



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział  
Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Zakład Teorii Maszyn i Robotów

---



# TEORIA STEROWANIA I

INŻ. DANIEL WLAZŁO

## OPIS ROZWIĄZANIA PIERWSZEGO ZADANIA PROJEKTOWEGO

*numer albumu:* 244123

*kierunek:* Automatyka i Robotyka

*specjalność:* Robotyka

Warszawa, 12 września 2015

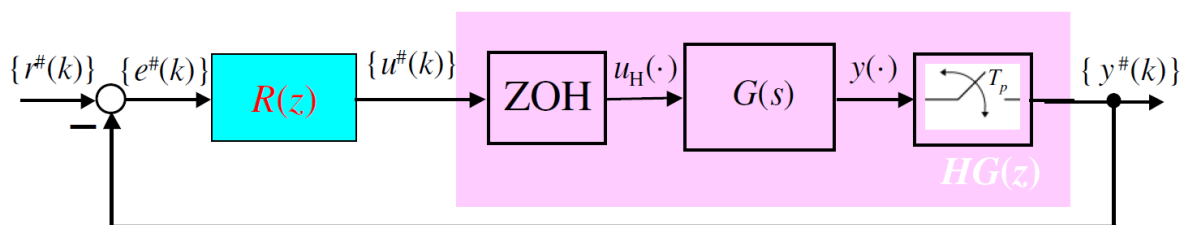
# Spis treści

<b>1</b>	<b>Zadanie</b>	<b>2</b>
1.1	Treść projektu . . . . .	2
1.2	Dane do projektu . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Proces projektowania</b>	<b>4</b>
2.1	Sprawdzenie zachowania symulowanego obiektu bez regulatora dyskretnego	4
2.1.1	Analiza transmitancji obiektu . . . . .	4
2.1.2	Dokładna transmitancja dyskretna obiektu . . . . .	5
2.1.3	Transmitancja widmowa . . . . .	5
2.1.4	Transmitancja pseudoczęstotliwościowa . . . . .	5
2.2	Projektowanie regulatora . . . . .	6
2.2.1	Dobór wzmacnienia regulatora . . . . .	6
2.2.2	Dobór nowej pulsacji granicznej . . . . .	8
2.3	Regulator . . . . .	9
2.3.1	Transmitancja . . . . .	9
2.3.2	Stabilność . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Wnioski</b>	<b>12</b>

# Rozdział 1

## Zadanie

### 1.1 Treść projektu



Rysunek 1.1: Schemat układu regulacji

Dla układu regulacji o powyższej strukturze wybrać czas próbkowania  $T_p$  oraz dobrać tak transmitancję regulatora dyskretnego  $R(z)$ , aby otrzymać układ regulacji spełniający następujące wymagania:

- uchyby położeniowy i prędkościowy w stanie ustalonym są najmniejsze z możliwych do osiągnięcia,
- wymuszenia  $r$  o maksymalnej prędkości  $r_1$  i maksymalnym przyspieszeniu  $r_2$  są przenoszone z uchybem nie większym niż  $\varepsilon$ ,
- odpowiedź układu regulacji na skok jednostkowy charakteryzuje się małą oscylacyjnością i niezbyt dużym czasem ustalania, co jest związane z przyjętą przez projektanta maksymalną wielkością piku rezonansowego  $M_p$  układu zamkniętego,
- moduł sterowania  $u$  nie przekracza rozsądnej granicy.

Projekt powinien przedstawiać co najmniej:

- transmitancję i równanie różnicowe wybranego regulatora,
- charakterystyki częstotliwościowe transmitancji:

$$\begin{aligned} G(j\omega), HG^*(j\omega), HG^*(jv), \\ L^*(jv) = R^*(jv)HG^*(jv), \end{aligned}$$

- charakterystykę Nyquista zaprojektowanego układu otwartego,
- przyjętą przez projektanta maksymalną wielkością pików rezonansowego  $M_p$  układu zamkniętego,
- charakterystykę amplitudową funkcji wrażliwości  $|S^*(j\omega)|$  oraz charakterystykę amplitudową dopełniającą funkcji wrażliwości (transmitancji układu zamkniętego)  $|T^*(j\omega)|$ , charakterystykę amplitudową funkcji wrażliwości sterowania  $|R^*(j\omega)|$ , zaprojektowanego systemu pokazujące, że spełniono postawione wymagania w dziedzinie częstotliwościowej,
- odpowiedzi układu regulacji na:
  - skok jednostkowy,
  - skok jednostkowy o amplitudzie  $(r_1)^2/r_2$ ,
  - wymuszenie harmoniczne:

$$t \mapsto r(t) = \frac{(r_1)^2}{r_2} \sin\left(\frac{r_2}{r_1}t\right)$$

- wymuszenie o trapezoidalnym przebiegu prędkości i prędkości maksymalnej równej  $r_1$  oraz przyspieszeniu maksymalnym równym  $r_2$ ,
- sterowanie wywołane powyższym wymuszeniem, pokazujące, że spełniono wymagania w dziedzinie czasowej.

