

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

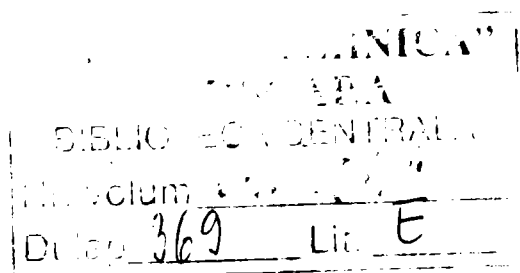
ING. ADRIAN PAVEL PUGNA

***CERCETĂRI PRIVIND PROIECTAREA ROBUSTĂ
TAGUCHI A PROCESULUI DE CREȘTERE PRIN
METODA HIDROTERMALĂ A MONOCRISTALELOR
DE α - CUARȚ***

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

PROF. DR. ING. MARCU BALEKICS

PROF. DR. ING. IOAN NICOARĂ



TIMIȘOARA - 2005

CUPRINS

| | |
|--|-----|
| INTRODUCERE | i |
| A. Oportunitatea și obiectivele tezei..... | i |
| B. Prezentarea conținutului tezei..... | iii |
| | |
| CAPITOLUL I Metoda Taguchi. Prezentare Generală | 1 |
| 1.1 Introducere..... | 1 |
| 1.2 Filozofia abordării Taguchi..... | 8 |
| | |
| CAPITOLUL II Proiectarea Robustă Taguchi | 12 |
| 2.1 Proiectarea Calității “off-line” Taguchi. “Funcția Pierdere a Calității”..... | 12 |
| 2.2 Funcția pierdere a calității Taguchi..... | 14 |
| 2.2.1 Expresia matematică a funcției pierdere pătratică Taguchi..... | 15 |
| 2.2.2 Funcția pierdere pătratică Taguchi în cazul criteriilor țintă..... | 16 |
| 2.2.3 Funcția pierdere pătratică Taguchi în cazul criteriilor de minimizat..... | 18 |
| 2.2.4 Funcția pierdere pătratică Taguchi în cazul criteriilor de maximizat..... | 19 |
| 2.3 Extinderea funcției pierdere a calității Taguchi. Funcția pierdere cuartică.... | 20 |
| 2.3.1 Modul de obținere a funcției pierdere cuartice (FPQ)..... | 20 |
| 2.3.2 Funcția pierdere cuartică asimetrică în cazul $\Delta_1 \neq \Delta_2$ | 21 |
| 2.3.3 Funcția pierdere cuartică asimetrică în cazul $\Delta_1 = \Delta_2$ | 23 |
| 2.3.4 Funcția pierdere cuartică simetrică..... | 24 |
| 2.3.5 Pierdere așteptată în cazul FPQ..... | 25 |
| 2.4 Determinarea mediei unui proces de fabricație în cazul unei caracteristici de calitate directe..... | 26 |
| 2.4.1 Analiza factorilor de influență asupra valorii optime a lui δ | 36 |
| 2.4.2 Analiza sensibilității lui EL (δ_0)..... | 37 |
| 2.5 Determinarea mediei optime a unui proces pentru o caracteristică de calitate indirecte..... | 39 |
| 2.5.1 Modelul Wen și Mergen..... | 39 |

| | |
|--|----|
| 2.5.2 Modelul Wen și Mergen modificat..... | 40 |
| 2.5.2.1 Modelul Wen și Mergen modificat pentru o funcție pierdere pătratică asimetrică..... | 41 |
| 2.5.2.2 Modelul Wen și Mergen modificat pentru o funcție pierdere liniară asimetrică..... | 44 |
| 2.6 Raportul Semnal/Zgomot (S/N Ratio)..... | 46 |
| 2.6.1 Utilizarea raportului Semnal/Zgomot ca indicator de performanță în cazul criteriilor statice..... | 46 |
| 2.6.1.1 Raportul Semnal/Zgomot pentru criteriile țintă..... | 48 |
| 2.6.1.2 Raportul Semnal/Zgomot pentru criteriile ce trebuie minimizate..... | 51 |
| 2.6.1.3 Raportul Semnal/Zgomot pentru criteriile ce trebuie maximizate..... | 52 |
| 2.6.1.4 Măsurarea performanței pentru criteriile dinamice..... | 52 |
| 2.6.2 Generalizare raportului Semnal/Zgomot..... | 56 |
| 2.6.2.1 Posibilități de extindere a raportului Semnal/Zgomot..... | 56 |
| 2.6.2.1.1 Extinderea raportului Semnal/Zgomot bazată pe probabilitatea de apariție a experimentelor..... | 57 |
| 2.6.2.1.2 Extinderea raportului Semnal/Zgomot bazată pe intervalele de necesitate..... | 59 |
| 2.6.2.1.3 Extinderea raportului Semnal/Zgomot bazată pe intervalele de variație liberă (intervale de posibilitate)..... | 60 |
| 2.6.2.1.4 Extinderea raportului Semnal/Zgomot la variabilele ce necesită ierarhizare..... | 62 |
| 2.6.2.1.5 Extinderea raportului Semnal/Zgomot la problemele cu restricții..... | 62 |
| 2.7 Proiectarea Calității “off-line” Taguchi. Proiectarea parametrilor..... | 63 |
| 2.7.1 Matrici de experiențe fracționate ortogonale Taguchi standard..... | 66 |
| 2.7.2 Planuri de experiențe Taguchi..... | 68 |
| 2.7.2.1 Procedura practică de realizare a unui plan de experiențe clasic..... | 70 |
| 2.7.2.2 Procedura practică de realizare a unui plan de experiențe Taguchi..... | 74 |
| 2.7.2.3 Optimizarea simultană a mai multor criterii referitoare la calitate..... | 76 |

| | |
|--|------------|
| 2.7.3 Planuri de experiențe Taguchi combinate..... | 77 |
| 2.8 Proiectarea parametrilor pe baza modelelor de programare neliniară..... | 78 |
| 2.9 Proiectarea calității “off-line”. Proiectarea toleranțelor..... | 81 |
| 2.9.1 Determinarea toleranțelor pe baza percepției clientului..... | 82 |
| 2.9.2 Proiectarea toleranțelor pentru un sistem cu toleranțe specificate inegale folosind funcția pierdere a calității Taguchi..... | 83 |
| 2.9.2.1 Modelul probabilistic Tsai pentru proiectarea toleranțelor..... | 83 |
| 2.9.2.2 Modelul probabilistic Tsai modificat..... | 84 |
| 2.10 Controlul Calității “on-line” Taguchi..... | 87 |
| 2.10.1 Fișele de control și Controlul Calității “on-line” Taguchi..... | 88 |
| 2.10.2 Procedeeul “Măsurare și Sortare” (M/S)..... | 89 |
| 2.10.3 Procedeeul “Diagnostic și Reglaj” (D/R)..... | 90 |
| 2.10.4 Procedeeul “Predicție și Corecție” (P/C)..... | 93 |
| 2.11 Ingineria Robustă Taguchi..... | 96 |
| 2.11.1 Sisteme tehnice (tehnologice). Funcția ideală..... | 97 |
| 2.11.2 Strategia semnalului, factorilor controlați și a zgomotului..... | 98 |
| 2.11.3 Strategia de implementare și aplicare a Ingineriei Robuste Taguchi..... | 99 |
| 2.12 Concluzii..... | 102 |
| CAPITOLUL III Metoda Taguchi. Comparații și Oportunități..... | 103 |
| 3.1 Introducere..... | 103 |
| 3.1.1 Nivelul invențiilor – inventivității..... | 106 |
| 3.1.2 Matricea Contradicțiilor..... | 107 |
| 3.2 Metoda Taguchi și Metoda TRIZ..... | 109 |
| 3.2.1 Analiza “Substanță – Câmp” (SC)..... | 109 |
| 3.2.2 Rezultatul Final Ideal (IFR)..... | 117 |
| 3.2.3 Sistemul Sistemelor și Resursele..... | 118 |
| 3.2.4 ARIZ – Algoritm pentru Rezolvarea Problemelor Inventive..... | 118 |
| 3.2.5 Modul de rezolvare a problemelor cu ajutorul TRIZ..... | 120 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.2.6 | Comparație Taguchi – TRIZ pe baza focalizării funcției..... | 120 |
| 3.2.7 | Comparație Taguchi – TRIZ pe baza efectelor factorilor și contradicțiilor..... | 122 |
| 3.2.8 | Comparație Taguchi – TRIZ pe baza raportului Semnal/Zgomot..... | 124 |
| 3.2.9 | Comparație Taguchi – TRIZ pe baza etapelor procesului de rezolvare a problemelor..... | 125 |
| 3.2.10 | Utilizarea conceptelor și tehnicilor metodei Taguchi la atingerea caracteristicilor și obiectivelor IFR..... | 127 |
| 3.2.11 | Utilizarea metodei Taguchi la tehnica “Trendul Evoluției” | 127 |
| 3.2.12 | Utilizarea metodei Taguchi la strategia “Utilizare Resurselor”..... | 128 |
| 3.2.13 | Posibilități de utilizare pe etape a metodei Taguchi în tehnica ARIZ.... | 129 |
| 3.2.14 | Comparație între punctele forte și slabe ale metodelor Taguchi și TRIZ..... | 130 |
| 3.2.15 | Concepte ale metodei Taguchi neutilizate în TRIZ..... | 130 |
| 3.2.16 | Metodologia de rezolvare a problemelor prin efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ..... | 131 |
| 3.3 | Metoda Taguchi și Proiectarea Axiomatică..... | 137 |
| 3.3.1 | Comparație Proiectare Robustă Taguchi – Proiectare Axiomatică pe baza focalizării funcției..... | 144 |
| 3.3.2 | Comparație Proiectare Robustă Taguchi – Proiectare Axiomatică pe baza axiomelor de proiectare..... | 145 |
| 3.3.3 | Comparație Proiectare Robustă Taguchi – Proiectare Axiomatică pe baza corolarelor de proiectare..... | 146 |
| 3.3.4 | Comparație între punctele forte și slabe ale Proiectării Robuste Taguchi și Proiectării Axiomatice..... | 147 |
| 3.3.5 | Legătura Proiectării Robuste Taguchi cu Proiectarea Axiomatică pe baza conținutului informațional al proiectului..... | 147 |
| 3.4 | Metoda Taguchi și QFD..... | 155 |
| 3.5 | Metoda Taguchi și Modelul Kano..... | 157 |

| | |
|--|------------|
| 3.5.1 Calitatea tridimensională..... | 159 |
| 3.5.1.1 Calitatea de bază (BQ) și FMEA + AFD..... | 160 |
| 3.5.1.2 Calitatea de performanță (PQ) și Taguchi + TRIZ..... | 161 |
| 3.5.1.3 Calitatea de încântare (EQ) și DE..... | 161 |
| 3.5.2 Funcții “Pierdere a Calității” bazate pe modelul Kano..... | 162 |
| 3.5.2.1 Funcția “Pierdere a Calității” în cazul PQ..... | 162 |
| 3.5.2.2 Funcția “Pierdere a Calității” în cazul BQ..... | 164 |
| 3.5.2.3 Funcția “Pierdere a Calității” în cazul EQ..... | 164 |
| 3.6 Metoda Taguchi și Procesul Global 8D (G8D)..... | 165 |
| 3.7 Concluzii..... | 167 |
| | |
| CAPITOLUL IV Tehnica creșterii monocristalelor de dimensiuni mari..... | 169 |
| 4.1 Tehnici de procesare a monocristalelor..... | 169 |
| 4.1.1 Introducere..... | 169 |
| 4.1.2 Creșterea cristalelor din fază gazoasă (transport de vapori)..... | 170 |
| 4.1.2.1 Creșterea prin transport fizic al vaporilor..... | 170 |
| 4.1.2.2 Creșterea prin transport chimic al vaporilor..... | 171 |
| 4.1.2.3 Epitaxie prin fascicul molecular (MBE)..... | 172 |
| 4.1.3 Creșterea cristalelor din soluție..... | 173 |
| 4.1.3.1 Creșterea cristalelor din soluție apoasă..... | 173 |
| 4.1.3.2 Metoda hidrotermală..... | 174 |
| 4.1.3.3 Epitaxie în faza lichidă..... | 175 |
| 4.1.3.4 Tehnici de creștere din gel. Tehnici de transport ale solventului..... | 176 |
| 4.1.4 Creșterea cristalelor din topitură..... | 176 |
| 4.1.4.1 Metoda Czochralski..... | 177 |
| 4.1.4.2 Metoda Bridgman..... | 180 |
| 4.1.4.3 Metoda Verneuil..... | 181 |
| 4.1.4.4 Metoda topirii zonale..... | 182 |
| 4.1.5 Creșterea cristalelor din faza solidă..... | 184 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.6 Metoda hidrotermală – unica metodă de creștere a monocristalelor | |
| de α – cuarț..... | 185 |
| 4.2 Creșterea cristalelor din soluție. Tehnica hidrotermală..... | 185 |
| 4.2.1 Aspecte teoretice ale creșterii hidrotermale a cristalelor..... | 185 |
| 4.2.1.1 Teorii bazate pe difuzie..... | 185 |
| 4.2.1.2 Teorii bazate pe structura microscopică..... | 187 |
| 4.2.2 Instalația pentru creșterea hidrotermală a cristalelor..... | 189 |
| 4.2.3 Principii fizico – chimice și hidrodinamice ale creșterii | |
| hidrotermale a cristalelor..... | 191 |
| 4.2.3.1 Minimizarea potențialului Gibbs..... | 191 |
| 4.2.3.2 Principii de bază în formarea fazelor..... | 193 |
| 4.2.3.3 Soluții, solubilitatea și cinetica cristalizării..... | 195 |
| 4.2.3.4 Procese elementare implicate în obținerea cristalelor din soluție..... | 196 |
| 4.2.3.5 Procese de transport la interfața lichid – solid..... | 197 |
| 4.2.3.6 Cristalizarea și nucleația..... | 198 |
| 4.2.3.7 Solubilizarea..... | 199 |
| 4.2.3.8 Efectul impurităților asupra creșterii cristalelor..... | 201 |
| 4.3 Parametri fizici și constuctivi ce determină creșterea monocristalelor | |
| de α – cuarț..... | 202 |
| 4.3.1 Concentrația și natura mineralizatorului..... | 202 |
| 4.3.2 Gradul de umplere al autoclavei..... | 204 |
| 4.3.3 Suprafața de solubilizare și cristalizare..... | 205 |
| 4.3.4 Temperatura de solubilizare și cristalizare. Gradientul de temperatură..... | 206 |
| 4.3.5 Deschidere șicanei..... | 207 |
| 4.3.6 Orientarea și prelucrarea germenilor..... | 207 |
| 4.4 Considerații asupra fenomenelor de transport în autoclavă și la | |
| suprafața de cristalizare..... | 208 |
| 4.4.1 Transportul global în autoclavă și în stratul limită..... | 208 |
| 4.4.2 Procese de transport în volumul de reacție..... | 208 |

| | | |
|---|---|------------|
| 4.4.3 | Transportul global prin stratul limită de soluție..... | 209 |
| 4.4.4 | Transportul materialului nutritiv din soluție prin stratul limită..... | 211 |
| 4.4.5 | Transportul nutrientului la suprafața lichid – solid..... | 212 |
| 4.5 | Proiectarea unei instalații de creștere a monocristalelor de α – cuarț prin metoda hidrotermală..... | 214 |
| 4.5.1 | Memoriu de prezentare..... | 214 |
| 4.5.2 | Breviar de calcul de dimensionare..... | 215 |
| 4.5.2.1 | Dimensiunea carcasei de rezistență..... | 215 |
| 4.5.2.2 | Dimensionarea autoclavei ca tub cu pereți groși..... | 215 |
| 4.5.2.3 | Calculul corpului autoclavei ca un cilindru cu pereți subțiri..... | 219 |
| 4.5.3 | Determinarea pe cale grafică a variației tensiunilor în jurul unui punct. Cercul lui Mohr..... | 221 |
| 4.5.3.1 | Definiția și componentele tensiunii..... | 221 |
| 4.5.3.2 | Variația tensiunilor în jurul unui punct..... | 222 |
| 4.5.3.3 | Cazul stării plane de tensiune..... | 222 |
| 4.5.3.4 | Determinarea pe cale grafică a variației tensiunilor în jurul unui punct. Utilizarea funcțiilor supermatematice..... | 223 |
| 4.6 | Concluzii..... | 231 |
| CAPITOLUL V Rezultate experimentale..... | | 233 |
| 5.1 | Introducere..... | 233 |
| 5.2 | Testul de etanșeitate și rezistență mecanică..... | 233 |
| 5.3 | Teste (finale) pentru stabilirea regimurilor termice în autoclavă..... | 234 |
| 5.4 | Procedura experimentală de obținere a monocristalelor de α – cuarț..... | 247 |
| 5.5 | Optimizarea grosimii monocristalelor de α – cuarț..... | 249 |
| 5.5.1 | Calculul rapoartelor S/N cu relația care se bazează pe medie și variația în jurul acesteia și care nu utilizează valoarea țintă..... | 251 |
| 5.5.2 | Calculul rapoartelor S/N cu relația care se bazează pe MSD, valoarea țintă fiind inclusă în formularea raportului S/N..... | 255 |

| | |
|---|------------|
| 5.5.3 Experimente de confirmare (Pilot)..... | 263 |
| 5.5.3.1 Experimentul de confirmare numărul 1 (Pilot 1)..... | 263 |
| 5.5.3.2 Experimentul de confirmare numărul 2 (Pilot 2)..... | 266 |
| 5.5.3.3 Experimentul de confirmare numărul 3 (Pilot 3)..... | 268 |
| 5.6 Determinarea permitivității dielectrice a monocristalelor de α – cuarț..... | 273 |
| 5.7 Determinarea factorului de calitate Q în infraroșu al monocristalelor de α – cuarț..... | 276 |
| 5.8 Concluzii..... | 284 |
| CAPITOLUL VI Concluzii finale. Contribuții personale..... | 287 |
| 6.1 Concluzii finale..... | 287 |
| 6.2 Contribuții personale..... | 289 |
| 6.3 Direcții viitoare de cercetare..... | 291 |

BIBLIOGRAFIE

ANEXE

INTRODUCERE

A. Oportunitatea și obiectivele tezei

Pentru a putea concura cu succes, în contextul economic actual al pieței globalizate, organizațiile trebuie să-și îmbunătățească substanțial competitivitatea. Aceasta înseamnă că organizațiile trebuie să aibe abilitatea de a fabrica sau de a oferi servicii la un nivel calitativ ridicat și la un preț redus, produse sau servicii, ce satisfac complet necesitățile clienților. Numai acele organizații care își schimbă fundamental modul de proiectare, modul de dezvoltare a tehnologiilor și modul de fabricare a produselor sau oferire a serviciilor, vor fi viabile și profitabile în mediul concurențial al viitorului.

În condițiile în care în prezent, majoritatea organizațiilor au adoptat TQM, una din posibilitățile de creștere a competitivității este introducerea proiectării robuste – Taguchi. În timp ce *calitatea ideală* (dorită de client) determină mărimea segmentului de piață și crearea de noi piețe, tehnicile și metodele proiectării robuste – Taguchi abordează *calitatea reală* (nedorită de client) și sunt extrem de importante pentru câștigarea cotei de piață în cadrul segmentului de piață.

Este evident că se dorește crearea și dezvoltarea unor sisteme care îndeplinesc cerințele cerute de calitatea ideală, însă realizarea practică a unor astfel de sisteme ideale este extrem de dificilă. Proiectarea robustă – Taguchi oferă posibilitatea optimizării sistemelor (produse, tehnologii sau servicii) în scopul obținerii unei *funcționări robuste* în care performanța produselor, tehnologiilor sau serviciilor are o minimă sensibilitate la factorii ce cauzează variabilitatea la cel mai mic cost posibil.

