

CAPITOLUL 3

DETECTAREA ȘI IZOLAREA DEFECTELOR ÎN SISTEMELE DINAMICE

3.1. Introducere

Problema detectării și izolării defectelor este una complexă. Necesitatea obținerii unor performanțe în diagnoză, fără instalarea unor echipamente redundante sau dedicate scumpe, forțează dezvoltarea programelor de diagnoză prin adoptarea de tehnici disponibile și descoperirea de informații “ascunse” în procesul tehnologic, [30]. Realitatea sistemelor industriale oferă inginerului însărcinat cu implementarea funcțiilor de monitorizare, modele slabe, inadecvate, bazate pe lipsa redundanței, număr insuficient de măsuri, distorsiuni în datele achiziționate, perturbații nemodelate.

Un defect se definește ca: “o deviație nepermisă a unei proprietăți caracteristice ce duce la inabilitatea îndeplinirii scopului propus”.

Pentru problema detectării și izolării defectelor în sistemele dinamice au fost propuse mai multe abordări incluzând utilizarea *arborilor de defectare*, (cap.2), filtre Kalman, observatori, tehnici de paritate a spațiului și filtre de detecție, etc.

Toate metodele de detectare a defectelor utilizează date redundante (suplimentare) obținute fie direct, când există două sau mai multe traductoare pentru măsurarea unei variabile a procesului, fie analitic, când o variabilă a unui proces este determinată printr-un model matematic. Aceste relații de redundanță pot fi exploatate pentru a genera semnale reziduale. În condiții normale de funcționare aceste semnale reziduale sunt “mici” dar pot afișa variații distincte la apariția defectului. Procesul de diagnoză a defectului constă în trei etape, [16]:

a) Procesul de modelare (estimarea stării, estimarea parametrilor, teoria deciziei statistice, etc.);

b) Generarea semnalelor reziduale. Acestea sunt independente de măsurătorile reale dar, reflectă efectele modelării incerte, zgomot și defectele componentelor. În absența defectelor și erorilor mari de modelare, semnalele reziduale nu prezintă abateri arătând o anumită corespondență între măsurători și detecția bazată pe modelare;

c) Analiza semnalelor reziduale. Datorită efectelor zgomotului și a modelului incert, semnalele reziduale trebuie examinate cu atenție pentru a permite determinare prezenței unor defecte (detectare) și precizarea componentelor care prezintă defecte (izolare).

3.2. Diagnoza defectelor

Un defect cauzează o *degradare* în comportarea sistemului dar nu conduce neapărat la o cădere totală a instalației. Sistemul poate continua să funcționeze la un nivel mai scăzut, motiv pentru care, căderea se poate produce dacă defectul nu este detectat la timp. Sarcinile unui sistem de monitorizare a defectelor sunt, [11]:

- detectarea defectului: o indicație binară dacă defectul s-a produs sau dacă acesta nu s-a produs;
- izolarea defectului, reprezintă a doua sarcină a diagnozei defectului; aceasta înseamnă detectarea traductorului sau a elementului de execuție care prezintă defect;
- sinteza comenzilor în condiționarea defectului care trebuie să asigure viabilitatea sistemului (posibilă într-o mai mică măsură).

Problema detectării și izolării defectului este prezentată în *figura 3.1*, [66].

