



UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE
DEPARTAMENT AUTOMATICĂ ȘI INGINERIA
SISTEMELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

*Contribuții la optimizarea regimului de combustie al
motoarelor Diesel*

*Contributions to the optimization of the combustion regime
of Diesel engines*

Student: **ing. Mihaela-Ancuța Mone**

Coordonator: **Prof. dr. ing. Dumitru Popescu**

București
2021

Comisia de Doctorat:

Președinte	Conf. dr. ing. Mihnea MOISESCU	de la	Universitatea „Politehnica” din București
Conducător de Doctorat, co- director teză	Prof. dr. ing. Dumitru POPESCU	de la	Universitatea „Politehnica” din București
Membru, co- director teză	Prof., dir. cercetare Sette DIOP	de la	CentraleSupélec, Université Paris- Saclay
Membru	Prof. dr. ing. Radu- Emil PRECUP	de la	Universitatea Politehnica Timișoara
Membru	Prof. dr. ing. Mircea IVĂNESCU	de la	Universitatea din Craiova

Listă Publicații:

1. *Stochastic optimization and minimal risk problems*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 2017 14th International Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Proceedings IFAC ACD 2017.
2. *Digital Control Ecosystem for Steel Plant Installations*, Dumitru Popescu, Ancuta Mone, Severus Constantin Olteanu, Lavinius Gliga, 2018 Academic Days of the Academy of Technical Sciences of Romania (ZASTR), ISSN 2066-6586.
3. *Optimal control of the combustion regime of an experimental Diesel Engine*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, National Scientific Conference of the Academy of Romanian Scientist, vol. XIII, issue 1, 2019, ISSN 2601-5102.
4. *Optimal control for Diesel engine combustion regime*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), p. 42-47, DOI: 10.1109/CSCS47589.2019.
5. *Multi Model Control - MMC approach for nonlinear combustion regime of Diesel Engines*, 15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis(ACD 2019), Proceedings of the Workshop held in Bologna, Italy, on November 21–22, 2019, ISBN 978-3-030-85317-4, DOI 10.1007/978-3-030-85318-1, 2022.

6. *Optimal multi-model control for nonlinear systems with parametric uncertainties - Diesel Engine case study*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), IEEE Catalog Number: CFP2036P-ART, ISBN: 978-1-7281-9809-5.
7. *Advanced Control for Hydrogen Pyrolysis Installations*, Dumitru Popescu, Catalin Dimon, Pierre Borne, Severus C. Olteanu, and Mihaela A. Mone, 2020, Energies 13, no. 12: 3270, <https://doi.org/10.3390/en13123270>.
8. *Evaluating the maximum domain of parameter model uncertainties in the combustion of a Diesel engine*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 2021 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), a fi publicată în IEEE Xplore Digital Library.

Cuvinte-cheie:

Industria constructoare de mașini; Motoare Diesel; Reducerea emisiilor poluante; Modelare matematică; Incertitudini parametrice; Control robust RST; Control robust LQR; Multi-model multi-controller (Control MMMC); Simulare; MATLAB/Simulink.

Cuprins

1. Introducere	7
2. Modelarea matematică a procesului de combustie al motorului Diesel	9
2.1. Model invariant liniarizat cu reprezentare în spațiul stărilor	
9	
2.2. Modelul de stare redus.....	10
2.3. Analiză de stabilitate, controlabilitate și observabilitate	11
2.4. Calculul modelului dinamic liniarizat	12
2.4.1. Modelul invariant.....	12
2.4.2. Modelul invariant redus	13
3. Proiectarea comenzii polinomiale RST	15
3.1. Forma canonică a comenzii numerice RST	15
3.2. Proiectarea comenzii nominale RST prin alocare de poli	16
3.3. Control robust RST.....	16
3.4. Calculul comenzii RST – metoda alocării polilor	17
3.5. Calculul comenzii robuste RST.....	20
4. Evaluarea domeniului maxim de incertitudine de model pentru procesul de combustie	23
4.1. Proiectarea comenzii optimale de tip LQR	23
4.2. Control optimal robust – incertitudini parametrice	24
4.3. Calculul comenzii LQR.....	25
4.3.1. Modelul de stare invariant	25
4.3.2. Modelul de stare invariant redus	29
5. Proiectarea comenzii multi-model multi-controller	35
5.1. Control MMMC pentru configurații SISO	36
5.1.1. Control pentru reprezentare I/O	36

5.1.2.	Control MMMC pentru reprezentare pe stare	38
5.2.	Control MMMC pentru configurații MIMO39	
6.	Concluzii, contribuții personale și perspective de cercetare	41
6.1.	Concluzii	41
6.2.	Contribuții personale	42
6.3.	Future research	44
Bibliografie		45

1. Introducere

Această teză reprezintă o cercetare în domeniul industriei constructoare de mașini, relevând diferitele tehnologii utilizate pentru îmbunătățirea mediului înconjurător și a confortului pasagerilor, strategiile implementate de către constructorii auto în Europa (e.g. Toyota Motor Corporation, Stellantis – alcătuită din PSA și FCA, Alianța Renault-Nissan-Mitsubishi, Hyundai Motor, Volkswagen AG, BMW Group, Ford, Daimler AG, Honda Motor, Volvo Cars, Jaguar Land Rover LTD, Mazda Motor Corporation) pentru a respecta norma CAFÉ care impune limitarea emisiilor de CO_2 la anumite praguri, impactul negativ pe care criza sanitară COVID-19 a avut-o și continuă să o aibă asupra industriei auto, precum și tendințele în materie de mobilitate, care conduc la dezvoltarea mobilității electrice (i.e. motoare HCCI și CAI, HEVC/EV/PHEV) [1-19].

Eforturile tehnologice și de modernizare din domeniul auto nu vor avea o eficacitate corespunzătoare dacă motoarele electrice sau pe bază de hidrogen nu vor folosi electricitate care să fie produsă cu ajutorul unor sisteme cu un nivel redus al emisiilor. De aceea, obiectivul principal al tezei îl reprezintă optimizarea procesului de combustie al unui motor Diesel, dotat cu un sistem de recirculare a gazelor arse (EGR) și turbină variabilă (VGT), prin controlul presiunii din galeria de admisie și al debitului de aer produs de VGT către galeria de admisie. Acest echipament se află pe o platformă experimentală la Universitatea Picardie Jules Verne din Amiens, Franța.

Între septembrie și decembrie 2018 am realizat un stagiul în cadrul laboratorului de semnale și sisteme (Laboratoire des Signaux et Systèmes) de la Centrale Supélec, Universitatea Paris-Saclay, unde am beneficiat de îndrumarea domnului profesor Sette Diop, co-director al acestei teze, și cercetător al CNRS (Fr. *Centre National de la Recherche Scientifique*).

Între septembrie 2019 și ianuarie 2021 am participat la proiectul A-Success, *Dezvoltarea competențelor de antreprenoriat ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – cheie a succesului în carieră*, cod MySMIS: 125125, unde am obținut premiul I în urma dezvoltării unui plan de afacere inspirat de teza de doctorat.

2. Modelarea matematică a procesului de combustie al motorului Diesel

Modelul matematic al motorului poate fi obținut plecând de la ecuația generală a gazelor ideale [20]:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT \quad (2.1)$$

unde m este cantitatea de substanță prezentă într-un tub de volum V , presiune p și temperatură T . M este masa moleculară a gazului și R este constanta gazelor ideale.

2.1. Model invariant liniarizat cu reprezentare în spațiul stărilor

Referința [22] un model invariant cu reprezentare în spațiul stărilor al motorului Diesel, plecând de la ecuația gazelor ideale și scriind o ecuație diferențială atât pentru admisie, cât și pentru evacuarea din ciclul de funcționare al motoarelor Diesel, și considerând dinamica transferului de putere al compresorului, întârziată cu δ :

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= \frac{RT_i}{V_i} (F_i + F_{EGR} - F_{ie}) + \frac{\dot{T}_i}{T_i} p_i \\ \dot{p}_e &= \frac{RT_e}{V_e} (F_{ie} + F_f - F_{EGR} - F_{VGT}) + \frac{\dot{T}_e}{T_e} p_e \\ \dot{P}_C &= \frac{P_T - P_C}{\delta} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Notăția i semnifică valoarea parametrilor la admisie, e – parametrii la evacuare, p este presiunea, T este temperatura, V este volumul, R este

constanta lui Reynolds, F_{EGR} este debitul prin EGR, F_{VGT} este debitul prin VGT, F_{ie} – debitul din camera de admisie, F_f – debitul de combustibil, P_c – puterea compresorului, P_T – puterea turbinei.

Prin rescrierea variabilelor F_{EGR} și F_{VGT} sub forma ecuației curgerii unui debit printr-o restricție, și considerând legea conservării maselor într-un sistem deschis, (2.2) este rescrisă sub următoarea formă a reprezentării în spațiul stărilor [21]:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{p}_i \\ \dot{p}_e \\ \dot{P}_c \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} p_i \\ p_e \\ P_c \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} S_R \\ x_{VGT} \\ N \\ F_f \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} F_i \\ p_i \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} p_i \\ p_e \\ P_c \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} S_R \\ x_{VGT} \\ N \\ F_f \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2.3)$$

unde componentele vectorului de intrare sunt S_R – suprafața valvei EGR, x_{VGT} – poziția valvei VGT, N – turația motorului, F_f – debitul de combustibil; elementele vectorului ieșirilor a fi controlate sunt F_i – debitul de aer masic și p_i – presiunea din camera de admisie.

2.2. Modelul de stare redus

Intrările S_R și x_{VGT} sunt redefinite prin adăugarea unor offseturi corespunzând centrului intervalului aferent elementului de acționare. Debitul de combustibil și turația motorului sunt considerate constante. Rezultă următorul model invariant redus [22]:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{p}_i \\ \dot{p}_e \\ \dot{P}_c \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} p_i \\ p_e \\ P_c \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} S_R \\ x_{VGT} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} F_i \\ p_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\eta_{CTT}}{c_p T_{amb}} \frac{1}{\left(\frac{p_i}{p_{amb}}\right)^{\gamma} - 1} \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_i \\ p_e \\ P_c \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2.4)$$

2.3. Analiză de stabilitate, controlabilitate și observabilitate

Sistemul este stabil dacă matricea de sistem, A , din (2.3) și (2.4) are toate valorile proprii în stânga planului complex.

