

**PROJEKT**

**Kaskadowa struktura regulacji napędu prądu stałego**

**Autorzy:**

Jakub Cios

Maciej Duda

Spis treści

[1. Cel projektu 2](#_Toc166344849)

[2. Wstęp teoretyczny 2](#_Toc166344850)

[2.1. Zasada działania silnika obcowzbudnego 3](#_Toc166344851)

[2.2. Model matematyczny silnika obcowzbudnego 4](#_Toc166344852)

[2.3. Kryterium doboru regulatorów ciągłych dla napędu prądu stałego 5](#_Toc166344853)

[3. Dobór parametrów modelu 7](#_Toc166344854)

[3.1. Założenia parametrów modelu 7](#_Toc166344855)

[3.2. Modele w postaci transmitancji 9](#_Toc166344856)

[4. Implementacja modelu w programie MATLAB – Simulink 9](#_Toc166344857)

[4.1. Odpowiedź skokowa modelu 9](#_Toc166344858)

[4.2. Wnioski 11](#_Toc166344859)

[5. Wyznaczenie parametrów regulatorów 12](#_Toc166344860)

[5.1. Założenia przyjęte przy doborze regulatora prądu 12](#_Toc166344861)

[5.2. Dobór parametrów regulatora prądu (regulator PI) przy zastosowaniu kryterium modułowego 12](#_Toc166344862)

[5.3. Założenia przyjęte przy doborze regulatora prędkości 15](#_Toc166344863)

[5.5. Dobór parametrów regulatora prędkości (regulator typu PI) 15](#_Toc166344864)

[6. Symulacje rozruchu silnika 17](#_Toc166344865)

[7. Charakterystyki Bodego i Nyquista 17](#_Toc166344866)

# 1. Cel projektu

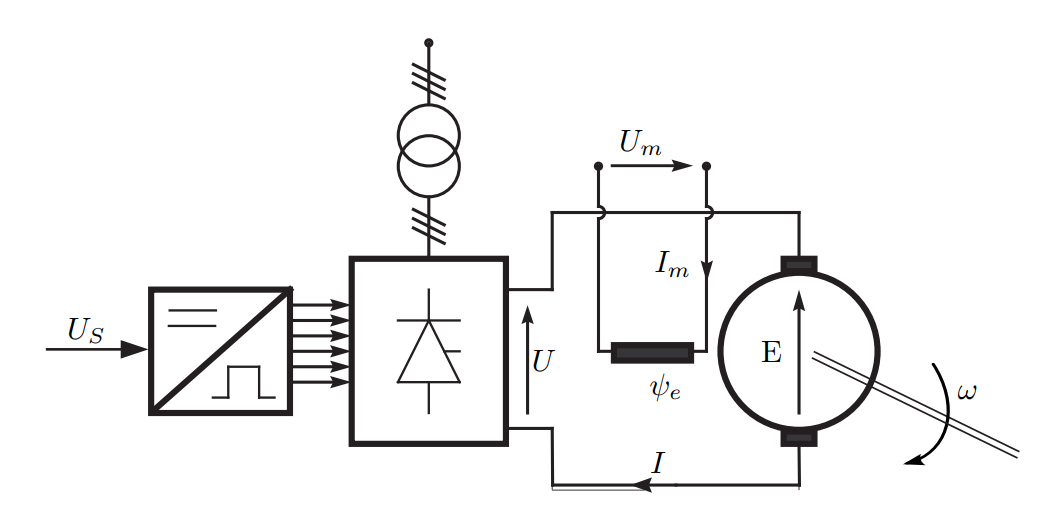
Celem projektu jest zapoznanie się z modelem matematycznym i symulacjami układu kaskadowej regulacji napędu prądu stałego. Spełnienie założeń projektu wymaga wnikliwej obserwacji procesu rozruchu i stabilizacji prędkości obrotowej napędu, wartości natężeń prądów w poszczególnych punktach regulatora oraz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

# 2. Wstęp teoretyczny

## 2.1. Zasada działania silnika obcowzbudnego

Silniki prądu stałego są z czasem zastępowane silnikami prądu przemiennego, dlatego że te drugie są tańsze i bardziej wytrzymałe na wszelkiego rodzaju przeciążenia i dodatkowo mogą pracować w bardziej korzystnych warunkach.

