

Universitatea Tehnică Cluj-Napoca
Facultatea de Automatică și Calculatoare
Secția Automatică și Informatică Aplicată

Controlul diferențial a două motoare BLDC cu scopul înlăturării diferențialului clasic

Lucrare de licență

Absolvent: Petrișor-Victor MARGIN

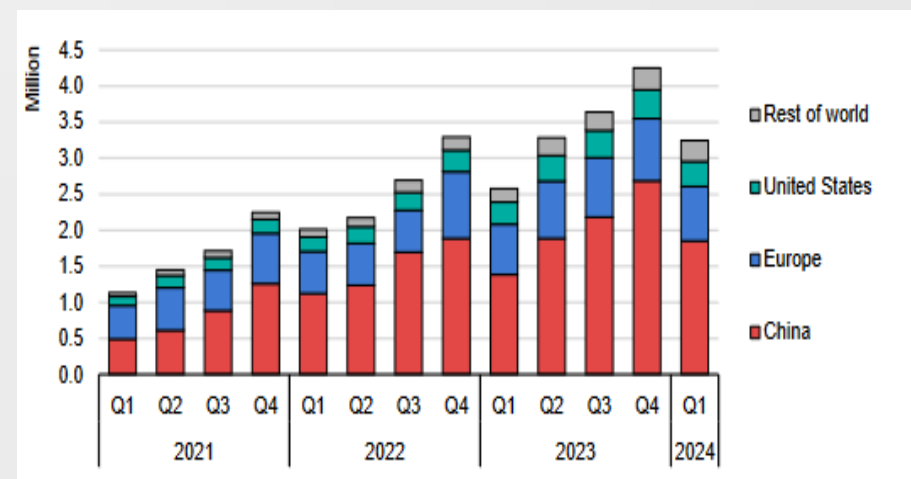
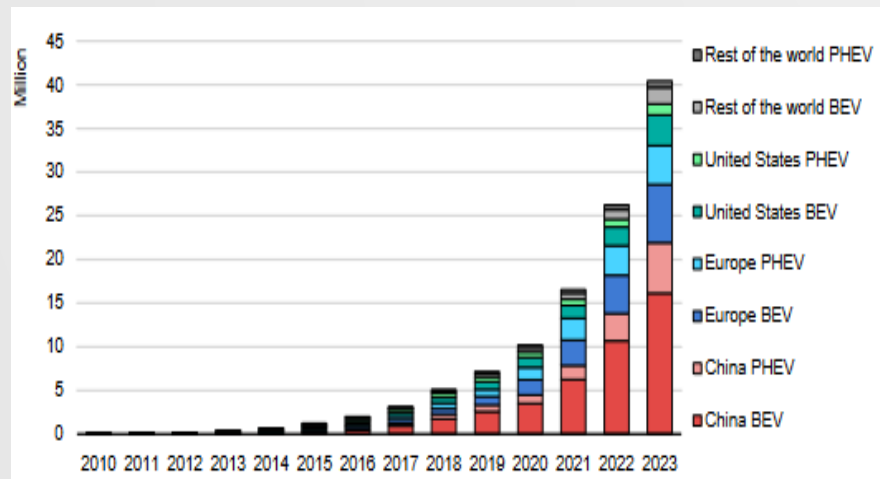
Coordonator: Vlad Mihai MIHALY

Conținutul prezentării

- **Introducere**
- Analiza și soluționarea problemei
- Testarea și validarea soluției propuse
- Concluzii

Introducere

- Evoluția pieții de mașini hibride/electrice a surprins creșteri exponențiale în ultimul deceniu.
- În anii 2010-2015 s-au realizat în jur de 4 milioane de mașini hibride/electrice, iar pentru anul 2023 s-a înregistrat manufacturarea a 42 de milioane de vehicule hibride/electrice.



Introducere

- O problemă majoră suportată de autovehiculele electrice este masa totală a acestora
- Aceasta provine în principal din cauza acumulatorilor mari folosiți pentru încapsularea energiei electrice, care constituie mai mult de un sfert din greutatea mașinii, având o masă aproximativă de 700[kg]
- În acest sens, o soluție este reunțarea la componentele fizice redundante, care se pot înlocui cu componente software.

Introducere

- Ideea eliminării diferențialului clasic vine de la faptul că mașinile electrice folosesc mai multe motoare electrice montate pe câte o roată.
- Astfel, prin calcularea și controlul vitezelor necesare motoarelor în momentul abordării unui drum curbiliniu, se poate renunța la această piesă fizică.
- De asemenea, prin evitarea acestei piese, se impactează direct producția de diferențiale, ceea ce duce la o poluare diminuată și susținută de Comisia Europeană (611 milioane de euro pentru soluții de ecologizare)

Conținutul prezentării

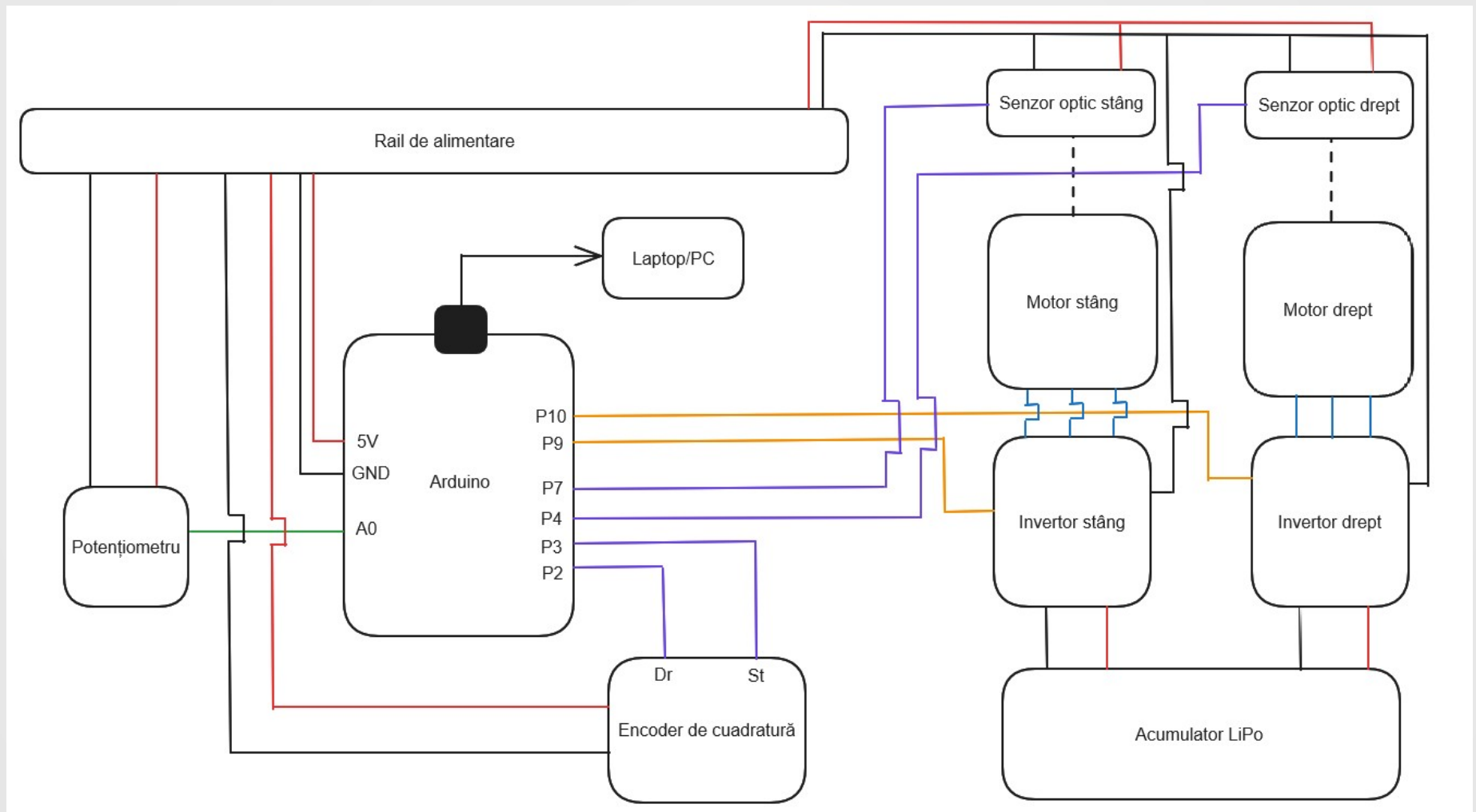
- Introducere
- **Analiza și soluționarea problemei**
- Testarea și validarea soluției propuse
- Concluzii

