

1. SISTEMELE MECATRONICE

1.1. Introducere

În centrul științelor naturale și tehnice se află noțiunile de observare și măsurare (fig.1.1). Pornind de la observație, cercetătorul construiește o imagine fizică a problemei pe care o analizează și apoi formulează o teorie adică un concept despre aspectul naturii analizat. Pe baza unor experimente gândite și construite în mod judicios se realizează experimente a căror rezultate pot confirma teoria, determină modificări ale acesteia sau o resping. Pe baza acestor argumente se poate afirma că în domeniul științelor naturale și tehnice, observațiile și măsurările (experimentele) sunt elemente fundamentale.

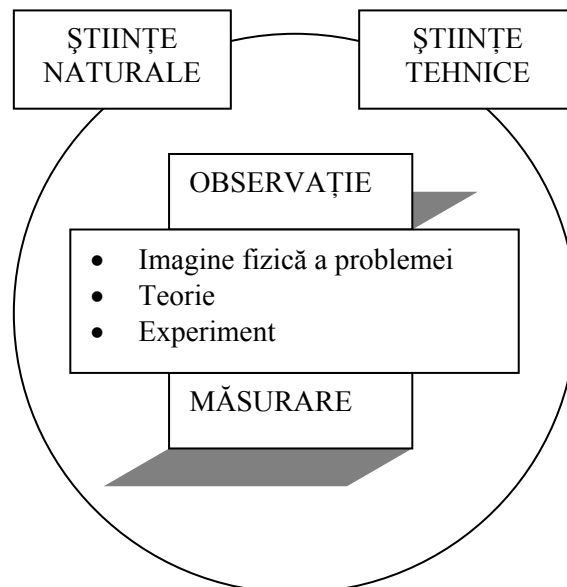


Fig. 1.1 Observația și măsurarea

O noțiune extrem de importantă care stă la baza abordărilor ulterioare este cea de sistem care poate fi înțeles într-un mod foarte general, ca “o colecție de obiecte aranjate într-o formă ordonată, care într-un anumit sens este dirijată spre un scop sau o

țintă” [1.10]. Tot ce aparține “sistemului” face parte din “mediul ambient” (fig.1.2). După linia de demarcație ce se impune între sistem și mediul ambient, se pot defini pentru sistem relațiile de intrare / ieșire. Ceea ce constituie un sistem depinde de punctul de vedere al observatorului.

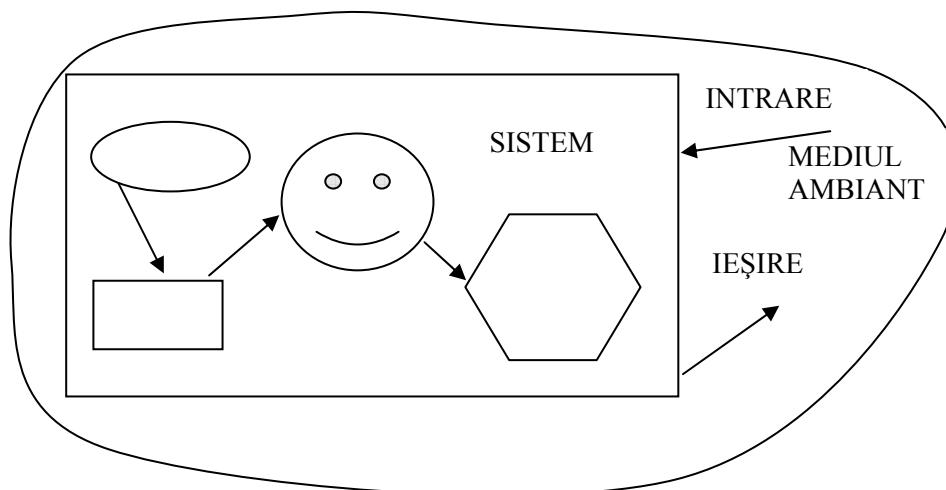


Fig. 1.2 Sistem și mediu ambiant

O importanță egală cu cele două anterioare specificate, o reprezintă noțiunea de model. Formularea unei teorii se poate echivala cu “construirea modelului” iar teoria ar putea defini “modelul” realității analizate. Modelul va reprezenta sub o formă utilizabilă, aspectele esențiale ale sistemului existent. În domeniul tehnic modelul este întâlnit și utilizat printre altele și în scopul proiectării.

Pe parcursul timpului s-a pus deseori întrebarea: ce este primordial, construirea unei complexități sau funcțiile complexității ? În ultima perioadă viața de zi cu zi a demonstrat că funcțiile unei “complexități” devin primordiale. În același timp se poate afirma că evoluția în timp a unui sistem – înțeles ca o “complexitate” – este determinată de funcțiile acestuia.

1.2. Evoluția sistemelor

Automatizarea a fost o dorință din totdeauna și s-a manifestat sub diverse forme. O analiză a unei evoluții în acest sens este destul de dificilă.

Se consideră că patru elemente au fost definitorii pentru dezvoltare în istorie [1.19]:

- preocupările grecilor și arabilor pentru urmărirea timpului;
- revoluția industrială din Europa (după mijlocul secolului al XVIII –lea);
- debutul comunicației de masă și primul și al doilea război mondial (1910 – 1945);
- debutul în spațiu și anul computerului (1957)
- Ceasul cu apă (water clocks) a fost printre cele mai timpurii supraveghetoare de

timp. Una dintre cele mai vechi variante a fost găsită în mormântul lui Amenhotep I îngropat în jurul anului 1500 înainte de Hristos. Curgerea apei printr-un circuit într-un rezervor determina o creștere a nivelului funcție de timp. În acest mod se puna în evidență pe cale mecanică trecerea timpului (fig.1.3). Se utilizează cu succes regulatorul cu plutitor (float regulator) inventat de greul Ktesibios.

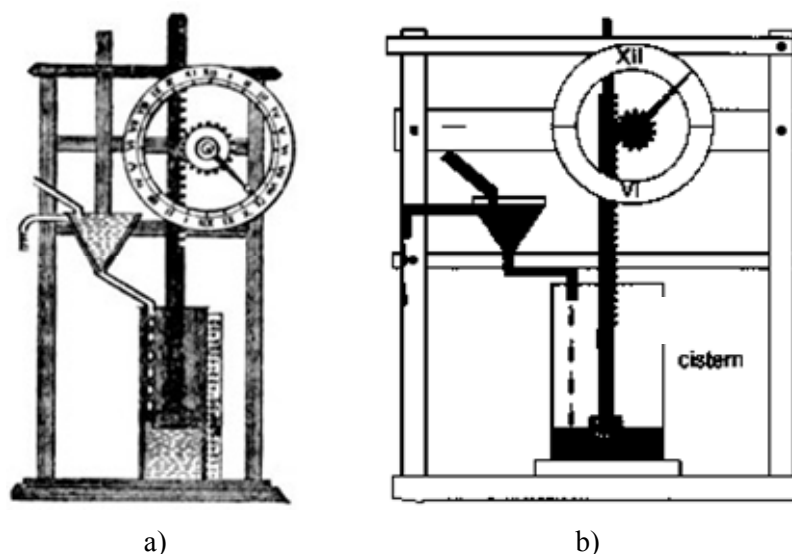


Fig. 1.3 Ceasul cu apă

J. Watt inventează locomotiva cu abur în 1769, dată care marchează debutul Revoluției industriale. Regulatorul lui Watt realizat în 1787 a fost denumit în faza inițială “governor”. Aplicarea inițială a acestuia la mașina cu vapori a deschis șirul lung al unor destinații utile, eficiente și ingenioase într-o mulțime de aplicații tehnice. În figura 1.4 se prezintă aplicația inițială a regulatorului pentru reglarea turației la locomotiva cu aburi. Principiul de funcționare are la bază forța centrifugă care acționează asupra contragreutăților E. Un mecanism cu bare permite acționarea clapetei V de admisie a aburului spre cilindrul mașinii (fig.1.5).

O serie de probleme de rezolvat s-au asociat cu inventarea locomotivei cu abur. Una dintre acestea a fost menținerea presiunii în cazan în limitele dorite. În 1681 D. Papin inventează o supapă de siguranță pentru un fierbător și o utilizează în 1707 pentru reglarea presiunii la locomotiva cu abur. Regulatorul de presiune este legat de anul 1799 și numele inventatorilor: R. Delap și M. Murray. Abia în 1803 Boulton și Watt combină regulatorul de presiune cu regulatorul de nivel pentru locomotiva cu aburi.

Războiul de țesut creat de Jacquard (sec.18) și-a adus contribuția atât la prima cât și la cea de-a doua revoluție industrială. Prima contribuție a constat la mecanizarea industriei textile engleze (fig.1.6). A doua contribuție s-a datorat faptului că sistemul cartelei perforate (cartelă cu orificii pe linie și coloană detectabile pe cale mecanică)

(punch_card) - utilizat și în pianul ambulant și alte automate – a contribuit la dezvoltarea viitoarelor calculatoare.

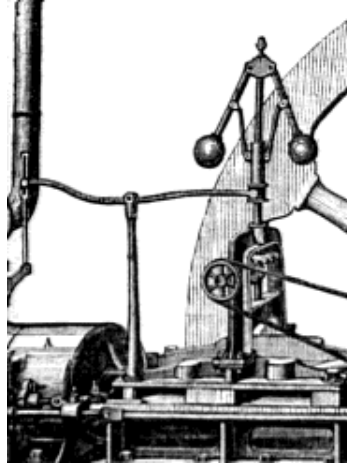


Fig. 1.4 Regulatorul Watt

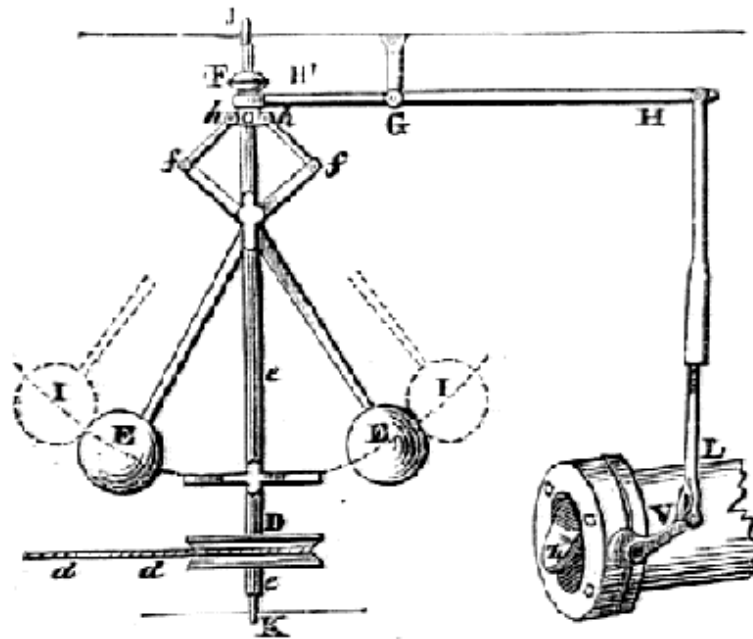


Fig. 1.5 Principiul de funcționare a regulatorului Watt

Elias Howe este cel care a realizat la începutul anilor 1800 prima variantă a mașinii de cusut (patentele datează din 1845 și 1854). S-a pus bazele unei noi etape în mecanizarea activității din industria textilă. În scurt timp diverse variante ale mașinii au fost introduse pe piață: Fanton – 1860 (fig.1.7), Flora – 1870 (fig.1.8, fig.1.9) [1.16].



Fig. 1.6 Războiul de țesut



Fig. 1.7 Mașina – Fanton

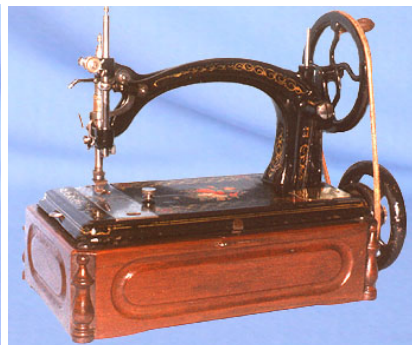


Fig. 1.8 Mașina – Flora

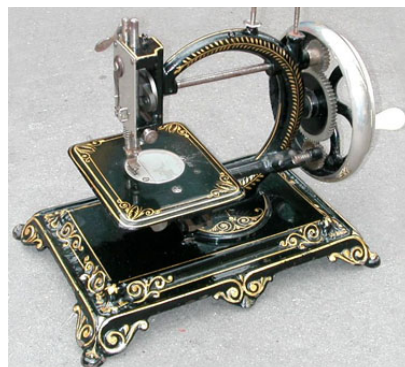


Fig. 1.9 Variantă a mașinii Flora

Primul patent pentru mașina de scris îl întâlnim în 1713 dar prima realizare practică poate fi citată abia peste aproape un secol (1808) și aparține lui Pellegrino Turri. O idee semnificativă de a construi o mașină care poate scrie alfabetul datează din

1868 (modelul patentat – fig.1.10 și respectiv schema mecanismului de bază – fig.1.11) și aparține unui publicist – filozof – politician Christopher Latham Sholes (Milwaukee, Wisconsin).



Fig. 1.10 Mașina de scris

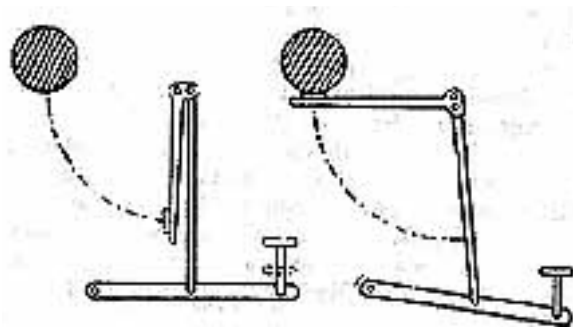


Fig. 1.11 Mecanismul mașinii de scris

Între 1874-1878 E. Remington & Sons (Ilion, NY) produce prima variantă de mașină (cu pedală de picior) de scris “Sholes & Glidden Type Writer” (fig.1.12). Sunt utilizate și “influențe” de la mașina de cusut Remington.

Wilhelm Schickard construiește primul calculator mecanic în 1623 într-o localitate neprecizată. Se consideră însă cert că Blaise Pascal construiește prima mașină de adunat (Pascaline) în 1642 după o descriere a lui Hero din Alexandria (fig.1.13). Mult mai târziu (în jurul lui 1900) se va dezvolta însă o construcție de mașini de adunat. Modelul Burroughs Class 1 (1904 – 1915) este modelul cel mai spectacular (fig.1.14) [1.36].



Fig. 1.12 Mașina de scris cu pedală

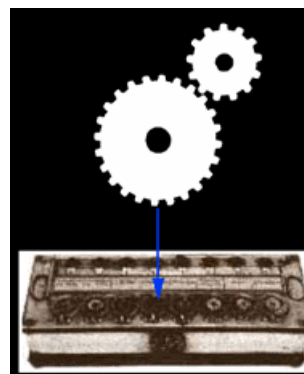


Fig. 1.13 Primul calculator mecanic



Fig. 1.14 Mașină de adunat

Sunt câteva realizări semnificative din istoria științelor tehnice care au avut implicații deosebite în evoluția tehnicii în general.

Perioada dintre revoluția industrială și cele două războaie mondiale este nominalizată ca și perioada extrem de importantă în dezvoltare. J.C. Maxwell realizează în 1868 pentru prima oară în mod riguros matematic o analiză a controlului sistemelor. Perioada precedentă lui 1868 se consideră *perioada preistorică* pentru controlul automat. Perioada dintre 1868 și 1900 este *perioada primitivă*. *Perioada clasică* a controlului automat se referă la perioada 1900 – 1960. După 1960 se vorbește despre *perioada modernă* a controlului.

Câteva dintre momentele mai importante în această evoluție sunt prezentate în mod succint în tabelul 1.1 [1.19].

Tabelul 1.1

1624	Incubatorul, C. Drebbel
1728	Governatorul cu bile, J. Watt
1769	Mașina cu abur, J. Watt – debutul revoluției industriale
1840	Dispozitiv de reacție pentru calibrarea telescopului, G.B. Airy
1868	Analiza stabilității mișcării guvernatorului Watt, J.C. Maxwell
1877	Criteriul de stabilitate, E. J. Routh
1890	Analiza stabilității neliniare, A.M. Lyapunov
1920	Giroscopul și pilotul automat, Sperry
1927	Amplificatorul electronic cu reacție, Black
1932	Criteriul de stabilitate Nyquist, Nyquist (Bell Telephone Lab.)
1938	Metoda răspunsului în frecvență, Bode (Bell Telephone Lab.)
1942	Regulatorul PID, Ziegler-Nichols
1947	Sisteme cu eșantionare (sursa sistemelor discrete / digitale, Hurewicz)
1948	Locul geometric al rădăcinilor, Evans
1956	Principiul de maxim (controlul optimal), Pontryagin
1960	Estimarea stărilor, teoria controlului modern, Kalman și alții
1969	Microprocesorul, Hoff

O perioadă extrem de importantă în evoluție este cea premergătoare zborului cosmic. Este o perioadă care a generat o “explozie” în domeniul electronicii și mai târziu în tehnologia informațiilor. Iată câteva dintre momentele mai semnificative [1.29], [1.40], 1.24, [1.30], [1.37], [1.38]:

- 1940: Russell S. Ohl demonstrează posibilitatea realizării joncțiunii “p-n” pe bază de siliciu (fig.1.15);



Fig. 1.15 Realizarea joncțiunii p-n

- 1943: se dă startul la proiectul de realizare a lui ENIAC, mașina de calcul construită de John Mauchly și Presper Eckert (finalizare în 1946), 5000 operații pe secundă;
- 23 decembrie: William Shockley, Walter Brattain și John Bardeen pun, prin invenția lor –amplificator într-un cristal de germaniu- bazele creării tranzistorului (AT&T Bell Laboratories);
- 1950: National Bureau of Standards (USA) construiește la Washington SEAC-ul (Standards Eastern Automatic Computer) în laboratorul pentru testarea componentelor și a sistemelor pentru computerele standard. SEAC este primul computer cu logică pe bază de diode și program înmagazinat;



Fig. 1.16 Primul computer cu program înmagazinat

- 1953: John Backus aduce contribuții în domeniul softului pentru computerul IBM 701;
- 1956: (luna necunoscută) Primul computer tranzistorizat – TX - O transistorized Experimental computer – la Massachusetts Institute of Technology. IBM introduce prima unitate de disc RAMAC 305 cu capacitatea de 5 MB;
- 1960: (luna necunoscută) Digital Equipment introduce primul minicomputer PDP-1, pentru un preț de 120,000 \$. Este primul computer comercial echipat cu tastatură și monitor;
- 1969: Intel anunță realizarea cip-ului de 1 kB memorie RAM;
- 1971: (iunie) Texas Instruments (TI) anunță obținerea un “CPU on a chip”; (luna necunoscută) Intel introduce cip-ul 1101 de 256 bit memorie programabilă și cip-ul 1701 de 256 – bit memorie EROM; (noiembrie) Intel introduce oficial sistemul de calcul MCS-4 (Microcomputer System 4 – bit) având facilități de 60.000 operații / sec, microprocesor 4004, frecvență de sincronizare 108 kHz;
- 1974: Intel 8080 – cel mai important produs al secolului 20 [1.29] – este pus în circulație;
- 1975: Digital Equipment introduce microcomputerul LSI-11 (placă cu microprocesor), cu 8 KB RAM. Este primul microcomputer american pe o arhitectură de 16-bit;
- 1976: Intel introduce microcontrolerul pe 8 bit MCS-48; (iunie) – Texas Instruments introduce primul microprocesor pe 16-bit (TMS9900) utilizat puțin mai târziu (iulie) în minicomputerul TI 990 (Zilog);
- 1979: Motorola anunță microcontrolerul 68000;
- 1980: Intel introduce microcontrolerul 8051 (pe 8 bit) cu memorie EPROM;
- 1984: Motorola produce microprocesorul pe 32-bit (tehnologie CMOS) 68020, cu 200.000 de tranzistoare;
- 1985: Intel anunță microprocesorul 80386 (pe 32-bit) cu 275.000 de tranzistoare;
- 1986: Firma Compaq este prima companie care produce un PC 386;
- 1987: Firma Zilog scoate pe piață microprocesorul Z280, versiunea pe 16-bit a lui Z80;
- 1989 (aprilie): Intel anunță microprocesorul 80486, pe 32-bit, 1,2 milioane tranzistoare, coprocesor matematic;
- 1992: Este anunțat PowerPC 601 (pe 32 bit, bus 64-bit) ca o acțiune comună a firmelor Motorola, IBM și Apple;
- 1993: Intel introduce procesorul Pentium (3 milioane tranzistoare, 32-bit, bus 64-bit).

