



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, 29 czerwca 2015

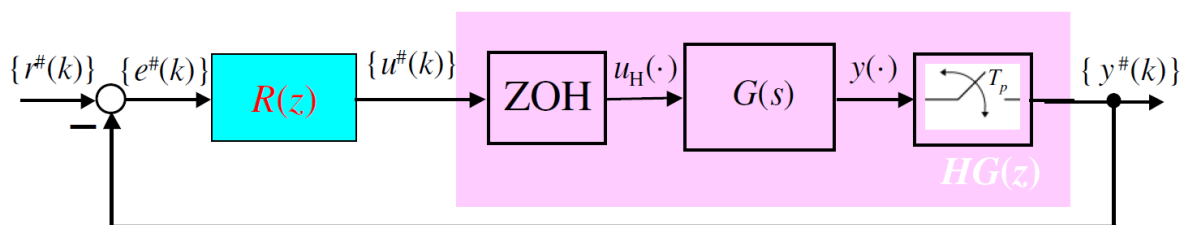
# Spis treści

<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 . . . . .	6
2.1.3	Transmitancja widmowa . . . . .	6
2.1.4	Transmitancja pseudoczęstotliwościowa . . . . .	9
2.2	Projektowanie regulatora . . . . .	13
2.2.1	Wyznaczenie obszarów zabronionych . . . . .	13
2.2.2	Wyznaczenie wzmocnienia regulatora . . . . .	14
2.2.3	Wyznaczenie $v_1$ i $v_2$ . . . . .	14
2.2.4	Regulator . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Wnioski</b>	<b>17</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 pikę 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

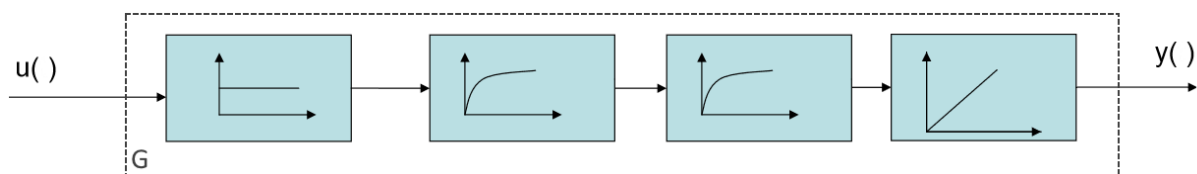
### 2.1 Sprawdzenie zachowania symulowanego obiektu bez regulatora dyskretnego

#### 2.1.1 Analiza transmitancji obiektu

Transmitancja ma postać:

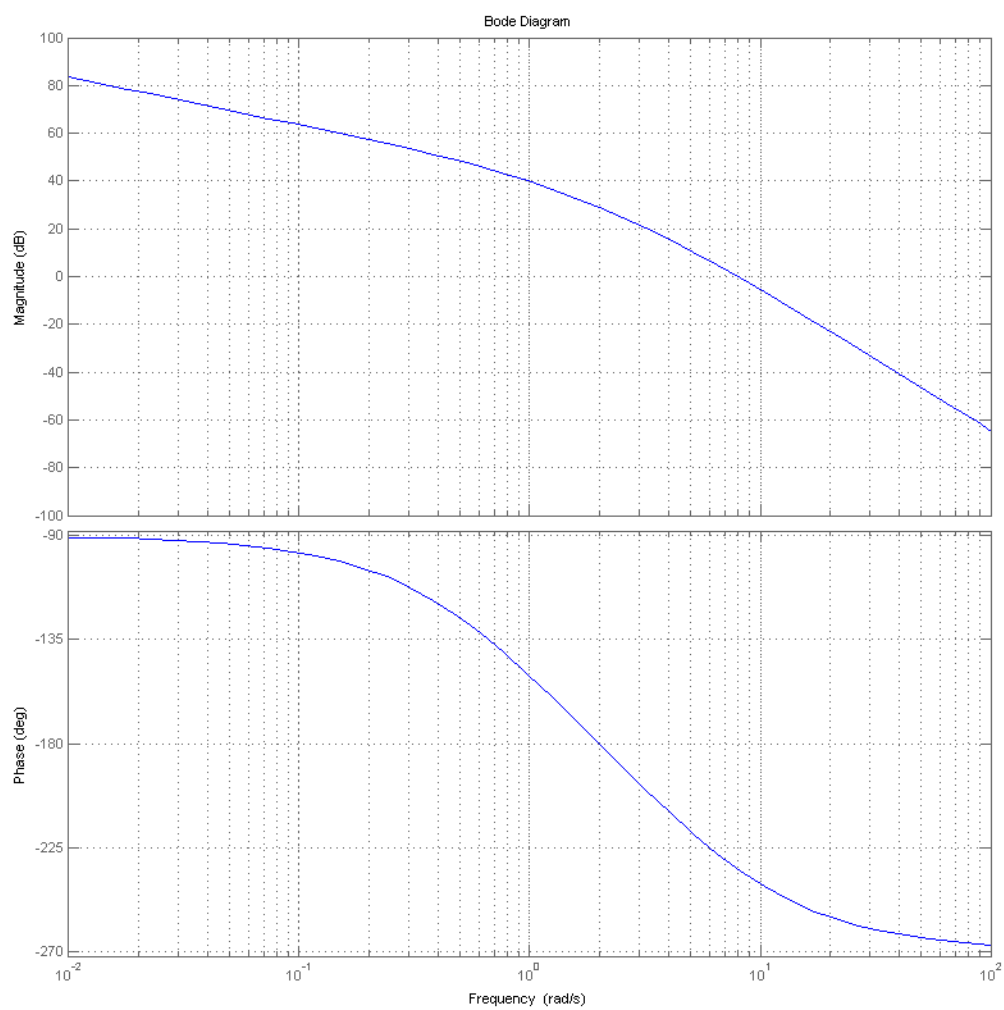
$$G(s) = \frac{150}{s(1.12s+1)(0.224s+1)}$$

