

# **E** lectronică pentru **A** utomobile

## Prelegerea nr. 2

### **2. STRUCTURI DE CONTROL PENTRU MOTOARELE CU APRINDERE PRIN SCÂNTEIE**

---



**Structuri clasice de control**

### **STRUCTURI CLASICE DE CONTROL**

O analiză eficientă a performanțelor motoarelor trebuie să aibă în vedere modul în care este structurat sistemul de control al alimentării cu combustibil și al aprinderii.

Dacă până în anii 1980 controlul era practic asigurat de sisteme de reglaj mecanice (cu toate limitările lor specifice), după acea perioadă se remarcă o dezvoltare spectaculoasă a sistemelor electronice.

Pentru a studia modalitățile de perfecționare în continuare a sistemelor electronice de control al injecției de benzină și al aprinderii sunt necesare o sistematizare și o analiză comparativă a soluțiilor existente.

O primă structură - bloc de motor cu aprindere prin scânteie este prezentată în figura 2.1.



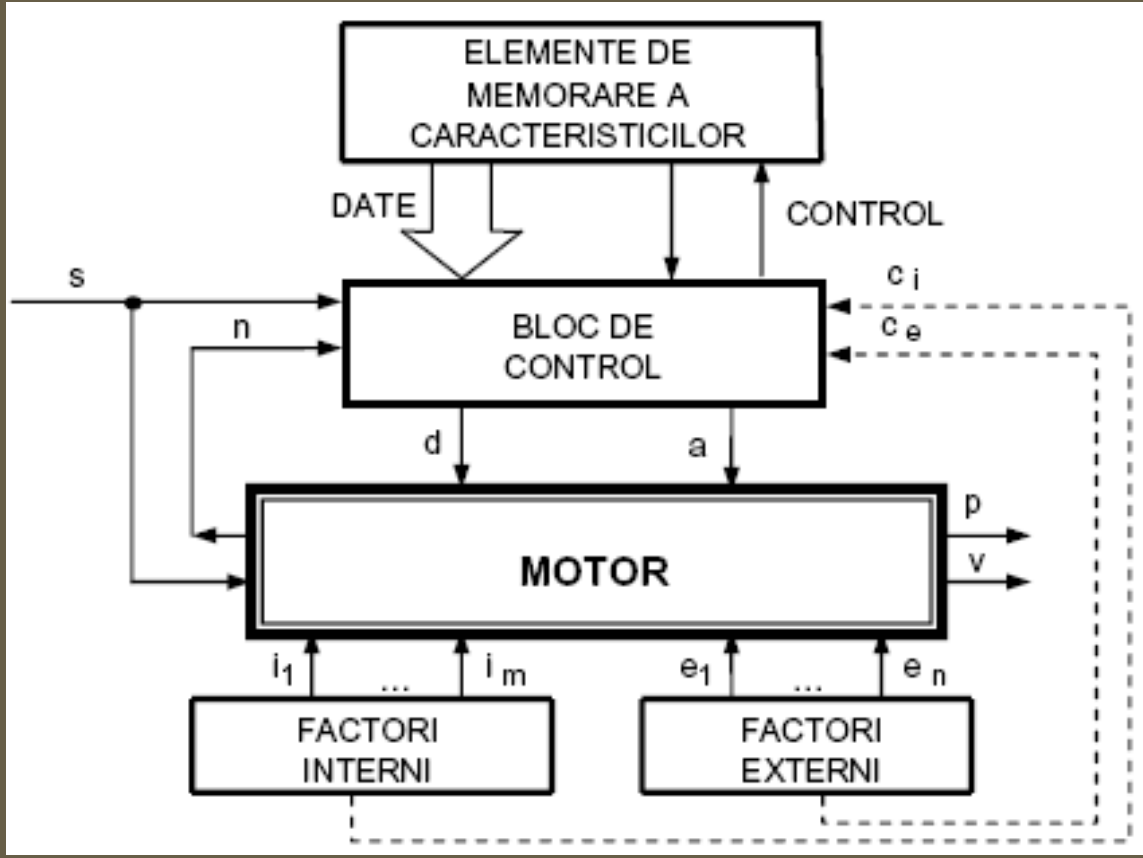
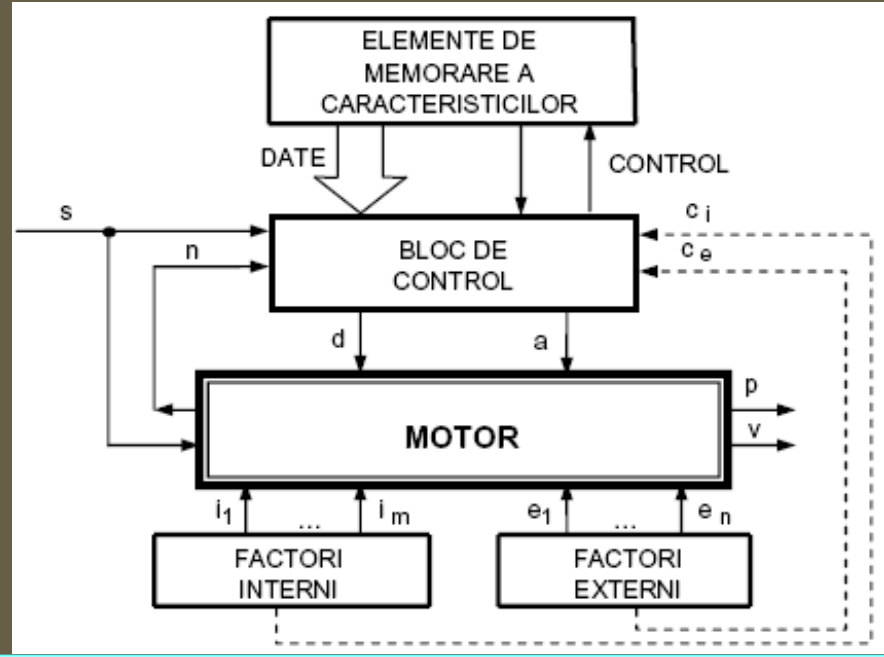


Figura 2.1

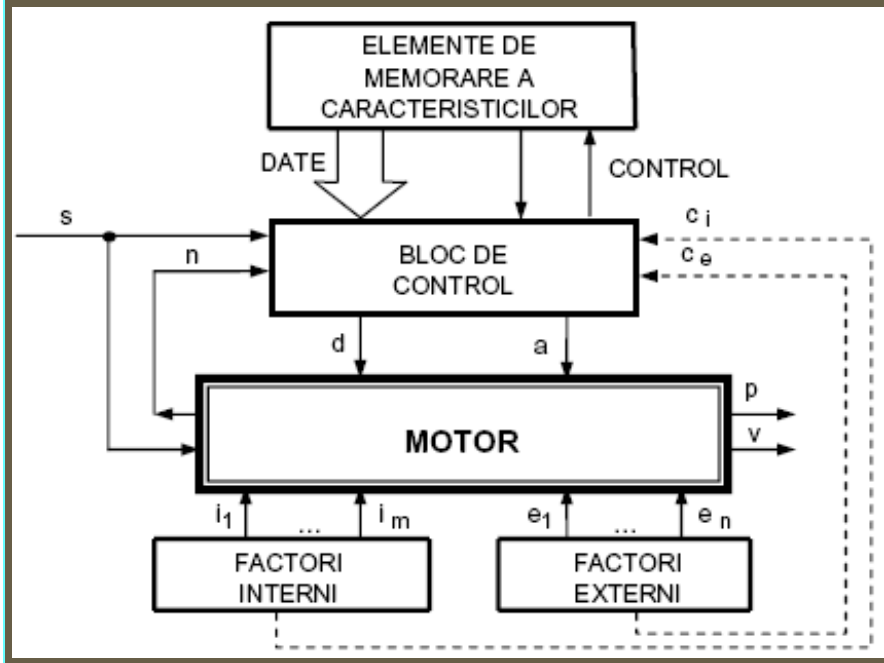


Acest tip caracterizează motoarele cu carburator, sistemele de injecție mecanică și injecția electronică de benzină fără control Lambda în buclă închisă și de control al detonației. Mărimile specifice ce apar sunt următoarele:



- **s** - sarcină;
- **n** - turație;
- **a** - avans la aprindere;
- **d** - dozaj carburant;
- **p** - factori poluanți (gaze de evacuare);
- **v** - vibrații (specifice detonației);





- $i_1 \dots i_m$  - parametri interni;
- $e_1 \dots e_n$  - parametri externi;
- $c_e$  - mărimi de corecție a influenței parametrilor externi;
- $c_i$  - mărimi de corecție a influenței parametrilor interni.



Dacă ne referim la controlul electronic existent în prezent, conform încadrării enunțate inițial, pentru figura 2.1 în regim stabilizat și condiții standard de funcționare avansul  $a_m = f_a(s, n)$  și dozajul  $d_m = f_d(s, n)$  pot fi considerate ca fiind memorate sub forma unor matrice,  $A$  respectiv  $D$ , având dimensiunile  $s_1 \times n_1$  și respectiv  $s_2 \times n_2$ .

