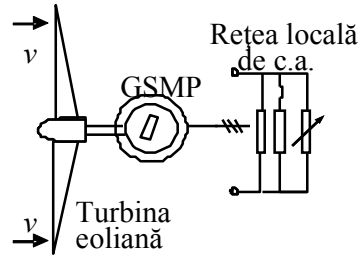


## Curs 5

### Ilustrarea procedurii de modelare,

Fie sistemul eolian din figură



Ecuatiile modelului matematic sunt formate din ecuația GSMP, în care intră și expresia cuplului eolian  $M_e$ .

$$\begin{cases} (L_d + L_{sa}) \frac{di_d}{dt} = -(R_S + R_{sa}) i_d + p(L_q - L_{sa}) i_q \Omega \\ (L_q + L_{sa}) \frac{di_q}{dt} = -(R_S + R_{sa}) i_q - p(L_d - L_{sa}) i_d \Omega + p\Phi_m \Omega \\ J \frac{d\Omega}{dt} = M_e - p[(L_d - L_q) i_d i_q - \Phi_m i_q] \end{cases}$$

Mărimile exogene sunt: viteza vântului  $v$  și rezistența de sarcină a rețelei locale,  $R_{sa}$ .

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \\ R_{sa}(t) \end{bmatrix}$$

Modelul de stare se poate pune sub forma generală de system neliniar:

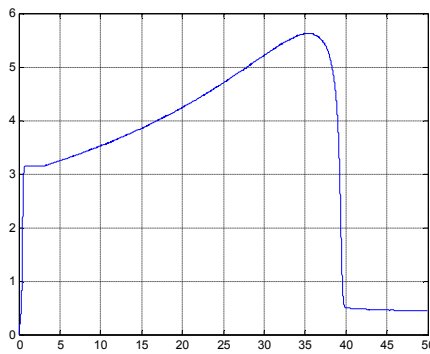
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} (-R_S x_1 + pL_q x_2 x_3) \\ \frac{1}{L_q} (-R_S x_2 - pL_d x_1 x_3 + p\Phi_m x_3) \\ -\frac{1}{J} p [\Phi_m x_2 - (L_d - L_q) x_1 x_2] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(1/L_d) x_1 \\ -(1/L_q) x_2 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot R_{sa} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/J \end{bmatrix} \cdot 0.5\pi \rho v^2 R^3 \cdot C_M(Rx_3/v) \end{aligned}$$

**Obiectivele urmărite** sunt:

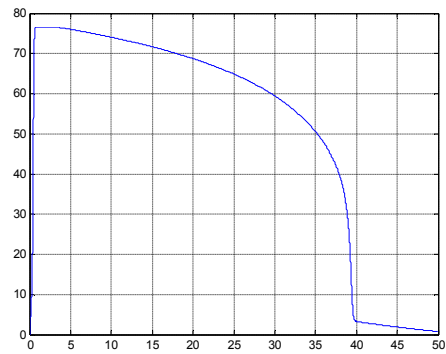
1. Analiza sistemului prin simulare numerică,
2. Liniarizarea modelului într-un punct de funcționare dat. SSe va alege un punct de funcționare în care puterea debitată de sursa eoliană, pentru o viteză dată a vântului, este maximă (punct de funcționare în regiunea caracteristicii regimurilor optime; de regulă, se impune ca turbine să funcționeze în regiunea caracteristicilor optime);
3. Amaliza modală, în scopul obținerii unui model simplificat

Pe baza modelului prezentat, se întocmește schema de simulare numerică, dată în cele ce urmează.