## 1.2 Dane do projektu

Zestaw numer 16:

- Transmitancja:

$$G(s) = \frac{150}{s(1.12s+1)(0.224s+1)}$$

- Maksymalna prędkość:

$$r_1 = 1$$

- Maksymalne przyspieszenie:

$$r_2 = 0.8$$

- Dokładność

$$\varepsilon = 0.005$$

# Rozdział 2

## Proces projektowania

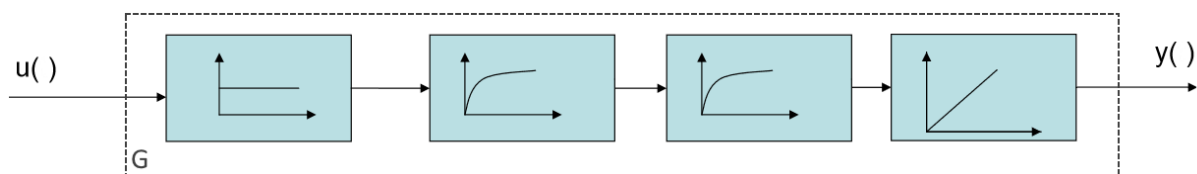
### 2.1 Sprawdzenie zachowania symulowanego obiektu bez regulatora dyskretnego

#### 2.1.1 Analiza transmitancji obiektu

Transmitancja ma postać:

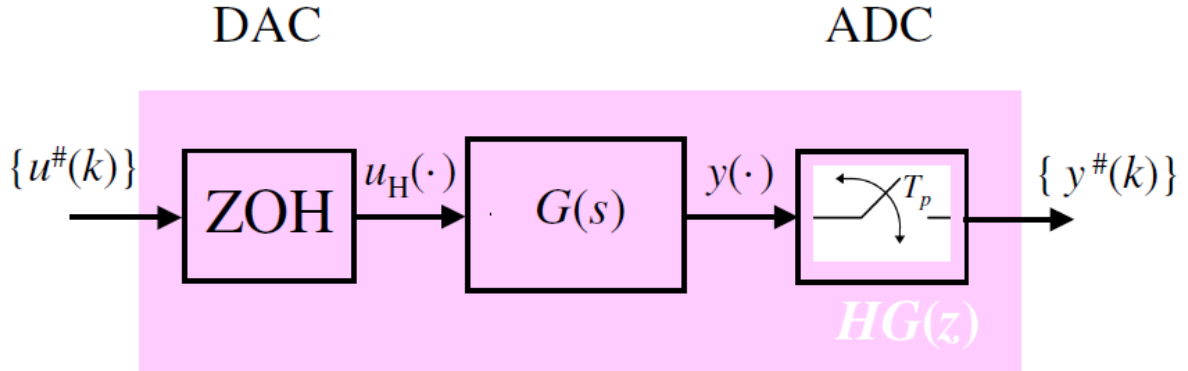
$$G(s) = \frac{150}{s(1.12s+1)(0.224s+1)}$$

Obiekt można zatem przedstawić w postaci superpozycji członu proporcjonalnego, członu całkującego idealnego oraz członu inercyjnego 2 rzędu (bądź dwóch członów inercyjnych pierwszego rzędu).



Rysunek 2.1: Wizualizacja dekompozycji obiektu o transmitancji G

### 2.1.2 Dokładna transmitancja dyskretna obiektu



Rysunek 2.2: Obiekt wraz z układami DAC i ADC

Korzystając z wzoru:

$$HG(z) = \frac{z-1}{z} \mathcal{Z}(\mathcal{L}^{-1}(\frac{G(s)}{s})) = \frac{z-1}{z} \mathcal{D}(\frac{G(s)}{s})$$

dla czasu próbkowania  $T_p = 0.04$  otrzymano dokładną transmitancję dyskretną obiektu:

$$HG(z) = \frac{6.344 \cdot 10^{-6} z^2 + 2.524 \cdot 10^{-5} z + 6.276 \cdot 10^{-6}}{z^3 - 2.979 z^2 + 2.958 z - 0.9788}$$

### 2.1.3 Transmitancja widmowa

Korzystając z zależności:

$$HG^*(j\omega) = HG(e^{T_p j\omega})$$

obliczono transmitancję widmową:

$$HG^*(j\omega) = \frac{6.344 \cdot 10^{-6} (e^{0.041 j\omega})^2 + 2.524 \cdot 10^{-5} e^{0.041 j\omega} + 6.276 \cdot 10^{-6}}{(e^{0.041 j\omega})^3 - 2.979 (e^{0.041 j\omega})^2 + 2.958 e^{0.041 j\omega} - 0.9788}$$

