

## 5. PROIECTAREA PENTRU X

### 5.1. Introducere

În mod tradițional conceptul de *Machine Design* – proiectarea elementelor constructive - este considerat echivalent cu *Mechanical Engineering Design*. Machine Design este definită ca transformările impuse unor parametri ce definesc un proces fizic din componentele concrete ale unei mașini. Aceasta prin elementele / componentele sale se presupune mecanică.

În ultimii ani au apărut în mod inerent unele discrepanțe între această definiție și apariția de mașini din ce în ce mai sofisticate. O atenție specială trebuie acordată în zona de graniță cu alte domenii. Aceste cerințe impun reconsiderări de esență curriculară și instruire industrială. Machine Design este un proces de selectare a componentelor unei mașini pentru funcții predefinite. Pentru a clarifica această definiție trebuie avută în vedere definiția mașinii ca sistem de elemente constructive.

O clasificare simplă a elementelor constructive este dată în tabelul 5.1 și ilustrată în tabelul 5.2. Machine Design include toate caracteristicile impuse de definirea mașinii, proiectării și ingineriei.

Tabelul 5.1

ELEMENTE CONSTRUCTIVE	
•	Roți dințate, arcuri, știfturi, ...
•	Motor electric, releu, ....
•	Senzori optici, senzori tactili, ....
•	Circuite de control, ....
•	Microprocesoare, ..
•	Software, ...

Tabelul 5.2

ELEMENTE CONSTRUCTIVE				
Mecanice	Hidraulice, pneumatice	Electrice	Electronice, hardware	Software

Din cele expuse se observă complexitatea noii noțiuni referitoare la elementele

constructive. În plus trebuie specificat că aceste componente intră în sistem cu specificațiile corespunzătoare domeniului restrâns de activitate.

## 5.2. Proiectare mecanică

### 5.2.1. Proiectarea pentru montaj (DFA)

Costul de producție în construcția de mașini este influențat în mare măsură (30 % - 50 %) [5.4] de volumul de muncă din montaj care poate atinge (25 % - 30 %) din volumul total [5.9]. În construcția de aparate volumul de muncă din montaj ajunge până la (40 % - 70 %). Cu toate acestea automatizarea operațiilor de montaj se referă la cel mult 10 % în industria SUA și Japonia.

În SUA din 18 milioane de muncitori ce lucrează în industrie, 8 milioane activează în montaj. Optimizarea a numai 75 % din această muncă de montaj ar permite economisirea până la 22 % din produsul național brut [5.10].

Profesorul Makino de la Yamanashi University (Japonia) a introdus noțiunea de indicator de elasticitate  $K$  pentru a evalua flexibilitatea unei linii de montaj:

$$K = \prod_{i=1}^5 C_i \quad (5.1)$$

unde coeficienții  $C_i$  țin cont de diverse aspecte ale elasticității sistemului:

- $C_1$  - coeficient care ține cont de complexitatea produselor asamblate într-un an (de ex.: pentru un micromotor  $C_1 = 100$ ; pentru un disc de frână  $C_1 = 5$ ; pentru un releu  $C_1 = 30$ ; pentru circuite imprimate  $C_1 = 20$ );
- $C_2$  – coeficient de producție;  $C_2 = \frac{100}{n}$  unde  $n$  este producția lunară (în mii de piese);
- $C_3$  – coeficientul duratei de asamblare;  $C_3 = \frac{30}{t}$  unde  $t$  este durata de asamblare a produsului;
- $C_4$  – coeficientul numărului de componente;  $C_4 = \frac{N}{10}$  unde  $N$  este numărul de componente pe ansamblu produs;
- $C_5$  coeficient de dimensiune a produsului (rezistoare -  $C_5 = 0.5$ ; releu, bujie -  $C_5 = 1$ ; ventil, micromotor -  $C_5 = 2$ , amplificator audio  $C_5 = 3$ ).

În funcție de valoarea indicelui de flexibilitate obținut pentru un produs, se recomandă o anumită linie de montaj cu includerea roboților industriali (tabelul 5.3).

Tabelul 5.3

10 - 1000	Roboți industriali (nivel manipulare, obiect)
> 10000	Roboți industriali inteligenți (nivel obiectiv)

Mediul tehnologic se prezintă ca un mediu dinamic în care diferitele componente își schimbă dimensiunile, poziția, caracteristicile într-un mod variat. Analizat din

punctul de vedere al variabilității mediului tehnologic, în montaj se pot distinge următoarele clase de variabilitate [5.13]:

- Variabilitatea pozițională a elementelor constructive, echipamente periferice, dispozitive de lucru;
- Variabilitatea de formă și dimensională;
- Variabilitatea de timp;
- Variabilitatea operațională;
- Variabilitatea generală de mediu.

Variabilitatea de formă, dimensională și de masă este specifică operațiilor de montaj, datorită faptului că piesele care intervin pe parcursul operațiilor sunt diferite ca formă, masă, dimensiuni și rigidități. Ponderea cea mai mare (aprox. 66 %) o au piesele rigide cu axă de simetrie (fig.5.1) (analiză a 3008 piese din 21727 procese tehnologice) [5.8].

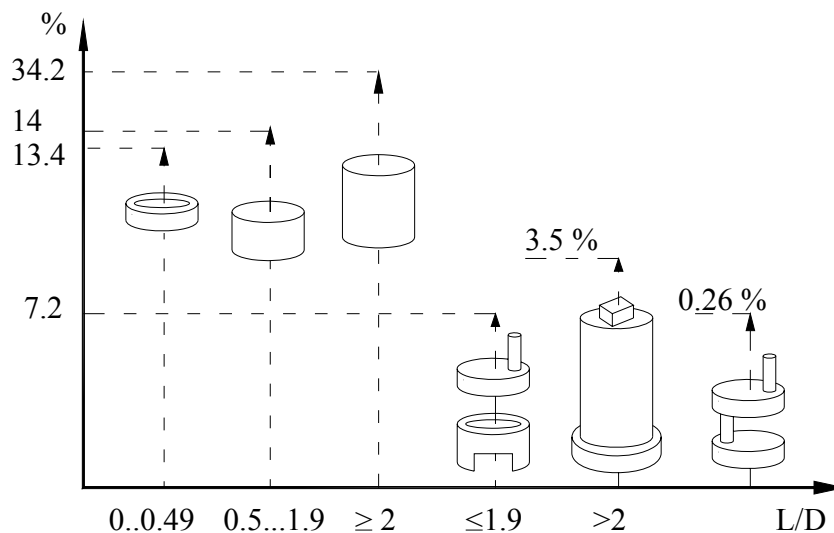


Fig. 5.1 Variabilitatea de formă și dimensiune

O analiză generală asupra variabilității de masă a scos în evidență că 70 % din piese au masa până la 0.5 kg. Un număr mare de piese sunt elastice, deformabile ceea ce impune atenție în prehensarea lor și în procesul de asamblare. Este vorba despre piese de fixare (inele și șaibe elastice, cleme, conducte etc), etanșări (garnituri, inele "O", etc.), arcuri, conectori electrici, etc.[5.17](tabelul 5.4 ).

Tabelul 5.4

Piese de fixare	Inele și șaibe elastice	7 %
	Brățare elastice	12 %
	Cleme	5.9 %
	Coliere	4.7 %
	Brățare pentru cabluri	1.6 %

(continuare Tabelul 5.4)

Etanșări	Garnituri	17 %
	Inele, inele O	6.5 %
	altele	0.5 %
Amortizoare		15 %
Arcuri	Elicoidale	7.2 %
	În foi	1.3 %
	Altele	0.9 %
Conectori electrici, fișe		9.2 %
Conducte		8.6 %
Subansamble și alte piese		2.5 %

Variabilitatea operațională este de asemenea hotărâtoare pentru procesul de montaj. Peste 90 % din operațiile de asamblare sunt din categoria “îmbinare simplă” (arbore – alezaj) sau “îmbinare liberă și rotație” și “îmbinare filetată” (fig.5.2 ) [5.17]. Direcția preferențială de montaj este cea verticală, de sus în jos.

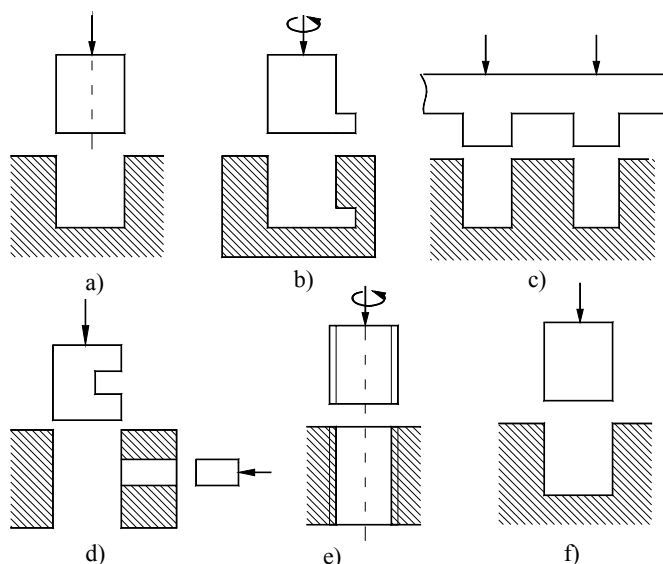


Fig. 5.2 Variabilitatea operațională

În mod sumar se pot enunța câteva reguli de proiectare:

- *Proiectarea componentelor:*
  - A. Se recomandă eliminarea / minimizarea amestecului confuz dintre piesele aflate în alimentator;
  - B. Se recomandă utilizarea unei simetrii constructive pentru a reduce durata de orientare pe parcursul manipulării;
  - C. Dacă nu se poate utiliza o construcție simetrică, utilizează o caracteristică clară / evidentă pentru a crește viteza de orientare;
- *Proiectarea unui produs*
  - A. Se recomandă reducerea numărului de componente dacă este posibil;

- B. Se recomandă realizarea unei construcții în straturi, de sus în jos;
- C. Utilizează teșirea suprafețelor pentru o îmbinare ușoară și asamblările filetate;
- D. Utilizează asamblări elastice rapide pentru a reduce durata operației.

În funcție de modalitatea de realizare a operației de asamblare – manual, automat, robotizat – se pot stabili o serie de reguli suplimentare pentru proiectare.