Pe de altă parte proiectarea robustă – Taguchi oferă un set de reguli, tehnici și metode speciale care permit măsurarea performanțelor și evaluarea pierderilor induse clienților și societății atât pentru proiectarea calității “off-line” cât și pentru controlul calității “on-line” .

Procesele de creștere a cristalelor, în vederea obținerii monocristalelor cât mai pure sau dopate, au aplicații în fizica corpului solid, în metalurgie, în industria optică (laseri, prisme, lentile, etc.) și în mecanica fină (rubine și safire pentru lagăre). În particular, monocristalele de α – cuarț, datorită proprietăților piezoelectrice, sunt folosite la dispozitivele rezonatoare și pot fi obținute numai prin metoda de creștere hidrotermală. Deși prin această metodă se pot obține monocristale de dimensiuni mari și calitate bună, sunt însă necesare condiții tehnice severe pentru instalația de creștere (etanșeită, rezistență mecanică la coroziune, la presiuni și temperaturi ridicate etc.) și datorită duratei lungi de creștere (zile, săptămâni, luni) este necesar un control strict al procesului. În plus, cele mai multe eșecuri în încercarea creșterii din soluție a cristalelor se datoresc faptului că există o lipsă de date legate de tipul de solvent și interacțiunea solut – solvent.

Pentru a putea trece de la faza de laborator la cea de producție, pe baza experienței acumulate la Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Electrochimie și Materie Condensată din Timișoara (unde s-a realizat prima instalație de creștere hidrotermală și s-a elaborat tehnologia de obținere, pentru prima oară în România a

monocristalului de α – cuarț) s-a abordat modelul proiectării robuste – Taguchi atât a produselor cât și a proceselor și instalațiilor. Optimizarea parametrilor procesului de creștere a monocristalelor de α – cuarț pe baza planurilor de experiențe Taguchi, datorită numărului limitat de experimente, asigură obținerea unor monocristale de calitate superioară la un cost competitiv. De asemenea proiectarea robustă – Taguchi permite realizarea unui proces de creștere robust și a unor instalații fiabile.

În concret, teza își propune ca obiective:

1. Studiul științific, teoretic și aplicativ, al grupului de tehnici și metode ce constituie proiectarea robustă – Taguchi
2. Analiza posibilităților de extindere și îmbunătățire a proiectării robuste - Taguchi.
3. Compararea proiectării robuste – Taguchi cu alte metode moderne de proiectare, analizarea posibilităților de îmbunătățire reciprocă și de utilizare a efectului sinergetic al acestora.
4. Studiul științific al metodelor de creștere a cristalelor de dimensiuni mari.
5. Cercetări teoretice și aplicative privind influența parametrilor fizici și constructivi asupra procesului de creștere a monocristalelor de α – cuarț.
6. Cercetări teoretice și aplicative privind posibilitățile de utilizare a planurilor de experiențe – Taguchi la obținerea stabilității dimensionale a monocristalelor de α – cuarț.
7. Cercetări teoretice și aplicative privind realizarea unui proces robust de creștere și a unor instalații fiabile de obținere a monocristalelor de α – cuarț de calitate.

O bună parte din rezultatele tezei și a cercetărilor au fost utilizate în mai multe contracte de cercetare științifică în cadrul unor programe naționale și bilaterale la care a participat autorul și au fost concretizate prin mai multe lucrări științifice din țară și străinătate și constituie parte a unei apariții editoriale la Editura SOLNESS în 2003.

ORIZONT 2000

1. 1984 – 1992: „Cercetarea obținerii cuarțului monocristalin, proiectarea și realizarea instalației de laborator și a instalației experimentale pilot, elaborarea tehnologiei de obținere a monocristalelor”
2. 1992 – 1997 : „Cercetări privind echilibrele de fază și tranzițiile de fază de speța I-a (solid-soluție) și speța a II-a (în stare solidă ordonată tridimensional) la presiuni mari și temperaturi ridicate, în compuși oxidici poli și monocristalini de tipul $X_1Y_1O_4$ ($X_1=Al$; $Y_1=P$) și $X_1TiO_2Y_1O_4$ etc”.

MATNANTECH

3. 2001 – 2004 : "Tehnologie de obținere de noi materiale piezoelectrice, pentru realizarea rezonatoarelor de mare performanță".

4. 2003 – prezent : “Materiale nanocristaline avansate. Obținerea prin metode din faza soluție (hidrotermal la presiuni mari, solvotermal, coloidal). Caracterizare și aplicații” .

B. Prezentarea conținutului tezei

Obiectivele propuse au condus la structurarea lucrării într-un număr de 6 capitole, al căror conținut este prezentat în continuare.

În **Capitolul 1 – Metoda Taguchi. Prezentare generală** – este definit locul metodei Taguchi în cadrul instrumentarului statistic actual, este prezentată filozofia abordării lui Genichi Taguchi și sunt prezentate tehnicile și metodele utilizate în proiectarea robustă – Taguchi.

În **Capitolul 2 – Proiectarea Robustă Taguchi** – extins pe 90 de pagini, se face o sinteză asupra stadiului actual al metodelor și tehnicilor utilizate în proiectarea robustă – Taguchi, prezentând de asemenea și posibilitățile de extindere ale acestora. Se prezintă funcția „Pierdere a Calității” introdusă de Genichi Taguchi pentru cuantificarea sub formă de pierderi financiare ale consecințelor pentru producători și clienți ale nivelului calității unui produs, definindu-se expresia matematică a acestei funcții pentru trei cazuri ale criteriilor de calitate (țintă, de minimizat, de maximizat). Pentru extinderea funcției pierdere Taguchi, se propune utilizarea unei funcții numită *funcție pierdere cuartică*, obținută prin dezvoltarea în serie Taylor a funcției pierdere $L(y)$ în raport cu y_N (valoarea țintă) până la termenul de ordin IV, a cărei expresie matematică permite o mai mare flexibilitate a profilului funcțional. Pe baza funcției pierdere pătratică asimetrică a lui Phadke, se analizează cazul unei caracteristici de calitate directe aparținând tipului NTB (Nominal cel mai bun) la care abaterea caracteristicii de calitate într-o direcție este mult mai mare decât în direcția opusă fiind necesare toleranțe bilaterale asimetrică. Problema care se rezolvă este cea a determinării valorii care minimizează pierderea, ajungând la concluzia că în ipoteza că varianța procesului σ^2 este independentă de media procesului μ , pierderea așteptată $EL(\delta)$ este funcție de k_1 , k_2 , δ și σ , unde $\delta = (\mu - T) / \sigma$ iar T este valoarea nominală. Setarea optimă a mediei procesului rezultă la una din valorile $T \pm \delta_0 \sigma$, unde δ_0 corespunde pierderii așteptate minime, după cum devierile spre una din toleranțele superioară sau inferioară sunt mai importante (implică pierderi mai mari). Acest mod de determinare a valorii medii (țintă) este mai favorabil decât alegerea valorii țintă la valoarea nominală (T), la mijlocul intervalului de toleranță sau conform modelului Wen și Mergen. Pentru rezolvarea numerică a ecuațiilor s-a conceput un program în MATLAB. Pentru determinarea mediei optime a unui proces pentru o caracteristică de calitate indirectă, se analizează modelul Wen și Mergen modificat de Chen atât pentru o funcție pierdere pătratică asimetrică cât și pentru o funcție pierdere liniară

asimetrică. În continuare autorul prezintă modul de utilizare a raportului Semnal/Zgomot ca indicator de performanță atât în cazul criteriilor statice cât și al celor dinamice, arătându-se și posibilitățile de extindere a acestui raport în cazul în care zgomotul constând în întregime din incertitudine probabilistică, în cazul în care există factori ce trebuie să satisfacă un întreg domeniu de valori, în cazul în care există factori ce pot varia liber într-un anumit interval, în cazul variabilelor ce trebuie ierarhizate și în cazul problemelor cu restricții.

Se prezintă în continuare modul de proiectare a parametrilor pe baza planurilor de experiențe Taguchi iar pentru cazul că este cunoscută forma analitică a relației dintre parametrii de intrare și parametrii de ieșire (funcția de transfer), aplicarea strategiei lui Fathi care presupune modele de programare neliniară cu restricții în care sunt minimizezate fie pierderea așteptată (modelul PDME) fie varianța caracteristicii de calitate cu păstrarea mediei la valoare țintă (modelul PDMV). Se prezintă în continuare modul de proiectare a toleranțelor cu ajutorul funcției pierdere a calității. În partea a doua a capitolului, se prezintă modul de abordare a controlului calității „on-line” în accepțiunea lui Taguchi și strategia de implementare și aplicare a Ingineriei Robuste Taguchi.

În **Capitolul 3 – Metoda Taguchi. Comparații și Oportunități** – extins pe 65 de pagini, se face o comparație a metodei Taguchi cu mai multe metode de proiectare, analizând posibilitățile de îmbunătățire reciprocă ale acestora. Se face o prezentare a metodei TRIZ și a modurilor de aplicare a acesteia și se face o comparație cu proiectarea robustă – Taguchi pe baza focalizării funcției, pe baza efectelor factorilor și contradicțiilor, pe baza raportului Semnal/Zgomot, pe baza etapelor procesului de rezolvare a problemelor. Se prezintă în continuare posibilitățile de utilizare a conceptelor și tehnicilor metodei Taguchi la atingerea caracteristicilor și obiectivelor IFR, utilizarea metodei Taguchi la tehnica “Trendul Evoluției” și strategia “Utilizarea Resurselor” și respectiv posibilitățile de utilizare pe etape a metodei Taguchi în tehnica ARIZ. Se face o comparație între punctele forte și slabe ale metodelor Taguchi și TRIZ subliniindu-se conceptele metodei Taguchi neutilizate în TRIZ. Se prezintă în continuare o metodologie de rezolvare a problemelor bazată pe efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ.

În continuare se face o prezentare a metodei QFD și a modului în care metoda Taguchi poate să contribuie la îmbunătățirea acesteia. Este prezentat apoi modelul Kano arătând că, prin combinarea calității, așa cum este exprimată în modelul Kano, cu efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ, conduce la un model tridimensional al calității. De asemenea se arată posibilitatea ca modelul Kano să furnizeze o clasă generală de funcții pierdere similare cu funcțiile pierdere Taguchi pentru cazurile LTB, STB, NTB, dar cu o flexibilitate mai mare. În finalul capitolului se prezintă modul în care metoda Taguchi poate îmbunătăți procesul global 8D.

În **Capitolul 4 – Tehnica creșterii monocristalelor de dimensiuni mari** – extins pe 63 de pagini, se prezintă stadiul actual al tehnicilor de creștere a cristalelor și

principalele metode de obținere a monocristalelor. Se arată în continuare că având în vedere fazele și tranzițiile de fază ale alfa-cuarțului, rezultă că acesta este termodinamic stabil numai în intervalul de temperaturi cuprins între temperatura ambiantă și 575°C . Proprietățile piezoelectrice ale cuarțului sunt caracteristice doar fazei alfa. Tranzițiile de fază caracteristice cuarțului conduc la distorsionarea ireversibilă a structurii cristaline ceea ce are ca efect diminuarea până la anulare a proprietăților piezoelectrice. Din acest motiv, singura posibilitate de obținere a fazei alfa a cuarțului este metoda hidrotermală, la presiuni de peste 1500 bar și temperaturi cuprinse între 300°C și 450°C . Se prezintă în continuare parametri fizici și constructivi ce determină creșterea monocristalelor de α – cuarț.

În continuare se prezintă modul de proiectare a unei instalații de creștere a monocristalelor de α – cuarț, realizându-se proiectarea carcasei de rezistență și a autoclavei. Apoi se definesc, pentru cazul stării plane de solicitare, toate funcțiile supermatematice circulare excentrice de variabilă centrică și excentrică – Șelariu și se face comparația cu elementele cercului lui Mohr, prin aceste funcții, metodele grafice se transformă în metode analitice. De asemenea se prezintă cazurile stărilor liniare și spațiale de tensiune. Se precizează legătura dintre tensiunea σ și deformația specifică ϵ în cazul solicitării după două direcții, curbele corespunzătoare reprezentând ovalele lui Cassini care fac parte din familia lemniscatelor lui Booth, acestea putând fi reprezentate prin funcția supermatematică radial excentrică – Șelariu.

În **Capitolul 5 – Rezultate experimentale** – extins pe 43 de pagini, autorul aplică metoda de proiectare robustă – Taguchi la creșterea monocristalelor de α – cuarț, realizându-se următoarele :

- Pentru autoclava de laborator proiectată s-a efectuat un test de etanșitate și rezistență mecanică printr-o încălzire dură cu o viteză de $25^{\circ}\text{C}/\text{h}$ până la 280°C , timp de 11 ore, presiunea atingând 2010 bari.
- Pentru autoclava proiectată s-a efectuat un test pentru verificarea rezistenței termo-mecanice printr-o încălzire rapidă până la 300°C urmată de introducerea autoclavei într-un recipient cu apă (răcire bruscă).
- S-au realizat 24 de experimente la diferite procente de umplere cu apă, stabilindu-se variația presiunii cu temperatura. Pentru cele 6 experimente de bază s-au utilizat procente de umplere de 75%, 80% și 85% lucrându-se cu două valori ale vitezei de încălzire și răcire (10°C și 15°C). Temperatura a fost măsurată cu termocuple Fe-FeCt în punctele mediene ale zonelor inferioară și superioară ale autoclavei, iar presiunea cu un manometru de 3000 bari. Alimentarea cu energie electrică s-a făcut de la un sistem stabilizat de tensiune continuă, sub o tensiune de 52 V. Diferența de temperatură dintre zonele de solubilizare și cristalizare a fost realizată prin creșterea curentului I_1 (zona inferioară) și I_2 (zona superioară).
- În cadrul acestor experimente s-a analizat fiabilitatea sistemelor de alimentare, sistemelor de măsură și control și s-au adus îmbunătățiri sistemului de etanșare, încălzire și izolație termică.

- S-au realizat 5 experimente preliminare utilizându-se 3 tipuri de autoclave de laborator, 2 tipuri de termocuple, 4 temperaturi de creștere diferite, 4 gradienti de temperatură diferiți, 4 presiuni diferite, 4 durate de experimentare diferite, 4 tipuri de germeni și 4 viteze de creștere diferite.
- S-au realizat 8 experimente în autoclava proiectată luând în considerare 5 factori cu 2 niveluri și 2 interacțiuni, alegându-se o matrice de experiențe L_8 Taguchi, utilizându-se germeni de dimensiuni reduse.
- S-a determinat combinația optimă de factori și interacțiuni pentru obținerea grosimii specificate astfel:
 - a. prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra valorilor măsurate.
 - b. prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra raportului Semnal/Zgomot.
 - c. prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra raportului Semnal/Zgomot și prin includerea valorii țintă în formularea raportului S/N.
- În afară de interacțiunile considerate în planul de experimentare, au fost studiate și interacțiunile cu index de severitate mare.
- S-au realizat 3 experimente de confirmare în autoclava Pilot prin transferul condițiilor optime obținute în autoclava de laborator. Primele două experimente au fost realizate utilizându-se 3 germeni, iar la experimentul de confirmare 3 s-au utilizat 24 de germeni dispuși în 4 coloane pe 6 rânduri.
- S-a realizat determinarea permitivității dielectrice printr-o metodă de rezonanță combinată cu una de substituție, folosind Q-metrul TESLA BM 311E, condensatorul de măsură TESLA BP 3110 și pentru realizarea acordului pe diverse game de frecvență, bobine cu diferite valori de inductanță.
- Pentru determinarea factorului de calitate Q în infraroșu s-au utilizat două monocristale obținute în experimentul de confirmare 3. Pentru comparare s-a folosit un cristal românesc. S-a optat pentru tăierea a două probe din acest cristal pentru care s-au stabilit două sectoare și trei zone în care s-au făcut măsurările. Debitarea și șlefuirea probelor și respectiv înregistrarea spectrogramelor s-a făcut la Rom - Quartz București.

În **Capitolul 6** au fost prezentate concluziile finale și principalele contribuții teoretice și aplicative ale tezei precum și câteva direcții de cercetare viitoare.

Autorul aduce un pios omagiu și un gând de recunoștință regretatului **Prof. Dr. Ing. Marcu Balekics**, dascăl de excepție al Școlii Politehnice din Timișoara.

Cele mai alese sentimente de recunoștință și mulțumiri Domnului **Prof. Dr. Ing. Ioan Nicoară** pentru îndrumarea competentă și îndemnul permanent dat pentru finalizarea acestei lucrări.

Cele mai calde mulțumiri și sentimente de profundă recunoștință Domnului **CP I. Dr. Fiz. Ioan Grozescu** pentru amabilitatea și disponibilitatea sa permanentă.

Mulțumesc tuturor celor care m-au încurajat și au fost alături de mine.

CAPITOLUL I

METODA TAGUCHI. PREZENTARE GENERALĂ

1.1 Introducere

Dezvoltarea rapidă a producției industriale contemporane a condus la o creștere progresivă a gradului de complexitate și de automatizare a sistemelor tehnico-economice. Cerințele tot mai mari ale beneficiarilor în ceea ce privește calitatea, impune în mod obiectiv, utilizarea metodelor matematice moderne, fundamentate științific, pentru conducerea, organizarea și controlul eficient al sistemelor tehnico-economice.

Gradul de apreciere a calității în etapa actuală poate fi realizat corespunzător dacă producătorul utilizează metodele matematice puse la dispoziție de teoria statisticii matematice, a teoriei probabilităților, precum și alte metode matematice speciale. Utilizarea acestor metode în conducerea și controlul proceselor tehnologice fac posibilă utilizarea unor indicatori specifici care la rândul lor pot fi utilizați la fundamentarea științifică a deciziilor manageriale.

Se consideră în prezent [M4], [I1] că statistica este știința transformării datelor în informații sau/și știința deciziilor în condiții de incertitudine. Pentru ca aplicarea metodelor statistice de analiză a calității să conducă la rezultatele așteptate este necesară adoptarea unui nou mod de gândire, “Gândirea Statistică sau “Statistical Thinking”.

Bazat pe ideea cooperării între compartimentele întreprinderii, acest nou mod de gândire a apărut ca necesar după așa numita perioadă a controlului “prin discriminare”[I1](aproximativ 1900-1937). Caracteristic acelei perioade era faptul că numărul muncitorilor specializați a crescut semnificativ, variabilitatea calității produselor a crescut în special datorită diferențelor de îndemânare, a începerii utilizării pe scară largă a mașinilor-unelte, precum și a dificultăților în asigurarea omogenității materiilor prime. Trebuie menționat că în acea perioadă s-a pierdut una din componentele de bază ale activității de control al calității și anume aceea de prevenire a apariției produselor defecte. Totodată acest recul al activității de control a avut la bază și îndepărtarea accentuată dintre compartimentele de producție și cel de control, rezultând un număr mai mare de controlori prin neimplicarea personalului productiv și evident un mod neeconomic de a controla.

Tranziția spre perioada controlului “prin cooperare”[I1], (aproximativ 1937 până în prezent), s-a manifestat prin utilizarea metodelor statistice exclusiv la controlul de recepție. Din păcate, aceasta a accentuat diferențierea dintre compartimentele întreprinderilor.