Un sistem a cărui reprezentare în spațiul stărilor este dată prin (2.3) sau (2.4) este controlabil dacă rangul matricei de controlabilitate [23]:

$$M_C = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (2.5)$$

este același cu rangul matricei A , i.e. există o comandă care să acționeze asupra ieșirii sistemului.

Un sistem a cărui reprezentare în spațiul stărilor este dată prin (2.3) sau (2.4) este observabil dacă rangul matricei de observabilitate [23]:

$$M_O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

este același cu cel al matricei A , adică poate estima o stare din prelucrarea mărimii măsurate $y = \begin{pmatrix} F_i \\ p_i \end{pmatrix}$.

2.4. Calculul modelului dinamic liniarizat

2.4.1. Modelul invariant

Pentru simularea modelului invariant cu 4 intrări și 2 ieșiri (2.3), am considerat următoarele valori numerice pentru matricele A , B , C și D :

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -3,625 & 0 & 373,0841 \\ 35,3698 & -93,4776 & 0 \\ 0 & 0,026 & -9,0909 \end{bmatrix} \\ B &= 10^5 + 0,05 \begin{bmatrix} 0,5714 & 0 & -0,000003 & 0 \\ -5,5755 & 0,1020 & 0,00003 & 1,4608 \\ 0 & -0,0002 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,0249 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Am calculat matricea de controlabilitate folosind (2.5). Rangul matricei de controlabilitate este 3, egal cu rangul matricei A din (2.7), rezultând că sistemul este controlabil.

Am calculat matricea de observabilitate folosind (2.6). Rangul matricei de observabilitate este 3, egal cu rangul matricei A din (2.7), rezultând că sistemul este observabil.

Dinamica modelului invariant (2.3) în simulare poate fi observată în figura 2.1.

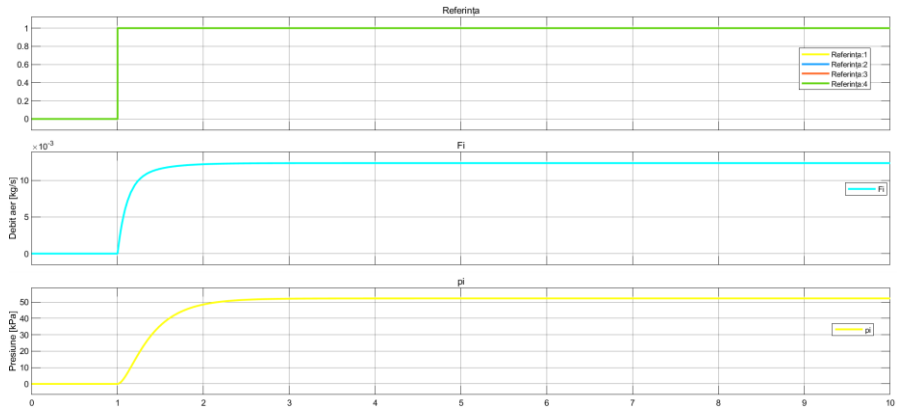


Fig. 2.1. Dinamica modelului invariant

Primul semnal din graficul de mai sus îl reprezintă referința treaptă, al doilea – debitul de aer F_i (kg/s), și al treilea – presiunea p_i (kPa).

2.4.2. Modelul invariant redus

Pentru simularea modelului invariant redus cu 2 intrări și 2 ieșiri (2.4), am considerat următoarele valori numerice ale matricelor A , B , C și D :

$$\begin{aligned}
 A_r &= \begin{bmatrix} -3,625 & 0 & 373,0841 \\ 35,3698 & -93,4776 & 0 \\ 0 & 0,026 & -9,0909 \end{bmatrix} \\
 B_r &= \begin{bmatrix} 57140 & 0 \\ -557550 & 10200 \\ 0 & -20 \end{bmatrix} \\
 C_r &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,0249 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 D_r &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Am calculat matricea de controlabilitate folosind (2.5). Rangul matricei de controlabilitate este 3, egal cu rangul matricei A din (2.8), rezultând că sistemul este controlabil.

Am calculat matricea de observabilitate folosind (2.6). Rangul matricei de observabilitate este 3, egal cu rangul matricei A din (2.8), rezultând că sistemul este observabil.

Dinamica modelului invariant redus (2.4) în simulare poate fi observată în figura 2.2.

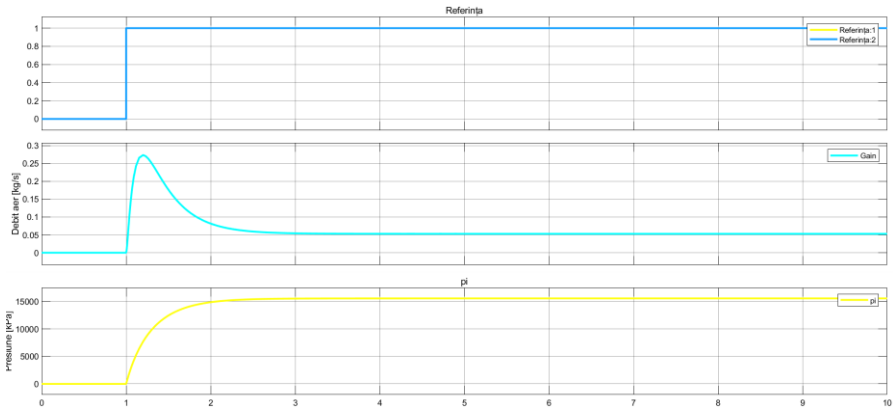


Fig. 2.2. Dinamica modelului invariant redus

Primul semnal din graficul anterior este reprezentat de referința treaptă, al doilea – debitul de aer F_i (kg/s), și al treilea – presiunea p_i (kPa).

Atât modelul invariant, cât și modelul invariant redus sunt stabile, controlabile și observabile, rezultând că ele pot fi utilizate în faza de proiectare a algoritmilor de control ai debitului de aer F_i și ai presiunii p_i .

3. Proiectarea comenzii polinomiale RST

3.1. Forma canonică a comenzii numerice RST

Forma canonică a cpmenzii numerice RST este [21]:

$$u[k] = \begin{bmatrix} T(q^{-1}) & -R(q^{-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r[k] \\ y[k] \end{bmatrix}, \forall k \in \mathbb{N}$$

$$\begin{aligned} R(q^{-1}) &= r_0 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{n_r} q^{-n_r} \\ S(q^{-1}) &= s_0 + s_1 q^{-1} + \dots + s_{n_s} q^{-n_s} \\ T(q^{-1}) &= t_0 + t_1 q^{-1} + \dots + t_{n_t} q^{-n_t} \end{aligned} \quad (3.1)$$

unde $r[k]$ este referința, $u[k]$ – comanda, $y[k]$ – ieșirea sistemului, s_i, r_i, t_i – coeficienții polinoamelor $R(q^{-1})$, $S(q^{-1})$, $T(q^{-1})$ aferenți regulatorului.

Sistemul în buclă închisă poate fi observat în figura 3.1.

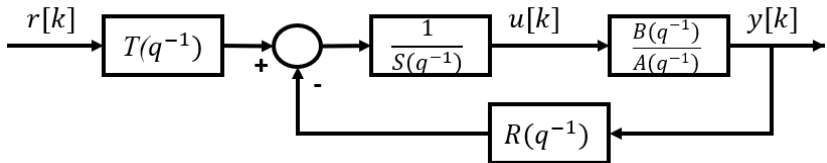


Fig. 3.1. RST closed-loop system

Urmărind figura 3.1, funcția de transfer a sistemului în buclă închisă este:

$$H_{RST}(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})T(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} \quad (3.2)$$

3.2. Proiectarea comenzii nominale RST prin alocare de poli

Metoda alocării polilor presupune impunerea polilor sistemului în buclă închisă, astfel:

$$\begin{aligned} P(q^{-1}) &= 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2} + \dots + p_n q^{-n_p} \\ &= A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Pentru găsirea soluției ecuației polinomiale de mai sus, folosim următoarea formă matriceală::

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{p} \quad (3.4)$$

unde:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^T &= [1 \ s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{n_b+\delta} \ r_0 \ r_1 \ \dots \ r_{n_a-1}] \\ \mathbf{p}^T &= [1 \ p_1 \ p_2 \ \dots \ s_{n_a+n_b+\delta}] \end{aligned} \quad (3.5)$$

\mathbf{M} este matricea Sylvester.

Coeficienții polinoamelor $S(q^{-1})$ și $R(q^{-1})$ se obțin din inversarea matricei \mathbf{M} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{p} \quad (3.6)$$

$T(q^{-1})$ are următoarea formă:

$$T(q^{-1}) = GP(q^{-1}) = \begin{cases} \frac{1}{B(1)}P(q^{-1}), B(1) \neq 0 \\ P(q^{-1}), B(1) = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

3.3. Control robust RST

Indicatorii de robustețe luați în considerare sunt marginea de modul ΔM și funcția de sensibilitate ($S_{vy}(e^{-j\omega})$). Acești indicatori exprimă

robustețea structurii de control în funcție de distanța minimă de la punctul critic $(-1,0)$ din planul Nyquist.

Figura 3.2 prezintă marginea de modul a unui sistem în buclă deschisă.

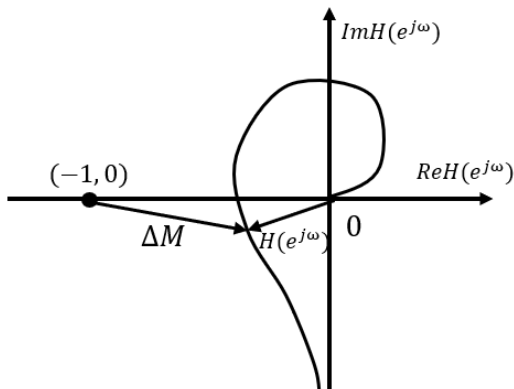


Fig. 3.2. Marginea de modul ΔM

Prin definiție:

$$\begin{aligned}
 \Delta M &= \min_{\omega \in \mathbb{R}} |1 + H(e^{j\omega})| = \\
 &= \min_{\omega \in \mathbb{R}} \sqrt{(1 + \operatorname{re}(H(e^{j\omega})))^2 + \operatorname{im}^2(H(e^{j\omega}))} \quad (3.8) \\
 &= \min_{\omega \in \mathbb{R}} \frac{1}{|S_{vy}(e^{-j\omega})|} = \frac{1}{\max_{\omega \in \mathbb{R}} |S_{vy}(e^{-j\omega})|}
 \end{aligned}$$

Pentru a obține marginea de modul este suficient să fie reprezentate grafic caracteristicile de frecvență ale modulului funcției de sensibilitate în dB.

