



PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

Metode de control pentru Twin Rotor

Autor: Zigler Alexandru

Grupa: 30133

AN UNIVERSITAR: 2021-2022

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

Cuprins

1	Scopul Proiectului	3
1.1	Obiective	3
1.2	Specificații	3
2	Determinarea modelului matematic al sistemului	4
2.1	Analiza sistemului	4
2.2	Achiziție semnale	4
2.3	Identificare	6
3	Proiectarea sistemului de control	14
4	Implementarea sistemului de control	20
5	Testare și analiza rezultate	21
6	Concluzii	23

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

1 Scopul Proiectului

1.1 Obiective

Obiectivele proiectului sunt următoarele:

- familiarizarea cu mărimile sistemului (intrări, ieșiri, model matematic) și cu documentația
- realizare experimente și achiziționare date pentru identificare
- implementare metode de identificare pentru sistem
- proiectarea unei metode de control, specifică sistemelor MIMO
- testarea și implementarea sistemului de control

1.2 Specificații

- Pentru identificarea sistemului pentru controlul acestuia se va folosi mediul MATLAB / Simulink.
- Sistemul este unul neliniar, dar se va identifica un sistem liniar în jurul unui punct de funcționare.
- Pentru sistemul de control, se dorește urmărirea referinței, un timp de răspuns și suprareglaj relativ mici.
- Vom lucra cu funcția de transfer sub formă liniarizată (în jurul unui anumit punct de funcționare):

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$H_{11}(s)$ - funcția de transfer de la intrarea 1 (tail rotor) la ieșirea 1 (azimuth)

$H_{12}(s)$ - funcția de transfer de la intrarea 2 (main rotor) la ieșirea 1 (azimuth)

$H_{21}(s)$ - funcția de transfer de la intrarea 1 (tail rotor) la ieșirea 2 (pitch)

$H_{22}(s)$ - funcția de transfer de la intrarea 2 (main rotor) la ieșirea 2 (pitch)

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

2 Determinarea modelului matematic al sistemului

2.1 Analiza sistemului

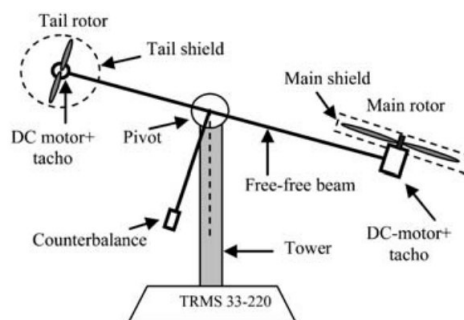


Figure 1: Twin Rotor

Sistemul din figură reprezintă un echipament de laborator cu 2 motoare (Main rotor și Tail rotor), similar unui elicopter. Modelul matematic al sistemului este unul neliniar, iar cuplajul dintre intrări și ieșiri este unul semnificativ. Se compune dintr-un element fix (Tower), o cuplă cinematică (Pivot) și un ax orizontal (free beam) pe care se află motoarele, rezultând astfel cele 2 grade de libertate (2dof). Motoarele antrenează elice, care vor genera cuplu și vor determina deplasarea unghiulară verticală sau orizontală.

Intrările sistemului sunt comenzi PWM pentru cele 2 motoare:

tail rotor - deplasare orizontală - azimuth/yaw

main rotor - deplasare verticală - pitch

Ieșirile sistemului sunt deplasările unghiulare menționate mai sus. Ele se măsoară folosind encodere.

Se dorește controlul ambelor ieșiri, astfel încât acestea să urmărească referința.

2.2 Achiziție semnale

În vederea identificării modelului, s-a efectuat inițial un set de măsurători pe echipamentul din laborator. Datele experimentale sunt rezultate din simulări "open- loop", având ca intrare semnal dreptunghiular (PWM) bipolar, cu frecvența 0.125 Hertz și diferite amplitudini, sau semnal de intrare

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

treaptă de amplitudini reduse. S-au realizat atât experimente 1-dof, cât și 2-dof.

Pentru generarea intrărilor de tip semnal dreptunghiular se implementează o funcție:

```

1 function u1 = sqwerty(ampp,period,t)
2     len=length(0:0.01:period/2);
3     u_prot=[-ampp*ones(1,len),ampp*ones(1,len)];
4     u1=u_prot;
5     while length(u1)<length(t)
6         u1=[u1,u_prot];
7     end
8     u1=u1(1:length(t));
9 end

```

Datele precizate mai sus au fost introduse în structuri de date de tipul iddata, folosind secvențe de cod precum:

```

1 load("square02_02pitch+azimuth1pe8f")
2 t=dataangles1.time;
3 azi=dataangles1.signals(1).values;
4 pitch=dataangles1.signals(2).values;
5 Y=[azi,pitch];
6 U=[sqwerty(0.2,8,t)',sqwerty(0.2,8,t)'];
7 z_dataset_2dof_azi02square_pitch02square=iddata(Y,U,t
    (2));

```

Se efectuează un nou set de măsurători pe echipamentul din laborator, de această dată pe simulări "closed-loop", observând că funcția de transfer $H_{11}(s)$ este instabilă. Ca regulator se folosește pentru simplitate un PID, pus la dispoziție în software-ul "tras": Demo Controller, cu parametrii:

P=4.9395;

I=0.0023;

D=5.188;

În mod analog, se generează seturi de date de tip iddata.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

2.3 Identificare

Identificare de tip MIMO ARX

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) + e(k)$$

unde A și B sunt matrici de polinoame. Pentru implementare, se folosește funcția **"arx"**, care primește ca parametri setul iddata și 3 matrici: Na,Nb,Nk care reprezintă ordinul polinoamelor de pe fiecare poziție din A și B, respectiv ordinul întârzierii.