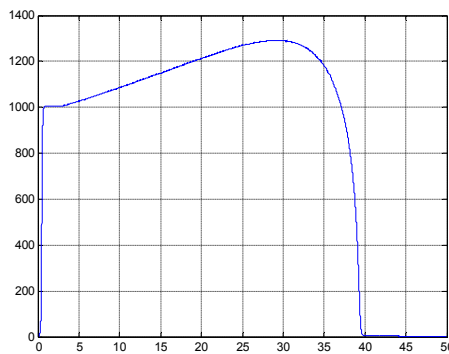




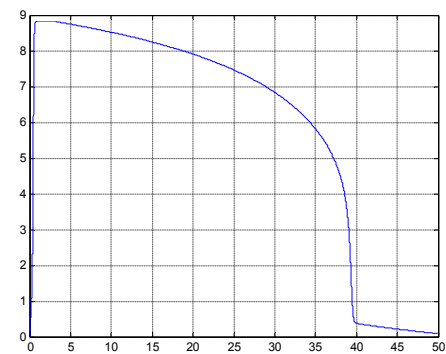
Curentul  $i_q$



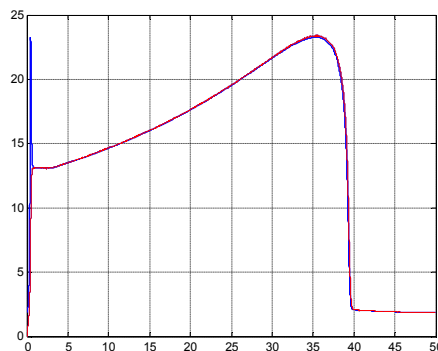
Viteza unghiulară



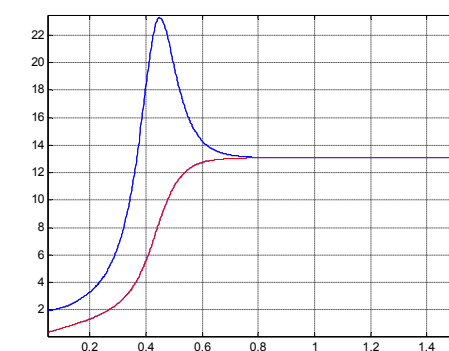
Puterea electromecanică



Viteza specifică



Cuplul eolian și cuplul electromagnetic



Cuplul eolian și cuplul electromagnetic (detaliu)

S-a considerat că cele două variabile de intrare au valorile:

- $v = 10$  m/s (viteza vântului)
- rezistența de sarcină  $R_s$  variază de la 100 ohmi spre zero.

Scopul este de a obține un punct de funcționare optimal, la care puterea debitată de sursa eoliană este maximă.

Din graficele obținute, date mai sus, se constată că puterea maximă se obține la  $t = 30$  s, când viteza specifică este  $\lambda = 7$ . În acel moment, vectorul de stare este :  $i_d = 0.33$  A,  $i_q = 5.2$  A,  $\omega = 59.8$  rad/s. Mărimile de intrare aferente punctului optimal sunt  $R_s = 46 \Omega$  și  $v = 10$  m/s.

În continuare, se impun în schema de simulare valorile punctului de funcționare în care vrem să facem liniarizarea modelului și, apoi, face o verificare a faptului că punctual de funcționare a fost bine ales. Se rulează programul de simulare în punctul de funcționare impus și se verifică faptul că mărimile din sistem sunt practice constante.

Pentru apelarea funcției *linmod* din Matlab, schema Simulink se completează cu conectoare de intrare, la variabilele  $R_s$  și  $v$  – inițializate conform punctului de funcționare impus, și conectoare de ieșire, la variabilele de stare – inițializate conform punctului de funcționare impus – dar și la alte variabile, considerate ca fiind de ieșire. În cele ce urmează s-a considerat că variabilele de ieșire sunt cele de stare plus puterea electrică debitată.

### Liniarizarea modelului și analiza modală

Apelarea funcției *linmod* se face astfel (GSMP este denumirea fișierului programului Simulink):

`[A,B,C,D]=linmod('model_GSMP')`

Se obțin parametrii A,B,C și D ai modelului de stare liniarizat:

A =

```
1.0e+003 *
-7.5079    0.4768    0.0416
-0.4768   -7.5079    0.6577
     0     -0.0990   -0.0077
```

C =

```
1.0000    0    0
     0    1.0000    0
     0     0    1.0000
     0   247.9360   21.6320
```

B =

```
-52.3810    0
-825.3968    0
     0   149.0376
```

D =

```
0  0
0  0
0  0
0  0
```

Cu parametrii obținuți, se formează modelul de stare liniarizat al agregatului eolian, utilizând funcția matlab *ss*:

`sys=ss(A,B,C,D)`

A =

```
      x1    x2    x3
x1 -7508   476.8   41.6
x2 -476.8  -7508   657.7
x3    0   -99.05  -7.732
```

C =

```
      x1    x2    x3
y1    1     0     0
y2    0     1     0
y3    0     0     1
y4    0   247.9   21.63
```

B =

```
      u1    u2
x1 -52.38     0
x2 -825.4     0
x3    0   149
```

D =

```
      u1 u2
y1  0  0
y2  0  0
y3  0  0
y4  0  0
```

Se convertește modelul de stare obținut într-un model de tip matrice de transfer, în care fiecare element este o funcție de transfer definită prin poli și zerouri. Se utilizează funcția Matlab *zpk*:

**sys1=zpk(sys)**

Zero/pole/gain from input 1 to output...  
-52.381 (s+1.502e004) (s+7.746)

#1: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

-825.3968 (s+7478) (s+7.732)  
#2: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