3.4. Calculul comenzii RST – metoda alocării polilor

Funcțiile de transfer direct de la intrare la ieșire pentru cele două sisteme decuplate SISO sunt:

$$\begin{aligned}
 H_{EGR-p_i}(q^{-1}) &= \frac{280,8q^{-3} - 102,9q^{-2} - 273,6q^{-1} - 99,2}{q^{-3} - 2,271q^{-2} + 1,617q^{-1} - 0,3458} \\
 H_{VGT-F_i}(q^{-1}) & \\
 &= \frac{0,03711q^{-3} - 0,0785q^{-2} + 0,09375q^{-1} + 0,02185}{q^{-3} - 2,271q^{-2} + 1,617q^{-1} - 0,3458}
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Răspunsurile transferurilor $EGR - p_i$ și $VGT - F_i$ sunt listate grafic în figurile 3.3 și, respectiv, 3.4, pentru o perioadă de eșantionare $T_e = 0,01$ s.

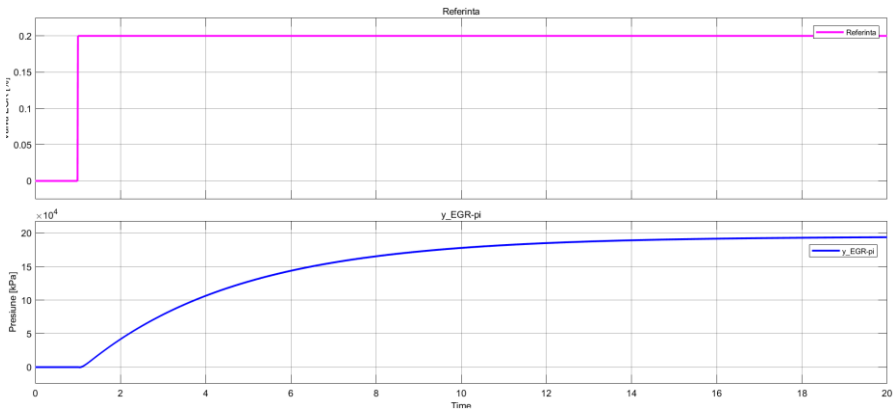


Fig. 3.3. Răspunsul transferului direct $EGR - p_i$

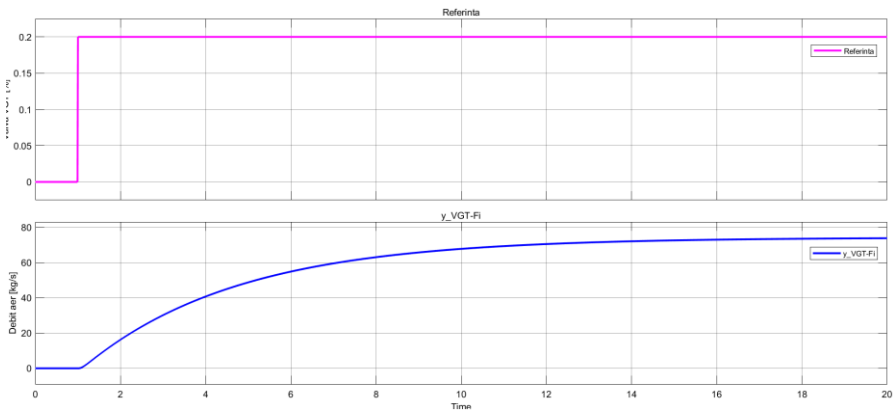


Fig. 3.4. Răspunsul transferului direct $VGT - F_i$

Pentru proiectarea comenzii numerice RST prin metoda alocării polilor am considerat o funcție de transfer de ordinul II, ale cărei proprietăți sunt: pulsația naturală $\omega_n = 1 \frac{rad}{d}$ și factorul de amortizare $\zeta = 0,7$.

Pentru transferul EGR- p_i am obținut:

$$R(q^{-1}) = \begin{bmatrix} -5,655 * 10^{-5} \\ -2,4735 * 10^{-4} \\ 3,0455 * 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$S(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0,9145 \\ 0,1916 \\ 0,0162 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$T(q^{-1}) = [-0,0051 \quad 0,0102 \quad -0,0051 \quad 0 \quad 0]$$

Pentru transferul VGT- F_i am obținut:

$$R(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0,4722 \\ 0,2139 \\ -0,6883 \end{bmatrix}$$

$$S(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 1,0255 \\ 0,2810 \\ 0,0298 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$T(q^{-1}) = [13,4753 \quad -26,7619 \quad 13,2879 \quad 0 \quad 0]$$

Răspunsul la intrare treaptă pentru sistemele în buclă închisă aferente transferurilor EGR – p_i și VGT – F_i sunt prezentate în graficele din figurile 3.5 și, respectiv, 3.6.

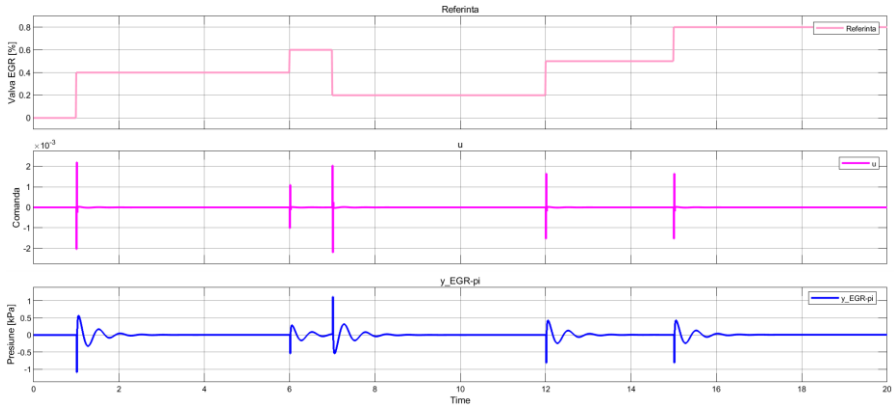


Fig. 3.5. Răspunsul indicial al sistemului EGR – p_i în buclă închisă

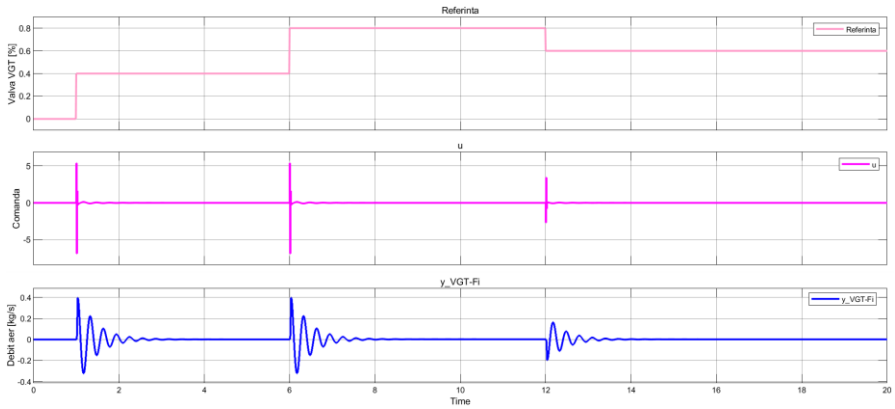


Fig. 3.6. Răspunsul indicial al sistemului VGT – F_i în buclă închisă

3.5. Calculul comenzii robuste RST

După aplicarea algoritmului de control robust RST, am obținut următoarele valori ale polinoamelor $R(q^{-1})$, $S(q^{-1})$, $T(q^{-1})$:

- Transferul EGR- p_i :

$$R(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 9,7915 * 10^{-4} \\ -0,0045 \\ 0,0062 \\ -0,0026 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$S(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 1,7362 \\ 2,4217 \\ 1,346 \\ 0,2809 \end{bmatrix}$$

$$T(q^{-1}) = [-0,0026 \quad 0,0051 \quad -0,0025 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

- Transferul $VGT-F_i$:

$$R(q^{-1}) = \begin{bmatrix} -3,0995 \\ 14,4651 \\ -19,7220 \\ 8,3571 \end{bmatrix}$$

$$S(q^{-1}) = \begin{bmatrix} 0,6899 \\ 1,3483 \\ 1,2338 \\ 0,1958 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$T(q^{-1}) = [6,7376 \quad -13,3809 \quad 6,6440 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

Răspunsul indicial al sistemelor $EGR - p_i$ și $VGT - F_i$ în buclă închisă pot fi observate în figurile 3.7 și, respectiv, 3.8.

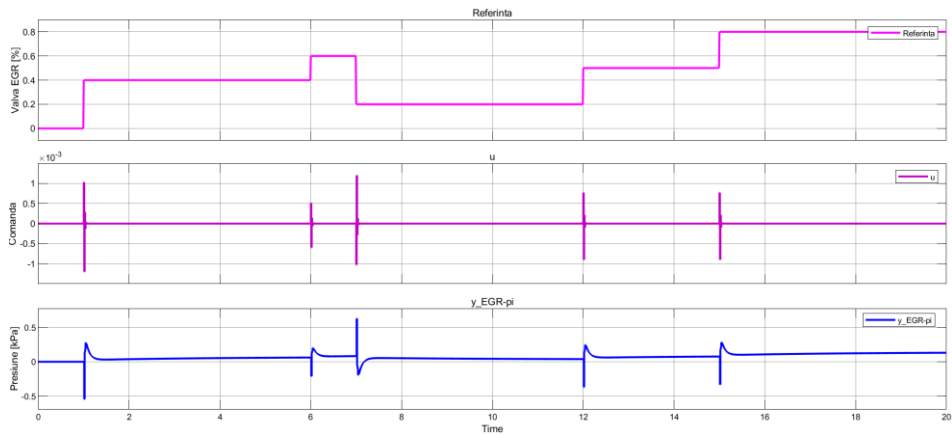


Fig. 3.7. Control robust RST p_i

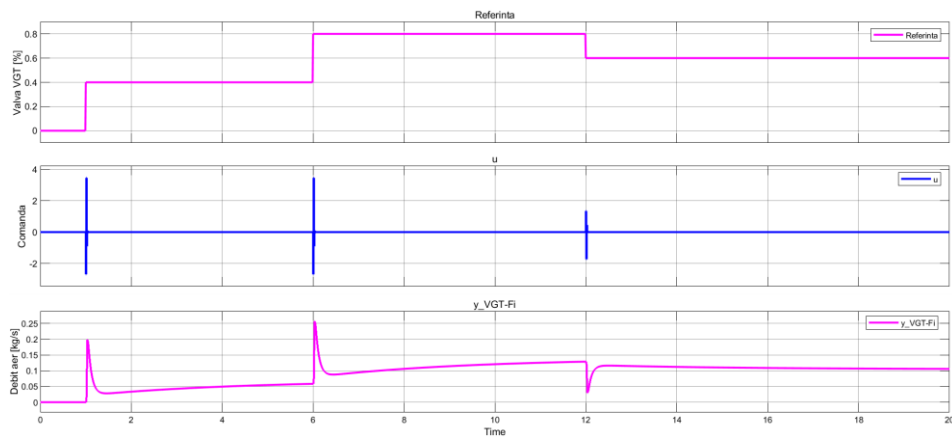


Fig. 3.8. Control robust RST F_i

Rezultatele obținute în acest capitol vor fi comparate cu cele din capitolul IV, unde sistemele sunt reprezentate în spațiul stărilor.