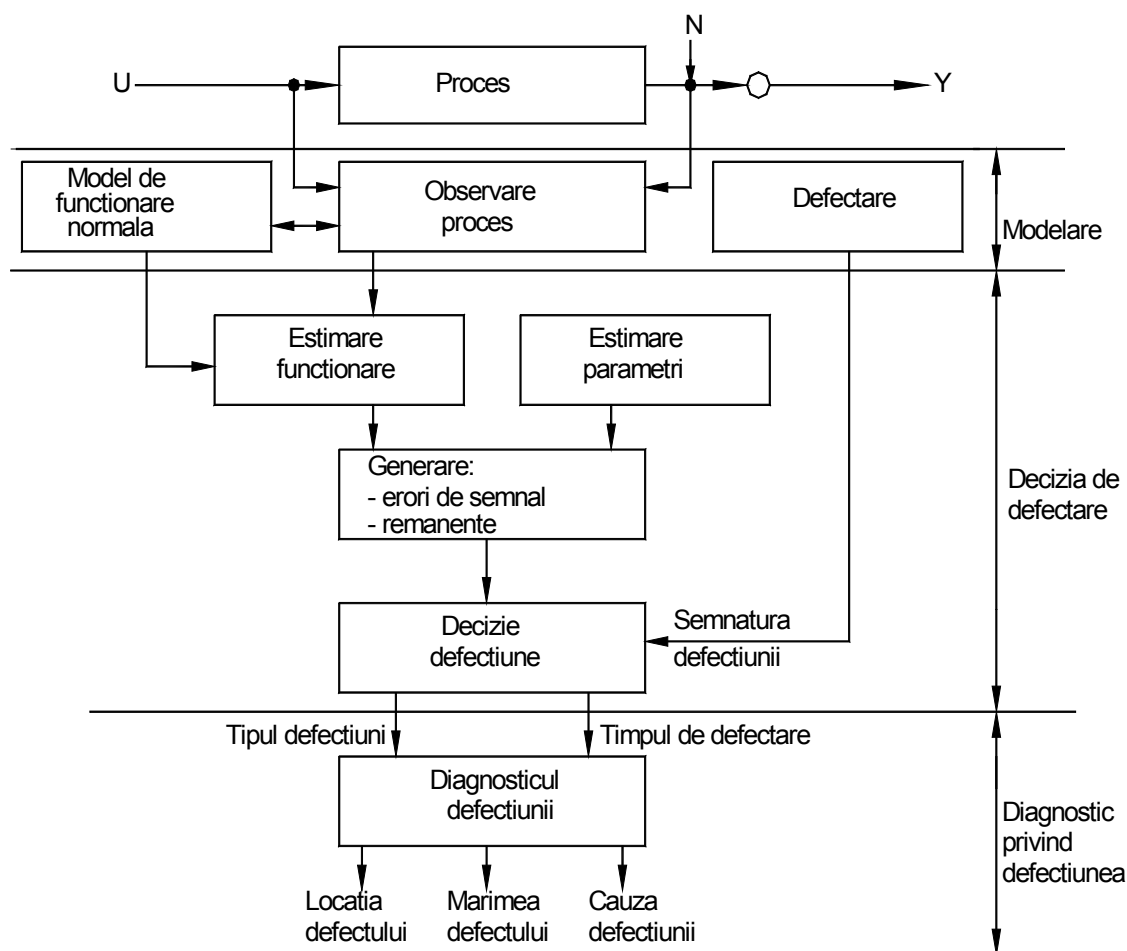


Fig. 3.1. Structura generalizată a modelului bazat pe metodele de detectare și izolare a defectelor

În general, modelul matematic al unui proces are următoarea expresie:

$$Y = f(U, N, \Theta, X) \quad (3.1)$$

unde s-a notat cu:

- Y – variabile de ieșire măsurabile;
- U – variabile de intrare măsurabile;
- Θ – parametri procesului nemăsurabili;
- N – semnale nemăsurabile de perturbații (preluate din proces și din sistemele de achiziție și control);
- X – variabilele stării interne (parțial măsurabile și parțial nemăsurabile).

3.3. Modelarea matematică a unui traductor sau a elementului de execuție defect

În *figura 3.2* este prezentat sistemul generalizat cu toate posibilitățile de defect, [30]. Semnificația variabilelor este următoarea:

- U_c - intrările dorite pentru control;
- U_d - defecte la dispozitivul de acționare;
- U_r - acționarea instalației (intrare reală);
- Y_c - ieșirea actuală a instalației;
- Y_d - defectele senzorului;
- Y_r - ieșirea măsurată a instalației.