Napęd elektryczny z obcowzbudnym silnikiem prądu stałego został przedstawiony na rysunku 1. Prąd w obwodzie wzbudzenia ma znamionową wartość stałą , przez co wytwarza strumień skojarzony rotacyjnie z uzwojeniem twornika o wartości znamionowej .



Rysunek 1. Napęd elektryczny z obcowzbudnym silnikiem prądu stałego

Napęd elektryczny przedstawiony na powyższym rysunku składa się ze sterownika, wzmacniacza mocy będącego zwykle nawrotnym przekształtnikiem tyrystorowym, który stanowi zasilanie obcowzbudnego silnika 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 obcowzbudnego silnika prądu stałego wraz z modelem zasilającego wzmacniacza mocy jest opisany następującym równaniem stanu:

( 1 )

Gdzie:

– napięcie sterujące wzmacniaczem mocy,

– napięcie znamionowe zasilania uzwojenia twornika,

– prąd twornika,

– znamionowy prąd twornika,

– moment obciążenia,

– moment znamionowy,

­­­­­­­­­­­­­­­­­­­­­­ – prędkość obrotowa silnika,

­­­­­­­­­­­­ – prędkość idealnego biegu jałowego,

– znamionowy strumień skojarzony rotacyjnie z uzwojeniem twornika,

­­ – rozruchowa stała elektromechaniczna silnika,

– elektromagnetyczna stała czasowa,

– moment bezwładności napędu i agregatu technologicznego,

– elektromechaniczna stała czasowa silnika,

– rezystancja uogólniona,

– indukcyjność całkowita,

– wzmocnienie wzmacniacza 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.

Powyższe założenia nie ograniczają zakresu stosowalności (1) gdyż są one zawsze spełnione dla układów napędowym o właściwie dobranym silniku i wzmacniaczu mocy.

Model matematyczny silnika możemy zapisać również za pomocą układu równań różniczkowych (2).

( 2 )

Gdzie:

– moment elektromagnetyczny;