Se folosesc 3 seturi de date de tip 2-dof. Se încearcă identificarea pe rând cu fiecare dintre acestea. Se validează modelul obținut pe toate cele 3 seturi de date calculând eroarea medie pătratică. Alegem modelul care are cea mai mică eroare medie pătratică. Scripturi și funcții folosite: "model101.m", "bestfriend2.m", "timeyy.m", "model_valf.m", "sqr_error.m".

Simularea modelului (a funcției de transfer MIMO) pe cele 3 seturi de date se poate vedea în Fig 2.

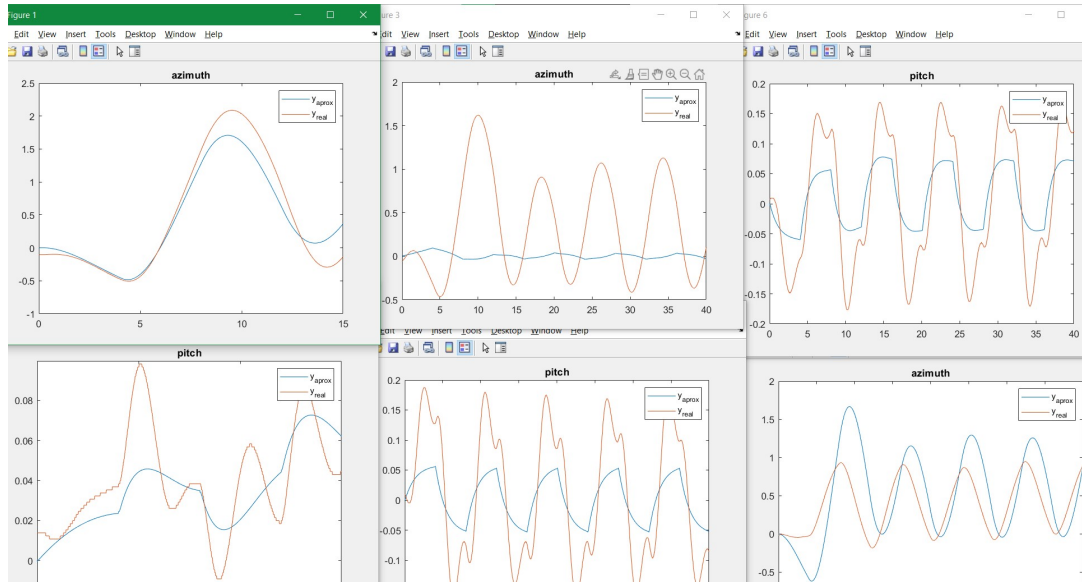


Figure 2: Rezultate arx MIMO

Observăm că rezultatele nu sunt mulțumitoare. De asemenea, gradul funcțiilor este prea mare (20).

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

Identificare closed-loop pentru $H_{11}(s)$

Deoarece funcția de transfer $H_{11}(s)$ (azimuth) este instabilă, se încearcă identificarea de tip closed-loop. Se alege regulatorul PID Demo din software. De notat că se putea alege un regulator care aduce sistemul la stabilitate, începând cu un regulator de tip P, prin încercări, apoi eventual PI sau PID.

Avem la dispoziție 5 seturi de date. Pentru fiecare set de date, se identifică modele în buclă închisă cu număr variat de poli și de zerouri. Identificarea se face folosind funcția **"tfest"**. Se calculează funcția de transfer a procesului, cu relația:

$$H_{11}(s) = \frac{1}{H_c(s)} \cdot \frac{H_{11o}(s)}{1 - H_{11o}(s)}$$

Pentru fiecare set de date se validează modelul curent, cu același regulator, calculându-se eroarea medie pătratică. În final, se face o medie a acestor erori, iar în funcție de media finală, se va alege cel mai bun model.

Acest algoritm se implementează în MATLAB cu funcțiile și script-urile: **"closed.m"**, **"bestfriend1.m"**, **"timeyy.m"**, **"val_closed.m"**, **"sqr_error.m"**.