Analiza și soluționarea problemei

- Pentru realizarea fizică a proiectului se folosesc două motoare de curent continuu fără perii (eng. Brushless DC Motors) comandate prin intermediul a două invertoare.
- Interfațarea utilizatorului se face prin folosirea unui potențiomtru prin care se setează o viteză, iar direcția și unghiul deplasării sunt date de encoderul de cuadratură.
- Controlul în buclă închisă este realizat prin folosirea unui montaj ce reprezintă un encoder de viteză, legea de control fiind calculată cu ajutorul unei plăcuțe de dezvoltare Arduino
- Calculul vitezelor fiecarui motor este realizat prin respectarea modelului geometric Ackermann

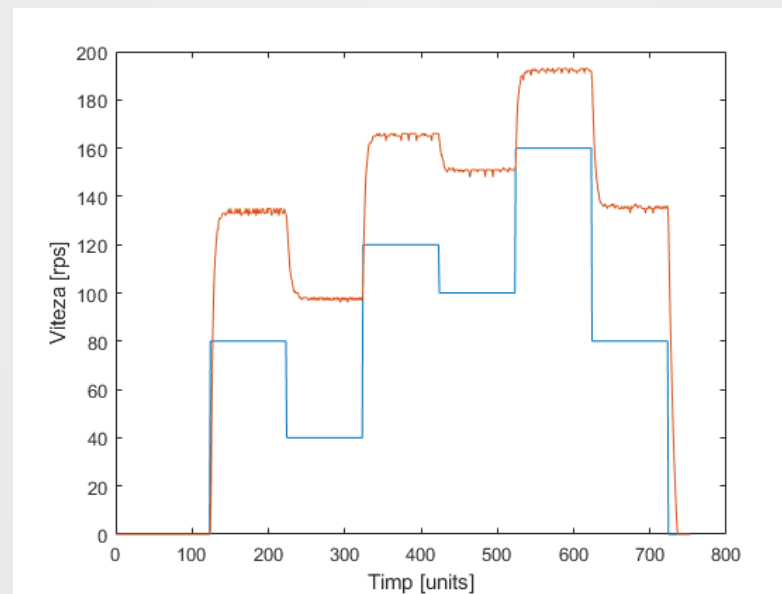
Analiza și soluționarea problemei

- Schema de montaj a proiectului :



Analiza și soluționarea problemei

- Pentru realizarea controlului se realizează o identificare pe baza datelor obținute prin acționarea motoarelor și modelarea pornind de la ecuațiile fizice ce descriu dinamica sistemului.
- Pentru validarea sistemului identificat respectiv modelat se verifică suprapunerea dinamicii obținute cu cea reală.



Analiza și soluționarea problemei

- Pentru identificare se impune forma unei funcții de ordinul I:

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1}.$$

- Iar parametrii se identifică prin folosirea formulelor:

$$K = \frac{y_{st} - y_0}{u_{st} - u_0},$$

$$T = Te \cdot (t_{63} - t_0).$$

Analiza și soluționarea problemei

- Pentru modelarea sistemului se folosesc următoarele ecuații:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{K_F}{J} \cdot \omega + \frac{K_T}{J} \cdot I_a - \frac{1}{J} \cdot T_L,$$

$$\frac{dI_a}{dt} = -\frac{K_E}{L_a} \cdot \omega - \frac{R_a}{L_a} \cdot I_a + \frac{1}{L_a} \cdot u.$$

- Constantele ce apar sunt: rezistența și inductanța de armătură, coeficientul de frecare al câmpului, constanta tensiunii inverse electromotoare, constanta tracțiunii, momentul de inerție al motorului
- Stările sunt: viteza unghiulară și curentul de armătură
- Intrările sunt: tensiunea de la borne și sarcina motorului

Analiza și soluționarea problemei

- În urma identificării, respectiv a modelării se observă faptul că dinamica sistemului real este una neliniară.
- Soluția folosită este liniarizare pe baza reacției (eng. Feedback Linearization) deoarece constituie o liniarizare exactă.
- În situația de față, elementul neliniar este un gain care apare din cauza folosirii invertorului, componentă care lucrează în comutație. Dinamica sistemului (comportamentul în regim tranzitoriu nu este afectat de neliniarități)