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



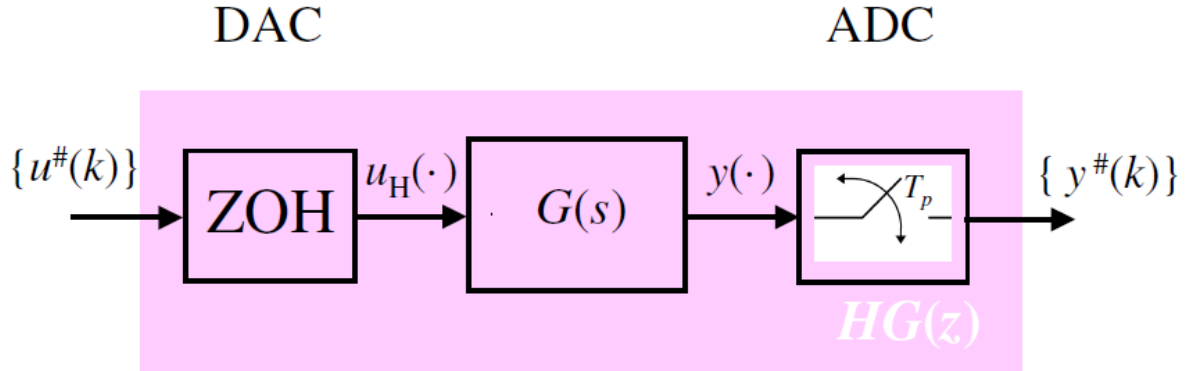
Rysunek 2.1: Wizualizacja dekompozycji obiektu o transmitancji  $G$

Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji:



Rysunek 2.2: Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji G

### 2.1.2 Dokładna transmitancja dyskretna obiektu



Rysunek 2.3: 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  $T_p = 0.01$  otrzymano dokładną transmitancję dyskretną obiektu:

$$HG(z) = \frac{9.833 \cdot 10^{-5} z^2 + 0.0003881 z + 9.573 \cdot 10^{-5}}{z^3 - 2.947 z^2 + 2.895 z - 0.9478} = \frac{9.8327 \cdot 10^{-5} (z+3.683)(z+0.2644)}{(z-1)(z-0.9911)(z-0.9563)}$$

### 2.1.3 Transmitancja widmowa

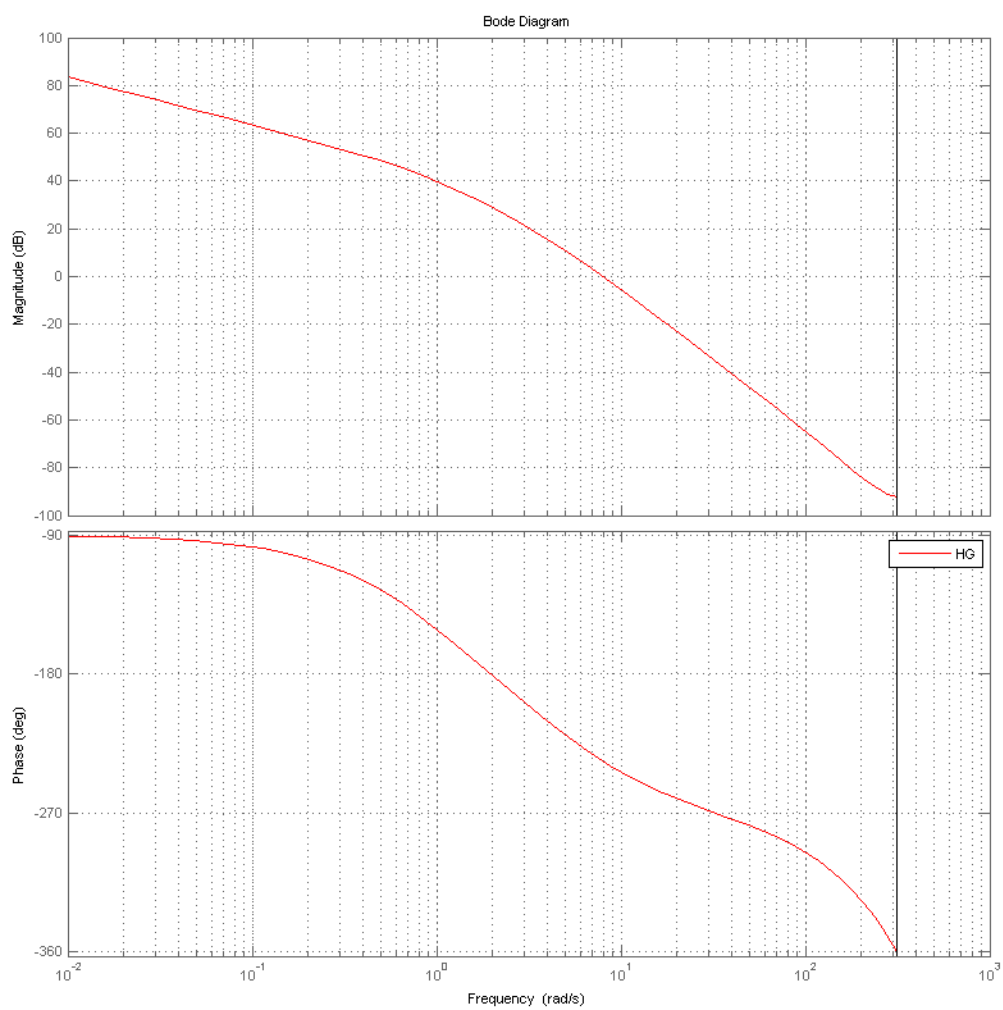
Korzystając z zależności:

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

obliczono transmitancję widmową:

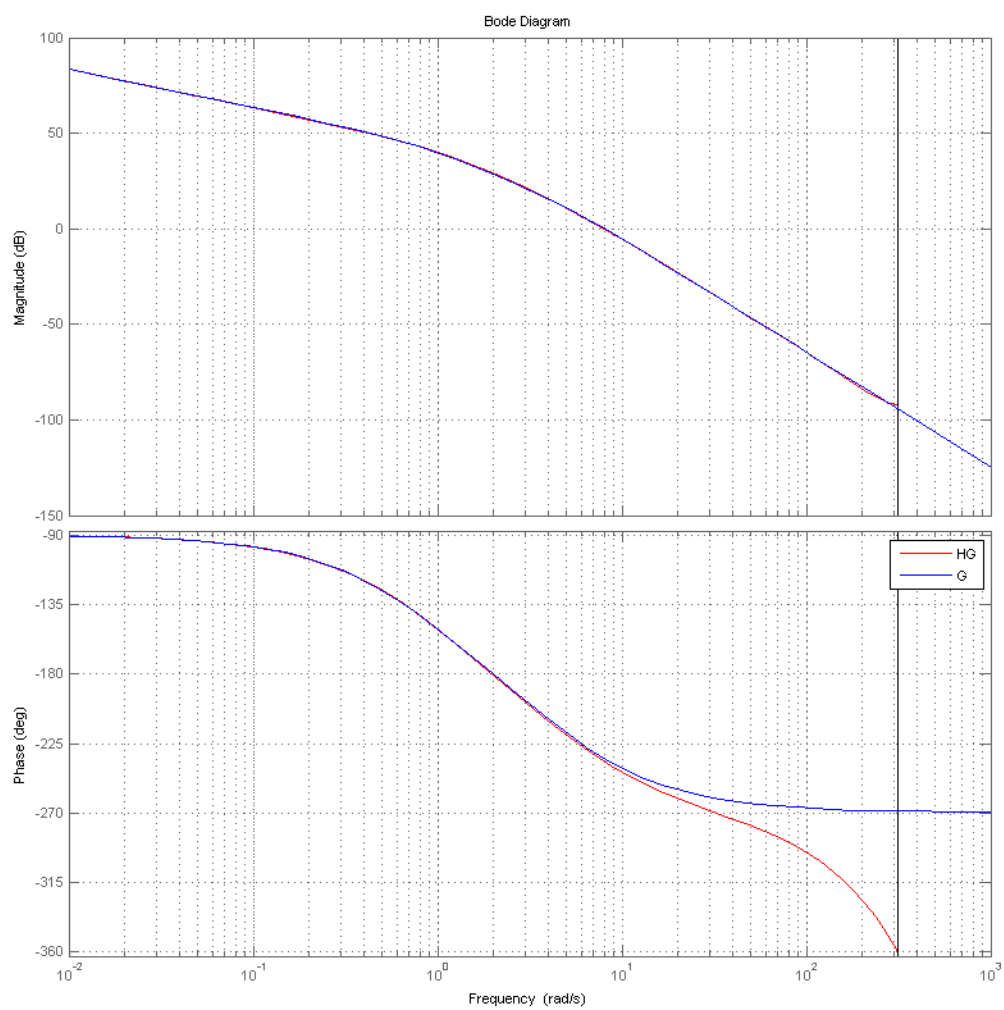
$$HG^*(j\omega) = \frac{9.8327 \cdot 10^{-5} (e^{0.01j\omega} + 3.683)(e^{0.01j\omega} + 0.2644)}{(e^{0.01j\omega} - 1)(e^{0.01j\omega} - 0.9911)(e^{0.01j\omega} - 0.9563)}$$

Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji:



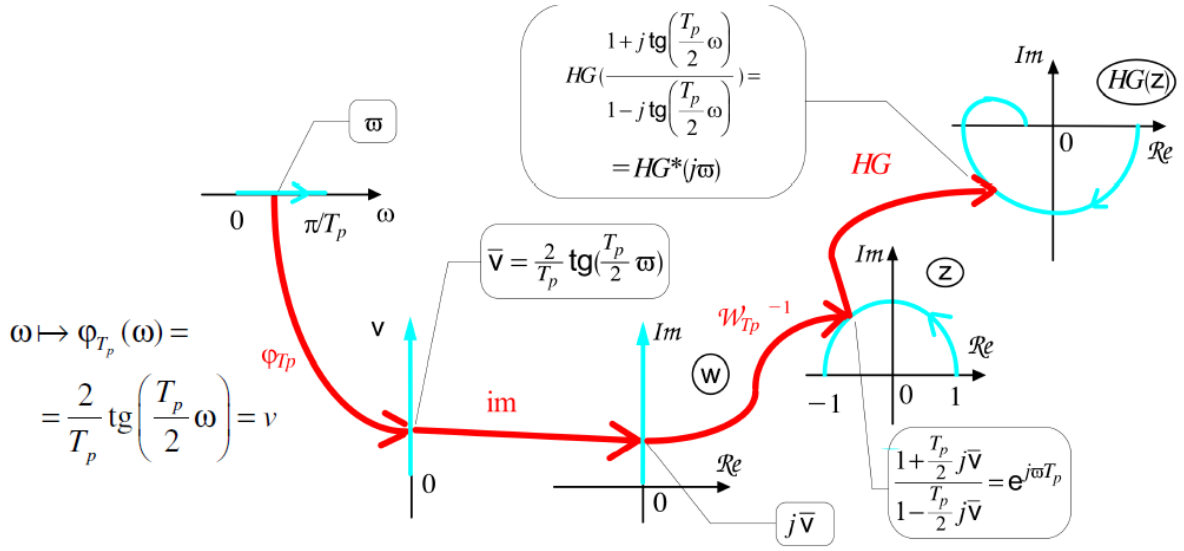
Rysunek 2.4: Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji HG\*