Gradul sistemului cu care se aproximează funcția de transfer este configurabil. Astfel, pentru o aproximare de ordin 1 a sistemului în buclă închisă obținem:

$$H_{11o}(s) = \frac{0.5268}{s + 0.4616}$$

$$H_{11}(s) = \frac{0.1015s}{s^3 + 0.8869s^2 - 0.06168s - 2.893 \cdot 10^{-5}}$$

Observație: Pentru aproximări ale sistemului în buclă închisă de ordin mai mare sau egal cu 2, sistemul în buclă deschisă va avea ordin mai mare sau egal cu 4 și va fi stabil. Îl vom alege pe cel de mai-sus. Rezultatele se pot vedea în Figura 3.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II				
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota

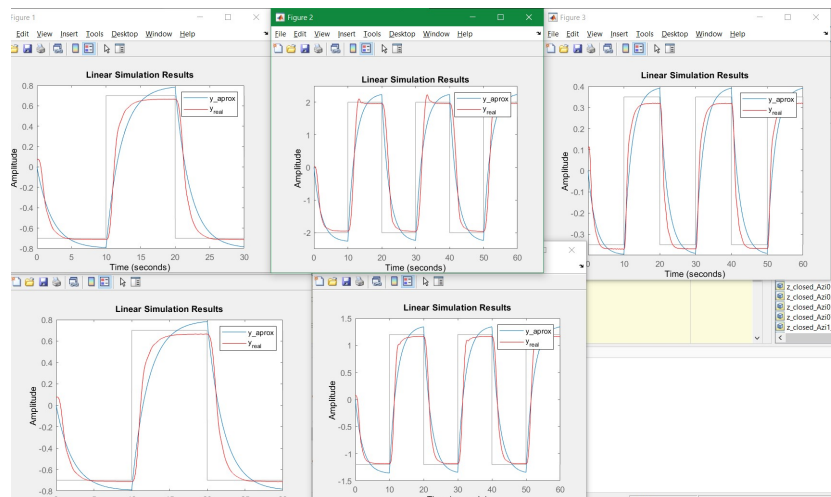
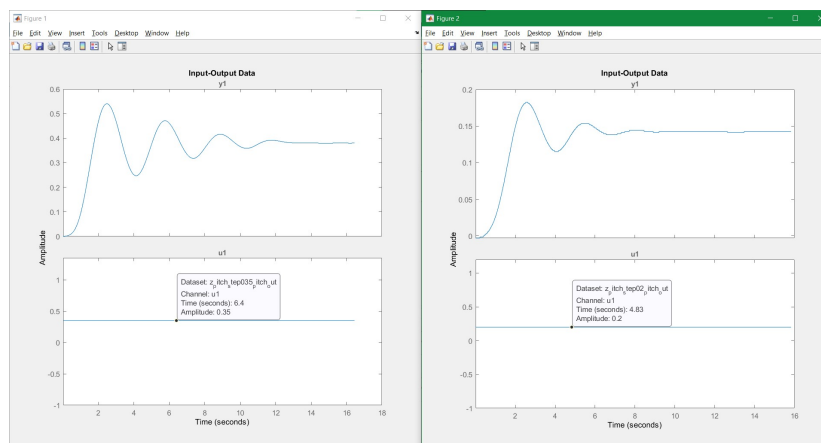


Figure 3: Rezultate identificare closed loop $H_{11}(s)$

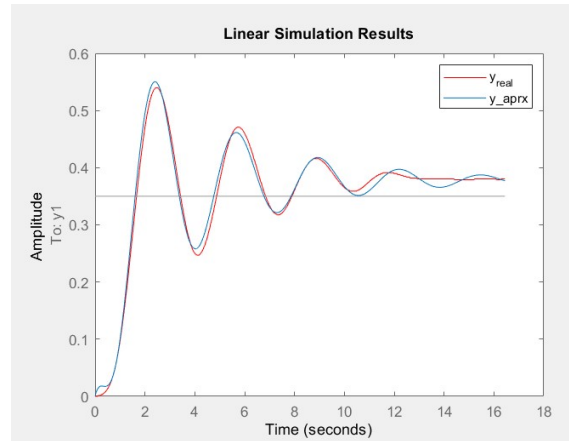
Identificare $H_{22}(s)$

Pentru identificarea funcției de transfer H_{22} (pitch), folosim seturi de date open loop, cu intrare treaptă.

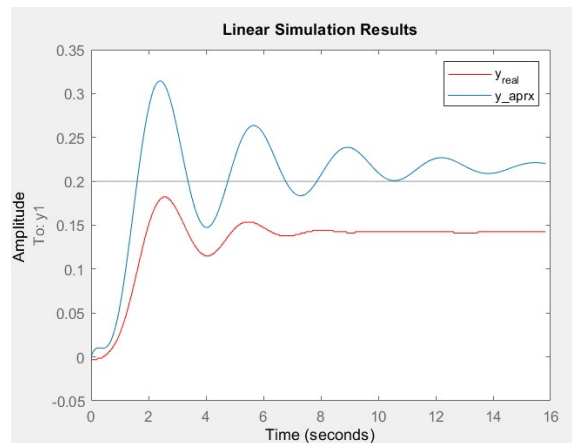


PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II				
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota

Cu funcția ”tfest” se determină funcția de transfer $H_{22}(s)$.



La validarea pe un alt set de date constatăm că aproximarea modelului nu este așa bună.



Acest lucru se datorează nelinariităților sistemului, aproximarea fiind făcută în vecinătatea unui anumit punct.

$$H_{22}(s) = \frac{0.5283s^2 - 2.404s + 8.185}{s^3 + 2.474s^2 + 4.672s + 7.568}$$

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II				
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota

Identificare $H_{12}(s)$

Funcția de transfer $H_{12}(s)$ reprezintă influența intrării 2 (main rotor) asupra ieșirii 1 (azimuth). Folosim aceleași experimente de mai sus, însă de această dată măsurăm ieșirea 1 în locul ieșirii 2.