4. Evaluarea domeniului maxim de incertitudine de model pentru procesul de combustie

4.1. Proiectarea comenzii optimale de tip LQR

Controlul optimal LQR presupune găsirea matricei de comandă \mathbf{K} a.î. comanda:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \\ \mathbf{K} &= \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} \end{aligned} \quad (4.1)$$

să minimizeze următorul indicator de performanță:

$$J(t) = \int_0^{\infty} \mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)dt \quad (4.2)$$

\mathbf{P} din (4.1) reprezintă soluția ecuației Riccati:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (4.3)$$

Matricele \mathbf{Q} și \mathbf{R} pot fi alese conform regulii Bryson [29]:

$$\begin{aligned} Q_{ii} &= \frac{1}{\text{valoarea maximă acceptabilă a lui } x_i^2} \\ R_{jj} &= \frac{1}{\text{valoarea maximă acceptabilă a lui } u_j^2} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T\mathbf{P}\mathbf{x}$ este o funcție Lyapunov pentru sistemul în buclă închisă, deoarece:

1. $V(\mathbf{x}) > 0, \mathbf{x} \neq 0$;
 2. $\dot{V}(\mathbf{x}) = -\mathbf{x}^T(\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T\mathbf{R}\mathbf{K})\mathbf{x} < 0, \mathbf{x} \neq 0$
- (4.5)

4.2. Control optimal robust – incertitudini parametrice

Considerăm modelul unui sistem liniar invariant în timp cu următoarea reprezentare în spațiul stărilor, unde erorile de modelare ΔA și ΔB afectează matricele A și, respectiv, B :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A(t))x(t) + (B + \Delta B(t))u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

Domeniul de incertitudine parametrică este definit după cum urmează:

$$D_i = \{(\Delta A(t), \Delta B(t) | \Delta A^T A \leq \alpha Q_0, \Delta B \leq \beta R_0\} \quad (4.7)$$

unde α, β sunt scalari pozitivi, Q_0 și R_0 matrice simetrice, pozitiv definite.

Problema de interes este reprezentată de găsirea valorilor maxime ale scalarilor α și β a.î. sistemul în buclă închisă definit de (4.6) și (4.7) își păstrează stabilitatea sub comanda optimală (4.1) [21].

Matricele de ponderare Q_0 și R_0 se obțin din:

$$\begin{cases} Q = Q_0 + Q_1 \\ R = R_0 + R_1 \end{cases} \quad (4.8)$$

unde Q și R sunt cunoscute din relația (4.2). Q_0 și R_0 sunt matricele din (4.7); Q_1 și R_1 sunt simetrice, pozitiv definite, și se obțin din (4.8). Dacă vom considera Q și R ca în (4.8) și definim următoarea matrice simetrică și pozitiv definită:

$$\Psi = P^{-1}(Q_1 + K^T R_1 K)P^{-1} \quad (4.9)$$

atunci sistemul în buclă închisă este stabil pentru incertitudinile definite în domeniul D_i (4.7) care satsifac:

$$\Psi > (\alpha + \beta)I \quad (4.10)$$

4.3. Calculul comenzii LQR

Pentru calculul comenzii optimale LQR și a domeniului maxim de incertitudine parametrică, au fost luate în considerare 3 cazuri, atât pentru modelul invariant, cât și pentru cel redus.

4.3.1. Modelul de stare invariant

1. Cazul 1:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}^T \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,006 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{R} = q^2 \mathbf{I}_{4 \times 4}, q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$$
$$\mathbf{Q}_0 = \mathbf{B} \mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} 4,058 & 3,82 & 4,0286 \\ 3,82 & 3,6818 & 3,7994 \\ 4,0286 & 3,7994 & 4 \end{bmatrix}$$
(4.11)

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{I}_{4 \times 4}$$

Am obținut $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q} - \mathbf{Q}_0$ și $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R} - \mathbf{R}_0$ din (4.8), iar Ψ din (4.9).

Figura 4.1 prezintă răspunsul la intrare treaptă al sistemului în buclă închisă, pentru cele 4 valori ale lui q , $q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$.

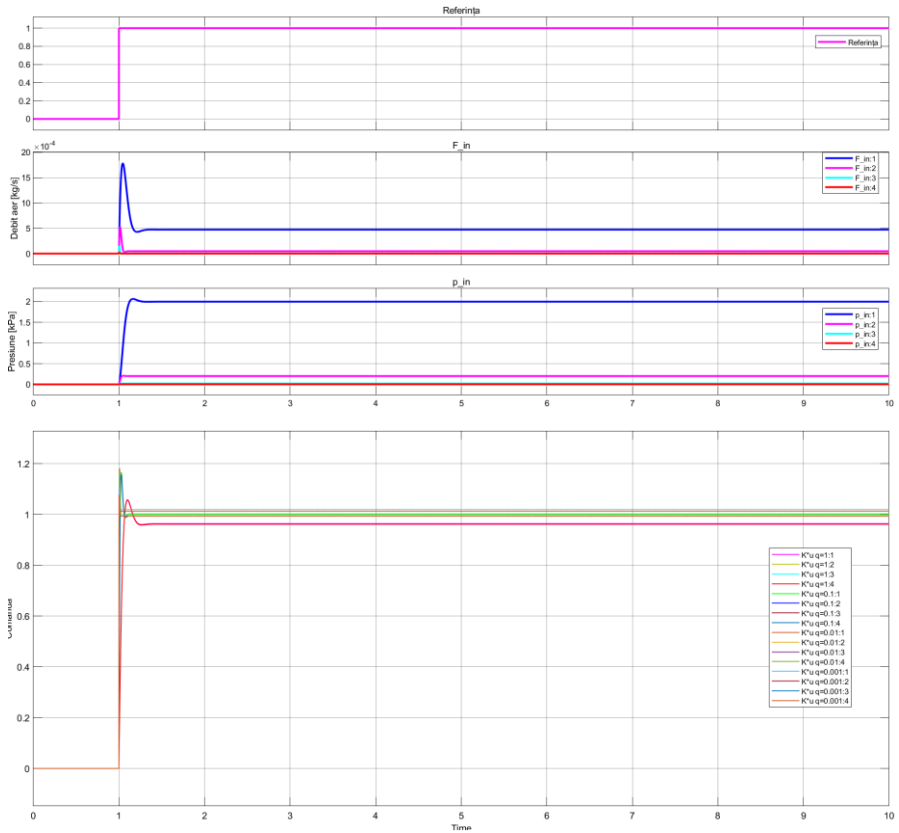


Fig. 4.1. Analiză comparativă LQR – Q variabil; R constant

2. Cazul 2:

$$Q = C^T C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6,2 * 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$R = I_{4 \times 4}$$

$$Q_0 = BB^T = \begin{bmatrix} 4,058 & 3,82 & 4,0286 \\ 3,82 & 3,6818 & 3,7994 \\ 4,0286 & 3,7994 & 4 \end{bmatrix}$$

$$R_0 = q^2 I_{4 \times 4}, q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$$

(4.12)

Figura 4.2 prezintă răspunsul la intrare treaptă al sistemului în buclă închisă, pentru cele 4 valori ale lui q , $q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$.

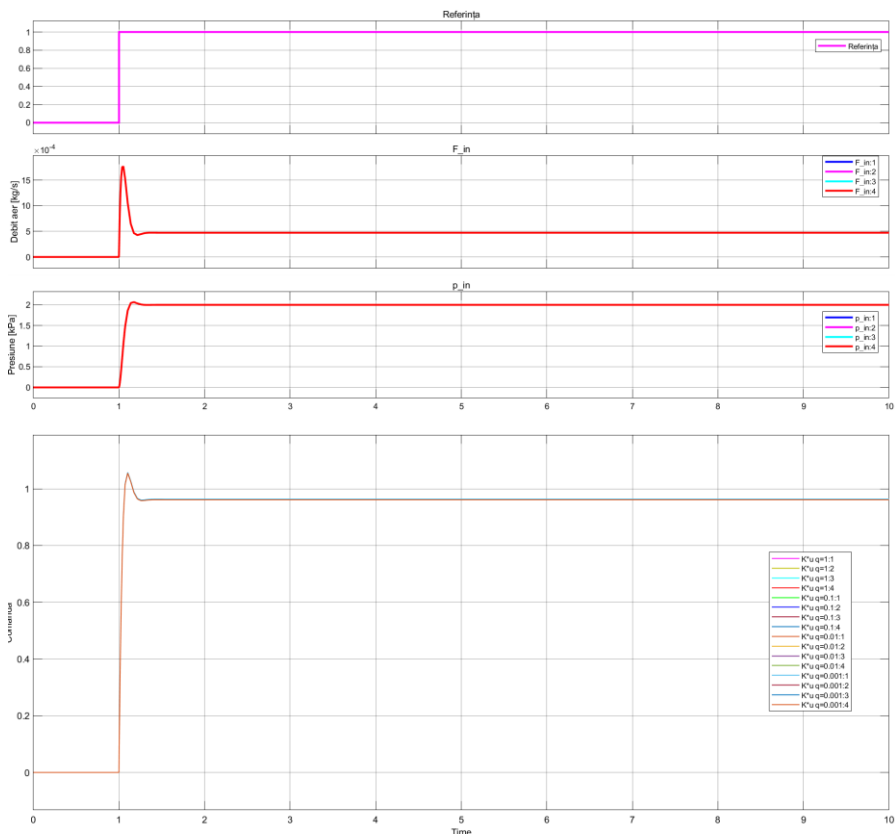


Fig. 4.2. Analiză comparativă LQR – Q constant; R variabil

3. Cazul 3:

Q și R sunt alese conform regulii Bryson (4.4):

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\max(p_i)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\max(p_e)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\max(P_c)^2} \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{Q}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{165^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{200^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\max(S_R)^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\max(x_{VGT})^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\max(N)^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\max(F_f)^2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\Rightarrow \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \frac{1}{100^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{100^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1800^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_0 = \mathbf{B}\mathbf{B}^T$$

$$\mathbf{R}_0 = q^2 \mathbf{I}_{4 \times 4}, q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$$

Figura 4.3 prezintă răspunsul la intrare treaptă al sistemului în buclă închisă, pentru cele 4 valori ale lui q , $q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$.