Saltul decisiv în controlul calității prin utilizarea metodelor statistice a fost posibil numai după aplicarea pe scară largă a metodelor lui Shewhart având ca efect utilizarea componentei active a controlului calității prin introducerea fișelor de control. Ulterior conținutul activității de control nu a început să se îmbunătățească

brusc ci pas cu pas întrucât și metodele statistice au fost aplicate în același mod așa cum se arată [11] în Fig 1.1

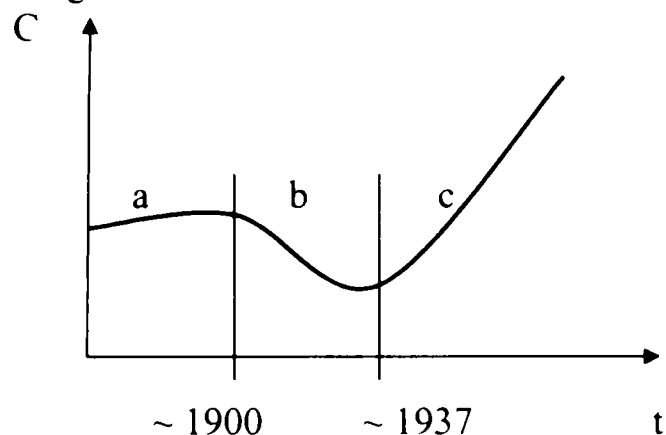


Fig. 1.1. Evoluția conținutului activității de control al calității [11]

- a - controlul prin mijloace proprii
- b - controlul prin discriminare
- c - controlul prin cooperare

Helen M. Walker în lucrarea sa „The contributions of Karl Pearson” (1969) citată în [V2] consideră că teoria statisticii moderne s-a dezvoltat în patru mari fluxuri de idei, fiecare având un punct de plecare distinct, dar care continuă să se dezvolte și în prezent. Această abordare o putem considera ca fiind valabilă până în deceniul șase al secolului XX, moment în care teoria statistică s-a orientat clar spre problemele de calitate, fiabilitate și durabilitate. Potrivit acestei abordări se consideră ca început al primei perioade lucrarea „Ereditatea Naturală” din 1889 publicată de Francis Galton, cel care de asemenea a făcut primul propunerea utilizării rețelelor probabilistice normale. Contribuția lui Karl Pearson prin seria de lucrări „Contribuții matematice la teoria evoluției” din 1893 se consideră ca fiind de asemenea un punct de referință pentru prima etapă. Rezultatele acestei perioade s-au concretizat în crearea lui χ^2 , a coeficientului de corelație, existând deja convingerea că analiza statistică poate avea un viitor în diverse domenii de activitate.

Începutul perioadei a doua se plasează în jurul anului 1915 atunci când Ronald A. Fisher (1890 – 1963) a publicat primul său articol referitor la repartiția exactă a coeficientului de corelație. Deși este cunoscut mai mult prin repartiția care îi poartă numele și analiza dispersională pe care a creat-o, R.A. Fisher considerat și astăzi „Titanul Statisticii”, a influențat singur sau împreună cu colaboratorii săi evoluția ulterioară a metodelor statisticii moderne. În această perioadă s-au formulat principiile pentru verificarea ipotezelor statistice, s-au determinat repartițiile exacte ale unor statistici de selecție, s-au fundamentat criterii precise de alegere a estimatorilor. A treia perioadă este legată de numele lui Walther A. Shewhart (1891-1967) începută în jurul anului 1924 prin crearea fișei „p”, fișa de control pentru procentul de defective. De asemenea Shewhart a pus problema determinării toleranțelor naturale, rezolvată în anumite direcții de S.S. Wilks (1907-1964) în 1941. De remarcă că toleranțele naturale reprezintă unicul mijloc prin care putem aprecia

calitatea conformanței cerințelor proiectului cu posibilitățile procesului. Tot în această perioadă se pun bazele controlului de recepție care ulterior au condus la elaborarea primelor standarde de control. Un alt capitol important este deschis de Jerzy Neyman și Egon S. Pearson care pun bazele teoriei verificării ipotezelor statistice. Crearea analizei secvențiale dezvoltată în principal de A. Wald și M.A. Girshick poate fi considerată ca a patra perioadă de dezvoltare a statisticii. Tot în această perioadă se pun bazele teoriei lui Bayes, această nouă concepție stârnind vii controverse asupra problemelor fundamentale ale *inferenței statistice*. Unii, ca de exemplu J. Wolfowitz citat în [V2] critică punctul de vedere bayesian, alții ca H.O. Hartley acceptă punctul de vedere pentru cazul în care nu se dispune de date experimentale, sau alții ca V. Barnett consideră că singura bază pentru inferența statistică este eșantionul. Viorel Gh. Vodă în cartea „Noi modele statistice în studiul durabilității produselor” consideră că a cincea perioadă este deschisă de B. Epstein și M. Sobel în domeniul testării durabilității, continuată de E. J. Gumbel cu contribuții importante în statistica ordinii.

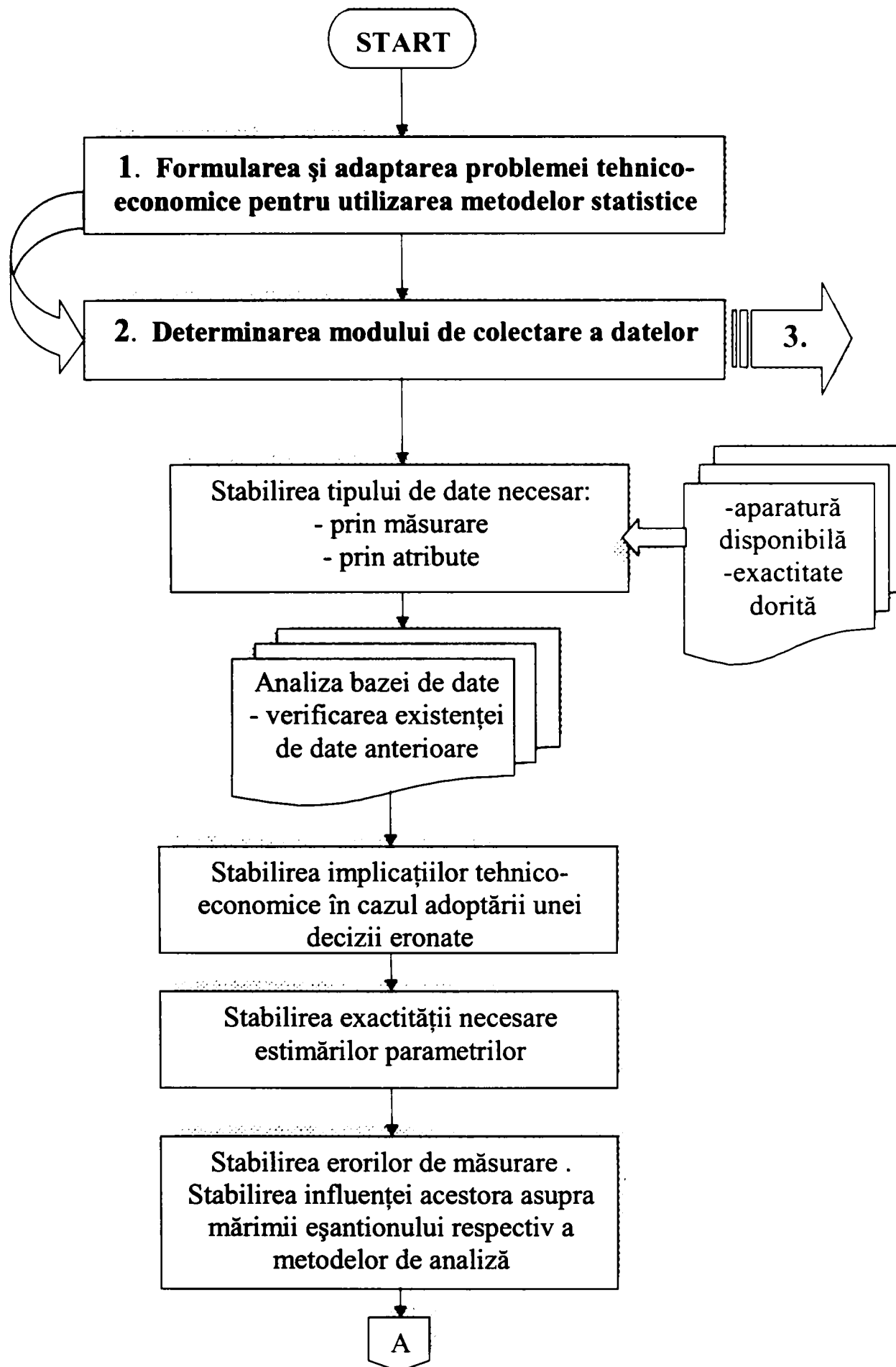
Desigur toate aceste perioade se suprapun și întrepătrund, cu timpul, unele din teoriile enunțate și dezvoltate tinzând să devină ele însele discipline independente.

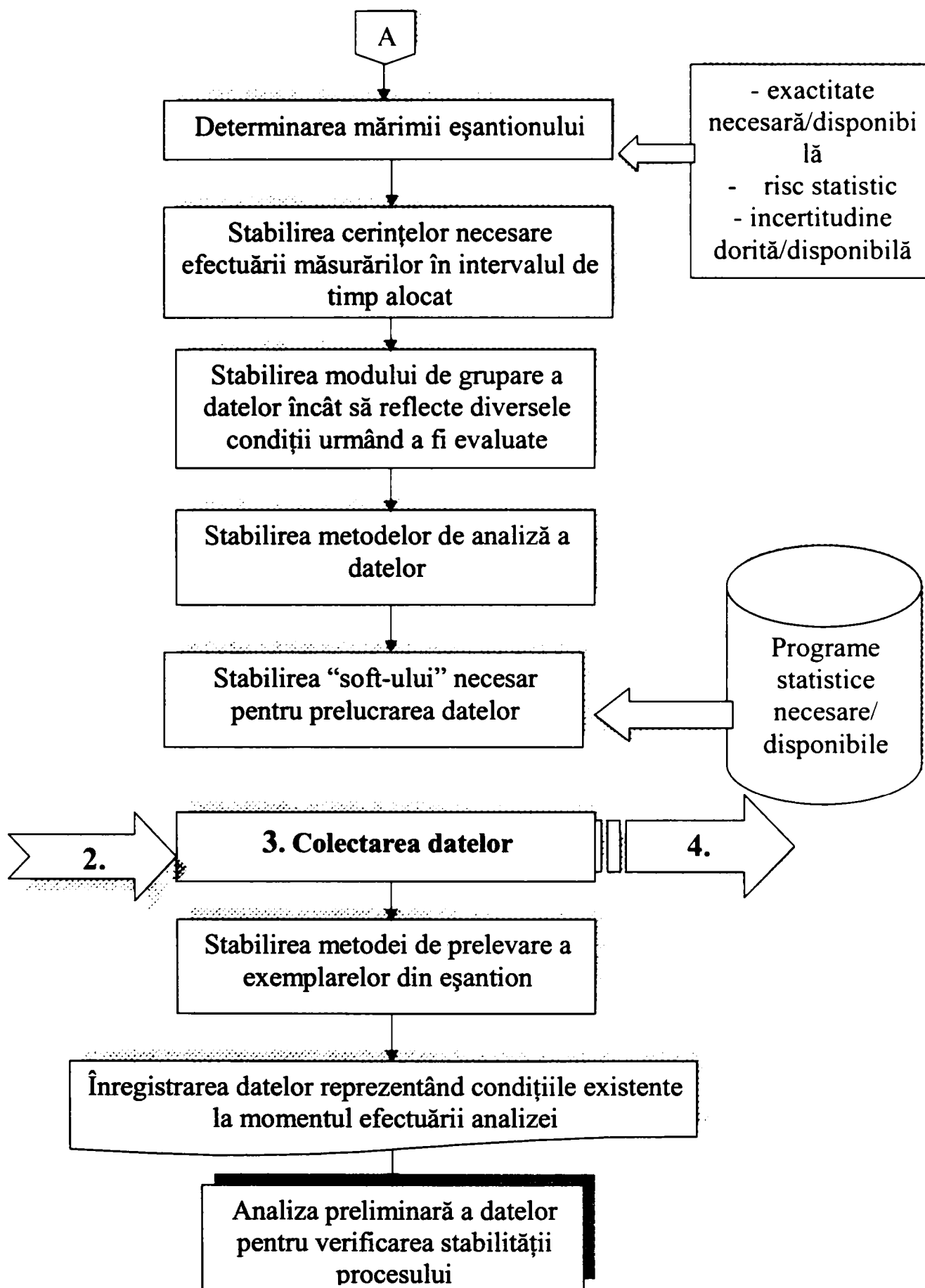
Marea majoritate a metodelor statistice prezentate anterior aplicate în controlul calității proceselor industriale au ca scop “stăpânirea” acestora în principal prin reducerea variabilității lor. În ultima perioadă se constată o deplasare a interesului atât al beneficiarului/clientului cât și al producătorului spre optimizarea raportului calitate/costuri. În acest sens trebuie subliniată contribuția lui Genichi Taguchi în combinarea tehnicilor ingineresti cu cele statistice pentru îmbunătățirea rapidă a costurilor calității, optimizarea realizându-se nu numai la nivelul procesului de fabricație ci și la nivelul proiectării produsului. Bazându-se pe planurile de experiențe dezvoltate de Ronald A. Fisher și Jacques Hadamard în care însă se iau în considerare doar valorile medii ale caracteristicilor ce trebuie optimizate, G. Taguchi tratează concomitent media și variabilitatea valorilor caracteristicilor măsurate. O altă contribuție majoră a lui G. Taguchi este funcția “pierdere a calității” care permite cuantificarea sub formă de pierderi financiare a consecințelor pentru producător și pentru clienții săi a nivelului calității unui produs.

Utilizarea metodelor statisticii matematice și a altor metode speciale a luat în ultima perioadă un avânt impresionant și aplicarea lor în practica curentă a condus la modificări substanțiale ale proceselor tehnologice (și nu numai), însoțite de creșterea productivității și eficienței economice și evident a calității produselor.

Este necesar să facem câteva precizări privind utilizarea și aplicarea metodelor statistice și speciale. Nu este deloc o sarcină ușoară să se adopte metodele și procedurile adecvate în prelucrarea statistică a datelor obținute prin măsurări. De asemenea dacă procesele analizate nu sunt stabile concluziile statistice pot fi lipsite de valoare, iar neasigurarea normalității poate conduce chiar la concluzii false dacă nu se aplică distribuțiile adecvate. Este recomandabil ca aceste metode să fie aplicate cu precauție și numai sub îndrumarea unui personal calificat.

Etapile principale necesare în rezolvarea unei probleme utilizând metodele statistice sunt sintetizate în Fig.1.2 (adaptat după [M4]).





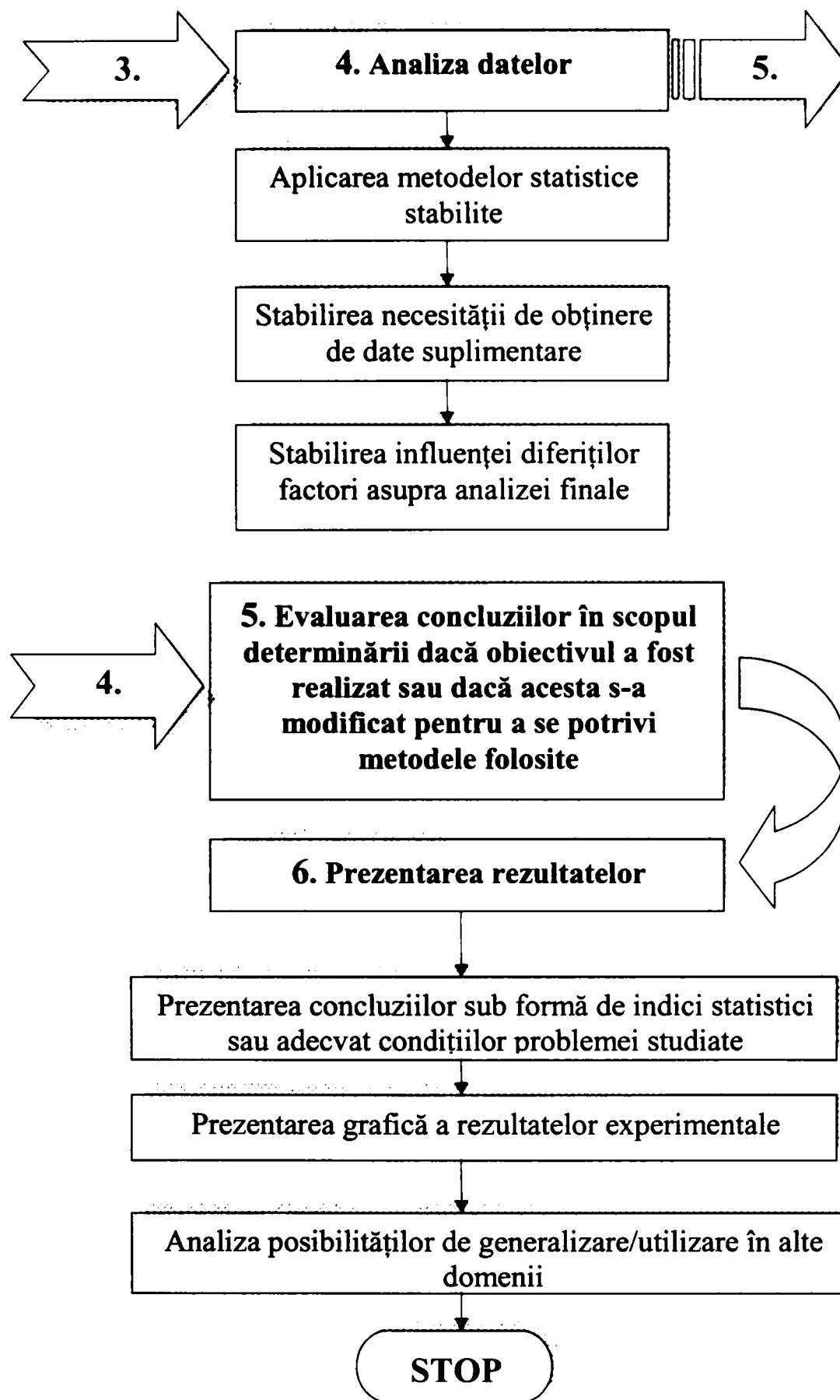


Fig. 1.2 Principalele etape în aplicarea metodelor statistice

Funcție de tipul și natura problemei supusă analizei în Tabelul 1.1 [M4] se prezintă câteva din metodele, procedeele și instrumentele statistice disponibile.

| Nr | Problema | Instrument statistic |
|-----------|--|---|
| 1 | Planificarea investigației | Analiza preliminară a experimentului și alegerea metodelor |
| 2 | Prezentarea datelor | Histograme., Distribuții de frecvență, Estimatori |
| 3 | Stabilirea mărimii eșantionului pentru testarea unei ipoteze | Metode de stabilire a mărimii eșantionului |
| 4 | Determinarea credibilității unor estimatori | Stabilirea nivelului de încredere |
| 5 | Verificarea diferențelor dintre seturi de date | Teste de ipoteză |
| 6 | Încorporarea unor informații trecute în prognoza unor evenimente viitoare | Teorema lui Bayes |
| 7 | Controlul proceselor | Controlul statistic prin măsurare sau prin atribute |
| 8 | Evaluarea calității loturilor de produse | Controlul statistic de recepție prin măsurare sau prin atribute |
| 9 | Evaluarea fiabilității produselor | Calculul fiabilității operaționale/previzionale |
| 10 | Evaluarea fiabilității lotului de produse | Planuri de încercări de fiabilitate |
| 11 | Stabilirea strategiei de întreținere | Evaluarea mentenabilității și stabilirea politicii de mentenanță |
| 12 | Analiza ajustajelor din ansambluri | Calculul lanțurilor de dimensiuni |
| 13 | Analiza capabilității | Analiza de regresie. Indicatorii CP și CPK. Evaluarea probabilității de rebut |
| 14 | Planificarea și analiza experimentelor | Experimente unifactoriale, bifactoriale, Analiză operațională, ANOVA |
| 15 | Insensibilizarea mărimilor de ieșire față de variația mărimilor de intrare | Metoda Taguchi |

Tab. 1.1 Elementele principale ale instrumentarului statistic

1.2 Filozofia abordării Taguchi

În cazul în care la fabricarea unui produs sau în timpul utilizării sale se constată o instabilitate a caracteristicilor sale sau o dispersie mare, conform strategiei clasice a lui Edwards W. Deming [D9], se caută cauzele pentru a reduce variabilitatea sau chiar, dacă e posibil, eliminarea acestora. Așa cum se arată în figura 4.1 prețul înlăturării cauzelor sau cel al reducerii variabilității poate deveni prohibitiv [A1].