81753.5903 (s+7478)  
#3: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

-204645.5873 (s+7478) (s-0.9101)  
#4: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

Zero/pole/gain from input 2 to output...  
6199.9657 (s+1.505e004)

#1: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

98018.6943 (s+7478)  
#2: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

149.0376 (s^2 + 1.502e004s + 5.66e007)  
#3: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

3223.9822 (s+1.505e004) (s+7508)  
#4: -----  
(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)

S-au obținut cele 8 funcții de transfer solicitate. Din acestea, sunt de interes cele care au ca mărimi de ieșire viteza unghiulară la arbore și puterea electrică debitată (intrările sunt  $R_s$  și  $v$ )

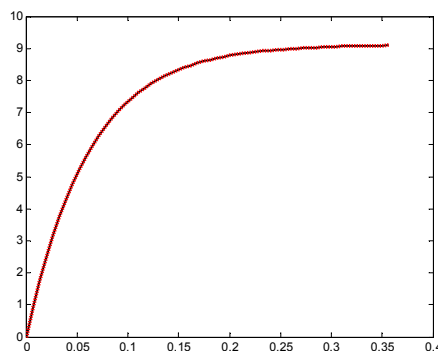
Se observă că la funcția de transfer  $H_{v\Omega}(s)$ , există un factor de tip trinom, practic identic, la numărător și numitor. Subsistemul respective este practice necontrolabil și neobservabil. Funcția de transfer respectivă se poate pune sub forma:

$$\frac{149.0376(5.66e007)}{(s+16.36)(5.653e007)}$$

sau

$$\frac{149.222}{(s+16.36)}$$

Răspunsurile la treaptă ale sistemelor de ordinal 3 și de ordinal 1 sunt practice identice



Vom analiza acum funcția de transfer  $H_{vp}(s)$ , sub forma zpk

$$\frac{3223.9822 (s+1.505e004) (s+7508)}{(s+16.36) (s^2 + 1.501e004s + 5.653e007)}$$

Dacă o punem sub forma tf (raport de polinoame), avem:

**sys2=tf(sys1)**

Se obține

$$\frac{3224 s^2 + 7.273e007 s + 3.643e011}{s^3 + 1.503e004 s^2 + 5.678e007 s + 9.248e008}$$

Deci, rezultă un sistem de ordinul 3. Din forma zpk se observă că sistemul are un pol dominant,

doi poli complecși conjugați ne semnificativi și două zerouri ne semnificative. Atributul “ne semnificativ” înseamnă foarte depărtat de axa imaginară, în raport cu polul dominant.

Eliminarea polilor și zerourilor ne semnificativi se face înlocuind  $s$  cu 0 în factorii respective. Se obține

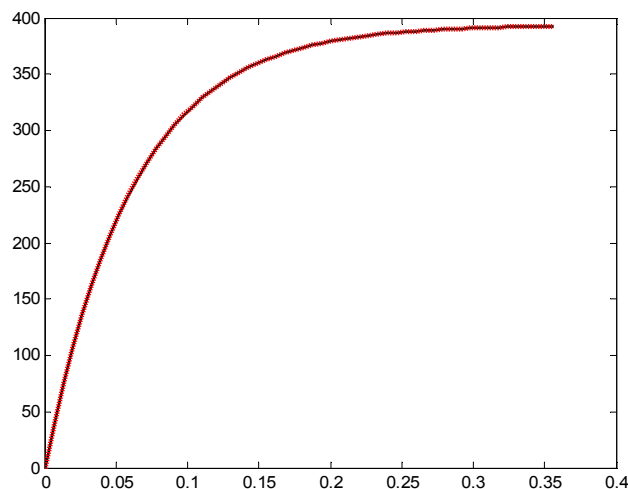
$$\frac{3223.9822 (1.505e004)(7508)}{(s+16.36) (5.653e007)}$$

sau

**6444**

**$s + 16.36$**

Răspunsurile la semnal treaptă ale sistemului de ordinul 3 și de ordinul 1 sunt date în figură



## Metodologia simulării numerice a sistemelor

În ultimul timp, analiza sistemelor prin simulare numerică se face aproape în exclusivitate prin utilizarea instrumentelor software de simulare. Există deja o mare varietate de astfel de instrumente software:

Matlab/SIMULINK;

ARCHER și ENDPORT – pentru modele obținute prin tehnici Bond Graph;

SABER – pentru procese hibride (mecanice-electrice-hidraulice-etc)

SimPowerSystem – pentru electronică de putere și acționări electrice;

Spice – pentru circuite electronice;

EMPT – pentru rețele electroenergetice

Signal Processing Blockset – pentru procesarea de semnale;

Video and Image Processing Blockset – prelucrarea imaginilor;

Virtual Reality Toolbox – realitate virtuală etc.