Rysunek 2.5: Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji  $HG^*$  oraz  $G$

### 2.1.4 Transmitancja pseudoczęstotliwościowa



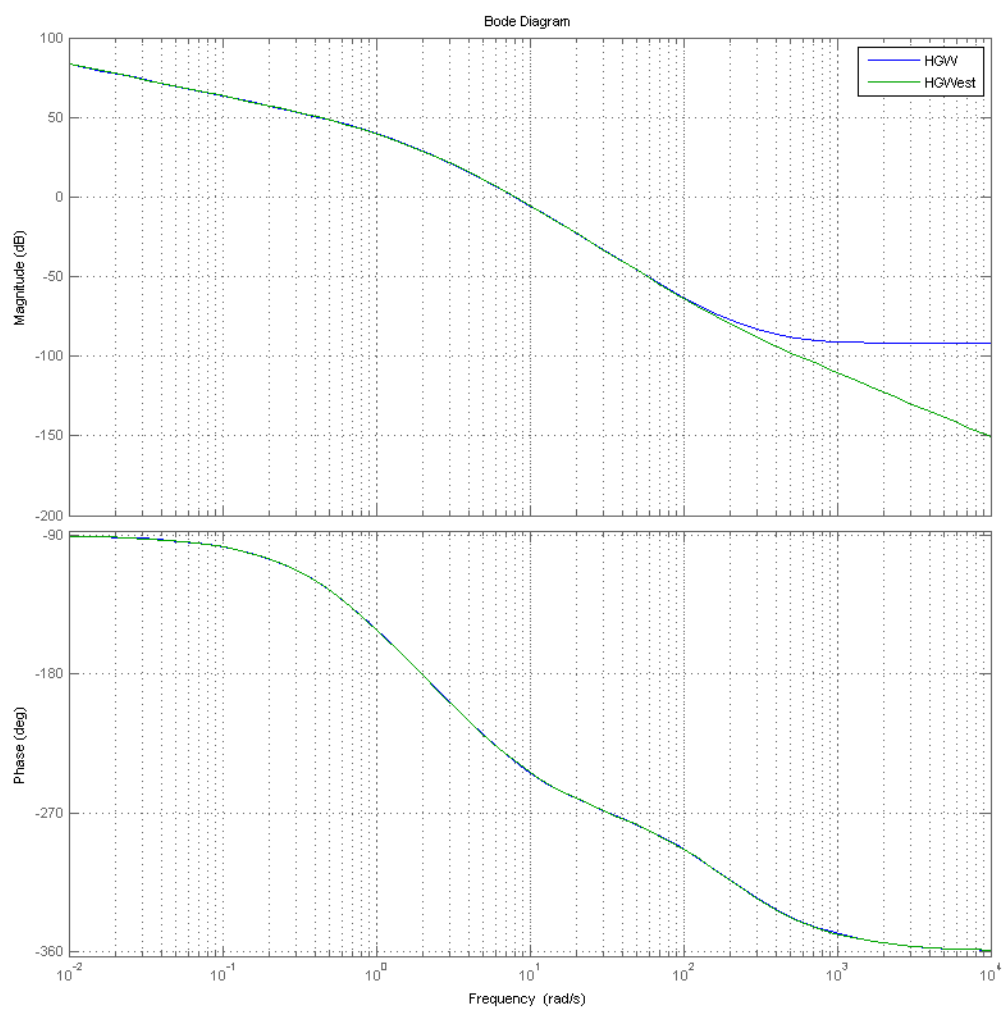
Rysunek 2.6: Proces wyznaczania transmitancji pseudoczęstotliwościowej

Transmitancja pseudoczęstotliwościowa ma postać:

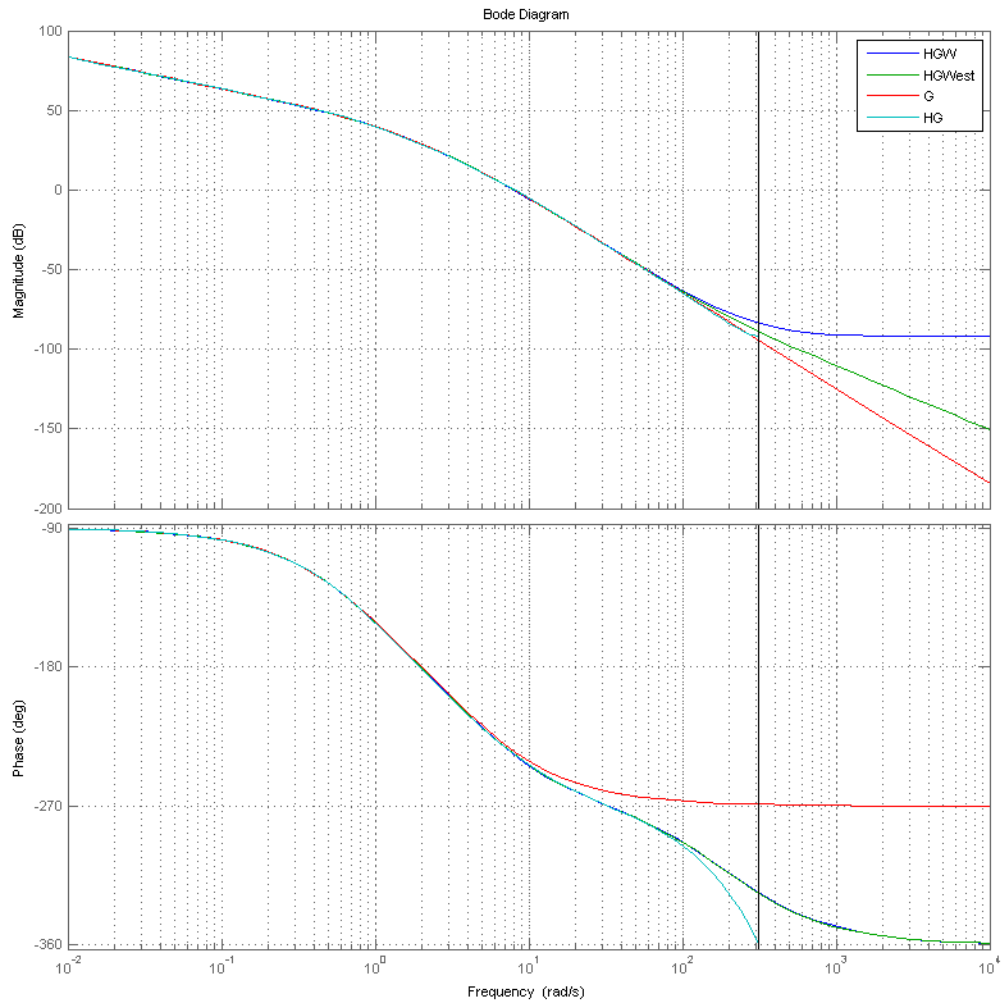
$$HG^{w*}(j\nu) = \frac{2.491 \cdot 10^{-5} j\nu^3 - 0.00038810.005115 j\nu^2 - 2.962 \cdot 10^{-5} j\nu + 597.8}{j\nu^3 + 5.356 j\nu^2 + 3.985 j\nu} = \frac{9.8327 \cdot 10^{-5} (j\nu + 343.8)(j\nu - 349.1)(j\nu - 200)}{j\nu(j\nu + 4.464)(j\nu + 0.8929)}$$

Przybliżenie transmitancji pseudoczęstotliwościowej:

$$HG_{est}^{w*}(j\nu) = G(j\nu) \left(1 - \frac{T_p}{2} j\nu\right) = \frac{-2.9895(j\nu - 200)}{j\nu(j\nu + 4.464)(j\nu + 0.8929)} =$$



Rysunek 2.7: Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji HGW\* oraz HGW\*est



Rysunek 2.8: Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji  $HGw^*$ ,  $HGw^{*est}$ ,  $HG^*$  oraz  $G$

Listing kodu dla tej części zadania:

```
Tp=0.01;
G=150/(s*(1.12*s+1)*(0.224*s+1))
HG=c2d(G, Tp);
HGzpk=zpk(HG)
HGW=d2c(HG, 'tustin');
HGWzpk=zpk(HGW)
HGWest=G*(1-Tp/2*s);
HGWestzpk=zpk(HGWest)
h=bodeplot(HGW, HGWest)
p=getoptions(h);
p.PhaseMatching='on';
p.PhaseMatchingFreq=1.97;
p.PhaseMatchingValue=-180;
setoptions(h,p);
hold
bodeplot(G, HG)
```

## 2.2 Projektowanie regulatora

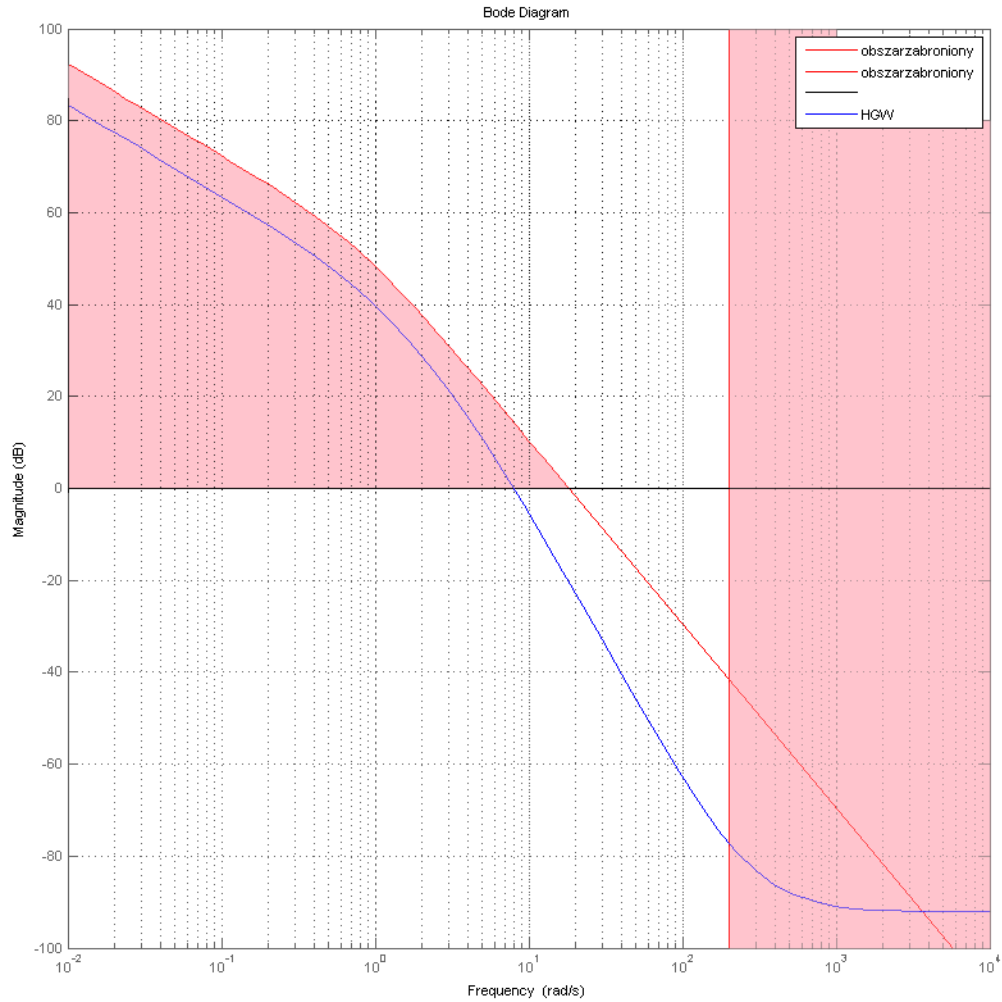
### 2.2.1 Wyznaczenie obszarów zabronionych