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1s_1} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2s_1} \\ & \dots & \dots & \\ a_{n_1 1} & a_{n_1 2} & \dots & a_{n_1 s_1} \end{vmatrix} \quad D = \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1s_2} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2s_2} \\ & \dots & \dots & \\ d_{n_2 1} & d_{n_2 2} & \dots & d_{n_2 s_2} \end{vmatrix}$$

Mărimile sunt cuantificate, respectând condițiile:  $a_{ij}$  și  $d_{ij} \in N$ .



Mărimile de control ce acționează asupra motorului, notate  $a_c$  și  $d_c$ , rezultă pe baza relațiilor analitice:

$$a_c = a_m \cdot U_a$$
$$d_c = d_m \cdot U_d$$

unde  $U_a$  și  $U_d$  sunt mărimi unitare specifice blocului de control, astfel încât  $a_c$  și  $d_c$  sunt din punct de vedere dimensional mărimi echivalente avansului la aprindere, respectiv dozei de benzină.

Pentru un regim staționar, dar pentru alte valori ale parametrilor determinați de factorii interni și externi, apare necesitatea aplicării unor corecții. Uzând de același formalism matematic, aceste corecții pot fi exprimate (în cazul când acestea au un caracter aditiv) prin două matrice de corecție  $C_a$ ,  $C_d$ :



$$C_a = \begin{vmatrix} ca_{11} & ca_{12} & \dots & ca_{1s_1} \\ ca_{21} & ca_{22} & \dots & ca_{2s_1} \\ & \dots & \dots & \\ ca_{n_11} & ca_{n_12} & \dots & ca_{n_1s_1} \end{vmatrix} \quad C_d = \begin{vmatrix} cd_{11} & cd_{12} & \dots & cd_{1s_2} \\ cd_{21} & cd_{22} & \dots & cd_{2s_2} \\ & \dots & \dots & \\ cd_{n_21} & cd_{n_22} & \dots & cd_{n_2s_2} \end{vmatrix}$$

Aceste matrice de corecție vor fi utilizate pentru prelucrarea mărimilor memorate **A**, respectiv **D**. Generarea mărimilor de control **folosite** va fi realizată de relații similare cazului precedent, în care însă apar matricele: **A<sub>f</sub>** pentru avansul la aprindere, respectiv **D<sub>f</sub>** pentru dozarea benzinei.





$$A_f = A + C_a, \quad D_f = D + C_d$$

deci:

$$a_f = (a_m + c_a) \cdot U_a, \quad d_f = (d_m + c_d) \cdot U_d$$

Valorile elementelor din matricele de corecție apar ca funcții de tipul:

$$c_a = f_{ca}(s, n, i_1, i_2, \dots, i_m, e_1, e_2, \dots, e_n)$$

$$c_d = f_{cd}(s, n, i_1, i_2, \dots, i_m, e_1, e_2, \dots, e_n)$$

Dacă se dorește o corecție de bună calitate, parametrii ce descriu factorii interni și cei externi se cuantifică într-un anumit număr de trepte, alese din considerente practice. Fie  $q$  acest număr. Apar, prin urmare,  $N_c$  combinații posibile ale parametrilor, unde:

$$N_c = C_{q(n+m)}^{n+m}$$

Așadar, apare un necesar de memorie pentru corecția avansului la aprindere de  $N_a$  locații, iar pentru corecția dozajului, de  $N_d$  locații, unde:

$$N_a = n_1 \cdot s_1 \cdot C_{q(n+m)}^{n+m}; \quad N_d = n_2 \cdot s_2 \cdot C_{q(n+m)}^{n+m}$$



Având în vedere valorile practice ale capacităților de memorie (caracteristicile standard statice) - pentru avans  $n_1 \cdot s_1$ , respectiv pentru dozaj  $n_2 \cdot s_2$  - rezultă necesități de memorie extrem de mari.

Valorile ce s-ar înscrie în aceste memorii ar impune un număr extrem de mare de rezultate experimentale, obținute prin probe de stand, uneori în condiții extrem de dificil de realizat (combinații posibil să apară practic, dar foarte dificil de menținut pe durata unor experimente în mediu artificial).



Prin urmare, pe baza acestor principii de control pentru toate regimurile staționare posibile, mărimile finale utilizate pentru controlul motorului  $a_{sf}$  și  $d_{sf}$  au forma:

$$a_{sfij} = a_{sfij}(s, n, i_1, i_2, \dots, i_m, e_1, e_2, \dots, e_n),$$

$$i = 1, 2, \dots, n_1, \quad j = 1, 2, \dots, s_1$$

$$d_{sfij} = d_{sfij}(s, n, i_1, i_2, \dots, i_m, e_1, e_2, \dots, e_n),$$

$$i = 1, 2, \dots, n_2, \quad j = 1, 2, \dots, s_2$$



Criteriile pe baza cărora se determină caracteristicile statice implementate în memoria sistemelor sunt:

- ***pentru dozaj***
  - economicitatea;
  - economicitatea și reducerea poluării;
  - reducerea poluării;
  - reducerea poluării și economicitatea.
- ***pentru avansul la aprindere:***
  - evitarea detonației;
  - reducerea poluării;
  - putere maximă (pentru un dozaj dat).



### **STRUCTURI DE CONTROL ÎN BUCLĂ ÎNCHISĂ**

Prezența buclelor de reacție negativă permite menținerea, în mod automat, a performanțelor motoarelor în limitele tehnologice asigurate de sistem pe toată durata de (bună) funcționare.

Problema buclelor de reacție a fost formulată cu acuitate odată cu schimbarea priorităților la formarea amestecului (dozaj) de la economicitate către reducerea poluării.

Realizarea dozajului cu o eroare maximă de 1% față de amestecul stoichiometric constituie o condiție obligatorie pentru funcționarea eficientă a convertorului catalitic cu trei căi. Un sistem în buclă deschisă nu poate realiza practic (atât din considerente tehnice, cât și economice) o astfel de performanță.

Din punctul de vedere al reglării avansului la aprindere criteriul de optimizare, respectiv de stabilizare a răspunsului, îl constituie funcționarea la limita de detonație, când randamentul motorului atinge un maxim.



Pentru creșterea performanțelor motoarelor s-a trecut la o structură de control de tipul celei prezentate în figura 2.2.