În ciuda calității remarcabile a instrumentelor moderne de simulare, utilizarea acestor instrumente nu asigură, **uneori**, suficiente **garanții privind acuratețea rezultatelor**. O cauză plauzibilă a acestui fapt este faptul că la crearea acestor instrumente se acordă o atenție primordială aspectelor de **interfațare convivială cu utilizatorul** (esențiale din punct de vedere comercial), în detrimentul aspectelor de natură sistemică privitoare la corectitudinea și eficiența metodelor numerice utilizate (exemplu privind procedurile numerice din Matlab).

**Principala dificultate în simularea sistemelor dinamice constă în asigurarea principiului cauzalității.** Adesea, cerința privind ordonarea ecuațiilor modelului matematic, astfel încât în partea dreaptă a oricărei ecuații trebuie să intervină numai:

- variabile de stare,
- variabile de intrare,
- **variabile intermediare definite printr-o relație anterioară.**

nu este respectată. Atunci când simularea se face printr-un program **.m**, de integrare a ecuațiilor

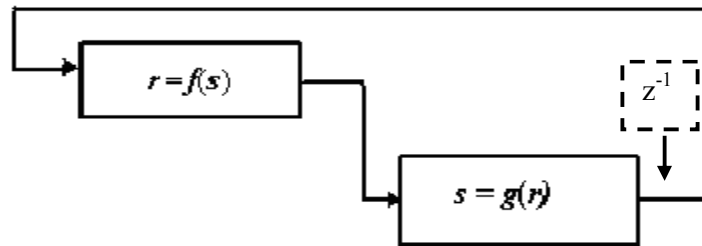
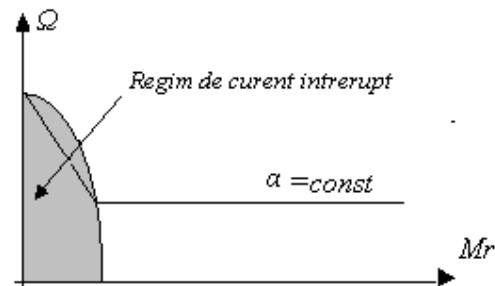
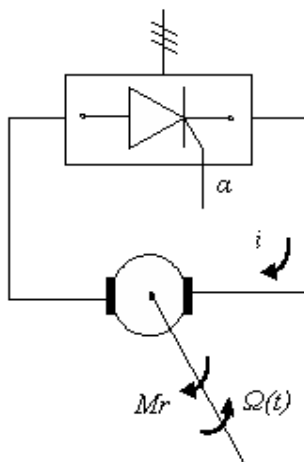


Fig. 21 Bucla algebrică

diferențiale ale sistemului simulat, existența unei relații care are în partea dreaptă o variabilă care nu a fost încă definită conduce la oprirea calculului și semnalarea erorii respective. Nu așa se întâmplă în cazul instrumentelor software de simulare, de tip SIMULINK și altele. Deseori, la întocmirea unei scheme de simulare, se introduc blocuri care calculează o variabilă pe baza unei mărimi de ieșire a altui bloc, acesta din urmă primind la intrare variabila de ieșire a primului bloc. Se obține o așa numită „**bucă algebrică**” (fig. 21). În cazul buclei algebrice, **nu se respectă principiul cauzalității**: ieșirea unui sistem trebuie să apară după aplicarea intrării. În aceste cazuri, instrumentul software SIMULINK nu oprește simularea, ci doar semnalează existența buclei algebrice. Utilizatorul poate să accepte sau nu rezultatul obținut; adesea el încearcă să elimine bucla algebrică prin introducerea unei întârzieri în acea buclă (adică, a funcției de transfer  $z^{-1}$ , v. fig. 21). În acest fel, el modifică, de fapt, modelul matematic, fără nicio justificare fizică.