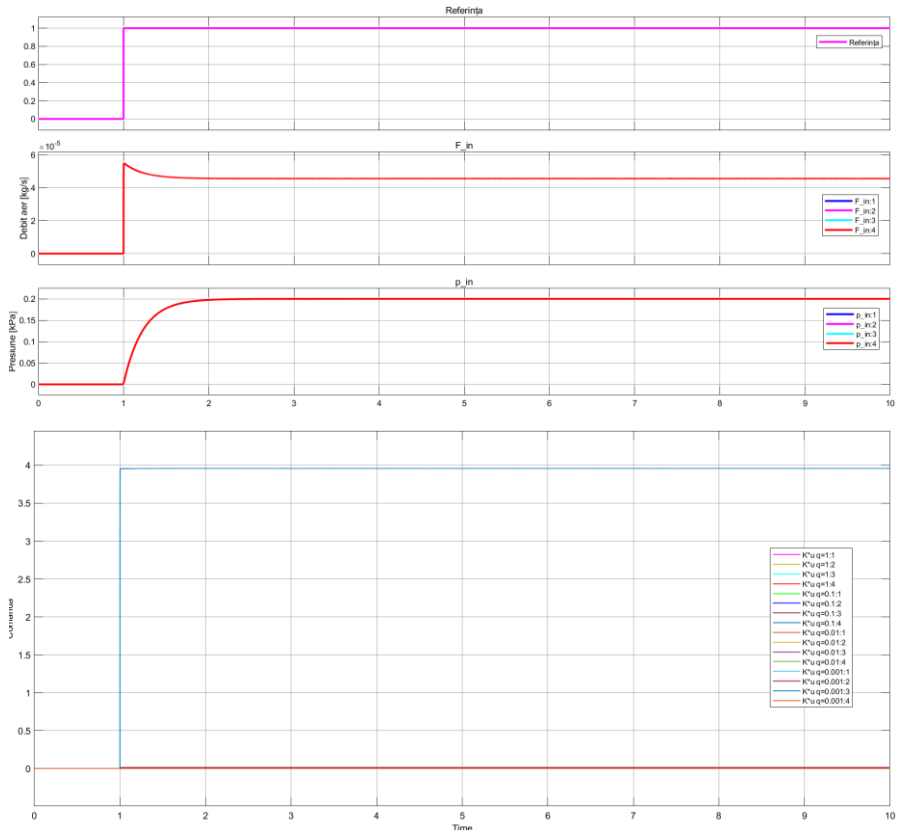


Fig. 4.3. Analiză comparativă LQR – Q constant; R variabil

4.3.2. Modelul de stare invariant redus

1. Cazul 1:

$$Q_r = C_r^T C_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6,2001 * 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$R_r = q^2 I_{2 \times 2}, q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$$

$$Q_0 = B_r B_r^T$$

$$= \begin{bmatrix} 3,265 * 10^9 & -3,1858 * 10^{10} & 0 \\ -3,1858 * 10^{10} & 3,1097 * 10^{11} & -204000 \\ 0 & -204000 & 400 \end{bmatrix}$$

(4.14)

$$R_0 = I_{2 \times 2}$$

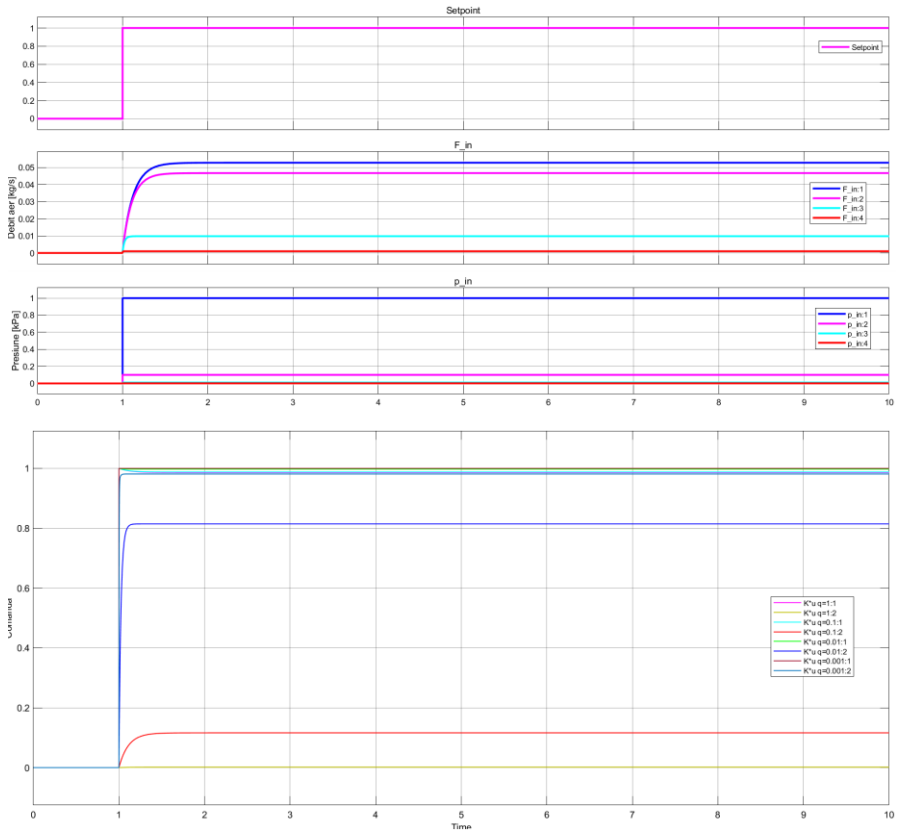


Fig. 4.4. Analiză comparativă LQR – Q variabil; R constant

2. Cazul 2:

$$Q_r = C_r^T C_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6,2 * 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$R = I_{2 \times 2}$$

$$Q_0 = B_r B_r^T \tag{4.15}$$

$$= \begin{bmatrix} 3,2650 * 10^9 & -3,1858 * 10^{10} & 0 \\ -3,1858 * 10^{10} & 3,1097 * 10^{11} & -204000 \\ 0 & -204000 & 400 \end{bmatrix}$$

$$R_0 = q^2 I_{2 \times 2}, q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$$

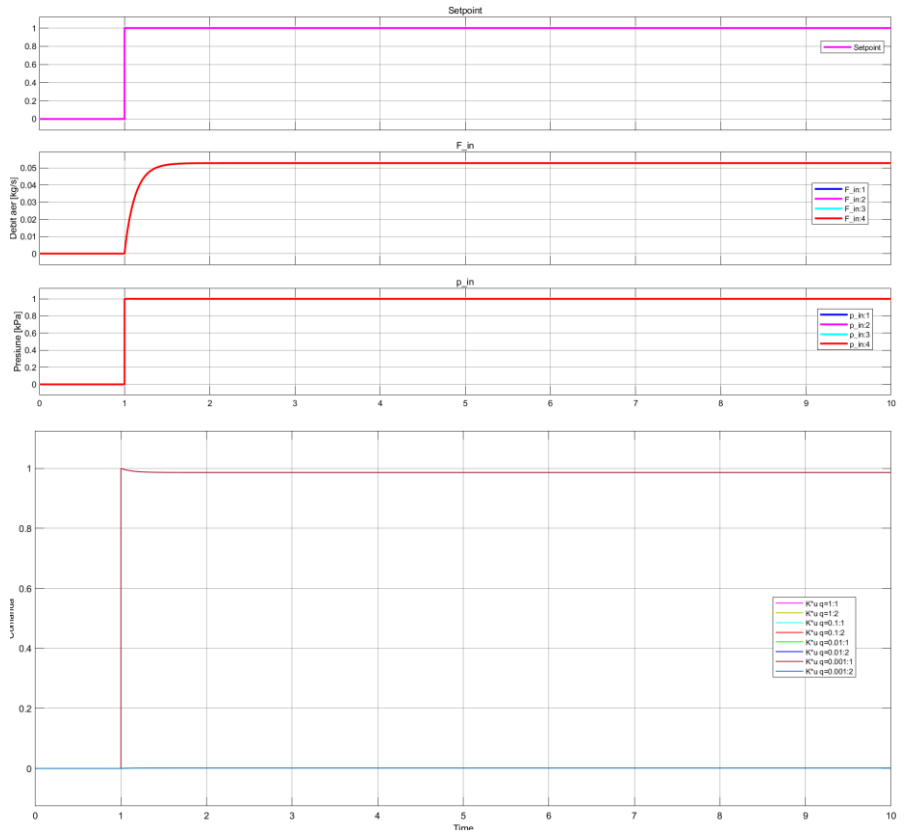


Fig. 4.5. Analiză comparativă LQR – Q constant; R variabil

3. Cazul 3:

$$Q_r = \begin{bmatrix} \frac{1}{\max(p_i)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\max(p_e)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\max(P_C)^2} \end{bmatrix} \Rightarrow Q_r = \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{165^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{200^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} \frac{1}{\max(S_R)^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\max(x_{VGT})^2} \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} \frac{1}{100^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{100^2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q}_0 = \mathbf{B}_r \mathbf{B}_r^T$$