Strategia abordării lui G. Taguchi, așa cum se arată în figura 4.2, se bazează pe minimizarea impactului factorilor paraziti (factori – zgomot), acționând experimental asupra factorilor controlați prin găsirea combinațiilor de valori ale acestora astfel încât procesul sau produsul să respecte performanțele funcționale și totodată să fie robust la factorii – zgomot.

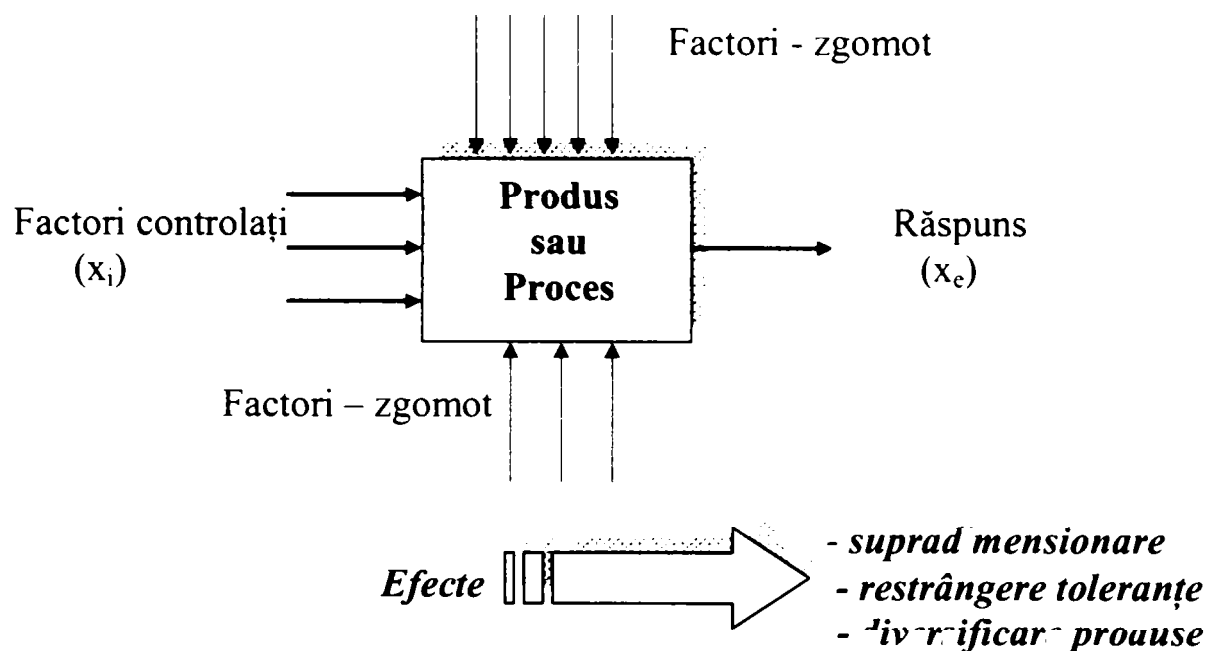


Fig. 1.3 Strategia clasică de minimizare a cauzelor variațiilor

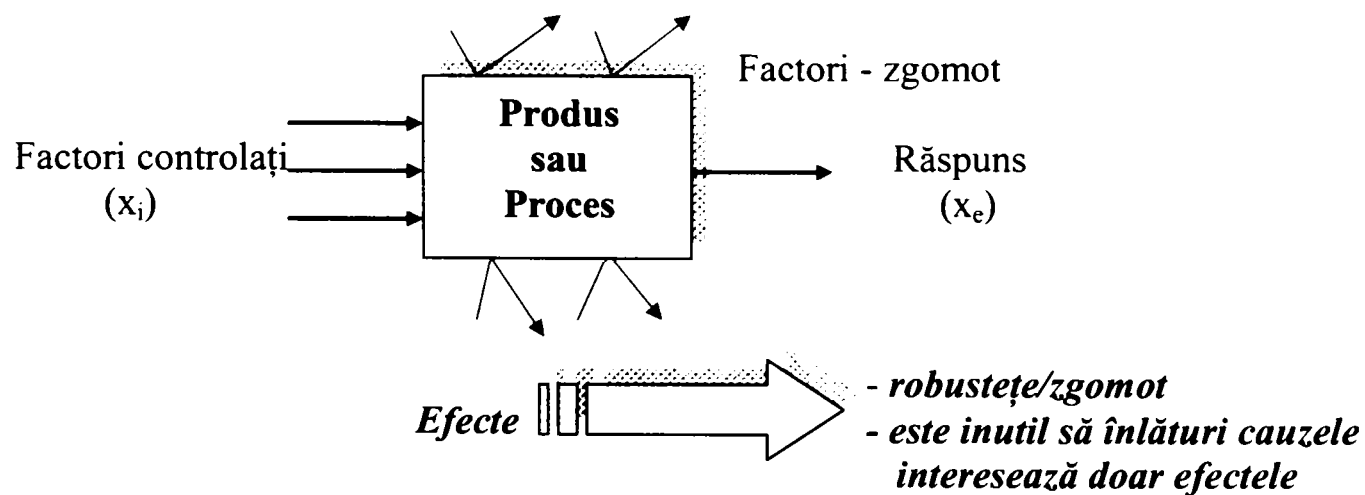


Fig. 1.4 Strategia lui G. Taguchi de minimizare a impactului factorilor – zgomot

În ceea ce privește proiectarea produselor, Genichi Taguchi are o abordare nouă (Fig. 1.7 și Fig. 1.8) comparativ cu abordarea secvențială a metodelor clasice de proiectare (Fig. 1.5 și Fig. 1.6).

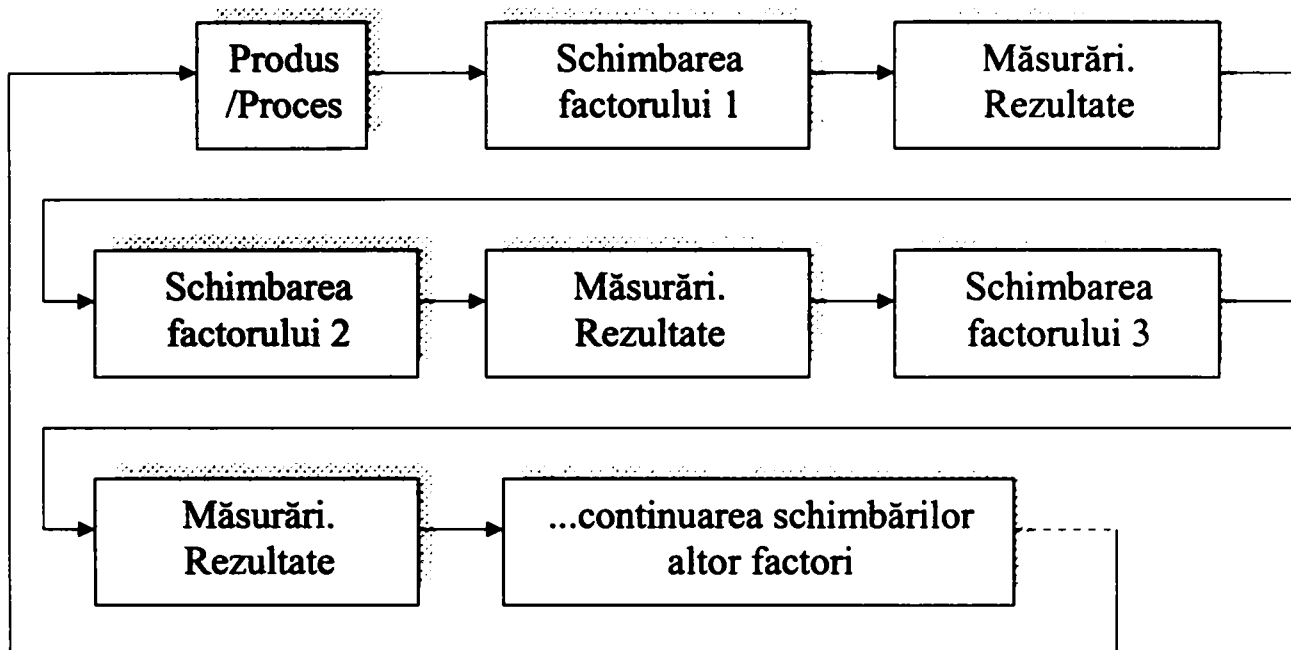


Fig. 1.5 Abordarea clasică

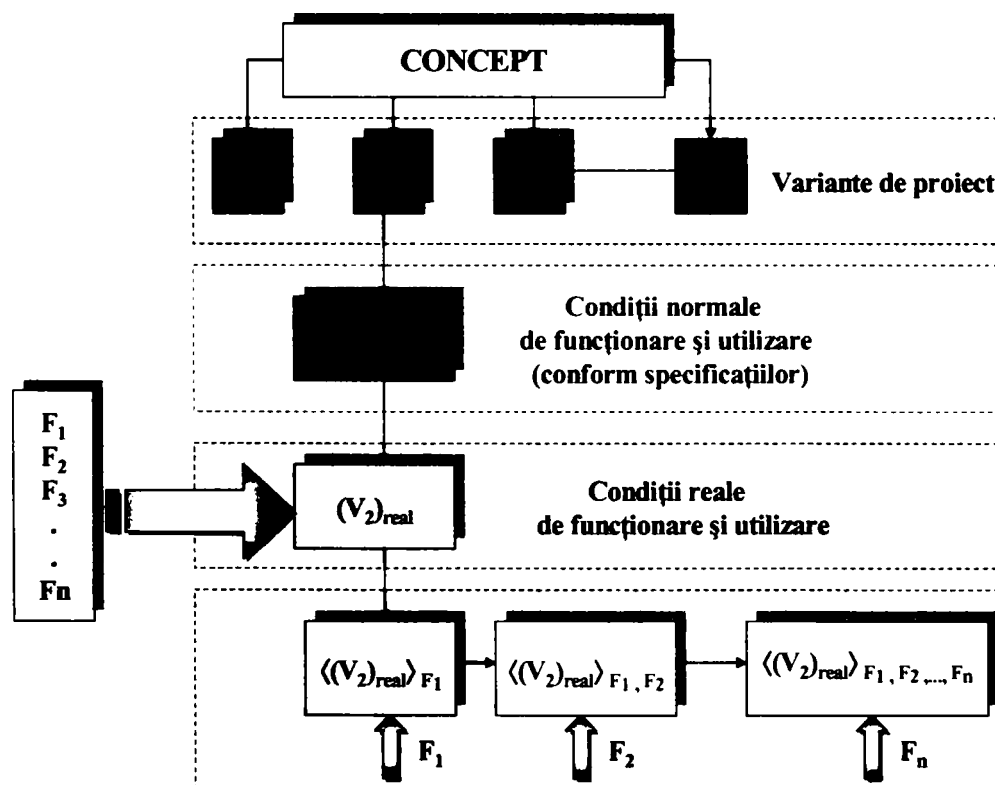


Fig. 1.6 Metoda clasică de proiectare

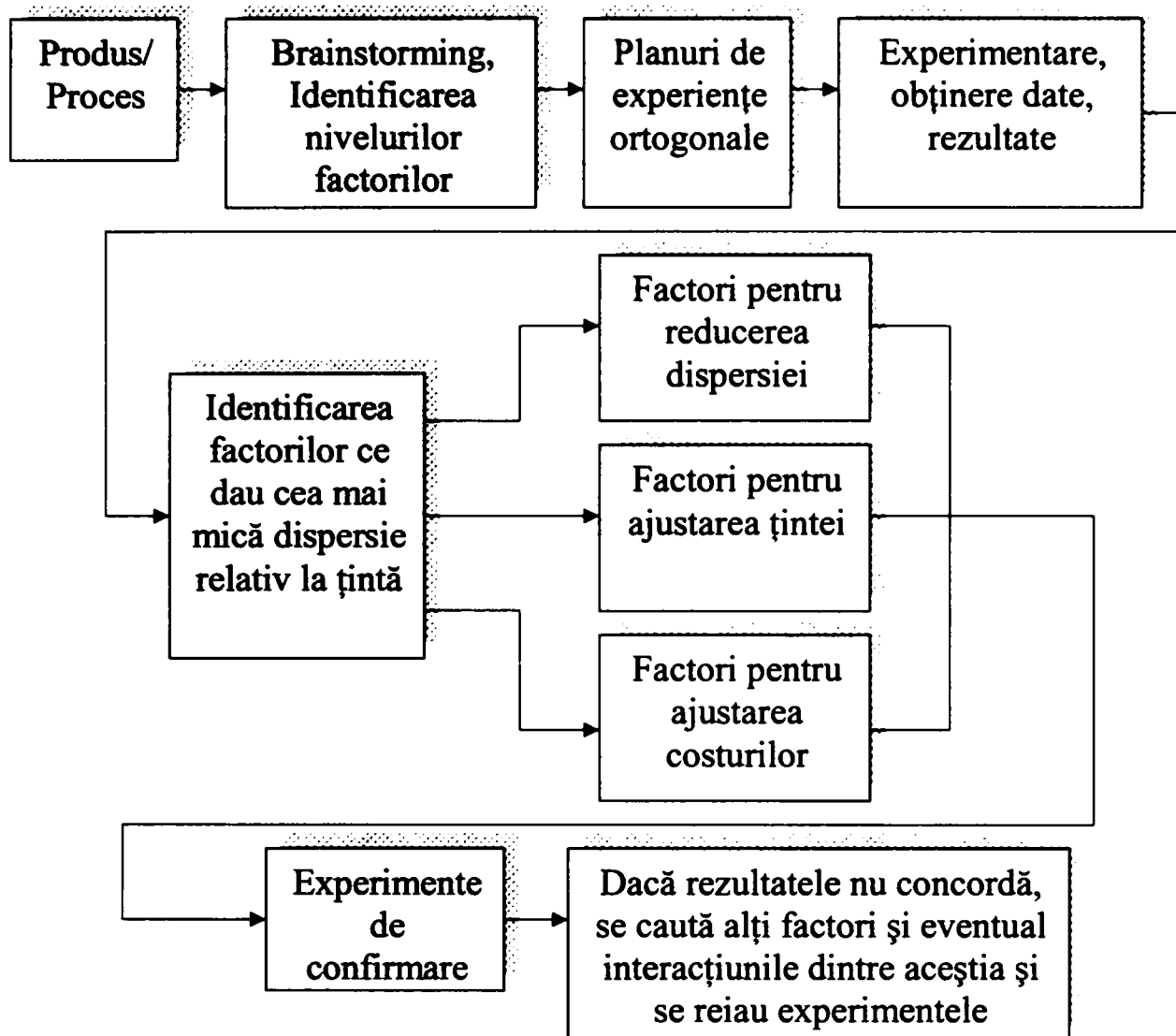


Fig. 1.7 Abordarea lui Genichi Taguchi

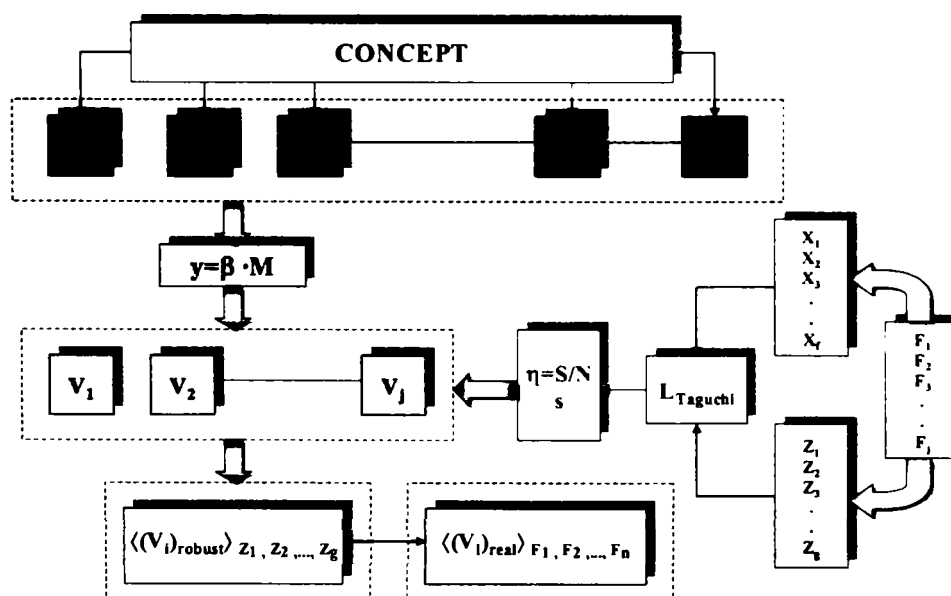


Fig. 1.7 Metoda de proiectare Taguchi

Tehnicile și metodele folosite în Proiectarea Robustă Taguchi sunt prezentate în Fig. 1.8.