O evoluție cronologică a microprocesorului este prezentată în tabelul 1.2. Sunt prezentați totodată și principalii parametri – constructivi și funcționali – pentru variantele de microprocesor:

- **Anul** desemnează perioada de primă apariție a microprocesorului;
- **Tranzistoare** este numărul de tranzistoare pe cip;
- **Dim** reprezintă lățimea, în μm , a celui mai subțire fir. Pentru comparație firul de păr uman are 100 μm grosime.
- **Frecvența** definește frecvența maximă pe cip.

- **Date** reprezintă lungimea cuvântului.
- **MIPS** corespunde numărului de instrucțiuni pe secundă (în milioane) și reprezintă performanța unității centrale.

Tabelul 1.2

Numele	Anul	Tranzistoare	Dim	Frecvență	Date	Mips
8080	1974	6.000	6	2 MHz	8 biți	0.64
8088	1979	29.000	3	5 MHz	16 bit 8 bit bus	0.33
80286	1982	134.000	1.5	6 MHz	16 bit	1
80386	1985	275.000	1.5	16 MHz	32 bit	5
80486	1989	1.200.000	1	25 MHz	32 bit	20
Pentium	1993	3.100.000	0.8	60 MHz	32 bit 64 – bit bus	100
Pentium II	1997	7.500.000	0.35	233 MHz	32 bit 64 – bit bus	~ 300
Pentium III	1999	9.500.000	0.25	450 MHz	32 bit 64 – bit bus	~ 510
Pentium IV	2000	42.000.000	0.18	1.5 GHz	32 bit 64 – bit bus	~ 1700

1.3. Ce este Mecatronica ?

Dezvoltarea produselor este o sarcină esențială a firmelor. Motivul acestui lucru are la bază scăderea duratei de viață a produselor pe piață. Acesta este în mod continuu în ultima perioadă și impune noi tehnologii de dezvoltare.

Cercetările inițiate de McKinsey & Co au evidențiat faptul că o întârziere de 6 luni în dezvoltarea unui produs tehnologic va reduce câștigul total cu până la 30 %. În același timp o creștere a costurilor cu 50 % are o influență nesemnificativă în câștigul financiar. Dezvoltarea rapidă cu asigurarea calității produselor este strict necesară.

Soluții de succes presupun o îmbinare armonioasă a electronicii, software-ului cu mecanica.

Evoluția în timp a tehnicii concretizată prin mecanizare, automatizare și robotizare a fost determinată în principal de posibilitatea de utilizare în mod superior a informației. În același timp, apariția microprocesorului și a memoriilor semiconductoare a permis o abordare funcțională a procesului de realizare a produselor tehnice.

Cele specificate au coincis cu necesitatea unui număr din ce în ce mai mare de produse noi – concepție și realizare - care înglobează pe lângă componenta mecanică și importante fracțiuni de electronică și informație. Într-o egală măsură evoluția unor sisteme mecanice tradiționale a fost posibilă prin transferarea realizării unor funcții

spre zona electronică și a tehnologiei informației. Dezvoltarea rapidă a noilor produse au avut la bază ascensiunea microelectronicii care a oferit diverse posibilități:

- *Circuitele electronice* ieftine și de serie pot înlocui dacă este cazul sarcini, acțiuni mecanice prin *electronică și software*;
- *Circuitele integrate* permit controlul mișcării mecanice și a proceselor în mod ușor, precis și economic;

Robuștețea componentelor electronice și a circuitelor determină o rezistență bună la vibrațiile mecanice sau alte solicitări specifice sistemelor mecanice. Ca urmare fiabilitatea crește sau cel puțin rămâne în limitele corespunzătoare sistemelor mecanice.

În acest context la nivelul anului 1969 cercetători ai firmei Yasukawa Electric Company au introdus noțiunea de *mechatronics* ca și o abreviere bazată pe mecha – “*mechanism*” + tronics – “*electronics*” [1.3], [1.6], [1.15], [1.23].

Mecanica, electronica și software-ul reprezintă componentele de bază ale mecatronicii. Adicional, pe lângă suma celor trei categorii de funcții, mai pot fi incluse:

- Realizarea de noi funcții imposibile înainte (de ex. programarea video player-ului);
- Ameliorarea (perfecționarea) unor operații și a unor sarcini viitoare (funcții “inteligente”);
- Ameliorarea flexibilității în proiectarea produselor (prin utilizarea flexibilității softului);
- Ameliorarea flexibilității în utilizarea produselor (utilizând flexibilitatea softului);
- Compensarea frecării sau amortizarea vibrațiilor din structura sistemelor mecanice;
- Cumularea acțiunilor mecanice și electronice în scopul reducerii dimensiunilor și costurilor produselor (senzori inteligenți sau servovalve electro-hidraulice).

Dezvoltarea produsului este divizată în trei faze reprezentate sugestiv în figura 1.17. *Mecatronica* este o cooperare a diferitelor domenii dominante în faza de concepție. Trei faze sunt specifice: faza de concepție, faza de proiectare cu evidențierea disciplinelor specifice, faza de implementare când domină disciplinele tradiționale.

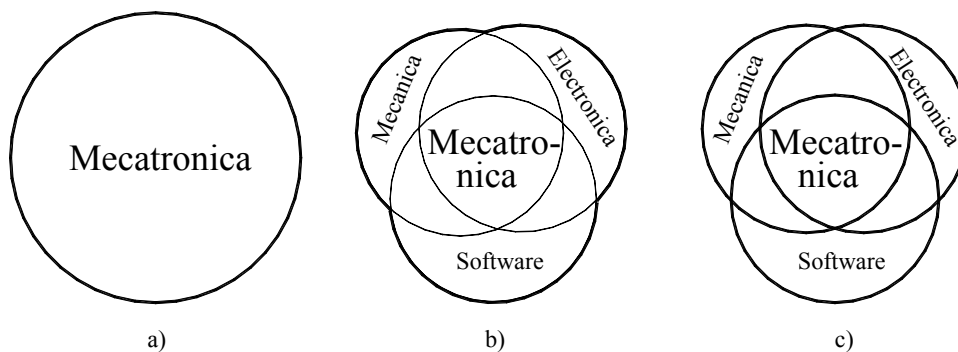


Fig. 1.17 Dezvoltarea produsului pe faze

Caracteristicile produselor pentru toate fazele din perioada de viață sunt determinate în perioada de început a dezvoltării. Aproximativ 70 % din costurile totale și calitate sunt determinate în faza de construcție cu toate că numai resurse reduse sunt utilizate aici (în varianta tradițională, mecanică, numai 5 %). Din cauza greșelilor din timpul fazelor de început un număr mare de întreprinderi suferă din cauza “greșelilor și deviațiilor” din producție. Sume mari sunt cheltuite pentru asigurarea calității și testarea acestor produse. În multe cazuri este mult mai ușor a proiecta produse, pe care variațiile normale din producție nu le conduc la erori. Utilizând conceptul de mecatronică, în faze de dezvoltare de început, se pot obține produse de calitate la preț de cost mai redus. Bariera tradițională din perioada de dezvoltare o constituie aplicarea conceptelor de optimizare. Lucrul în echipă este strict necesar pentru a putea obține integrarea soluțiilor tehnice și de a reduce timpul de lucru. Se pot nominaliza dintre aspectele preconizate a fi obținute:

- reducerea timpului de dezvoltare și a costurilor;
- orientare de marketing (focalizată pe utilizator);
- capacitate de reacție rapidă la schimbările care afectează competitivitatea.

În același timp este necesar să se facă diferențe între caracteristicile imperative ale produsului și caracteristicile de marketing.

1.4. Evoluție și definiții ale sistemelor mecatronice

Conceptul de “mecatronică” a fost brevetat în anii 1971-1972 dar în anul 1982 firma Yasukawa renunță la drepturile de autor asupra acestuia pentru a putea fi utilizat pe scară largă.

În anul 1986 conceptul este citat și în literatura de specialitate din România pentru roboți industriali.

Conceptul de mecatronică primește legitimitate academică în anul 1996 prin apariția revistei IEEE / ASME Transactions on Mechatronics [1.38].

Noțiunea a generat controverse, discuții, analize și diverse abordări. Întrebările au avut la bază atât domeniul cât și “obiectele” mecatronice. Iată câteva dintre aceste controverse:

- este un domeniu nou sau o combinație ale unor domenii existente?
- este vorba despre controlul sistemelor mecanice cu calculatorul ?
- se definesc mecanismele inteligente ?
- este vorba de mașini computerizate ?
- este vorba despre sisteme mecanice informatizate ?

Răspunsurile la modul de definire a mecatronicii au apărut în timp prin diverse definiții abordate la nivelul colectivelor de cercetare și proiectare:

- integrarea sistemelor mecanice, electronice și informatice pentru realizarea produselor și sistemelor tehnologice “inteligente” (Japonia 1983);
- mecanică fină, control, știința calculatoarelor și electronică în proiectarea proceselor de realizare a unor produse mai funcționale și mai adaptabile (San Jose State University - USA);
- câmp de studiu combinative al fundamentelor de inginerie mecanică, electrică și

- calculatoare (Chico State University - USA);
- combinatie de software și hardware pentru proiectarea și analiza tehnicilor de control avansate (Clemson University- USA);
- nouă filozofie de proiectare prin integrarea tehnologiilor mecanice, electronice și informatice în scopul producerii de produse, procese și sisteme performante (Loughborough University –Anglia);
- combinatie de tehnologie mecanică, electronică și informațională pentru a forma o interacțiune funcțională și o integrare spațială în componente, module, produse și sisteme (Univesity of Twente – Olanda);
- modalitate flexibilă, multitehnică de integrare a ingineriei mecanice, electronice, știința calculatoarelor și informatică (Berkeley University - USA); controlul sistemelor mecanice [1.23];
- integrare sinergică a ingineriei de mecanică fină, control electronic și sistemele logice în proiectarea produselor și proceselor inteligente (Nort Carolina State University - USA);
- aplicație a conceptului de inginerie concurentă pentru proiectarea sistemelor electromecanice. Această filozofie de proiectare este un exemplu în proiectarea interdisciplinară și integrată acolo unde subsistemele electrice, electronice, computere și mecanice sunt proiectate simultan pentru a funcționa și a se integra într-un singur sistem(Georgia Tech. University - USA);
- știința care integrează dispozitivele mecanice și controlul electronic (în “Design with Microprocessors for Mechanical Engineers”);
- integrare sinergică a ingineriei mecanice cu electronica și controlul inteligent computerizat în proiectarea și realizarea produselor industriale și a proceselor” (ASME Trans. on Mecha., nr.1, 1996);
- metologie – colecție de practici, proceduri, reguli - utilizată pentru proiectarea optimală a produselor electromecanice”(Mechatronics System Design– D.Shetty, 1997).

În primul său număr revista ASME Transactions on Mechatronics precizează 10 domenii de interes pentru noul concept lăsând deschisă lista (tabelul 1.3).

Tabelul 1.3

modelare, simulare	controlul mișcării
sisteme integrate	controlul vibrațiilor
actuatoare și senzori	microsisteme optoelectronice
control inteligent	subsisteme ale automobilului
robotică	altele
tehnologie	

1.5. Elementele de bază ale mecatronicii

Modul de reprezentare și identificare a elementelor componente este extrem de divers. O reprezentare concisă fără detalieri a interdependențelor dintre elementele componente este ilustrată în figura 1.18.

Un mod de reprezentare mai complex a structurii unui hipersistem mecatronic este dat în figura 1.19 [1.3]. Sistemul controlat este procesul mecanic aflat în contact cu mediul prin “senzori” și “actuatoare”. Sistemul mecatronic se deosebește de alte sisteme prin cele trei subsisteme ale sistemului de control reprezentate prin percepție, planificare / control și reprezentarea cunoștințelor.

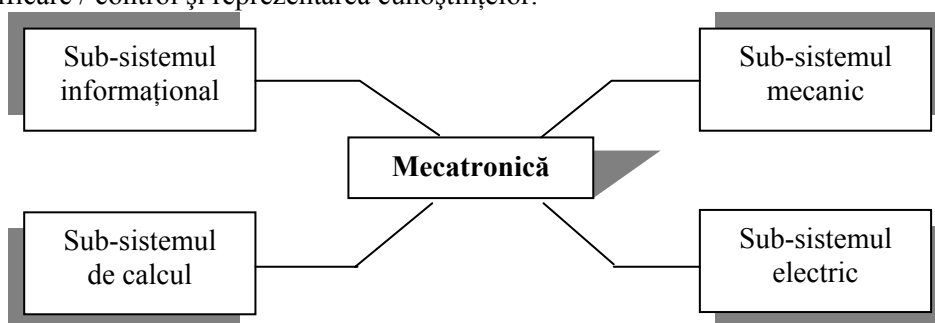


Fig. 1.18 Elementele componente ale mecatronicii

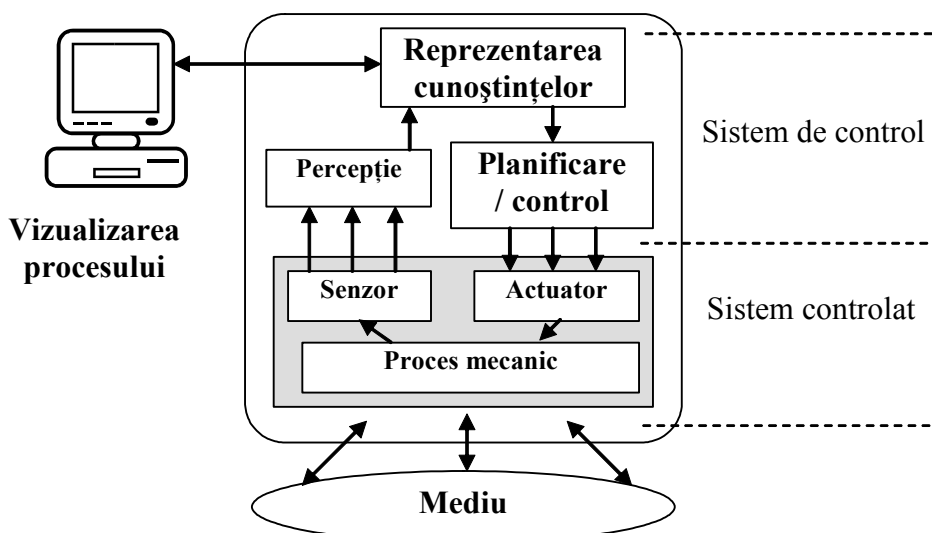


Fig. 1.19 Hipersistemic mecatronic

Modulul “*Mediu*” influențează prin parametrii proprii – temperatură, umiditate, presiune etc. – comportarea sistemului. Condițiile de mediu în care un sistem își poate desfășura activitatea la parametrii doriți sunt precizate prin recomandări practice. Modulul “*Proces mecanic*” definește realitatea fizică a sistemului care este cercetată și condusă. Intrările în acest modul provin de la modulul “*Actuator*”. Ieșirile modulului se constituie ca și mărimi de intrare pentru modulul “*Senzor*”. Modulul “*Senzor*” are rolul de obținere a informațiilor necesare despre procesul mecanic. Modulul “*Planificare / control*” stabilește, pe baza informațiilor primite despre procesul mecanic, planul de acțiune și control astfel încât să fie atinși parametrii doriți în procesul mecanic. Modulul de interfațare “*Vizualizare proces*” transferă informațiile între componentele

sistemului și permite dialogul cu operatorul uman.

O reprezentare la fel de complexă a unui sistem mecatronic este ilustrată în figura 1.20 [1.6]. Se evidențiază prezența a patru subsisteme componente: subsistemul mecanic, subsistemul informațional, subsistemul electric și subsistemul de calcul.

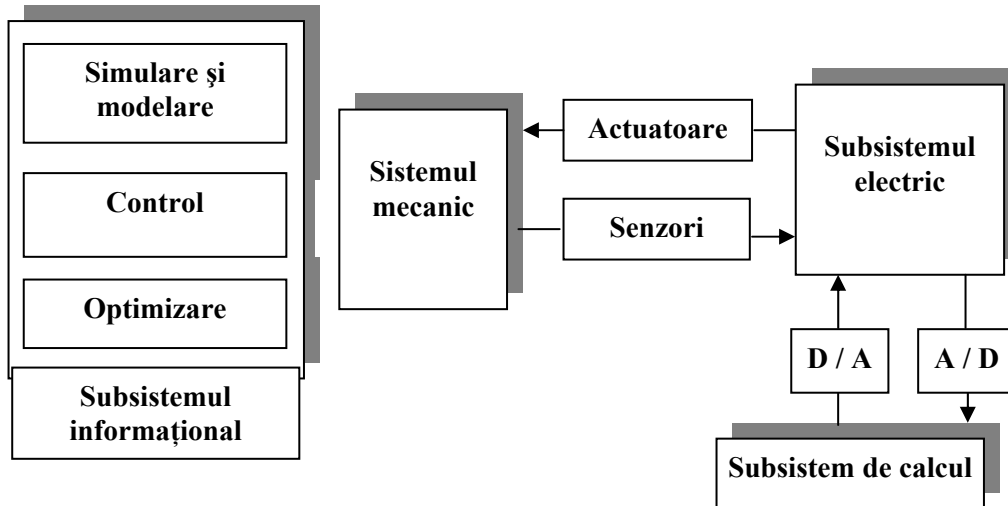


Fig. 1.20 Sistemul mecatronic

În alte abordări, studiul sistemelor mecatronice este divizat în ariile de specialitate [1.3]: modelarea sistemelor fizice, senzori și actuatoare, semnale și circuite, sisteme logice și de calcul, achiziții de date.

Indiferent de abordările mai mult sau mai puțin complexe avute în vedere, se pot preciza detaliile generale pentru cele patru sisteme componente ale hipersistemului mecatronic.

1.5.1. Sub-sistemul mecanic

1.5.1.1. Generalități

Lumea fizică este alcătuită din materie în permanentă mișcare și transformare în spațiu și timp. Cea mai simplă formă de mișcare a materiei o constituie deplasarea reciprocă a corpurilor materiale de dimensiuni uzuale. Un corp al cărui dimensiuni sunt neglijabile față de distanțele la corpurile înconjurătoare se definește ca și punct material. Acesta este caracterizat numai prin masa sa. Punctul material nu este un obiect fizic real; el este un model folosit în studiul anumitor fenomene. Punctul material nu efectuează mișcări de rotație în jurul vreunei axe. Un sistem de puncte materiale supuse la legături reciproce – forțe de interacțiune – astfel încât să formeze un “întreg”, mai mult sau mai puțin stabil, mai mult sau mai puțin deformabil se numește sistem mecanic.

Sistemul mecanic este implicat în transmiterea mișcării cu anumiți parametri.

Între mișcarea de translație și mișcarea de rotație există o analogie ușor

sesizabilă în relațiile din tabelul 1.4.

Tabelul 1.4

TRANSLAȚIA		ROTAȚIA	
Mărimea sau ecuația	Unit. măsur.	Mărimea sau ecuația	Unit. măsur.
Cinematica			
Spațiul "s"	m	Unghiul "φ"	rad
Timpul "t"	s	Timpul "t"	s
Viteza "v"	m/s	Viteza unghiulară "ω"	rad/s
$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	m/s	$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$	rad/s
Mișcare uniformă $s = s_0 + v \cdot t$	m	Rotația uniformă $\varphi = \varphi_0 + \omega \cdot t$	rad
Accelerația $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ $a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	m/s ²	Accelerația unghiulară $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$ $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$	rad/s ²
Mișcarea uniform variată $v = v_0 + a \cdot t$ $s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}$ $v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot (s - s_0)$		Rotația uniform variată $\omega = \omega_0 + \varepsilon \cdot t$ $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$ $\omega^2 = \omega_0^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot (\varphi - \varphi_0)$	
Dinamica			
Masa "m"	kg	Momentele de inerție "I"	Kgm ²
Forța "F"	N	Momentul forței "M"	Nm
Impulsul (cantitatea de mișcare) $\bar{p} = m \cdot \bar{v}$	$kg \cdot \frac{m}{s}$	Momentul cinetic "J"	Js
$\bar{F} = \frac{\Delta \bar{p}}{\Delta t}$	N	$\bar{J}_{\parallel} = I \cdot \bar{\omega}$ $\bar{M} = \frac{\Delta \bar{J}}{\Delta t}$	Nm
$F_t = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = m \cdot a_t$	N	$M_{\parallel} = \frac{\Delta(I \cdot \omega)}{\Delta t} = I \cdot \varepsilon$	Nm
Energia cinetică $E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$	J	Energia cinetică $E_c = \frac{I \cdot \omega^2}{2}$	J
Puterea $P = \bar{F} \cdot \bar{v}$	W	Puterea $P = \bar{M} \cdot \bar{\omega}$	W

Aceste sisteme se clasifică în sisteme *rigide, deformabile și fluidice*.