Reproiectarea produsului de asamblat este una din posibilitățile de creștere a productivității. Se urmărește prin aceasta scăderea numărului de piese, asigurarea unor proprietăți favorabile orientării, simetriei etc. În figura 5.3 se prezintă două piese (din 4 ale unui ansamblu) care au fost astfel proiectate încât să poată fi utilizat un același dispozitiv de manipulare.

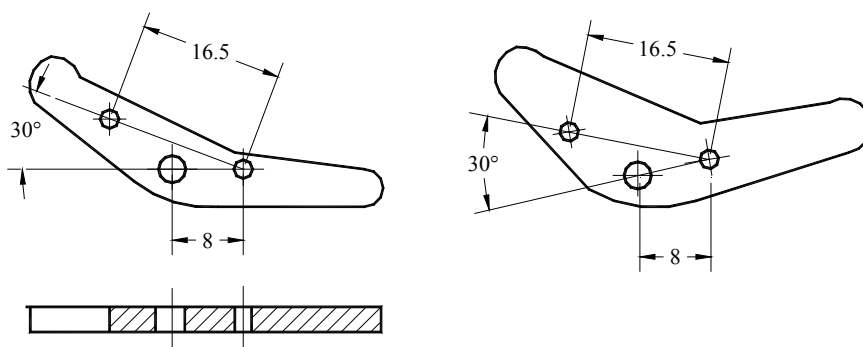


Fig. 5.3 Asigurarea de proprietăți favorabile manipulării

Se folosește în acest scop distanța dintre cele două alezaje (cota de 16.5 mm), fixarea realizându-se pe două știfturi.

În general proiectanții includ un număr mai mare de componente decât este necesar. Pentru reducerea numărului de componente se impune o analiză atentă a construcției. Existența a două piese separate se poate justifica dacă:

- Trebuie să existe o mișcare relativă între ele;
- Piesele trebuie realizate din materiale diferite;
- Piesele trebuie separate pentru întreținere;
- Elementele elastice separate (arcuri elicoidale, spirale etc.) se pot înlocui printr-o construcție adecvată cu cuple cinematice elastice (fig.5.4).

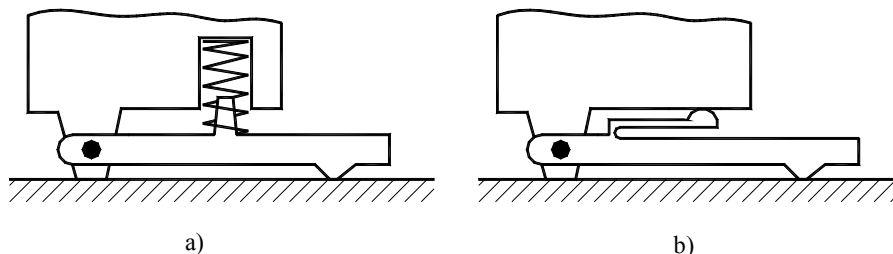


Fig. 5.4 Construcție adecvată cu cuple cinematice elastice

Manipularea și orientarea pieselor în procesul de montaj trebuie avută în vedere.

Se recomandă utilizarea unei construcții simetrice astfel încât să se reducă timpul de orientare a piesei. Orientarea piesei din figura 5.5a este relativ pretențioasă. Se poate realiza o variantă cu construcție simetrică dacă este admisă funcțional (fig.5.5b). Un caz asemănător este cel din figura 5.6a. Recunoașterea orientării piesei necesită un echipament specializat. Se poate realiza o construcție simetrică (fig.5.6b) care simplifică operațiile de orientare.

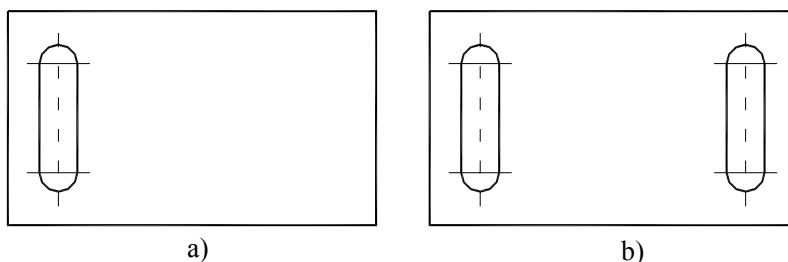


Fig. 5.5 Proiectare în scopul unei orientări convenabile a piesei

Componenta constructivă din figura 5.7a nu se poate monta decât într-o situație dată, datorită lungimilor diferite ale tronsoanelor. Acest lucru impune o orientare prealabilă. Se poate elimina acest aspect prin considerarea unei soluții simetrice (fig.5.7b) cu tronsoanele exterioare de aceeași lungime.

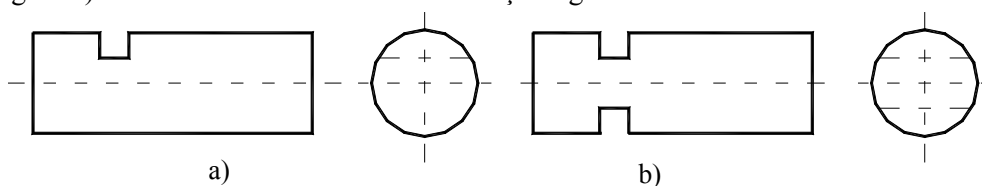


Fig. 5.6 Proiectare în scopul unei orientări convenabile a piesei

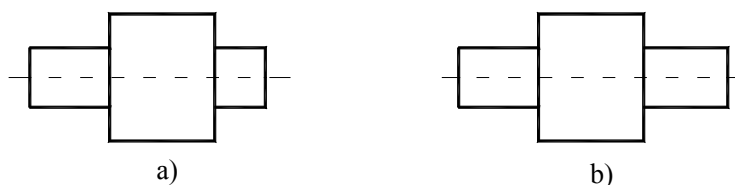


Fig. 5.7 Variante ale unei piese pentru un montaj de orientare dată (a) sau indiferentă (b)

Construcția modulară oferă o serie de avantaje în procesul de asamblare: simplifică operațiile, asigură un control de calitate sporit, îmbunătățește posibilitățile de reconfigurare a sistemului, permite automatizarea asamblării, simplifică întreținerea etc.

Asamblările filetate sunt în general nerecomandate în literatura de specialitate pentru DFA. Dacă acest procedeu nu poate fi ocolit, se recomandă să se realizeze unele construcții convenabile pentru terminația șurubului astfel încât orientarea automată a acestuia să fie îmbunătățită (fig.5.8).

Stuart Pugh a dezvoltat în 1980 tabela de evaluare a conceptului de proiectare.

Metoda este aplicabilă pentru concepte de proiectare multiple și permite formularea unor aprecieri calitative pentru procesul decizional [5.22].

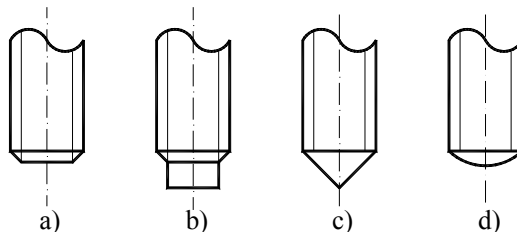


Fig. 5.8 Forme constructive recomandate pentru șurub

Metoda de lucru este structurată pe 5-6 etape:

- *Identificarea conceptelor*

Dintre posibilitățile existente și realiste, competitive se selectează 5-10 concepte care se pot descrie în mod simplu sau prin cuvinte. Un număr crescut de concepte sau prea redus nu va conduce la rezultate pozitive în analiza efectuată.

- *Definitivarea matricii de lucru*

O listă de criterii, agreată de echipa de lucru, va constitui elementul de bază pentru analiza conceptelor luate în considerare. Această listă trebuie să fie clară, fără ambiguități: service, asamblare, manufacturabilitate, cost unitar, risc, etc.

- *Compararea conceptelor*

Un concept va fi considerat ca un concept de referință. Restul conceptelor vor fi comparate cu cel de referință în baza criteriilor admise și a trei nivele calitative: “+ - plus” pentru un concept superior, “- \_minus” pentru un concept inferior, “E – egal” pentru un concept asemnător. În urma acestei evaluări este posibilă o ierarhizare a conceptelor

- *Combinării și îmbunătățire*

Este posibil ca un concept să ocupe o poziție ierarhică corespunzătoare, dar să difere printr-o caracteristică de conceptul de bază. Printr-o modificare minoră a acestei caracteristici se pot aduce îmbunătățiri ale conceptului analizat

- *Repetarea ciclului anterior*

Conceptul de proiectare permite o reluare a ciclului de analiză prin considerarea combinațiilor anterioare și a unui concept de referință nou

- *Concluzii finale*

Procesul prezentat este un început pentru echipa de lucru prin care poate identifica conceptele de bază pe care să le dezvolte și să le analizeze în baza criteriilor selectate

În tabelul 5.5 se prezintă metologia Pugh pentru 6 concepte identificate prin numele VAR<sub>i</sub> (i = 1...6) și 6 criterii calitative sau cantitative. Scorul net apropiat pentru varianta 1 și 2 recomandă o combinație a conceptelor în timp ce variantele 4, 5 pot fi eliminate.







Complexitatea relativă considerată ca un parametru a unui ansamblu permite o comparare a diverselor soluții posibile. O astfel de evaluare ia în considerare:

- Numărul categoriilor de părți componente. Fiecare componentă poate fi considerată ca o nouă categorie, totalitatea componentelor formând categoria

- respectivă. De ex.: 10 șuruburi M8 x 10 formează o singură categorie =  $N_c$ ;
- Numărul componentelor din ansamblu. De ex: 10 șuruburi M8 x 10 constituie 10 componente =  $N_{co}$ ;
  - Numărul de interfețe  $N_i$ . Se urmărește determinarea interfeței fiecărei componente cu celelalte cu condiționarea neluării în considerare a unei interfețe de mai multe ori.
  - Se calculează factorul de complexitate [5.12]:

$$C_f = \sqrt{N_c + N_{co} + N_i} \quad (5.2)$$

Tabelul 5.5

						
<b>Criteriul</b>	<b>var 1</b>	<b>var 2</b>	<b>var 3</b>	<b>var 4</b>	<b>var 5</b>	<b>var 6</b>
Comoditatea de utilizare	<b>REFERINT</b>	+	+	-	-	E
Estetica		-	+	+	-	-
Manufacturabilitate		+	-	-	+	+
Masa		+	+	+	-	+
Randament		E	-+	-	+	+
Fiabilitate		-	+	E	-	+
$\Sigma +$		3	5	2	2	4
$\Sigma -$		2	1	3	4	1
$\Sigma S$		1	0	1	0	1
Scor net [( $\Sigma +$ ) + ( $\Sigma -$ )]	0	1	4	-1	-2	3
Poziție	4	3	1	5	6	2
<b>Continuă sau combină</b>	Combină	Combină	da	nu	nu	da

În figura 5.9 se prezintă un ansamblu suport în mod asamblat și respectiv prin componentele sale. În tabelul 5.6 este prezentată o evaluare a numărului de interfețe și numărul de componente.