Analiza și soluționarea problemei

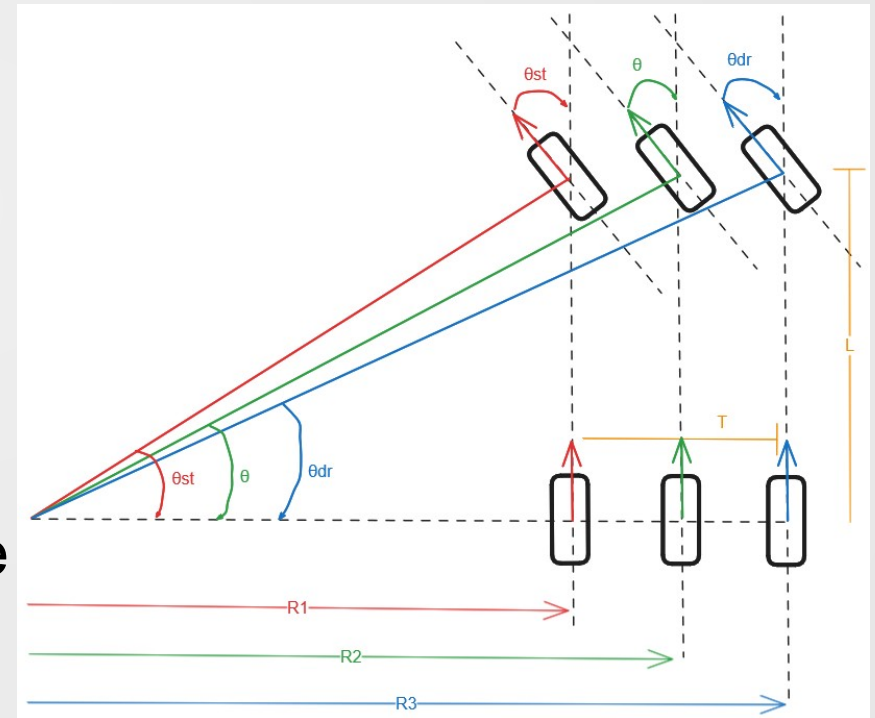
- Pentru controlul sistemului se folosesc regulatoare cu reacție de la stare calculate cu ajutorul metodei regulatorului liniar cuadratic (eng. Linear Quadratic Regulator – LQR).
- Se impune o saturație pe semnalul de comandă cu scopul setării unei viteze maxime, pentru a nu forța sursa de alimentare.
- Se calculează două regulatoare, unul care respectă saturația impusă și unul care nu, pentru a compara rezultatele obținute prin folosirea acestora.

Analiza și soluționarea problemei

- Pentru modelul extins, care folosește intrarea de tensiune și sarcină a motorului, se implementează un estimator, deoarece curentul din armătură nu se măsoară fizic.
- Regulatorul cu reacție de la stare folosește stările estimate pentru controlul buclei de viteză și respectiv a buclei de curent.
- Polii se impun astfel încât să se respecte inegalitățile matriciale liniare propuse (eng. Linear Matrix Inequations – LMIs).

Analiza și soluționarea problemei

- Vitezele unghiulare care se aplică ca referințe în buclele de control ale motoarelor se calculează folosind modelul geometric Ackermann.
- Pentru calcularea vitezelor este nevoie de L (lungimea mașinii), T (lățimea mașinii), θ (unghiul de deplasare) și direcția de mișcare



Analiza și soluționarea problemei

- Formulele deduse din modelul Ackermann sunt:

$$R_i = R - \frac{T}{2}, \quad R_e = R + \frac{T}{2},$$

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{L}{R}, \quad \theta_i = \operatorname{arctg}\left(\frac{L}{R_i}\right), \quad \theta_e = \operatorname{arctg}\left(\frac{L}{R_e}\right),$$

$$v_i = v \cdot \cos(\theta_i), \quad v_e = v \cdot \cos(\theta_e).$$

- Unde vitezele care trebuie folosite ca referințe sunt v_i (viteza roții interioare) și v_e (viteza roții exterioare).

Analiza și soluționarea problemei

- Din punct de vedere al programării microcontrollerului (μC), aplicația se împarte în mai multe funcționalități:
 - Funcții de citire a datelor de la utilizator.
 - Funcții de mapare a datelor citite de pe senzorii de viteză.
 - Funcții pentru calcularea legii de control.
 - Funcții pentru corectarea problemelor introduse de sistemele discrete.
 - Funcții pentru generarea semnalelor trimise driverelor motoarelor BLDC respectând standardul lor de comunicație.

Conținutul prezentării

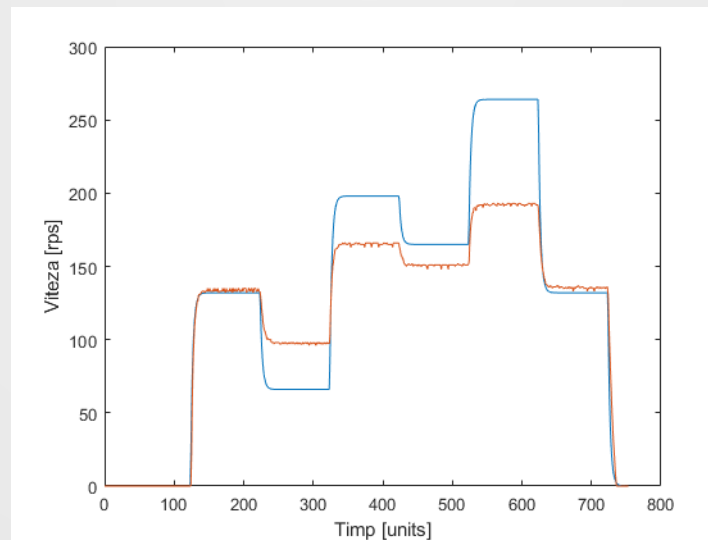
- Introducere
- Analiza și soluționarea problemei
- **Testarea și validarea soluției propuse**
- Concluzii

Testarea și validarea soluției propuse

- Sistemul identificat pe o treaptă are forma:

$$H(s) = \frac{1650}{0.8s + 1}.$$

- Evidențierea caracteristicii neliniare a sistemului:



Testarea și validarea soluției propuse

- Gainul neliniar care evoluează în funcție de viteză este identificat după formula:

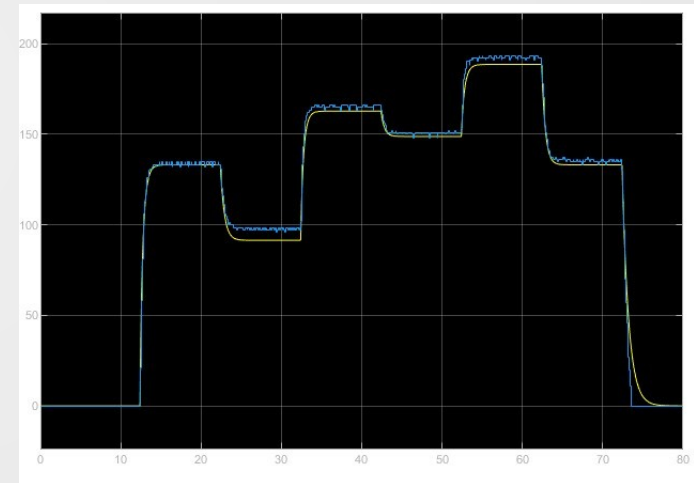
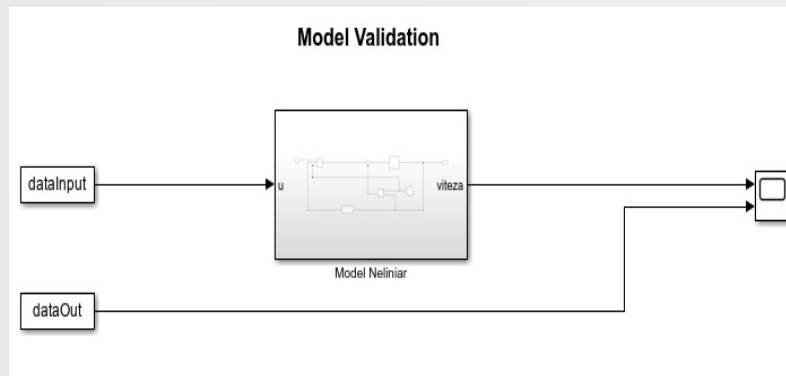
$$K(\omega) = 0.06328 \omega^2 - 29.11 \omega + 4417$$