Sistemele de corpuri rigide se referă la corpuri și legături perfect rigide caracterizate prin aceea că distanțele relative dintre elementele care le alătuiesc nu se

modifică în procesul mișcării mecanice. Într-o serie din sistemele actuale această categorie este mai puțin posibil de utilizat.

Sistemele deformabile iau în considerare deformațiile din sistem pe parcursul desfășurării procesului. Analiza materialelor recomandate pentru aceste sisteme și a influențelor deformațiilor din sistem asupra mișcării sunt domenii de interes.

Interacțiunea dintre corpuri implică ideea de evoluție și de conexiune spațială și temporală și se manifestă ca fenomene guvernate de legi fizice. Mărimea fizică care exprimă în mod cantitativ interacțiunea mecanică a corpurilor este forța. Forța – în sens generalizat – caracterizează mărimea, direcția și sensul unei interacțiuni.

În cadrul procesului mecanic, care este parte componentă a sistemului mecatronic (vezi fig.1.19), există diverse variante de fluxuri materiale, energie sau informațional [1.15].

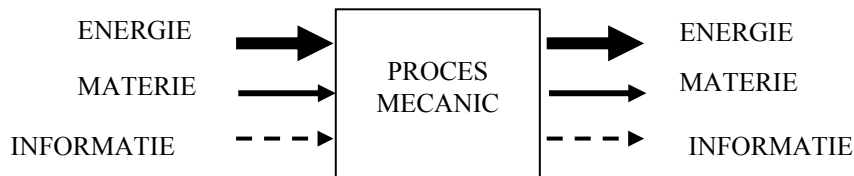


Fig. 1.21 Forme de fluxuri în procesul mecanic

Sistemul mecanic participă în mod direct la procesul mecanic regăsindu-se sub una din formele de prezentare a științei mașinilor (fig.1.22)[1.15].

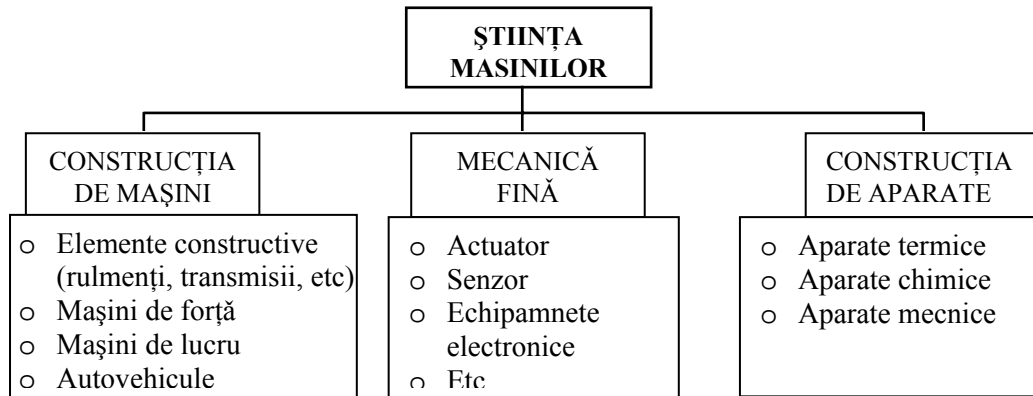


Fig. 1.22 Sistemul mecanic și știința mașinilor

Desfășurarea procesului mecanic are loc pe bază de aport de energie. Energia unui sistem fizic este o mărime de stare caracterizând sistemul într-o stare staționară. Starea unui sistem (este și cazul sistemului mecanic) este definită de totalitatea proprietăților acestuia la un moment dat.

Adeseori în analiza sistemelor mecanice se fac unele ipoteze simplificatoare: absența frecărilor, absența vâscozității pentru fluide, etc. În toate aceste cazuri mișcarea apare ca fenomen pur mecanic. Caracteristic pentru astfel de fenomene este faptul că în tot cursul lor, energia se conservă.

Din energia totală a unui sistem se pot separa anumite părți, numite forme de energie, care depind numai de o anumită clasă de mărimi de stare (mărimi mecanice, electrice, magnetice, etc.). În aceste cazuri, formele de energie capătă denumirea clasei de mărimi de care depinde: energie mecanică, energie electrică, energie magnetică, etc.

Ipotezele simplificatoare nu sunt niciodată riguros realizate în natură astfel că fenomenele mecanice sunt însoțite de fenomene termice. Numai în măsura în care aceste fenomene termice au efecte neglijabile se poate accepta ipoteza simplificatoare. În aceste condiții trebuie să se aibă în vedere că “energia nu apare și nici nu dispare, ea se transformă dintr-o formă în alta în cantități echivalente” sau sub formă matematică:

$$\Delta W_i = W_1 - W_2 = \Delta L + \Delta Q \quad (1.1)$$

unde: W_1 reprezintă energia inițială a sistemului, W_2 reprezintă energia finală a sistemului. Variația lucrului mecanic ΔL respectiv a căldurii ΔQ sunt pozitive atunci când sunt cedate de sistem.

În rezolvarea problemelor legate de analiza sistemelor mecanice se apelează la modul de tratare clasică respectându-se:

- Principiul inerției;
- Principiul independenței acțiunii forțelor;
- Principiul acțiunii și reacțiunii.

Starea reală de mișcare a unui sistem mecanic mobil este stabilită de echilibrul de forțe care acționează asupra lui. Folosind reprezentarea sistemică, se poate preciza că un sistem mecanic mobil este compus din trei componente: elementul motor, transmisia mecanică și elementul condus (consumator) (figura 1.23) [1.8].

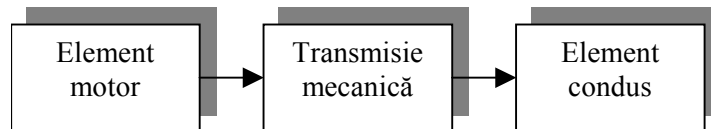


Fig. 1.23 Sistem mecanic mobil

Sistemul astfel definit se presupune că este desmodrom (starea de mișcare a tuturor elementelor este univoc determinată dacă se cunoaște starea de mișcare a elementului conducător) astfel că se definește elementul de referință (în general elementul conducător și mai rar cel de ieșire sau un altul oarecare) ca și *element de reducere*.

Pentru a simplifica expresia energiei cinetice a întregului mecanism, se introduce noțiunea de masă redusă și aceea de moment de inerție redus. În acest mod, studiul dinamic al SA pentru cuplele cinematice conducătoare se reduce la studiul dinamic al elementelor de reducere. Ca element de reducere, se admite rotorul motorului electric, armătura mobilă a electromagnetului, pistonul cilindrului pneumatic și hidraulic, etc.

Prin definiție, masa redusă a unui mecanism este echivalentă cu o masă fictivă care, concentrată într-un punct al unui element numit element de reducere, dezvoltă aceeași energie cinetică pe care o dezvoltă întregul mecanism aflat în mișcare. Pe baza definiției date, se poate scrie relația de calcul pentru masa redusă:

$$m_r = \frac{1}{v_A^2} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i \cdot v_i^2 + J_i \cdot \omega_i^2) \quad (1.2)$$

unde notațiile au semnificația următoare:

- v_A reprezintă viteza de translație a elementului de reducere;
- m_i și J_i reprezintă masa și respectiv momentul de inerție mecanic în raport cu o axă ce trece prin centrul de greutate al unui element "i";
- v_i și ω_i reprezintă viteza centrului de greutate și respectiv viteza unghiulară a elementului "i";
- n reprezintă numărul de elemente mobile ale mecanismului.

Prin definiție, momentul de inerție redus I_r al unui mecanism este echivalent cu momentul de inerție fictiv al unui volant, care rotindu-se ca element de reducere, dezvoltă aceeași energie cinetică pe care o dezvoltă întregul mecanism.

Pe baza definiției, se poate scrie expresia pentru calculul momentului de inerție redus:

$$I_r = \frac{1}{\omega_A^2} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i \cdot v_i^2 + J_i \cdot \omega_i^2) \quad (1.3)$$

unde notațiile au semnificația:

- ω_A reprezintă viteza unghiulară a elementului de reducere;
- m_i și J_i reprezintă masa și respectiv momentul de inerție mecanic în raport cu o axă ce trece prin centrul de greutate al unui element "i";
- v_i și ω_i reprezintă viteza centrului de greutate respectiv viteza unghiulară a elementului "i";
- n reprezintă numărul de elemente mobile ale mecanismului.

Exemplu 1.1

Se consideră schema principal-constructivă a mecanismului generator de traiectorie al unui robot industrial (RI) cu acționare directă ca fiind ceaprezentată în figura 1.24.

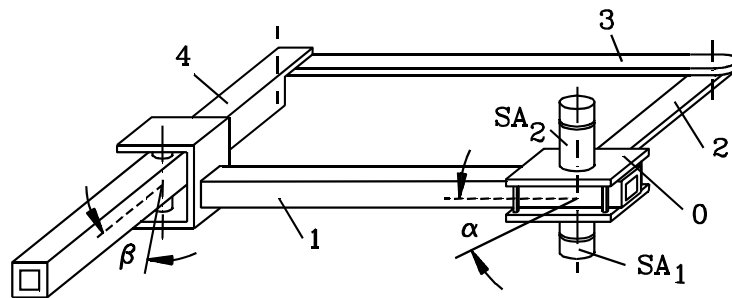


Fig. 1.24 Mecanism generator de traiectorie

SA_1 și SA_2 reprezintă sisteme de acționare din cuplele RI. Schema cinematică a acestui modul este ilustrată în figura 1.25. Cupla cinematică O este multiplă, asigurând două grade de mobilitate: rotația de unghi "α" a elementului "4" în raport cu batiul și

rotația elementului “1”, de unghi “ β ”, în raport cu elementul “4”. Se cere determinarea masei reduse în punctul A al mecanismului paralelogram, la o poziție fixă a elementului “4”.

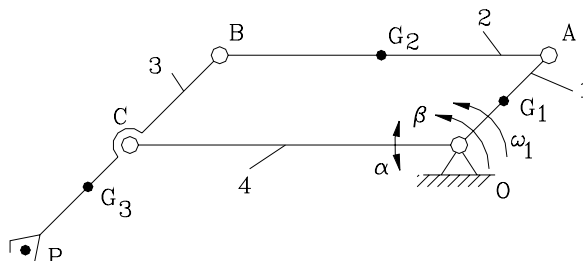


Fig. 1.25 Schema cinematică a mecanismului generator de traiectorie

După egalarea expresiilor energiei cinetice și având în vedere că viteza punctului de reducere v_A este $v_A = \omega_1 \cdot l_A$, se obține după transformări de masa redusă la elementul “1” în punctul “A”:

$$m_r = m_1 \cdot \left(\frac{l_{G_1}}{l_A} \right)^2 + m_2 + m_3 \cdot \left(\frac{l_{G_3}}{l_A} \right)^2 + \frac{J_1 + J_2 + J_3}{l_A^2} \quad (1.4)$$

unde:

- m_i (cu $i=1, 2, 3$) și J_j (cu $j = 1, 2, 3$) au semnificațiile din definiție;
- l_A , l_{G_1} și l_{G_3} reprezintă lungimea elementului “1” respectiv modulele vectorilor de poziție a centrelor de greutate G_1 respectiv G_3 în raport cu cuplele cinematice “O” și “C”;

În scopul simplificării analizei fluxului de putere din sistemele mecanice mobile se utilizează noțiunile de forță redusă și moment redus [1.8].

În concordanță cu cele prezentate, un sistem mecanic mobil se poate înlocui cu element de reducere în vederea studiului dinamic.

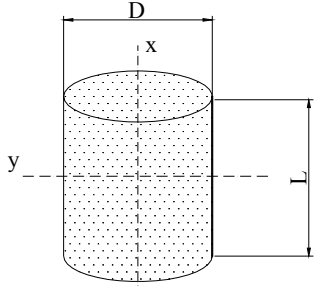
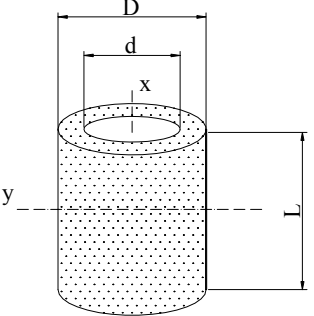
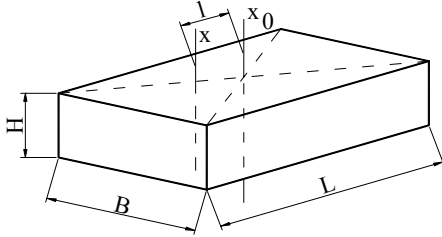
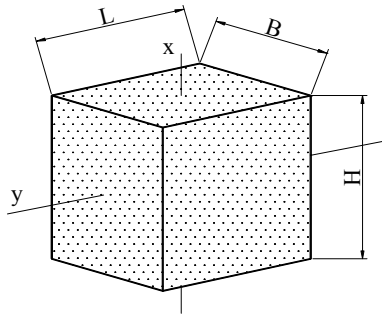
O modalitate de determinare a ecuației de mișcare este cea oferită de ecuațiile lui Lagrange de ordinul 2:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial E_c}{\partial q_k} = Q_k \quad (1.5)$$

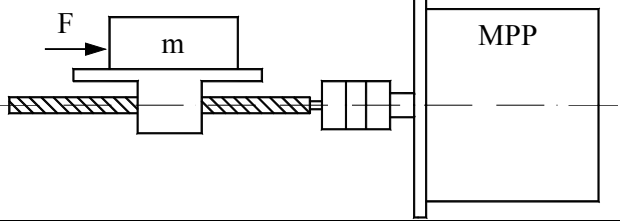
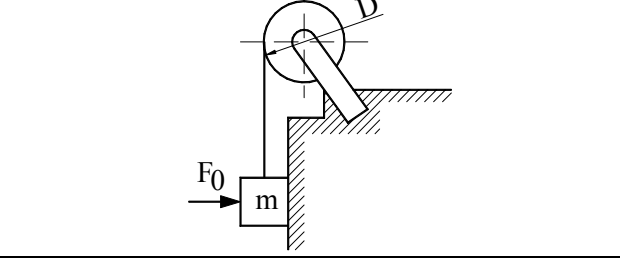
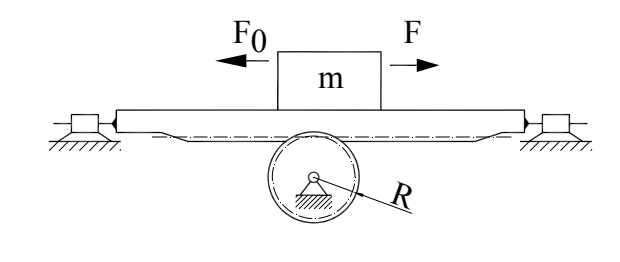
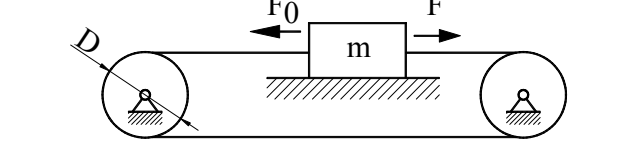
unde notațiile au semnificațiile: E_c – reprezintă energia cinetică a sistemului; q_k – reprezintă coordonata generalizată pentru gradul de libertate “k”; \dot{q}_k - reprezintă viteza generalizată; Q_k – reprezintă forța generalizată.

Aplicabile studiului dinamic pentru sistemul mecanic mobil sunt toate metodele mecanicii teoretice. În tabelul 1.5 se prezintă modalități de calcul a momentelor de inerție pentru câteva corpuri geometrice. În tabelul 1.6 se prezintă relații de calcul pentru momentul de inerție redus la arborele motorului.

Tabelul 1.5

	$J_x = \frac{mD^2}{8} = \frac{\pi}{32} \cdot \rho L D^4$ $J_y = \frac{1}{4} \cdot m \cdot \left(\frac{D^2}{4} + \frac{L^2}{3} \right)$
	$J_x = \frac{1}{8} \cdot m \cdot (D^2 - d^2) =$ $= \frac{\pi}{32} \cdot \rho L \cdot (D^4 - d^4)$ $J_y = \frac{1}{4} \cdot m \cdot \left(\frac{D^2 - d^2}{4} + \frac{L^2}{3} \right)$
	$J_x = J_{x_0} + ml^2 =$ $= \frac{m}{12} \cdot (L^2 + B^2) + ml^2$
	$J_x = \frac{m}{12} \cdot (L^2 + B^2) =$ $= \frac{1}{12} \cdot \rho L B H \cdot (L^2 + B^2)$ $J_y = \frac{m}{12} \cdot (H^2 + B^2) =$ $= \frac{1}{12} \cdot \rho L B H \cdot (H^2 + B^2)$

Tabelul 1.6

	$J_{red} = J_s + m \cdot \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2$
	$J_{red} = J_r + \frac{4m}{D^2}$
	$J_{red} = J_p + \frac{m}{R^2}$
	$J_{red} = 2J_r + \frac{4m}{D^2}$

1.5.1.2. Efecte elastice în sistemele electromecanice

1.5.1.2.1. Elemente elastice

O clasificare a forțelor într-un sistem poate în general nominaliza **forțele conservative** și **forțele neoconservative**.

Forțele conservative derivă dintr-un potențial V conform relației:

$$f = \frac{\partial V}{\partial u} \quad (1.6)$$

în raport cu variabila de stare “u”

Ca și exemple de forțe conservative se pot aminti: forța gravitațională, **forța elastică**, forțele electromagnetice etc.

Efectul elastic al elementelor componente dintr-un sistem poate aparține:

- Unor elemente reale: arcuri, bare, plăci, fluide (pneumatice, hidraulice);

- Unor fenomene specifice din natură: efect elastic aerodinamic, efect elastic gravitațional, efect elastic magnetic, efect elastic electrostatic, efect elastic centrifugal.

Parametrii de bază ai elementelor elastice din categoria arcurilor sunt: încărcarea arcului: forță, moment sau presiune; săgeata - deformația arcului (liniară – f - sau unghiulară - φ) pe direcția încărcării; caracteristica arcului; rigiditatea; constanta arcului; lucrul mecanic acumulat; erorile de caracteristică.

Caracteristica arcului se exprimă printr-una din ecuațiile :

$$P = P(f) \quad (1.7)$$

$$M = M(\varphi) \quad (1.8)$$

și are aspectul celor prezentate în figura 1.26 (1 – neliniară - moale; 2 – liniară; 3 – neliniară dură).

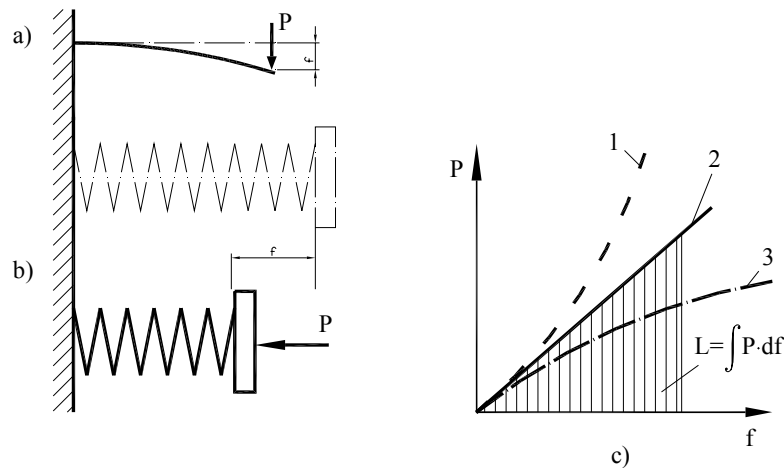


Fig. 1.26 Caracteristicile elementelor elastice

Raportul “ c ” (sau “ c' ”) definit prin relația:

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta f} [N/m] \quad (1.9)$$

$$K_\alpha = \frac{\Delta M}{\Delta \varphi} [Nm/rad] \quad (1.10)$$

se numește rigiditatea arcului. Dacă “ K ” (sau “ K_α ”) are valoare constantă se vorbește despre constanta arcului. Inversa rigidității definește complianța elementului elastic.