Fig. 5.9 Ansamblu suport



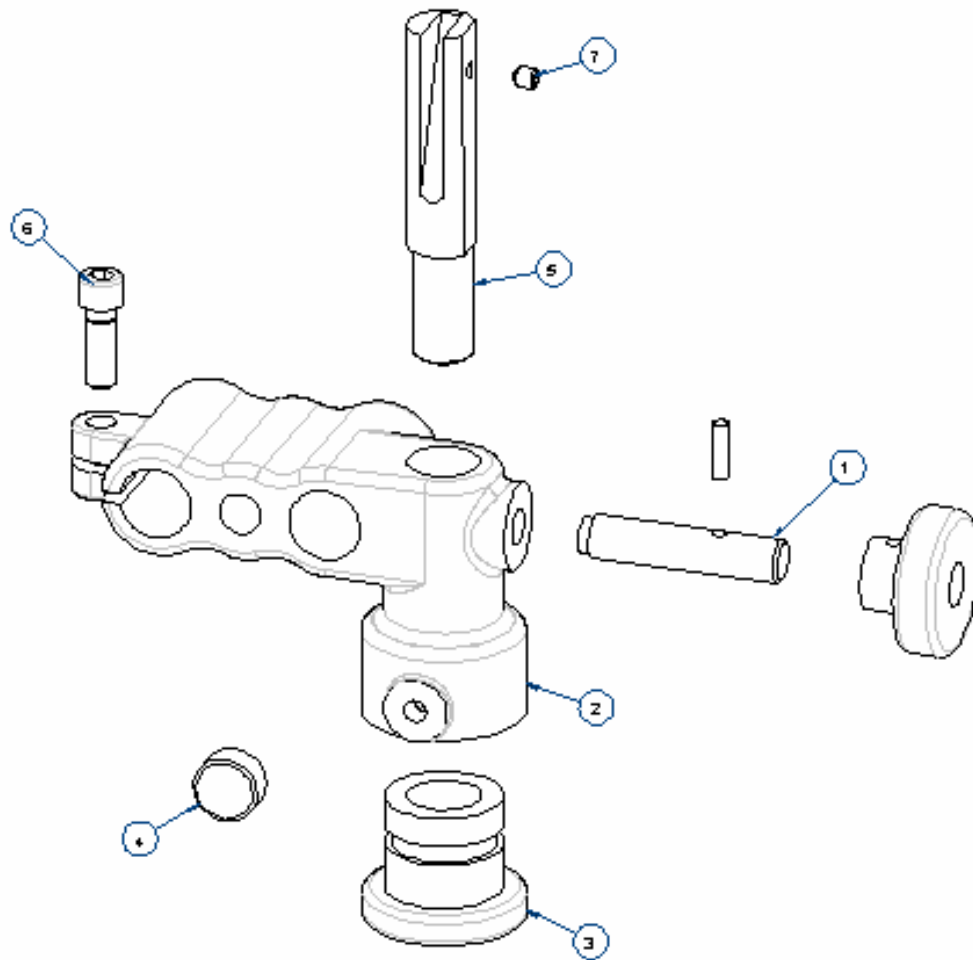


Fig. 5.10 Componentele ansamblului

Coeficientul de complexitate calculat pentru ansamblul dat va fi:

$$C_f = \sqrt{9+9+17} = \sqrt{35} \quad (5.3)$$

Eficacitatea în proiectare – *design efficiency* – este evaluată pentru produsul de realizat prin abordarea a trei probleme esențiale [5.12]:

- Mișcarea relativă între două componente A și B;
- Materialele pentru cele două componente;
- Necesitatea existenței unor reglaje sau înlocuiri.

După o analiză logică a întregului ansamblu, prin care piesele se împart în piese principale A și piese neesențiale B, eficiența în proiectare se estimează ca fiind:

$$\text{eficiența} = \frac{\text{componente principale } A}{\text{total componente } (A + B)} \cdot 100 \% \quad (5.4)$$

Tabelul 5.6

Nr.comp.	Numele componentei	Cantitatea	Nr. interfețe
1	Rolă fixare	1	2
2	Șurub fixare	1	3
3	Știft	1	2
4	Corp	1	4
5	Batiu	1	1
6	Șurub	1	1
7	Șurub fixare	1	1
8	Tijă	1	2
9	Știft	1	1
<b>Total</b>		<b>9</b>	<b>17</b>

Piesa A este esențială în produs dacă:

- există mișcare relativă față de B;
- mișcarea este esențială pentru funcția produsului;
- piesa trebuie să fie independentă;
- materialul este esențial;
- există necesitatea unei înlocuiri;
- necesită reglaje față de piesa B.

În cadrul procesului de dezvoltare a produsului este important să se facă distincție între etapele procesului și diversele categorii de testare. Diversele metode de testare se prezintă cu obiective diferite, aproximări și modalități de modelare. În general se pot considera următoarele categorii de teste:

- *Teste de explorare* prin care se urmărește examinarea și testarea preliminară a potențialului conceptelor de proiectare. Acestea includ: poziția și orientarea utilizatorului față de concept, interfața cu utilizatorul este operabilă, estimările despre cerințele consumatorului sunt corecte.
- *Teste de evaluare* pentru soluțiile potențiale.
- *Teste de validare*. Acesta include analiza utilizabilității (calitatea unui produs de a fi sigur și comod în utilizare), performanței, fiabilității, mentabilității, metodelor de asamblare și a robusteții.
- *Teste de comparare* poate fi aplicat în orice moment a procesului de proiectare pentru compararea conceptului, produsului sau a elementelor acestuia cu alternative posibile.

Testele ISO 9000 urmăresc:

- Revizuirea proiectului prin care se urmărește o evaluare a rezultatelor proiectării și cum acestea răspund tuturor cerințelor de calitate;
- Verificarea proiectului prin care se urmărește examinarea parametrilor de ieșire ale proiectului (sistemic) și de a confirma prin obiective evidente aceste ieșiri dacă corespund cerințelor de intrare.
- Validarea proiectului prin care se urmărește examinarea produselor rezultate și confirmarea că acestea satisfac cerințele utilizatorului.

O reprezentare succintă a modului de suprapunere a etapelor de proiectare și testare este prezentată în figura 5.11.

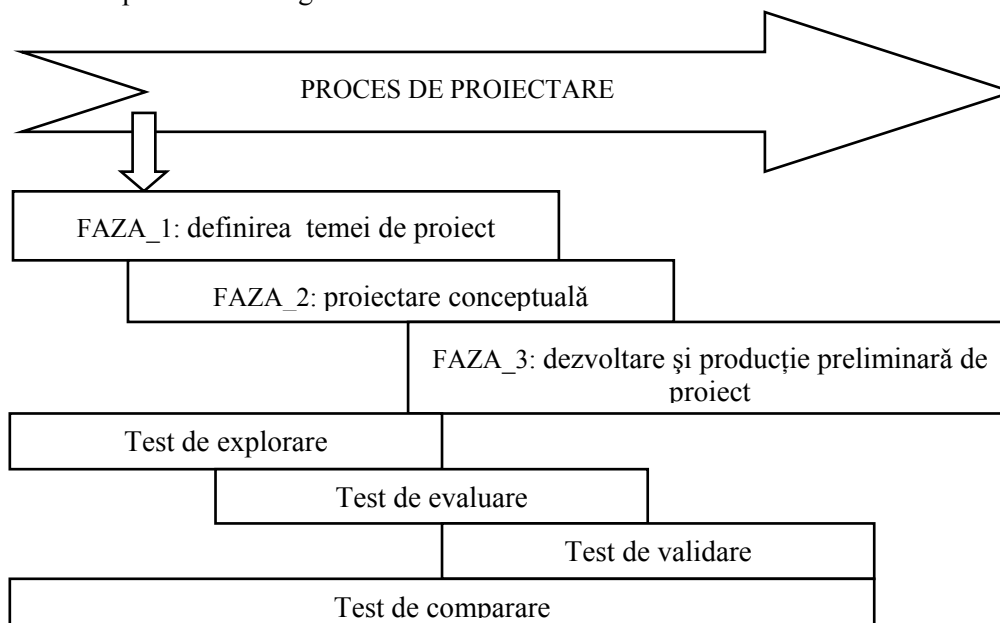


Fig. 5.11 Modul de suprapunere a etapelor de proiectare și testare

### 5.2.2. Proiectarea pentru fabricație (DFM)

Un rol esențial în obținerea unui produs de calitate revine procesului de fabricație. În trecut exista posibilitatea ca produse bine proiectate să nu poată fi realizate. Produsele erau lansate în fabricație după realizarea prototipurilor construite și ajustate în ateliere de către tehnicieni cu pregătire / abilități superioare. Dezvoltarea eficientă a produsului trebuie să treacă dincolo de pașii tradiționali constând în achiziția și implementarea produsului și a tehnologiei procesului de proiectare ca soluție. Dezvoltarea produsului trebuie să includă practici manageriale care iau în considerare nevoile consumatorului proiectând acele cerințe în interiorul produsului și apoi asigurându-se că atât fabrica cât și fabrica virtuală (furnizorii companiei) au capacitatea să fabrice efectiv produsul.

Produsele sunt inițial conceptualizate pentru a prevedea o capabilitate particulară (o caracteristică, o însușire) și să satisfacă cerințele de performanță identificate. Fiind date aceste specificații, un produs poate fi proiectat în diverse moduri. Obiectivul proiectantului trebuie să fie acela de a optimiza proiectul produsului în corelație cu sistemul de producție. Sistemul de producție al unei companii include furnizorii săi, sistemele de manipulare ale materialelor, procesele de fabricație, capabilitățile forței de muncă și sistemele de distribuție.