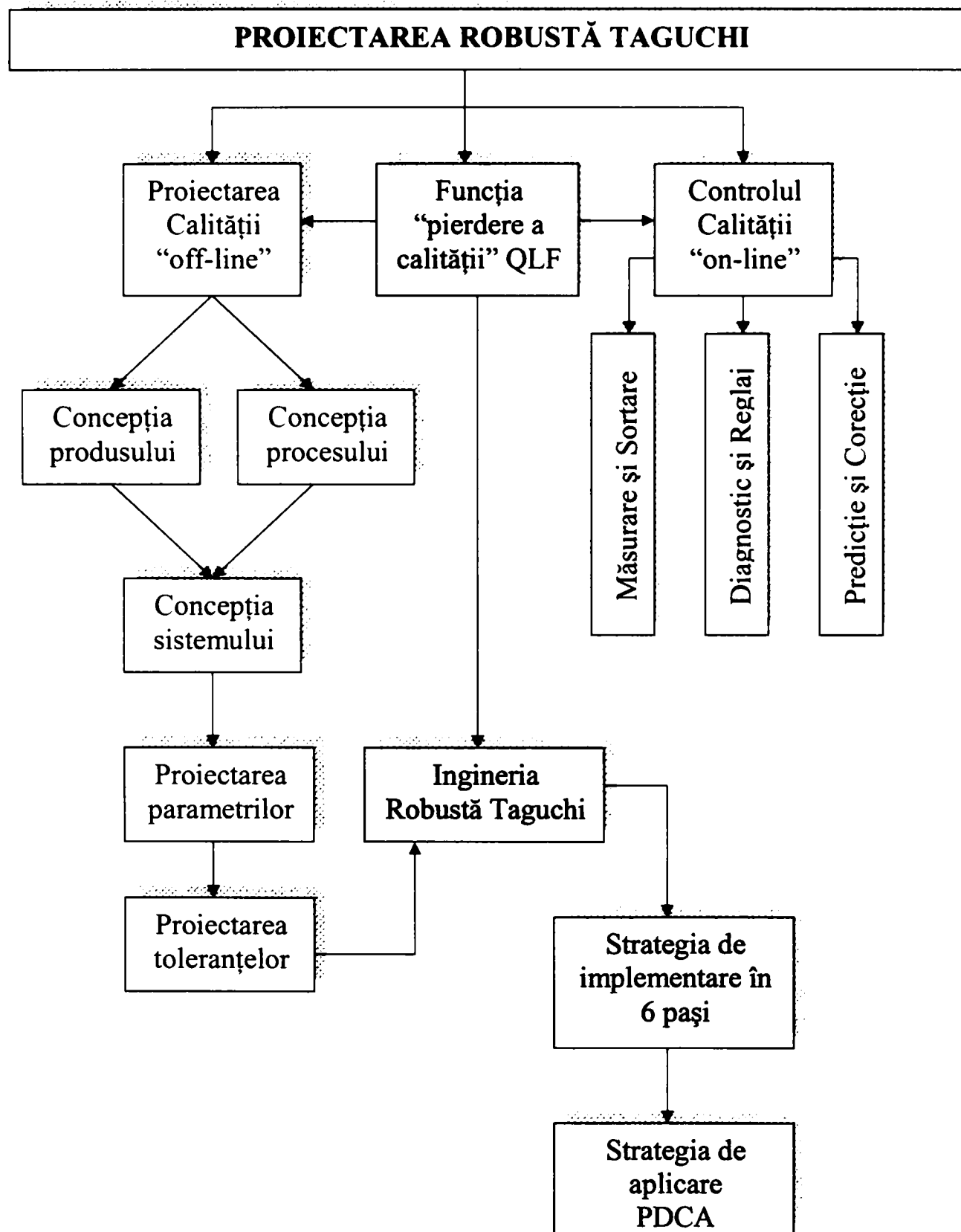


Fig. 1.8 Proiectarea Robustă Taguchi

CAPITOLUL II

PROIECTAREA ROBUSTĂ TAGUCHI

2.1 Proiectarea Calității “off-line” Taguchi. Funcția Pierdere a Calității.

“Funcția pierdere a calității” (“Quality Loss Function”) reprezintă unul din aporturile majore pe care le-a adus Genichi Taguchi [A1]. Vorbind în termeni simpli, “funcția pierdere a calității” este un mod de-a arăta cum fiecare produs imperfect rezultă într-o pierdere pentru individ, firmă, societate. Dr. Edwards W. Deming spune în [D9], pagina 141: “*O pierdere minimă la valoarea nominală și o veșnică creștere a pierderii cu depărtarea în cele două direcții*”. G. Taguchi definește calitatea ca o caracteristică ce evită pierderile de bani atât pentru producător în timpul procesului de fabricație și pentru utilizator, cât și la nivelul global al societății.

De obicei această pierdere este asimilată unor costuri suplimentare în general suportate de fabricant și care sunt date de rebuturi, re prelucrări, garanții etc. (Fig2.1).

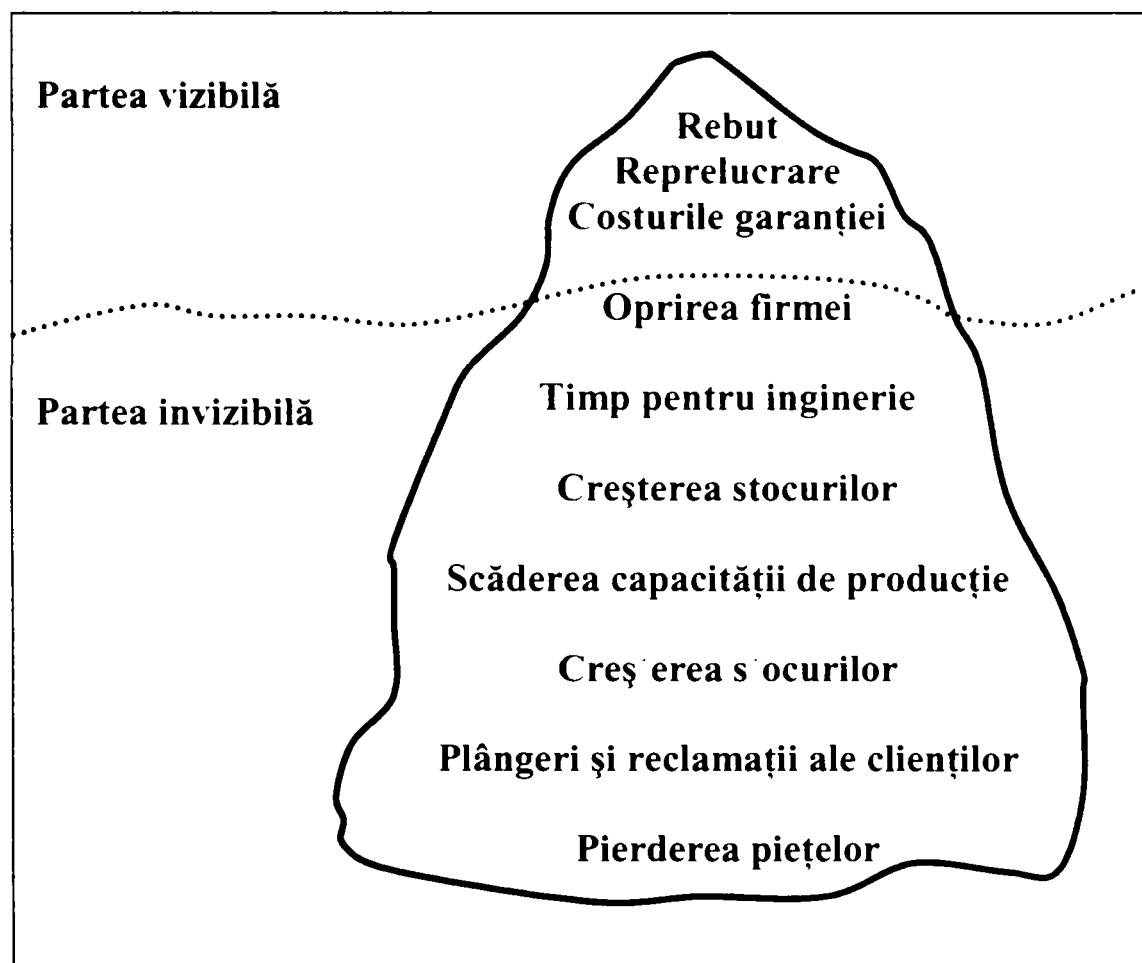


Fig.2.1 Costurile noncalității [A1]

Este evident că un produs începe să se uzeze și să se deterioreze din momentul în care el a fost pus în funcțiune și există posibilitatea ca dacă el se defectează în perioada de garanție să fie reparat sau înlocuit, caz în care costul este suportat de fabricant. Dacă însă defectul s-a produs în perioada de post-garanție, atunci costurile reparării sau înlocuirii produsului vor fi suportate de utilizator/consumator. Problema este că un produs de calitate înaltă nu generează decât costuri mici întrucât (conform definiției Calității – ISO 2000), el îndeplinește așteptările în timpul perioadei pe care utilizatorul/consumatorul o consideră adecvată. Atunci când însă utilizatorul/consumatorul este nemulțumit sau consideră că produsul nu corespunde nevoilor sale, este greu de apreciat și calculat reacția sa negativă. Indirect, producătorul este cel care va suporta însă toate consecințele materiale, de imagine și/sau pierdere a piețelor.

Funcția "pierdere a calității" exprimată de Genichi Taguchi permite cuantificarea sub formă de pierderi financiare ale consecințelor pentru producător și pentru clienți/utilizatori/consumatori ale nivelului calității unui produs.

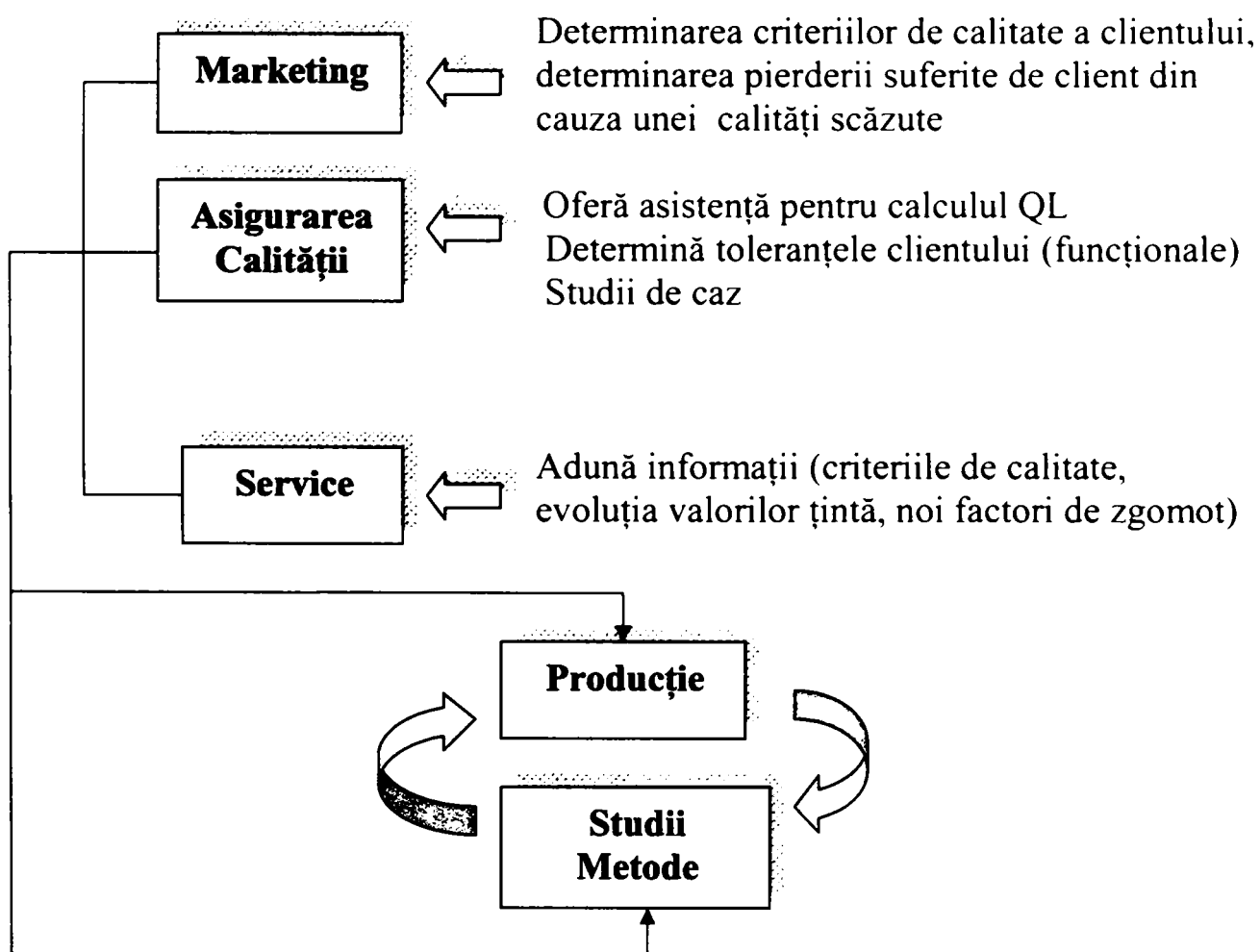


Fig.2.2 Utilizarea funcției pierdere a calității

2.2 Funcția pierdere a calității Taguchi

Conform conceptului lui Genichi Taguchi (Fig 2.3), pierderea apare nu numai dacă produsul se află în afara limitelor specificate ci și atunci când el se află în interiorul acestora.

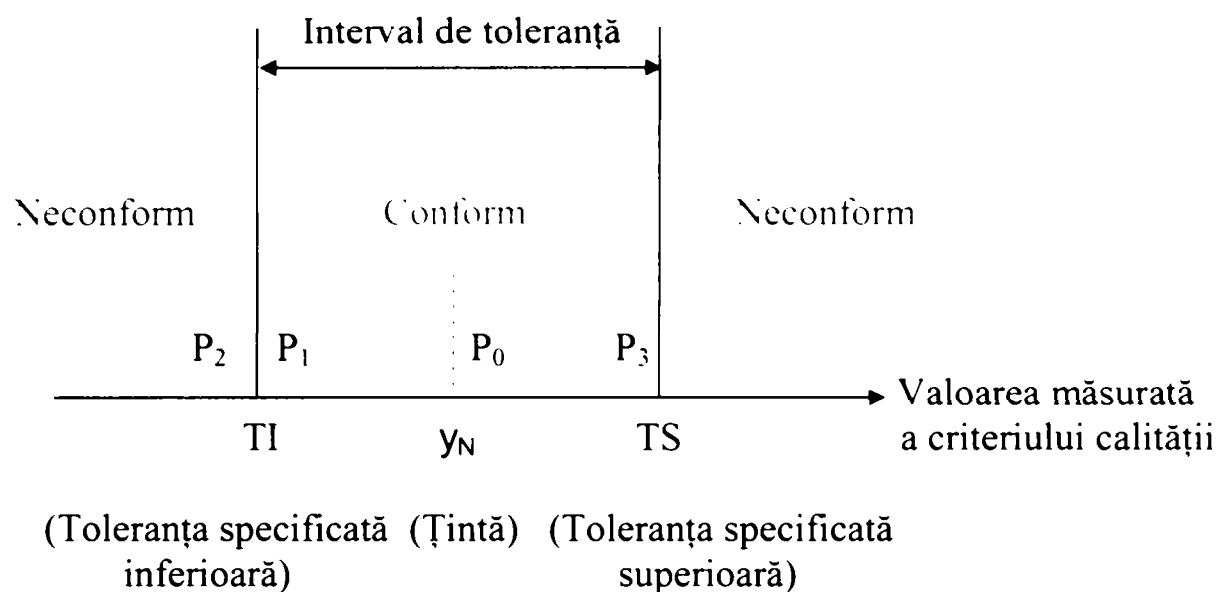


Fig. 2.3 Conceptul funcției pierdere a calității

Este evident că diferența între un produs P_1 , declarat acceptabil (bun) la limita inferioară a toleranței și un produs P_2 , declarat inacceptabil (respins) la aceeași limită este nesemnificativă. Diferența este mult mai importantă între produsul acceptabil P_1 și un produs P_3 , de asemenea declarat acceptabil, dar aflat la limita superioară de toleranță. Cel mai bun produs este P_0 și care se găsește exact la valoarea nominală specificată (țintă). Cu alte cuvinte această abordare este diferită de ceea ce se numește *fracțiune defectivă*, care implică faptul că toate produsele care se află în interiorul limitelor de toleranță specificate sunt la fel de bune (nedefective), în timp ce dacă se află în afara acestor limite se consideră *egal defective*. În realitate numai produsele a căror răspuns este exact la țintă oferă cea mai bună performanță, pe măsură ce răspunsul se abate mai mult de la țintă acesta devine “mai rău” în mod progresiv. De aici rezultă concluzia că minimizarea pierderilor calității nu constă în fixarea limitelor conform/neconform ci în reducerea variațiilor în raport cu valorile nominale (țintă).

Funcția pierdere a calității, ca pierdere indusă societății datorită abaterii caracteristicii sale față de valoarea țintă, are ca scop cuantificarea consecințelor economice a variațiilor în raport cu valorile fixate.

Expresia matematică a funcției pierdere a calității diferă funcție de tipurile de criterii de calitate ce trebuie optimizate: criteriul țintă (optimal este valoarea nominală), criteriul ce trebuie minimizat (cu cât mai mic cu atât mai bine) și criteriul ce trebuie maximizat (cu cât mai mare cu atât mai bine).

2.2.1 Expresia matematică a funcției pierdere pătratică Taguchi

O definiție tehnică a funcției pierdere Taguchi este cea dată de William Duncan “ O reprezentare parabolică care estimează pierderea calității exprimată în unități monetare ce rezultă când caracteristica de calitate se abate de la valoarea țintă, costul acestei abateri crescând pătratic pe măsură ce caracteristica se îndepărtează tot mai departe de valoarea țintă ”.

Se notează cu Y o caracteristică de calitate care are valoarea țintă y_N . O funcție pierdere pătratică simetrică continuă este prezentată în Fig. 2.4 și care reprezintă în fapt ipoteza simplificatoare a lui G. Taguchi conform căreia pierderea este proporțională cu pătratul abaterii caracteristicii în raport cu valoarea fixată.

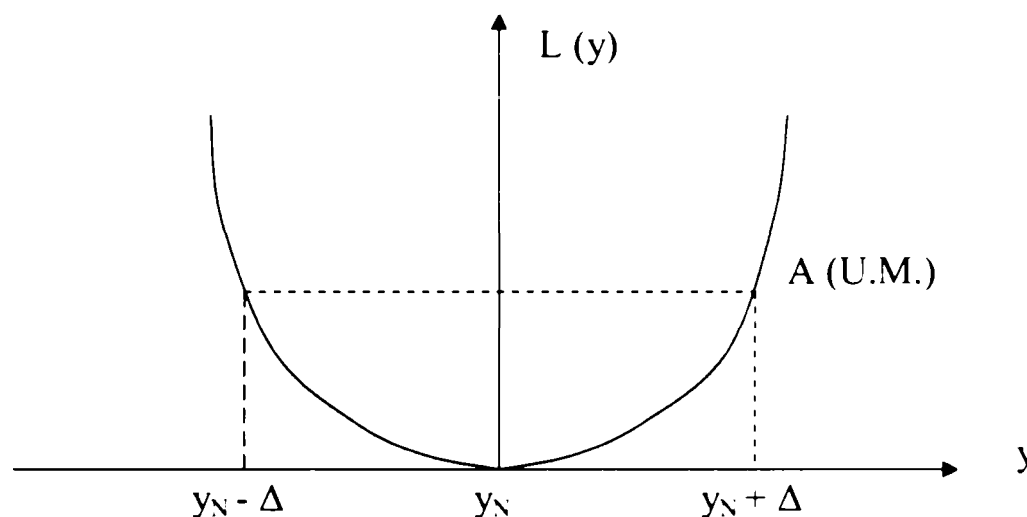


Fig. 2.4 Funcție pierdere pătratică simetrică continuă

Așa cum se observă din figură, pierderea calității notată cu $L(y)$ este egală cu 0 când caracteristica de calitate este exact pe țintă ($Y = y_N$), pierderea calității crescând pe măsură ce caracteristica de calitate se îndepărtează de valoarea țintă în ambele direcții. La fiecare limită de toleranță (specificație), pierderea calității este egală cu A (U.M.), deviația lui Y față de y_N în oricare direcție fiind deci considerată nedorită. În cazul general se consideră că pentru caracteristica de calitate Y , funcția pierdere $L(y)$ reprezintă valoarea monetară a pierderilor induse unui client arbitrar de o unitate de produs. Pentru determinarea aproximativă a acestei funcții se dezvoltă în serie Taylor funcția evaluată în y_N până la termenii de ordin II, termenii de ordin superior neglijându-se conform relației (2.1).

$$L(y) = L(y_N + y - y_N) = L(y_N) + \frac{L'(y_N)}{1!}(y - y_N) + \frac{L''(y_N)}{2!}(y - y_N)^2 + \dots \quad (2.1)$$

Se observă că $L(y_N) = 0$, și deoarece valoarea minimală a funcției este la y_N , prima derivată a funcției evaluată în acest punct este egală cu 0, adică $L'(y_N) = 0$. Atunci relația (2.1) poate fi rescrisă sub forma (2.2).

$$L(y) = \frac{L''(y_N)}{2!} (y - y_N)^2 = k (y - y_N)^2 \quad (2.2)$$

unde k – este o constantă numită *coeficient de pierdere a calității*.