- Funcția de transfer apare sub forma:

$$H(s) = \frac{0.06328 \omega^2 - 29.11 \omega + 4417}{0.8s + 1}$$

Testarea și validarea soluției propuse

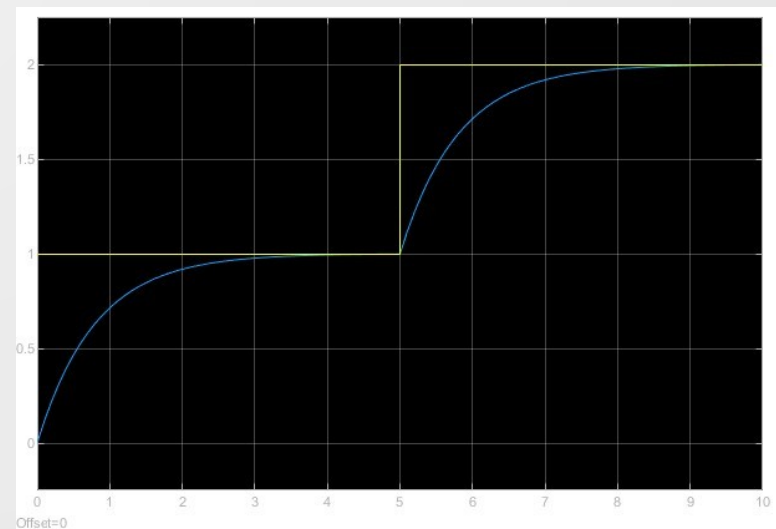
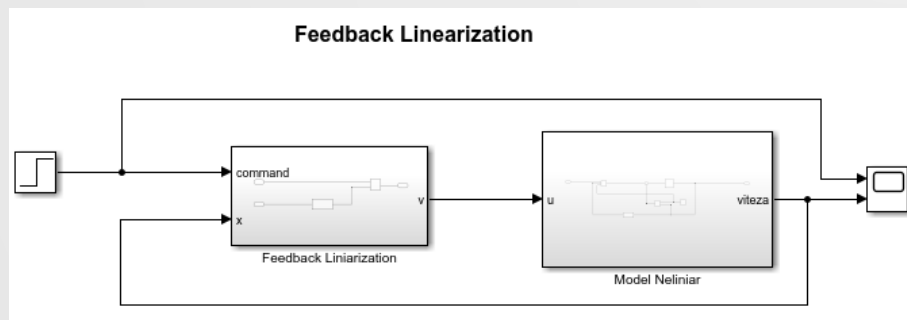
- Implementarea și simularea funcției în Simulink:



Testarea și validarea soluției propuse

- Liniarizarea pe baza reacției calculează gainul neliniar și intrarea dorită se înmulțește cu inversul gainului calculat:

$$v = \frac{u}{K(\omega)}$$

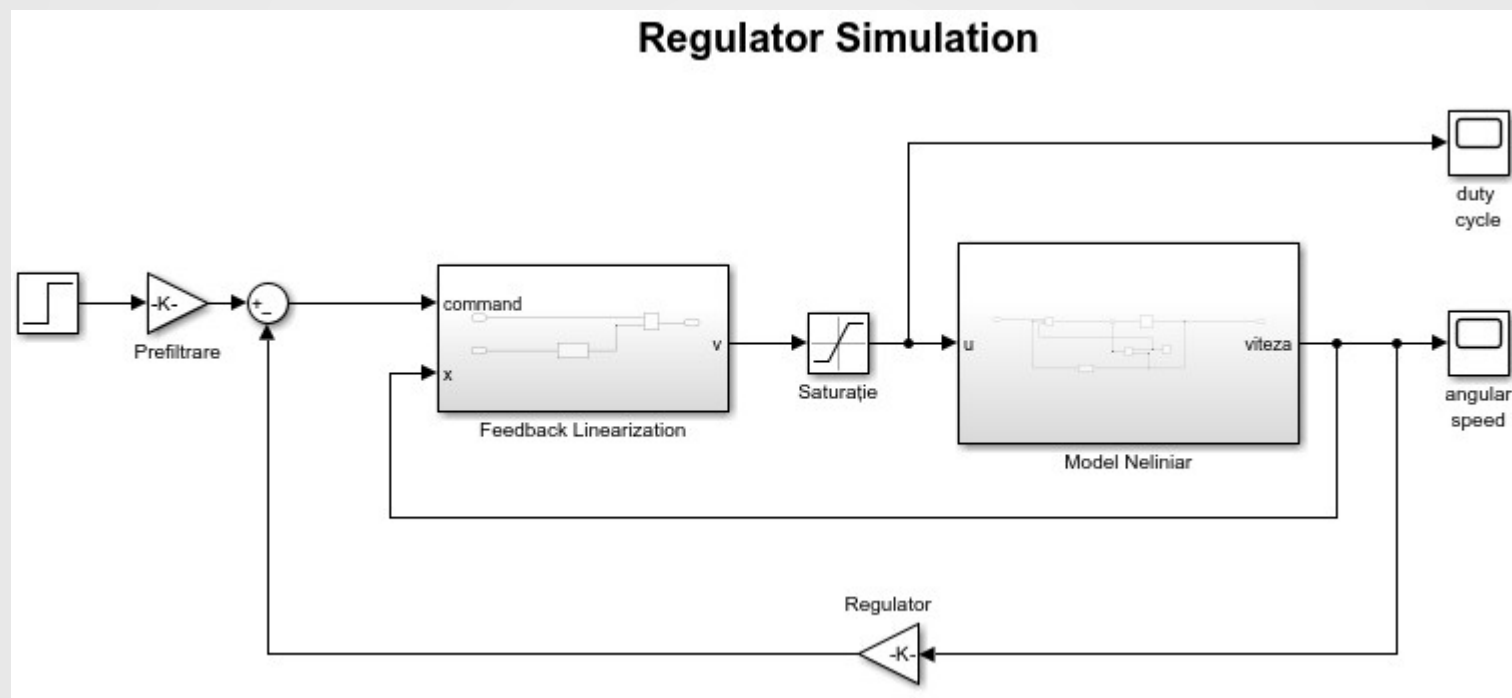


Testarea și validarea soluției propuse

- Pentru calculul reguletoarelor se impun următoarele valori:
 - $Q = 7$, $R = 1$ – pentru regulatorul care respectă saturația.
 - $Q = 7$, $R = 0.1$ – pentru regulatorul care nu respectă saturația impusă.
- Reguletoarele și matricile de prefiltrare sunt:
 - $K = 1.8284$, $F = 2.8281$ – pentru primul set de reguli.
 - $K = 7.4261$, $F = 8.4246$ – pentru al doilea set de reguli.