Este foarte grav faptul că Simulink-ul permite simularea sistemului în condițiile nerespectării cerințelor de cauzalitate, prin artificii numerice (netransparente) care nu au o bază



**Fig. 23** Regimurile de funcționare ale sistemului

**Fig. 22.** Structura fizică a sistemului  
din cadrul *Exemplului 1*

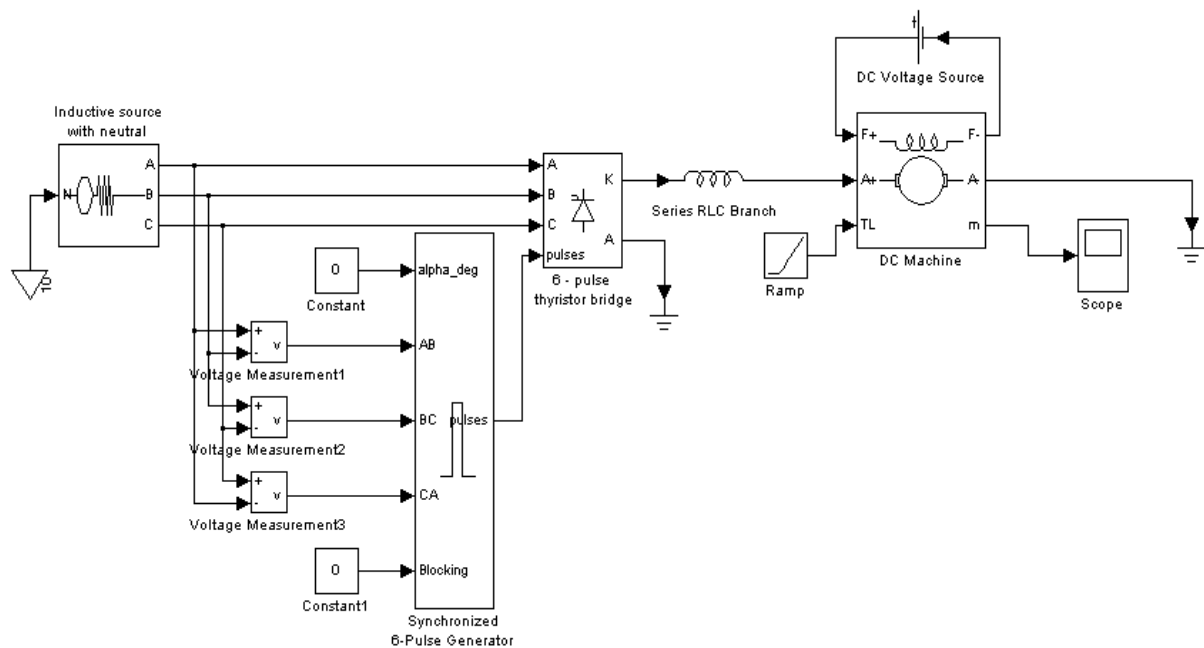
științifică. Acest fapt nu garantează corectitudinea rezultatelor obținute.

Ilustrarea acestei situații s-a realizat în cadrul *Exemplului 1*. Sistemul simulat, a cărui structură este dată în fig. 22, are ca mărimi de intrare unghiul de comanda pe grila,  $\alpha$ , și cuplul rezistent la arbore,  $M_r$ . Pentru  $\alpha = \text{const.}$ , caracteristica mecanică a acționării electrice este dată în fig. 23.

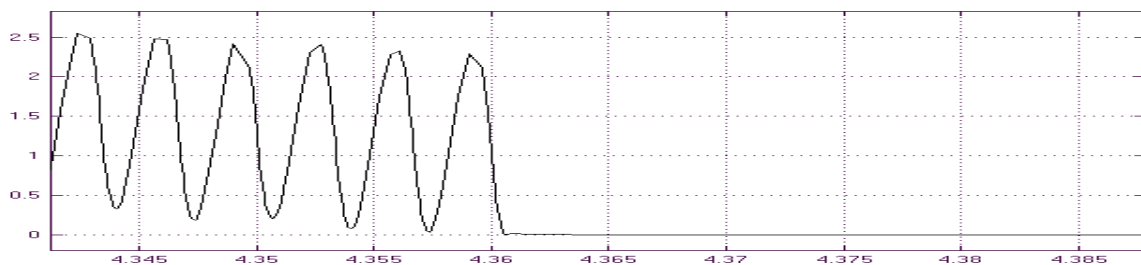
Sistemul are două regimuri distincte:

- de curent ne-întrerupt, la valori medii și mari ale cuplului de sarcină, și
- de curent întrerupt, la valori reduse ale cuplului de sarcină.

Schema de simulare în Simulink utilizează un generator de tip rampă, cu pantă negativă, pentru a se aplica un cuplu de sarcină lent scăzător, astfel încât sistemul să evolueze de la un regim de curent ne-întrerupt, la un regim de curent întrerupt.