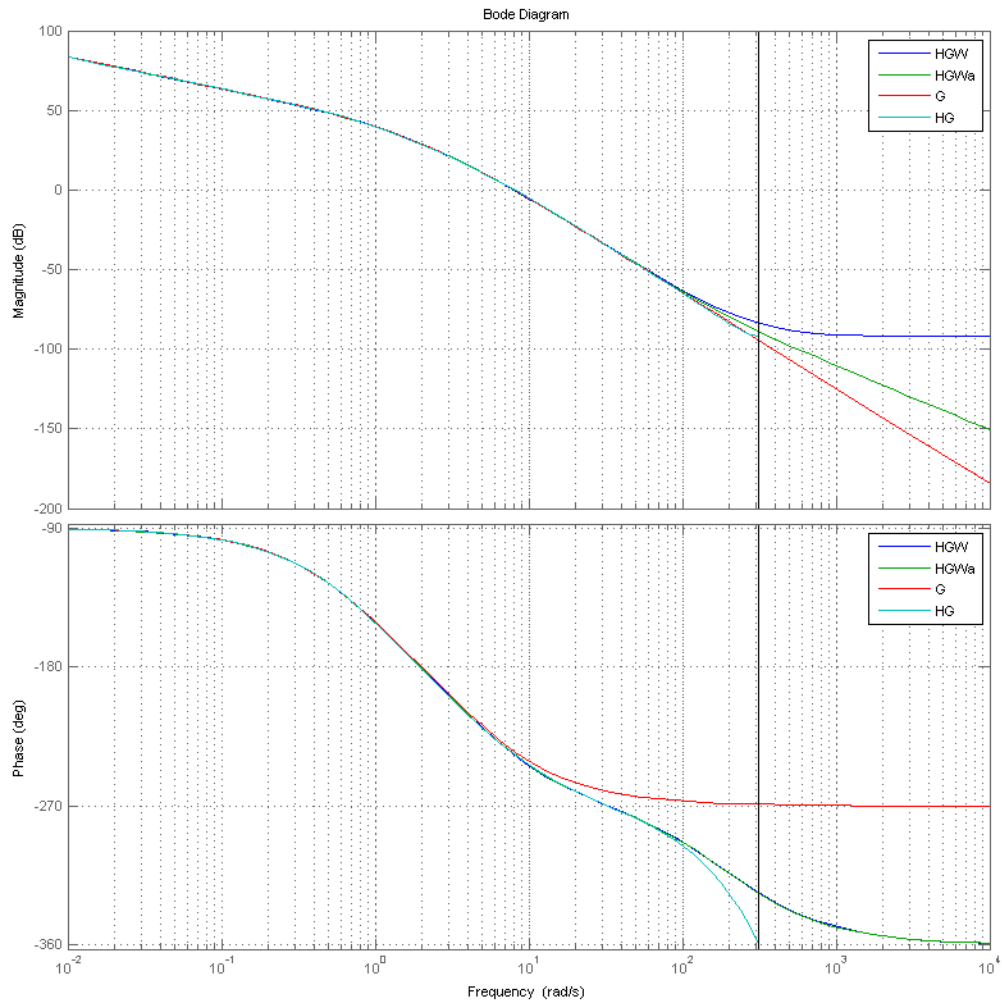
### 2.1.4 Transmitancja pseudoczęstotliwościowa

Transmitancja pseudoczęstotliwościowa ma postać:

$$HG^{w*}(j\nu) = \frac{1.594 \cdot 10^{-6} j\nu^3 - 8.057 \cdot 10^{-4} j\nu^2 - 1.191 j\nu + 597.9}{j\nu^3 + 5.357 j\nu^2 + 3.986 j\nu}$$

Przybliżenie transmitancji pseudoczęstotliwościowej:

$$HG_{est}^{w*}(j\nu) = G(j\nu) \left(1 - \frac{T_p}{2} j\nu\right) = \frac{-0.3 j\nu + 150}{0.2509 j\nu + 1.344 j\nu + s}$$



Rysunek 2.3: Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji  $HGw^*$ ,  $HGw^{*est}$ ,  $HG^*$  oraz  $G$

## 2.2 Projektowanie regulatora

### 2.2.1 Dobór wzmocnienia regulatora

Pierwszym krokiem zbliżającym do obliczenia wzmocnienia było wyznaczenie obszaru zabronionego. Korzystając z definicji wymagań:

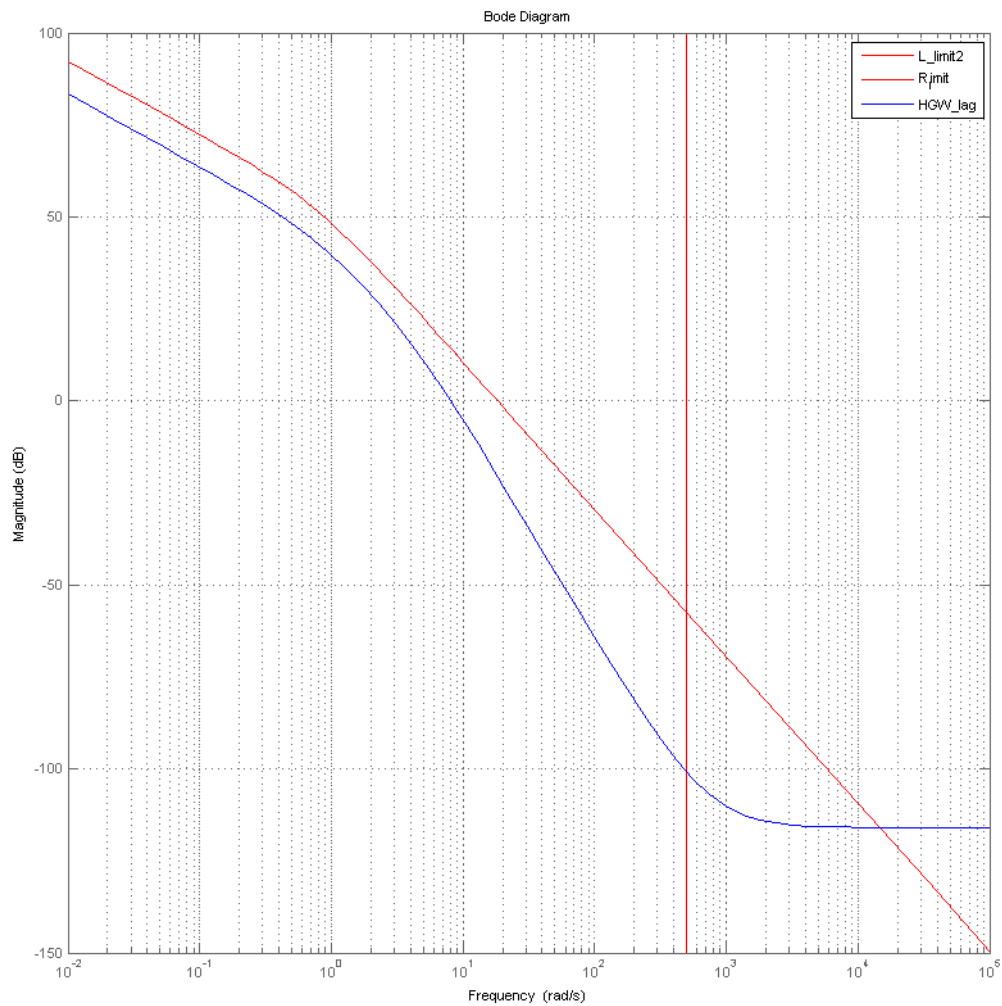
$$\begin{aligned} \text{Maksymalna prędkość: } r_1 &= 1 \\ \text{Maksymalne przyspieszenie: } r_2 &= 0.8 \\ \text{Dokładność: } \varepsilon &= 0.005 \end{aligned}$$