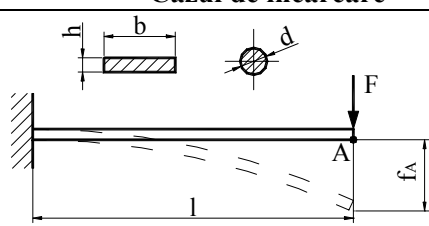
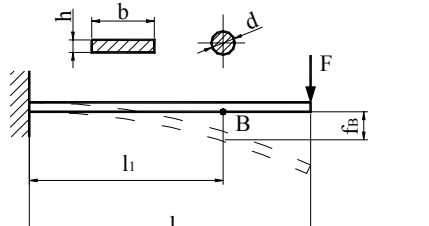
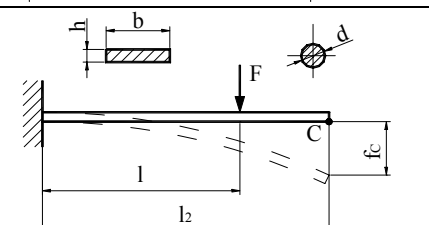
Posibilitățile energetice ale arcurilor sunt puse în evidență de lucrul mecanic acumulat echivalent valoric cu mărimea suprafeței delimitată de caracteristica arcului și axa absciselor (fig.1.26). Considerând o caracteristică liniară și utilizând relațiile de definiție (1.9), (1.10) se obțin relațiile pentru lucrul mecanic:

$$L = \frac{K \cdot f^2}{2} = \frac{F^2}{2 \cdot K} = \frac{F \cdot f}{2} \quad (1.11)$$

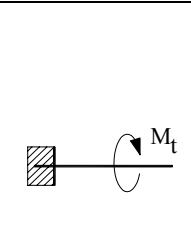
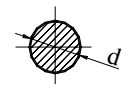
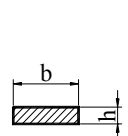
$$L = \frac{K_\alpha \cdot \varphi^2}{2} = \frac{M^2}{2 \cdot K_\alpha} = \frac{M \cdot \varphi}{2} \quad (1.12)$$

În tabelul 1.7 se prezintă relații de calcul pentru calculul deformațiilor unor elemente elastice sollicitate la încovoiere iar în tabelul 1.8 pentru sollicitarea la torsiune.

Tabelul 1.7

Cazul de încărcare	Formula de calcul a săgeții
	$f_A = \frac{4 \cdot F \cdot l^3}{b \cdot h^3 \cdot E}$ $f_A = \frac{64 \cdot F \cdot l^3}{3\pi \cdot d^4 \cdot E}$
	$f_B = \frac{2 \cdot F \cdot l_1 \cdot (3 \cdot l - l_1)}{b \cdot h^3 \cdot E}$ $f_B = \frac{32 \cdot F \cdot l_1^2 \cdot (3 \cdot l - l_1)}{\pi \cdot d^4 \cdot E}$
	$f_B = \frac{3 \cdot F \cdot l^2 \cdot (3 \cdot l_2 - l)}{b \cdot h^3 \cdot E}$ $f_B = \frac{32 \cdot F \cdot l^2 \cdot (3 \cdot l_2 - l)}{\pi \cdot d^4 \cdot E}$

Tabelul 1.8

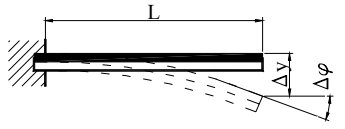
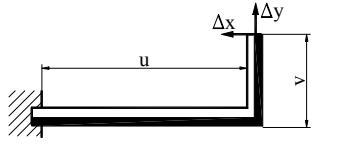
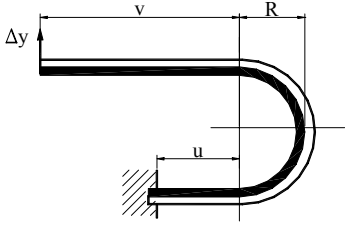
		$\varphi = \frac{32 \cdot M_t \cdot L}{\pi \cdot G \cdot d^4}$	$\varphi \leq \frac{2 \cdot L}{G \cdot d} \cdot \tau_{at}$	$K_\alpha = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot G}{32 \cdot L}$																				
		$\varphi = \frac{M_t \cdot L}{\psi \cdot G \cdot b \cdot h^3}$	$\varphi \leq \frac{\eta \cdot L}{\psi \cdot h \cdot G} \cdot \tau_{at}$	$K_\alpha = \frac{\psi \cdot b \cdot h^3 \cdot G}{L}$																				
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>b/h</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>4</th> <th>8</th> <th>10</th> <th>.....</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>η</td> <td>0.208</td> <td>0.246</td> <td>0.282</td> <td>0.307</td> <td>0.313</td> <td>.....</td> </tr> <tr> <td>ψ</td> <td>0.140</td> <td>0.229</td> <td>0.281</td> <td>0.307</td> <td>0.313</td> <td>.....</td> </tr> </tbody> </table>	b/h	1	2	4	8	10	η	0.208	0.246	0.282	0.307	0.313	ψ	0.140	0.229	0.281	0.307	0.313		
b/h	1	2	4	8	10																		
η	0.208	0.246	0.282	0.307	0.313																		
ψ	0.140	0.229	0.281	0.307	0.313																		

Obs.: G – modulul de elasticitate transversal al materialului; τ_{at} – rezistența admisibilă la torsiune

Arcurile bimetalice sunt întâlnite într- serie de aplicații tehnice: dispozitive de conectare și protecție, termostate pentru controlul și reglarea temperaturii, aparate pentru măsurarea temperaturii, presiunii sau umidității, relee termoelectrice în telecomunicații etc. La modificarea temperaturii ansamblului, cele două lamele tind să se dilate diferit astfel încât rezultă o încovoiere a lamelor înspre materialul pasiv. Această variație de temperatură Δt , echivalentă unui semnal de intrare, determină un semnal care se poate echivala cu (tabelul 1.9):

- o mișcare (deplasare) datorită deformării;
- o forță, datorită tensiunilor interne, dacă forțe exterioare se opun producerii deformării.

Tabelul 1.9

Forma	Δx	Δy	$\Delta \varphi$
	0	$\frac{a \cdot L^2}{h} \cdot \Delta t$	$\frac{2aL}{h} \Delta t$
	$\frac{a \cdot v(2 \cdot u + v)}{h} \cdot \Delta t$	$\frac{a \cdot u^2}{h} \cdot \Delta t$	–
	–	$\frac{a}{h} \left((v-u)^2 + 4R^2 + 2\pi Rv \right) \Delta t$	–

Considerații asemănătoare pot fi prezentate și pentru alte componente ale unui sistem mecanic mobil [1.8].

Efectul elastic electromagnetic este sugerat în figura 1.27. Forțele F_0 – atracție sau respingere – depind între altele de sarcinile electrice ale particulelor și distanța dintre ele (fig.1.27)

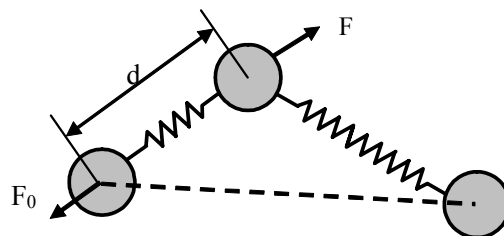


Fig. 1.27 „Elasticitate” electromagnetică

Pentru condensatorul din figura 1.28 se poate determina în mod simplu capacitatea electrică (A - aria comună a armăturilor, ε – permitivitatea mediului dintre armături) :

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{x + x_0} \quad (1.13)$$

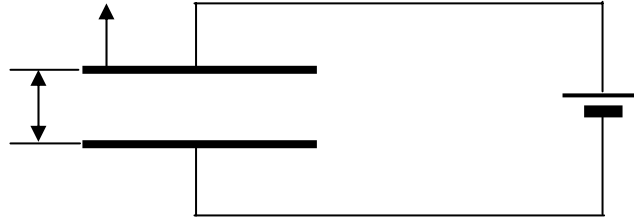


Fig. 1.28 Condensator electric în circuit

Forța electrică dintre armăturile condensatorului (determinabilă din energia acumulată pe capacitate $f = -\frac{\partial W_e}{\partial x}$) este [1.8]:

$$F_e = -\frac{1}{2} \cdot \frac{C \cdot U^2}{x_0 + x} \quad (1.14)$$

Relația anterioară permite determinarea *rigidității* sistemului (ca și efect elastic electrostatic):

$$K_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{C \cdot U^2}{(x_0 + x)^2} \quad (1.15)$$

Din relația anterioară se observă caracterul neliniar al efectului elastic electrostatic.

Pentru un condensator diferențial efectul elastic electrostatic al sistemului se exprimă prin rigiditatea:

$$K_e = \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{\Delta(F_1 - F_2)}{\Delta x} \quad (1.16)$$

Arcul pneumatic este o variantă simplă pentru susținerea elastică a unor sarcini de valori ridicate care acționează asupra unui sistem. Capacitatea ridicată de amortizare îl recomandă pentru sisteme izolatoare ale vibrațiilor.

Considerăm arcul pneumatic cu simplă acțiune, reprezentat în figura 1.29[1.13]. Forța exterioară preluată de arcul pneumatic este definită prin relația:

$$F = p_i \cdot S \quad (1.17)$$

unde p_i este presiunea gazului din interiorul cilindrului iar S este suprafața pistonului.

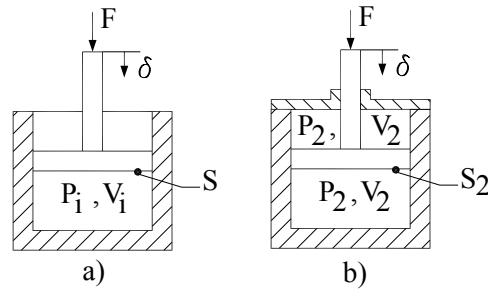


Fig. 1.29 Arc pneumatic

Rigiditatea elementului elastic se definește ca fiind:

$$K = \frac{dF}{d\delta} = S \cdot \frac{dp_i}{d\delta} \quad (1.18)$$

Analiza rigidității elementului elastic pneumatic presupune ca punct de pornire legile gazelor. Considerând acțiunea elementului elastic ca o compresiune adiabatică a gazului, se poate scrie:

$$p \cdot V^n = p_i \cdot V_i^n \quad (1.19)$$

unde V_i este volumul gazului într-o poziție de referință, p_i este presiunea corespunzătoare iar n este coeficientul adiabatic al gazului.

La o deplasare δ a pistonului – echivalentă cu săgeata elementului elastic – modificarea de volum este:

$$V = V_i - S \cdot \delta \quad (1.20)$$

Având în vedere relațiile (1.17), (1.18), (1.19) se poate scrie și:

$$K = \frac{d}{d\delta} \left[p_i S \cdot \left(\frac{V_i}{V_i - S \cdot \delta} \right)^n \right] \quad (1.21)$$

Construcția elementului elastic poate asigura o suprafață S constantă independentă de săgeata δ sau o dependență funcțională de forma $S = S(\delta)$.

Considerând prima variantă ($S = \text{ct.}$), relația (1.20) devine:

$$K = \frac{p_i \cdot S^2 \cdot n}{V_i} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{S}{V_i} \cdot \delta \right)^{n+1}} \quad (1.22)$$

Relația anterioară se poate simplifica printr-o dezvoltare în serie, având în vedere că $x = \frac{S\delta}{V_i} \ll 1$.

Arcul pneumatic se poate realiza și în forma complexă – pentru studiu și constructiv – a arcului cu dublă acțiune și cu auto-amortizare. Amortizarea este obținută prin folosirea unor conducte cu scurgere capilară între cilindrul elementului elastic și rezervoare.

Sistemele de izolare moderne care se includ în domeniul de acțiune al mecatronicii presupun existența unor elemente “inteligente” active care să asigure elasticitatea necesară în corelație cu stabilitatea dinamică a sistemului.

1.5.1.2.2. Modele ale elementelor elastice

R. Hooke publică în 1676 lucrarea “The true theory of elasticity or springiness” introducând primul model de solid deformabil, modelul hookean sau modelul solidului ideal elastic. Se consideră că solidul suferă o deformare proporțională cu forța care a produs-o iar această deformare dispare cu cauza care a generat-o. Se spune că deformarea este reversibilă.

Între tensiunea normală σ , deformarea relativă ε și modulul de elasticitate longitudinală E (modulul lui Young) se stabilește o relație liniară, independentă de timp energia disipată fiind egală cu zero (fig.1.30):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.23)$$

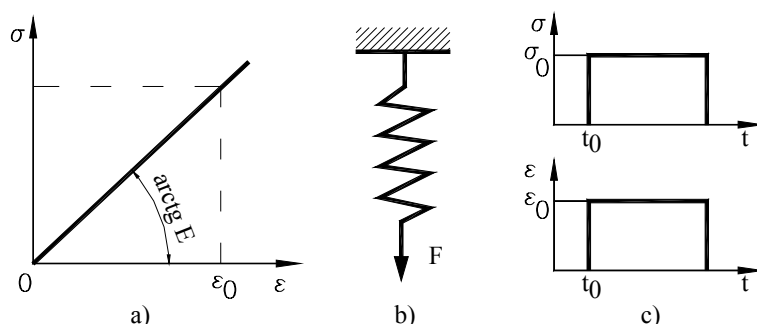


Fig. 1.30 Modelul corpului elastic (a – dependența $\sigma - \varepsilon$; b - mod de reprezentare; c - variația în timp a tensiunii normale și deformației relative

1.5.1.2.3. Modele neelastice

a) Corpuri cu proprietăți plastice

Solidele deformabile care prin descărcare nu revin la forma inițială sunt solidele neelastice. O clasă importantă de corpuri este cea a corpurilor perfect plastice pentru care este valabil modelul Saint-Venant [1.27] (fig.1.31):

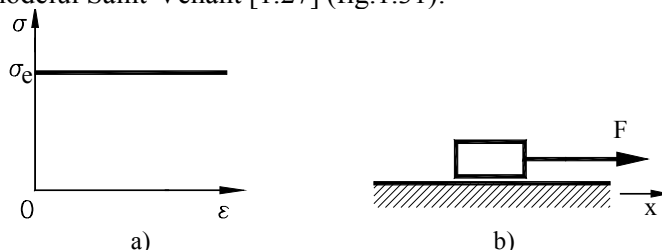


Fig. 1.31 Modelul Saint-Venant

$$\sigma = \sigma_e, \quad \varepsilon > 0 \tag{1.24}$$

Pe baza modelului Hooke și a modelului Saint-Venant, conectate în paralel, se obține modelul corpurilor plastic rigide (fig.1.32):

$$\sigma = \sigma_e + E_1 \cdot \varepsilon; \varepsilon \geq 0 \tag{1.25}$$

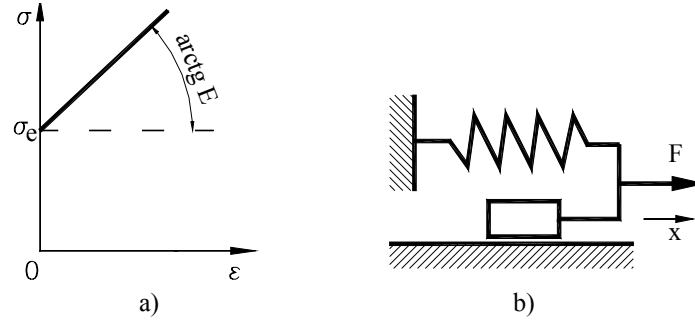


Fig. 1.32 Modelul corpurilor plastic rigide

Prin conectarea în serie a modelelor anterioare se obține modelul corpului elasto-perfect plastic (fig.1.33):

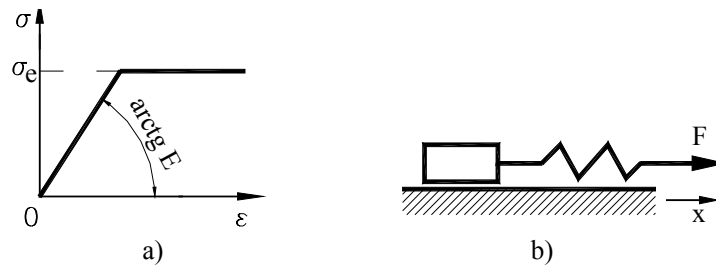


Fig. 1.33 Modelul corpului elasto-perfect plastic

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon & \text{pentru } 0 \leq \varepsilon \leq \frac{\sigma_e}{E} \\ \sigma_e & \text{pentru } \varepsilon \geq \frac{\sigma_e}{E} \end{cases} \tag{1.26}$$

Conectarea în paralel a unui model Hooke cu un model elasto-plastic vom obține modelul corpului elasto-plastic rigid (fig.1.34):

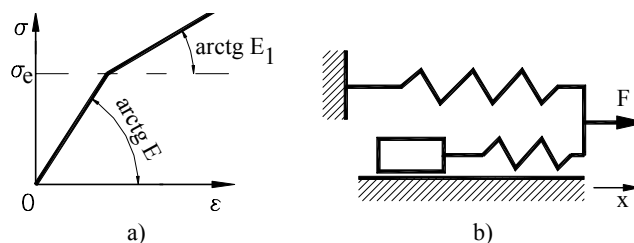


Fig. 1.34 Modelul corpului elasto-plastic

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon & \text{pentru } 0 \leq \varepsilon \leq \frac{\sigma_e}{E} \\ \sigma_e + E_1 \cdot \varepsilon & \text{pentru } \varepsilon \geq \frac{\sigma_e}{E} \end{cases} \quad (1.27)$$

Un număr mare de materiale – în particular polimeri – au un comportament neelastic: dependență de timp și deformație recuperabilă. În figura 1.35 se prezintă influența timpului asupra comportamentului unui material perfect neelastic și a unuia cu proprietăți elastice + neelastice [1.14].

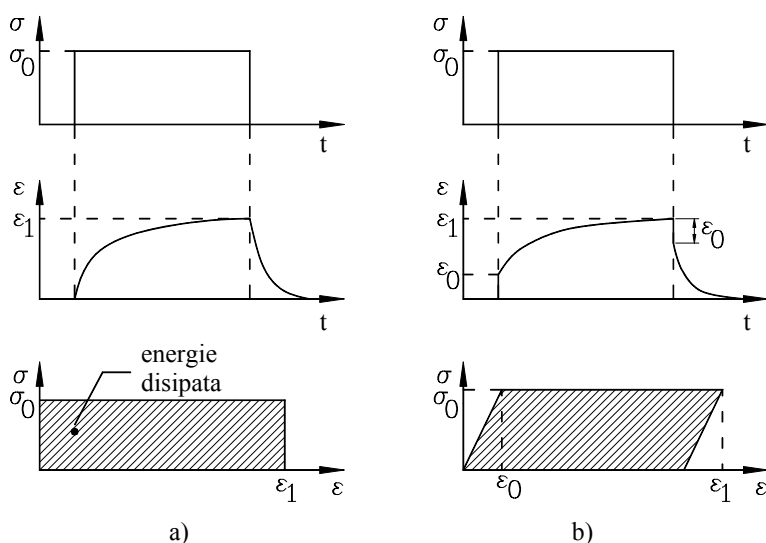


Fig. 1.35 Modelul neelastic funcție de timp

1.5.1.2.4. Rigiditatea echivalentă în sistemele mecanice

În baza celor prezentate anterior în figura 1.36 se prezintă schema de reprezentare a unui element elastic cu rigiditatea K și forța corespunzătoare pentru deplasările x_1, x_2 .

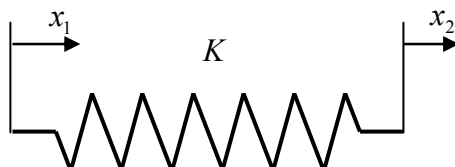


Fig. 1.36 Element elastic cu rigiditatea K

$$F = K \cdot (x_1 - x_2) \quad (1.28)$$

Într-o serie de aplicații este avantajos de a înlocui un sistem elastic cu rigiditățile proprii printr-un singur element elastic care încorporează caracteristicile sistemului inițial. Se prezintă în continuare câteva din echivalările curente:

- Echivalarea a două elemente elastice în paralel cu un singur element (fig.1.37).