În general proiectantul lucrează în contextul unui sistem de producție existent care poate suporta numai modificări minimale. Totuși în anumite cazuri sistemul de producție va fi proiectat sau reproiectat în raport cu proiectul produsului. Când inginerii proiectanți și cei tehnologi lucrează împreună pentru a proiecta și raționaliza

atât produsul cât și procesele de producție și cele suport, acest lucru este cunoscut ca integritatea proiectării produsului și a procesului. Considerația proiectantului de *proiectare pentru fabricație* (*design for manufacturability* - DFM), cost, fiabilitate și mentabilitate este punctul de plecare pentru dezvoltarea integrată a produsului.

Proiectarea produsului este efectiv îmbunătățită dacă inițial sunt evaluate alternativele de proiectare existente. Proiectarea automatizată beneficiază de diverse variante (fiecare cu specificațiile proprii) pe care un proiectant le poate utiliza :

- Proiectarea asistată de calculator (Computer Aided Design – CAD) ;
- Inginerie asistată de calculator (Computer Aided Engineering – CAE);
- Modelarea solidelor;
- Analiza prin elemente finite;
- Tehnologia de grup;
- Planificarea producției asistate de calculator (Computer Aided Process Planing - CAPP).

CAD / CAE permite proiectantului să analizeze costurile efective și variantele de proiectare.

O serie de « reguli » permit trasarea unei linii de urmat în DFM [5.12]:

- *simplifică proiectarea și redu numărul componentelor* pentru că fiecare componentă este o sursă de defecte și erori. Probabilitatea de a avea un produs perfect descrește exponențial cu numărul componentelor produsului;
- *standardizează și utilizează componente și materiale obișnuite* pentru a facilita activitatea de proiectare, pentru a reduce prețul de cost și a crește calitatea. Instruirea operatorilor de lucru este mult simplificată și totodată crește oportunitatea automatizării operațiilor;
- *proiectează astfel încât să ușurezi fabricația*. Selectează procesele compatibile cu materialele și volumul producției. Selectează materiale compatibile cu procesul de producție și minimizează durata procesului. Aplică indicații specifice pentru procesul de fabricație:
  - pentru un volum mare de componente, ia în considerare turnarea și matrițarea pentru a reduce uzinarea;
  - utilizează turnarea în forme și forjarea pentru a minimiza uzinarea și efortul de prelucrare;
  - proiectează pentru o fixare ușoară prevăzând suprafețe largi, paralele și solide de sprijin;
- *proiectează în limita capabilității proceselor și evită prelucrări care nu sunt impuse de cerințele funcționale*;
- *proiectează piesele pentru orientare și manipulare sigură* minimizând efortul de lucru, ambiguitățile și erorile în procesul de orientare și îmbinare;
- *minimizează părțile flexibile și interconectările*;
- *proiectează pentru o asamblare ușoară*;
- *proiectează pentru o îmbinare și închidere eficientă*:
  - elementele de fixare prin filet sunt consumabile de timp pentru asamblare și cu dificultate pentru automatizare;
  - consideră îmbinările prin forme elastice (fig.5.12: Y – deplasarea maximă,  $\epsilon$  - deformația relativă)(tabelul 5.7 și ecuația 5.5);

- analizează alte metode și tehnici de îmbinare cu adezivi;
- armonizează tehnicile de fixare cu materialele utilizate, cerințele funcționale ale produsului și cerințele de dezasamblare și întreținere.

Tabelul 5.7

<b>h / H</b>	0.33	0.5	0.67	0.84	1
<b>K</b>	2.137	1.636	1.338	1.138	1

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot Y \cdot H}{2 \cdot L^2 \cdot K} \quad (5.5)$$

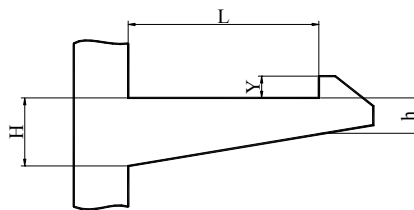


Fig. 5.12 Formă recomandabilă pentru îmbinare

- proiectează produsele modulare pentru a facilita asamblarea cu carcasa sau subansamble;
- proiectează pentru automatizarea producției;
- proiectează plăcile pentru circuitele imprimate în vederea asamblării.

Recomandările includ: minimizarea variabilității componentelor, standardizarea componentelor, utilizarea componentelor auto-insertabile, utilizarea componentelor comune etc.

Un element esențial în DFM este proiectarea formei componentelor care alcătuiesc produsul. La stabilirea formei (configurației) unui ansamblu și a elementelor acestuia trebuie să se aibă în vedere:

- îndeplinirea funcțiunii de deservire și întreținere;
- proprietățile materialelor și modul de confecționare.

Dacă se precizează corect influența asupra prețului de cost și în același timp se asigură interdependența celor două condiții se poate obține o configurație optimă pentru ansamblul proiectat. Diversele influențe asupra formei sunt menționate în figura 5.13 .

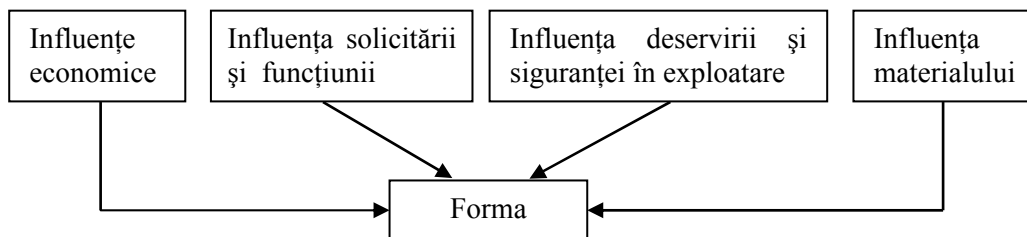


Fig. 5.13 Factori care influențează forma unei piese

Costul construcției, al materialului și al confecționării sunt principalele elemente

care influențează forma din punct de vedere economic.

Costul construcției este influențat pozitiv prin:

- utilizarea unor forme normate, standardizate, prefabricate, semifabricate și fabricate comerciale (profile, tablă, țevi, șuruburi, arcuri, știfturi etc.);
- mărirea numărului de bucăți / ansamblu;
- micșorarea tipurilor și formelor părților constructive;
- utilizarea pieselor turnate în locul celor prelucrate;
- utilizarea pieselor obținute prin deformare plastică cu cât mai puține prelucrări ulterioare;
- construcții simetrice.

Costul materialului influențează forma prin:

- realizarea unor forme optime cu utilizare minimă de material;
- utilizarea unor materiale adecvate pentru zonele puternic solicitate;
- construcții sudate în locul celor turnate etc.

Costul confecționării intervine economic asupra formei prin:

- alegerea procesului tehnologic optim;
- micșorarea numărului de suprafețe prelucrate;
- utilizarea de mașini, dispozitive, scule etc. din categoria celor curente fără a periclita însă prescripțiile impuse pieselor.

Rezistența și configurația optimă a componentelor unui ansamblu se influențează reciproc. Teoriile rezistenței materialelor sunt cele care permit obținerea soluțiilor optime.

Selecția materialelor rezolvă multe probleme de decizie importante ce apar în domeniul proiectării. Nivelul de informații necesar este de la proprietăți fizice până la cunoaștere practică a științei materialelor. Literatura de specialitate abordează problema prin diverse metode.

Un punct de vedere este cel construit pe o metodă de selecție a materialelor care are la bază trei componente.

- Prima componentă poartă denumirea de *indicele de performanță al materialului (M)*. Un exemplu pentru această etapă este rigiditatea specifică:

$$K = \frac{E}{\rho} \quad (5.6)$$

unde “E” este modulul de elasticitate longitudinal al materialului (modulul lui Young) iar “ρ” este densitatea materialului. Se preferă în general materiale cu un indice cât mai mare, după considerentul « ușor și rezistent ». În această categorie se încadrează și materialele utilizate în construcția sistemului mecanic al roboților industriali.

- A doua componentă din metodologia de selecție are la bază *diagrama de selecție a materialelor*. Un exemplu de o astfel de diagramă este prezentată în figura 5.14 unde parametrii de pe cele două axe corespund perechii “E - ρ” [5.7]. Scalele celor două axe sunt logaritmice astfel încât gama materialelor cuprinse să fie cât mai mare. Pe diagrama de alegere este prezentat un set de drepte paralele, corespunzătoare vitezei longitudinale a sunetului în materialele

respectiv ( $v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ).

- Cea de-a treia componentă a selecției are la bază *analiza secțiunii transversale* a unei componente și este denumită *factorul de formă* “ $\phi_B$ ” definit pe baza relației:

$$\phi_B = \frac{4 \cdot \pi \cdot I}{A^2} \tag{5.7}$$

unde “I” este momentul de inerție al secțiunii transversale “A”. În alegerea materialului este preconizată valoarea maximă a factorului de formă.