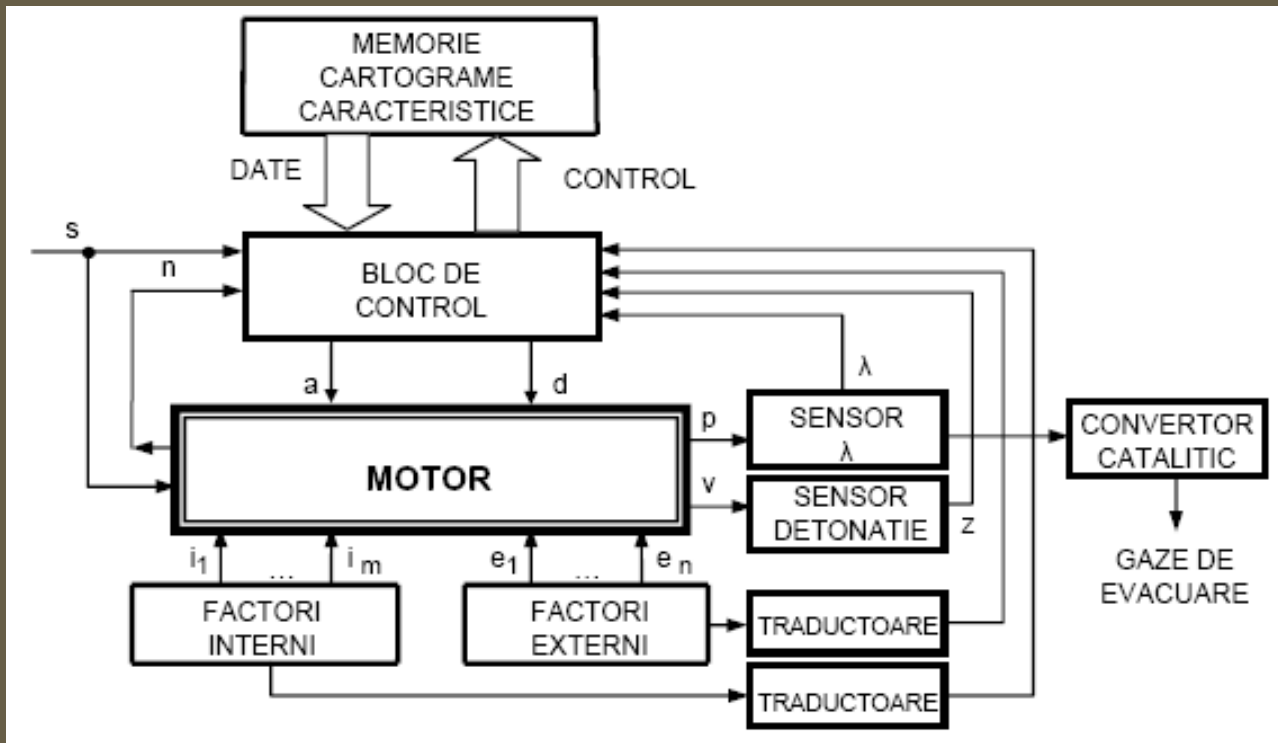
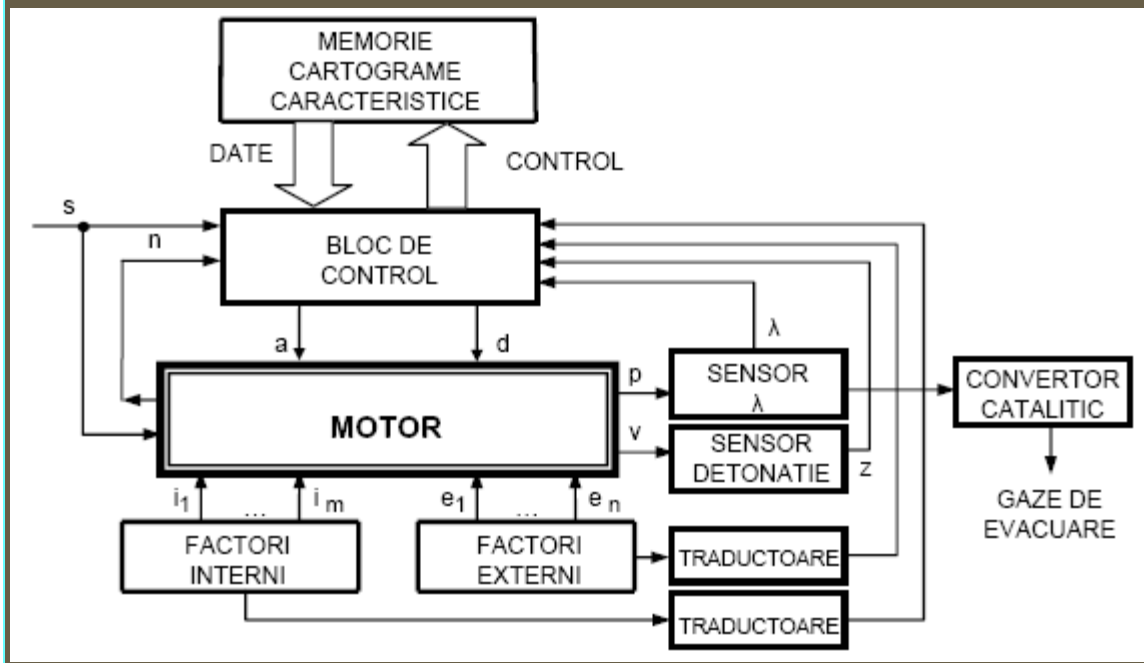


Figura 2.2

Evident că aceste structuri nu pot fi realizate decât cu sisteme electronice de control (cu injecție sau carburator electronic). Față de structura din figura 2.1 mai apar semnalele:



- $\lambda$  - semnal despre dozaj (furnizat de sonda Lambda);
- $z$  - semnal de la sensorul de detonație.



Superioritatea în regim staționar a structurii din figura 2.2 față de cea din figura 2.1 se evidențiază în primul rând când apar abateri ale parametrilor de stare față de valorile ce corespund condițiilor standard de funcționare.

Ca urmare a schimbării parametrilor de stare se va modifica și răspunsul sistemului (motorului), modificările fiind puse în evidență de sensorii Lambda și de detonație.

Semnalele de la acești senzori, fiind incluse în bucle de reacție negativă, vor determina variații compensatoare, de semn contrar, care să asigure revenirea mărimilor  $a$  și  $d$  la valori care să satisfacă criteriile de funcționare (dozaj cu  $\lambda = 1 \pm 1\%$  și avans corespunzător funcționării la limita de detonație).



Modificarea mărimilor de control din sistem se face discret, practic prin incrementări și decrementări ale mărimilor  $a$  și  $d$ , ceea ce are ca efect variații prin trepte de valoare  $U_a$ , respectiv  $U_d$  ale avansului la aprindere și ale dozajului.

Pentru a facilita sarcina menținerii condițiilor de bună funcționare, corecțiile pot acționa direct în memoria cartogramelor caracteristice, modificând valorile existente în sensul de a le apropia cât mai mult de valorile reale necesare.

Se realizează practic o structură de sistem adaptiv, ce relaxează „efortul” buclelor de reacție. În regim staționar un sistem adaptiv de acest tip va converge către valorile reale necesare, evoluând în limitele erorilor de cuantificare ( $\pm 1/2 U_a, \pm 1/2 U_d$ ).



Există posibilitatea de a desprinde următoarele concluzii din analiza regimurilor staționare:

- În regim staționar de funcționare a motorului și condiții standard de funcționare nu se pot pune practic în evidență deosebiri esențiale între structuri și în cadrul structurilor între soluțiile tehnologice;
- În regim staționar de funcționare a motorului și în condiții de funcționare stabile, dar descrise de parametri cu valori ce se abat de la condițiile standard, sistemele cu reacție sunt superioare, datorită efectului stabilizator al reacției negative.



La funcționarea în **regim dinamic** (tranzitoriu), pentru mărimile reglate avans la aprindere, respectiv dozaj, apar dependențe complexe, descrise de ecuații diferențiale de tipul:

$$F_a(s, \dot{s}, \ddot{s}, \dots, n, \dot{n}, \ddot{n}, \dots, i_1, \dot{i}_1, \ddot{i}_1, \dots, i_2, \dot{i}_2, \ddot{i}_2, \dots, \dots, i_m, \dot{i}_m, \ddot{i}_m, \dots, e_1, \dot{e}_1, \ddot{e}_1, \dots, e_2, \dot{e}_2, \ddot{e}_2, \dots, \dots, e_n, \dot{e}_n, \ddot{e}_n, \dots, t) = 0$$

$$F_d(s, \dot{s}, \ddot{s}, \dots, n, \dot{n}, \ddot{n}, \dots, i_1, \dot{i}_1, \ddot{i}_1, \dots, i_2, \dot{i}_2, \ddot{i}_2, \dots, \dots, i_m, \dot{i}_m, \ddot{i}_m, \dots, e_1, \dot{e}_1, \ddot{e}_1, \dots, e_2, \dot{e}_2, \ddot{e}_2, \dots, \dots, e_n, \dot{e}_n, \ddot{e}_n, \dots, t) = 0$$



Chiar dacă ținem seama că variațiile se manifestă în jurul unor valori bine determinate și în aceste condiții liniarizăm ecuațiile, apare ca evident faptul că simularea la stand și memorarea tuturor valorilor pentru avans la aprindere și dozaj corespunzătoare tuturor tipurilor de dependente ce pot apărea este (tehnic) practic imposibilă, iar economic extrem de costisitoare.

Ca urmare, sistemele actuale se bazează pe anumite simplificări: reducerea ordinului de dependență, eliminarea unor variabile, care în final vor permite totuși încadrarea erorilor dinamice între anumite limite și la un nivel rezonabil de cost și complexitate.



În aceste condiții apar evidente trăsăturile unui reglaj dinamic ideal:

- timpul de răspuns egal cu pauza dintre două comenzi succesive;
- erorile dinamice de fixare a avansului și dozajului în limitele erorii de cuantificare ( $\pm 1/2 U_a, \pm 1/2 U_d$ ).



Așa după cum s-a precizat, reducerea nivelului de poluare a gazelor de evacuare fixează extrem de restrictiv dozajul la valoarea  $\lambda = 1 \pm 1\%$ . În regim staționar controlul Lambda în buclă închisă realizează (relativ) ușor această condiție.

În aceste situații convertorul catalitic are eficiență maximă și nivelul poluării este minim. Prin urmare, utilizând convertor catalitic, reducerea în continuare a nivelului poluării se poate face numai prin îmbunătățirea răspunsului dinamic.



Necesitatea în creștere de menținere a parametrilor funcționali în interiorul unor limite rezonabile a impus realizarea unui volum semnificativ de cercetări în domeniul sistemelor de control în timp real.

Majoritatea aplicațiilor de timp real implică elemente și sarcini specifice în ceea ce privește traductoarele, elementele de interfață și arhitecturile, precum și algoritmi și programele.

Controlul computerizat de timp real al proceselor implică următoarele cerințe:

- menținerea sistemului între anumite limite prestabilite;
- mijloace de control efectiv în condiții critice sau în prezența erorilor.

Din acest punct de vedere, controlul vehiculelor rutiere este o aplicație de timp real de o complexitate extrem de ridicată.