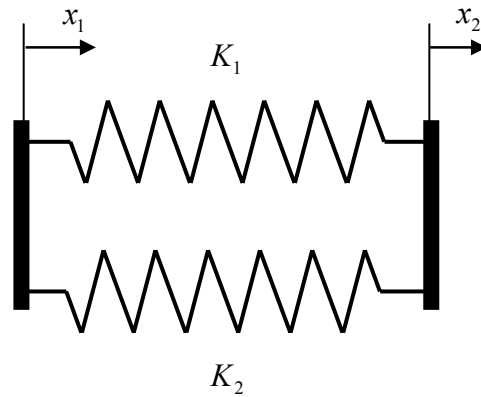


Fig. 1.37 Două elemente elastice în paralel

$$K_e = K_1 + K_2 \quad (1.29)$$

- Echivalarea a două elemente elastice în serie cu singur element (fig.1.38)

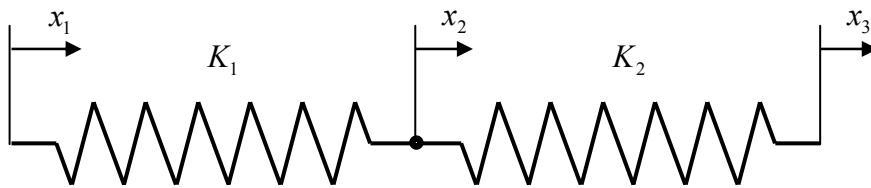


Fig. 1.38 Două elemente elastice în serie

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \quad (1.30)$$

- Doi arbori dintr-o transmisie cu roți dințate (fig.1.39). Cei doi arbori au rigiditățile K_1 și K_2 și sunt conectați printr-o transmisie cu roți dințate cu raportul de transmitere i . Considerând transmisia perfect rigidă, se poate pune problema determinării rigidității echivalente a celor doi arbori paraleli.

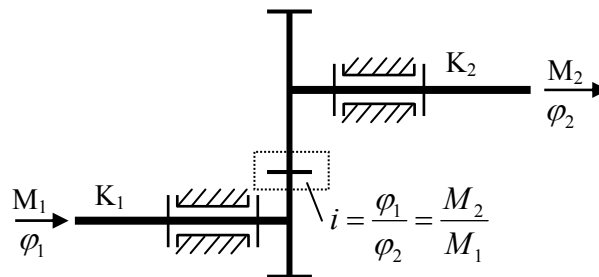


Fig. 1.39 Arbori în serie dintr-o transmisie cu roți dințate

Se poate demonstra că rigiditatea echivalentă este:

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{K_1} + \frac{i^2}{K_2} \quad (1.31)$$

- Două elemente elastice conectate printr-un balansier (fig.1.40)

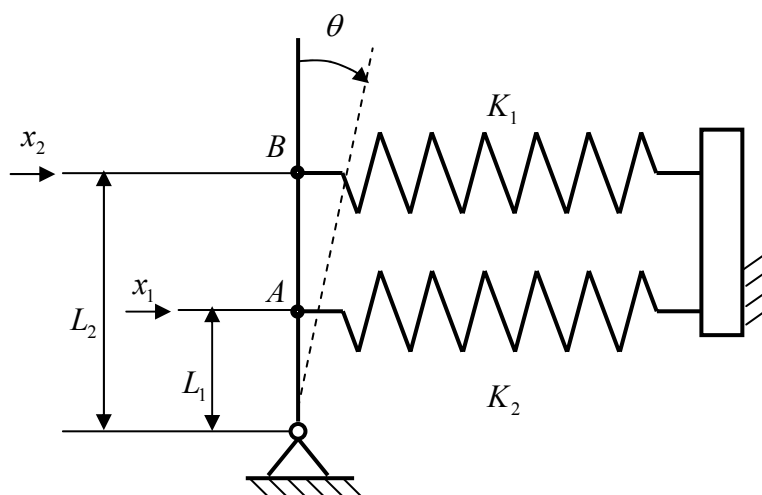


Fig. 1.40 Două elemente elastice conectate printr-un balansier

Considerând "A" punctul de echivalare a sistemului elastic din figura 1.40 cu un singur element elastic, se poate obține rigiditatea echivalentă:

$$K_e = K_1 + K_2 \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2 \quad (1.32)$$

1.5.1.3. Comportamentul de amortizare în sistemele electromecanice

1.5.1.3.1. Efectul de amortizare

Efectul de amortizare se identifică cu orice efect din natură care tinde să reducă amplitudinea oscilațiilor dintr-un sistem [1.41]. În sistemele tehnice acest efect poate fi utilizat cu un scop util, cel precizat anterior, dar poate să se manifeste și cu efect perturbator: efecte de frânare în sistemele mecanice mobile, efect de histereză asociat cu solicitare ciclică în materiale etc.

Dispozitivele utilizate pentru înlăturarea efectului dăunător al vibrațiilor poartă denumirea de amortizoare. O clasificare a acestor dispozitive după destinația lor este prezentată în figura 1.41

În cadrul sistemelor tehnice efectul de amortizare se poate modela matematic printr-o forță sincronă cu viteza, de aceeași direcție și sens contrar:

$$\bar{F} = -C \cdot \bar{v} \quad (1.33)$$

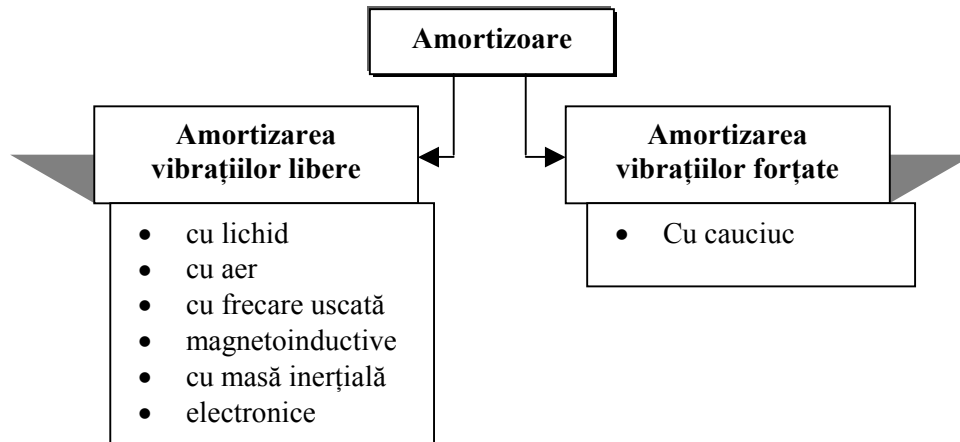


Fig. 1.41 Clasificarea amortizoarelor

Sub forma cea mai simplă un amortizor cu lichid este compus din două plăci paralele de arie “S” așezate separat la distanța “h”, având interpus între ele un strat de fluid vâscos și mobile una față de alta cu anumită viteză relativă (fig.1.42).

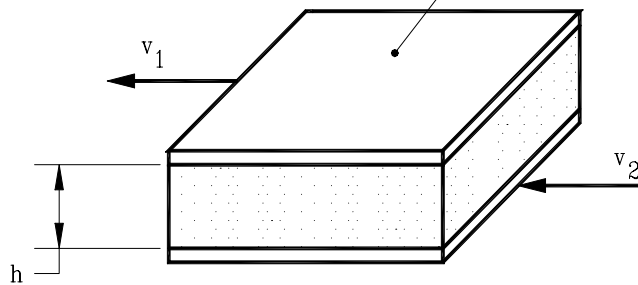


Fig. 1.42 Amortizor cu lichid

Forța de amortizare se datorează frecării fluide și interacțiunii moleculare dintre plăci și lichid. Coeficientul de amortizare este dat de relația:

$$c = \frac{F_a}{v} = \frac{S \cdot \eta}{h} \quad (1.34)$$

unde: “S” reprezintă suprafața fiecărei plăci [m²]; “η” este coeficientul de vâscozitate dinamică [Ns/m²]; “h” este grosimea stratului de fluid vâscos [m]; $v = v_1 - v_2$ este viteza relativă dintre cele două plăci [m/s]. Acest tip de amortizor se întâlnește la aparatele de control activ, aparatele de cântărit, pick-up, servomotoare cu mișcare incrementală etc.

Din punct de vedere practic este avantajoasă utilizarea unor suprafețe cilindrice pentru modelarea amortizorului (fig.1.43). Coeficientul de amortizare este:

$$c = \frac{2\pi \cdot R^3 \cdot \eta \cdot l}{h} \left[\frac{Nms}{rad} \right] \quad (1.35)$$

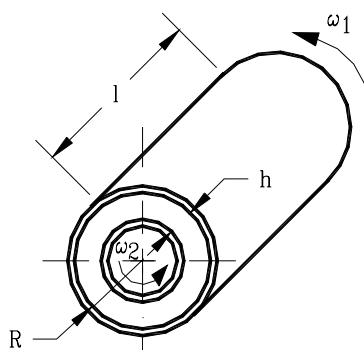


Fig. 1.43 Amortizor cilindric

Dezavantajul principal al acestor amortizoare este sensibilitatea ridicată la variațiile mari de temperatură.

Amortizoarele cu aer se utilizează pentru atenuarea unor vibrații de amplitudine redusă, ca de exemplu în echipamentele periferice de calcul, magnetofoane, aparatură de bord, aparate foto, aparate pentru prelucrarea datelor, aparate medicale etc. Aceste tipuri de amortizoare prezintă avantajul unui gabarit redus, prin eliminarea sistemului de etanșare și menținerea aproximativ constantă a vâscozității aerului la variația temperaturii. Din punct de vedere constructiv aceste amortizoare pot fi cu piston, cu palete, cu membrană sau tub silfon. Amortizoarele cu aer au o amortizare care nu este riguros proporțională cu viteza de oscilație.

Amortizoarele magnetoinductive își bazează funcționarea pe curenții turbionari care sunt generați într-un element mobil – ramă, disc, sector general din aluminiu – și care se rotește într-un camp magnetic creat de un magnet permanent. Soluția unui astfel de amortizor cu disc este prezentată în figura 1.44.

Avantajul amortizoarelor magnetoinductive constă în obținerea unor forțe de amortizare direct proporționale cu viteza de oscilație a sistemului mobil. În plus, coeficientul de amortizare nu depinde de temperatură.

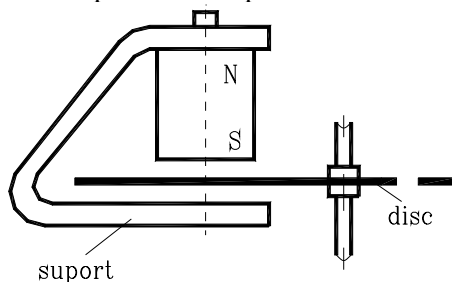


Fig. 1.44 Amortizor magneto-inductiv

1.5.1.3.2. Modele ale corpurilor vâscoase

Un parametru extrem de important care trebuie să fie luat în considerare este factorul timp. Pentru descrierea fenomenelor care depind de parametrul timp, se utilizează în general o relație între tensiuni și deformații descrisă sub forma:

$$f(\sigma, \varepsilon, t) = 0 \tag{1.36}$$

Mediul analizat se consideră alcătuit dintr-o componentă perfect elastică și o componentă cu proprietăți vâscoase. Modelul lui Hooke este completat cu modelul lui Newton pentru fluide vâscoase. Modelul lui Newton este reprezentat printr-un amortizor și este definit ca o relație liniară între tensiune și viteza de deformare:

$$\sigma(t) = \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t) \tag{1.37}$$

unde η este coeficientul de vâscozitate [1.27]. În [1.11] relația pentru viteza pistonului (viteza de variație a deformăției) se definește ca fiind:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{3\eta} \tag{1.38}$$

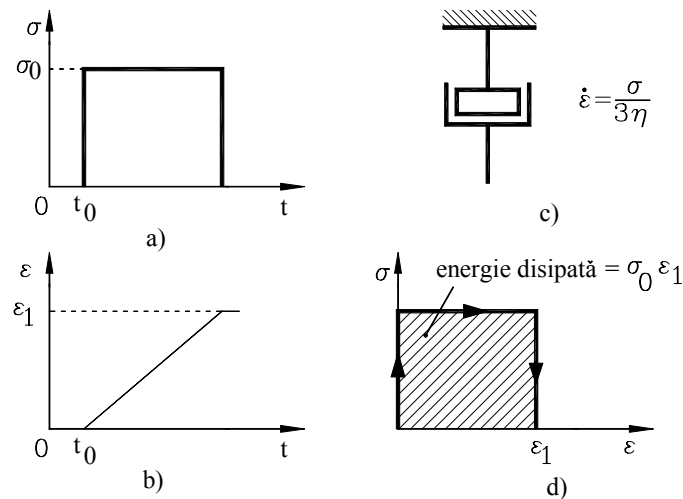


Fig. 1.45 Modelul lui Newton

Modelul lui Kelvin – Voigt se obține prin legarea în paralel a unui model Hooke cu un model Newton.

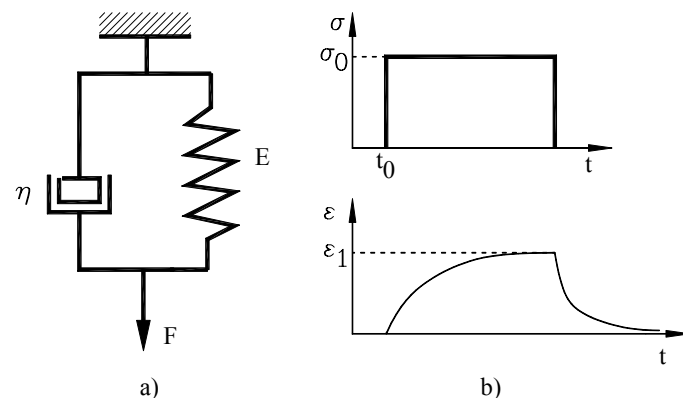


Fig. 1.46 Modelul Kelvin – Voigt

Acestui model îi va corespunde o lege constitutivă de forma:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}(t) = E \cdot \left(\varepsilon + t_0 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (1.39)$$

unde $t_0 = \frac{\eta}{E}$ reprezintă timpul de întârziere sau de fluaj.

Deformația specifică va avea o variație de forma:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \quad (1.40)$$

Prin legarea în serie a unui model Hooke cu un model Newton se obține modelul Maxwell căruia îi corespunde legea constitutivă:

$$\varepsilon(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E} + \frac{\sigma(t)}{\eta} = \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{\sigma(t)}{t_0} + \frac{d\sigma}{dt} \right) \quad (1.41)$$

unde t_0 poartă denumirea de timp de relaxare.

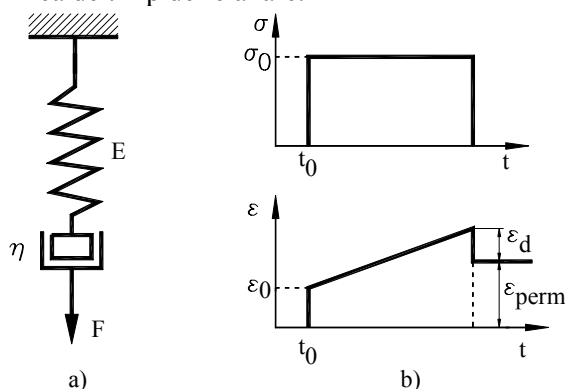


Fig. 1.47 Modelul Maxwell

Pornind de la modelele Kelvin și Maxwell simple, la care se asociază modelele Hooke și Newton, putem construi și alte modele de corpuri vâscoelastice, utile pentru corpuri particulare. Modelul cu trei parametri (grupare serie a unui model Kelvin și a unui model Hooke), modelul Zener, modelul Burgers și altele sunt exemple reprezentative [1.27].

Modelarea sub aspectul celor prezentate anterior se utilizează în cele mai diverse domenii. O confirmare a celor spuse prezentăm în continuare modalități de modelare a miocardului uman.

Modelul Hill - Maxwell cu trei elemente comportă:

- un element contractil E_c care reprezintă ansamblul sarcom a unei fibre musculare și prin urmare partea activabilă a mușchiului care crează constrângerea contractilă;
- un element serial E_s care permite punerea în evidență a deformațiilor izovolumice;

- un element paralel E_p care permite controlul deformațiilor extreme a miocardului și astfel să se împiedice o contracție sau o relaxare prea importantă.

Cele două elemente E_p și E_s sunt elemente elastice dar nu este obligatoriu să fie liniare.

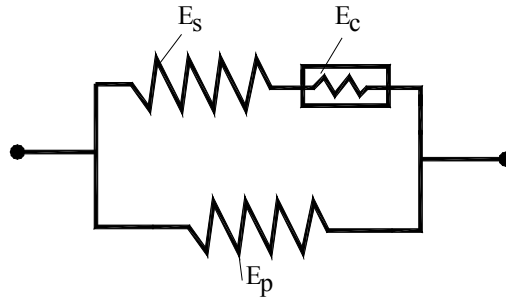


Fig. 1.48 Modelul Hill – Maxwell

1.5.1.3.3. Echivalențe ale elementelor vâscoase multiple

Conectarea în paralel a două sau mai multe elemente amortizoare permite determinarea unui element echivalent care va avea coeficientul de amortizare echivalent (fig.1.49):

$$C_e = C_1 + C_2 \quad (1.42)$$

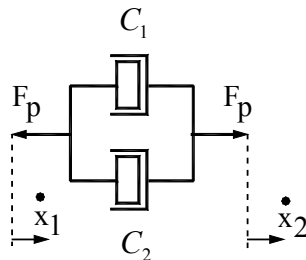


Fig. 1.49 Echivalarea a două elemente vâscoase

Ecuția noului element amortizor pentru cazul unei mișcări de translație va fi:

$$F_p = C_e \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (1.43)$$

și respectiv pentru cazul mișcării de rotație:

$$M_p = C_e \cdot (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) \quad (1.44)$$

Legarea în serie a două amortizoare (fig.3.13) permite definirea unui element echivalent cu constanta de amortizare:

$$C_e = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (1.45)$$

Ecuția noului element amortizor va fi pentru cazul mișcării de translație:

$$F_s = C_e \cdot (\dot{x}_3 - \dot{x}_1) \quad (1.46)$$

și respectiv pentru cazul mișcării de rotație:

$$M_s = C_e \cdot (\dot{\phi}_3 - \dot{\phi}_1) \quad (1.47)$$

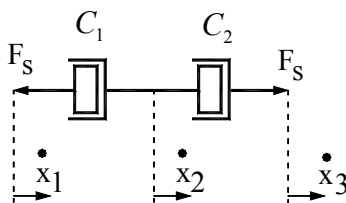


Fig. 1.50 Echivalarea pentru două elemente de amortizare înseriate

Relații asemănătoare se pot obține și pentru alte structuri mecanice. Pentru sistemul mecanic mobil din figura 1.39 coeficientul de amortizare echivalent este:

$$C_e = C_1 + \frac{C_2}{i^2} \quad (1.48)$$

1.5.1.4. Efecte termice în sistemele mecatronice

Așa cum arătam anterior, procesele mecanice sunt însoțite de *efecte termice* dezvoltate la nivelul unor componente ale sistemului sau efectiv ca un proces tehnologic util. Pierderile de putere în hipersistemul mecatronic se pot defini ca *pierderi mecanice* (pierderi prin frecare uscată, pierderi prin frecare fluidă), pierderi prin efect Joule într-un rezistor electric, pierderi electromagnetice (prin histereză, prin curenți Foucault) [1.8]. Modalitățile de calcul sunt specifice termodinamicii.

Schema termică echivalentă a unui sistem omogen (cu un singur nod) este prezentată în figura 1.51.

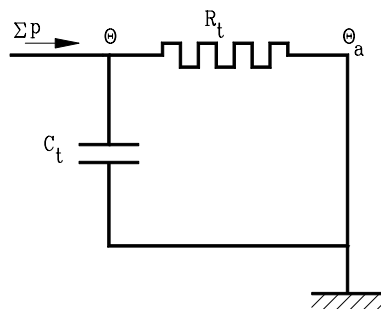


Fig. 1.51 Schema cu un nod

Pentru sisteme neomogene creșterea de temperatură se poate obține pe baza schemei cu două noduri [1.8].

Prin analogie cu componentele electrice semnificația notațiilor este următoarea:

- R_t este rezistența termică sistem – mediu ambiant (de ex: bobină – mediu etc.) [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];
- C_t este capacitatea termică a sistemului (de ex: capacitatea termică a carcasei servomotorului etc.) [$\text{J}/^{\circ}\text{C}$];
- θ [$^{\circ}\text{C}$] este temperatura sistemului analizat (de ex.: rezistorul etc.) iar θ_a este temperatura mediului ambiant.

Ecuția diferențială care descrie funcționarea schemei anterioare este :

$$\sum(p) = C_t \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_a}{R_t} \quad (1.49)$$

Introducând creșterea de temperatură a sistemului față de mediu ca fiind $\Delta\theta$, soluția ecuației anterioare este:

$$\Delta\theta = \left(\sum p\right) \cdot R_t \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1.50)$$

unde $\tau = RC$ poartă denumirea de constantă termică. Constanta de timp termică ia în considerare *inerția termică* a piesei analizate.

Transferul de căldură între două puncte sau între două porțiuni ale unui sistem în dezechilibru termic se efectuează fie prin *convecție*, *conducție* sau *radiație* fie în general prin două sau prin toate cele trei fenomene simultan [1.8].