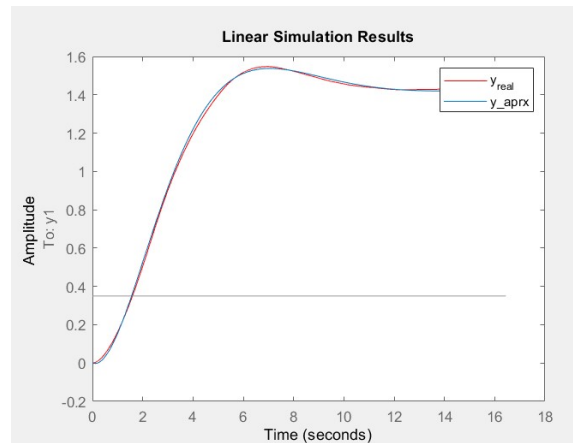
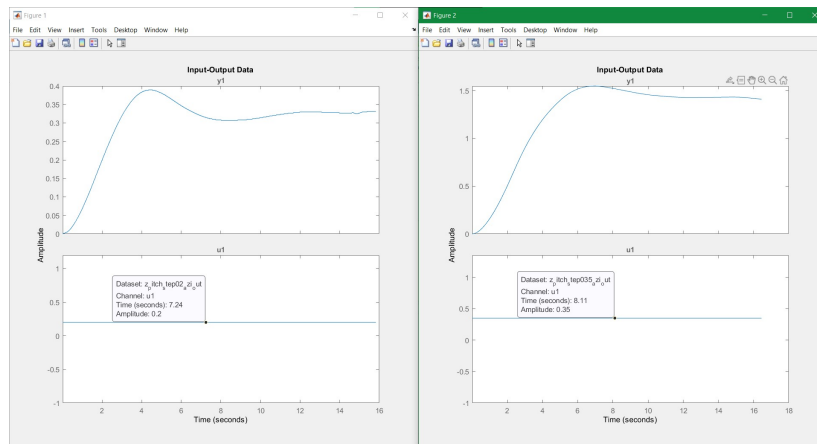


Figure 4: Identificare $H_{12}(s)$

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II				
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota

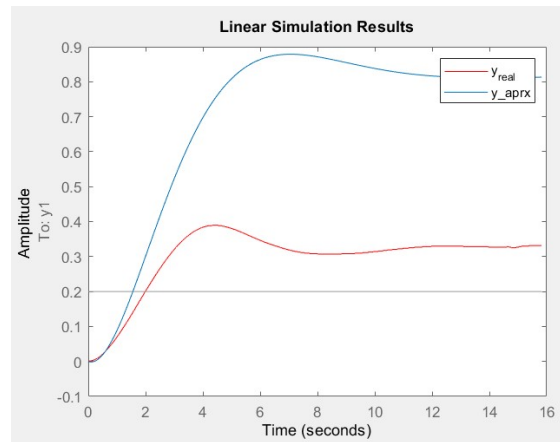
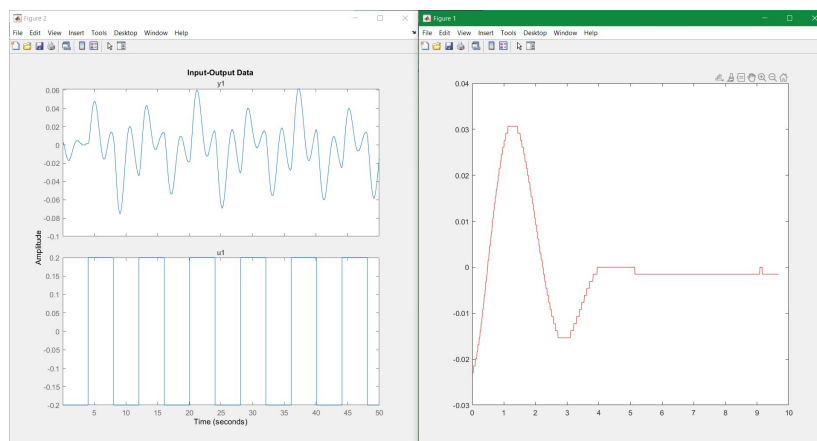


Figure 5: Validare $H_{12}(s)$

$$H_{12}(s) = \frac{-0.1425s + 1.389}{s^2 + 0.7391s + 0.3404}$$

Identificare $H_{21}(s)$

Funcția de transfer $H_{21}(s)$ reprezintă influența intrării 1 (tail rotor) asupra ieșirii 2 (pitch). Folosim 2 seturi de date 1dof open loop cu intrări pe azimuth: o intrare step de amplitudine 0.2 și o intrare square.



PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

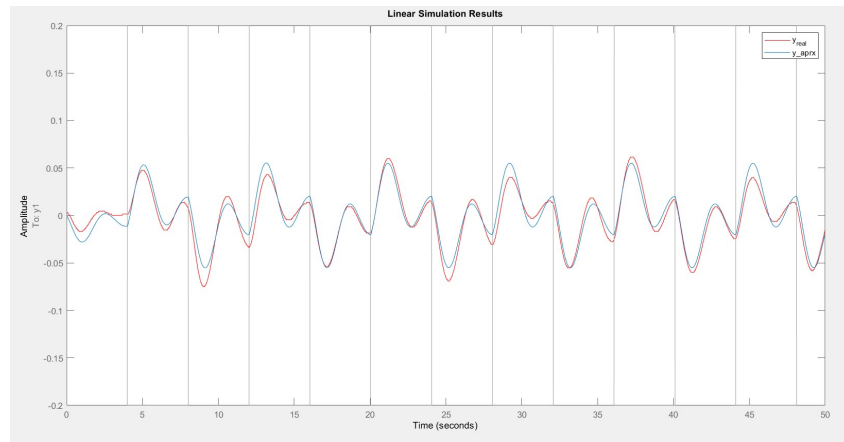


Figure 6: Identificare $H_{21}(s)$

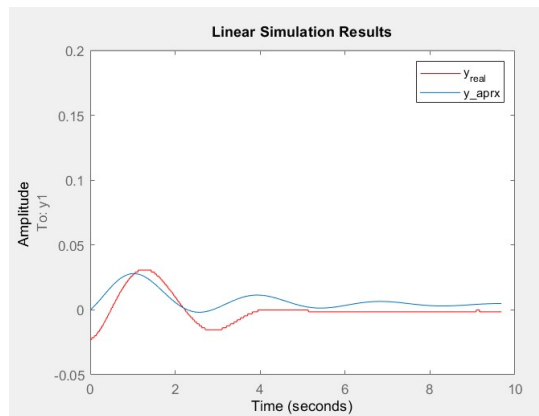


Figure 7: Validare $H_{21}(s)$

$$H_{21}(s) = \frac{0.1382s^2 + 0.5354s + 0.05738}{s^3 + 1.272s^2 + 5.283s + 2.778}$$

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

Pentru identificarea celor 3 funcții de transfer s-a folosit scriptul "lastid.m" și funcțiile "timeyy.m" și "tfest.m".

Funcția de transfer MIMO va fi:

$$H(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.1015s}{s^3+0.8869s^2-0.06168s-2.893 \cdot 10^{-5}} & \frac{-0.1425s+1.389}{s^2+0.7391s+0.3404} \\ \frac{0.1382s^2+0.5354s+0.05738}{s^3+1.272s^2+5.283s+2.778} & \frac{0.5283s^2-2.404s+8.185}{s^3+2.474s^2+4.672s+7.568} \end{bmatrix}$$

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

3 Proiectarea sistemului de control

Având sistemul identificat, putem proiecta sistemul de control. Sistemul fiind unul MIMO, vom încerca metodele de descentralizare și de decuplare.

Metoda descentralizării

Se calculează matricea RGA. Se evaluează funcția de transfer MIMO în punctul 0.

$$G(s)|_{s=0} = \begin{bmatrix} 0 & 4.0805 \\ 0.02065 & 1.0815 \end{bmatrix}$$

$$RGA = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{11} \end{bmatrix}$$

$$\text{unde } \lambda_{11} = \frac{1}{1 - \frac{g_{12}g_{21}}{g_{11}g_{22}}} = \frac{1}{1 - \frac{0.084}{0}} - \text{undefined}$$

Observăm că nu putem folosi metoda descentralizării.

Metoda decuplării

Metoda decuplării presupune adăugarea unor funcții de transfer suplimentare între regulatoare și proces, pentru ca noul proces să aibă valori nule pe diagonală secundară. Astfel, ieșirea 1 va depinde exclusiv de intrarea 1 și ieșirea 2 va depinde exclusiv de intrarea 2, rezultând astfel 2 sisteme SISO.

Funcțiile de transfer introduse trebuie să fie stabile și implementabile. Avem relația:

$$H(s) = G(s) \cdot D(s) \implies D(s) = G^{-1}(s) \cdot H(s),$$

unde $G(s)$ este sistemul inițial identificat, $H(s)$ este sistemul final impus, iar $D(s)$ reprezintă funcția de decuplare.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

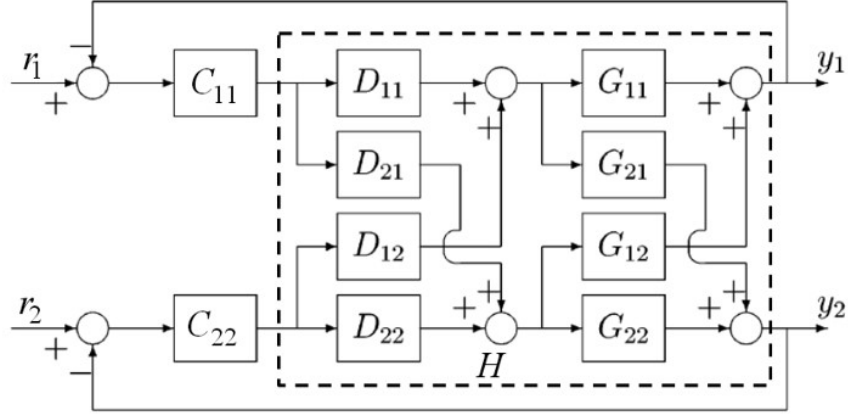


Figure 8: Schemă implementare decuplare

Notăm inițial:

$$H(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & 0 \\ 0 & H_{22}(s) \end{bmatrix}$$

$$D(s) = G^{-1}(s) \cdot H(s) \implies D(s) = \frac{1}{\det G(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)H_{11}(s) & -G_{12}(s)H_{22}(s) \\ -G_{21}(s)H_{11}(s) & G_{11}(s)H_{22}(s) \end{bmatrix}$$