## STRUCTURI EVOLUATE DE CONTROL

Vehiculele cu motor aflate în funcționare sunt puternic dependente de mediul înconjurător (condiții meteo și de trafic, conducător, sisteme de comunicații etc.) și prin urmare controlul lor trebuie realizat, pe de o parte, pe baza câtorva parametri previzibili (sau estimați), iar, pe de altă parte, pe baza unor condiții imprevizibile sau întâmplătoare privind traficul, vremea, erorile operatorului, hazardul.

Decizia finală a controlerului trebuie să fie (în mod ideal) de tip uman; de exemplu, acțiunile controlerului trebuie să depindă de structura lui internă, de informațiile externe, de experiența dobândită anterior și de antrenament.



Un motor cu ardere internă, acționând un vehicul, în mișcare, impune o unitate centrală de control, capabilă să furnizeze parametrii de operare pentru funcționare optimală a motorului, în combinație cu o interacțiune rezonabilă cu mediul înconjurător.

Un controler pe bază de reguli trebuie să permită sistemului:

- să interacționeze cu mediul înconjurător;
- să schimbe anumiți parametri interni ca urmare a interacțiunilor;
- să răspundă în mod diferențiat mediului înconjurător datorită acestor schimbări.

Aceste așa-numite „controlere cu învățare“ sunt capabile să se autoorganizeze, de exemplu, au capacitatea să-și schimbe parametrii interni încât să achiziționeze noi cunoștințe, cunoștința fiind privită ca un corp de date-obiect conectate, organizate într-o formă reprezentativă (de exemplu reguli) ce pot fi executate sau aplicate în anumite scopuri.

Acționând într-un cadru corespunzător de reguli, un astfel de controler poate lua cea mai bună decizie, cu cea mai mică întârziere posibilă.

Etajul supervizat de antrenare a unui astfel de sistem impune prezența unui „profesor“, care intervine în mod succesiv și operează corecții de structură. De asemenea, necesită mijloace de generare a informațiilor pentru „profesor“.

Achiziția de cunoștințe pentru instruirea controlerelor de timp real necesită explorarea sistemelor complexe, interacționând în mod permanent.

Schema-bloc a unui sistem experimental pentru generarea bazei de cunoștințe la motoare cu injecție de benzină este prezentată în figura 2.3.



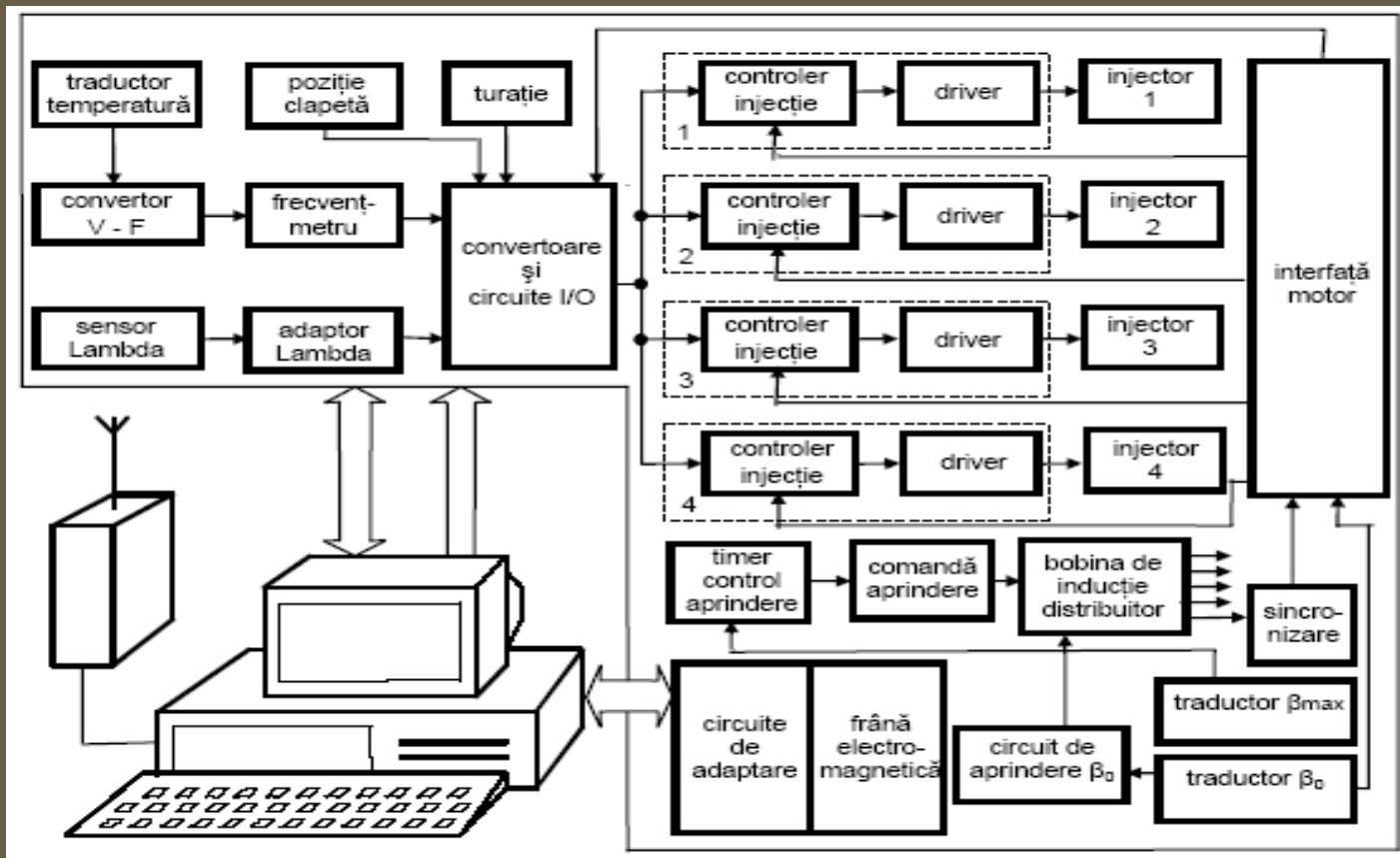
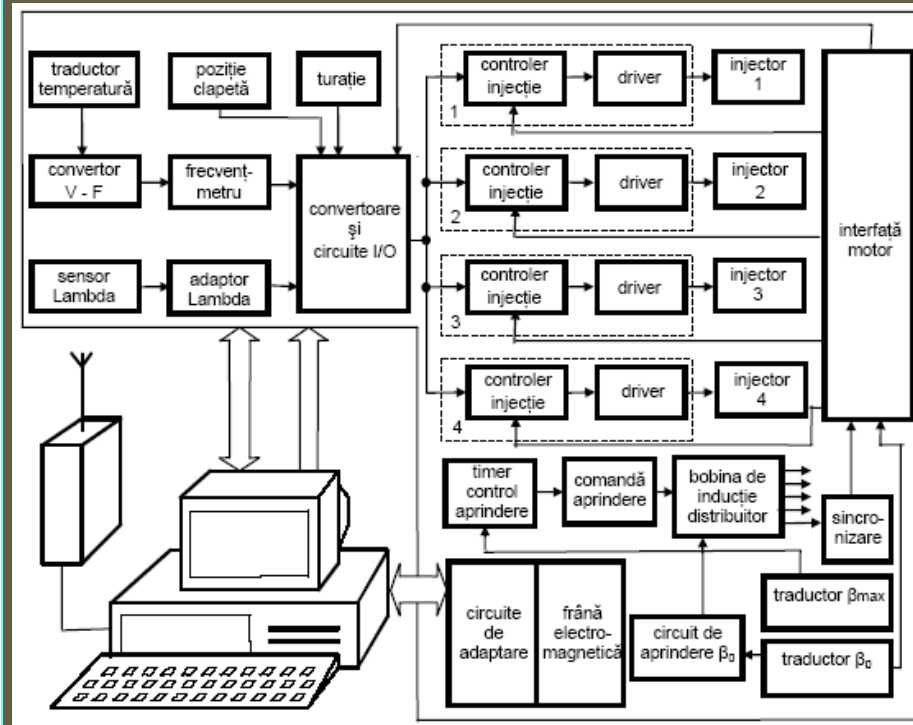
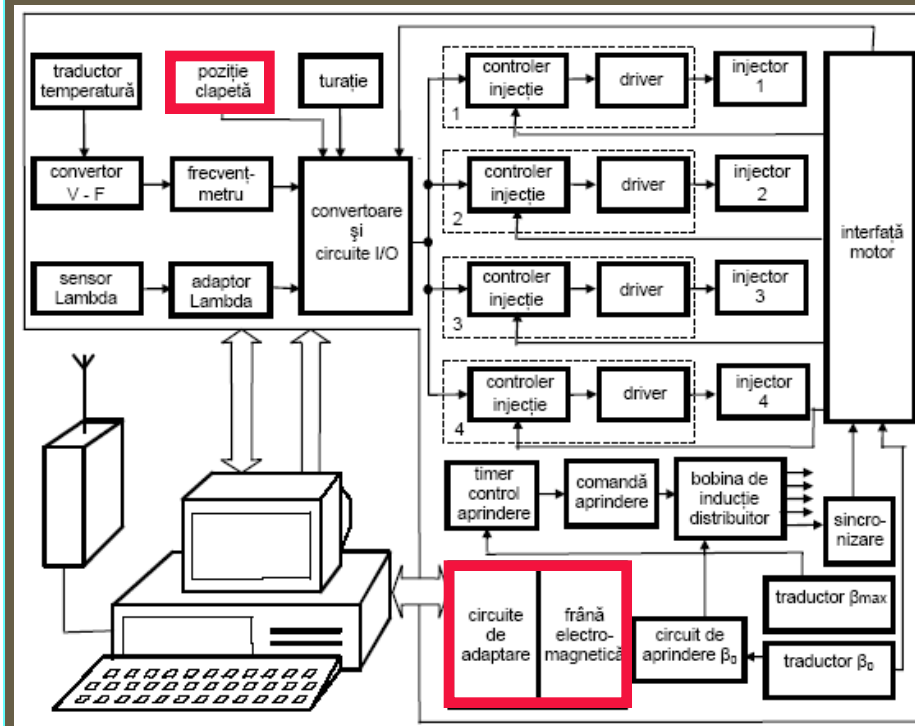