obliczam wielkości  $\omega_a$  oraz  $L_g r$ :

$$\omega_a = \frac{r_2}{r_1} = 0.8$$

$$L \geq \frac{1}{\epsilon} \frac{(r_1)^2}{r_2} \frac{1.16 \cdot 4}{\pi} = 369.2$$

Na podstawie tych wartości wykreślono wykres obszaru zabronionego. Naniesiono na niego również wykres transmitancji  $HG^{w*}(j\nu)$ .



Rysunek 2.4: Obszar zabroniony

Z analizy wykresu wynika, że minimalne wzmocnienie, jakie powinien wprowadzać regulator wynosi  $k_r = 3$



## 2.2.2 Dobór nowej pulsacji granicznej

Naturalna pseudopulsacja graniczna obiektu:  $\nu_{gob} = 8.0395$ .

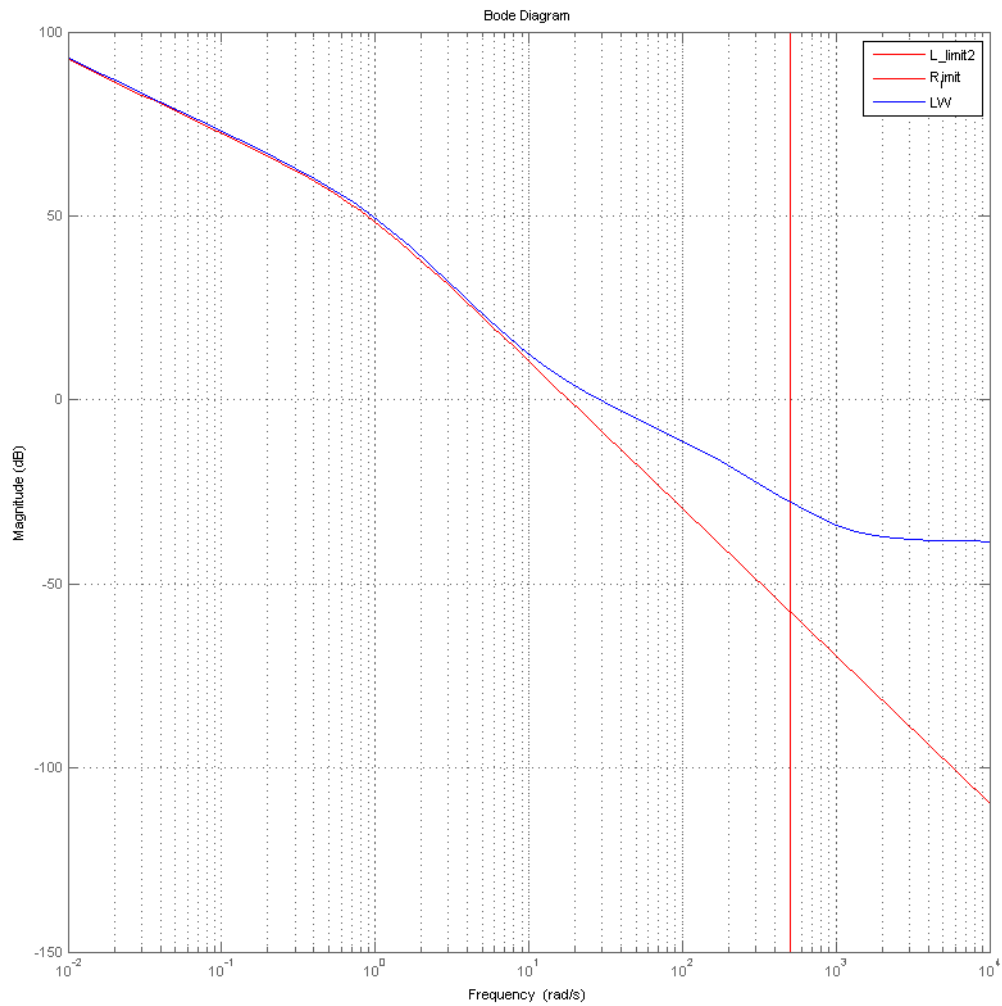
Ograniczenie wynikające z wprowadzenia opóźnień:  $\nu_g < 110$ .

Przyjęto  $\nu_g = 80$ .

Z faktu przyjęcia, iż  $M_p = 1.4$ , wynika, że:

$$\nu_1 \leq \nu_g \frac{M_p - 1}{M_p} = 22.8571; \nu_2 \geq \nu_g \frac{M_p + 1}{M_p} = 137.1429$$

Na podstawie przeprowadzonych symulacji działania regulatora, dobrano  $\nu_1 = 8, \nu_2 = 400$ .