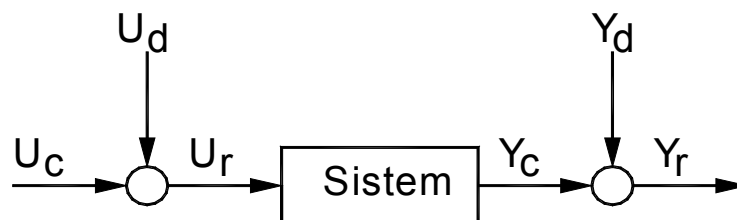


Fig. 3.2. Modelul analitic al traductoarelor și elementelor de execuție defecte

Considerăm două clase de defecte: defecte independente ale senzorilor și defecte independente ale dispozitivelor de acționare.

Este posibilă modelarea defectelor la dispozitivele de acționare sau la senzori ca semnale adiționale, așa cum indică *figura 3.2*. Se presupune că $U_c(t)$ este intrarea corectă (dorită) a instalației și $U_r(t)$ este intrarea reală (actuală) a

instalației, modificată de semnalul de eroare $U_d(t)$. Printr-o selecție corectă a semnalelor $U_{d_i}(t)$ putem reprezenta diferite defecte pentru dispozitivul de acționare "i". În particular, dacă acesta se blochează în poziția inițială neproducând nici o ieșire, atunci $U_{d_i}(t) = -U_{c_i}(t)$. Dacă apare o abatere b_i pentru dispozitivul de acționare respectiv, din diferite motive, atunci $U_{d_i}(t) = b_i$. În final dacă dispozitivul de acționare "i" este blocat la o valoare constantă b_i , atunci $U_{d_i}(t) = b_i - U_{c_i}(t)$. Defectele multiple pot fi modelate specificând faptul că, mai multe elemente ale lui $U_d(t)$ trebuie să fie diferite de zero.

Defectele senzorilor pot fi reprezentate într-o manieră asemănătoare pe baza unei alegeri corespunzătoare a semnalelor $Y_{d_i}(t)$. Variabilele $U_c(t)$ și $Y_r(t)$ reprezintă semnalele externe disponibile pentru diagnoza defectelor, iar $U_r(t)$ și $Y_c(t)$ sunt semnale interne sau inaccesibile.

3.4. Metode analitice pentru detecția și localizarea defectelor

3.4.1. Detecția și localizarea defectelor utilizând analiza sensibilității inverse

Din practica inginerescă este bine știut că, un sistem dinamic nu răspunde la fel la toți stimuli exteriori (mărimi de comandă sau perturbații). Se spune că sistemul este mai sensibil la comanda u_i sau la perturbația ξ_j . În mod similar, modificarea unuia sau a mai multor parametri din structura internă, face ca starea și ieșirea sistemului să se abată de la traiectoria neperturbată, sistemul fiind mai sensibil la unele modificări față de altele. Toate aceste observații au condus la necesitatea analizei sensibilității sistemului care cuprinde următoarele aspecte:

- analiza sensibilității directe – *ASD*;
- analiza sensibilității inverse – *ASI*.

În cazul *ASD* se urmărește determinarea influențelor pe care le au variațiile stării inițiale ale parametrilor și ale comenzilor, asupra evoluției în timp a stării și ieșirii sistemului.

În cazul *ASI* se pornește de la măsurarea abaterilor traiectoriilor stării și ieșirii sistemului perturbat față de traiectoriile ideale generate de un model al sistemului neperturbat și se caută determinarea cauzelor care au condus la aceste abateri, realizându-se o *diagnosticare tehnică*.

3.4.2. Detecția și localizarea defectelor utilizând metoda filtrelor multiple

Metodele de *detectare a defectelor* bazate pe compararea ipotezelor multiple se bazează pe utilizarea filtrelor multiple cu funcții corespunzătoare.

