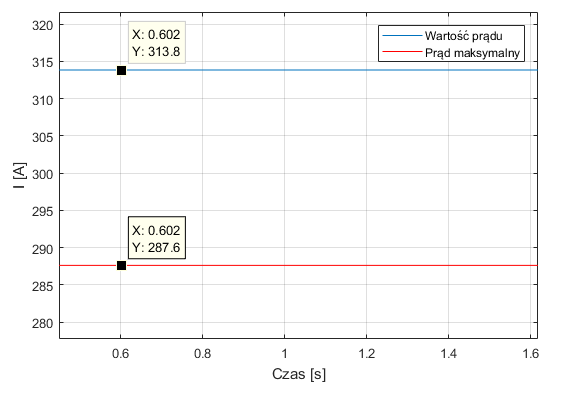
1. Rozruch napędu z momentem obciążenia

Wykonano symulacje rozruchu napędu z momentem obciążenia przedstawioną na rysunku 19 poniżej. Analogicznie do wyników poprzednich symulacji prąd silnika przekracza dopuszczalną wartość. Wartość ta jest wyznaczalna analitycznie (32). Do jej obliczenia założono, że moment jest stały (co do wartości), a sterowanie u(t) równe 0. W wyniku tego działania otrzymano wartość prądu .

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

Wartość ta jest zgodna z wynikiem symulacji, co przedstawiono na rysunku 22.

Rys.22. Rozruch ze znamionowym momentem czynnym.

Rys.23. Symulacja prądu silnika dla rozruchu ze znamionowym momentem czynnym.

1. Rozruch napędu ze znamionowym momentem biernym oraz z obciążeniem udarowym

Przeprowadzono również symulację rozruchu z momentem udarowym następującym w 5 sekundzie dla regulacji ciągłej, dyskretnej bez kwanty zera i dyskretnej z kwantyzerem. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 24-26.

  
Rys.24. Rozruch bez momentu obciążenia i moment udarowy w 5 sekundzie dla regulacji ciągłej

  
Rys.25. bez momentu obciążenia i moment udarowy w 5 sekundzie bez kwantyzera

  
Rys.26. Rozruch bez momentu obciążenia i moment udarowy w 5 sekundzie z kwantyzerem

1. Podsumowanie

W projekcie zaprojektowano model kaskadowej struktury regulacji napędem prądu stałego z uwzględnieniem dwóch stopni regulacji – prądu i prędkości. Wykonano odpowiednie symulacje za pomocą środowiska *Matlab* i zapoznano się ze stanami przejściowymi zmiennych stanu napędu.

Zestawiono wyniki dla dwóch typów regulacji prędkości – P i PI. Regulator PI sprawia, że prędkość osiąga zadany poziom szybciej niż z regulatorem typu P, ale występują przeregulowania.

Dyskretyzacja regulatora ciągłego potrzebna jest, aby można było zaimplementować zaprojektowany regulator na mikroprocesorze. Parametry zapewniające prawidłowe działanie regulatora zdyskretyzowanego to czas próbkowania i poziom kwantyzacji sygnałów.