Rysunek 2.5: Wykres Bodego dla obiektu z regulatorem

## 2.3 Regulator

### 2.3.1 Transmitancja

Transmitancja regulatora wynosi:

$$R(j\nu) = \frac{0.04664j\nu^2 + 0.7482j\nu + 3}{6.25e-06j\nu^2 + 0.005j\nu + 1}$$

Transmitancja impulsowa regulatora wynosi:

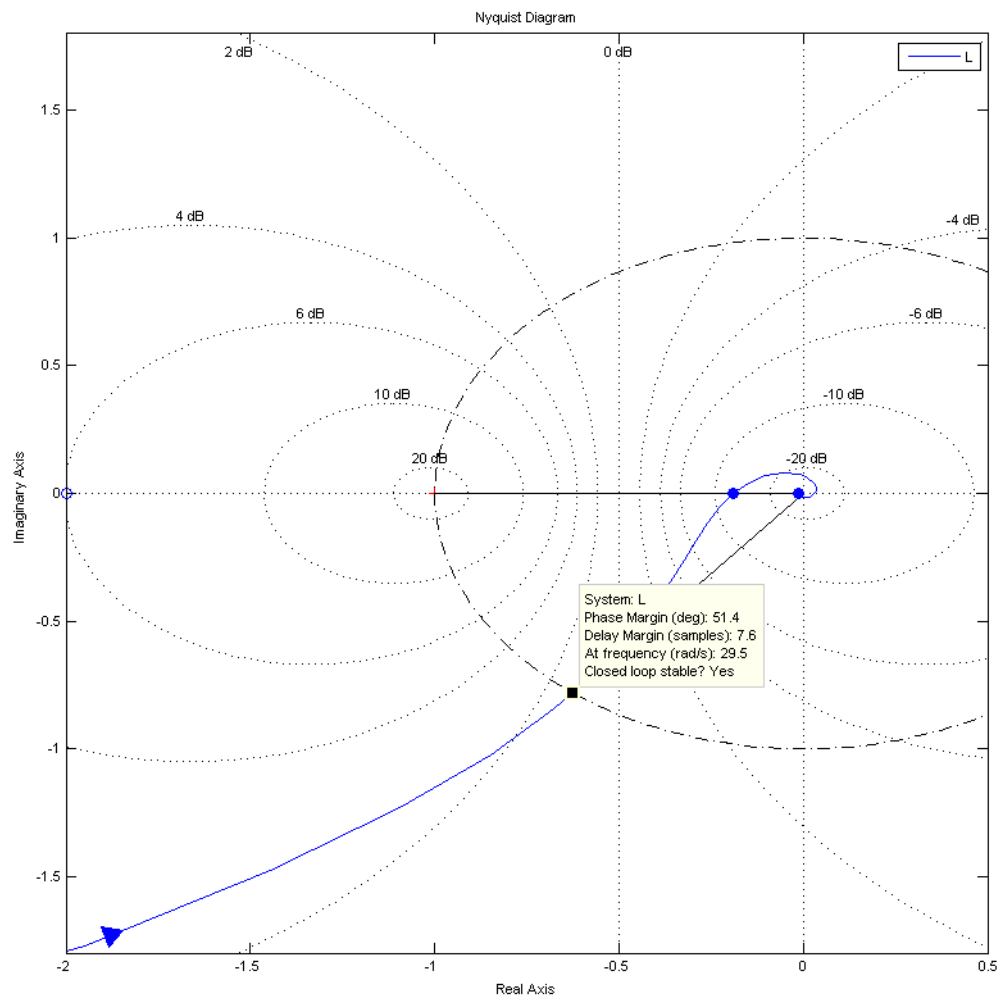
$$R(z) = \frac{2378z^2 - 4606z + 2230}{z^3 - 0.2222z^2 + 0.01235z}$$

Równanie różnicowe:

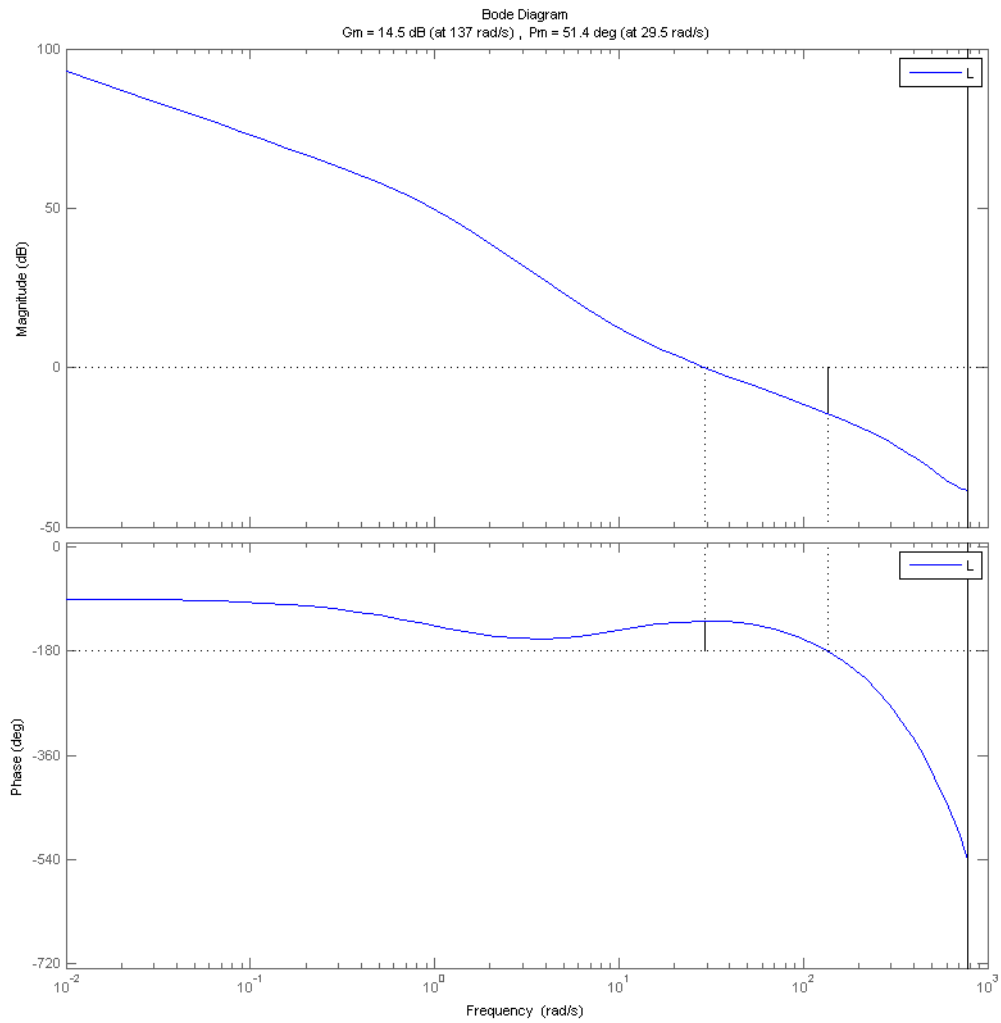
$$u(k) = 0.2222u(k-1) - 0.01235u(k-2) + (2378e(k-1) - 4606e(k-2) + 2230)e(k-3)$$