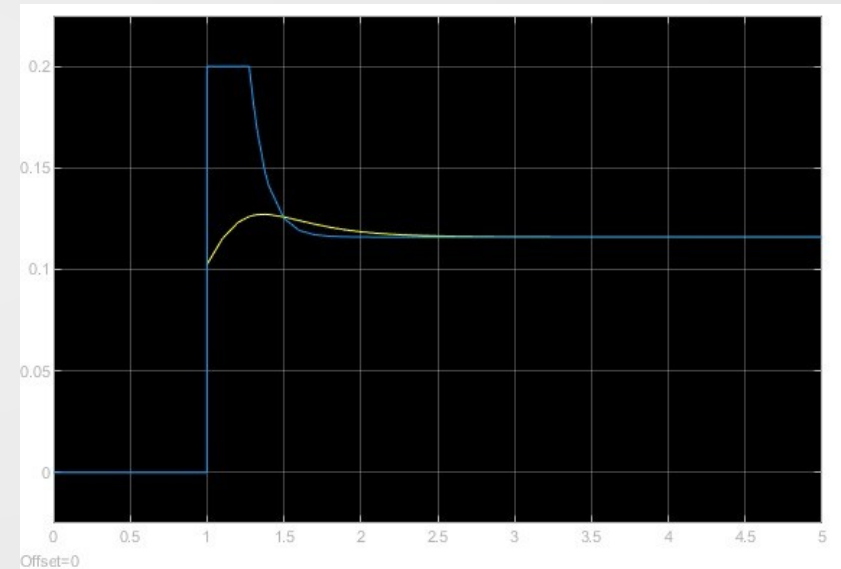
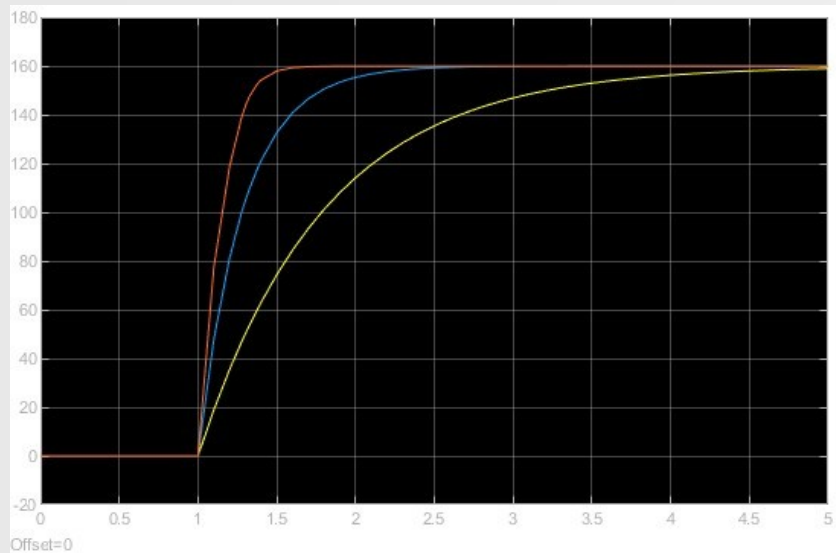
Testarea și validarea soluției propuse

- Implementarea Simulink:



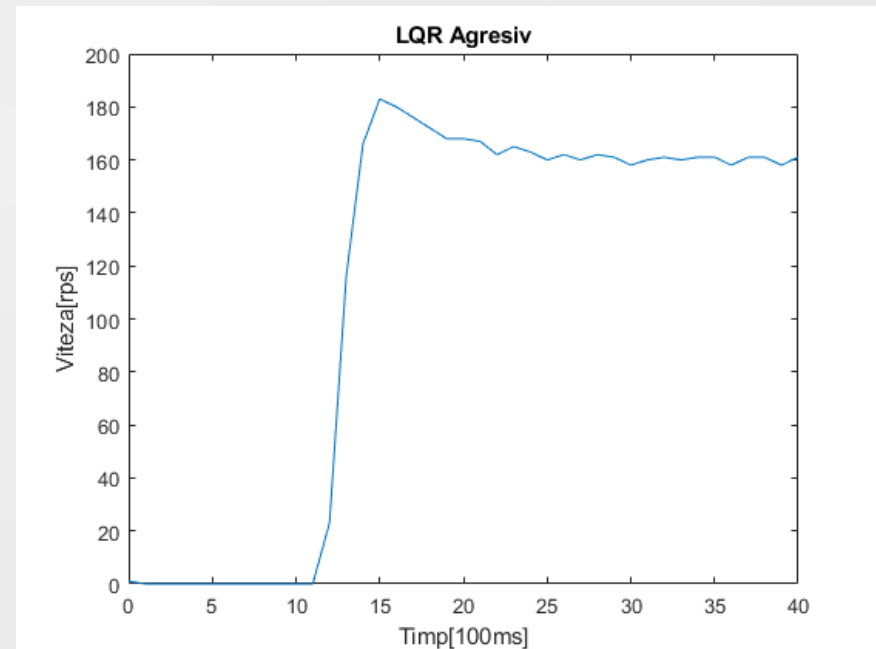
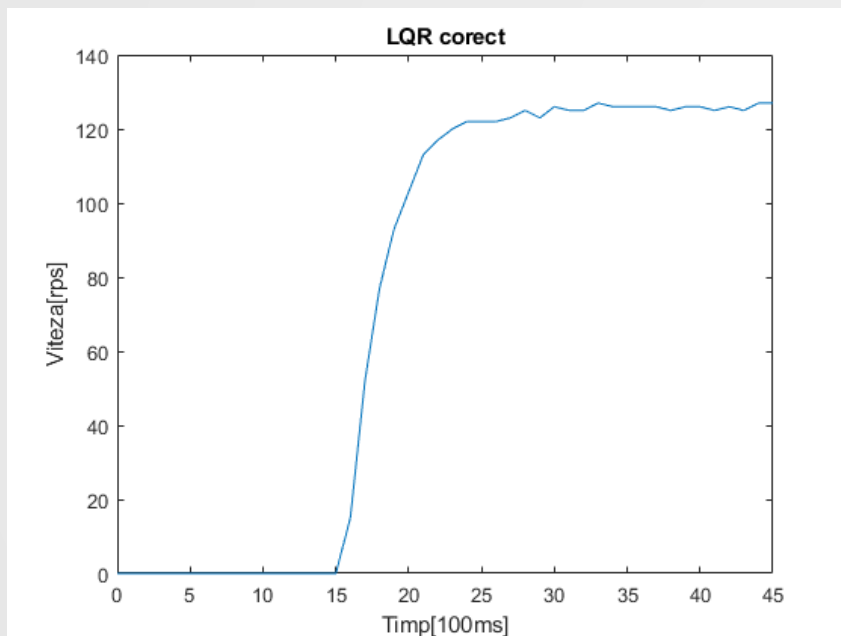
Testarea și validarea soluției propuse