Figura 2.3

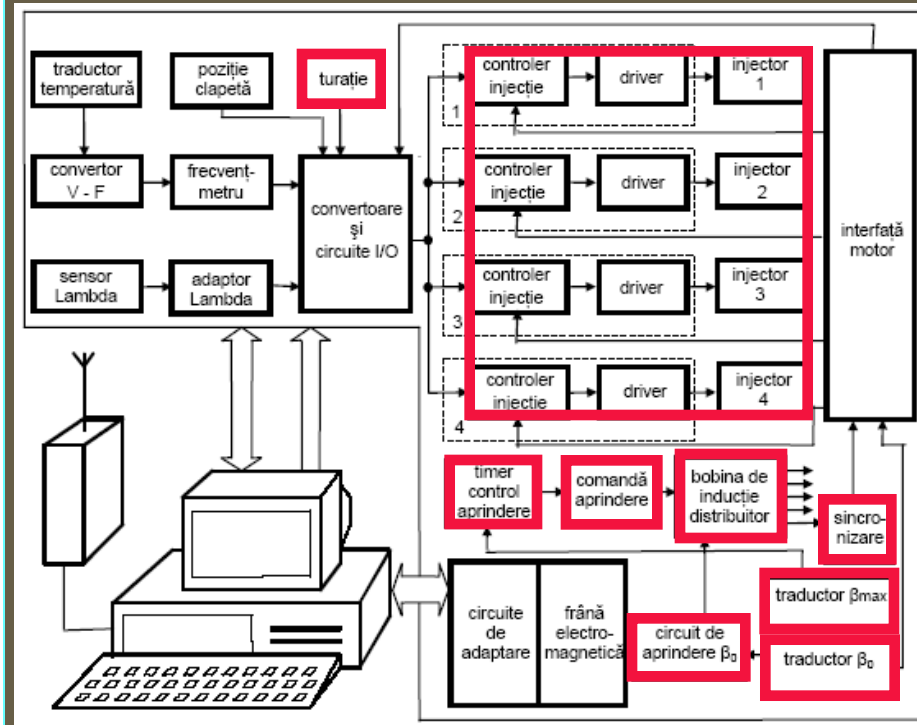
De asemenea, modelarea teoretică pe calculator necesită în mod uzual încercări experimentale practice, recurgându-se la analiza experimentală a sistemului.



Simularea condițiilor de mediu convențional pentru astfel de motoare impune un stand experimental controlat de calculator, permițând controlul pentru:



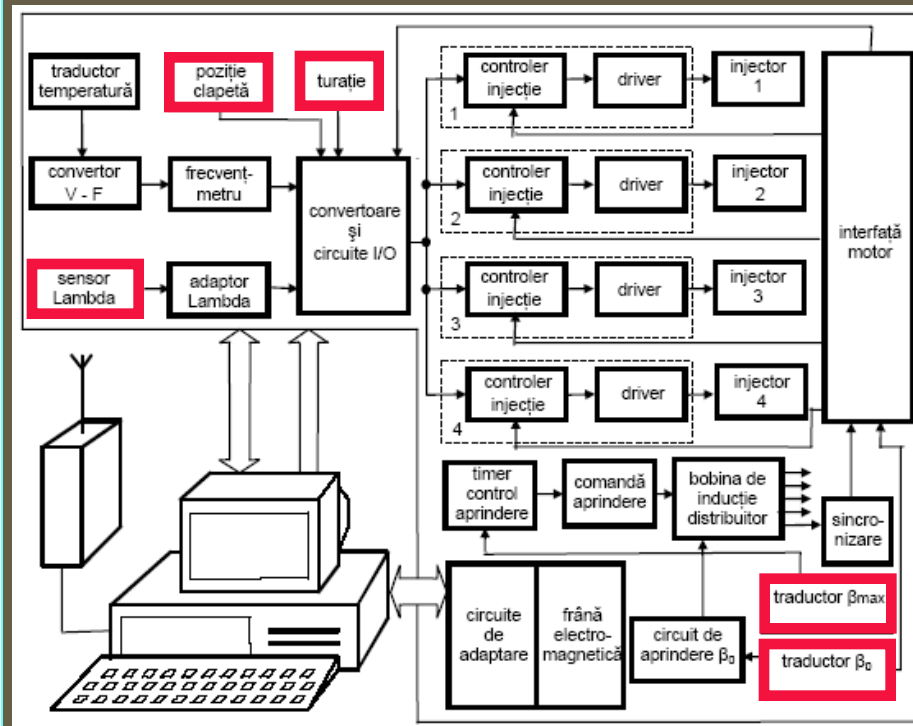
- **sarcina motorului** (frână electromagnetică, dispozitiv de control al poziției clapetei de accelerație, circuite de adaptare);



- **turația motorului;**
- **injecția de benzină** (controlere pentru injecție, circuite driver, injectoare pentru benzină);
- **aprindere** (timer de control al aprinderii, etaj de ieșire, traductor și circuite pentru aprindere pe avans zero -  $\beta_0$ , traductor pentru avans maxim  $\beta_{max}$ , bobină de inducție, distribuitor de înaltă tensiune).

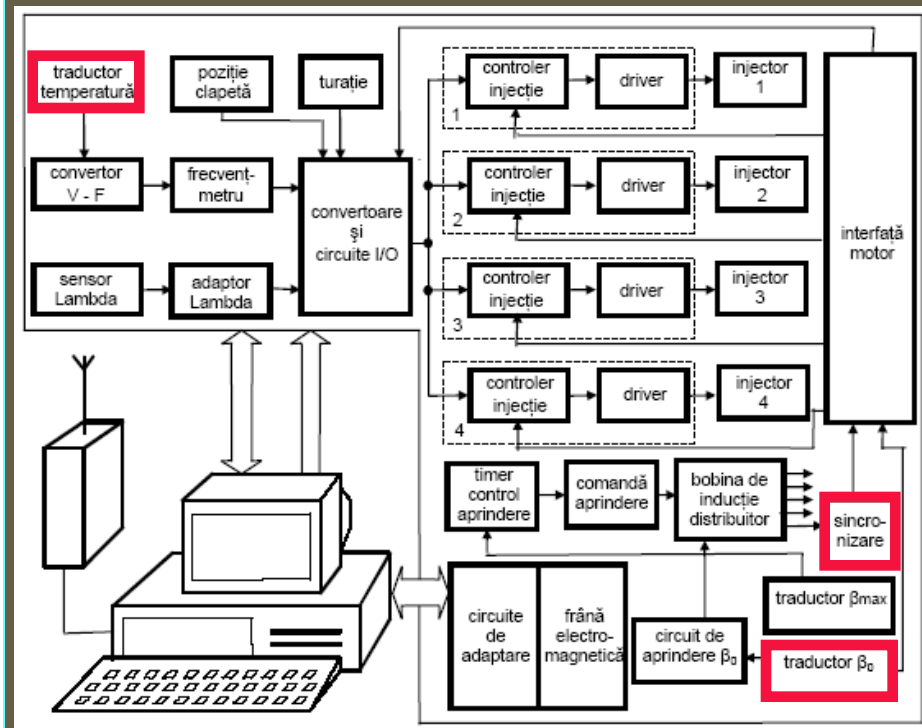


Achiziția datelor primare a fost realizată cu ajutorul traductoarelor specifice, proiectate pentru a da informații asupra unor parametri cum ar fi:



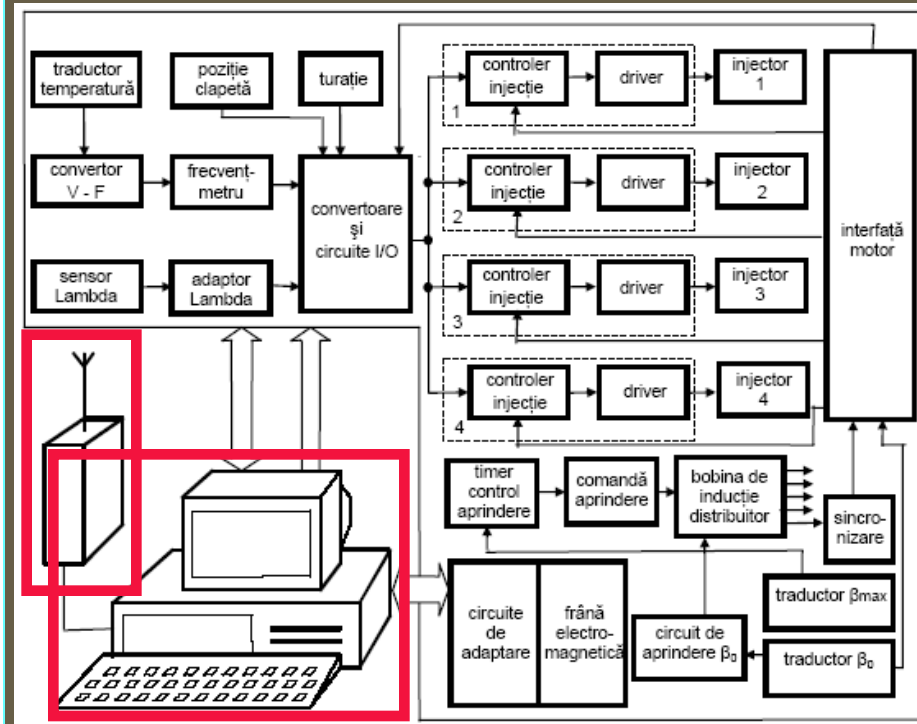
- turația motorului;
- poziția clapetei de accelerație;
- unghiul de avans la aprindere (traductor  $\beta_{max}$ );
- dozajul aer/benzină (sensor Lambda);
- punctul mort interior (traductor  $\beta_0$ );

Achiziția datelor primare a fost realizată cu ajutorul traductoarelor specifice, proiectate pentru a da informații asupra unor parametri cum ar fi:



- fazele de lucru ale motorului;
- temperatură (aer, lichid de răcire, benzină, gaze de evacuare etc.);
- presiune (în galeria de admisie, benzină etc.).

Circulația informațiilor și procesarea locală sunt realizate de un microcalculator prevăzut cu interfețe specifice.



Un nivel mai înalt de achiziție al informațiilor, de la un sistem mobil (cum ar fi automobile în mers în mediu real), este de asemenea posibil, utilizând o interfață de comunicații radio de înaltă frecvență cu calculatorul, aceasta permițând o corecție de finețe a cunoștințelor.

Dezvoltarea acestor interfețe specifice impune de asemenea dezvoltarea de software utilizator:

- programe de achiziție;
- programe de comandă-control;
- programe de supraveghere a parametrilor;
- programe de extragere a regulilor la prelucrarea datelor experimentale.

Utilizând acest sistem, se pot studia diferite tipuri de interacțiuni stimuli-răspuns, obținând ca urmare o bază de cunoștințe de prim nivel.

Aceste date generează un potențial de informații, utilizabil pentru a emite deducții prezivibile despre comportarea ulterioară a sistemului în zonele neexplorate ale lumii înconjurătoare reale în transformare.



Gradul de complexitate a unor astfel de relații este evidențiat în cartogramele caracteristice.

Această complexitate înaltă precum și restricțiile în abordarea analitică a unor astfel de sisteme reale justifică dezvoltarea controlerelor cu învățare de reguli.

Structura-bloc a motorului cu control evoluat pe bază de reguli este prezentată în figura 2.4



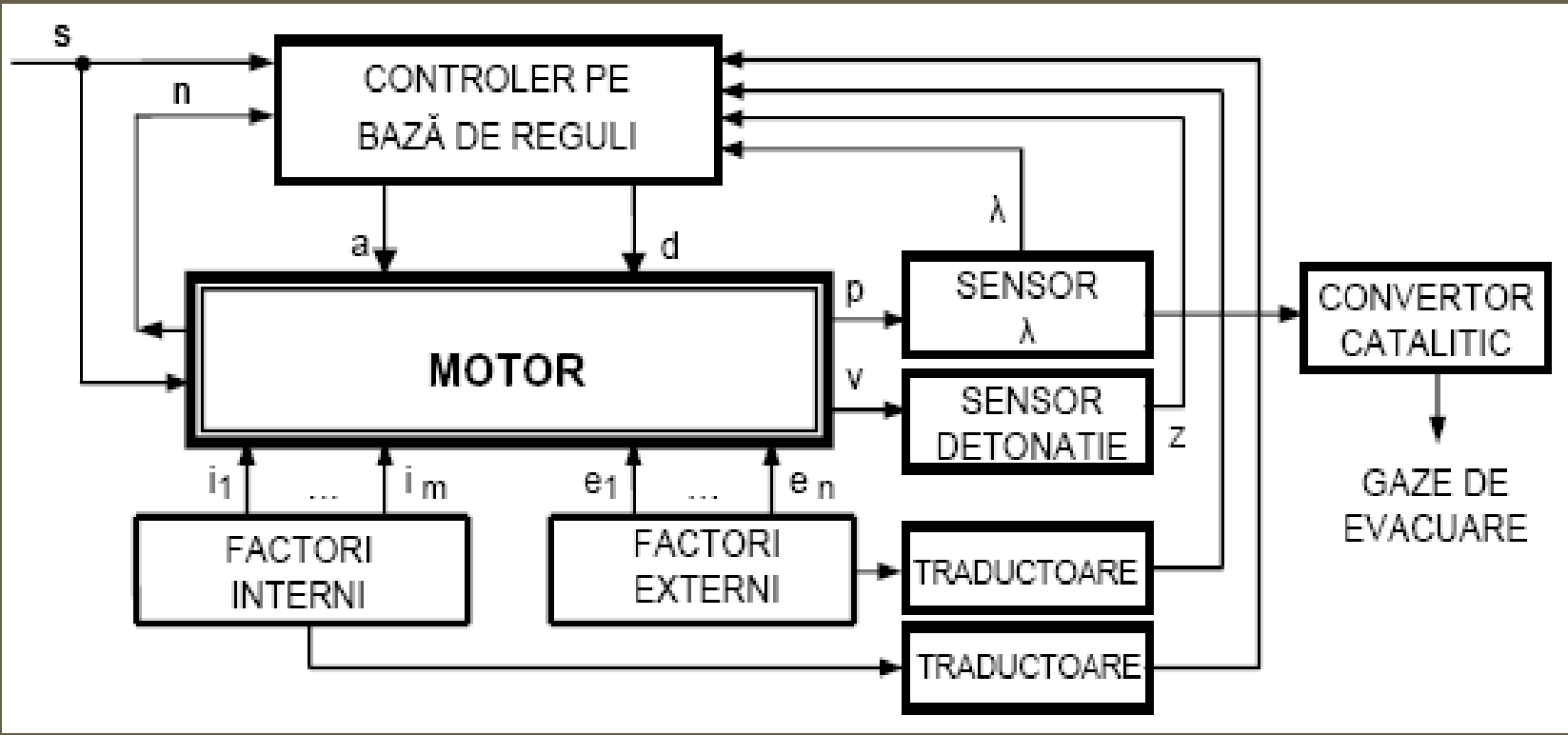
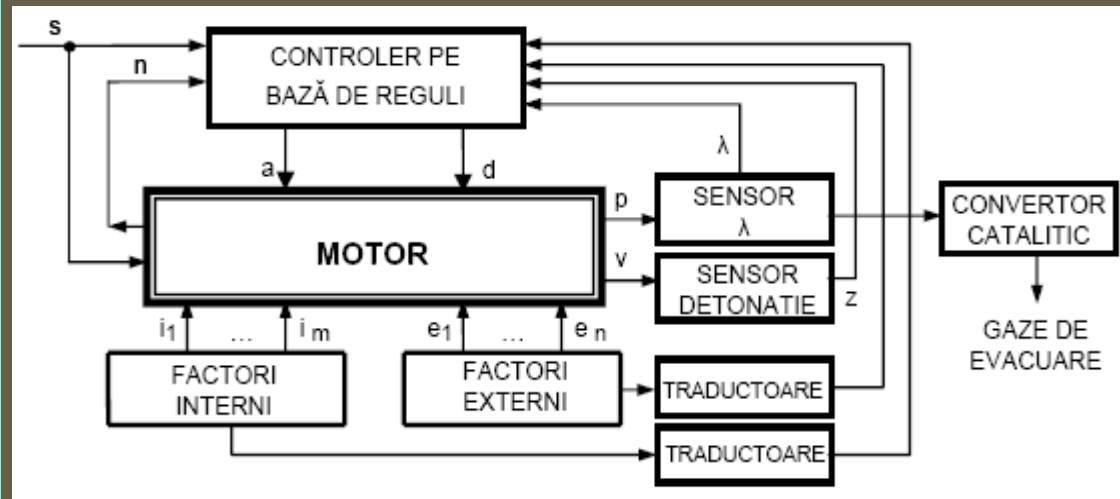
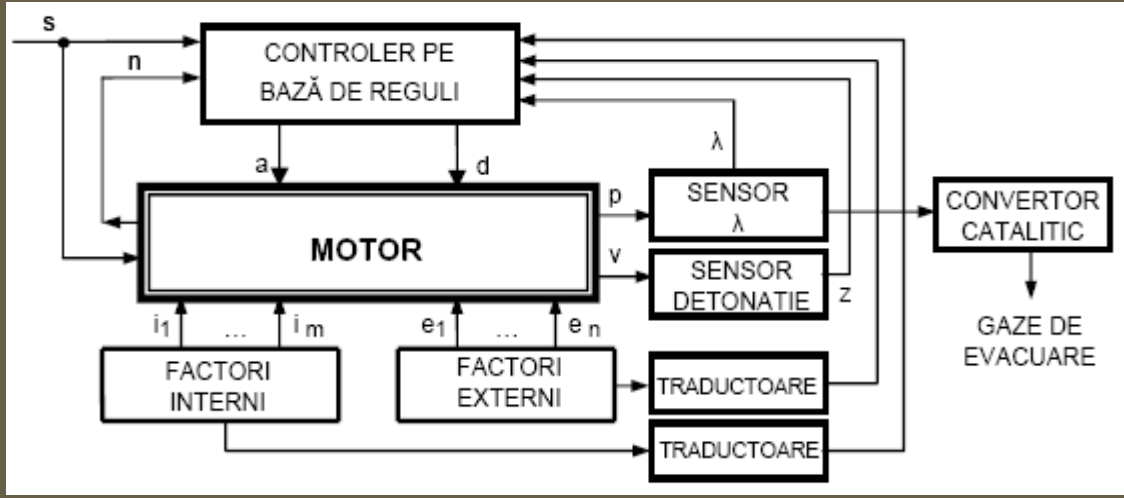