**Fig. 24** Schema 1 de simulare a sistemului din *Exemplul 1*



**Fig. 25** Evoluția curentului în sistemul cu schema 1 de simulare



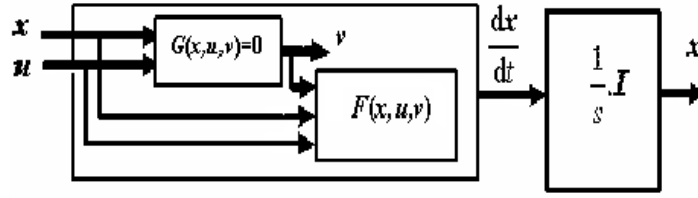


Fig. 28 Structura modelului

În cadrul modelului intervine, pe lângă variabilele  $x$  și  $u$ , și vectorul  $v$  obținut prin rezolvarea sistemului de ecuații algebrice (v. fig. 28).

Deci, modelul curent are forma:

$$\begin{aligned} G(x, u, v) &= 0 \\ \dot{x} &= F(x, u, v) \end{aligned} \quad (11)$$

Simularea numerică a sistemului, cu respectarea principiului cauzalității, se poate face prin două proceduri:

A- Rezolvarea prin metode numerice, la fiecare pas de integrare a ecuațiilor modelului de stare, a sistemului de ecuații algebrice. Inițializarea procedurii numerice în vecinătatea soluției, urmare a faptului că modificarea vectorului  $v$  la doi pași consecutivi este mică, face ca aceasta procedură să fie aplicabilă pentru simulare. Admițând că funcția  $G(\cdot)$  este derivabilă, algoritmul Newton-Raphson reprezintă o variantă adecvată de rezolvare numerică a sistemului de ecuații algebrice, în cele mai multe aplicații.

B- Procedura bazată pe liniarizarea prin calcul simbolic a modelului în punctul curent de funcționare. La iterația curentă este necesară liniarizarea prin *calcul simbolic* a funcției  $G(x, u, v)$ , rezultând:

$$\mathbf{M}_x \partial x + \mathbf{M}_u \partial u + \mathbf{M}_v \partial v = 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_x = \left( \frac{\partial G}{\partial x} \right)_0; \mathbf{M}_u = \left( \frac{\partial G}{\partial u} \right)_0; \mathbf{M}_v = \left( \frac{\partial G}{\partial v} \right)_0 \quad (13)$$

Liniarizarea implică o ipoteză: cunoașterea punctului de funcționare inițial (inclusiv a variabilei  $v_0$ ). Cuplarea ecuației algebrice liniarizate (12) la ecuația diferențială, conduce – în cadrul iterației curente – la un sistem dinamic în buclă închisă, căruia i se investighează poziția componentei spectrale aferente ecuației de stare adăugate la această iterație.

## TEHNICI DE SIMULARE ÎN MEDIU FIZIC

### Simularea Hardware-In-the-Loop (HIL)

Pentru ilustrarea tehnicii de simulare în mediu fizic, se va considera un exemplu concret.  
**Fie sistemul de amortizare a oscilațiilor la un autoturism.**

Amortizorul este format dintr-un ansamblu de elemente care formează un sistem dinamic. Acest sistem este interconectat cu ansamblul: caroserie, motor propulsie etc, care furnizează modul de variație a forței ce acționează asupra amortizorului, în funcție de **încărcarea autoturismului** și de **viteza lui de deplasare**. De asemenea, amortizorul este interconectat cu **elementul de rulare** (roata), care este modelată ca subsistem dinamic,

O posibilitate de analiză a comportării amortizorului constă în simularea numerică a ansamblului. Putem utiliza o abordare de simulare de tipul celei din fig. I.a, unde sistemul dinamic include toate subsistemele enumerate (nediferențiate). Mărimile de intrare sunt: profilul drumului, încărcarea autoturismului, viteza de deplasare, direcția de deplasare. Mărimile de ieșire sunt toate variabilele de interes privind funcționarea amortizorului.

Pentru a pune în evidență mai bine obiectivul cercetării, sistemul global se poate structura în două subsisteme (fig. I.b):

- **sistemul investigat**, în cazul de față amortizorul, notat cu  $S_2$  în fig. I.b,
- **sistemul care asigură „mediul” de funcționare al sistemului investigat**, notat cu  $S_1$  în fig. I.b