Este evident că, caracteristica de calitate Y variază de la unitate la unitate și în timp și este practic să se reprezinte variația sa printr-o funcție probabilitate de repartiție. Se presupune că funcția densitate de probabilitate a lui Y este $f(y)$. Având funcția pierdere a calității $L(y)$ și funcția densitate de probabilitate $f(y)$, pierderea așteptată poate fi scrisă sub forma generală (2.3).

$$E[L(y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} L(y) \cdot f(y) dy \quad (2.3)$$

În cazul funcției pierdere pătratică, se poate substitui $L(y)$ din ecuația (2.2) direct în ecuația (2.3).

$$E[L(y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} k(y - y_N)^2 f(y) dy = k \left[\sigma_y^2 + (\mu_y - y_N)^2 \right] \quad (2.4)$$

unde μ_y și σ_y^2 sunt media și varianța lui Y .

2.2.2 Funcția pierdere pătratică Taguchi în cazul criteriilor țintă

Se aplică pentru caracteristicile care au o valoare nominală specificată, criteriul țintă fiind tocmai valoarea nominală. Expresia matematică în cazul unui singur produs este:

$$L(y) = k (y - y_N)^2 \quad (2.5)$$

unde: $L(y)$ – valoarea pierderii unitare exprimată în unități monetare
 y – valoarea caracteristicii de calitate măsurate
 y_N – valoarea nominală specificată (valoarea țintă)
 k – constantă de cuantificare a pierderilor financiare

Din punct de vedere grafic relația (2.5) reprezintă o parabolă. În Fig. 2.5 se face o comparație între ITS (Intervalul de Toleranțe Specificat) și reprezentarea grafică a funcției pierdere a calității.

Dacă se dorește evaluarea calității medii pentru un lot de produse, se folosește media lui $(y_i - y_N)^2$ numită abatere medie pătratică sau MSD (mean square deviation), care poate fi calculată conform relațiilor:

$$\begin{aligned}
 \text{MSD} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_N)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - m) + (m - y_N)]^2 = \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - m)^2 + 2(y_i - m)(m - y_N) + (m - y_N)^2] = \\
 &= \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 + \underbrace{2(m - y_N) \sum_{i=1}^n (y_i - m)}_{=0} + n(m - y_N)^2 \right] \tag{2.6}
 \end{aligned}$$

În relația (2.6) termenul din mijloc se anulează datorită modului de definire a lui m care reprezintă chiar media aritmetică adevărată a ansamblului populației pieselor.

Se obține pentru MSD:

$$\text{MSD} = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - m)^2}{n} + (m - y_N)^2 \tag{2.7}$$

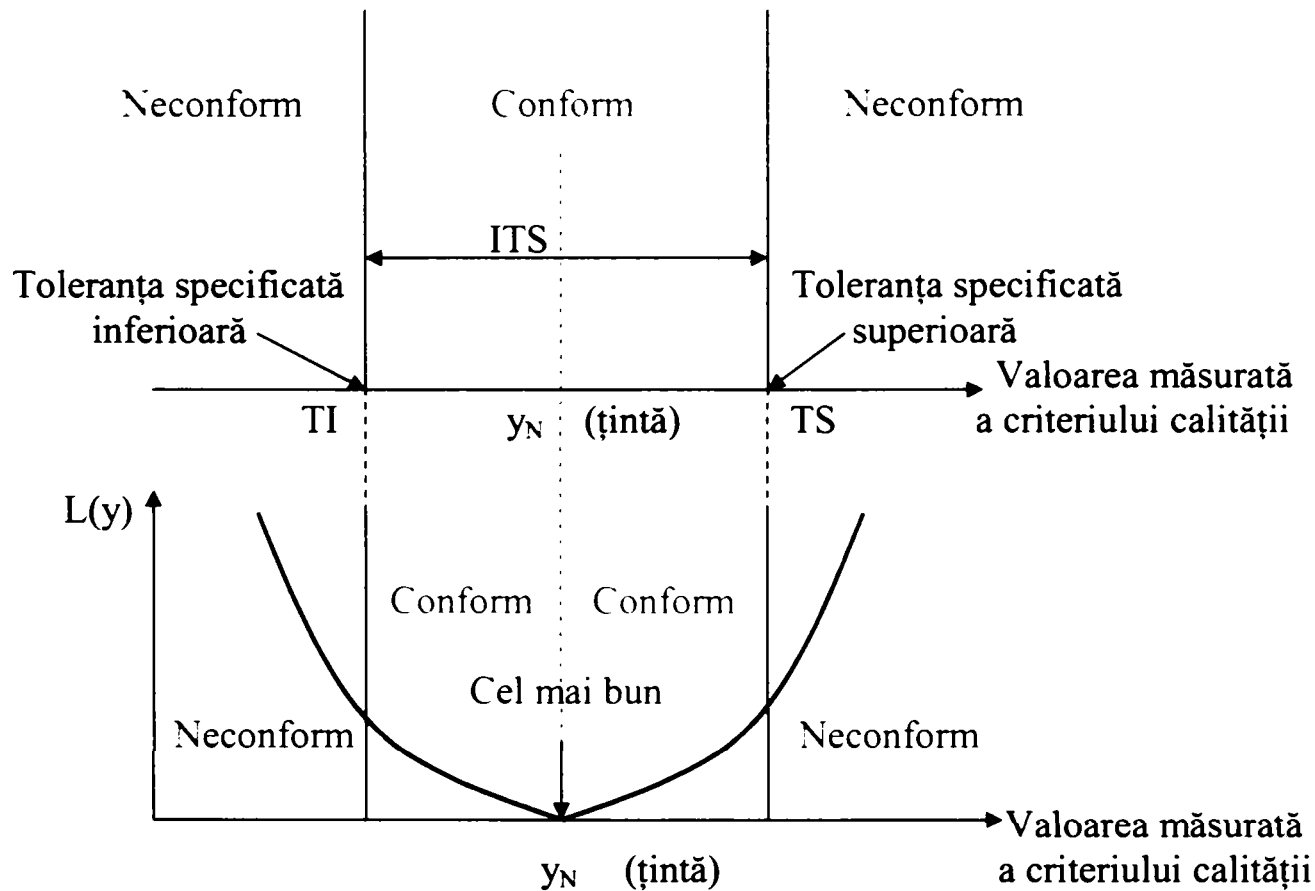
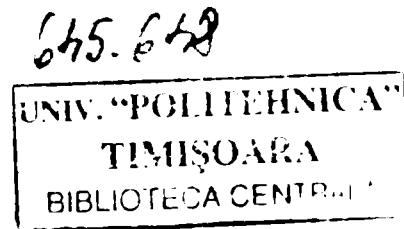


Fig 2.5 ITS și funcția pierdere a calității pentru un criteriu țintă



Dacă se ține cont că $\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - m)^2}{n} = \sigma^2$ reprezintă definiția varianței populației pieselor se obține în final expresia funcției pierdere a calității pentru un lot de produse:

$$L(y) = k \left[\sigma^2 + (m - y_N)^2 \right] \quad (2.8)$$

Dacă se consideră un eșantion de n piese asupra cărora se fac măsurările, atunci se lucrează cu valorile estimate ale mediei, \bar{y} și abaterii standard s , rezultând pentru funcția pierdere a calității relația (2.9).

$$L(y) = k \left[s^2 + (\bar{y} - y_N)^2 \right] \quad (2.9)$$

2.2.3 Funcția pierdere pătratică Taguchi în cazul criteriilor de minimizat

Se aplică la caracteristicile a căror valoare nominală este zero ($y_N = 0$), criteriul care trebuie minimizat este: *cu cât este mai mic cu atât este mai bun*. Funcția pierdere a calității este:

$$L(y) = ky^2 - \text{pentru un singur produs} \quad (2.10)$$

$$L(y) = k(s^2 + \bar{y}^2) - \text{pentru un lot de produse} \quad (2.11)$$

Observație:

reprezentarea grafică a funcției pierdere a calității în cazul criteriilor care trebuie minimizate este o jumătate de parabolă ca în Fig. 2.6

criteriul este mult mai sensibil la valoarea medie decât la dispersia valorilor măsurate, fiind preferabil să se lucreze cu o valoare medie mică și o abatere standard mare decât invers.

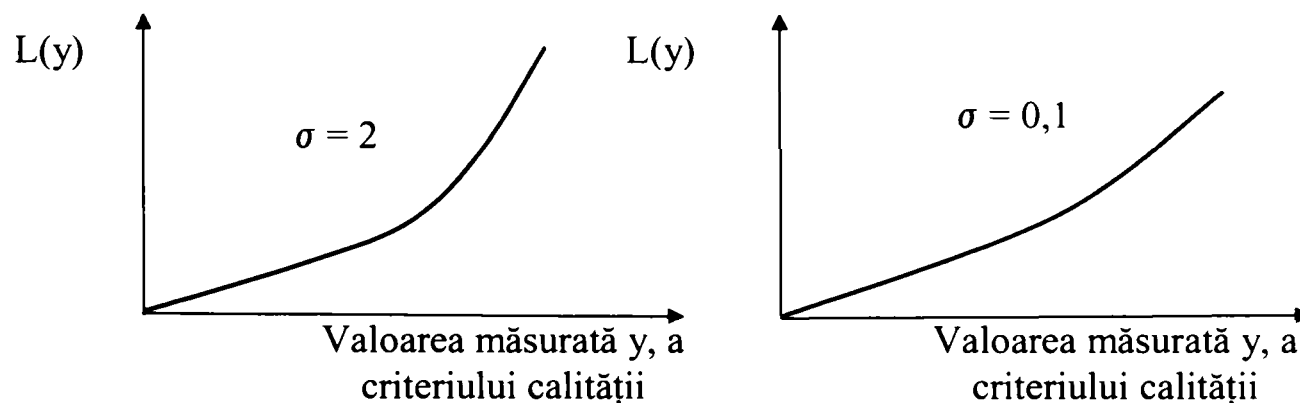


Fig. 2.6 Funcția pierdere a calității pentru un criteriu ce trebuie minimizat

2.2.4 Funcția pierdere pătratică Taguchi în cazul criteriilor de maximizat

Se aplică la caracteristicile a căror valoare țintă este teoretic infinită, criteriul care trebuie maximizat fiind: *cu cât este mai mare cu atât este mai bun*. Funcția pierdere a calității pentru un singur produs este dat în relația (2.12):

$$L(y) = \frac{1}{y^2} \text{ - pentru un singur produs} \quad (2.12)$$

$$L(y) = k \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \text{ - pentru un lot de produse} \quad (2.13)$$

Deoarece relația (2.13) este relativ greu de utilizat, pentru evaluarea calității medii a unui lot de produse, se folosește media lui $\frac{1}{y_i^2}$, numită și abatere medie pătratică sau MSD și care poate fi calculată conform relațiilor:

$$\begin{aligned} \text{MSD} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(m + y_i - m)^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\left[1 + \frac{y_i - m}{m}\right]^2 m^2} = \\ &= \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^n \left[1 + \frac{y_i - m}{m}\right]^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dacă se notează cu $x = \frac{y_i - m}{m}$ și $x < 1$, atunci $(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)x^2}{2} + \varepsilon$ și deci relația aproximativă $(1 + x)^{-2} \approx 1 - 2x + 3x^2$. Relația lui MSD poate fi rescrisă conform relației (2.15).

$$\text{MSD} \approx \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^n \left[1 - 2 \frac{y_i - m}{m} + 3 \left(\frac{y_i - m}{m}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

Deoarece $\sum_{i=1}^n \frac{y_i - m}{m} \rightarrow 0$ și $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m)^2 = \sigma^2$ atunci MSD se poate scrie:

$$\text{MSD} = \frac{1}{m^2} \left[1 + 3 \left(\frac{\sigma}{m}\right)^2\right] \quad (2.16)$$

Deci funcția pierdere a calității pentru un lot de produse în cazul criteriilor de maximizat este dată în relația (2.17).

$$L(y) = k \frac{1}{m^2} \left[1 + 3 \frac{\sigma^2}{m^2} \right] \quad (2.17)$$

Dacă se înlocuiesc m și σ cu valorile lor estimate rezultă relația (2.18)

$$L(y) = k \frac{1}{\bar{y}^2} \left[1 + 3 \frac{s^2}{\bar{y}^2} \right] \quad (2.18)$$

Observație:

- reprezentarea grafică a funcției pierdere a calității în cazul criteriilor care trebuie maximizate este o hiperbolă ca în Fig. 2.7
- criteriul este mult mai sensibil la valoarea medie decât la dispersia valorilor măsurate și este preferabil să se obțină o valoare medie cât mai mare posibil chiar dacă abaterea standard este mare, decât invers.

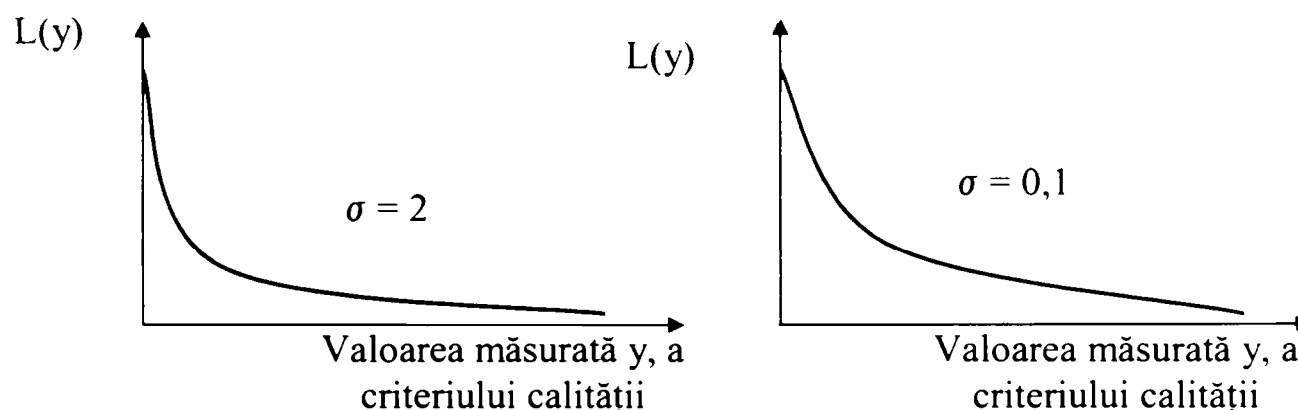


Fig. 2.7 Funcția pierdere a calității pentru un criteriu ce trebuie maximizat

2.3 Extinderea funcției pierdere a calității Taguchi. Funcția pierdere cuartică

Există două forme funcționale uzuale utilizate în practică pentru a reprezenta funcția pierdere a calității. O formă este funcția treaptă convențională bazată pe clasificarea produselor (unităților) în defecte și nondefective. O altă formă este funcția pierdere pătratică propusă de Taguchi (§ 2.2). Fiecare din aceste forme are un profil funcțional specific și ca urmare nu au nici un grad de libertate în alegerea profilului funcțional pentru cazuri specifice.

2.3.1 Modul de obținere a funcției pierdere cuartice (FPQ)

Fie o caracteristică de calitate oarecare Y a cărei valoare țintă este presupusă a avea valoarea y_N , iar abaterea față y_N în orice direcție este nedorită. Se notează cu $L(y)$ funcția pierdere pentru Y și care reprezintă sub formă monetară pierderea indusă unui client oarecare de către unitatea de produs.

Pentru determinarea aproximativă a acestei funcții, ea se dezvoltă în serie Taylor în raport y_N până la termenul de ordin IV.

$$L(y) \approx L(y_N) + \frac{L'(y_N)}{1!}(y - y_N) + \frac{L''(y_N)}{2!}(y - y_N)^2 + \frac{L'''(y_N)}{3!}(y - y_N)^3 + \frac{L^{IV}(y_N)}{4!}(y - y_N)^4 \quad (2.19)$$

Există evident relația $L(y_N) = 0$ și deoarece minimumul acestei funcții este pentru $y = y_N$ se obține $L'(y_N) = 0$.

Ecuția (2.19) se reduce în aceste condiții la ecuația (2.20)

$$L(y) = \frac{L''(y_N)}{2!}(y - y_N)^2 + \frac{L'''(y_N)}{3!}(y - y_N)^3 + \frac{L^{IV}(y_N)}{4!}(y - y_N)^4 \quad (2.20)$$

Sau:

$$L(y) = k_2(y - y_N)^2 + k_3(y - y_N)^3 + k_4(y - y_N)^4 \quad (2.21)$$

În relația (2.21), care reprezintă *funcția pierdere cuartică*, constantele k_2, k_3, k_4 sunt numite *coeficienți de pierdere a calității* de ordin 2, ordin 3 și respectiv ordin 4.

În loc de a avea numai termenul de ordin 2, ca în cazul funcției pierdere pătratică a lui Taguchi, apar și doi termeni de ordin superior care reprezintă *asimetria* și *flexibilitatea* profilului funcțional.

2.3.2 Funcția pierdere cuartică asimetrică în cazul $\Delta_1 \neq \Delta_2$

Pentru funcția pierdere asimetrică din Fig. 2.8, pierderea calității este 0 atunci când caracteristica de calitate este exact la valoarea țintă y_N . Pierderea de calitate crește asimetric pe măsură ce caracteristica de calitate se abate de la valoarea țintă.

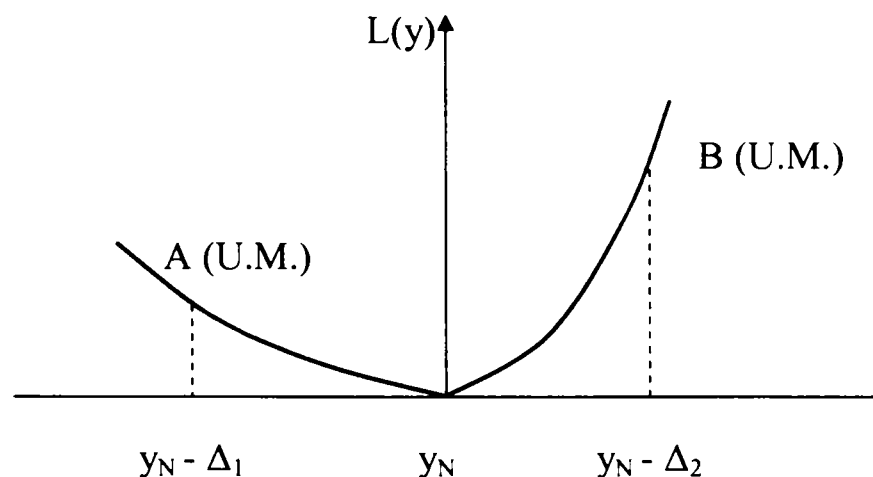


Fig. 2.8 Funcția pierdere cuartică asimetrică când $\Delta_1 \neq \Delta_2$

Se presupune că la limita inferioară $y_N - \Delta_1$ pierderea de calitate este A (Unități Monetare) iar la limita superioară $y_N + \Delta_2$ pierderea de calitate este B (U.M).