- Rezultatele obținute:



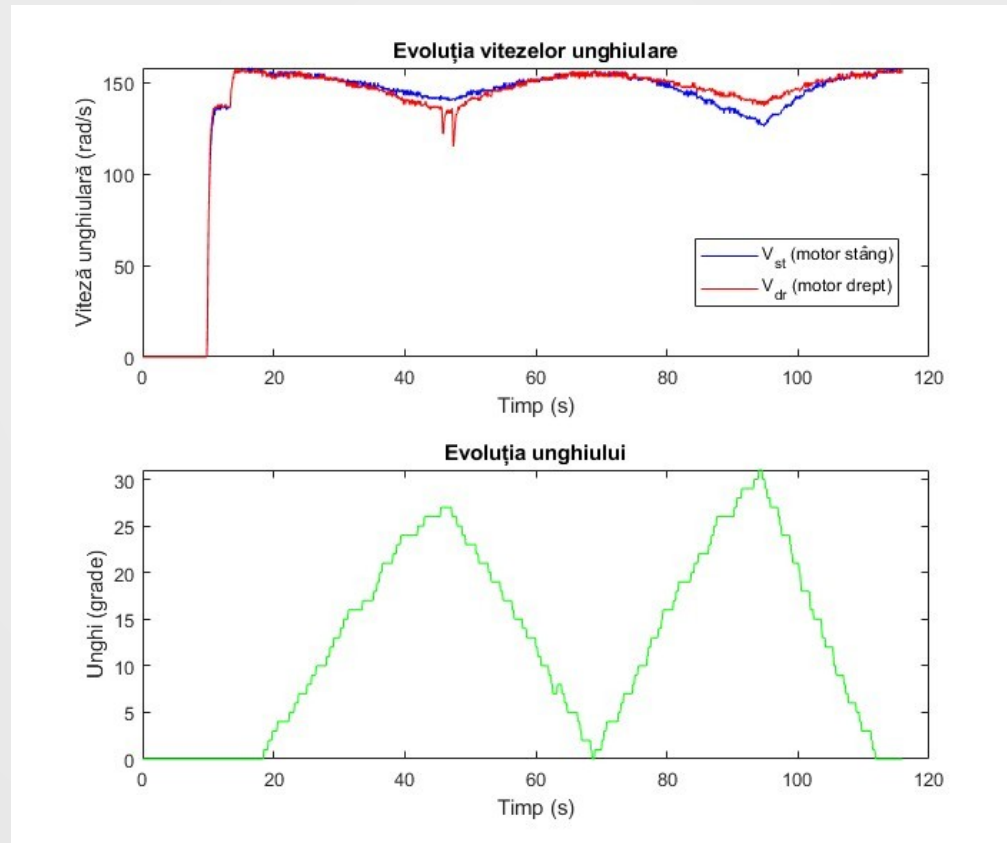
Testarea și validarea soluției propuse

- Comportamentul fizic al motoarelor în urma implementării reguletoarelor:



Testarea și validarea soluției propuse

- Rezultatul testării controlului și a funcției de direcție este prezentat mai jos



Testarea și validarea soluției propuse

- Pentru modelul extins se folosește spațiul stărilor obținut prin descoperirea valorilor parametrilor fizici:

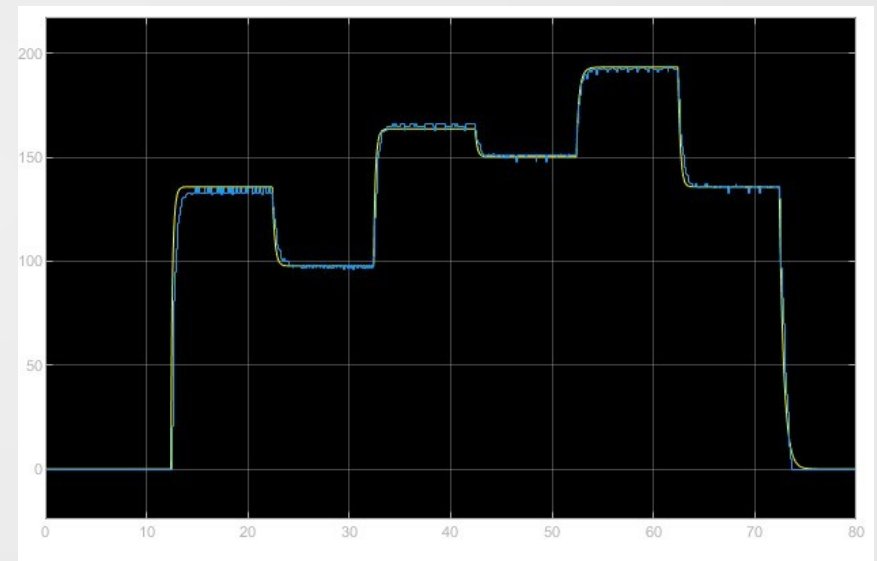
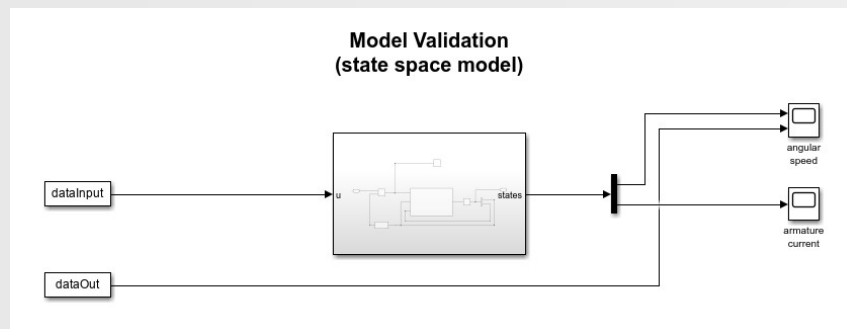
$$\dot{x} = \begin{pmatrix} -48580.9682 & 13961468.520 \\ -0.006207 & -0.5 \end{pmatrix} \cdot x + \begin{pmatrix} -104894579.418 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix} \cdot u$$

- În acest caz se folosește următoarea aproximare a gainului neliniar:

$$K(\omega) = 9.2289 \cdot 10^{-5} \omega^2 + 0.0371 \omega + 4.6870$$

Testarea și validarea soluției propuse

- Implementarea și testarea în Simulink:



Testarea și validarea soluției propuse

- Pentru control se calculează un estimator de stare care aproximează stările pe baza ieșirii (viteza unghiulară):

$$L = \begin{pmatrix} 437233.214 \\ 0.7710 \end{pmatrix}$$

- Pentru calculul regulatorului se impun parametrii următori:

$$\alpha = 10$$

$$\theta = 0.1$$

$$u_{max} = 1$$

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{220^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{20^2} \end{pmatrix}$$