Transferul de căldură prin *convecție* se realizează prin curenți de substanță încălzită în contact cu corpul cu temperatură mai înaltă și reprezintă un caz de propagare a căldurii în fluide. Mișcarea fluidului este fie liberă, fie forțată. Schimbul de căldură între corpul cald și fluid se efectuează prin conducție și urmează legile transferului de căldură între două medii separate printr-o suprafață de discontinuitate.

Transferul de căldură prin *conducție* se face, fie în masa unui corp când între două puncte sau între două regiuni există o diferență de temperatură, fie între două corpuri în contact, care nu se găsesc la aceeași temperatură și este caracterizat prin lipsa unei deplasări de substanță. Fenomenul este caracteristic corpurilor solide, lichide sau gazoase.

Căldura pe care o primește un corp ridicându-și temperatura se transformă în *energie radiantă*. Radiațiile emise se propagă în spațiu și dacă sunt absorbite de un alt corp acesta se încălzește. Aceste radiații emise de corpuri și dependente de temperatură se numesc radiații termice.

1.5.2. Sub-sistemul electric

Sub-sistemul electric are la bază trei parametri fundamentali: sarcină, curent și tensiune. Se face deosebire între două categorii de sisteme: sisteme electrice de putere – curenți intensi și sisteme de comunicații – proiectate pentru transferul de informație (semnale cu energie electrică de valoare redusă).

Sistemele de comunicații – memorare informație, procesare și transmitere semnal corespund ariei de activitate din *electronică*.

Sistemele electrice de putere fac referință la vehicularea energiei electrice de valori ridicate. Convertirea energiei electrice în energie mecanică cu anumiți parametri impuși este una din funcțiile acestor sisteme.

Sistemele electrice sunt parte integrantă a sistemelor mecatronice bazându-se pe o largă ofertă de componente: motoare și generatoare, senzori, circuite, relee, siguranțe, contactoare, circuite integrate etc.

În tabelul 1.10 sunt date principalele mărimi derivate care intervin în studiul sistemelor electrice și unitățile de măsură corespunzătoare.

Tabelul 1.10

Nr. crt.	Mărimea fizică		Unitatea de măsură	
	Denumirea	Simbol	Denumirea	Simbol
1	Tensiunea electrică	U	volt	V
2	Rezistență electrică	R	ohm	Ω
3	Reactanța	X	ohm	Ω
4	Impedanța	Z	ohm	Ω
5	Capacitate electrică	C	farad	F
6	Inductanța	L	henry	H
7	Putere activă	P	watt	W
8	Putere reactivă	Q	var	VAR
9	Putere aparentă	S	voltamper	VA
10	Energie activă	W_a	wattoră	Wh
11	Energie reactivă	W_r	varoră	VARh
12	Densitatea curentului electric	J	amper pe metru pătrat	A/m^2
13	Sarcina electrică	Q, q	coulomb	C
14	Intensitatea câmpului electric	E	volt pe metru	V/m
15	Potențial electric scalar	V	volt	V
16	Inducție electrică	D	coulomb / metru pătrat	C/m^2
17	Flux electric	Ψ	coulomb	C
18	Rezistivitate	ρ	ohm-metru	Ωm
19	Conductivitate electrică	σ	-	$1/(\Omega m)$
20	Inducția magnetică	B	tesla	T

În cadrul aplicațiilor practice se utilizează adeseori multiplii sau submultiplii unităților fundamentale sau derivate (unități tolerate). În tabelul 1.11 se prezintă semnificația notațiilor care definesc multiplii sau submultiplii unei unități.

Tabelul 1.11

Simbol	Denumire	Valoare	Simbol	Denumire	Valoare
G	giga	10	d	deci	10^{-1}
M	mega	10^6	c	centi	10^{-2}
k	kilo	10^3	m	mili	10^{-3}
da	deca	10	μ	micro	10^{-6}
			n	nano	10^{-9}
			p	pico	10^{-12}

Formule și relații de calcul pentru circuitele electrice fundamentale sunt prezentate în tabelul 1.12.

Tabelul 1.12

Nr.crt.	Mărimea	U.M.	Notație / Valori / Formule
1	Sarcina electrică	$A \cdot s$ sau C (Coulomb)	Q $Q = \int i \cdot dt$ $Q = I \cdot t$
2	Sarcina electronului	$A \cdot s$	$e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
3	Concentrația electronilor în metale	cm^{-3}	$n = 10^{23} \text{ cm}^{-3}$
4	Intensitatea curentului electric	A (Ampere)	i, I $i = \frac{dQ}{dt}; I = \frac{Q}{t}$
5	Densitatea curentului electric	A / mm^2	$J = \frac{di}{dA}$ $J = \frac{I}{A}$
6	Intensitatea câmpului electric	V / m	$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{Q}$ sau în câmp omogen $E = \frac{U}{l}$
7	Tensiunea electrică	V (Volt)	$U_{AB} = \int_A^B \bar{E} \cdot d\bar{s}$
8	Rezistivitatea electrică	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{m}$ sau $\Omega \cdot m$	ρ
9	Rezistența unui conductor	Ω (Ohm)	$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$
10	Rezistența unui conductor dependentă de temperatură	Ω (Ohm)	$R_{(\Theta)} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\Theta)$ $\Delta\Theta = \Theta_2 - \Theta_1$ α_{20} – coeficientul de temperatură la 20°C
11	Rezistența electrică a unei porțiuni de circuit	Ω (Ohm)	$R = \frac{U_{AB}}{I}$

(continuare tabelul 1.12)

12	Rezistența electrică echivalentă pentru o conexiune serie	Ω (Ohm)	$R = \sum_i R_i$
13	Rezistența electrică echivalentă pentru o conexiune paralelă	Ω (Ohm)	$\frac{1}{R} = \sum_j \frac{1}{R_j}$
14	Energia electrică	Ws (Watt.secunda)	$W = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot i \cdot dt$ $W = U \cdot I \cdot t$
15	Puterea electrică	W (Watt)	$P = \frac{W}{t} = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$
16	Capacitatea unui condensator plan	$\frac{A \cdot s}{V} = F$ (Farad)	$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$ $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$
17	Capacitatea electrică echivalentă pentru o conexiune serie	F	$\frac{1}{C} = \sum_j \frac{1}{C_j}$
18	Capacitate electrică echivalentă pentru o conexiune paralelă	F	$C = \sum_j C_j$
19	Inductivitatea unei bobine	H (Henry) $\frac{V \cdot s}{A} = H$	$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$
20	Energia electrică acumulată într-un condensator	Ws	$W_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C}$

(continuare tabelul 1.12)

21	Energia electrică acumulată într-o bobină	W_s	$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$
22	Tensiunea electrică la bornele unei bobine		$u_L(t) = L \cdot \frac{di}{dt}$
23	Curentul electric printr-o bobină		$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int u(t) \cdot dt$
24	Tensiunea electrică la bornele unei capacități electrice		$u_C(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i(t) \cdot dt$
25	Curentul electric printr-o capacitate		$i(t) = C \cdot \frac{dU}{dt}$
26	Reactanță inductivă	Ω (Ohm)	$X_L(\omega) = j \cdot \omega \cdot L = \omega \cdot L \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$
27	Reactanță capacitivă	Ω (Ohm)	$X_C(\omega) = \frac{1}{j\omega \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}$
28	Impedanța	Ω (Ohm)	$Z(\omega) = Z \cdot e^{j\varphi} = \frac{U}{I} \cdot e^{j\varphi}$ $Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ $\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$

Legile teoriei macroscopice a fenomenelor electromagnetice – legile câmpului electric, legile curenților și sarcinilor electrice, legea inducției electromagnetice, legile câmpului magnetic - sunt elemente de bază în analiza sistemelor electromagnetice.

Noțiunile de electrocinetică - prima teoremă a lui Kirchhoff (pentru un nod de rețea electrică), a doua teoremă a lui Kirchhoff (pentru un ochi de rețea electrică), teorema lui Helmholtz-Thevenin, teorema lui Norton etc. – permit analiza circuitelor electrice din hipersistemul mecatronic.

În regim nestaționar, problemele de electrodinamică se rezolvă apelând la legile teoriei macroscopice ale fenomenelor electrice și magnetice, în cea mai generală formă alor [1.28].

1.5.3. Sub-sistemul de calcul

Sub-sistemul de calcul (computer systems) este alcătuit din două subsisteme principale [1.2]:

- Sub-sistemul hardware (echipamente fizice componente);

- Subsistemul software (programe și structuri de date).

Componenta software conține instrucțiunile de operare și definește algoritmi necesari pentru controlul sistemului. *Componenta hardware* este uzual formată pe baza circuitelor și dispozitivelor specifice: circuite logice, bistabile, timere, circuite de ceas, circuite integrate, microcontrolere și microprocesoare.

Structura de bază a calculatorului secvențial cuprinde următoarele unități funcționale (fig.1.52):

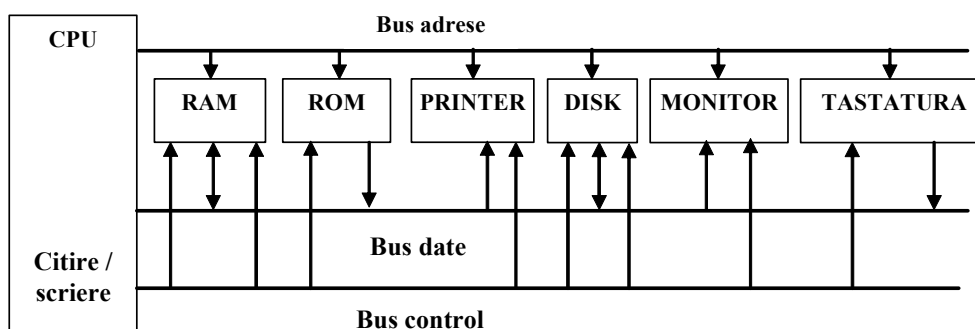


Fig. 1.52 Sistemul de calcul

- Unitatea de intrare (UI) care permite introducerea informației în calculator, realizând conversia reprezentării informației de la forma externă, accesibilă omului (numere, texte, imagini), în format intern binary. Ca unități de intrare se pot enumera: tastatura, mouse-ul, creionul optic etc.

- Unitatea de memorare (M) reprezintă unitatea funcțională a unui calculator în care se stochează informația (date și programe). Memoria internă păstrează programele și datele ce se utilizează la un moment dat și se realizează pe bază de circuite electronice de memorie. Uzual se utilizează două tipuri de memorie: RAM (Random Access Memory – memorie cu acces aleatoriu, informațiile sunt pierdute dacă alimentarea sistemului de calcul este oprită) și ROM (Read Only Memory – memorie remanentă ce poate fi doar citită). Memoria remanentă (nevolatilă – informațiile nu se pierd la căderea tensiunii de alimentare) se poate realiza în trei tipuri: sub forma clasică ROM fixată din fabricație, nevolatilă programabilă o singură dată (PROM) și nevolatile reprogramabile (REPROM sau EPROM). Memoria externă păstrează toate celelalte programe și date ce trebuie să se afle la dispoziția sistemului de calcul și se materializează prin echipamente fizice de memorare (bandă magnetică, discuri magnetice etc.).

- Unitatea de ieșire asigură transmiterea în exteriorul sistemului de calcul a rezultatelor prelucrărilor. Dacă rezultatele sunt destinate operatorului uman, unitatea de ieșire asigură conversia din formatul binar în format direct accesibil omului (cifre, texte, imagine). Dacă rezultatele sunt destinate unor echipamente periferice, unitatea de ieșire asigură acționarea acestor echipamente pe baza semnalelor corespunzătoare.

- Unitatea centrală de prelucrare (CPU) (Central Processing Unit) care are rolul de a executa programul memorat în memorie. Comunicația între CPU, memorie și periferice se realizează prin intermediul magistralelor (bus) de adrese, date, control.

Unitatea centrală cuprinde un processor format dintr-o unitate de comandă și o unitate de calcul (unitatea aritmetică și logică).

În ultimii ani partea de comandă a unui sistem mecatronic a suportat transformări majore. Ele se referă în principal la creșterea ponderii comenzilor în logică programată, la o flexibilitate funcțională ridicată, consumuri de energie reduse, volum și greutate minime, fiabilitate mărită cu posibilități de implementare a unor strategii de comandă performante. Soluțiile de comandă în logică programată implică utilizarea de structuri digitale complexe ca circuite VLSI specializate (ASIC – *Application Special Integrated Circuit*), microprocesoare (μ P) de uz general sau cu funcții speciale, microcontrolere, procesoare de semnal (DSP), automate programabile (PLC – *Programmable Logic Controller*).

Microprocesorul nu conține memorie RAM, ROM și nu are porturi (I/O) intrare / ieșire înglobate pe circuit (cip). Un proiectant ce utilizează un astfel de dispozitiv trebuie să adauge memorie, porturi I/O, timere / numărătoare externe pentru a putea face sistemul funcțional [1.30].

Un microcontroler (μ C) are o unitate centrală CPU și o anumită cantitate de memorie RAM, ROM, porturi I/O, timere/numărătoare și alte module utile, toate montate pe același cip (fig.1.53) [1.2].

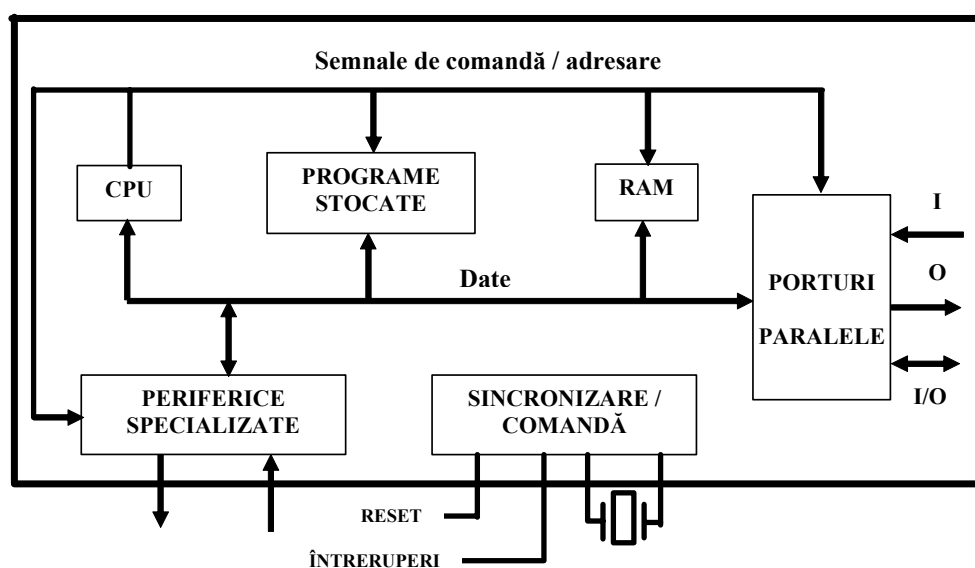


Fig. 1.53 Microcontrolerul

În principiu proiectul nu are nevoie de memorie suplimentară sau porturi I/O externe. În acest mod microcontrolerele sunt ideale în foarte multe aplicații în care costul și spațiul sunt esențiale. Din punct de vedere al apartenenței la domeniul electronic – analogic și digital – microcontrolerul este un hibrid prin faptul că include atât elemente analogice (eșantionare – memorare, convertoare A/D, comparatoare, referințe de tensiune) cât și elemente digitale complex specifice microprocesoarelor și

sistemelor de dezvoltare. *Diferența esențială pentru un microcontroler în comparație cu un circuit analogic sau digital este faptul că acesta pentru a funcționa trebuie programat.*

1.5.4. Sub-sistemul informațional

Sub-sistemul informațional include toate aspectele referitoare la transmiterea informației, de la procesarea semnalelor până la sistemul de control și tehnici de analiză. În acest concept sunt incluse patru discipline fundamentale: sisteme de comunicare, sistemul procesare semnal, sisteme de control și metode numerice.

În figura 1.54 se prezintă concentrat modul de transfer al unei informații în diversele circuite electrice [1.7]. Un mod de distribuire și comunicare cu sistemul central de calcul este ilustrat în figura 1.55 [1.33].

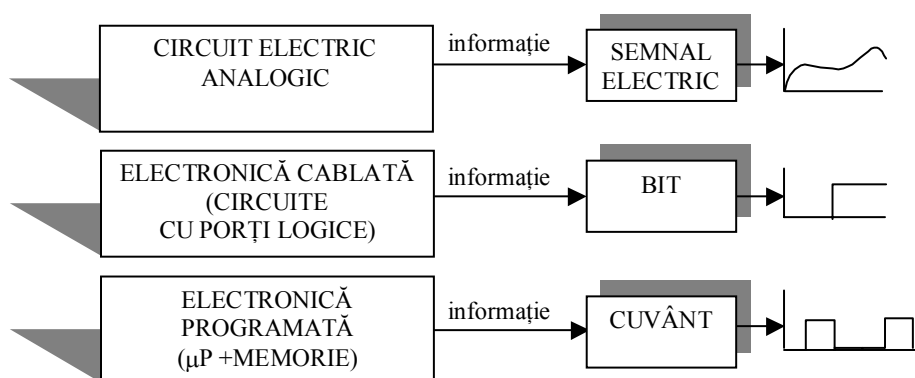


Fig. 1.54 Modalități de transfer a informației în circuitele electrice

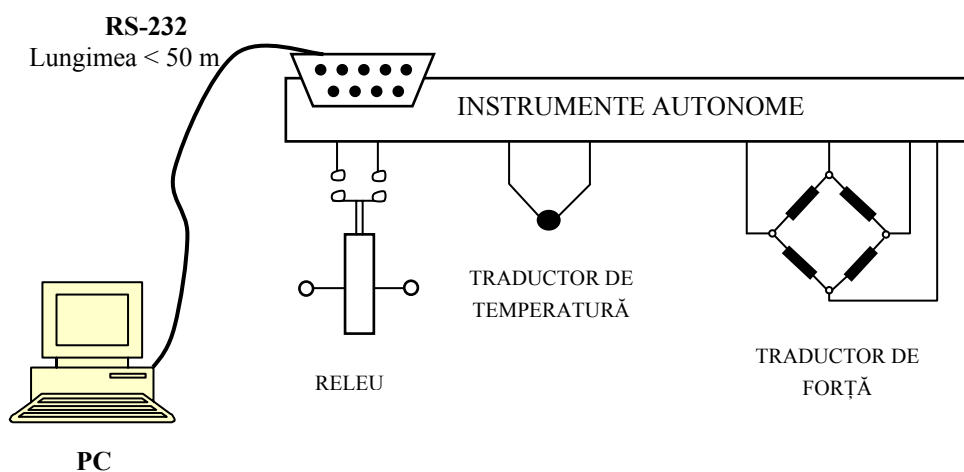


Fig. 1.55 Conectarea prin interfața serială a elementelor senzoriale la sistemul de calcul

În aplicațiile mecatronice acest concept presupune modelare, simulare, control automat și metode numerice pentru optimizare.

1.6. Exemple de sisteme mecatronice

1.6.1. Industria automobilului [1.3]

Fosta societate japoneză pentru promovarea industriei constructoare de mașini (JSPMI) clasifica produsele mecatronice în patru mari categorii:

Clasa 1 – produse mecanice cu electronică încorporată pentru a mări capacitățile funcționale. Exemple tipice acestei clase include mașini unelte cu comandă numerică și acționările cu viteză variabilă pentru mașinile de producție de masă;

Clasa 2 – sisteme mecanice tradiționale cu o componentă electronică semnificativă modernizată dar cu interfață utilizator neschimbată. Ex: mașini de țesut / cusut și sisteme de producție automate;

Clasa 3 – sisteme care mențin funcționalitatea sistemelor mecanice tradiționale dar mecanismele interne sunt înlocuite printr-un sistem electronic adecvat. Ex: ceasul electronic;

Clasa 4 – produse proiectate cu tehnologie mecanică și electronică printr-o integrare sinergică. Ex: xerox, mașini de spălat și mașini de gătit automate.

Fiecare clasă de produse scoate în evidență progresul produselor electromecanice în paralel cu dezvoltarea teoriei controlului, tehnologia informației și a microprocesorului:

- produsele clasei 1 sunt definite prin servo-tehnologie, electronică de putere și teoria controlului;
- produsele din clasa 2 sunt remarcabile prin utilizarea componentelor de calcul și memorie și circuite cu capabilități speciale;
- produsele clasei 3 sunt caracterizate prin înlocuiri ale sistemelor mecanice de către circuite integrate și microprocesor;
- produsele clasei 4 sunt practic produsele mecatronice prin integrarea sinergică a tehnologiilor.