$$\mathbf{R}_0 = q^2 \mathbf{I}_{2 \times 2}, q \in \{1; 0,1; 0,01; 0,001\}$$

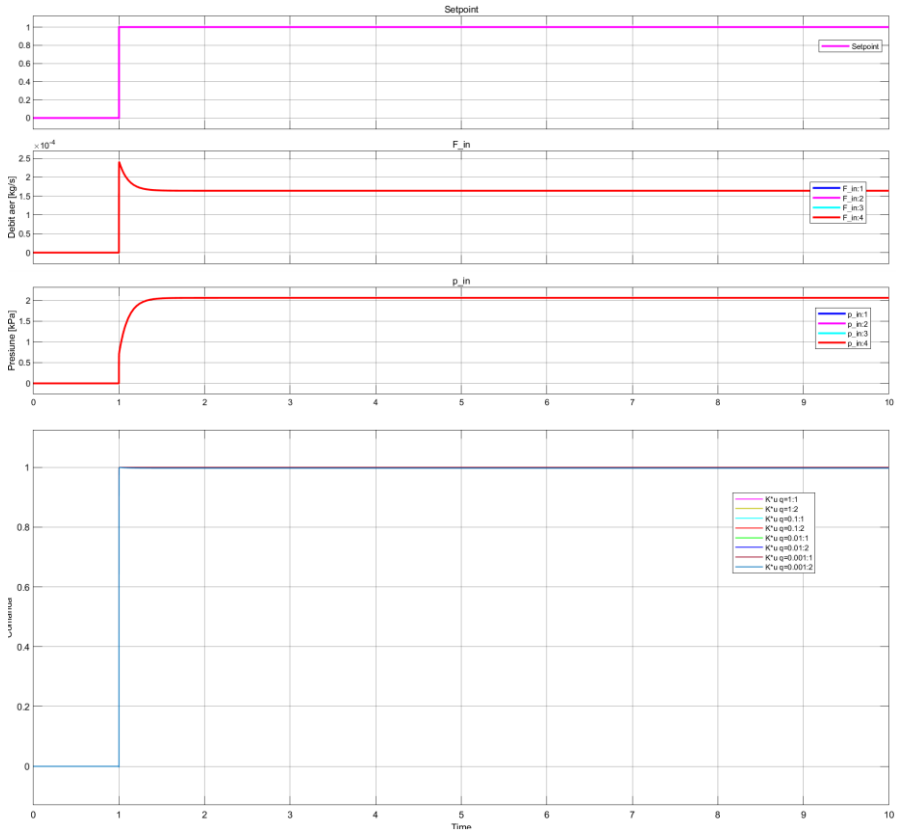


Fig. 4.5. Analiză comparativă LQR – \mathbf{Q} constant; \mathbf{R} variabil

Utilizând toolbox-ul Simulink Control System Designer, precum și scripturi MATLAB, am obținut indicatorii de performanță pentru controlul RST și LQR, listați în tabelul 4.1.

		Step Response from Setpoint r to Output y							
		Peak Amplitude	Overshoot (%)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Steady State	Gain Margin CL (dB)	Modulus Margin OL (dB)	
RST	p_t	-2,74	73,9 la t=0,01 s	0,0128	39	1	5,07	40,99	
	F_t	0,996	0 la t>100 s	0,0175	71,9	1	4,03	0,2991	
RST Robust	p_t	1,37	394 la t=0,01s	0,000811	1,85	-0,175	7,57	40,99	
	F_t	-0,495	251 la t=0,03 s	0,0103	3,53	-0,141	7,33	0,2991	
LQR – model invariant	$q = 1$	p_t	0,518	3,44 la t=0,164 s	0,0803	0,209	0,501	-6,03	0,5885
		F_t	0,000447	276 la t=0,0455s	0,00413	0,257	0,000117	-64,2	1
	$q = 0,1$	p_t	0,0523	4,02 la t=0,0484s	0,0242	0,0651	0,0503	-26	0,5885
		F_t	0,000133	983 la t=0,0132s	0,0004128	0,0809	1,05* 10 ⁻³	-74,1	1
	$q = 0,01$	p_t	0,00521	2,88 la t=0,0138s	0,00656	0,0176	0,00507	-45,9	0,5885
		F_t	3,88 * 10 ⁻⁵	2253 la t=0,00398s	0,000349	0,0173	-1,94* 10 ⁻⁶	-85	1
	$q = 0,001$	p_t	0,000513	0,554 la t=0,00345	0,00105	0,00174	0,00051	-65,9	0,5885
		F_t	8,59* 10 ⁻⁶	1348 la t=0,00107s	2* 10 ⁻⁵	0,0117	5,93* 10 ⁻⁷	-99,6	1
	Regula	p_t	0,0549	0 la t>1,8s	0,503	0,893	0,0484	-25,2	0,5885
		F_t	1,37* 10 ⁻⁵	19,85 la t=0,0043s	0,000716	0,53	1,12* 10 ⁻⁵	-97,2	1

LQR – model invariant redus	Regula Bryson	q = 1	p_i	1	2,76 * 10 ⁻⁶ la t=0,000 4s	3,96 * 10 ⁻⁵	6,87 * 10 ⁻⁵	1	- 1,76* 10 ⁻⁸	1
		F_i	-0,0528	0 la t>0,9s	0,274	0,487	-0,0528	-25,5	0,947 1	
	q = 0,1	p_i	0,1	3,95 * 10 ⁻⁸ l a t= 6,12 * 10 ⁻⁵ s	1,63 * 10 ⁻⁵	1,99 * 10 ⁻⁵	0,1	-20	1	
		F_i	-0,0467	0 la t>0,8s	0,242	0,431	-0,0468	-26,6	0,947 1	
	q = 0,01	p_i	0,01	3,95 * 10 ⁻⁸ l a t=8,9 * 10 ⁻⁶ s	3,58 * 10 ⁻⁶	4,39 * 10 ⁻⁶	0,01	-40	1	
		F_i	-0,0098	0 la t>0,14s	0,0498	0,090 9	- 0,0098 3	-40,2	0,947 1	
	q = 0,001	p_i	-0,001	5,49 * 10 ⁻⁹ la t= 1,83 * 10 ⁻⁵	1,47 * 10 ⁻⁵	1,82 * 10 ⁻⁵	-0,001	-60	1	
		F_i	-0,001	0 la t>0,06s	0,0044 6	0,008 15	-0,001	-60	0,947 1	
	Regula Bryson	p_i	1,57	0 la t>0,8s	0,228	0,398	1,58	3,95	1	
		F_i	- 0,0002 37	0,0189 la t=0,006 67	0,0010 5	0,001 86	- 0,0002 37	-72,5	0,947 1	

Table 4.1. RST control versus LQR control

5. Proiectarea comenzii multi-model multi-controller

Structura multi-model multi-controller (MMMM) pentru cele trei puncte de funcționare poate fi observată în figura 5.1, unde r reprezintă referința, cvadruplul (A_i, B_i, C_i, D_i) reprezintă realizările minimale aferente modelelor, $i \in \{1,2,3\}$. P reprezintă procesul de combustie a fi controlat, K_i reprezintă regulatoarele, u_i reprezintă comenzile.

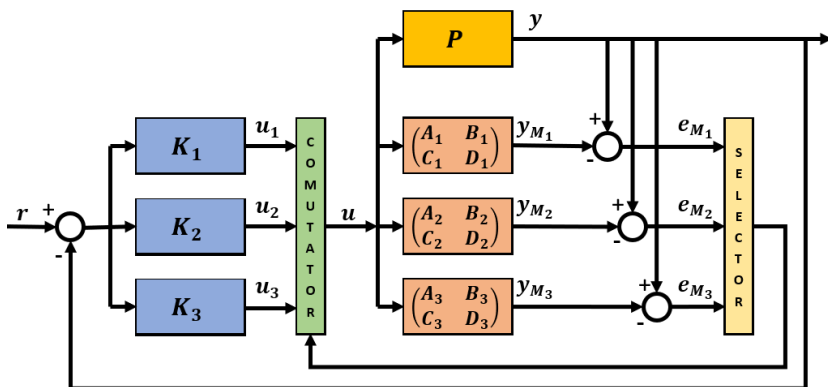


Fig. 5.1. Multi-model multi-controller (MMMM) structure

e_{M_i} este eroarea de model, definită ca diferența dintre ieșirea procesului, y , și ieșirea modelelor, y_{M_i} . COMUTATOR este legea de comutare, bazată pe valoarea următorului indicator de performanță:

$$\|e_{M_i}\| < \epsilon \quad (5.1)$$

unde ϵ este un prag stabilit a-priori.

Considerând sistemele cu reprezentare în spațiul stărilor din (2.3) și (2.4), și forma vectorială a ieșirii, $y = \begin{bmatrix} F_i \\ p_i \end{bmatrix}$, eroarea de model devine:

$$\begin{aligned} \|e_{M_i}\| &= \|y - y_{M_i}\| = \left\| \begin{bmatrix} F_i \\ p_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{F}_i \\ \hat{p}_i \end{bmatrix} \right\| = \left\| \begin{bmatrix} F_i - \hat{F}_i \\ p_i - \hat{p}_i \end{bmatrix} \right\| \\ &= \sqrt{(F_i - \hat{F}_i)^2 + (p_i - \hat{p}_i)^2} < \epsilon \end{aligned} \quad (5.2)$$

Controllerul K_i , care pilotează procesul P , corespunde modelului M_i care oferă cea mai mică eroare de model, e_{M_i} . Dacă, în timpul simulării, eroarea de model îndeplinește condiția criteriului din (5.2) simultan pentru mai multe modele M_i , atunci algoritmul va menține valoarea comenzii anterior calculată.

Obiectivul principal al analizei de robustețe a comenzii LQR din capitolul IV (i.e. evaluarea domeniului maxim de incertitudine parametrică aferentă procesului de combustie) a fost stabilirea dimensiunea minimă a configurației multi-model multi-controller a.â. să avem un număr minim de comutații și o reducere a efortului de calcul în proiectarea configurației MMMC.

5.1. Control MMMC pentru configurații SISO

5.1.1. Control pentru reprezentare I/O

Pentru transferul $EGR - p_i$, avem următoarele 3 modele:

$$\begin{aligned} B_{1p_i} &= [280,8 \quad -102,9 \quad -273,6 \quad -99,22] \\ B_{2p_i} &= [210 \quad -56,8 \quad -198,45 \quad -77,28] \\ B_{3p_i} &= [178,5 \quad -12,7 \quad -102,33 \quad -24,44] \\ A_{p_i} &= [1 \quad -2,271 \quad 1,617 \quad -0,3458] \end{aligned} \quad (5.3)$$

Pentru transferul $VGT - F_i$, avem următoarele 3 modele:

$$\begin{aligned}
 B_{1F_i} &= [0,03711 \quad -0,0785 \quad 0,09375 \quad 0,02185] \\
 B_{2F_i} &= [0,02899 \quad -0,0622 \quad 0,08945 \quad 0,01765] \\
 B_{3F_i} &= [0,02489 \quad -0,0558 \quad 0,08012 \quad 0,01247] \\
 A_{F_i} &= [1 \quad -2,271 \quad 1,617 \quad -0,3458]
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

După aplicarea algoritmului de control robust RST prezentat în capitolul III, am obținut dinamica sistemului în buclă închisă, atât pentru controlul presiunii p_i (figura 5.2), precum și pentru debitul de aer, F_i (figura 5.3).