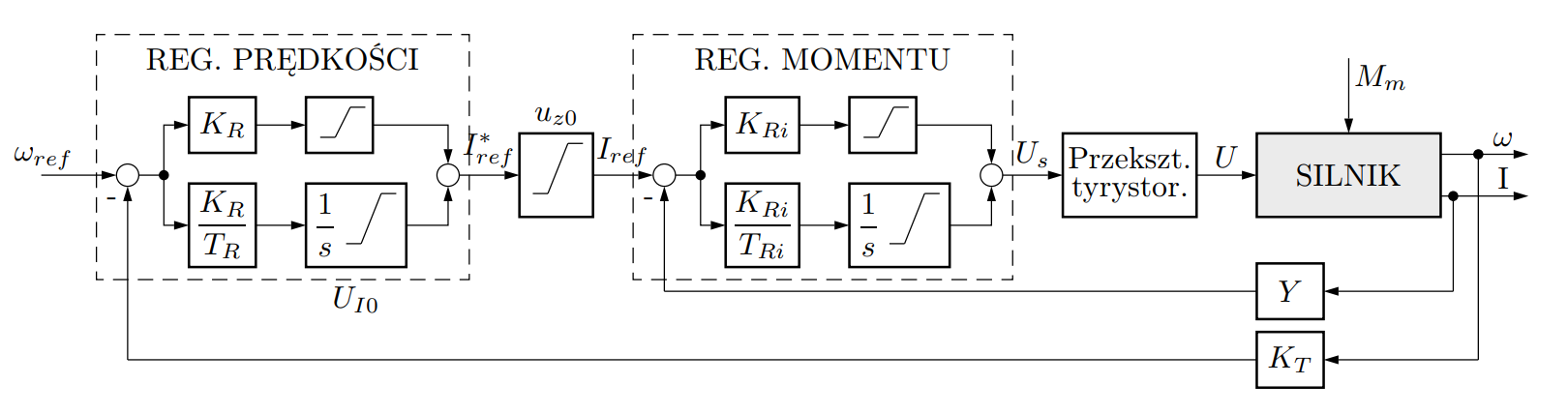
– rezystancja uogólniona

– napięcie zasilania uzwojenia twornika,

pozostałe oznaczenie jak dla równia w (1).

## 2.3. Kryterium doboru regulatorów ciągłych dla napędu prądu stałego

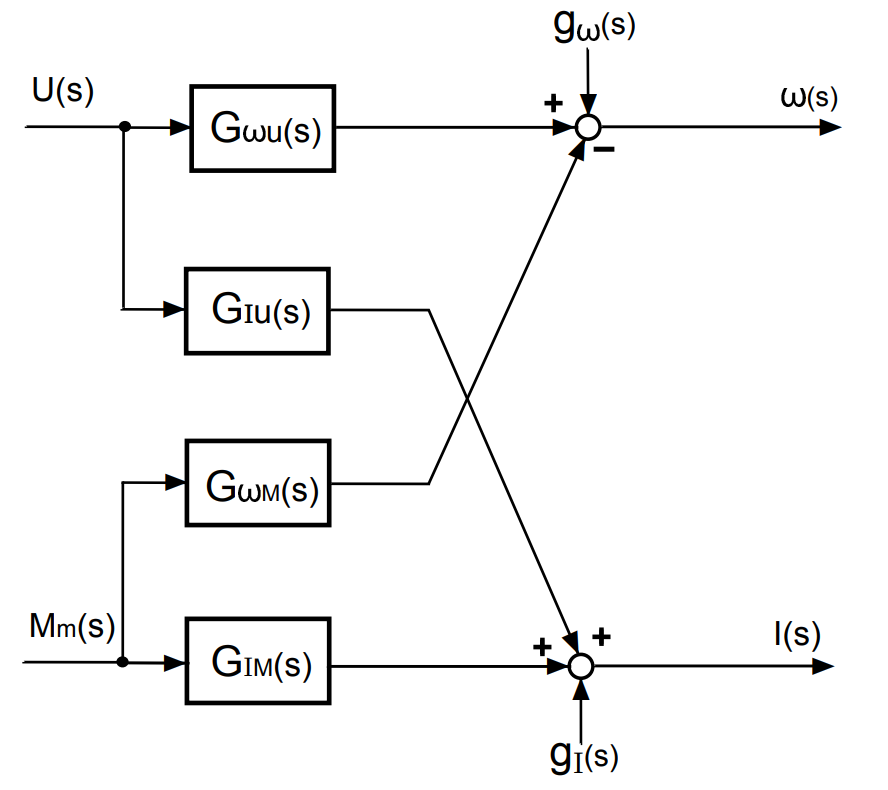
Kryterium modułowe jest jednym z najczęściej wykorzystywanych w optymalizacji parametrycznej regulatorów układów przemysłowych. Wynika to z prostych zależności określających nastawy regulatora oraz możliwości aproksymacji układów inercyjnymi modelami matematycznymi.