Figura 2.4

Se observă, în principal, înlocuirea grupului - bloc de control - memorie cartograme caracteristice din figura 2.2 - cu un controler pe bază de reguli.  
Informația înmagazinată inițial în memoria acestui controler se referă la o caracteristică tipică a motorului din gama respectivă.  
Informațiile au fost obținute în prealabil pe baza unor probe la un stand de încercări specializat.



Controlerul poate „învăța“ în faza de probe de stand cu atât mai mult cu cât i se oferă mai multe situații de funcționare distincte. Din acest punct de vedere apare ca necesară efectuarea de probe la standul climatic. Oricum, sistemul nu poate fi antrenat pentru toate situațiile posibile în care va fi pus în cazul funcționării reale.





Problemele de optimizare ale controlerelor pentru motoare trebuie privite într-un context mai larg, de dezvoltare a echipamentelor electronice de control pentru automobile. Aceste echipamente devin din ce în ce mai complexe, necesitând tehnologii avansate și concepte noi în materie de testare.



În aceste condiții, este evident că soluția o reprezintă utilizarea a câte unui circuit de control pe fiecare cilindru. Se poate vorbi și de o comportare globală a motorului, fără ca aceasta să fie constituită din simpla însumare a efectelor produse de cilindrii săi.

Din acest mod de abordare a problemei rezultă că se pot extrage anumite reguli de funcționare a motorului, ca rezultat al funcționării cilindrilor, fără a considera modul propriu de reglare a mărimilor de control la fiecare dintre aceștia. Se poate astfel imagina o structură de control pe două niveluri:



- **pe primul nivel:** controlere pe baza de reguli pentru procesele ce au loc la nivelul fiecărui cilindru;
- **pe al doilea nivel (superior):** un controler pe bază de reguli ce coordonează motorul, privit ca un ansamblu de cilindri.

Structura-bloc a unui astfel de sistem de control este ilustrată în figura 2.5.

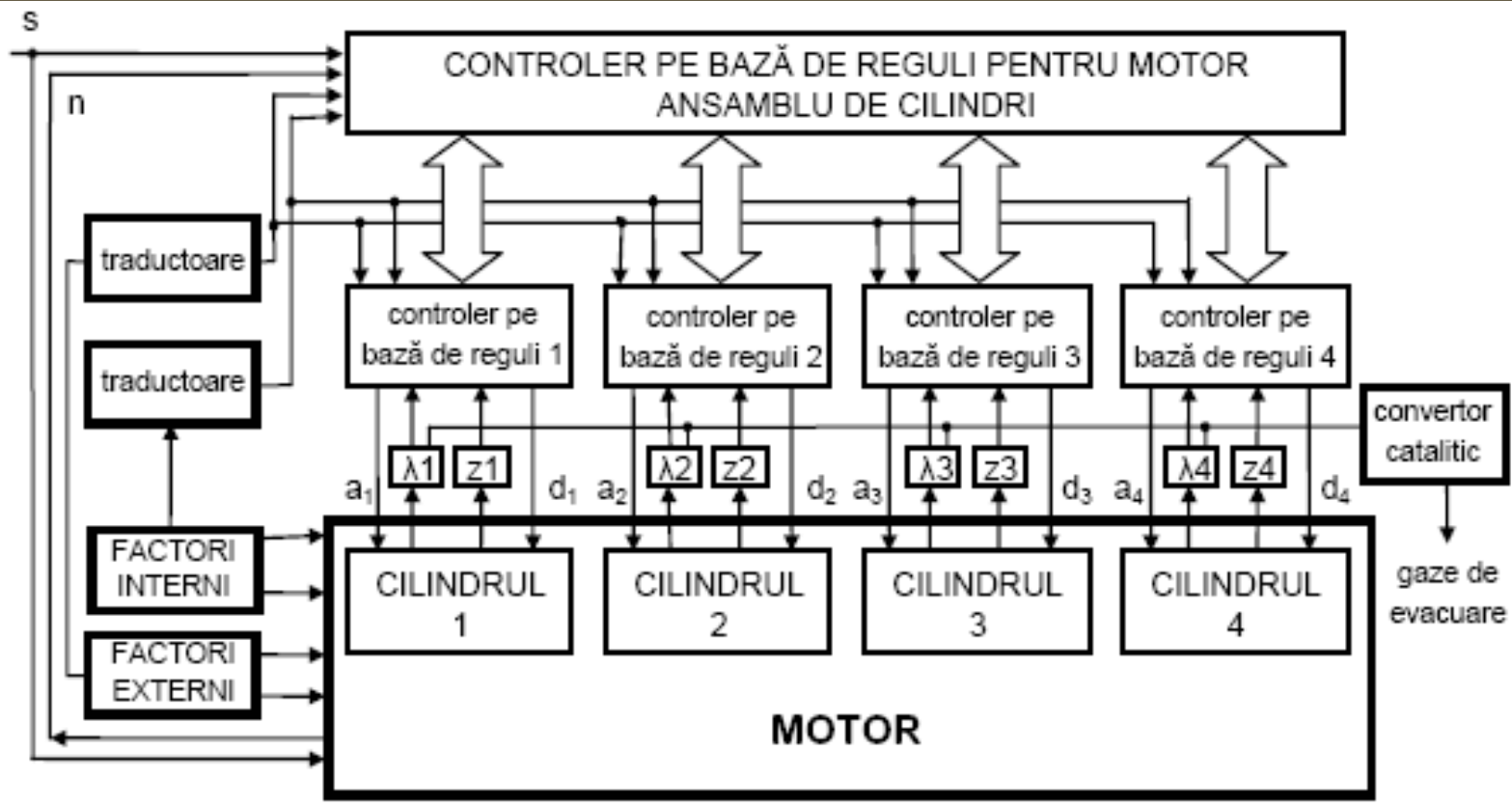
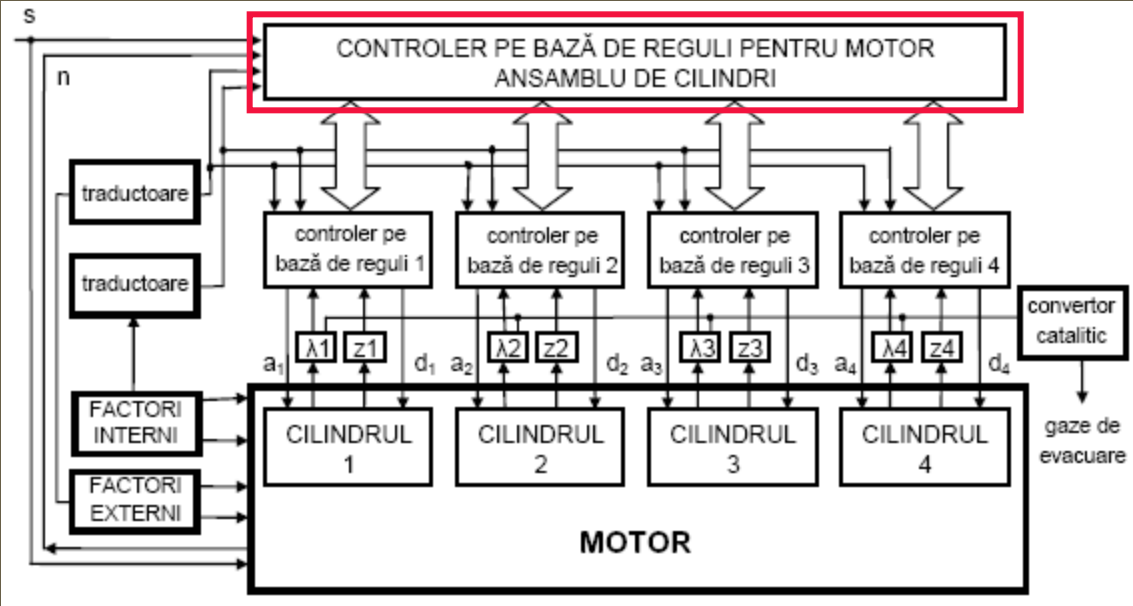
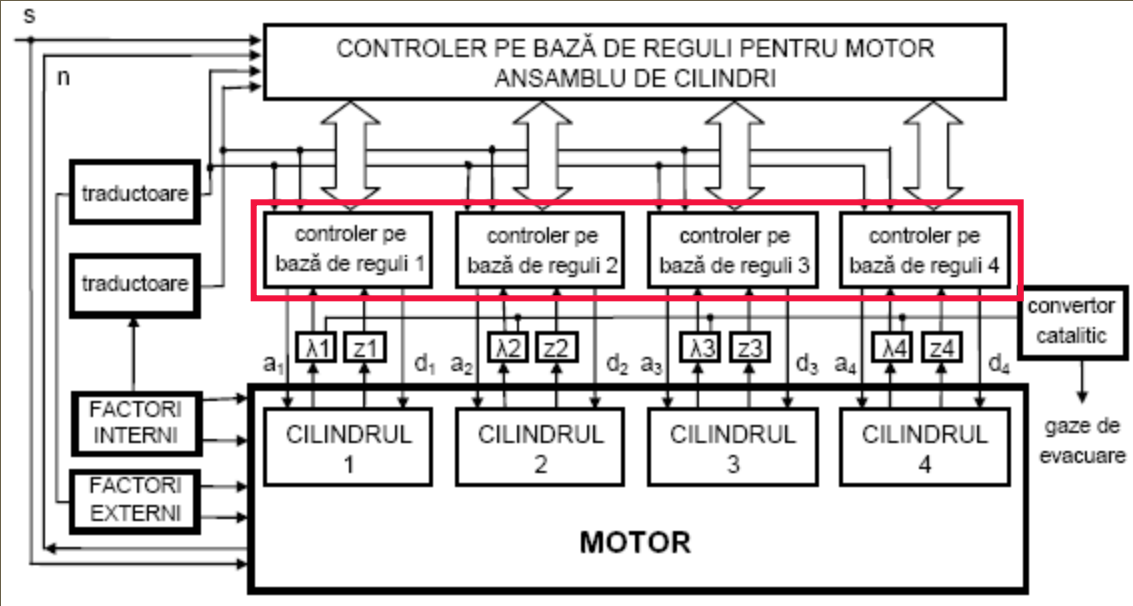