Un moment semnificativ al acestei evoluții l-a constituit separarea controlului clasic și a celui modern prin teoria “controlului robust” la începutul anilor 1980. Unul dintre domeniile care scot în evidență extrem de puternic această evoluție a produselor pe de o parte și a mecatronicii în general este domeniul industriei automobilelor. O serie de sisteme cu destinație precisă - pentru creșterea siguranței de funcționare și a facilităților ambietale - au fost introduse în dotarea automobilelor moderne în raport cu automobilele clasice:

- sistemul antișoc ABS (**Antilock Brake System**) a fost introdus în anii 1970;
- sistemul de control al tracțiunii TCS (**Traction Control System**) a fost introdus la mijlocul anilor 1970;
- sistemul de control al dinamicii automobilului VDC(**Vehicle Dynamics Control**) poate fi atribuit anilor 1990. Similar sistemului TCS, noul sistem include și facilitățile oferite de un senzor de accelerație laterală pentru asigurarea direcției de rulare.

Subsistemul de control include o unitate CPU pe 8, 16 sau 32 bit.

Microcontrolerul dispune pe placa de bază de memorie (EEPROM / EPROM), intrări analogice și digitale, convertoare A / D, PWM, funcții de timp. Procesorul pe 32 bit este utilizat pentru coordonarea motorului, controlul transmisiei și al airbag-ului. Procesorul pe 16-bit este utilizat pentru controlul ABS, TCS, VDC, instrumentației și sistemului de aer condiționat. Procesorul pe 8 bit este utilizat pentru controlul poziției scaunului, oglinzii și a liftului geamului. La ora actuală un număr de 30-60 microcontrolere intră în dotarea unui automobil modern.

Dotarea automobilului modern cu un sistem informațional – navigație, internet, email, telefon, multimedia – este o altă facilitate pe care tehnologia mecatronică o oferă industriei automobilului. Controlul climei, temperaturii etc. sunt alte facilități remarcabile. Sistemul radar care intră în dotarea automobilului îi permite acestuia menținerea distanței în raport cu alte vehicule din trafic în limita impusă pentru evitarea unor accidente (fig.1.56)[1.3].

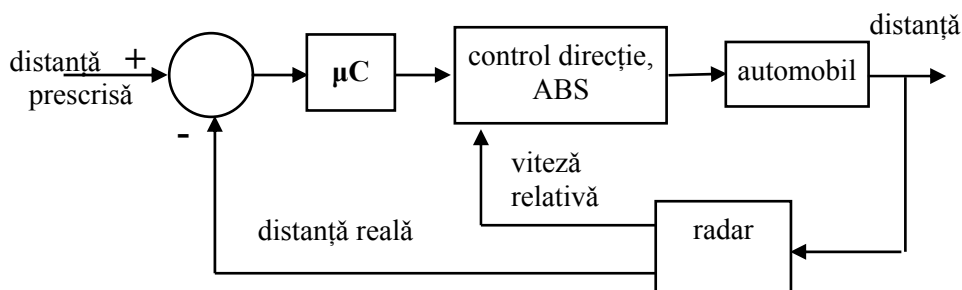


Fig. 1.56 Controlul distanței parcurse de automobil

Sistemul anti-blocare (anti-lock) este dotat cu un senzor de rotație în diferențial, un circuit de control și un controler pentru roțile din față. Varianta principală a sistemului este prezentată în figura 1.57.

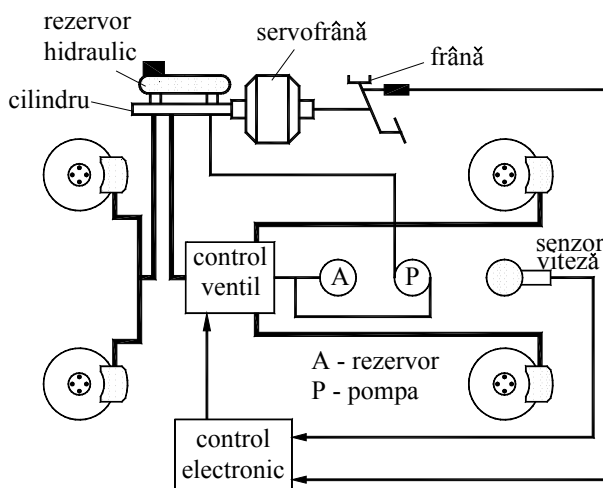


Fig. 1.57 Sistemul anti-blocare (anti-lock)

Sistemul anti-alunecare reprezintă următorul nivel de dezvoltare a conceptului ABS. Se include controlul pe toate roțile și se suplimentează numărul senzorilor de rotație și a circuitelor de control.

Creșterea numărului de microcontrolere din dotarea automobilelor – clasificate în trei clase – este prezentată în figura 1.58.

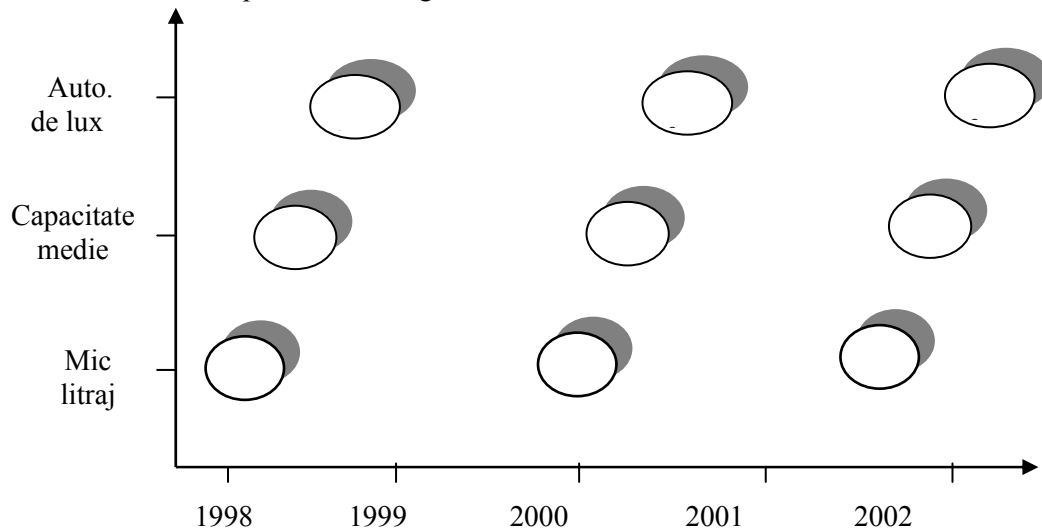


Fig. 1.58 Microcontrolere în dotarea automobilelor

Schema bloc a aprinderii electronice cu microprocesor (efectuează operații aritmetice și logice) este prezentată în figura 1.59.

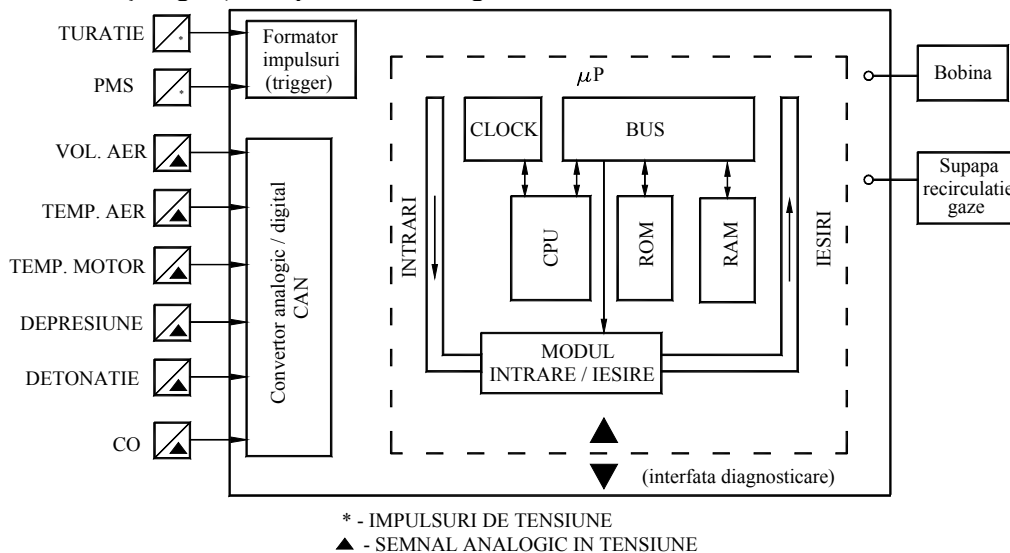


Fig. 1.59 Schema aprinderii electronice cu microprocesor

Sistemul de aprindere cu control integral este o altă aplicație mecatronică în industria automobilului. Odată cu introducerea turbosupralimentării s-a văzut necesară introducerea unui sistem de aprindere. Apariția frecventă a detonației și necesitatea de

a reduce avansul la încărcare totală, fără a afecta randamentul și consumul la sarcini parțiale, a impus necesitatea dezvoltării unor sisteme de aprindere adaptive, în circuit închis. Principala caracteristică a acestui sistem constă în modificarea avansului în sensul păstrării acestuia în limita detonației chiar în zona detonațiilor incipiente.

Programele de lucru și datele experimentale de referință (curbe caracteristice de funcționare) sunt stocate în memoria ROM. Informațiile obținute de la senzori sunt stocate (cu o anumită frecvență) temporar în memoria RAM și vor fi prelucrate de microprocesor. Se pot înregistra o serie de valori pentru utilizarea lor în secvențe ulterioare de program sau pentru o “istorie” a funcționării.

Sistemul de navigație GPS, sistemul de coordonare a stabilității, sistemul de prevenire a coliziunilor, recunoașterea vocii, accesul la internet, facilități de vedere pe timp de noapte sunt câteva dintre direcțiile ce se urmăresc în dezvoltarea capabilităților automobilelor moderne constituind aplicații mecatronice.

1.6.2. Aplicații industriale

1.6.2.1. Echipament de vopsire [1.34]

Vopsirea pieselor de *formă diversă* trebuie să se realizeze la viteze ridicate pentru a se asigura *productivitate*. Cerința *calitate* este strict necesară. Selectarea programului de lucru depinde de tipul de piesă în lucru. Procesul de vopsire este controlat prin poziția pistolului de vopsire. Configurarea structurii de comandă este asemănătoare cu cea prezentată în figura 1.63.

Sistemul mecanic mobil prezintă cinci axe de mișcare: trei translații și două rotații. Poziția pistolului de vopsit este asigurată prin mobilitățile axelor de translație X și Y și respectiv rotația după axa C. Controlul poziției după cele trei axe este asigurată prin interpolare liniară și circulară. Viteza punctului caracteristic, care coincide cu pistolul de vopsit, este menținută constantă.

1.6.2.2. Echipament pentru injecție mase plastice

O linie de injecție mase plastice prevăzută cu tăierea materialului este inclusă de firma Yaskawa în rândul aplicațiilor mecatronice (fig.1.60). Cuțitul de tăiere este sincronizat cu mașina de injectat. Poziția conveiorului de transfer (acționat de motorul M1) este furnizată de senzorul 2 iar tăierea materialului este semnalizată de senzorul 1. Poziția cuțitului de tăiat este controlată printr-un senzor montat pe arborele motorului M2 [1.34].

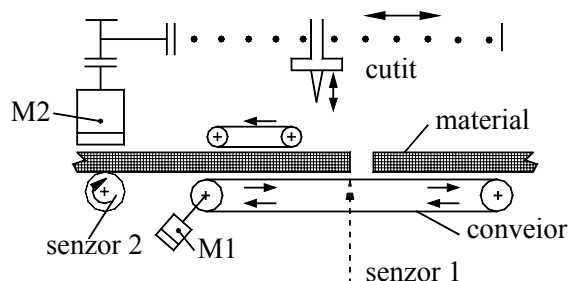


Fig. 1.60 Linie de injecție mase plastice

1.6.2.3. Echipament pentru bobinare în straturi multiple [1.34]

Realizarea bobinelor, în mai multe straturi, pentru diverse produse electronice este o altă aplicație mecatronică a firmei Yaskawa (fig.1.61).

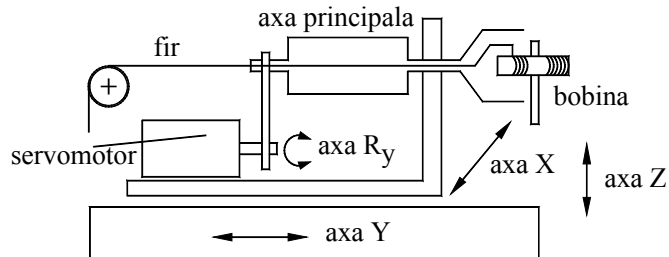


Fig. 1.61 Mașină de bobinat Yaskawa

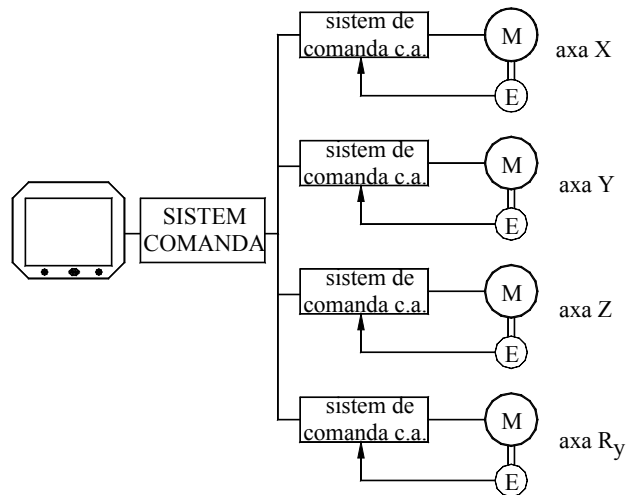


Fig. 1.62 Sistem de control

Sistemul de control asigură o înaltă calitate a bobinajului prin sincronizarea mișcării pe axa Ry și axa Y. Configurarea sistemului de control este prezentată în figura 1.62.

1.6.2.4. Alte aplicații mecatronice la firma Yaskawa [1.35]

Firma Yaskawa dezvoltă tehnologii și produse pentru utilizarea în medii curate / vacuum. Una din aplicațiile importante este cea a tehnologiei semiconductorilor. În acest scop firma Yaskawa a introdus tehnologii mecatronice și produse: servomotoare ac pentru lucru în vacuum, sisteme de transfer pe bază de levitație, roboți industriali pentru lucru în medii curate. Un astfel de robot este prezentat în figura 1.63a și figura 1.63b. Un sistem de transfer pentru medii curate este prezentat în figura 1.64.

Aplicațiile industriale impun și utilizarea unor echipamente periferice de soluții speciale. Un astfel de caz este dispozitivul de prehensiune pentru piese de tip placă utilizat în mediile curate (fig.1.65)

Aceste aplicații necesită rezolvarea diverselor probleme ridicate de sursele de

impurități din mediu. O astfel de problemă este cea a lubrificației. Lubrificarea solidă a rulmenților a fost constituit soluția dezvoltată de firma Yaskawa datorită avantajelor: durată de viață corespunzătoare, emisie redusă de praf și gaz, rezistență la coroziune. Varianta explicativă a soluției este prezentată în figura 1.66.



a)



b)

Fig. 1.63 Tehnologie în medii curate**Fig. 1.64 Sistem de transfer pentru medii curate****Fig. 1.65 Dispozitiv de prehensiune**

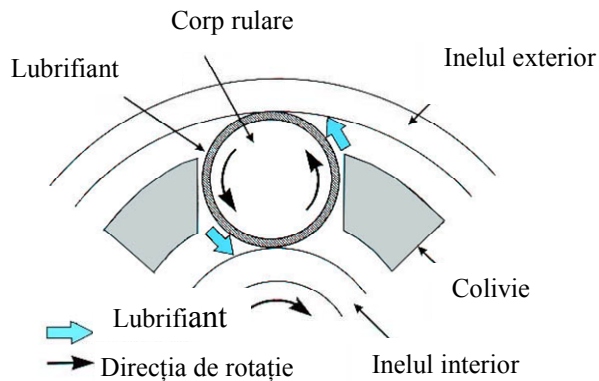


Fig. 1.66 Lubrificația solidă

Una din direcțiile applicative ale mecatronicii este cea de controlul mișcării. Această aplicație se bazează pe progresul servosistemelor, controlere performante și tehnici avansate de control. O soluție avansată pentru viitor este integrarea acestor sisteme în rețelele internet. Dezvoltarea aplicațiilor industriale robotizate și expansiunea roboților de servicii este sugerată ca o aplicație mecatronică de către firma Yaskawa.

Succesul aplicațiilor firmei Yaskawa are la bază printre altele și sisteme de acționare electrice performante. Aplicațiile sistemelor mecatronice impun acest lucru ca o condiție clară, fără echivoc. O istorie a dezvoltării acestor sisteme de acționare la firma Yaskawa este ilustrată în figura 1.67

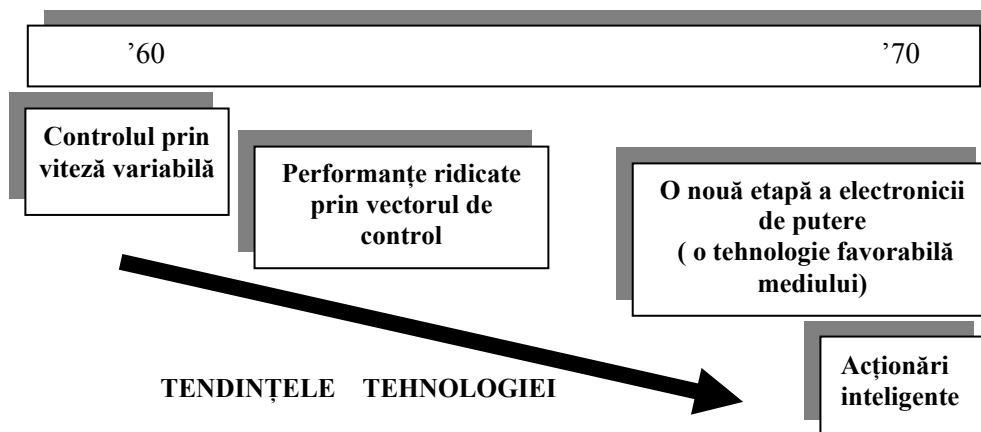


Fig. 1.67 Tendințe în sistemul de acționare

1.6.2.5. Aplicații ale mecatronicii în producția de animale [1.14]

Conceptul referitor la tehnologia biosenzorilor, care se constituie ca și aplicație de miniaturizare mecanică în electronică, se utilizează cu succes și în producția de animale: testări ale metabolismului pentru animalele bolnave, identificarea și

monitorizarea individuală etc.

Sistemul de identificare a animalelor este prezentat în tabelul 1.13 iar modul de urmărire / înregistrare a datelor este prezentat în figura 1.68.

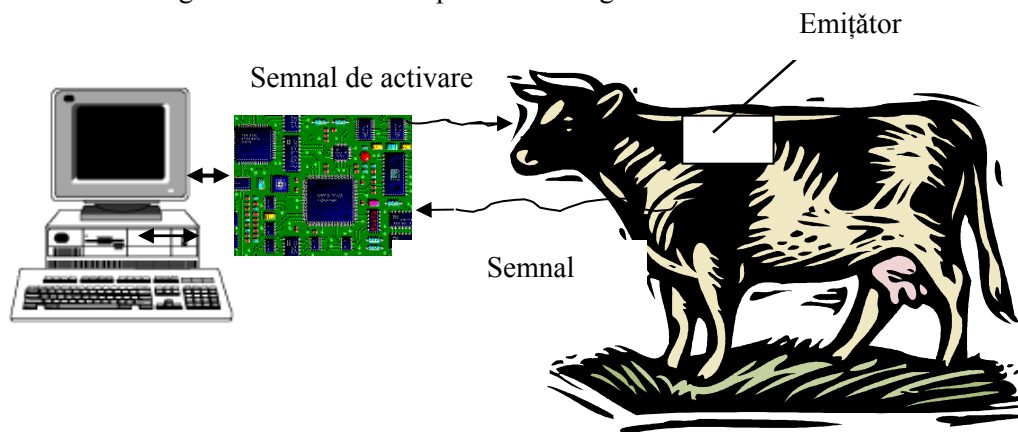


Fig. 1.68 Sistemul de identificare a animalelor

Tabelul 1.13

Principiul de lucru	Suportul pentru informație	Procesul	Aplicații
Optic	Forma, aspectul	Atingere	Amprentă
	Forma, culoare	Procesare imagine	Recunoaștere iris
	Cod numeric	Recunoaștere cod	Identificare automată
Electromecanic	Cod bare	Scanner	Comerț
	Electronic cu transfer în infraroșu	Emițător - receptor	Identificare
	Undă acustică superficială	Emițător - receptor	Identificare
Electronic	Emițător de impulsuri	Emițător + receptor	Procesare, logistică, identificare

1.6.2.6. Linie pentru montaj [1.5]

Linia este capabilă să monteze până la 60.000 de componente pe oră în condiții date de lucru. Aplicațiile se includ în sfera de montaj a echipamentelor electronice, calculatoare și telecomunicații care necesită un volum mare de muncă. Linia dispune de 16 roboți "pick-and-place" și automate de montaj (AM) (fig.1.69).