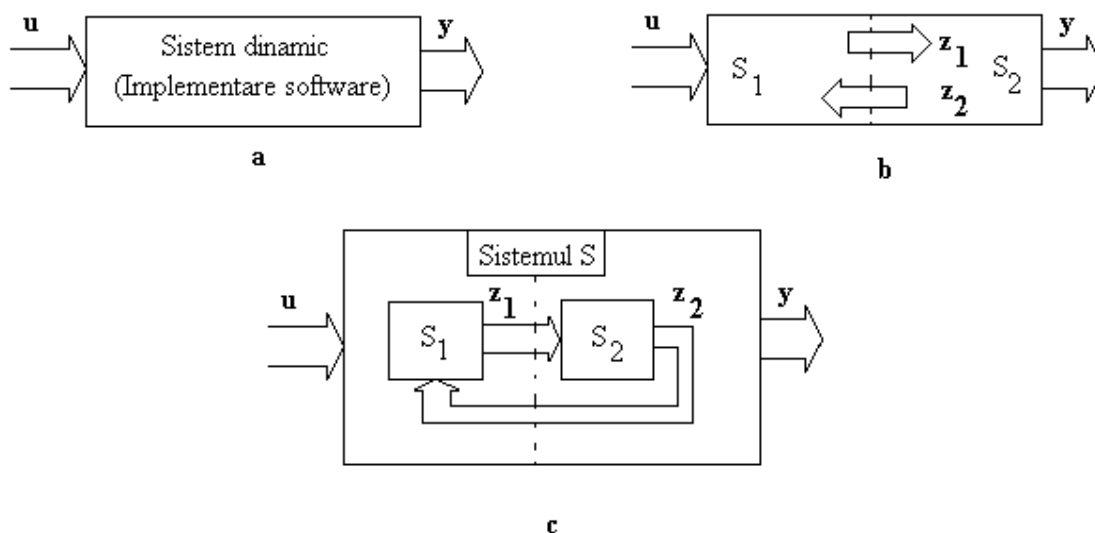


Fig. I

Schema din fig. I.b se poate pune sub forma din fig. I.c, în care apar explicit cele două subsisteme menționate, precum și variabilele de interacțiune  $z_1$  și  $z_2$ . Sistemul investigat  $S_2$  apare într-o buclă și, din acest motiv, structura din figura I.c este numită “Software-In-the-loop Simulation” (SILS).

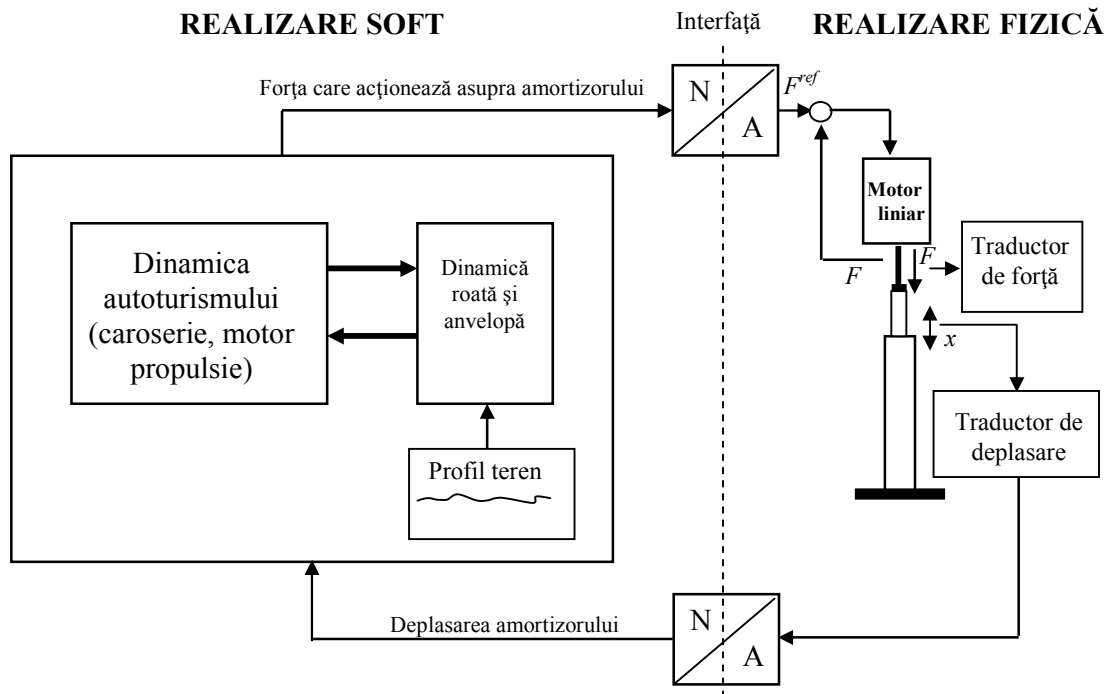
Rezultatele simulării numerice reprezintă o validare **preliminară (în mediul virtual)**. În realitate, nu știm în detaliu cum se va comporta **sistemul fizic investigat**, în toate privințele, inclusive din **punct de vedere care nu au fost luat în considerare la modelarea matematică a amortizorului** (probleme de material, fiabilitate etc). Este clar că:

- simularea numerică nu poate oferi soluția completă a problemei investigate;
- investigarea în timp real a amortizorului pe un autoturism este complicată, costisitoare și, uneori, greu sau imposibil de realizat **în detaliu**.