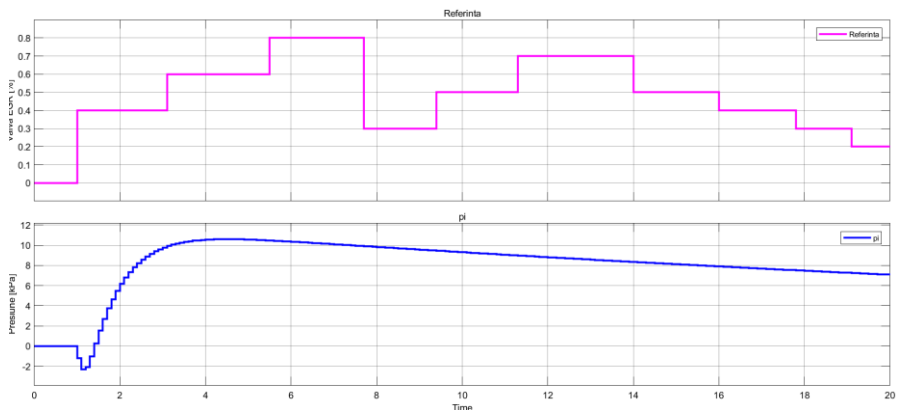


Fig. 5.2. Dinamica p_i RST MMC SISO I/O la intrare treaptă

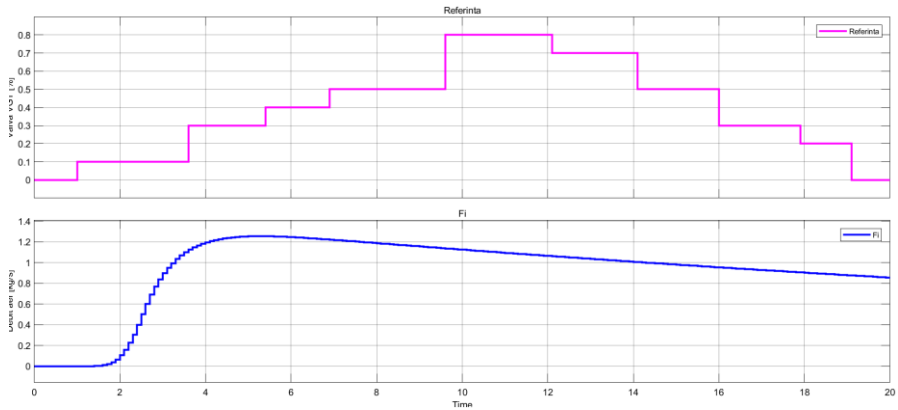


Fig. 5.3. Dinamica F_i RST MMMC SISO I/O la intrare treaptă

5.1.2. Control MMMC pentru reprezentare pe stare

Pentru fiecare model din (5.3) și (5.4) a fost obținută o realizare minimală. De asemenea, pentru procesul reprezentat de (3.9), am obținut o realizare minimală. Pentru fiecare model M_i a fost proiectat un controller LQR, K_i , unde Q și R au fost reprezentate de matricele identitate.

Figurile 5.4 și 5.5 prezintă răspunsul la intrare treaptă pentru configurația MMMC aferentă controlului presiunii p_i , și, respectiv, a debitului de aer, F_i .

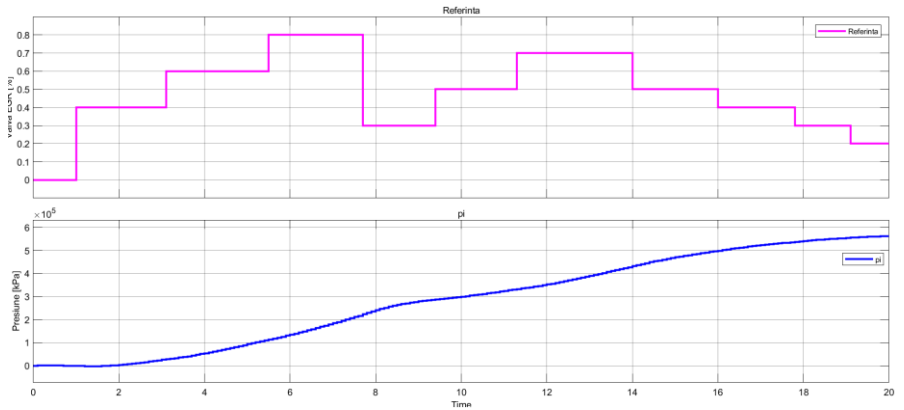


Fig. 5.4. Răspuns indicial LQR MMMC SISO I/O p_i

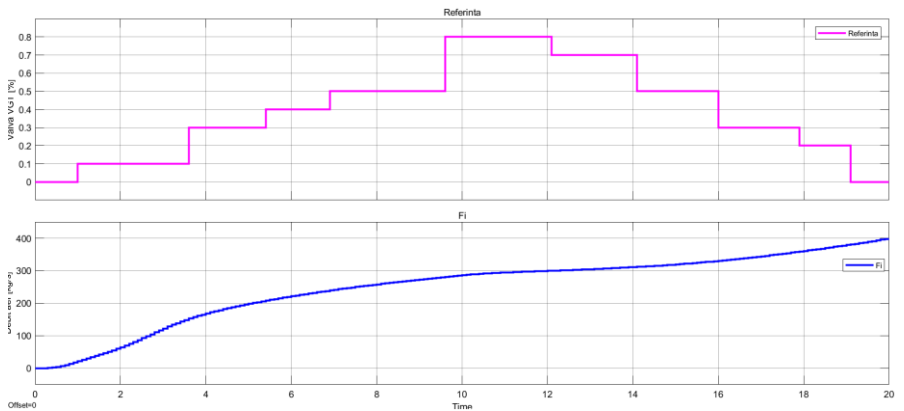


Fig. 5.5. Răspuns indicial LQR MMMC SISO I/O F_i

5.2. Control MMMC pentru configurații MIMO

Pentru cazul multiple-input multiple-output, unde procesul e reprezentat de (2.7) și (2.8), iar modelele M_i sunt alese în urma analizei din capitolul IV, răspunsul sistemului în buclă închisă poate fi observat în figurile 5.6 și, respectiv, 5.7.

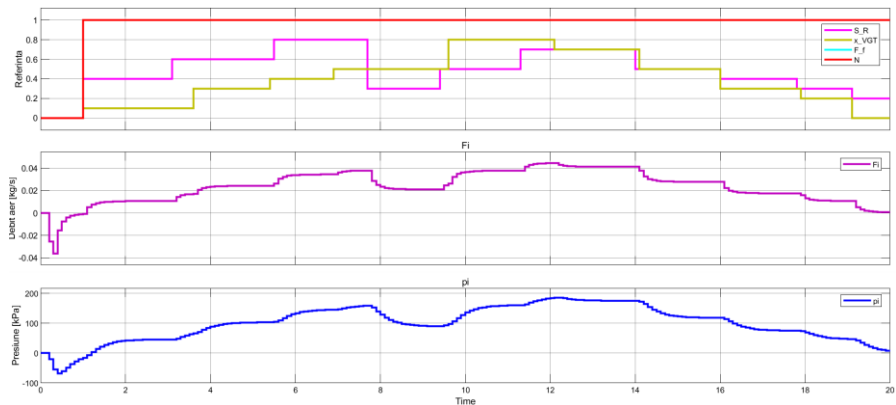


Fig. 5.6. Răspuns indicial MIMO MMC – model invariant

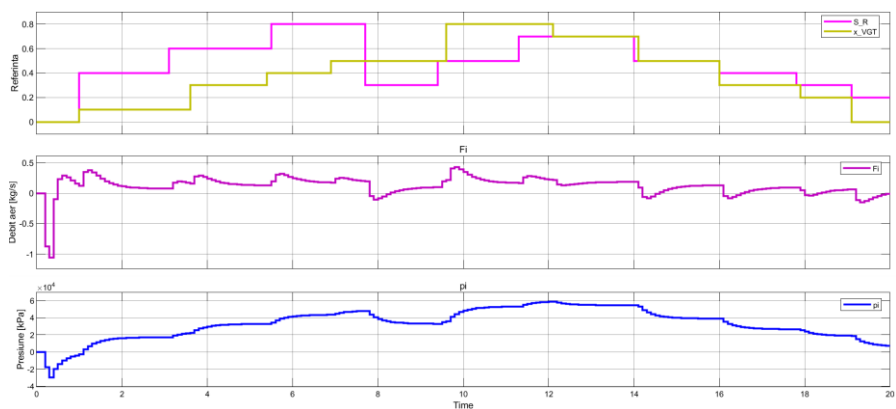


Fig. 5.7. Răspuns indicial MIMO MMC – model invariant redus

Abordarea multi-model multi-controller aduce îmbunătățiri considerabile pentru controlul presiunii p_i și al debitului F_i prin selectarea unui model adecvat punctului de funcționare curent al procesului și al unui controller corespunzător.

6. Concluzii, contribuții personale și perspective de cercetare

6.1. Concluzii

Teza prezintă o cercetare în domeniul automotive, punctând tehnologiile care au un rol asupra îmbunătățirii mediului înconjurător, precum și a confortului pasagerilor. Au fost trecute în revistă strategiile diferiților constructori auto în ceea ce privește norma CAFE, care impune reglementarea emisiilor de CO₂ în cazul mașinilor și a vehiculelor utilitare noi. A fost evaluat impactul pe care criza sanitară cauzată de COVID-19 începând cu martie 2020 l-a avut asupra sectorului auto. Au fost prezentate tendințele în materie de mobilitate, care vor impulsiona dezvoltarea în masă a tehnologiilor de acționare electrică.