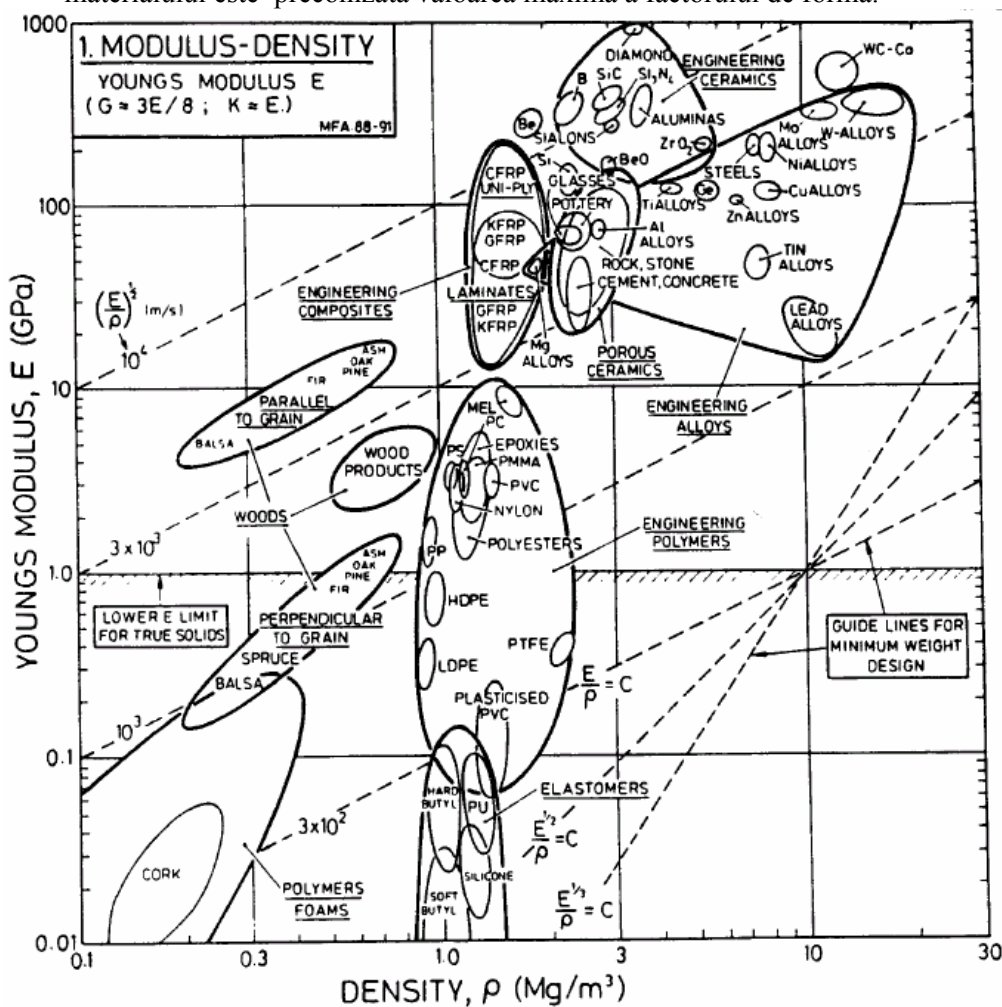


Fig. 5.14 Dependența E – ρ pentru diverse materiale

Cerințele de performanță ale materialelor se pot clasifica în cinci categorii: cerințe funcționale, cerințe de procesare, cost, fiabilitate și rezistență. O ierarhizare a

etapelor de proiectare și selecție a materialelor este prezentată în figura 5.15 [5.2].

Metoda analizei costului pe unitatea de produs este utilizată în etapa de selecție și de optimizare a proiectului.

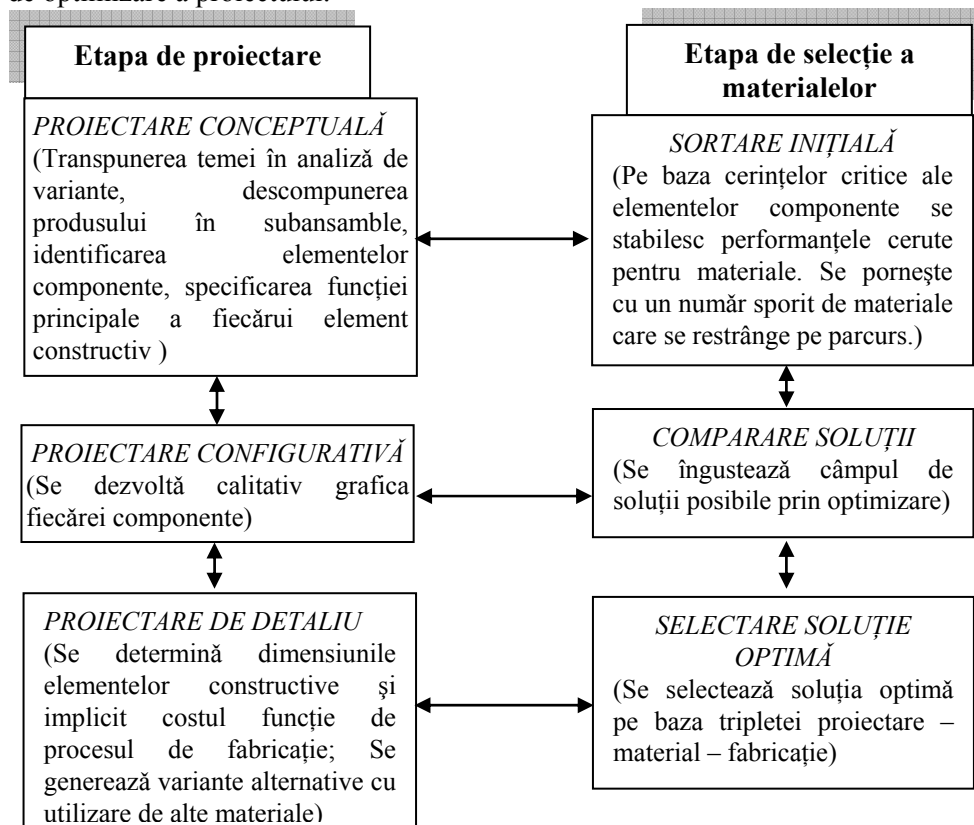


Fig. 5.15 Etape ale proiectării și selecției materialelor

*Exemplu 5.1 [5.1]*

Se consideră o bară de lungime  $L$  care este încărcată cu o forță axială  $F$  (condițiile inițiale privind solicitare axială statică, forma barei etc. nu sunt restrictive asupra generalității metodei). Se cere să se determine varianta de material care corespunde cel mai bine pentru bara dată.

Din starea de solicitare admisă, conform principiilor de calcul clasic și ținând cont de un coeficient de siguranță, se poate determina aria transversală a barei :

$$A_{nec} = \frac{F}{\sigma_a} \quad (5.8)$$

unde  $\sigma_a$  este rezistența admisibilă a materialului. Se poate stabili pentru bară o arie de realizare practică  $A_0 \geq A_{nec}$

Costul barei se poate defini ca fiind :

$$Cost\_bara = C \cdot \rho \cdot A_0 \cdot L = \frac{C \cdot \rho \cdot F \cdot L}{\sigma_a} \quad (5.9)$$



unde  $C$  – este costul pe unitatea de masă a materialului iar  $\rho$  este densitatea materialului.

Pentru o pereche de parametri impuși  $F, L$  costul barei este influențat de raportul  $\frac{C \cdot \rho}{\sigma_a}$ . Materialul cu limita inferioară a raportului anterior se va prezenta ca și materialul de selectat pe principiul cost.

Pe baza indicelui de performanță se pot formula pașii de selecție într-o problemă de proiectare [5.1]:

- identifică proprietatea care trebuie maximizată sau minimizată : greutate, cost, energie, rigiditate, stare de solicitare, deteriorarea mediului etc. ;
- transpune într-un model matematic atributele anterioare funcție de cerințele funcționale, parametrii geometrici și de material. Definește astfel funcția obiectiv care trebuie analizată.
- Identifică variabilele libere ;
- Identifică constrângerile ;
- Dezvoltă ecuațiile pentru constrângeri ;
- Inlocuiește variabilele libere pornind de la ecuațiile de constrângere în funcția obiectiv ;
- Grupează variabilele în trei categorii :
  - Cerințe funcționale « F » ;
  - Cerințe geometrice « G » ;
  - Cerințe de material « M » ;
- Identifică proprietatea de grup a materialului care determină indicele de performanță maxim.

Ashby – autorul propunerii de indice de performanță – arată că există cazuri pentru care grupul de variabile este separabil :

$$f = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M) \quad (5.10)$$

și cazuri în care variabilele nu sunt separabile.

Problema prezentată este o problemă tipică de optimizare.

*Exemplu 5. 2 [5.2]*

*Se cere să se determine printr-un proces documentat indicele de performanță pentru materialul unei vâsle utilizată la propulsia unei ambarcațiuni.*

- *Analiza funcțională*

*Vâsla se poate echivala din punctul de vedere al rezistenței materialelor cu o bară dreaptă de o anumită secțiune.*

*Problema de rezolvat urmărește alegerea materialului care să îndeplinească condiția de masă minimă (reducerea efortului depus suplimentar de vâslaș).*

*Costul produsului reprezintă de asemenea o limitare care poate fi luată în considerare. Rigiditatea ramei este importantă prin limitarea săgeții de la capătul liber. Acest aspect este bine definit. O ramă rigidă are o săgeată la capătul liber  $\Delta x = 30$  mm în condițiile : forța aplicată la capătul liber  $F = 100$  N pentru o lungime a vâslei – punctul de aplicație a forței, colierul de fixare – de  $L = 2.05$  m. O ramă ușor*

rigidă are săgeata de  $\Delta x = 50 \text{ mm}$ .

Evitarea unei distrugerii prin rupere a vâslei elimină materialele fragile din lista materialelor posibile.

Atributele ramei care trebuie avute în vedere sunt : masa, lungimea, secțiunea, geometria secțiunii transversale, rigiditatea, rezistența la rupere, rezistența la coroziune în apă, aspecte de mediu (toxicitatea materialului), cost.

- Funcția obiectiv

Se poate admite ca funcție obiectiv masa ramei. Se poate considera vâsla ca o bară de lungime  $L$ , secțiune circulară de diametru  $d$  realizată dintr-un material de densitate  $\rho$ . În aceste condiții masa ramei se poate scrie ca fiind :

$$m = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \quad (5.11)$$

- Calculul indicelui de performanță

Săgeata la capătul liber al vâslei, la un moment  $M$  aplicat, se poate defini ca fiind :

$$f = \frac{M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot I} \quad (5.12)$$

unde :  $E$  este modulul de elasticitate longitudinal al materialului,  $I$  este momentul de inerție pentru secțiunea ramei,  $C_1$  o constantă care ține cont de modul de încăstrare și respectiv de aplicare a forței.

Pe baza definiției momentului de inerție :

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (5.13)$$

se poate determina o altă formă a săgeții ramei :

$$f = \frac{64 \cdot M \cdot L^2}{C_1 \cdot E \cdot \pi \cdot d^4} \quad (5.14)$$

Pe considerentul impunerii deformației suferite de ramă, se poate elimina între relațiile (5.11), (5.14) parametrul reprezentat de diametrul ramei determinându-se masa vâslei:

$$m = \frac{\pi \cdot \rho}{4} \cdot \left( \frac{64 \cdot M \cdot L^2}{\pi \cdot C_1 \cdot E \cdot f} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot L = 2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{C_1}} \cdot \frac{L^2 \cdot M^{\frac{1}{2}}}{f^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\rho}{\sqrt{E}} \quad (5.15)$$

Prin separația constantelor, a parametrilor cunoscuți și respectiv variabilelor care intervin se poate defini indicele de performanță ca fiind :

$$IP = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \quad (5.16)$$

*Minimizarea masei înseamnă de fapt maximizarea indicelui de performanță IP. Din materialele aflate la dispoziție se poate stabili o ierarhizare optimală.*

Compararea diferitelor variante referitoare la alegerea materialelor urmează metode de decizie multicriterială. Indicele de performanță este un parametru remarcabil în cadrul acestei selecții.