### 2.3.2 Stabilność

W celu zbadania stabilności układu wykonano wykres Nyquista oraz zbadano układ poleceniem *gain*.



Rysunek 2.6: Wykres Nyquista petli otwartej

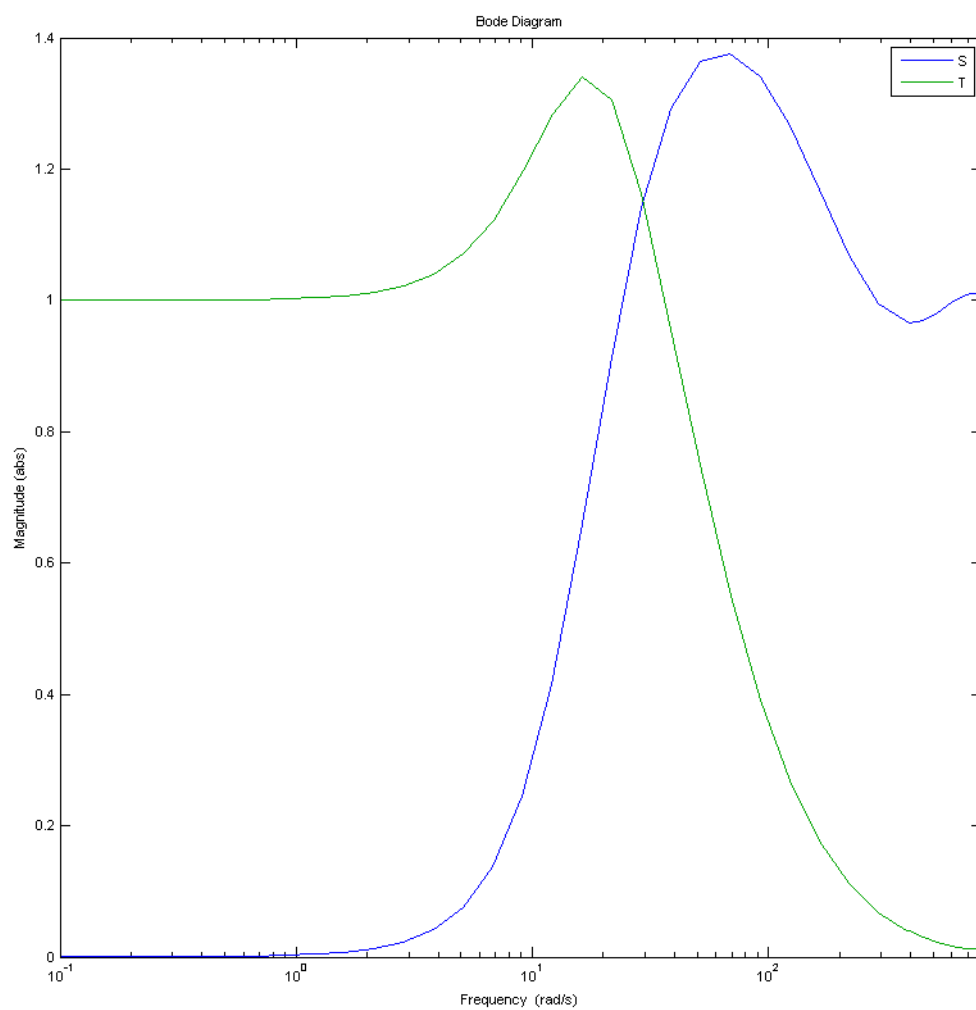


Rysunek 2.7: Wykres Bodego petli otwartej

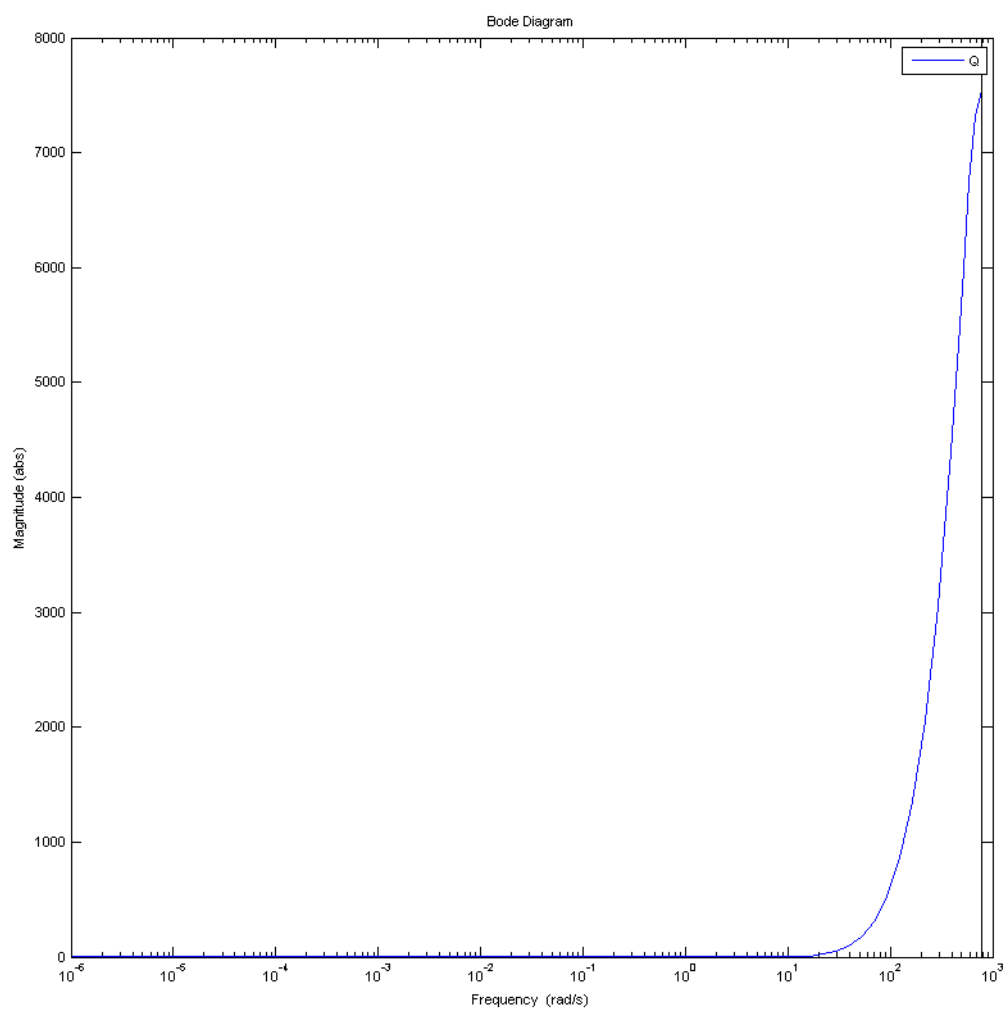
### 2.3.3 Funkcje wrażliwości

W celu sprawdzenia reakcji układu na spektrum częstotliwości sygnału wymuszenia sporządzono wykresy:

- funkcji wrażliwości  $S = \frac{1}{1+GR}$  oraz dopełniającej funkcji wrażliwości  $T = \frac{GR}{1+GR}$
- funkcji wrażliwości na sterowanie  $Q = \frac{R}{1+GR}$



Rysunek 2.8: Wykres funkcji wrażliwości oraz dopełniającej funkcji wrażliwości



Rysunek 2.9: Wykres funkcji wrażliwości na sterowanie

# Rozdział 3

## Wnioski

Celami pracy były:

- zapoznanie się z literaturą w zakresie robotyki mobilnej,
- wykonanie przeglądu rozwiązań w zakresie budowy robotów kategorii Ketchup House,
- określenie wymagań stawianych robotom Pomidor 1,5 oraz PACMAN,
- zaprojektowanie oraz wykonanie części mechanicznych robotów Pomidor 1,5 oraz PACMAN,
- wykonanie środowiska testowego dla testów czujników oraz planszy zgodnej z regulaminami zawodów,
- przeprowadzenie testów robotów.

# Spis rysunków

1.1	Schemat układu regulacji . . . . .	2
2.1	Wizualizacja dekompozycji obiektu o transmitancji $G$ . . . . .	4
2.2	Obiekt wraz z układami DAC i ADC . . . . .	5
2.3	Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji $HGw^*$ , $HGw^{*est}$ , $HG^*$ oraz $G$ . . . . .	6
2.4	Obszar zabroniony . . . . .	7
2.5	Wykres Bodego dla obiektu z regulatorem . . . . .	8
2.6	Wykres Nyquista petli otwartej . . . . .	10