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  $L_g r$ :

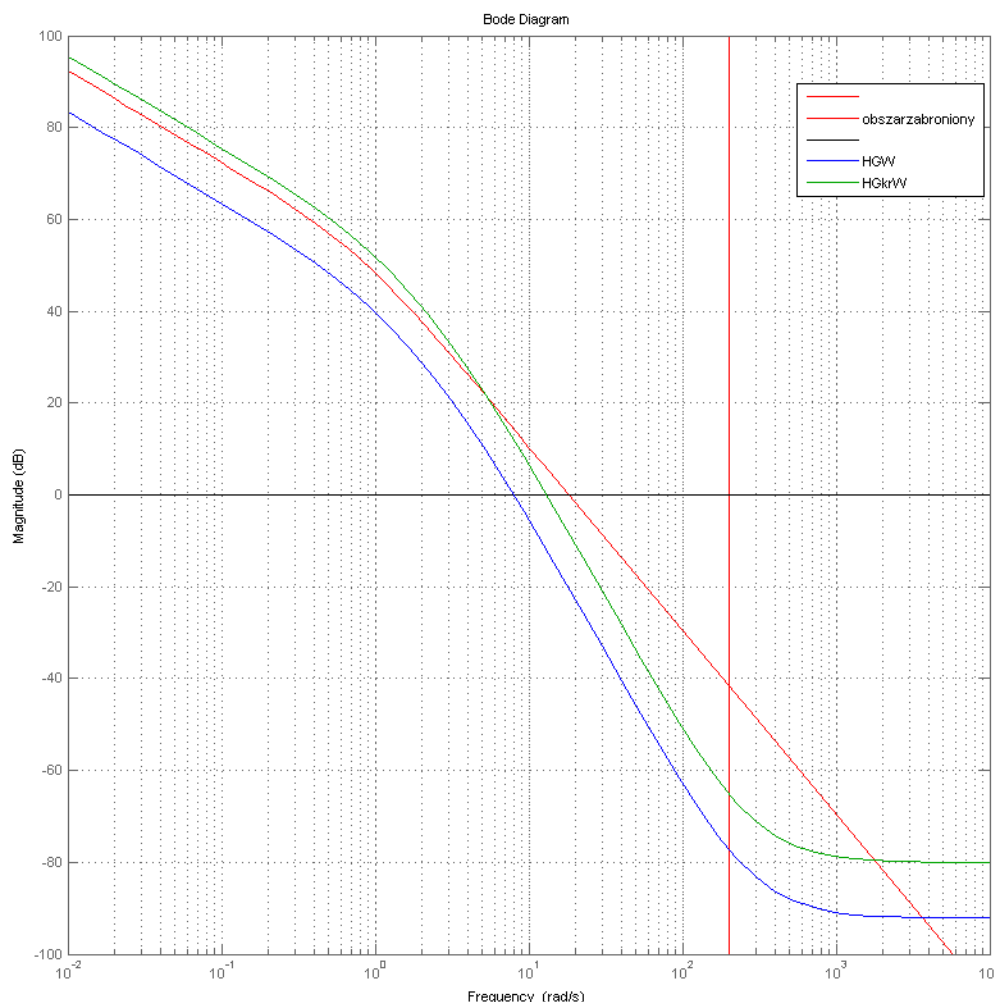
$$\begin{aligned}\omega_a &= \frac{r_2}{r_1} = 0.8 \\ L &\geq \frac{1}{\varepsilon} \frac{(r_1)^2}{r_2} \frac{1.16 \cdot 4}{\pi} = 369.2\end{aligned}$$



Rysunek 2.9: Zaznaczone obszary zabronione wraz z naniesioną transmitancją obiektu

## 2.2.2 Wyznaczenie wzmocnienia regulatora

Na podstawie odczytów z wykresu ustalono wzmocnienie regulatora na  $k = 4$



Rysunek 2.10: Transmitancja razem z regulatorem P

## 2.2.3 Wyznaczenie $\nu_1$ i $\nu_2$

Naturalna pseudopulsacja graniczna obiektu:  $\nu_{gob} = 8.04$ :