Proprietăți mecanice, fizice sau chimice ale materialului se iau în considerare în evaluarea primară pentru alegerea materialului. Se poate stabili astfel o listă cu materialele ce “candidează” la utilizare. Valoarea scalată a proprietății se calculează conform relației [5.7]:

$$B = \text{proprietate scalata} = \frac{\text{valoarea numerica\_proprietate}}{\text{valoare maxima\_lista}} \cdot 100 \quad (5.17)$$

Pentru proprietăți ca și: *cost, coroziune, pierdere prin frecare* etc. scalarea urmează relația:

$$B = \text{proprietate scalata} = \frac{\text{valoare minima\_lista}}{\text{valoarea numerica\_proprietate}} \cdot 100 \quad (5.18)$$

Introducând coeficienții de importanță (corespunzător metodelor de decizie) se poate calcula indicele de performanță al materialului:

$$\text{Indice\_perfor} = \gamma = \sum_{i=1}^n B_i \cdot p_i \quad (5.19)$$

unde  $n$  este numărul de proprietăți analizate.

În cazul abordării unui criteriu de tip *cost*, o altă evaluare posibilă este pe baza unui parametru de merit al materialului:

$$\text{merit} = \frac{\gamma}{C \cdot \rho} \quad (5.20)$$

unde  $C$  este costul materialului pe unitatea de masă (materie primă, procesare, finisare etc.) iar  $\rho$  este densitatea materialului.

Corelând costul cu solicitările mecanice la care este supus materialul, relația anterioară poate căpăta și o altă formă:

$$\text{merit} = \frac{\gamma}{C_1} \quad (5.21)$$

unde  $C_1$  este costul pe unitatea de volum.

Utilizarea facilităților oferite de CAD este structurată pe considerentul existenței bazelor de date pentru materiale. Proprietățile materialelor (evaluare cantitativă), nivele de prelucrare (prelucrabilitate, sudabilitate, cost de tratare / prelucrare etc.), clasa materialului (rezistent la oboseală, rezistent la coroziune, rezistent termic, materiale electrice etc.), forma semifabricatului (rotund, fir, tub, forjat etc.), indici de proiectare (nume, grupa de materiale sau țara de origine, codul conform Unified Numbering Systems sau American Iron and Steel Institute), compoziție (procente ale materialelor componente) sunt câteva din informațiile incluse în bazele de date și care oferă

posibilitatea alegerii materialului dorit.

Utilizarea unui sistem expert permite extragerea din baza de date a informațiilor referitoare la materiale într-un mod rapid și profesional.

Comportarea materialului la vibrații, minimizarea influențelor termice sunt alte aspecte esențiale în alegerea materialului ținându-se cont și de factorul aplicație.

Vibrațiile asupra sistemelor tehnice au în general un efect nedorit. Pentru a reduce efectele nedorite se au în vedere două posibilități:

- izolarea sistemului față de sursa care generează vibrația;
- proiectarea adecvată a sistemului pentru un răspuns minimal.

Utilizarea unor materiale adecvate este o cerință strictă pentru cea de a doua posibilitate. Problema se poate aborda apelând la doi indici de performanță. În primul caz frecvența naturală a sistemului este indicele care depinde printre altele de modulul de elasticitate  $E$ , densitatea  $\rho$  și factorul de formă  $\phi_B$ . Sistemele supuse unor vibrații cu frecvențe care conțin și frecvența naturală a sistemului impun coeficientul de amortizare  $\eta$  în selecția materialului.

### 5.3. Proiectarea în domeniul electric

#### 5.3.1. Introducere

Impactul produs – mediu are ora la actuală o importanță deosebită. Acest aspect reiese și din recomandările Comitetului Electrotehnic Internațional privind aprecierile și evaluările acestui impact (tabelul 5.8)[5.11]. Diversele măsuri se consideră aplicabile în cadrul proiectării produselor electrice și electronice. Se urmăresc principiile de alegerea materialelor, reducerea utilizării materialelor vătămate, proiectarea plăcilor de circuit.

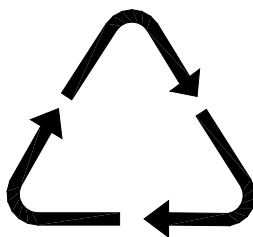
Tabelul 5.8

<b>Evaluarea compoziției produselor</b>	Compoziția chimică a produselor; Compoziție chimică cu potențial cumulativ; Acumulatori și baterii (tip, greutate, compoziție și cantitate); Materiale utilizate pentru ambalare și transport;
<b>Evaluarea impactului cu mediu a industriei</b>	Energia și serviciile consumate pentru fiecare parte materializată; Emisiile pe durata producției: aer, apă, gaze etc. și posibilitățile de a le elimina, reduce sau controla; Măsurarea și analiza emisiilor; Materialele utilizate în producție: reciclabile sau dăunătoare.
<b>Transport, înmagazinare, reciclare</b>	Instrucțiuni pentru ambalare și expediție / transport; Reevaluarea necesităților de ambalare și transport interoperațional a tuturor componentelor; Instrucțiuni pentru reducerea, reutilizarea, reciclarea materialelor pentru ambalaj; Instrucțiuni pentru transportul, stocarea, reutilizarea, reciclarea materialelor consumabile; Identificarea componentelor reutilizabile sau reciclabile.



În tabelul 5.9 semnificația notațiilor este următoarea:

- – există compatibilitate
- – există compatibilitate pentru un volum limitat
- – există compatibilitate pentru volum limitat, cu conținut redus de aditivi
- - incompatibilitate



> PA 66 - GF 30 <

Fig. 5.16 Marcarea componentelor din plastic

Proiectarea pentru asamblare (*Design for Assembly*) este o opțiune și în domeniul electric. Ditron Manufacturing consideră ca o primă regulă pentru DFA și DFM comunicarea. Atingerea unui preț de cost convenabil impune o comunicare continuă și pertinentă dintre fabricant și proiectant.

Dimensiunea lotului de produse care se intenționează a se produce este hotărâtor pentru alegerea metodei convenabile privind asamblarea.

Plăcile cu circuit imprimat reprezintă o clasă importantă a sistemelor electrice. Acesta este motivul pentru care o serie de recomandări se referă la acestea.

### 5.3.3. Marcarea componentelor de circuit

Marcarea componentelor utilizate în realizarea circuitelor este o obligație a firmei producătoare. În acest mod se reduce timpul necesar orientării componente și se evită montaje greșite, generatoare de erori și defecte ulterioare.

Terminalele diodei sunt identificabile prin inscripționarea acesteia (fig.5.17). În partea catodului este trasat un semn circular.

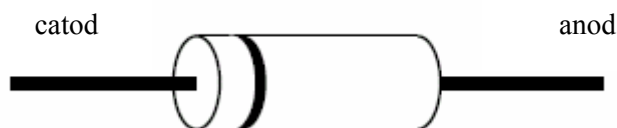


Fig. 5.17 Marcarea terminalelor unei diode

Pentru identificarea terminalelor diodei electroluminiscente (LED) se pot utiliza două variante:

- Într-o vedere de jos, marginea dreaptă indică poziția catodului (teșitură pe generatoarea corpului);
  - Terminalul catodului este mai scurt decât cel al anodului;
- Circuitele integrate (IC) au o mare diversitate de capsule, două fiind comune:
- Terminale duble în linie - DIP (dual – in line package);

- Chip încapsulat în plastic - PLCC (*plastic leaded chip carrier*).

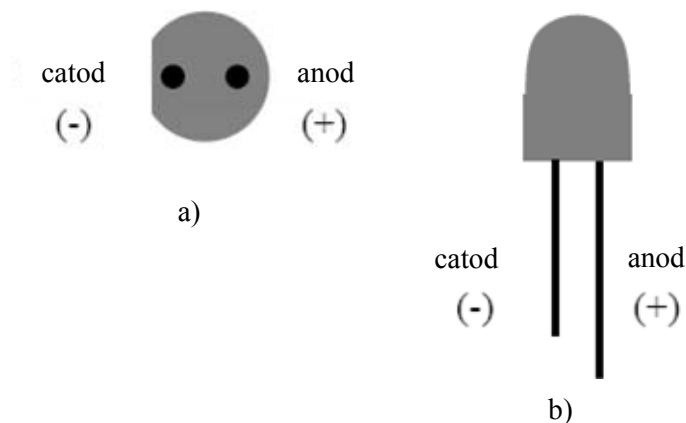


Fig. 5.18 Identificarea terminalelor diodei electroluminiscente

În ambele cazuri un marcaj - de o anumită formă (un punct, o tăietură, o nervură) - pe carcasa circuitului desemnează pinul "1". După identificarea pinului "1" ordinea pinilor următori este conformă sensului orar (fig.5.19). În figura 5.20 se prezintă vederea de sus a carcasei unui circuit (DIP) cu identificarea degajării necesare identificării pinului "1" și respectiv un chip PLCC.

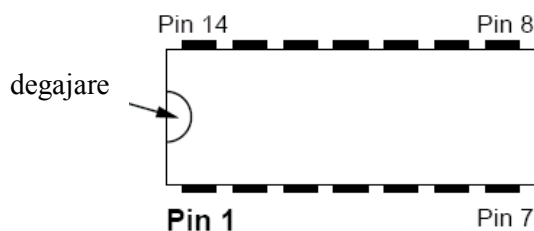


Fig. 5.19 Identificarea pinilor pentru un IC

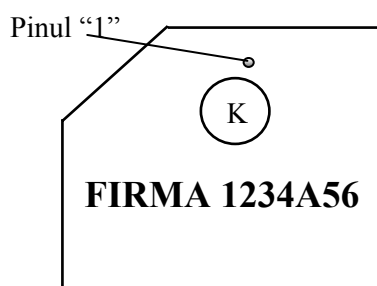


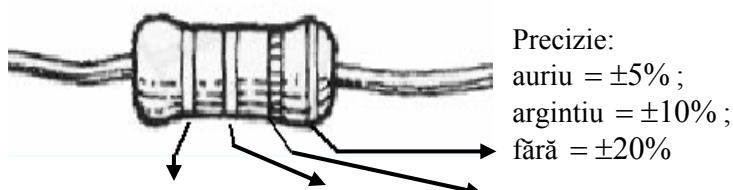
Fig. 5.20 Identificarea unui circuit imprimat din clasa PLCC

Marcarea rezistențelor are la bază codul culorilor (tabelul 5.10). În tabelul 5.11 se prezintă principiul de dispunere a culorilor, codul și corespondentul numeric al acestuia. Un cod al culorilor se aplică și în cazul marcării condensatoarelor. Pentru a evita confuzii cu codul din cazul rezistoarelor, se impune o atenție la decodificare.