Inițial, considerăm $H_{11}(s) = H_{22}(s) = 1$, pentru a vedea dacă $D(s)$ este implementabil.

$$\det G(s) = G_{11}(s) \cdot G_{22}(s) - G_{12}(s) \cdot G_{21}(s)$$

Observăm în Figura 9 că $D(s)$ are poli în semiplanul drept:

$$s_1 = 8.617;$$

$$s_2 = 0.6008;$$

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

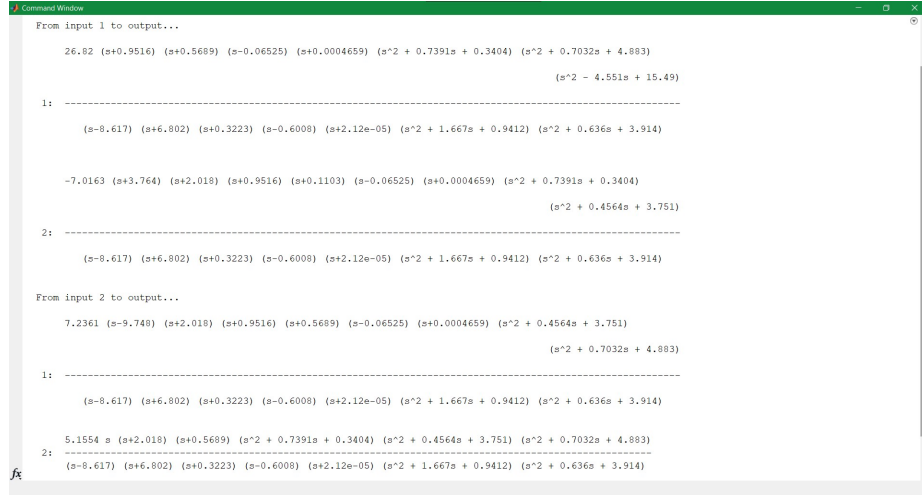


Figure 9: $D(s)$

Poli din semiplanul drept ai funcției $D(s)$ vor deveni zerouri în $H_{11}(s)$ și $H_{22}(s)$. Mai avem nevoie de cel puțin 2 poli în ambele funcții, pentru ca ele să fie cauzale. De asemenea, și funcțiile $D_{11}(s)$, $D_{12}(s)$, $D_{21}(s)$, $D_{22}(s)$ trebuie să fie cauzale, deci va fi nevoie de mai mult de 2 poli. Aceștia se aleg dintre zerourile din funcțiile de transfer din Figura 8, pentru a se simplifica în mod convenabil.

$$H_{11}(s) = \frac{(s - 8.617)(s - 0.6008)}{(s + 0.9516)(s + 0.0004659)(s^2 + 0.7391s + 0.3404)}$$

$$H_{22}(s) = \frac{(s - 8.617)(s - 0.6008)}{(s + 2.018)(s + 0.5689)(s^2 + 0.4564s + 3.751)}$$

$$D_{11}(s) = \frac{26.82(s + 0.5689)(s - 0.06525)(s^2 + 0.7032s + 4.883)(s^2 - 4.551s + 15.49)}{(s + 6.802)(s + 0.3223)(s + 2.12e - 05)(s^2 + 1.667s + 0.9412)(s^2 + 0.636s + 3.914)}$$

$$D_{12}(s) = \frac{7.2361(s - 9.748)(s + 0.9516)(s - 0.06525)(s + 0.0004659)(s^2 + 0.7032s + 4.883)}{(s + 6.802)(s + 0.3223)(s + 2.12e - 05)(s^2 + 1.667s + 0.9412)(s^2 + 0.636s + 3.914)}$$

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

$$D_{21}(s) = \frac{-7.0163(s + 3.764)(s + 2.018)(s + 0.1103)(s - 0.06525)(s^2 + 0.4564s + 3.751)}{(s + 6.802)(s + 0.3223)(s + 2.12e - 05)(s^2 + 1.667s + 0.9412)(s^2 + 0.636s + 3.914)}$$

$$D_{22}(s) = \frac{5.1554s(s^2 + 0.7391s + 0.3404)(s^2 + 0.7032s + 4.883)}{(s + 6.802)(s + 0.3223)(s + 2.12e - 05)(s^2 + 1.667s + 0.9412)(s^2 + 0.636s + 3.914)}$$

Funcțiile de transfer $D(s)$ sunt stabile și implementabile în practică.