Alocând ipoteza H_0 pentru funcționarea normală (fără defect) și H_i , $i=1...n$, pentru diferite moduri de defecte, prin analiza cu ajutorul calculatorului și utilizând semnalele reziduale pentru fiecare filtru, sunt generate funcțiile corespunzătoare

(probabilitățile de defect) pentru H_i , acestea oferind o indicație asupra defectului. Uneori, poate fi utilizat modul de alcătuire a fiecărui filtru și poate fi aleasă ipoteza cea mai plauzibilă ca mod de defect. Principalul dezavantaj al metodei constă în numărul mare de modele utilizate.

3.4.3. Expertizarea stării sistemului

Pentru a realiza o *expertizare de stare* corectă, se pornește de la modelul matematic, [66]:

$$x_{k+1} = A_k + B_d u_k \quad (3.2)$$

$$y_k = C_d x_k \quad (3.3)$$

Fie x_k vectorul de stare real, în timp ce \hat{x}_k reprezintă vectorul stării estimate. Relația cunoscută, ce descrie dinamica estimatorului de stare este:

$$x_{k+1} = A_d \cdot \hat{x}_k + B_d u_k + L \left(y_k - C_d \cdot \hat{x}_k \right) \quad (3.4)$$

Alegerea matricii câștig L se face astfel încât $(A_d - LC_d)$ să fie stabilă.

3.5. Analiza sistemelor cu elemente de execuție defecte

Pentru a analiza comportamentul unui sistem, atunci când unul sau mai multe elemente de execuție sunt blocate, vom considera următoarea relație :

$$\theta_{ir} = (1 - k_i) \theta_i + k_i \theta_{i0} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.5)$$

în care:

- $k_i=0$ pentru starea în care elementul de execuție este în funcțiune;
- $k_i=1$ în condiții de defect și elementul de execuție este blocat în poziția $(\theta_{i0}; \theta_{ir})$, având semnificația unei comenzi reale a elementului de execuție i .

Pentru cazul în care $k_i=1$ putem simula un element de execuție care nu funcționează și rămâne blocat, θ_{i0} . În concluzie, apariția unui defect este echivalentă cu o modificare a structurii ecuației de stare pentru elementele de execuție. Vectorul de comandă are expresia :

$$E_r = \begin{bmatrix} \theta_{1r} \\ \theta_{2r} \\ \theta_{3r} \end{bmatrix} = (I - K_D) \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} + K_D \begin{bmatrix} \theta_{10} \\ \theta_{20} \\ \theta_{30} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

în care:

$$K_D = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

este numită matrice de defect . Când $K_D=0$ sistemul nu are nici un defect.

Vectorul $[\Theta_0]^T = [\theta_{10} \ \theta_{20} \ \theta_{30}]$ reprezintă poziția de blocaj a elementului de execuție. Ca urmare, putem studia comportamentul în condiții de defect fixând matricea de defect. Polinomul caracteristic al sistemului este:

$$L(s) = \det(sI - A_s)^{-1} \det[I - (sI - A_s)^{-1} A_D] \quad (3.8)$$

și, dacă presupunem că sistemul fără defect este stabil , nu ne rămâne decât să analizăm condițiile în care soluțiile ecuației sunt în semiplanul stâng al planului complex:

$$\det[I - (sI - A_s)^{-1} A_D] = 0 \quad (3.9)$$

3.6. Sinteza comenzilor în cazul defectării elementelor de execuție

Dacă sistemul de control este proiectat folosind un controlor dinamic sau static, atunci putem asigura controlabilitatea în cazul defectării unui element de execuție, dacă acesta nu este interferat în structura sistemului de control. Mai mult, acțiunea controlerului asupra canalului defect (care caută să împiedice apariția unei erori) perturbă puternic celelalte canale pentru că acele ieșiri vor tinde repede spre valoarea minimă sau maximă.