Tabelul 5.10

Culoare 1	Culoare 2	Culoare 3	Valoare [ $\Omega$ ]
galben	violet	roșu	4700
portocaliu	roșu	maro	320
galben	galben	maro	440
verde	albastru	galben	560k

Tabelul 5.11



Culoare	Banda 1	Banda 2	Banda 3 = nr. de zerouri
Negru	0	0	
Maro deschis	1	1	0
Roșu	2	2	00
Portocaliu	3	3	000
Galben	4	4	0000
Verde	5	5	00000
Albastru	6	6	000000
Violet	7	7	0000000
Gri	8	8	00000000
Alb	9	9	000000000

Condiția de polarizare impusă și eventualele erori care pot rezulta din neaplicarea acestui lucru sunt prezentate în tabelul 5.12.

Marcarea componentelor în desenul de bază trebuie să fie consistentă. Orientarea marcajului și stilul sunt esențiale pentru înțelegerea proiectării plăcii de circuit. Se recomandă utilizarea unei metode de marcarea a orientării pinilor și a polarizării. Detalii referitoare la stilul de scriere vizibil, consistent (grosimea liniei, textului, înălțimea) sunt aspecte care nu trebuie scăpate din vedere. Aceste detalii sunt importante pentru inspecția plăcii și pentru rezolvarea unor defecte (fig.5.21).

Marcarea pinilor reduce timpul necesar pentru rezolvarea defectelor și pentru inspecția asamblării.

Spațiul alocat pentru plasarea componentelor trebuie să fie suficient (superior cu până la 10 %) pentru a asigura o plasare corespunzătoare (fig.5.22).

Numele plăcii, numărul de identificare trebuie să fie marcate în mod clar pe fața de bază. O zonă semnificativă trebuie asigurată pentru marcajul reviziilor, modificărilor de pe placă. Pe placă, în zona din cupru se va marca numărul plăcii și revizuirea (controlul). Orice revizuire, modificare are nevoie de aspectul inițial al plăcii. Modele ale marcajului pentru cele specificate sunt reprezentate în figura 5.23.



Tabelul 5.12

Componenta	Polarizare impusă ?	Efecte ale montajului incorect
Rezistor	NU	
Rezistor izolat	NU	
Rezistor în pachet	DA	Circuitul nu funcționează
Diodă	DA	Circuitul nu funcționează
LED	DA	Dispozitivul nu funcționează
Condensator monolitic	NU	
Condensator din tantal	DA	Pericol explozie
Condensator electrolitic	DA	Pericol explozie
DIP socket	DA	Confuzie în utilizare
PLCC socket	DA	Perturbare în funcționare
Circuit integrat	DA	Supraîncălzire; avarie continuă
Inductivitate	NU	
Tranzistor	DA	Circuitul nu funcționează

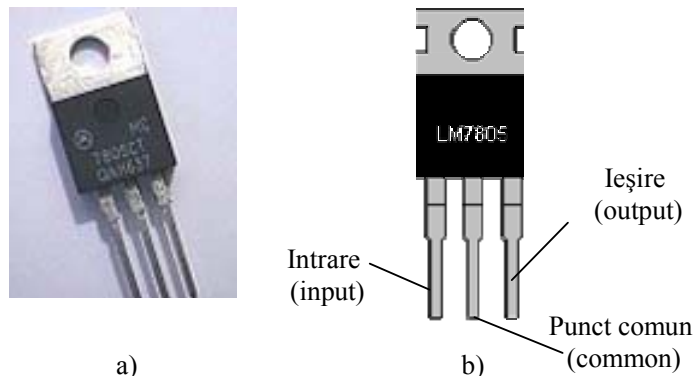


Fig. 5.21 Marcarea și dispunerea terminalelor pentru un regulator de tensiune

Orientarea componentelor pe placă se recomandă, în limita posibilităților, să se respecte aceeași direcție și spații uniforme pe direcție orizontală și verticală. Procesele de asamblare sunt influențate de aceste aspecte.

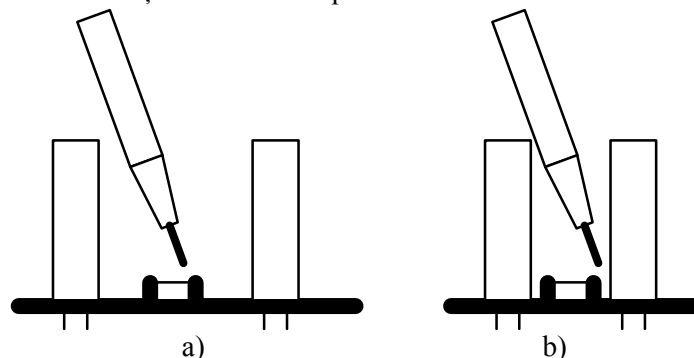
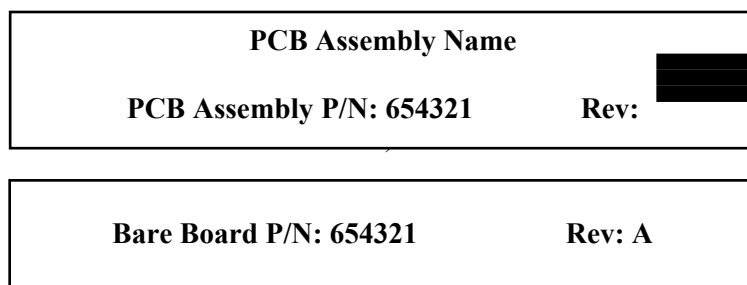


Fig. 5.22 Alocarea spațiului pentru plasarea componentelor



b)

Fig. 5.23 Marcaje ale plăcii cu circuite imprimate

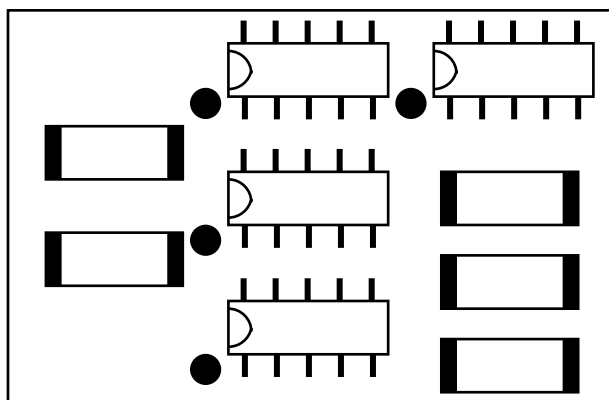


Fig. 5.24 Orientarea componentelor pe placă

Plasarea componentelor trebuie avută în vedere și din aspectul înălțimii componentelor învecinate. Un spațiu lateral insuficient dintre componente face dificilă procesul tehnologic de asamblare (fig.5.24).

#### 5.4. Proiectare electronică

Gordon Moore co – fondator a emis în 1965 o considerație, privind evoluția numărului de tranzistoare pe unitatea de suprafață a circuitelor integrate, devenită peste ani “legea lui Moore (Moore’s Law)”[5.21]. Evoluția circuitelor imprimate este în atenția cercetătorilor firmelor de prestigiu, cosnemându-se o luptă continuă pentru depășirea barierelor din legea Moore [5.18], [5.19]. Drept dovadă a celor spuse se prezintă evoluția numărului de tranzistoare pe categoria de microprocesor Intel (tabelul 5.13).

Tabelul 5.13

CPU	Anul	Număr tranzistoare
Procesor Intel ® Pentium ® III	1999	24.000.000
Procesor Intel ® Pentium ® 4	2000	42.000.000
Procesor Intel ® Itanium ®	2002	220.000.000
Procesor Intel ® Itanium ® 2	2003	410.000.000

Legea lui Moore a însemnat o revoluție pentru diversele și vastele aplicații ale circuitelor integrate. Evoluția a avut însă la bază și un management al calității care a sprijinit prin diversele sale mijloace această evoluție (fig.5.25).

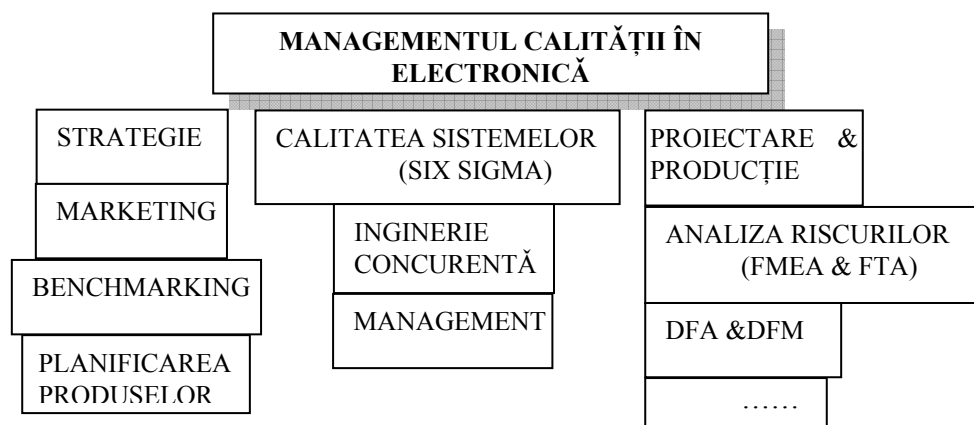


Fig. 5.25 Calitate în electronică

Un prim caz al legii Moore este ilustrat în figura 5.26 și se referă la o comparație dimensională a sistemului de acționare a unui floppy 1.44 MB 3.5 " – generația 92 (a) și un floppy 360 kB 5.25 " – generația 80 (b). Fiabilitatea în această generație mecatronică a tehnologiei perifericelor a fost urmărită cu mare atenție [5.21]. Această performanță s-a putut atinge pe baza respectării unor principii de proiectare referitoare la minimizarea masei, a dimensiunilor de gabarit. Considerații asemănătoare se pot face pentru hard-disk, pentru restul echipamentelor din sistemul de calcul.

Un al doilea caz al legii lui Moore, o comparație mecatronică, este ilustrat în figura 5.27 referitor la un hard-disk pentru un laptop: a) generația de mijloc al anilor '90; b) generația primilor ani '90. Memoria inclusă în varianta a) este cu mult superioară celei din varianta b) dar la dimensiuni mai mici [5.21].