Structura modului pentru axa y este prezentată în figura 1.70.

Sistemul prezentat în integritatea sa se constituie ca un caz al sistemelor mecatronice: un sistem electromecanic cu controlul mișcării. Schema bloc al acestui hipersistem este prezentată în figura 1.71.

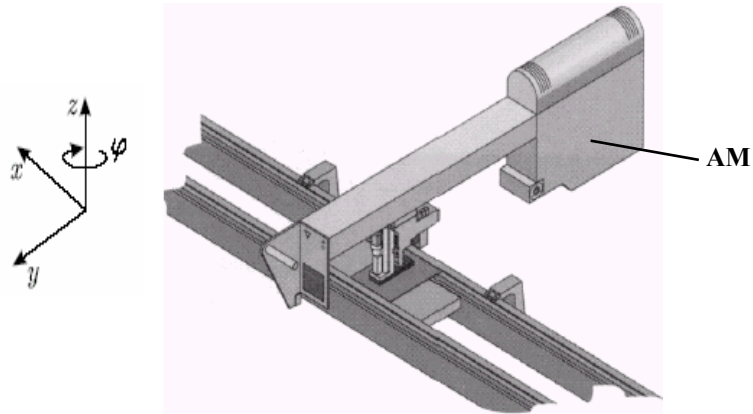


Fig. 1.69 Linie de montaj

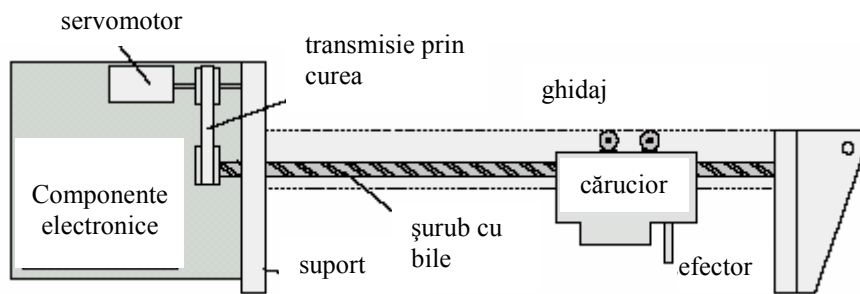


Fig. 1.70 Modul de translație

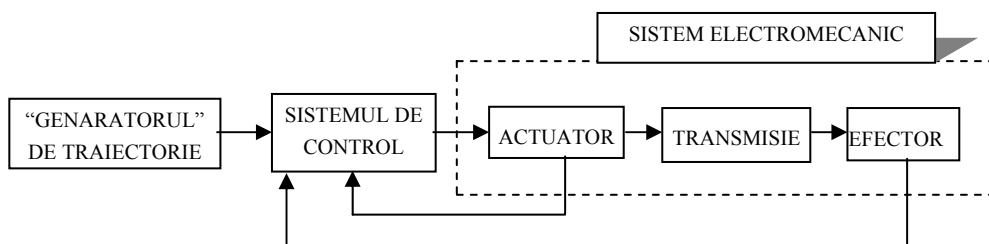


Fig. 1.71 Sistem electromecanic cu controlul mișcării

1.6.2.7. Diagnosticare automată [1.6]

Sistemele mecanice mobile, punctul central al hipersistemelor mecatronice, sunt coordonate în mod performant de actuatore care au rolul de a asigura diverse poziții elementelor mobile, viteze, debite, forțe în sens generalizat, tensiuni. Performanțele hipersistemului mecatronic sunt condiționate de un control eficient pe baza

informațiilor obținute de la senzorii din sistem. O schemă bloc a distribuției senzorilor la diferite nivele a producției este prezentată în figura 1.72.

Condițiile de monitorizare sunt definite de stări ale mașinilor sau condiții ale echipamentelor, de evoluții ale acestora în timp. Aceste stări sunt determinate de o serie de factori perturbatori, vibrații ale mașinilor, zgomot, temperatură etc. Acești parametri influențează parametrii de lucru ai mașinilor, echipamentelor și în final pe cei ai procesului. Monitorizarea parametrilor cu emiterea unor concluzii și decizii privind cauzele acestor modificări presupune o integrare în sens mecatronic.

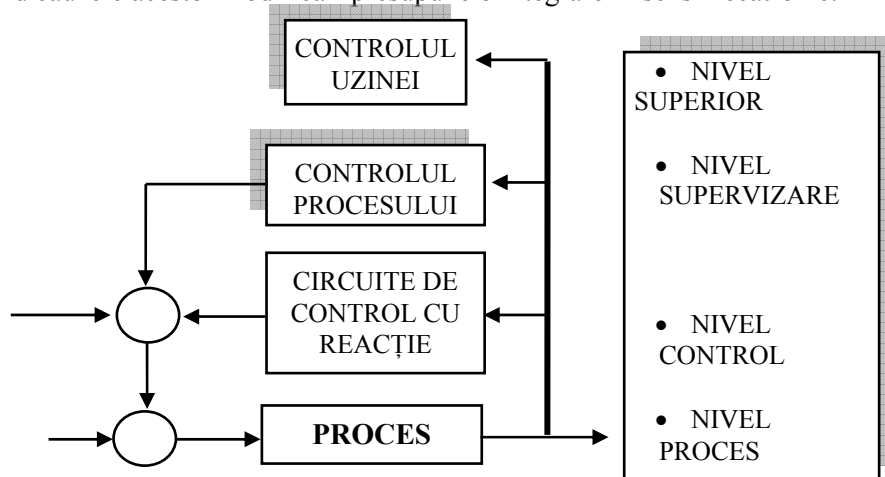


Fig. 1.72 Distribuția senzorilor la nivelul de producție

În figura 1.73 se prezintă varianta de configurare a unui sistem de monitorizare pentru o mașină uneltă pe durata procesului de producție.

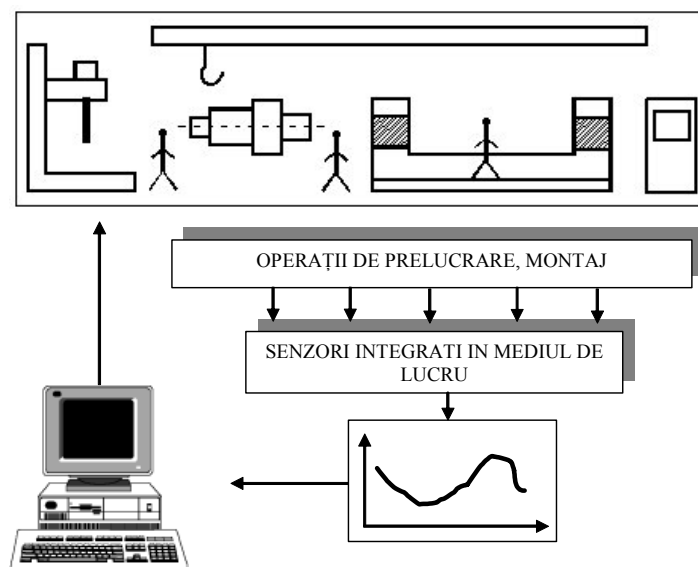


Fig. 1.73 Sistem de monitorizare a unei mașini unelte

Utilizând sistemul de monitorizare a mașinii este posibil să se detecteze condițiile anormale de așchiere, informații despre uzura sculei sau ruperea acesteia, despre forțele dezvoltate asupra sculei.

Modalitățile de identificare a diverselor caracteristici de lucru și senzori aferenți monitorizării sunt prezentate în figura 1.74

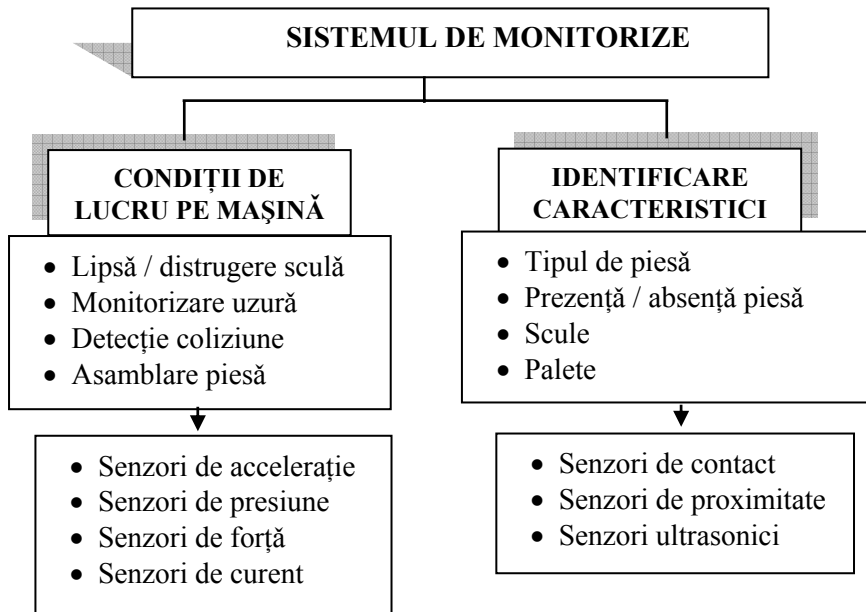


Fig. 1.74 Modalități de identificare a caracteristicilor de lucru

Condițiile de monitorizare ale sistemului se pot considera de două categorii :

- Sistemul de bază al monitorizării materializat prin informații despre mașină și prezentate la nivelul display și utile pentru operatorul uman de a lua decizii;
- Sistemul automat de monitorizare a condițiilor de lucru având un control adaptiv și mecanisme de reacție

Dintre exemplele practice de monitorizare a funcționării mașinilor se mai poate aminti *monitorizarea fenomenului vibratoriu* (fig.1.75).

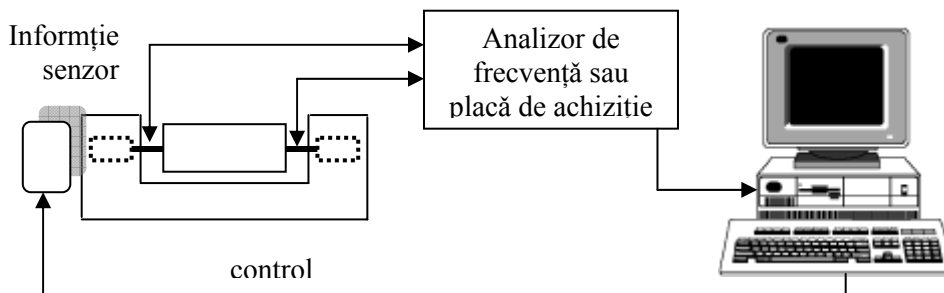


Fig. 1.75 Monitorizarea vibrațiilor la o mașină rotativă

Aceasta este una din metodele uzuale de analiză a condițiilor de funcționare a

mașinilor rotative. În timpul funcționării, orice mașină produce zgomote și vibrații caracteristice. Spectrul de frecvențe al semnalelor complexe astfel generate este specific fiecărei mașini în parte, formând o « semnătură » unică. Analiza « semnăturii » mașinii permite localizarea surselor de vibrații iar observarea evoluției în timp permite aprecierea stării mecanice a mașinii. De exemplu, pentru o mașină electrică programul de decizie se bazează pe compararea componentelor spectrale ale semnalului dat de motor, cu un nivel de referință considerat acceptabil.

1.7. Concluzii

Structura sistemelor mecatronice este o structură complexă. Procesul de proiectare a acestor sisteme se bazează atât pe aspecte clasice cât și pe abordări noi specifice filozofiei mecatronice. În figura 1.76 se prezintă succinct una din propunerile structurale privind proiectarea sistemelor mecatronice [1.4]. Această propunere a stat la baza organizării prezentei lucrări.

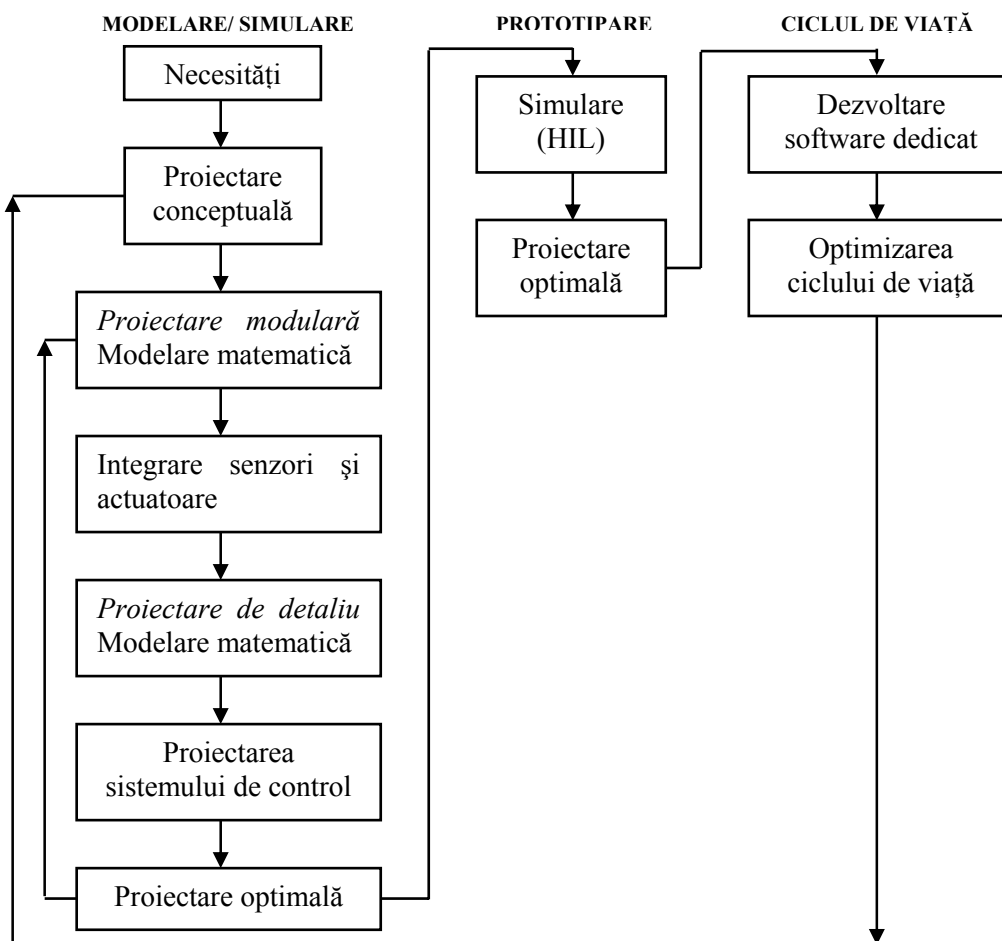


Fig. 1.76 Proiectarea sistemelor mecatronice

1.8. Bibliografia capitolului 1

- [1.1] Auslander, D.M., *Mechatronics: A Design and Implementation Methodology for Real Time Control Software*, Berkely University, 1997
- [1.2] Bălan, R., *Microcontrolere. Structură și aplicații*, Editura Toderco, Cluj-Napoca, 2002
- [1.3] Bishop, H. Robert, *The Mechatronics Handbook*, CRC Press, London-New York-Washington, 2002
- [1.4] Blanchard, B.S., Fabrycky, W.J., *Systems Engineering and Analysis*, Prentice Hall, 2006
- [1.5] Coelingh, H.J., DeVries, T.J., VanAmerongen, J., *Design Support for Motion Control Systems*, <http://www.rt.el.utwente.nl/mechatronics>
- [1.6] Devdas, S., Kolk A.R., *Mechatronics System Design*, PWS Publis. Comp., Boston, 1997
- [1.7] Dolga, V., *Senzori și traductoare*, Editura Eurobit, Timișoara, 1999
- [1.8] Dolga, V., *Elemente de inginerie mecanică în construcția echipamentelor electronice*, Vol.1, Editura Politehnica, 2003
- [1.9] Enikov, E.T., *Control systems design*, www.ame.arizona.edu/ame455/
- [1.10] Eykhoff, P., *Identificarea sistemelor*, Editura Tehnică, București, 1977
- [1.11] Flores, K.M, *Introduction to Mechanical Behavior of Materials*, Handout # 8: Anelasticity,
- [1.12] Gligor, O., *Structuri mecatronice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2003
- [1.13] Harris, C.M., Crede, Ch.E., *Socuri și vibrații*, vol.II, Editura tehnică, București, 1968
- [1.14] Irenitza de Alencar Nääs, *Applications of Mechatronics to Animal Production*, CIGR Journal of Scientific Research and Development, vol.IV, 2002, Chicago, USA
- [1.15] Isermann, R., *Mechatronische Systeme*, Springer-Verlag, Berlin, 1999
- [1.16] Jacquard Loom, <http://www.victorianweb.org/technology/jacquard2.html>
- [1.17] Kaynak, O., *Recent Advances in Mechatronics*, <http://mecha.ee.boun.edu.tr/cv/publications/g1.html>
- [1.18] Kopplin, J., *An Illustrated History of Computers*, <http://www.computersciencelab.com/index.htm>
- [1.19] Lewis, F.L., *A brief history of feedback control*, <http://arri.uta.edu/acs/history.htm>
- [1.20] Maniu, I., Dolga, V., *Sisteme de acționare*, Editura Politehnica, Timișoara, 2003
- [1.21] Mătieș, V., *Mecatronică*, Editura Dacia Cluj-Napoca, 1998
- [1.22] Mătieș, V., ș.a., *Tehnologie și educație mecatronică*, Editura Toderco, Cluj Napoca, 2001
- [1.23] Miu, K.D., *Mechatronics. Electromechanics and Contromechanics*, Springer-Verlag, New York 1992
- [1.24] Polsson, K., *Chronology of Personal Computers*, <http://www.islandnet.com/~kpolsson/comphist/>
- [1.25] Sermesant, M., *Modèle électromécanique du cœur pour l'analyse d'image et la simulation*, These, Université de Nice Sophia-Antipolis, 2003
- [1.26] Surducu, V., Wouter van Ooijen, *Microcontrolere pentru toți*, Editura Risoprint,

Cluj-Napoca, 2003

[1.27] Teodorescu, P.P., Ille, V., Teoria elasticității și introducere în mecanica solidelor deformabile, Editura Dacia, Cluj – Napoca, 1976

[1.28] Timotin, A., s.a., Lecții de bazele electrotehnicii, EDP, București, 1970

[1.29] Woolley, S.I., A Brief History of Microprocessors, <http://www.eee.bham.ac.uk/woolley/teaching/microhistory.htm>

[1.30] Woolley, I. S., Microprocessor History, [http://www.eee.bham.ac.uk/woolley/Sandra I_Woolley - Microprocessor History.htm](http://www.eee.bham.ac.uk/woolley/Sandra_I_Woolley-MicroprocessorHistory.htm)

[1.31] ***, ISP Glossary, <http://isp.webopedia.com/TERM/s/simulation.html>

[1.32] ***, EuroSim Mk3.2, <http://www.eurosim.nl/support/manual/html/SUM/B.html>

[1.33] ***, Data Acquisition and Control Handbook, www.keithley.com

[1.34] ***, Mechatronics system applications, www.yaskawa.co.jp/en/products/

[1.35] ***, Super-Mechatronics Business, Yaskawa Technical Review, vol.65, no.1

[1.36] ***, The first mechanical calculator, [http://www.eingang.org/Mechanical_adding/History of Computing Science The First Mechanical Calculator.htm](http://www.eingang.org/Mechanical_adding/History_of_Computing_Science_The_First_Mechanical_Calculator.htm)

[1.37] ***, Internet History and Microprocessor Timeline, <http://www.computerhistory.org/exhibits/microprocessors/up.2.page>

[1.38] ***, What is mechatronics, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.1, nr.1, march 1996

[1.39] ***, Microprocessor History, <http://electronics.howstuffworks.com/microprocessor1.htm>

[1.40] ***, Timeline of Computer History, <http://www.computerhistory.org/timeline/timeline.php>

[1.41] ***, Damping, <http://en.wikipedia.org/wiki/Damping#Definition>