În aceste condiții, în cadrul buclei SILS din fig. I.c, partea software aferentă sistemului investigat  $S_2$  **se înlocuiește cu obiectul fizic propriu-zis (investigat)**. În aceste condiții,

structura care se obține se numește **Hardware-In-the-Loop (HIL)** și reprezintă o soluție utilizată pentru investigare în mediu fizic. Evident, subsistemul  $S_1$  rămâne realizat în mediul software, însă trebuie asigurată o interfațare prin convertoare N/A și A/N cu mediul fizic investigat.

În aceste condiții, structura HIL de investigare experimentală a amortizorului este dată în figura următoare.



Din punctul de vedere al sistemului fizic investigat (adică, amortizorul), funcționarea este asigurată de un **ansamblu fizic și informatic** ce reprezintă autoturismul care rulează pe un drum dat. **Contactul dintre subsistemul  $S_2$  și subsistemul  $S_1$  are loc în mediul fizic.** Deci, subsistemul  $S_1$ , numit și **emulator (simulator) electromecanic de autoturism**, conține două părți:

1. un **simulator software de timp real (SSTR)**, care are la bază modelele de dinamică a caroseriei, motorului, roții, căii de rulare etc.;
2. un **servosistem electromecanic în circuit închis (SE)**. Acesta primește de la SSSTR, prin convertor N/A, referința forței care trebuie să acționeze asupra amortizorului și realizează efectiv această forță.

Interacțiunea dintre SSSTR și SE poate să aibă loc în două moduri:

1. SSSTR furnizează referința de forță (sistemul  $S_2$  este **pilotat în forță**), iar  $S_2$  transmite spre SSSTR, **ca variabilă de răspuns**, deplasarea amortizorului,
2. SSSTR furnizează referința de deplasare (sistemul  $S_2$  este **pilotat în deplasare**), iar  $S_2$  transmite spre SSSTR, **ca variabilă de răspuns**, forța din amortizor.

Exemplul prezentat, foarte simplu, ilustrează modul cum o structură HIL **emulează un sistem fizic**, numit **sistem fizic simulat (SFS)**, care interacționează cu un **sistem fizic investigat (SFI)**. Acesta poate fi cercetat experimental, în laborator, întrucât structura HIL îi creează “mediul” natural de funcționare.

Structurile HIL sunt, în prezent, larg utilizate pentru emularea diverselor procese de natură diferită, inclusiv procese pur electrice sau electronice. (Exemple: ABS etc)

Vom ilustra utilizarea structurii HIL pentru studiul conversiei energiilor regenerabile.

Investigarea experimentală a agregatelor eoliene necesită dezvoltarea unor simulatoare de turbine eoliene, care să permită realizarea cercetărilor independent de regimul de vânt din momentul efectuării experimentelor. În acest caz, din punctul de vedere al cercetărilor din profilurile electric, electronic, automatică, **sistemul fizic investigat (SFI) este format din:**

- generatorul electric;
- electronica de putere aferentă;
- buclele de reglare;
- rețeaua în care debitează sursa eoliană.

**Simulatorul electromecanic de turbină eoliană trebuie să ofere un arbore mecanic** astfel încât:

- la acest arbore să se obțină caracteristicile statice și dinamice ale unei turbine date, care a fost aleasă dintr-o anumită clasă. Clasa turbinelor ale căror caracteristici pot fi reproduse la arbore ar trebui să fie restricționată doar de puterea nominală;
- regimul de vânt la care este testat sistemul eolian, conform strategiei de experimentare, să fie impus prin modelul matematic al vitezei vântului (proprietățile spectrale ale acesteia).

Simulatorul electromecanic propriu-zis este compus dintr-un simulator software de timp real (SSTR), care implementează modelul matematic al turbinei emulate și al vitezei vântului, precum și un servomotor electric, care constituie sistemul electromecanic de urmărire a referinței impuse de SSTR.

Simulatorul de turbină poate fi cu pilotare în viteză sau cu pilotare în cuplu, după cum simulatorul software de timp real generează referința de viteză, respectiv de cuplu pentru subsistemul electromecanic și primește de la acesta, ca variabilă de răspuns, semnal de cuplu, respectiv viteză. Alegerea variantei de pilotare se face prin soft-ul de aplicație.