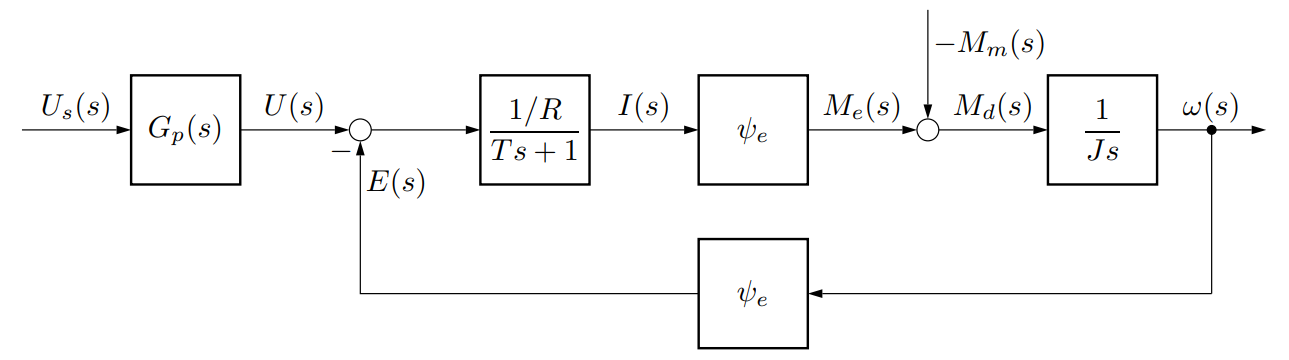
Rysunek 2. Schemat układu kaskadowej regulacji napędem prądu stałego (regulatory windup)

Układ regulacji przedstawiony na powyższym rysunku składa się z podrzędnego regulatora prądu twornika oraz z nadrzędnego regulatora prędkości obrotowej silnika. Idea działania układu polega na nasyceniu regulatora prędkości w początkowym etapie rozruchu, co z kolei zapewnia pracę silnika ze stałą wartością prądu twornika.

W modelu symulacyjnym układu występuje szereg bloków ograniczających wartość sygnału i przy realizacji praktycznej takiego układu regulacji (w oparciu o analogowe układy elektroniczne), niektóre z nich były realizowane w sposób naturalny przez ograniczenia sygnału wyjściowego wzmacniaczy operacyjnych. W realizacji powyższego układu regulacji w oparciu o układy mikroprocesorowe wszystkie ograniczenia występujące na rysunku 2 muszą zostać uwzględnione w algorytmie obliczeniowym.



Rysunek 3. Schemat blokowy silnika obcowzbudnego



Rysunek 4. Najprostszy schemat blokowy napędu prądu stałego Gp(s) jest transmitancją przekształtnika

# 3. Dobór parametrów modelu

## 3.1. Założenia parametrów modelu

Tabela 1 Założenia projektowe

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 17 | 230 | 85 | 700 | 0,253 | 1,9 | 0,75 |

Gdzie:

– czynna moc znamionowa,

– napięcie znamionowe,

– prąd znamionowy,

– prędkość znamionowa,

– rezystancja twornika,

– indukcyjność twornika,

– moment bezwładności.

Obliczenia parametrów na podstawie założeń projektowych:

* Prędkość kątowa

( 3 )

* Strumień elektryczny

( 4 )

* Stała elektromagnetyczna

( 5 )

* Moment obciążenia

( 6 )

* Moment bezwładności całości napędu:

( 7 )

* Elektromagnetyczna stała czasowa silnika:

( 8 )

JS dobrane tak aby został spełniony warunek B > 4T

* Ograniczenia wartości prądu:

Dopuszczalny prąd twornika

( 9 )

( 10 )

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

Ograniczenia prędkości obrotowej silnika:

( 11 )

Parametry wyliczone na podstawie powyższych zależności:

Tabela 2 Obliczone parametry

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
| 73,30 | 2,84 |  | 8,25 | 0,259 |

## 3.2. Modele w postaci transmitancji

Transmitancja następujących modeli na podstawie przyjętych parametrów:

( 12 )