Testarea și validarea soluției propuse

- Prin impunerea condițiilor:

$$AP + P^T A^T + BZ + Z^T B^T + 2\alpha P < 0$$

$$\begin{pmatrix} AP + P^T A^T + BZ + Z^T B^T & \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta)} (AP - PA^T + BZ - Z^T B^T) \\ 0 & AP + P^T A^T + BZ + Z^T B^T \end{pmatrix} < 0$$

$$\begin{pmatrix} -u_{\max}^2 \cdot I & 0 \\ -Z^T & -Q \end{pmatrix} < 0$$

$$P > 0$$

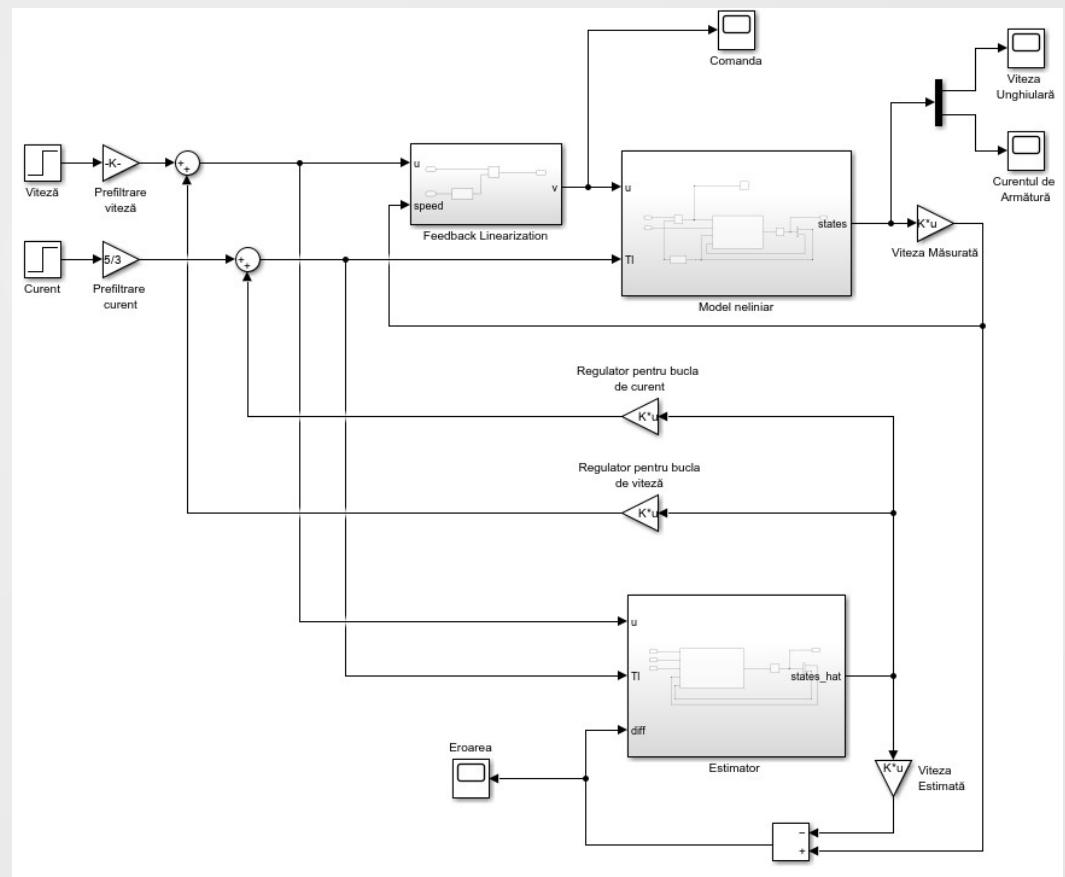
Testarea și validarea soluției propuse

- Se obține regulatorul și se implementează în Simulink:

$$K = \begin{pmatrix} 0.000463 & -0.1331 \\ -0.00078 & 1.5295 \end{pmatrix}$$

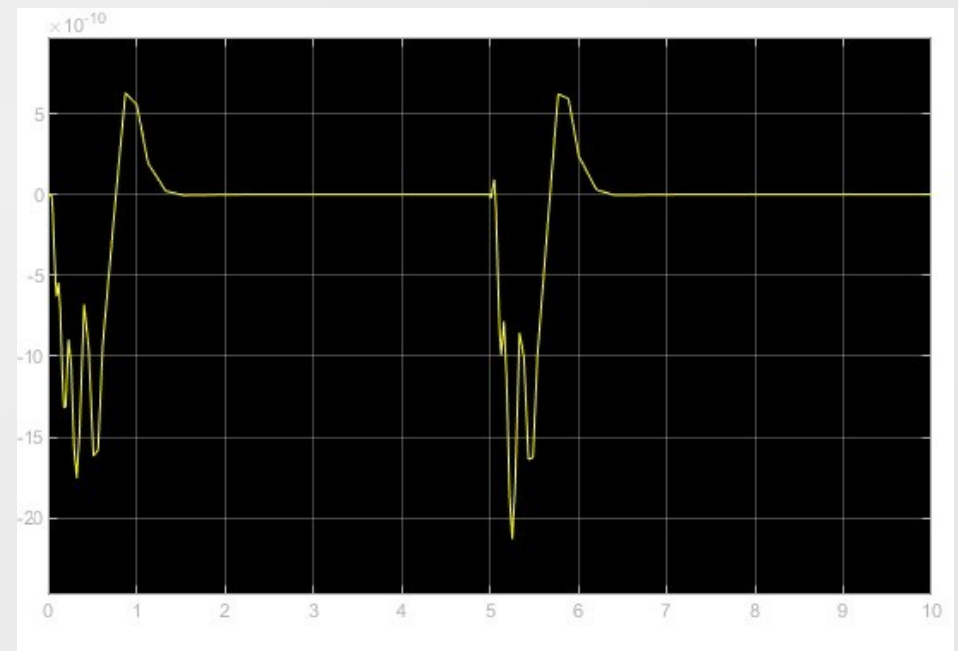
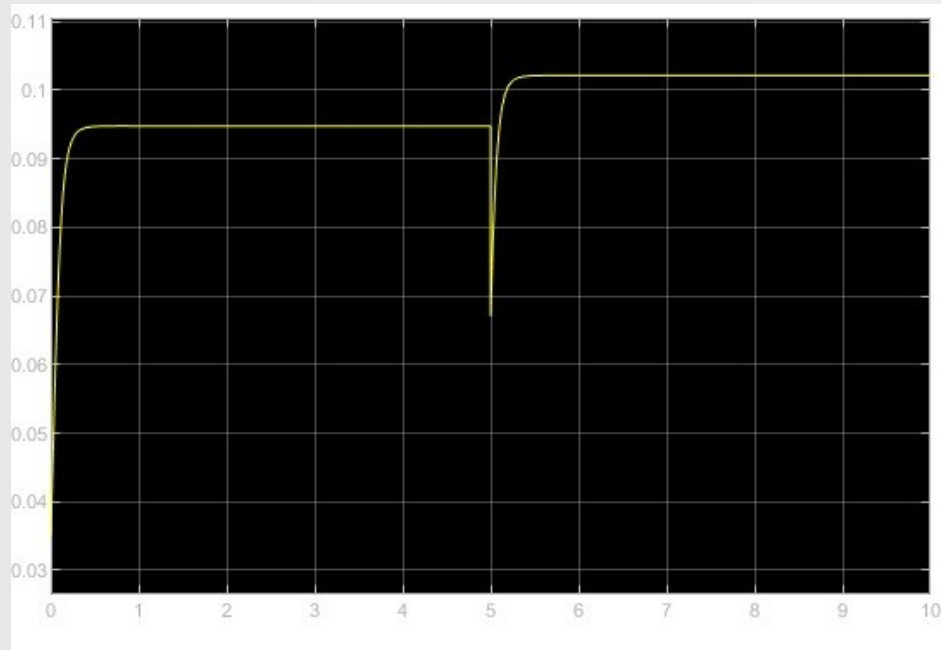
$$F_{viteză} = 0.0010216$$