Pentru a descrie simplu (matematic) un sistem defect avem următoarele ecuații:

$$\overset{o}{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p (1 - K_D) K_C u_r(t) + B_p K_D u_0 \quad (3.10)$$

$$y(t) = C_p x_p(t); \quad u_r(t) = f[v(t) - y(t)] \quad (3.11)$$

unde: $K_D = \text{diag}[k_i]$ cu $k_i=0$ pentru funcționare normală și $k_j=1$ pentru defectarea elementului de execuție pe canalul j . Trebuie rezolvată problema determinării coeficienților matricii K_C , astfel încât procesul să poată fi menținut în starea dorită. În acest caz, produsul $(I - K_D) K_C$ are linia j cu toate elementele zero, unde $(I - K_D) = \text{diag}[a_{ij}]$ cu $a_{ij} = 1$ și $a_{ij} = 0$, celelalte elemente a_{ik} fiind zero. Pentru că este folosită cu variabile standard, starea statică prognozată va corespunde la $x_s=0$, $u_{rs}=0$, $y_s=0$. Se folosește indicele “d” pentru valorile variabilelor statice în condiții de defect. În aceste condiții, ecuațiile (3.10-3.11) devin:

$$A_p x_p(t) + B_p (1 - K_D) K_C u_r(t) + B_p K_D u_0 = 0 \quad (3.12)$$

$$y_d = C_p A_p^{-1} [B_p (I - K_D) K_C u_{rd} + K_D u_0] \quad (3.13)$$

Sinteza comenzii este considerată rezolvată dacă matricea K_C și/sau vectorul de comandă u_{rd} sunt determinați pentru o matrice K_D și vectorul u_0 .

3.7. Sistemul de mentenanță după necesitate, pe baza de diagnostic

În scopul realizării unui nivel înalt de fiabilitate și a unei disponibilități optime a produselor realizate, se apreciază că există două sisteme de mentenanță: preventivă și corectivă. *Mentenanța preventivă* este clasificată în trei categorii: sistematică, condițională și previzionară, iar cea *corectivă* în două categorii: curativă și paliativă, [29]. Mentenanța după necesitate face parte din mentenanța corectivă; ea se mai numește și mentenanța paliativă și constă din activități de mentenanță corectivă destinate a permite unui mijloc de producție îndeplinirea integrală sau parțială a funcțiilor sale. Așadar, această categorie de mentenanță trebuie continuată cu lucrări de mentenanță curativă.

Din practica exploatării mașinilor complexe a reieșit faptul că, se impune alegerea unui sistem mixt de mentenanță care să conțină atât lucrări (operațiuni) de mentenanță preventivă cât și corectivă.

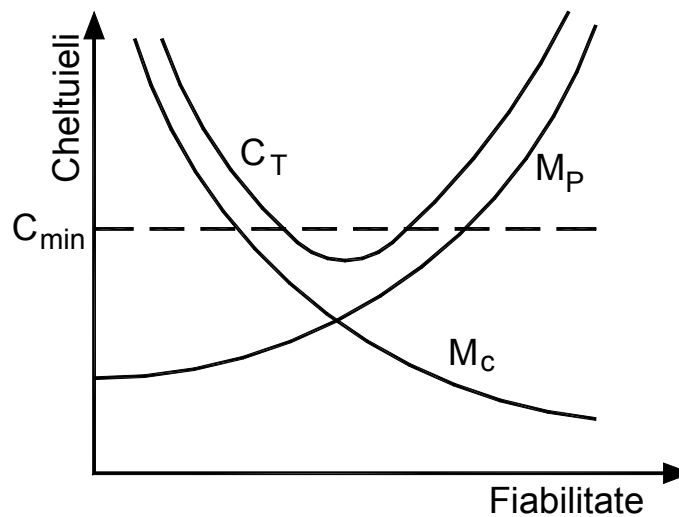


Fig. 3.3 Cheltuieli totale (C_T) de mentenanță

Acest nou sistem a rezultat din necesitatea reducerii cheltuielilor totale de mentenanță (C_T) spre costurile minime (C_{min}) dar cu menținerea unui *nivel de fiabilitate* acceptabil, *figura 3.3*.