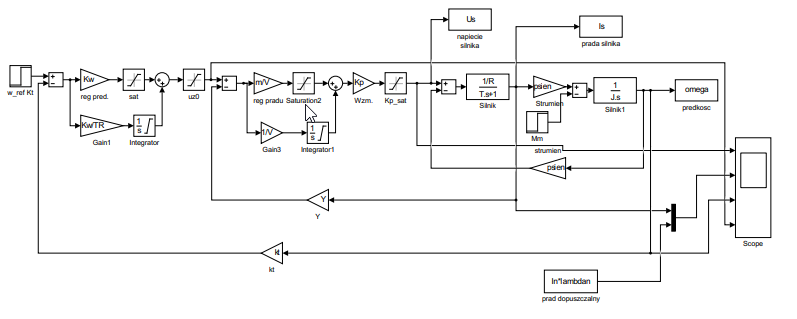
( 13 )

# 4. Implementacja modelu w programie MATLAB – Simulink

## 4.1. Odpowiedź skokowa modelu

W projekcie zaczęliśmy od wyznaczenia odpowiedzi skokowych prądu twornika I, jego pochodnej oraz prędkości kątowej ω, przy napięciu zasilania .

Zostało to zrealizowane w programie MATLAB – Simulink, którego schemat został przedstawiony na Rysunek 5 Schemat symulacji w Symulinku dla odpowiedzi skokowej prądu twornika. W bloczkach zostały zrealizowane transmitancje [(12) - (15)].



Rysunek 5 Schemat symulacji w Simulinku dla odpowiedzi skokowej prądu twornika

Obraz zawierający tekst, Wykres, linia, numer

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 6 odpowiedź skokowa prądu twornika

Obraz zawierający tekst, linia, Wykres, zrzut ekranu

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 7 odpowiedź skokowa pochodnej prądu twornika

Obraz zawierający tekst, linia, Wykres, diagram

Opis wygenerowany automatycznie

Rysunek 8 odpowiedź skokowa prędkości obrotowej

## 4.2. Wnioski

Prąd i jego pochodne wyraźnie przekraczają bezpieczne wartości. Aby ograniczyć ten prąd i jego pochodne, należy zastosować człon inercyjny łagodzący skoki napięcia. To jednak spowoduje pogorszenie charakterystyki dynamicznej układu. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie zamkniętego systemu sterowania mierzącego prąd. Ze względu na to, że prąd jest mierzony, odpowiedź regulatora będzie bardzo szybka, co pozwala dobrać regulator, który może uzyskać dobrą dynamikę przy bardzo małym przesterowaniu.

Napięcie silnika skacze do wartości znamionowej, powodując przekroczenie wartości znamionowej prędkości. Korzystanie z regulatora prędkości zmniejszy zniekształcenia i usunie stronniczość.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że konieczne jest zastosowanie kaskadowej regulacji, gdyż pochodna prądu twornika oraz prędkość kątowa przekracza założone ograniczenia przez co przy próbie uruchomienia silnik mógłby ulec uszkodzeniu.

# 5. Wyznaczenie parametrów regulatorów

## 5.1. Założenia przyjęte przy doborze regulatora prądu

Wzmocnienie toru pomiarowego prądu twornika:

( 16 )

Wzmocnienie przekształtnika tyrystorowego:

( 17 )

Średnie opóźnienie przekształtnika tyrystorowego:

( 18 )

## 5.2. Dobór parametrów regulatora prądu (regulator PI) przy zastosowaniu kryterium modułowego

Kryterium modułowe dotyczy obiektów charakteryzujących się dużą stałą czasową T i kilkoma mniejszymi stałymi czasowymi , gdzie stałą czasową zastępuje się średnią wartością opóźnienia przekształtnika tyrystorowego .

Istotą kryterium modułowego jest kompensowanie bieguna przez zero regulatora , gdzie TR = T.