2.7	Wykres Bodego petli otwartej . . . . .	11



## Spis tabel

# Bibliografia

- [1] Jezierski E., *Dynamika robotów*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006, str. 233-237
- [2] Matarić M. J. *The Robotics Primer*, MIT Press, 2007
- [3] Pierewoj Jakub *Projekt i wykonanie robota mobilnego - oprogramowanie sterujące* 2015.
- [4] Kamiński Mateusz *Miniaturowy robot mobilny: projekt konstrukcji, wykonanie prototypu i oprogramowania* 2014.
- [5] Koło Nauowe Inżynierii Mechatronicznej, <http://www.knim.pwr.wroc.pl/>, data dostępu 20.01.2015
- [6] R-BOT, <http://r-bot.pl/index.php/zdjecia/> , data dostępu 20.01.2015
- [7] Istrobot, <http://www.robotika.sk/contest/2014/>, data dostępu 20.01.2015
- [8] Robotic Day, Ketchup House rules, <http://www.roboticday.org/>, data dostępu 20.01.2015
- [9] ISTROBOT, Ketchup House rules, <http://www.robotika.sk/contest/2014/EN/index.php?page=rules&type=ketchup>
- [10] Regulamin zawodów Robotic Day, [http://www.roboticday.org/2014/rules/2014-Ketchup\\_House-ENV1.pdf](http://www.roboticday.org/2014/rules/2014-Ketchup_House-ENV1.pdf), data dostępu 20.01.2015
- [11] Robomaticon, <http://robomaticon.pl/pl/node/45>, data dostępu 20.01.2015
- [12] Robot Challenge, <http://www.robotchallenge.org/competition/>, data dostępu 20.01.2015
- [13] Pololu, Product 2212 <http://www.pololu.com/product/2212>, data dostępu 20.01.2015
- [14] Pololu, Product 1090 <http://www.pololu.com/product/1090>, data dostępu 20.01.2015
- [15] Pololu, Product 950 <http://www.pololu.com/product/950>, data dostępu 20.01.2015
- [16] Pololu, Product 713 <http://www.pololu.com/product/713>, data dostępu 20.01.2015