Conform graficului din *figura 3.3*, cu cât volumul lucrărilor de mentenanță preventivă (M_P) și cheltuielile aferente sunt mai mari, cu atât crește nivelul fiabilității și disponibilității produselor tehnice. Totuși, oricât ar crește cheltuielile pentru mentenanța preventivă (M_P), nu se va ajunge niciodată la valoarea de 100% a funcției de fiabilitate $R(t)$. Se poate observa că, pentru un asemenea nivel de fiabilitate cheltuielile tind în mod asimptotic spre ∞ .

Așadar, nu este rațional să se exagereze cu aplicarea unui volum prea mare de lucrări de mentenanță preventivă în detrimentul mentenanței corective (M_C).

Din aceeași figură rezultă că, pe măsură ce scad cheltuielile pentru mentenanța preventivă, cresc cele destinate mentenanței corective. Dacă se adună costurile corespunzătoare celor două categorii de mentenanță rezultă curba cheltuielilor totale (C_T) de mentenanță. O politică rațională în acest domeniu ne obligă să reducem cheltuielile totale de mentenanță. Din graficul prezentat rezultă că, dacă se micșorează cheltuielile totale de mentenanță și în primul rând cele corespunzătoare mentenanței preventive, fiabilitatea produselor scade în mod continuu. Ca urmare, este normal să se accepte o reducere a valorilor indicatorilor de fiabilitate până când se ajunge la cheltuielile minime (C_{min}) de mentenanță. În continuare, nu mai este rațională reducerea cheltuielilor de mentenanță preventivă deoarece, în acest caz, ar începe să crească cheltuielile pentru mentenanța corectivă și, implicit, cheltuielile totale de mentenanță. În același timp, ar continua să scadă fiabilitatea produselor tehnice, așa cum relevă graficele din *figura 3.3*, [29].

Cheltuielile de mentenanță corectivă și preventivă, precum și cheltuielile totale pe întreg ciclul de viață a produsului, trebuie urmărite și precizate încă din primele faze de cercetare – proiectare pentru a se ajunge la cheltuieli minime.

Revenind la aplicarea sistemului de mentenanță după necesitate, pe baza de diagnostic, trebuie să precizăm faptul că, din experiența diagnosticării tehnice s-a constatat inexistența unei metode de *evaluare și predicție* a timpului probabil de funcționare fără defectarea unui produs, bazată pe analiza rezultatelor diagnosticării acestuia. Aceasta disfuncție în determinarea perioadei până la apariția primei defecțiuni se datorează faptului că, metoda de prezicere se bazează pe ipoteza absenței defectelor instalate, iar după instalarea acestora, pe ipoteza existenței datelor statistice a mediei timpilor de bună funcționare pentru fiecare defect în parte și pentru fiecare subansamblu din compunerea structurilor respective. Stabilirea cu precizie a perioadei optime de diagnosticare reprezintă o problemă ce trebuie rezolvată. S-a încercat determinarea valorilor admisibile și limită ale parametrilor de diagnosticare și ale celor de funcționare a diferitelor ansambluri de produse pe baza anumitor criterii (tehnic, tehnologic sau funcțional, economic, al siguranței în funcționare, etc.). Toate aceste criterii ridică anumite probleme. Astfel, criteriul tehnic presupune determinarea valorilor limită ale parametrilor menționați, bazându-se pe date statistice și pe măsurarea efectivă a unui anumit parametru. Ca urmare, dificultatea determinării perioadei optime de diagnosticare și a timpului probabil la care se va produce defecțiunea se explică prin faptul că este dificil de creat o bază de date despre tipul, pericolozitatea și intensitatea tuturor defectărilor la toate piesele și componentele ce fac parte dintr-un ansamblu.