$$F_{curent} = 1.6667$$



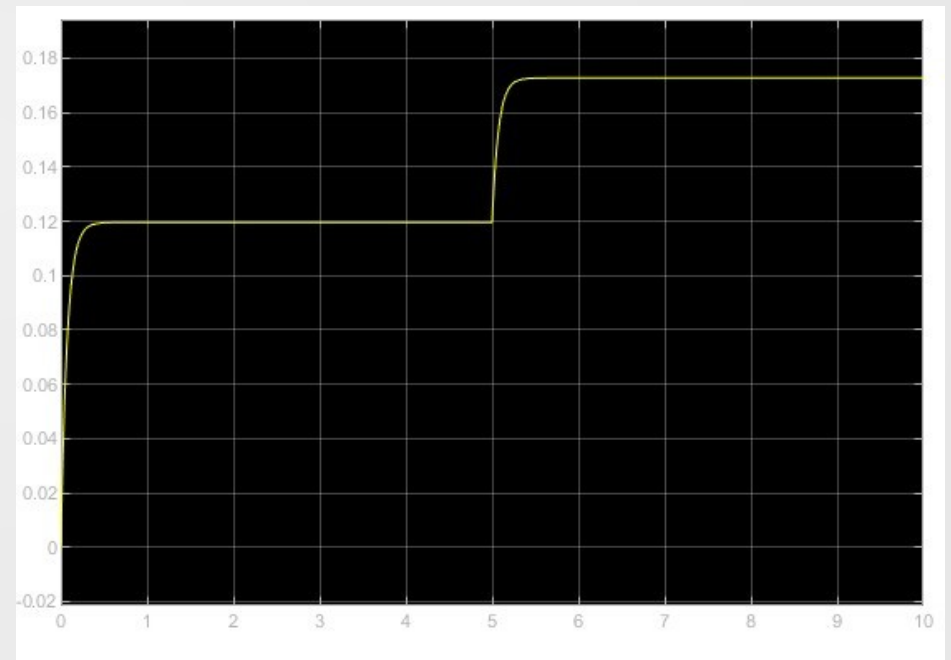
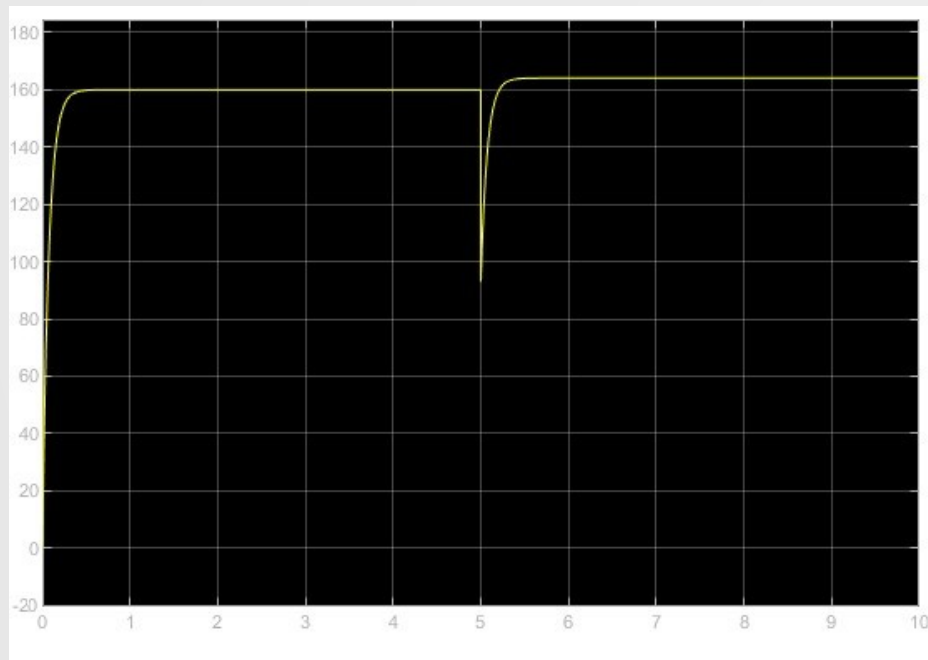
Testarea și validarea soluției propuse

- Semnalul de comandă și eroarea obținută:



Testarea și validarea soluției propuse

- Viteza și curentul obținut:



Conținutul prezentării

- Introducere
- Analiza și soluționarea problemei
- Testarea și validarea soluției propuse
- **Concluzii**

Concluzii

- Controlul vitezei și calcularea referințelor de viteză s-au realizat atât în simulări cât și pe un sistem fizic.
- Analiza controlului arată diferențe între simulare și realitate, între sisteme ce lucrează în domeniul discret și cel continuu.
- Se expun comportamentele și efectele reguletoarelor calculate corect, respectiv gresit.

Concluzii

- Ca direcții de dezvoltare se numesc următoarele puncte:
 - Îmbunătățirea elementelor fizice folosite.
 - Completarea modelului matematic cu dinamica introdusă de invertoarele folosite.
 - Extinderea modelului cu stări de interes precum temperatura motorului și starea de sănătate a acestuia.
 - Folosirea unor algoritmi de predicție bazați pe inteligența artificială.

Universitatea Tehnică Cluj-Napoca
Facultatea de Automatică și Calculatoare
Secția Automatică și Informatică Aplicată

Controlul diferențial a două motoare BLDC cu scopul înlăturării diferențialului clasic

Lucrare de licență

Email: petrisor.margin@yahoo.com

Număr de telefon: (+40) 0741 765 665