Ograniczenie wynikające z istnienia obszarów zabronionych:  $20 < \nu_g < 200$

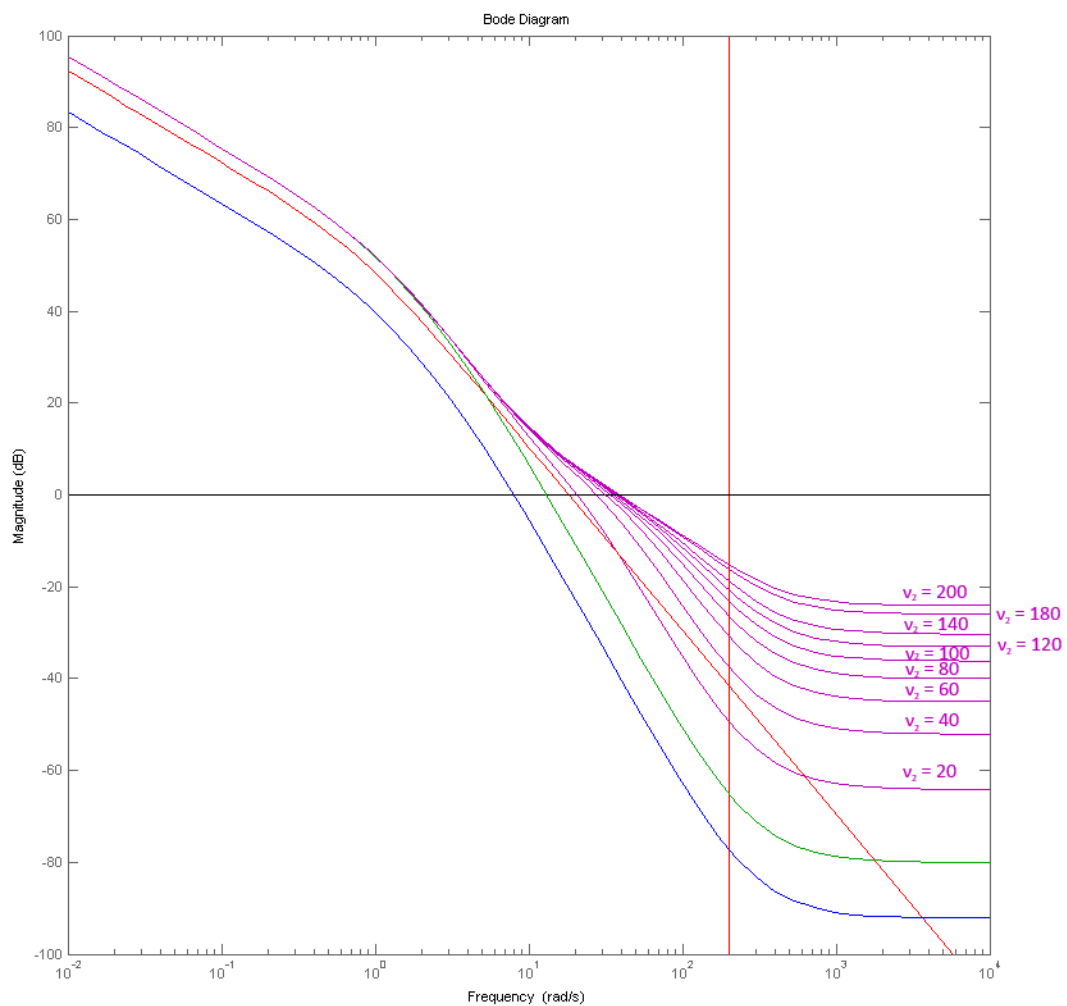
Ograniczenie wynikające z wprowadzenia opóźnień:  $\nu_g < 44$ :

Przyjmuję  $\nu_g = 28$  co daje  $\omega_g = 27.82$

Jeżeli przyjmę  $M_p = 1.4$  to:  $\nu_1 \leq \nu_g \frac{M_p - 1}{M_p} = 8$ ;  $\nu_2 \geq \nu_g \frac{M_p + 1}{M_p} = 48$

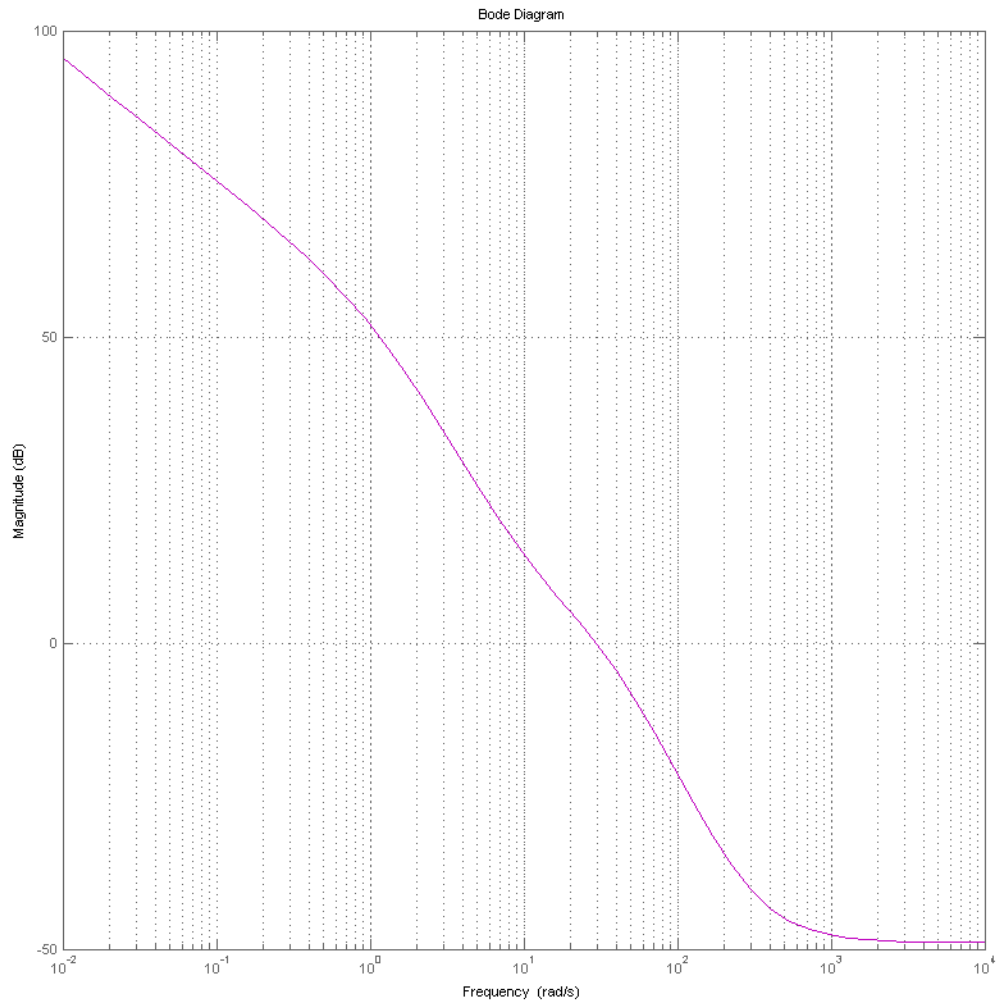
Na tej podstawie dobrano:  $\nu_1 = 8$ . Dobór  $\nu_2$  był nieco bardziej skomplikowany. Na rysunkach pokazano zależność przebiegu amplitudy dla różnych  $\nu_2$  oraz transmitancję dla