Otrzymujemy w ten sposób układ regulacji o transmitancji:

( 19 )

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

( 20 )

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

lub

( 21 )

dla którego optymalne wzmocnienie regulatora określa wzór:

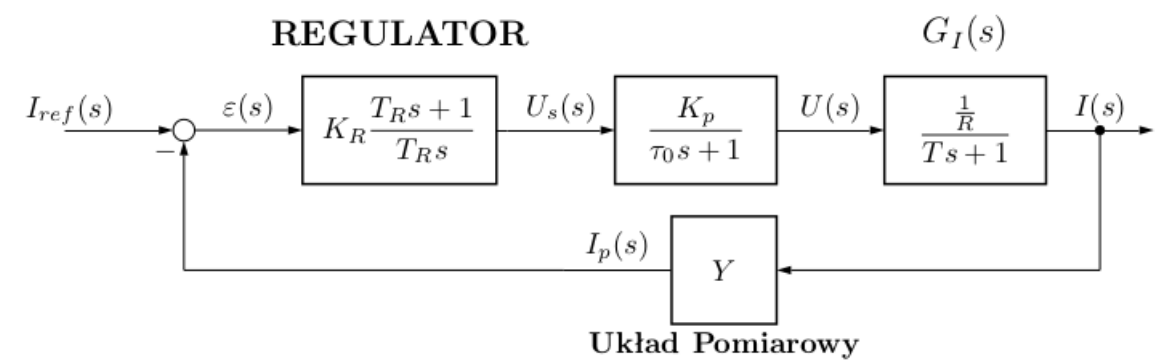
( 22 )

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:

( 23 )

Natomiast przekształtnik tyrystorowy aproksymuje się układem inercjalnym o stałej czasowej i wzmocnieniu Kp

( 24 )



Rysunek 9 Schemat blokowy układu regulacji prądu silnika - kryterium modułowe

Nastawy regulatora oblicza się z zależności

( 25 )

( 26 )

**Ostatecznie transmitancja regulatora prądu PI wyniesie:**

( 27 )

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

( 28 )

Zakładając, że: otrzymujemy:

( 29 )

Zatem:

( 30 )

( 31 )

## 5.3. Założenia przyjęte przy doborze regulatora prędkości

Wzmocnienie toru pomiarowego prędkości:

( 32 )

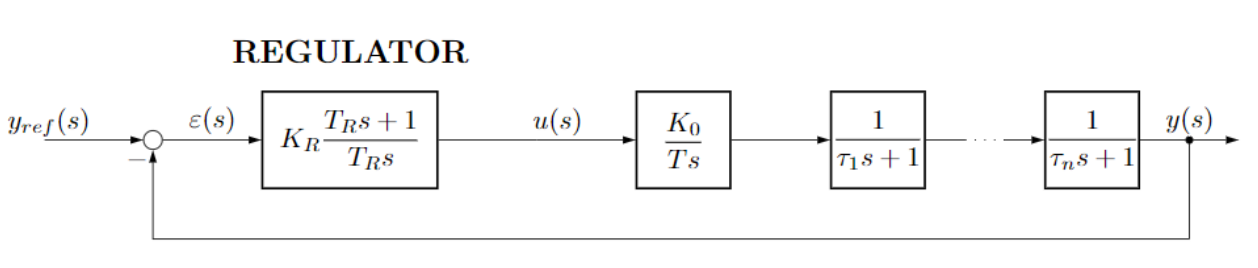
Parametry układu regulacji prądu twornika :

( 33 )

( 34 )

## 5.5. Dobór parametrów regulatora prędkości (regulator typu PI)

Kryterium symetrii jest stosowane, gdy mamy do czynienia z obiektami, w których oprócz głównego elementu całkowania o czasie całkowania T, mamy do czynienia z wieloma elementami inercjalnymi o małych stałych czasowych. Ze względu na te małe wartości stałych czasowych dokonujemy aproksymacji elementów inercyjnych zastępując je tylko jednym elementem o określonej stałej czasowej.