Figura 2.5

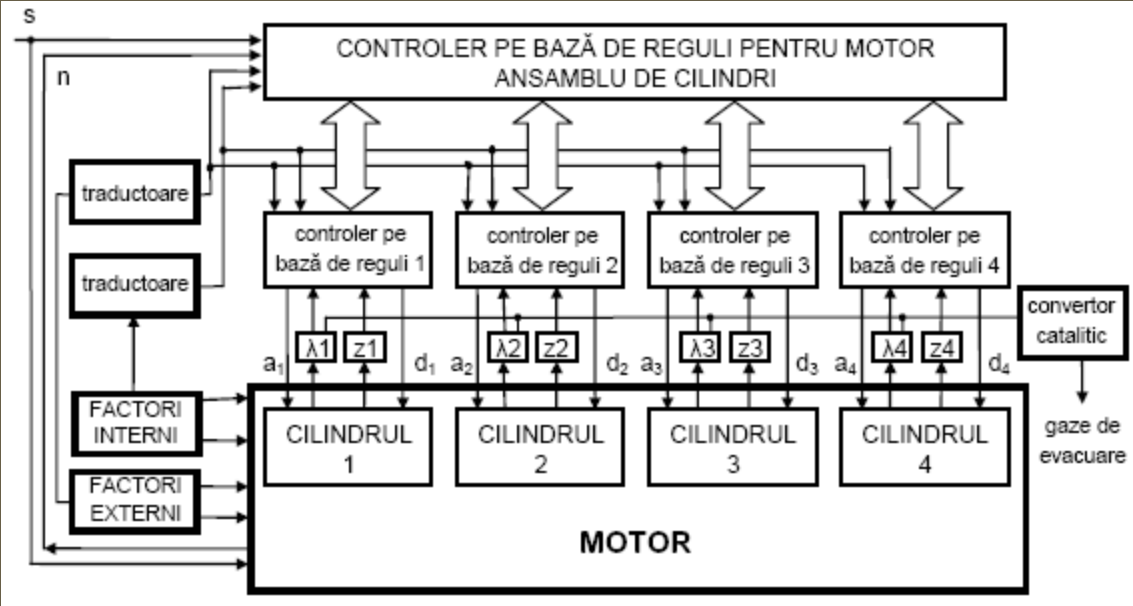
O astfel de structură ar putea asigura o anumită ierarhizare a informațiilor (regulilor). Astfel, regulile cu grad înalt de generalizare se vor implementa pe nivelul al doilea, determinând individualizarea cilindrilor în ansamblul reprezentat de motor.



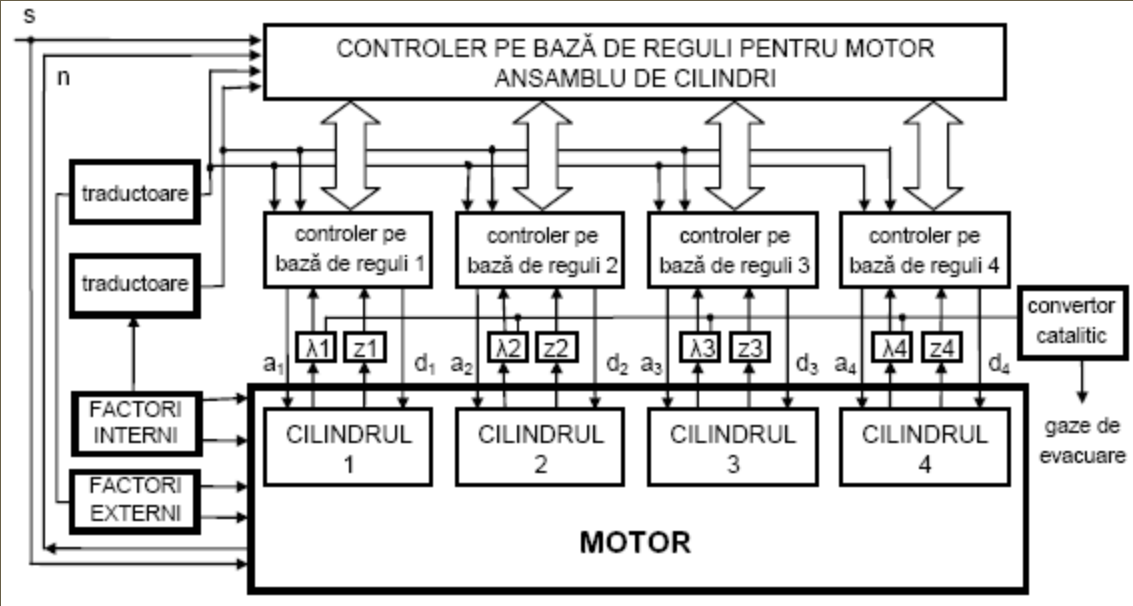
Regulile cu grad înalt de specificitate se vor implementa pe primul nivel, asigurând optimizarea performanțelor fiecărui cilindru în parte.



Se va putea asigura o sporire a vitezei de lucru globale, regulile generale fiind procesate simultan pentru toți cilindrii, eliminând suprapunerile. Timpul astfel disponibilizat poate fi utilizat pentru executarea unor algoritmi specifici mai complecși.



Evident că diagnoza cu un astfel de sistem de control va fi mai precisă, individualizând defectele la nivelul cilindrului.



**PRELEGAREA**    **Structuri evoluat de control**  
**nr. 2**