dobranego regulatora o  $\nu_2 = 48$ .



Rysunek 2.11: Zależność przebiegu transmitancji  $L^*(jv)$  od różnych wartości  $\nu_2$ .





Rysunek 2.12: Przebieg dobranej transmitancji L

## 2.2.4 Regulator

Transmitancja regulatora wynosi:

$$R(j\nu) = \frac{4 \cdot (\frac{j\nu}{8} + 1)^2}{(\frac{j\nu}{48} + 1)^2}$$

Transmitancja impulsowa regulatora wynosi:

$$R(z) = \frac{143.9z^2 - 287.9z + 143.9}{z^3 - 1.999z^2 + 0.999z}$$

Równanie różnicowe:

$$u(k) = 1.999u(k-1) - 0.999u(k-2) + (143.9e(k-1) - 287.9e(k-2) + 143.9e(k-3))$$

# 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.

Wszystkie wyznaczone cele zostały zrealizowane.

W wyniku przeprowadzonych prac konstrukcyjnych powstały dwa roboty kategorii Ketchup House, spełniające postawione założenia konstrukcyjne. Roboty "POMIDOR 1,5" oraz PACMAN zostały wyposażone w szereg sensorów umożliwiających realizację algorytmu poruszania się i zbierania puszek.

Robot POMIDOR 1,5 został W robocie POMIDOR 1,5 wyeliminowano większość błędów konstrukcyjnych występujących w robocie POMIDOR.

Robot PACMAN natomiast realizacją koncepcji robota modułowego - w którym można głęboko ingerować w jego budowę. Ponadto umożliwia dużo szersze spektrum zastosowań, np. jako robot inspekcyjny (przy wykorzystaniu modułu wizyjnego), mapujący pomieszczenie (z wykorzystaniem skanera 2D) bądź interaktywno-pokazowy (przy zastosowaniu manipulatora). Jest to konstrukcja typowo prototypowa, niektóre obszary funkcjonalności wymagają dopracowania, jednak można go potraktować jako przyczynek do rozważań na temat tworzenia wielozadaniowych robotów mobilnych. Pracę nad robotem zakończono na etapie zaprojektowania części mechanicznej i elektronicznej. Dalszym krokiem w ramach pracy autora będzie zintegrowanie robota z oprogramowaniem przygotowanym przez kol. Jakuba Pierewoja[3] i przetestowanie jego działań na planszy w warunkach zbliżonych do zawodów.

Dzięki wykonaniu pracy, autor zdobył wiele nowych umiejętności:

- zarządzanie ryzykiem,
- integrowanie części mechanicznej i elektronicznej,
- projektowanie układów mechanicznych i ich symulacja w środowisku Autodesk Inventor,
- projektowanie układów elektronicznych w programie Altium Designer,
- wykonywanie elementów z wykorzystaniem drukarki 3D,,
- przeprowadzenie testów robotów.

# Spis rysunków

1.1	Schemat układu regulacji . . . . .	2
2.1	Wizualizacja dekompozycji obiektu o transmitancji $G$ . . . . .	4
2.2	Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji $G$ . . . . .	5
2.3	Obiekt wraz z układami DAC i ADC . . . . .	6
2.4	Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji $HG^*$ . . . . .	7
2.5	Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji $HG^*$ oraz $G$ . . . . .	8
2.6	Proces wyznaczania transmitancji pseudoczęstotliwej . . . . .	9
2.7	Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji $HGw^*$ oraz $HGw^{*est}$ . . .	10
2.8	Charakterystyka częstotliwościowa transmitancji $HGw^*$ , $HGw^{*est}$ , $HG^*$ oraz $G$ . . . . .	11
2.9	Zaznaczone obszary zabronione wraz z naniesioną transmitancją obiektu .	13
2.10	Transmitancja razem z regulatorem $P$ . . . . .	14
2.11	Zależność przebiegu transmitancji $L^*(jv)$ od różnych wartości $v2$ . . . . .	15
2.12	Przebieg dobranej transmitancji $L$ . . . . .	16

## 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