Rysunek 10 Schemat układu regulacji - kryterium symetryczne

Transmitancja układu zamkniętego:

( 40 )

Po podstawieniu s = jω, moduł transmitancji widmowej |Gc(jω)|2 jest obliczany i rozszerzany do szeregu Maclaurina wokół punktu ω = 0. Następnie, aby spełnić założenie optymalnego śledzenia (Gc (s) = 1), wszystkie składniki rozwinięcia są porównywane do zera, z wyjątkiem pierwszego składnika, który przyrównuje się do 1. Następnie otrzymujemy parametry ustawień sterownika:

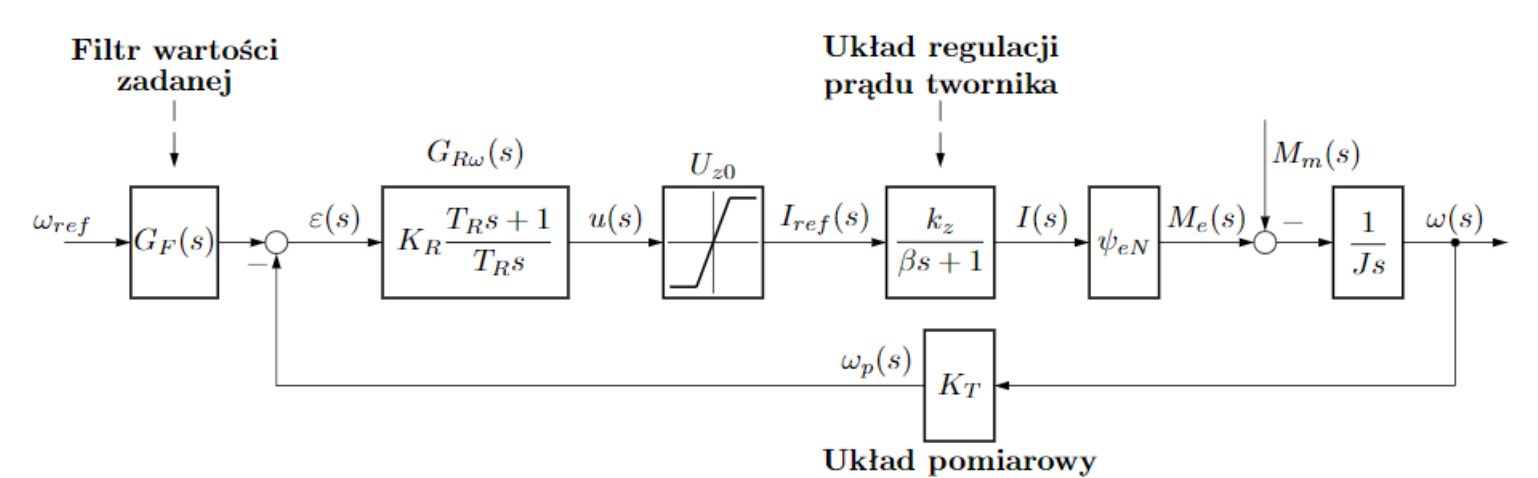
* ,

( 41 )

( 42 )

Dodatkowo stosujemy filtr dolnoprzepustowy, który zmniejsza przeregulowanie określa transmitancja:

( 43 )



Rysunek 11 Uproszczony schemat blokowy napędu z regulatorem prędkości PI-kryterium symetryczne

Zgodnie z punktem 5.2. transmitancja układu zamkniętego, który będzie uwzględniany w dalszej analizie jako regulator prądu twornika wyniesie po zastosowaniu odpowiednich aproksymacji ():

( 44 )

Zakładając, że: , otrzymujemy:

( 45 )

( 46 )

**Transmitancja regulatora prędkości PI dla kryterium symetrycznego:**

( 47 )

**Transmitancja filtru wartości zadanej prędkości:**

( 48 )

# 6. Symulacje rozruchu silnika

Obraz zawierający zrzut ekranu

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, linia

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, linia

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, linia, Wykres

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, linia

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, linia, Wykres

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, tekst, diagram

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający zrzut ekranu, tekst, Oprogramowanie multimedialne, oprogramowanie

Opis wygenerowany automatycznie

Obraz zawierający Czcionka, tekst, biały, linia

Opis wygenerowany automatycznie

# 7. Charakterystyki Bodego i Nyquista