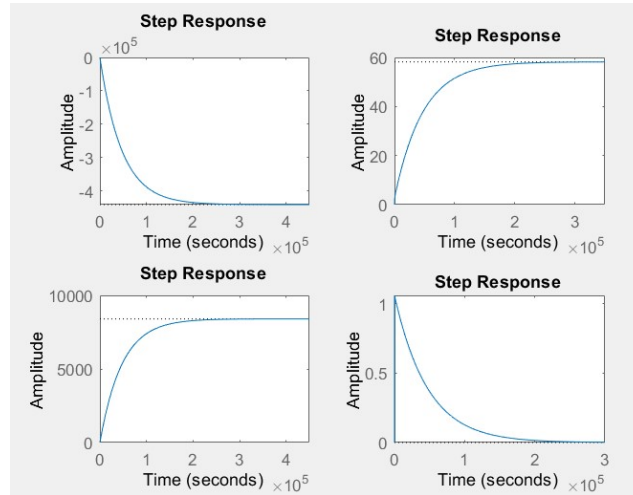


Figure 10: Răspunsul la treaptă al funcțiilor D

La proiectarea regulatorului pentru $H_{11}(s)$, constatăm că sistemul în buclă deschisă are un timp de răspuns foarte mare (8400 secunde), după cum se poate vedea în figura 11. Un asemenea timp de răspuns nu este admisibil, deci va trebui să reconstruim funcția $H_{11}(s)$.

Observăm că problema majoră este polul $\hat{s} = -0.0004659$, deoarece are constanta de timp foarte mare.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

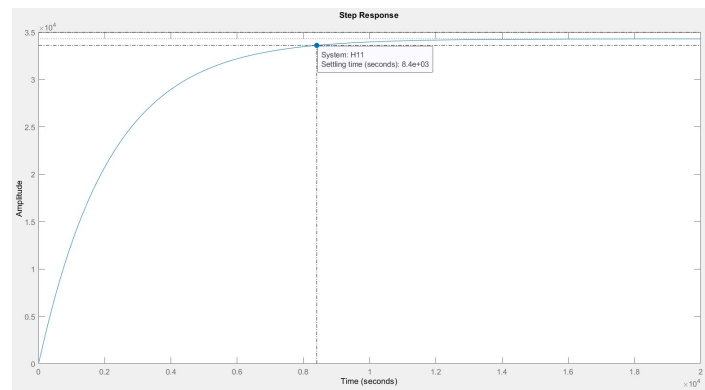


Figure 11: Răspunsul la treaptă al $H_{11}(s)$

Dacă ignorăm polul menționat mai sus, vedem că funcția $D(s)$ rămâne implementabilă și stabilă. Atunci:

$$H_{11}(s) = \frac{(s - 8.617)(s - 0.6008)}{(s + 0.9516)(s^2 + 0.7391s + 0.3404)}$$

Rămâne să proiectăm regulatoare pentru $H_{11}(s)$ și $H_{22}(s)$.

Folosim funcția "pidtool" din MATLAB.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II				
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota

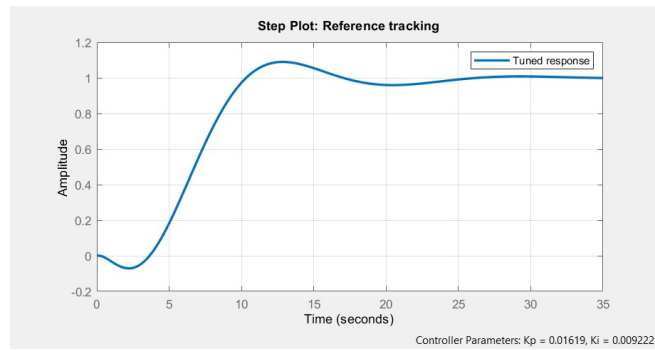


Figure 12: Răspunsul în buclă închisă cu un regulator PI - ieșirea 1

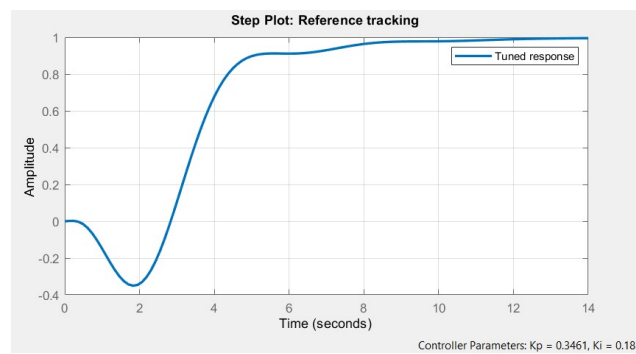


Figure 13: Răspunsul în buclă închisă cu un regulator PI - ieșirea 2

$$H_{PI1} = \frac{0.01619s + 0.009222}{s}$$

$$H_{PI2} = \frac{0.3461s + 0.181}{s}$$

Pentru sistemul de control s-a folosit scriptul "twin_control" și modelul simulink "twin_decouple".