- [17] Dynamixel AX-12A, User's Manual [http://www.electronickits.com/robot/BioloidAX-12\(english\).pdf](http://www.electronickits.com/robot/BioloidAX-12(english).pdf), data dostępu 20.01.2015
- [18] STMicroelectronics, STM32 Discovery VL User's Manual [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/user\\_manual/CD00267113.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/user_manual/CD00267113.pdf), data dostępu 20.01.2015
- [19] STMicroelectronics, STM32F100RB datasheet <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00251732.pdf>, data dostępu 20.01.2015
- [20] Botland, Dualsky 7,4 V <http://botland.com.pl/lipo-dualsky/2395-pakiet-lipol-dualsky-2200mah-25c-2s-74v-eco-s.html>, data dostępu 20.01.2015
- [21] Botland, HC-SR04 datasheet [http://botland.com.pl/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=476](http://botland.com.pl/index.php?controller=attachment&id_attachment=476), data dostępu 20.01.2015
- [22] Sparkfun, SEN-10530 datasheet <http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Sensors/Magneto/HMC5883L-FDS.pdf>, data dostępu 20.01.2015
- [23] Texas Instrument, LM339 datasheet <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm339-n.pdf>, data dostępu 20.01.2015
- [24] SHARP GP2Y0A41SK0 datasheet, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm339-n.pdf>, data dostępu 20.01.2015
- [25] SHARP GP2Y0D805Z0F datasheet, [http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0d805z\\_e.pdf](http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0d805z_e.pdf), data dostępu 20.01.2015
- [26] Kingbright, [http://www.kingbright.com/attachments/file/psearch/000/00/00/KTIR0711S\(Ver.13\).pdf](http://www.kingbright.com/attachments/file/psearch/000/00/00/KTIR0711S(Ver.13).pdf), data dostępu 20.01.2015
- [27] Pololu, Product 1442 <http://www.pololu.com/product/1442>, data dostępu 20.01.2015
- [28] Botland, Dualsky 11,1 V <http://botland.com.pl/lipo-dualsky/2487-pakiet-lipol-dualsky-3300mah-25c-2s-111v.html>, data dostępu 20.01.2015
- [29] Pololu, Product 2110 <https://www.pololu.com/product/2110>, data dostępu 20.01.2015
- [30] IRF4905 datasheet [http://www.redrok.com/MOSFET\\_IRF4905\\_-55V\\_-74A\\_20m0\\_Vth-4.0\\_T0-220.pdf](http://www.redrok.com/MOSFET_IRF4905_-55V_-74A_20m0_Vth-4.0_T0-220.pdf), data dostępu 20.01.2015
- [31] ST Microelectronics, VNH5019ATR-E <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00234623.pdf>, data dostępu 20.01.2015
- [32] VISHAY, CNY70 datasheet <http://www.vishay.com/docs/83751/cny70.pdf>, data dostępu 20.01.2015

- [33] Infineon Technologies AG, TLE4946-2K [http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE4946\\_2K-DS-v01\\_00-en.pdf?folderId=db3a30431f848401011facc1c83b4674&fileId=db3a30431f848401011fbc925c48637f](http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE4946_2K-DS-v01_00-en.pdf?folderId=db3a30431f848401011facc1c83b4674&fileId=db3a30431f848401011fbc925c48637f), data dostępu 20.01.2015
- [34] Raspberry Pi <http://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/>, data dostępu 20.01.2015
- [35] Raspberry PI HD Camera <http://www.raspberrypi.org/camera-board-available-for-sale/>, data dostępu 20.01.2015
- [36] TME, ACCORD KB1604-PAB <http://www.tme.eu/pl/details/kb1604-pab/klawiatury/accord/>, data dostępu 20.01.2015
- [37] Botland, wyświetlacz 4x20 <http://botland.com.pl/wyswietlacze-alfanumeryczne/2640-wyswietlacz-lcd-4x20-znakow-niebieski-konwerter-i.html>, data dostępu 20.01.2015
- [38] Pololu, Product 1264 <https://www.pololu.com/product/1264>, data dostępu 20.01.2015
- [39] Hokuyo, URG-04LX-UG01 [https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg\\_04lx\\_ug01.html](https://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx_ug01.html), data dostępu 20.01.2015
- [40] DAGU Hi-Tech Electronic [http://dagurobot.diytrade.com/sdp/895152/4/pd-4555778/5252103-1798792/ROBOT\\_KIT\\_RA-001\\_SIX\\_SERVO\\_ROBOT\\_ARM.html](http://dagurobot.diytrade.com/sdp/895152/4/pd-4555778/5252103-1798792/ROBOT_KIT_RA-001_SIX_SERVO_ROBOT_ARM.html), data dostępu 20.01.2015