Proprietățile FPQ în acest caz sunt:

a) $L(y_N - \Delta_1) = A$ și $L(y_N + \Delta_2) = B$

b) $L''(y) > 0 \quad -\infty < y < +\infty$

Ultima proprietate este adevărată deoarece se presupune că FPQ este convexă oriunde în $(-\infty; +\infty)$. La limitele Δ_1 și Δ_2 se pot scrie relațiile (2.22) și (2.23).

$$L(y_N - \Delta_1) = A = k_2 \Delta_1^2 - k_3 \Delta_1^3 + k_4 \Delta_1^4 \quad (2.22)$$

$$L(y_N + \Delta_2) = B = k_2 \Delta_2^2 + k_3 \Delta_2^3 + k_4 \Delta_2^4 \quad (2.23)$$

Rezolvând ecuațiile (2.22) și (2.23) pentru k_2 și k_3 în raport cu k_4 se obține

$$k_2 = \left(1 + \frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)^{-1} \cdot \left[\frac{A}{\Delta_1^2} + \frac{\Delta_1 B}{\Delta_2^3} - (\Delta_1 \Delta_2 + \Delta_1^2) \cdot k_4 \right] \quad (2.24)$$

$$k_3 = \left(1 + \frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)^{-1} \cdot \left[\frac{B}{\Delta_2^3} - \frac{A}{\Delta_2 \Delta_1^3} + \left(\frac{\Delta_1^2}{\Delta_2} - \Delta_2\right) \cdot k_4 \right] \quad (2.25)$$

Derivata a doua a FPQ din relația (2.21) este conform relației (2.86)

$$L''(y) = 2k_2 + 6k_3(y - y_N) + 12k_4(y - y_N)^2 \quad (2.26)$$

Ecuația (2.26) poate fi rescrisă sub forma pătratică din relația (2.27)

$$L''(y) = (12k_4) \cdot y^2 + (6k_3 - 24y_N k_4) \cdot y + (2k_2 + 6y_N k_3 + 12y_N^2 k_4) \quad (2.27)$$

Pentru a se realiza proprietatea b) trebuie îndeplinite în cazul formelor pătratice următoarele două condiții date în relațiile (2.28) și (2.29)

$$1. 12k_4 > 0 \quad (2.28)$$

$$2. (6k_3 - 24y_N k_4) \cdot y < 4(12k_4) \cdot (2k_2 + 6y_N k_3 + 12y_N^2 k_4) \quad (2.29)$$

Condițiile precedente pot fi rescrise sub următoarele forme:

$$1. k_4 > 0 \quad (2.30)$$

$$2. k_3^2 < \frac{8}{3} k_2 k_4 \quad (2.31)$$

Substituind k_2 și k_3 din relațiile (2.24) și (2.25) rezultă următoarele condiții pentru k_4 :

1. $k_4 > 0$
2. k_4 este selectat din soluțiile inegalității (2.92)

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(\Delta_1^2 - \Delta_2^2)^2}{\Delta_2^2} + \frac{8}{3} \left(\frac{\Delta_1 \Delta_2^2 + 2\Delta_1^2 \Delta_2 + \Delta_1^3}{\Delta_2} \right) \right] \cdot k_4 + \\ & + \left[\left(\frac{2B}{\Delta_2^4} - \frac{2A}{\Delta_1^2 \Delta_2^2} \right) \cdot (\Delta_1^2 - \Delta_2^2) - \frac{8}{3} \left(\frac{A(\Delta_1 + \Delta_2)}{\Delta_1^2 \Delta_2} + \frac{\Delta_1 B(\Delta_1 + \Delta_2)}{\Delta_2^4} \right) \right] \cdot k_4 + \quad (2.92) \\ & + \left[\frac{B^2}{\Delta_2^6} - \frac{2AB}{\Delta_1^2 \Delta_2^4} + \frac{A^2}{\Delta_1^4 \Delta_2^2} \right] < 0 \end{aligned}$$

Orice valoare a lui k_4 care satisface aceste inegalități conduce la $L''(y) > 0$. Se obține astfel un interval de valori pentru k_4 din care se poate alege funcție de necesitățile practice. Valorile lui k_2 și k_3 sunt determinate din relațiile (2.24) și (2.25), forma FPQ depinzând numai de k_4 care poate fi văzut în această situație ca și un *parametru de formă*.

2.3.3 Funcția pierdere cuartică asimetrică în cazul $\Delta_1 = \Delta_2$

În cazul în care $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$, relațiile (2.24) și (2.25) se simplifică rezultând relațiile (2.33) și (2.34)

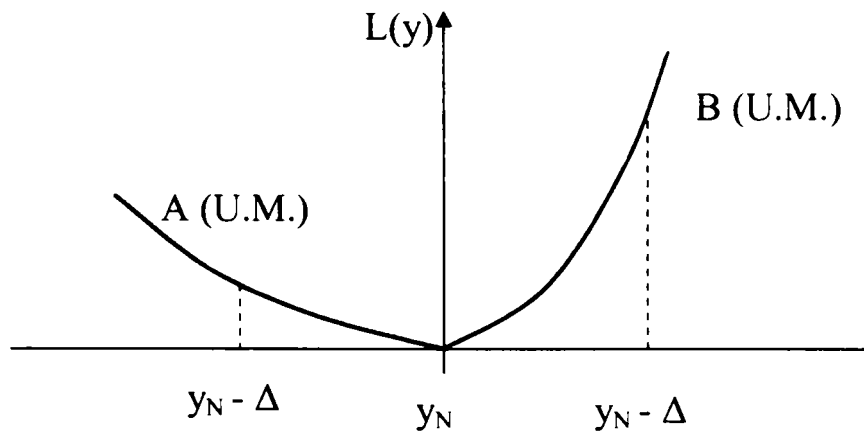


Fig. 2.9 Funcția pierdere cuartică asimetrică când $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$

$$k_2 = \frac{A + B}{2\Delta^2} - \Delta^2 k_4 \quad (2.33)$$

$$k_3 = \frac{B - A}{2\Delta^3} \quad (2.34)$$

Se observă că în acest caz k_3 nu depinde de k_4 fiind unic determinat de relația (2.34). Similar cazului precedent pe baza proprietății b) se obțin pentru k_4 condițiile:

1. $k_4 > 0$
2. k_4 este selectat din soluțiile inegalității (2.35)

$$(2\Delta^4) \cdot k_4^2 - (A + B) \cdot k_4 + \frac{3(B - A)^2}{8 \cdot 2\Delta^4} < 0 \quad (2.35)$$

După selectarea unei valori pentru k_4 , se determină valoarea corespunzătoare a lui k_2 din relația (2.33)

2.3.4 Funcția pierdere cuartică simetrică

O funcție pierdere cuartică simetrică este un caz special al precedentului la care pierderea este aceeași la ambele limite.

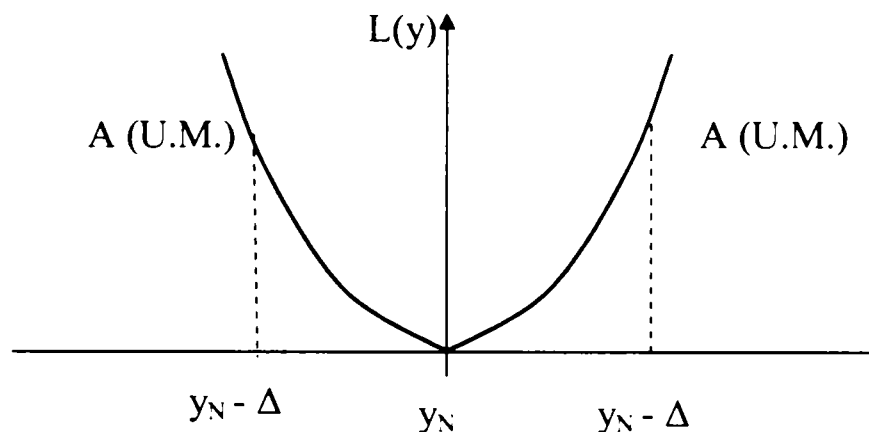


Fig. 2.10 Funcția pierdere cuartică simetrică

Se aplică relațiile (2.33) și (2.34) în care se înlocuiește B cu A rezultând relațiile (2.36) și (2.37).

$$k_2 = \frac{A}{\Delta^2} - \Delta^2 k_4 \quad (2.36)$$

$$k_3 = \frac{A - A}{2\Delta^3} = 0 \quad (2.37)$$

Similar cazurilor precedente se obțin pentru k_4 condițiile:

1. $k_4 > 0$
2. k_4 este selectat din soluțiile inegalității (2.38)

$$(2\Delta^4) \cdot k_4^2 - (2A) \cdot k_4 < 0 \quad (2.38)$$

$$\text{adică } 0 < k_4 < \frac{A}{\Delta^4} \quad (2.39)$$

2.3.5 Pierderea așteptată în cazul FPQ

Se notează $f(y)$ densitatea de probabilitate a caracteristicii de calitate și se consideră funcția pierdere a calității $L(y)$. Atunci pierderea așteptată în formă generală se scrie conform relației (2.3).

$$E[L(y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} L(y) \cdot f(y) dy$$

Ținând cont de ecuația funcției pierdere cuartice (2.21), pierderea așteptată în cazul FPQ se scrie conform relației (2.40)

$$L(y) = k_2(y - y_N)^2 + k_3(y - y_N)^3 + k_4(y - y_N)^4$$

$$\begin{aligned} E[L(y)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} [k_2(y - y_N)^2 + k_3(y - y_N)^3 + k_4(y - y_N)^4] \cdot f(y) dy = \\ &= k_2 \int_{-\infty}^{+\infty} [(y - \mu_y) + (\mu_y - y_N)]^2 f(y) dy + k_3 \int_{-\infty}^{+\infty} [(y - \mu_y) + (\mu_y - y_N)]^3 f(y) dy + \\ &+ k_4 \int_{-\infty}^{+\infty} [(y - \mu_y) + (\mu_y - y_N)]^4 f(y) dy = \\ &= k_2 [\sigma_y^2 + (\mu_y - y_N)^2] + k_3 [\phi_y + 3\sigma_y^2(\mu_y - y_N) + (\mu_y - y_N)^3] + \\ &+ k_4 [\varphi_y + 4\phi_y(\mu_y - y_N) + 6\sigma_y^2(\mu_y - y_N)^2 + (\mu_y - y_N)^4] \end{aligned} \quad (2.40)$$

în care μ_y - media lui y

σ_y^2 - varianța lui y

ϕ_y - momentul centrat de ordinul 3

φ_y - momentul centrat de ordinul 4

Pentru cazul special al FPQ simetrice la care $k_3 = 0$, relația pierderii așteptate se simplifică rezultând relația (2.41)

$$E[L(y)] = k_2 [\sigma_y^2 + (\mu_y - y_N)^2] + k_4 [\varphi_y + 4\phi_y(\mu_y - y_N) + 6\sigma_y^2(\mu_y - y_N)^2 + (\mu_y - y_N)^4] \quad (2.41)$$

2.4 Determinarea mediei unui proces de fabricație în cazul unei caracteristici de calitate directe

În multe cazuri caracteristicile de calitate aparțin tipului “*Nominal este cel mai bun (NTB)*”, dar de multe ori abaterea caracteristicii de calitate într-o direcție este mult mai mare decât în direcția opusă, fiind necesare toleranțe bilaterale asimetrice. Atunci se folosește funcția pierdere pătratică asimetrică introdusă de Phadke [P7]:

$$L(y) = \begin{cases} k_1(y - T)^2 & \text{pentru } y \leq T \\ k_2(y - T)^2 & \text{pentru } y \geq T \end{cases} \quad (2.42)$$

Problema care se pune este dacă cea care minimizează pierderea calității este valoarea nominală a toleranțelor asimetrice sau valoarea medie a acestora.

Presupunem o caracteristică de calitate Y distribuită normal cu media μ și varianța σ^2 . Funcția așteptată pătratică a pierderii calității pentru toleranțe bilaterale asimetrice va fi:

$$E[L(y)] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T k_1(y - T)^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dy + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_T^{\infty} k_2(y - T)^2 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dy \quad (2.43)$$

În ipoteza că varianța procesului σ^2 este independentă de media procesului μ (adică la ajustarea mediei cu un factor, varianța rămâne în control statistic dacă nu apar alte perturbații de natură sistematică), membrul drept al relației (2.103) se poate rescrie făcând următoarele notații și schimbări de variabilă:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\mu - T}{\sigma} \Rightarrow \mu - T = \delta\sigma \quad ; \quad z = \frac{y - \mu}{\sigma} \Rightarrow dz = \frac{1}{\sigma} dy \Rightarrow dy = \sigma dz \\ EL(\delta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{T - \mu}{\sigma}} k_1(\mu + \sigma z - T)^2 \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{T - \mu}{\sigma}}^{\infty} k_2(\mu + \sigma z - T)^2 \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz = \\ &= \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{T - \mu}{\sigma}} k_1(\sigma\delta + \sigma z)^2 \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz}_{I_1} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{T - \mu}{\sigma}}^{\infty} k_2(\sigma\delta + \sigma z)^2 \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz}_{I_2} \quad (2.44) \end{aligned}$$

$$I_1 = k_1 \sigma^2 \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{-\delta} (\delta^2 + 2\delta z + z^2) \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz \right] =$$

$$k_1 \sigma^2 \left[\delta^2 \Phi(-\delta) + 2\delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz \right] \quad (2.45)$$

unde cu $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz$ s-a notat funcția de probabilitate normală normată.

Pentru a calcula expresia I_2 se face schimbarea de variabilă $z = -u$; $dz = -du$

$$I_2 = k_2 \sigma^2 \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\delta}^{\infty} (\delta - u)^2 \exp\left(-\frac{1}{2} u^2\right) \cdot (-du) \right] = k_2 \sigma^2 \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} (\delta^2 - 2\delta u + u^2) \exp\left(-\frac{1}{2} u^2\right) du \right] =$$

$$= k_2 \sigma^2 \left[\delta^2 \Phi(\delta) - 2\delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} u \exp\left(-\frac{1}{2} u^2\right) du + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} u^2 \exp\left(-\frac{1}{2} u^2\right) du \right] \quad (2.46)$$

De unde rezultă pentru $I_1 + I_2$ expresia dată de relația (2.47)

$$I_1 + I_2 = k_1 \sigma^2 \delta^2 \Phi(-\delta) + k_2 \sigma^2 \delta^2 \Phi(\delta) + k_1 \sigma^2 \cdot 2\delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz +$$

$$+ k_1 \sigma^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz - k_2 \sigma^2 \cdot 2\delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz + \quad (2.47)$$

$$+ k_2 \sigma^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz$$

Se calculează primitivele P_1 și P_2 prin părți:

$$P_1 = \int z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = -\int (-z) \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = -\int \left[\exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) \right]' dz = -\exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) \quad (2.48)$$

$$P_2 = \int z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = \int z \cdot z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = -z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) + \int \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz \quad (2.49)$$

Deci se poate scrie:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[-\exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) \right] \Big|_{-\infty}^{-\delta} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[-\exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \underbrace{\exp(-\infty)}_{=0} \right] = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) \quad (2.50)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[-z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) \right] \Big|_{-\infty}^{-\delta} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\delta} \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \lim_{z \rightarrow -\infty} \underbrace{\frac{z}{\exp\left(\frac{1}{2} z^2\right)}}_{=0} + \Phi(-\delta) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} z^2 \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[-z \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) \right] \Big|_{-\infty}^{\delta} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} \exp\left(-\frac{1}{2} z^2\right) dz = \\ &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \lim_{z \rightarrow -\infty} \underbrace{\frac{z}{\exp\left(\frac{1}{2} z^2\right)}}_{=0} + \Phi(\delta) \end{aligned} \quad (2.3)$$

De unde rezultă pentru $I_1 + I_2$ expresia dată de relația (2.54)

$$\begin{aligned} EL(\delta) = I_1 + I_2 &= k_1 \sigma^2 \delta^2 \Phi(-\delta) + k_2 \sigma^2 \delta^2 \Phi(\delta) + 2\delta k_1 \sigma^2 \left[-\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) \right] + \\ &+ k_1 \sigma^2 \left[\frac{1}{2} \delta \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \Phi(-\delta) \right] - 2\delta k_2 \sigma^2 \left[-\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) \right] + \\ &+ k_2 \sigma^2 \left[-\frac{1}{2} \delta \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \Phi(\delta) \right] \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} EL(\delta) &= \sigma^2 \delta^2 [k_1 \Phi(-\delta) + k_2 \Phi(\delta)] - 2\delta k_1 \sigma^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + k_1 \sigma^2 \delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \\ &+ k_1 \sigma^2 \Phi(-\delta) + 2\delta k_2 \sigma^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) - k_2 \sigma^2 \delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + k_2 \sigma^2 \Phi(\delta) = \\ &= \sigma^2 \delta^2 [k_1 \Phi(-\delta) + k_2 \Phi(\delta)] - k_1 \sigma^2 \delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + k_2 \sigma^2 \delta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \delta^2\right) + \\ &+ \sigma^2 [k_1 \Phi(-\delta) + k_2 \Phi(\delta)] \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$EL(\delta) = (k_2 - k_1)\delta\sigma^2\phi(\delta) + \sigma^2\delta^2[k_1\Phi(-\delta) + k_2[1 - \Phi(-\delta)]] + \sigma^2[k_1\Phi(-\delta) + k_2\Phi(\delta)] \quad (2.56)$$

unde cu $\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right)$ s-a notat funcția densitate de probabilitate normală normată și s-a folosit proprietatea $\Phi(\delta) = 1 - \Phi(-\delta)$ a funcției de repartiție normale normate.

Forma finală a relației lui $EL(\delta)$ poate fi scrisă sub forma:

$$EL(\delta) = (k_2 - k_1)\delta\sigma^2\phi(\delta) + k_2\sigma^2\delta^2 + k_2\sigma^2 + \sigma^2\delta^2[k_1\Phi(-\delta) - k_2\Phi(-\delta)] + \sigma^2[k_1\Phi(-\delta) - k_2\Phi(-\delta)] \quad (2.57)$$

Relația (2.57) arată că pierderea de calitate așteptată este funcție de k_1 , k_2 , δ și σ și a fost pusă în evidență și de Li și Chen [L3] sub forma relației (2.58) ce rezultă imediat.

$$EL(\delta) = (k_2 - k_1)\delta\sigma^2\phi(\delta) + k_2\sigma^2(1 + \delta^2) + (k_1 - k_2)\Phi(-\delta)\sigma^2(1 + \delta^2) \quad (2.58)$$

Se notează cu $EL(\delta_0)$ pierderea de calitate optimă rezultată din faptul că media procesului este $\mu = \mu_0$ astfel încât $EL'(\delta_0) = 0$, unde $\delta_0 = \frac{\mu_0 - T}{\sigma}$, T fiind valoarea nominală. Prin urmare $EL(\delta_0)$ este și pierderea minimă de calitate. Cu $EL(0)$ se notează pierderea de calitate asociată cu media procesului aflată la valoarea nominală (considerată ca valoare țintă) $\mu = T$.

Se notează raportul coeficienților pierderii calității cu $R_k = \frac{k_1}{k_2}$ și respectiv raportul dintre pierderea calității la valoarea nominală (țintă) și pierderea de calitate optimă cu $R_L = \frac{EL(0)}{EL(\delta_0)}$.