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

4 Implementarea sistemului de control

Implementarea se poate observa în Figura 17.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II				
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota

5 Testare și analiza rezultate

Testare Simulink

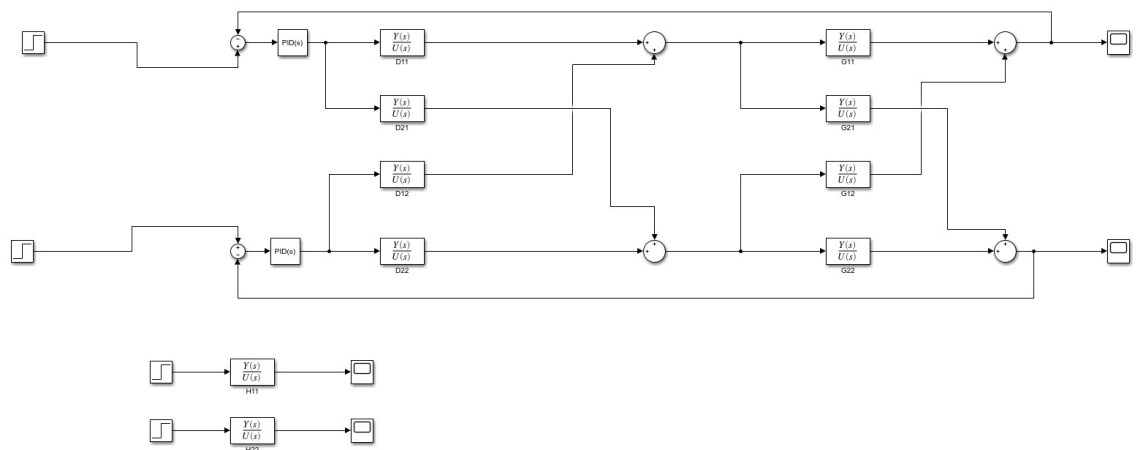


Figure 14: Implementare Simulink

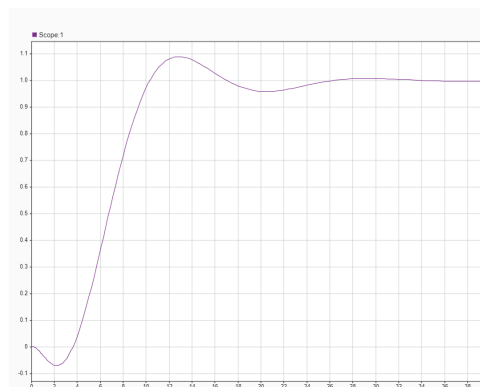


Figure 15: Ieșire 1

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

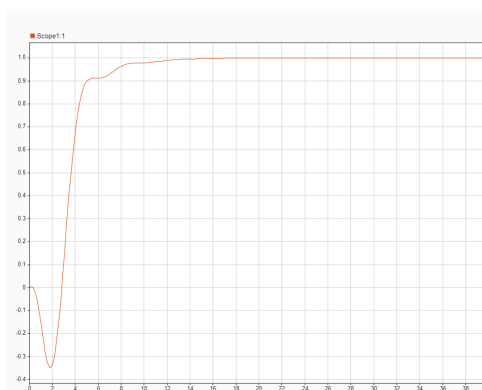


Figure 16: Ieșire 2

Constatăm că decuplarea a funcționat, iar regulatoarele au performanțe acceptabile.

Testare software tras

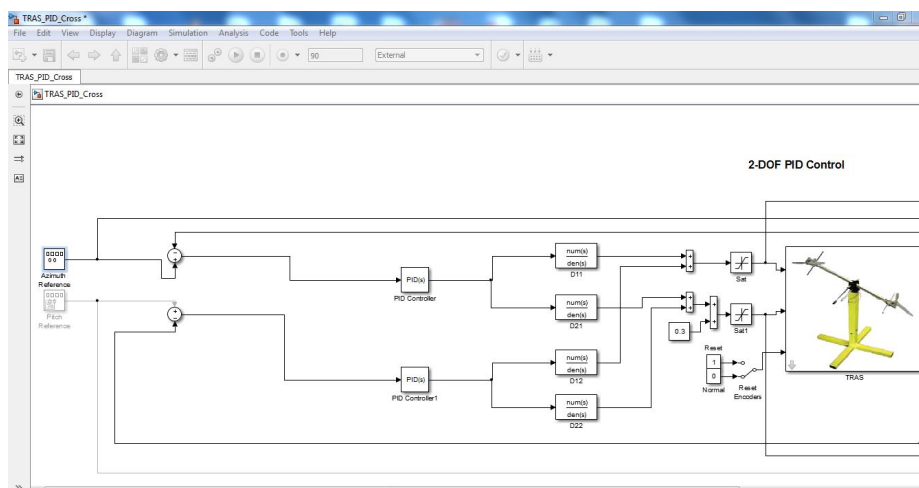


Figure 17

În urma simulării reguletoarelor în laborator, constatăm că sistemul în buclă închisă este instabil.

PROIECT INGINERIA REGLARII AUTOMATE II					
NUME student	Zigler Alexandru	GRUPA:	30133	Nota	

6 Concluzii

- Procesul de identificare a fost unul solicitant și dificil, iar rezultatele au fost nesatisfăcătoare.
- Este necesară o identificare a unei game variate de modele în mai multe puncte de funcționare, introducând variabile în funcțiile de transfer.
- O modelare analitică, apoi o liniarizare în mai multe puncte de funcționare ar putea da rezultate mai bune ca idenificare, dar de asemenea, avem parametri și funcții care trebuie determinate experimental.
- S-ar putea folosi metode mai avansate de control: control optimal, control robust.
- Partea de decuplare a fost realizată cu succes, iar controlul procesului identificat este rezonabil.
- Se puteau folosi diferite metode de proiectare a reguletoarelor("în loc de funcția "pidtool"), dar în urma rezultatelor din laborator (sistem instabil), acest lucru nu mai este necesar.