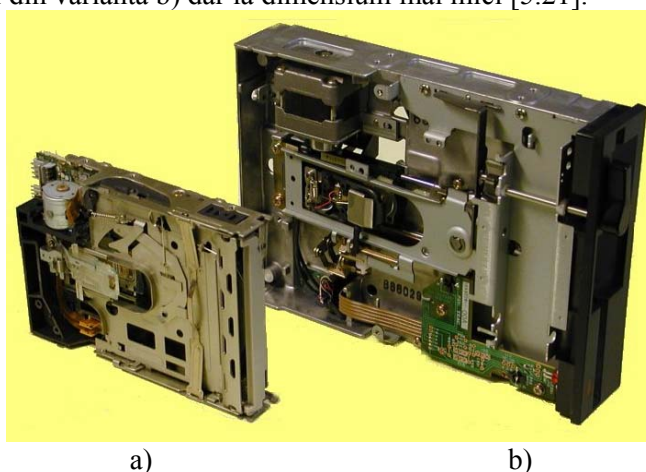


Fig. 5.26 Comparație între generații hard-disk



Fig. 5.27 Comparație între generații hard-disk

Un al treilea caz ale legii Moore se sprijină pe o comparație a tehnologiei de realizare a plăcii de circuit imprimat pentru hard-disk-ul unui laptop (asemănător cazului 2 prezentat).

Ca o concluzie a celor prezentate anterior se poate evidenția o modificare conceptuală a orientării dezvoltării produselor cu referire directă la evoluția tehnologică (fig.5.28).

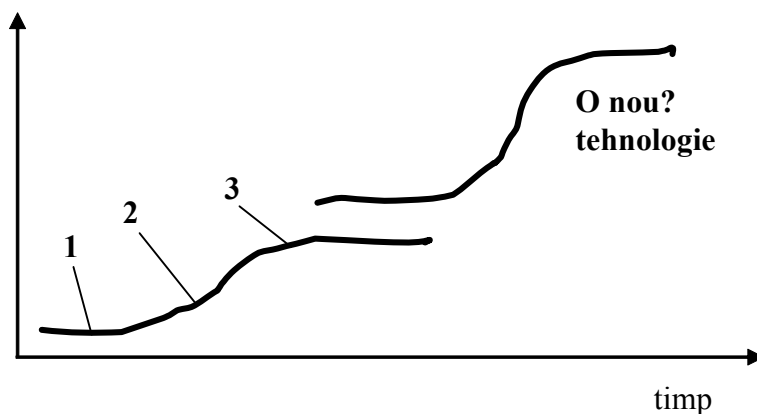


Fig. 5.28 Curba S a evoluției produselor

## 5.5. Concluzii

Activitatea de proiectare este o activitate complexă. În decursul timpului s-a încercat să se orienteze această activitate în mod direct spre scopul urmărit. Așa cum arătam în paragrafele anterioare, mecatronica este un domeniu multidisciplinar care a apărut ca o necesitate în obținerea unor produse noi, de calitate, cu funcții noi printr-o activitate de grup. În figura 5.29 se prezintă o extensie a conceptului de *proiectare pentru X* avându-se în vedere trei cicluri de viață individuale - *hardware*, *software* și *uman* – și evoluția noțiunii de proiect de la nivelul de sistem la nivelele de subsisteme. Se ilustrează în acest mod localizarea diverselor concepte de *design for x* și importanța acestora în abordarea generală [5.3].

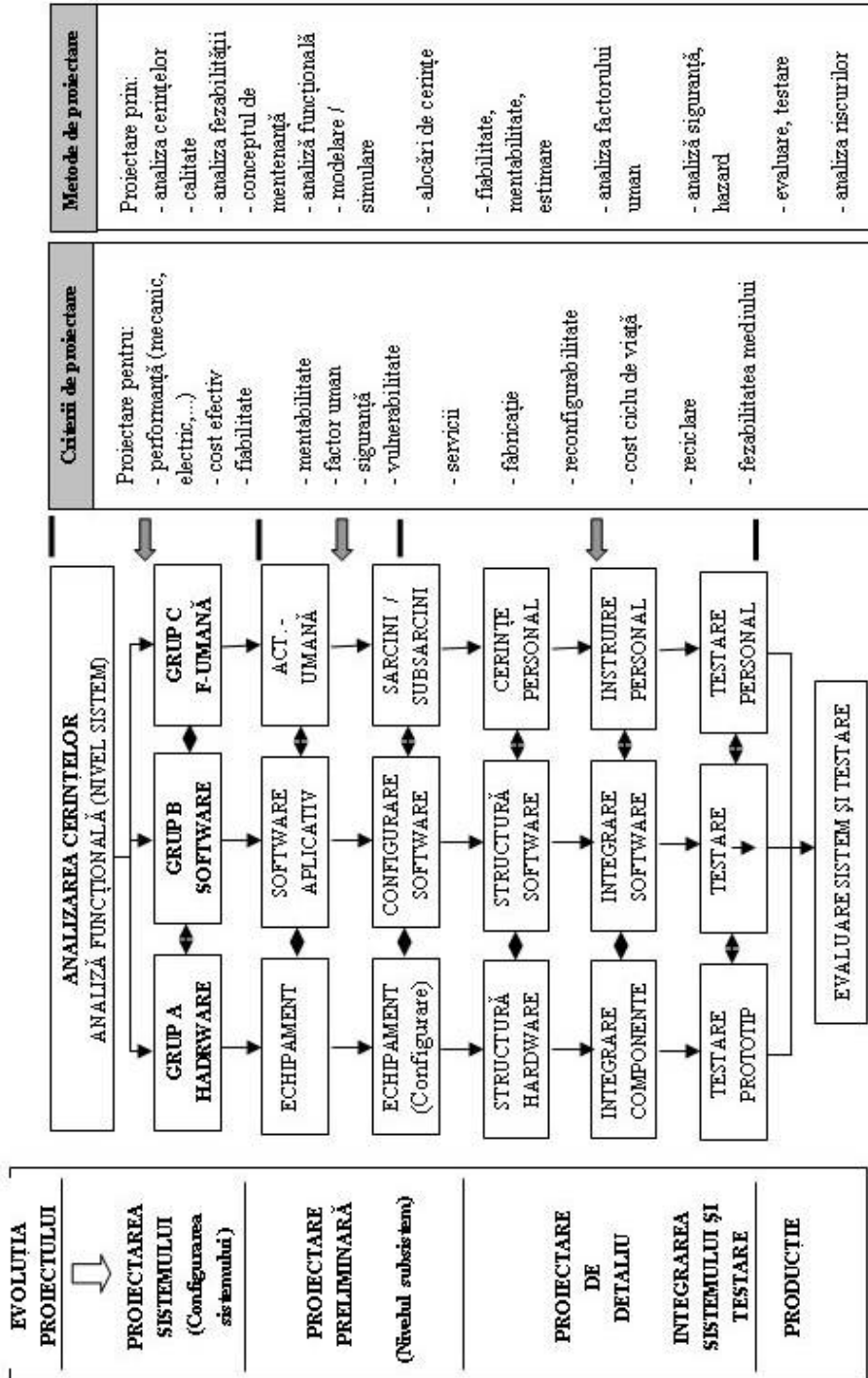


Fig. 5.29 Integrare hardware, software și factor uman

**5.6. Bibliografia capitolului 5**

- [5.1] Ashby, M.F., Performance Indices, ASM Metals Handbook, vol.20, ASM International, Materials Park, OH, 1997, p.281-290
- [5.2] Besson, J.: Sélection de matériaux corrigé, [http://www.mat.enscm.fr/Personnel/Besson/COURS\\_MATERIAUX/cours\\_materiaux.html](http://www.mat.enscm.fr/Personnel/Besson/COURS_MATERIAUX/cours_materiaux.html)
- [5.3] Blanchard, B.S., Fabrycky, W.J., Systems Engineering and Analysis, Prentice Hall, 2006
- [5.4] Crișan, I., s.a., Sisteme flexibile de montaj cu roboți și manipolatoare, Ed. Tehnică, București, 1988
- [5.5] Dolga, V., s.a., Ecodesign, Universitatea „Transilvania” din Brașov, 2006
- [5.6] Dolga, V., Dolga, L., Design and evaluation in mechatronics, Acta Technica Napocensis – Applied Mathematics and Mechanics, 49, vol.II, p.269-274
- [5.7] Farag, M.M., Quantitative methods of materials selection (cap.1), în “Handbook of Materials Selection”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002
- [5.8] Franck, H.E., Handhabingseinrichtungen, Krausskopf Verlag, Mainz, 1975
- [5.9] Gusev, A.A., Avtomatizația sborki zubciatih peredaci, Itogi nauki i tehniki, tom 6, Moskva, 1990
- [5.10] Hesse, S., Roboter-Automat mit Zukunft, Wiss. Beitrage der IH Zwickau, 1988, nr.2, p.2
- [5.11] Karna, A., Environmentally oriented product design. A Guide for Companies in the Electrical and Electronics Industry, Helsinki, 1998
- [5.12] Kenneth, C., Design for manufacturability / assembly guidelines, <http://www.npd-solutions.com>
- [5.13] Kovacs, Fr., s.a, Manipolatoare, roboți și aplicațiile lor industriale, Ed. Facla, Timișoara, 1982
- [5.14] Mahmoud, M.F., Quantitative methods of materials selection, în “Handbook of Materials Selection”, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [5.15] Popinceanu, N.G., Puiu, V., Machine Elements, Editura Junimea, Iași, 2003
- [5.16] Salustri, F.A, Morphological Chart, <http://deed.ryerson.ca/x/bin/xiki/view/learning/MorphologicalChart>
- [5.17] Whitney, D.E., s.a., Part mating theory for compliant parts, R 1407, CSDL Massachusetts, 1980
- [5.18] \*\*\*, Moore's law, [http://www.webopedia.com/TERM/M/Moores\\_Law.html](http://www.webopedia.com/TERM/M/Moores_Law.html)
- [5.19] \*\*\*, Moore's Law for Intel CPUs, <http://www.physics.udel.edu/wwwusers/watson/scen103/intel.html>
- [5.20] \*\*\*, Silicon. Moore's Law, <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>
- [5.21] \*\*\*, Moore's Law is stable, <http://www.expira.se/ep/>
- [5.22] \*\*\*, Controlled Convergence, <http://www.betterproductdesign.net/tools/concept/convergence.htm>