Eforturile tehnologice și de modernizare din domeniul auto vor avea o eficacitate corespunzătoare dacă motoarele electrice sau pe bază de hidrogen vor folosi electricitate care să fie produsă cu ajutorul unor sisteme cu un nivel redus al emisiilor. Până la acel moment, există însă preocupări importante pentru optimizarea procesului de combustie prin controlul motoarelor cu aprindere internă, în vederea reducerii consumului de combustibil și a noxelor.

Au fost estimate modelele matematice neliniare aferente regimului de combustie al motorului Diesel. Pentru modelele matematice liniarizate și approximate prin reprezentări reduse, atât în cazul SISO, cât și în cazul MIMO, au fost obținute realizări minimale în spațiul

stărilor, urmate de un studiu de stabilitate, controlabilitate și observabilitate. Aceste modele au fost folosite pentru controlul parametrilor cheie: presiunea din camera de admisie și debitul de aer de recirculare a gazelor.

Pentru cele două modele decuplate intrare/ieșire, care reprezintă transferul direct de la intrarea EGR la p_i și, respectiv, de la VGT la F_i , a fost proiectată comanda polinomială RST robustă.

Au fost proiectați algoritmi de control optimal LQR și a fost evaluat domeniul maxim de incertitudine de model pentru controlul LQR al procesului de combustie, ca o necesitate cerută ulterior de controlul multi-model multi-controller.

Configurațiile de reglare RST și LQR au fost utilizate în proiectarea structurii de reglare multi-model multi-controller (MMMC). Noutatea în cazul abordării MMMC o reprezintă considerarea sistemului MIMO pentru reprezentarea procesului de combustie, iar comutația între modele făcându-se în funcție de valoarea celei mai mici erori de model după un criteriu normă.

Evaluarea domeniului maxim de incertitudine de model pentru procesul neliniar de combustie a jucat un rol important în stabilirea numărului minim de puncte de pe caracteristica statică a.î. să evidențiem un număr minim de comutații și de reducere a efortului pentru proiectarea sistemelor de control din configurația MMMC.

6.2. Contribuții personale

A fost realizată o analiză *state of the art* în domeniul automotive din punct de vedere al: tehnologiilor cu rol asupra protejării mediului

înconjurător, precum și al confortului pasagerilor; strategiilor constructorilor auto în ceea ce privește norma CAFE, care impune reglementarea emisiilor de CO₂ în cazul mașinilor și a vehiculelor utilitare noi; impactului pe care criza sanitară cauzată de COVID-19 începând cu martie 2020 l-a avut asupra sectorului auto; tendințelor în materie de mobilitate, care vor impulsiona dezvoltarea în masă a tehnologiilor de acționare electrică; obstacolelor identificate în era electrificării pentru o tranziție sustenabilă și sigură.

A fost efectuată o analiză de stabilitate, controlabilitate și observabilitate aferente realizărilor minimale ale modelelor matematice liniarizate și approximate prin forme reduse, cu reprezentare în spațiul stărilor obținute pentru modelele matematice liniarizate și approximate prin forme reduse, în vederea proiectării algoritmilor de control.

Au fost propuse două configurații de sisteme de control pentru procesul de combustie al motorului Diesel: polinomial robust RST și optimal LQR, pentru o evaluare comparativă a performanțelor obținute.

Au fost evaluate domeniul maxim de incertitudine de model și robustețea controlului LQR ca necesitate cerută ulterior de controlul multi-model multi-controller.

Considerarea sistemului MIMO pentru reprezentarea procesului de combustie în configurația MMMC și selectarea controller-ului în funcție de valoarea celei mai mici erori de model după un criteriu normă.

Dezvoltarea rutinelor MATLAB și a schemelor Simulink în vederea obținerii rezultatelor experimentale prezentate în teză.

6.3. Future research

1. Utilizarea rețelelor *Deep Learning* pentru estimarea emisiilor de noxe [38], evaluarea performanței sistemelor de diagnoză (eng. *Onboard Diagnostics*). Totuși, provocarea întâlnită de folosirea acestei abordări este dată de capacitatea mare de calcul utilizată de aceste rețele pentru a face predicții.
1. Utilizarea *Reinforcement Learning* [39] pentru controlul presiunii MAP și a debitului de aer MAF. Această tehnică își are rădăcina în psihologie, iar scopul său este antrenarea unui agent prin experiențe repetate a.î. să facă cele mai bune alegeri într-un mediu necunoscut. Agentul primește observații și o recompensă de la mediu, și trimite acțiuni către acesta. Recompensa reprezintă o măsură a succesului pe care o acțiune a avut-o în îndeplinirea obiectivului.
2. Rezolvarea următoarei probleme de optimizare: maximizarea valorii proprii minimale a lui Ψ din ecuația (4.16) prin tehnici de optimizare non-liniare a.î. matricele Q_1 și R_1 din (4.15) sunt alese optim pentru a obține cea mai bună robustețe a sistemului.

Bibliografie

- [1] *Fiches Techniques Environnement*, www.groupe.renault.com
- [2] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/exhaust-gas-treatment/> denoxtronic- exhaust-gas-treatment-system/
- [3] *En route vers la neutralité carbone*, Rapport Climat Avril 2021, Groupe Renault
- [4] https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/regulation_en
- [5] <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/average-co2-emissions-from-motor-vehicles/assessment-2>
- [6] <https://www.epa.gov/vw/learn-about-volkswagen-violations>
- [7] http://www2.paconsulting.com/rs/526-HZE-833/images/PA-CO2-Report-2019_2020.pdf
- [8] *Strategia Groupe Renault pentru respectarea normei CAFE*: <https://www.youtube.com/watch?v=NGzdji52d7E>
- [9] *Time-varying MPC-based energy management for HEV including engine stop & start*, Alexandra Stroe et al., 978-1-5090-2720-0, 2016.
- [10] https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/new-electric-vehicles-by-country-1#tab-chart_1
- [11] <https://pro.largus.fr/actualites/voitures-electriques-les-modeles-les-plus-vendus-en-europe-en-2020-10548393.html>

[12]

<https://new.siemens.com/dk/da/virksomhedsoplysninger/innovation/pictures-of-the-future/futureofmobility.html>

[13] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/mobility-topics/powertrain-and-electrified-mobility/synthetic-fuels/>

[14] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/mobility-topics/powertrain-mix-for-better-air-quality/>

[15] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/about-us/current-news/renewable-gasoline/>

[16] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/mobility-topics/powertrain-and-electrified-mobility/gasoline-engine/>

[17] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/mobility-topics/powertrain-and-electrified-mobility/>

[18] <https://www.adaptautomotive.com/articles/924-the-industrys-ev-obstacles>

[19]

https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/Economic_and_Market_Report_full-year_2020.pdf

[20] *Internal Combustion Engine Fundamentals*, John B. Heywood, McGraw-Hill Education, 1st edition, 1988, ISBN: 0-07-028637-X.

[21] *Modelisation, identification et commande des systemes*, Genevieve Dauphin-Tanguy, Laurent Foulloy, Dumitru Popescu, Editura Academiei Române, 2004, ISBN: 973-27-1086-1.

[\[22\] *Calibratable Linear Parameter-Varying Control of a Turbocharged Diesel Engine*, Merten Jung and Keith Glover, IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 14, NO. 1, JANUARY 2006.](#)

[\[23\] *Teoria Sistemelor: culegere de probleme*, R. Ștefan, F. Stoican, S. Tudor, C. Oară, Editura Politehnica Press, București, 2013, ISBN: 978-606-515-517-6.](#)

[\[24\] *Optimal control of the combustion regime of an experimental Diesel engine*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, National Scientific Conference of the Academy of Romanian Scientist, vol. XIII, issue 1, 2019, ISSN 2601-5102.](#)

[25] *Multi-model adaptive control for turbocharged Diesel engines*, Silviu CÎRSTOIU, Dumitru POPESCU, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 1, 2013.

[26] *Advanced Control for Hydrogen Pyrolysis Installations*, Dumitru Popescu, Catalin Dimon, Pierre Borne, Severus Constantin Olteanu, Mihaela-Ancuța Mone, *Energies* 2020, 13, 3270; doi:10.3390/en13123270.

[\[27\] *Digital control ecosystem for steel plant installations*, Dumitru POPESCU, Pierre BORNE, Mihaela-Ancuța MONE, Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Engineering Sciences, Volume 10, Number 1/2018, ISSN 2066-8570.](#)

[\[28\] *The R-S-T Digital Controller Design and Applications*, I. D. Landau, Control Engineering Practice 6\(2\):155-165, 1998.](#)

[\[29\] *Linear Systems Theory*, J. P. Hespanha., Princeton, NJ, USA, Princeton University Press, 2009, ISBN: ISBN 978-0-691-14021-6.](#)

[30] *Stochastic optimization and minimal risk problems*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 14th International Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD), București, Romania, Proceedings IFAC ACD 2017.

[31] *Optimal control for Diesel engine combustion regime*, Mihaela-Ancuța Mone et al., 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), p. 42-47, DOI: 10.1109/CSCS47589.2019.

[32] *Evaluating the maximum domain of parameter model uncertainties in the combustion of a Diesel engine*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 25th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Iași, Romania, 2021, a fi publicată în IEEE Xplore Digital Library.

[33] *Multimodel Control of Diesel Engines*, Silviu Cirstoiu et al, 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 783 012043.

[34] *Multiple-Model Design and Switching Solution for Nonlinear Processes Control*, C. Lupu, D. Popescu, C. Petrescu, Al. Ticlea, C. Dimon, A. Udrea, I. Bogdan, , ISC'08, The 6th Annual Industrial

Simulation Conference, Lyon, France, pp. 71-76, ISBN 978-90-77381-4-03, 2008.

[35] *A Simulator for the Multi-model Control of Diesel Engines*, Silviu CÎRSTOIU, Dumitru POPESCU, Studies in Informatics and Control, ISSN 1220-1766, vol. 23 (4), pp. 381-386, 2014.

[36] *Optimal Multi-Model Control for Nonlinear Systems with Parametric Uncertainties - Diesel Engine Case Study*, Mihaela-Ancuța Mone, Sette Diop, Dumitru Popescu, 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), IEEE Catalog Number: CFP2036P-ART, ISBN: 978-1-7281-9809-5.

[37] *Multi Model Control - MMC approach for nonlinear combustion regime of Diesel Engines*, Mihaela-Ancuța Mone et al., 15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2019), Bologna, Italy, ISBN 978-3-030-85317-4.

[38] <https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/using-deep-learning-networks-to-estimate-nox-emissions.html>

[39] *Reinforcement Learning Toolbox User's Guide*, MATLAB R2021a, MathWorks