Pentru a determina relațiile între R_k , R_L și δ_0 se pornește de la funcția $EL(\delta)$, dată în relația (2.58). Pentru determinarea punctului de minim δ_0 se calculează $EL'(\delta)$ conform relației (2.59).

$$EL'(\delta) = \sigma^2[(k_2 - k_1)\phi(\delta) + (k_2 - k_1)\delta\phi'(-\delta) + 2k_2\delta - (k_1 - k_2)\Phi'(-\delta)(1 + \delta^2) + (k_1 - k_2)\Phi(-\delta)2\delta] \quad (2.59)$$

Deoarece $\phi(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) \Rightarrow \phi'(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right)(-\delta)$ și deoarece $\Phi'(\delta) = \phi(\delta) \Rightarrow \Phi'(-\delta) = \phi(-\delta) = \phi(\delta)$ rezultă pentru $EL'(\delta)$ relația (2.60)

$$\begin{aligned} EL'(\delta) &= \sigma^2 \left[(k_2 - k_1) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (k_2 - k_1) \delta^2 \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) + 2k_2\delta - \right. \\ &\quad \left. - (k_1 - k_2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) (1 + \delta^2) + (k_1 - k_2) \Phi(-\delta) 2\delta \right] = \\ &= \sigma^2 \left\{ (k_2 - k_1) \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta^2 \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta^2 \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) - 2\delta\Phi(-\delta) \right] + 2k_2\delta \right\} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Sau

$$EL'(\delta) = \sigma^2 \left\{ (k_2 - k_1) \left[\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) - 2\delta\Phi(-\delta) \right] + 2k_2\delta \right\} \quad (2.61)$$

Pentru a-l determina pe δ_0 trebuie să rezolvăm ecuația $EL'(\delta) = 0$ adică:

$$EL'(\delta) = \sigma^2 \left\{ (k_2 - k_1) \left[\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) - 2\delta\Phi(-\delta) \right] + 2k_2\delta \right\} = 0 \quad (2.62)$$

Deoarece $\sigma^2 \neq 0$ se poate renunța la acest factor și împărțind relația (2.62) cu $2k_2$ și păstrând notația $R_k = \frac{k_1}{k_2}$ rezultă:

$$(1 - R_k) \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2}\right) - \delta\Phi(-\delta) \right] + \delta = 0 \quad (2.63)$$

Adică:

$$(1 - R_k) [\phi(\delta) - \delta\Phi(-\delta)] + \delta = 0 \quad (2.64)$$

Ecuația (2.64) se poate rezolva doar numeric, și anume pentru fiecare R_k fixat se obține un δ_0 ca soluție aproximativă a acesteia, folosindu-se funcția MATLAB *fzero*. Evaluarea lui $\phi(\delta)$ se face cu funcția MATLAB *normpdf(d)*, iar a funcției $\Phi(-\delta) = 1 - \Phi(\delta)$ cu ajutorul funcției MATLAB *1-normcdf(d)*.

```

A:\AdiPugna\EL.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 function val=EL(d, k, sigma)
2 - global Rk;
3 - hp=(1-Rk);
4 - tp=d*normpdf(d)-(1+d^2)*normcdf(-d);
5 - val=hp*tp+1+d^2;

C:\Program Files\matlabR12\work\AdiPugna\AdiPugna\ELP.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 function val=ELP(d)
2 %derivata functiei EL impartita la
3 %factorul sigma^2*k2 pt cazul patratic
4 - global Rk;
5 - tp=normpdf(d)-d*(1-normcdf(d));
6 - val=(1-Rk)*tp+d;

```

Calculul lui R_L se face înlocuind $\delta = 0$ în expresia lui $EL(\delta)$ obținându-se relația (2.65).

$$EL(0) = k_2 \sigma^2 + (k_1 - k_2) \Phi(0) \sigma^2 \quad (2.65)$$

Ținând cont că $\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$ și înlocuind pe x cu 0 se obține $\Phi(0) = 1 - \Phi(0)$, adică $2\Phi(0) = 1 \Rightarrow \Phi(0) = \frac{1}{2}$ și deci relația (2.65) se poate scrie:

$$EL(0) = \sigma^2 \left[k_2 + \frac{k_1 - k_2}{2} \right] = \sigma^2 \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{\sigma^2}{2} k_2 (1 + R_k) \quad (2.66)$$

Pentru a putea evalua $EL(\delta_0)$, știind că δ_0 s-a obținut pentru R_k fixat, se rescrie ecuația (2.67) pentru δ_0 .

$$EL(\delta_0) = k_2 \sigma^2 \left\{ (1 - R_k) \left[\delta_0 \phi(\delta_0) - (1 + \delta_0^2) \Phi(-\delta_0) \right] + 1 + \delta_0^2 \right\} \quad (2.67)$$

Astfel:

$$R_L = \frac{EL(0)}{EL(\delta_0)} = \frac{(1 + R_k)}{2 \left\{ (1 - R_k) \left[\delta_0 \phi(\delta_0) - (1 + \delta_0^2) \Phi(-\delta_0) \right] + 1 + \delta_0^2 \right\}} \quad (2.68)$$

C:\Program Files\matlabR12\work\AdiPugna\AdiPugna\RL.m

File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help



```

1 %calculul functiei RL pentru cazul patratie
2 function val= RL(d)
3 - global Rk;
4 - tp=1+Rk;
5 - hp1=d*normpdf(d)-(1+d^2)*(1-normcdf(d));
6 - hp2=(1-Rk)*hp1;
7 - val=tp/(2*hp2+2*(1+d^2));

```

Programul de calcul pentru determinarea relațiilor între R_L , δ_0 și R_k este realizat cu ajutorul programului MATLAB, iar în Tabelul 2.1 sunt prezentate valorile numerice pentru diferite valori ale lui R_k .

C:\Program Files\matlabR12\work\AdiPugna\AdiPugna\calcd0.m*

File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help



```

1 %Calculul lui delta0, RL cu Rk fixat
2 - clear;
3 - global Rk;
4
5 - X0=0;
6 - h=0.5;
7 - N=floor(10/h);
8 - D=zeros(size(N));
9 - rk=zeros(size(N));
10 - rl=zeros(size(N));
11 - for j=1:N
12 -     Rk=0.5+j*h;
13 -     rk(j)=Rk;
14 -     X = fzero('ELP',X0);
15 -     X0=X;
16 -     D(j)=X;
17 -     rl(j)=RL(X);
18 - end
19 - Rez=[rk;D;rl]';
20 -     fid = fopen('tabel.dat','w');
21 -     for i=1:N
22 -         fprintf(fid,'%1.6f %1.6f %1.6f\n',Rez(i,:));
23 -     end
24 -     fclose(fid);
25 -     disp('Rk delta0 RL')
26 -     disp(Rez)

```

În Figura 2.11 este prezentată relația între δ_0 și R_k , iar în Figura 2.12 este prezentată relația între R_L și R_k .

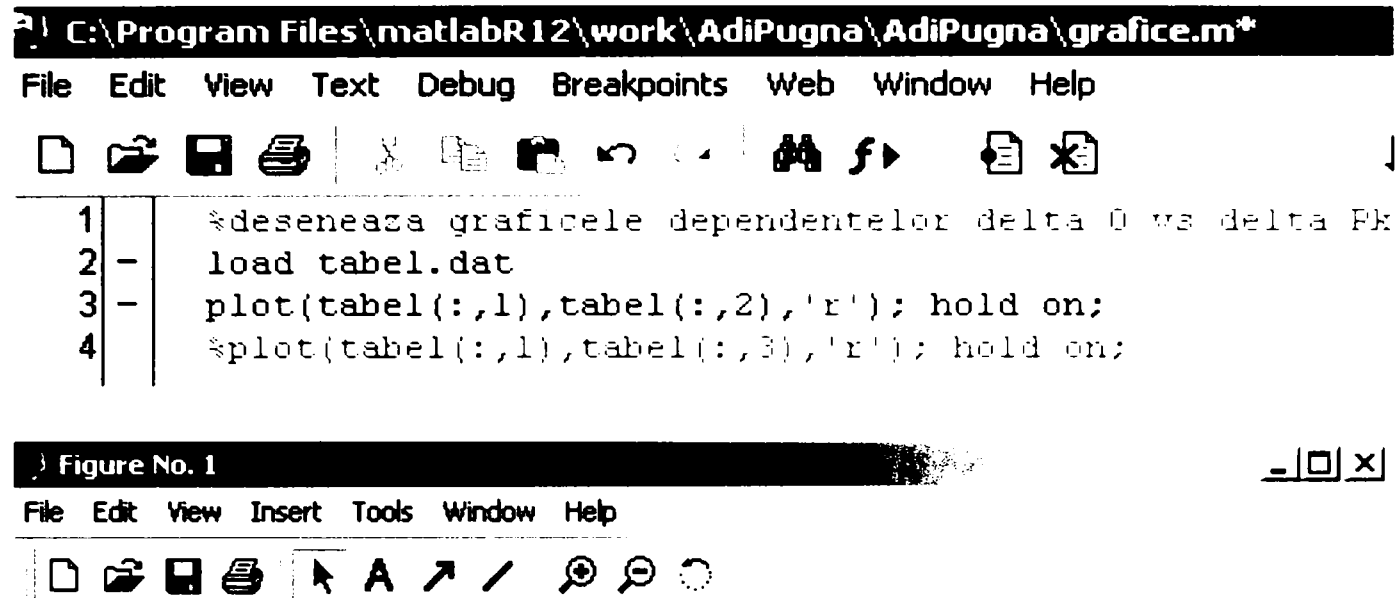


Fig 2.11 Relația între δ_0 și R_k

C:\Program Files\matlabR12\work\AdiPugna\AdiPugna\grafice.m*

File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help



```
1 %deseneaza graficele dependentelor RL vs delta Rk|
2 - load tabel.dat
3 %plot(tabel(:,1),tabel(:,2),'r'); hold on;
4 - plot(tabel(:,1),tabel(:,3),'r'); hold on;
```

Figure No. 1



File Edit View Insert Tools Window Help

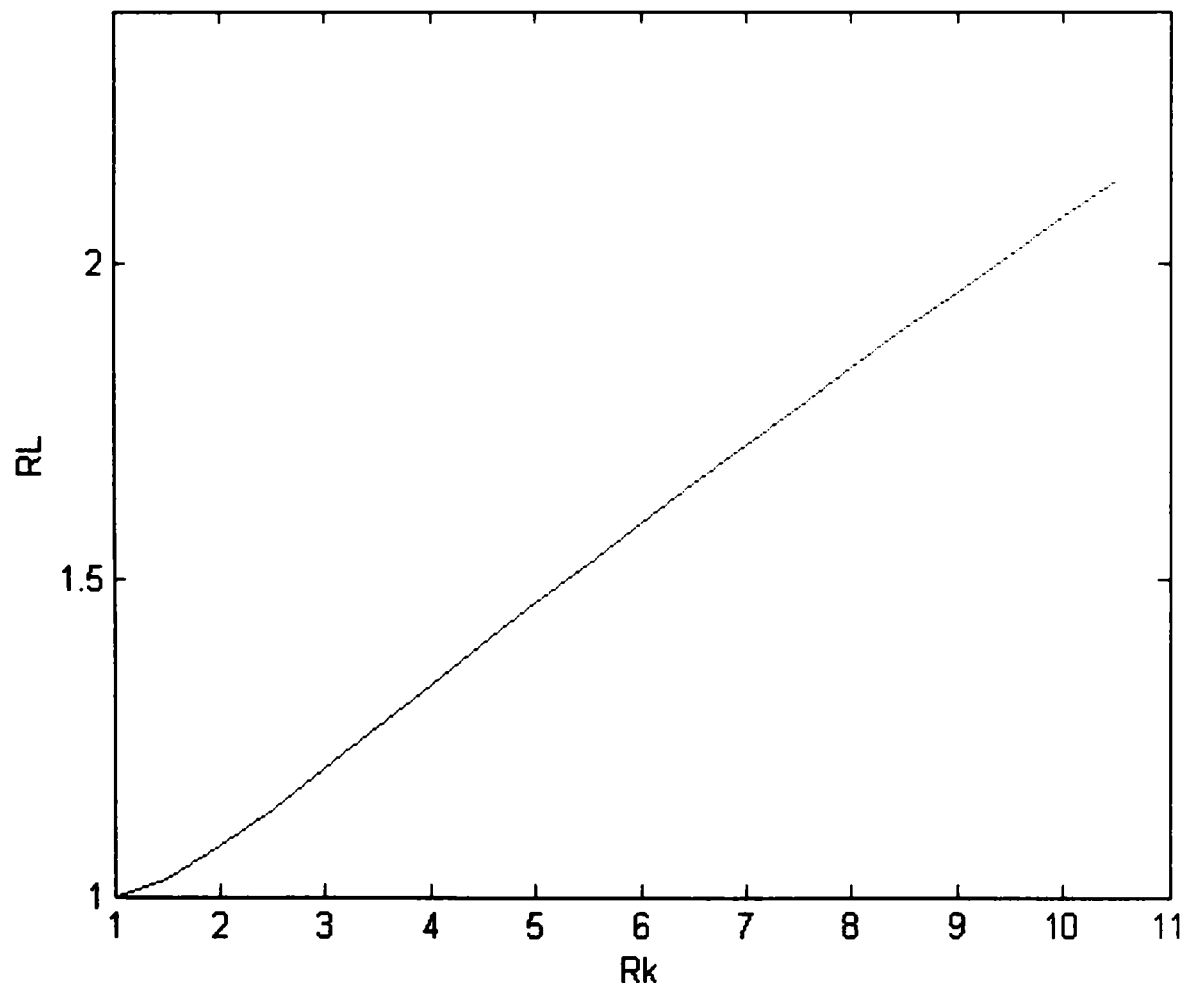


Fig 2.12 Relația între R_L și R_k

| R_k | δ_0 | R_L |
|---------|------------|--------|
| 1,0000 | 0,0000 | 1,0000 |
| 1,2500 | 0,0890 | 1,0079 |
| 1,5000 | 0,1617 | 1,0264 |
| 1,7500 | 0,2230 | 1,0506 |
| 2,0000 | 0,2760 | 1,0782 |
| 2,2500 | 0,3227 | 1,1078 |
| 2,5000 | 0,3644 | 1,1388 |
| 2,7500 | 0,4020 | 1,1706 |
| 3,0000 | 0,4363 | 1,2029 |
| 3,2500 | 0,4678 | 1,2355 |
| 3,5000 | 0,4969 | 1,2683 |
| 3,7500 | 0,5239 | 1,3010 |
| 4,0000 | 0,5492 | 1,3338 |
| 4,2500 | 0,5728 | 1,3665 |
| 4,5000 | 0,5951 | 1,3990 |
| 4,7500 | 0,6161 | 1,4315 |
| 5,0000 | 0,6360 | 1,4638 |
| 5,2500 | 0,6549 | 1,4959 |
| 5,5000 | 0,6729 | 1,5278 |
| 5,7500 | 0,6901 | 1,5596 |
| 6,0000 | 0,7065 | 1,5912 |
| 6,2500 | 0,7223 | 1,6226 |
| 6,5000 | 0,7373 | 1,6538 |
| 6,7500 | 0,7518 | 1,6848 |
| 7,0000 | 0,7658 | 1,7157 |
| 7,2500 | 0,7792 | 1,7464 |
| 7,5000 | 0,7922 | 1,7769 |
| 7,7500 | 0,8047 | 1,8072 |
| 8,0000 | 0,8168 | 1,8374 |
| 8,2500 | 0,8285 | 1,8674 |
| 8,5000 | 0,8399 | 1,8972 |
| 8,7500 | 0,8509 | 1,9269 |
| 9,0000 | 0,8616 | 1,9565 |
| 9,2500 | 0,8720 | 1,9858 |
| 9,5000 | 0,8821 | 2,0151 |
| 9,7500 | 0,8919 | 2,0441 |
| 10,0000 | 0,9015 | 2,0731 |

Tab. 2.1 Relațiile între R_L , δ_0 și R_k pentru pierderea pătratică

2.4.1 Analiza factorilor de influență asupra valorii optime a lui δ

- a. Dacă $k_1 > k_2$ ($R_k > 1$), adică devierea spre toleranța inferioară (stânga) este mai dăunătoare decât devierea spre toleranța superioară (dreapta) și în consecință pierderea calității este mai mare la devierea spre stânga, atunci valoarea lui δ_0 este pozitivă. Aceasta înseamnă că media procesului trebuie plasată puțin mai la dreapta față de valoarea nominală (țintă). Valori mai mari ale raportului R_k conduc la o deplasare mai mare spre dreapta. Setarea optimă a mediei procesului este la $T + \delta_0\sigma$.
- b. Dacă $k_1 < k_2$ ($R_k < 1$), adică devierea spre toleranța superioară (dreapta) este mai dăunătoare decât devierea spre toleranța inferioară (stânga) și în consecință pierderea calității este mai mare la devierea spre dreapta, atunci valoarea lui δ_0 este negativă. Aceasta înseamnă că media procesului trebuie plasată puțin mai la stânga față de valoarea nominală (țintă). Valori mai mari ale lui $1/R_k$ conduc la o deplasare mai mare spre stânga. Setarea optimă a mediei procesului este la $T - \delta_0\sigma$.

Fie o dimensiune tolerată bilateral asimetric cu valoarea $3,040_{-0,012}^{+0,022}$. Se consideră pierderile de calitate la limitele de toleranță date în unități monetare după cum urmează: $A_I = 1,44$ U.M. și $A_S = 1,21$ U.M. Atunci, conform celor prezentate anterior, se obțin următoarele valori pentru coeficienții pierderii calității respectiv pentru raportul R_k următoarele valori:

$$k_1 = \frac{A_I}{T_I^2} = \frac{1,44}{(-0,012)^2} = 10000, k_2 = \frac{A_S}{T_S^2} = \frac{1,21}{(0,022)^2} = 2500, R_k = \frac{k_1}{k_2} = \frac{10000}{2500} = 4$$

Din Tabelul 2.3 pentru $R_k = 4$ se obțin valorile $\delta_0 = 0,5492$ și $R_L = 1,3338$. Acest lucru spune că media procesului trebuie mutată spre dreapta cu o valoare egală cu $0,5492\sigma$ față de valoarea nominală 3,040 și pierderea de calitate așteptată dacă am plasa valoarea medie la valoarea nominală este de 1,3338 ori mai mare decât dacă am plasa-o la valoarea optimă μ_0 . Pentru o valoare $\sigma = 0,005$ se obține valoarea optimă a mediei :

$$\mu_0 = T + \delta_0\sigma = 3,040 + 0,5492 \cdot 0,005 = 3,042$$

Dacă calculăm valoarea optimă a mediei după modelul Wen și Mergen se obține:

$$\mu^* = \frac{T_I + T_S}{2} + \frac{\sigma^2}{T_S - T_I} \ln \frac{A_I}{A_S} = \frac{3,062 + 3,028}{2} + \frac{(0,005)^2}{3,062 - 3,028} \ln \frac{1,44}{1,21} = 3,045$$

De obicei în cadrul procesului de proiectare se impune ca pierderile la cele două limite de toleranță să fie egală, adică $A_I = A_S$ și atunci raportul R_k poate fi calculat direct:

$$\left. \begin{array}{l} A_I = k_1 T_I^2 \\ A_S = k_2 T_S^2 \end{array} \right\} \Rightarrow k_1 T_I^2 = k_2 T_S^2 \Rightarrow \frac{k_1}{k_2} = \frac{T_S^2}{T_I^2} = R_k \quad (2.69)$$

O dată R_k determinat valoarea lui δ_0 poate fi obținută din Tabelul 2.1.

Dacă în acest exemplu se păstrează intervalul de toleranță specificat ITS cu lățimea de 0,030 însă se schimbă poziția toleranțelor de la $T_1 = -0,012$ la $T_1^* = -0,010$ și respectiv de la $T_S = +0,022$ la $T_S^* = +0,020$ atunci pierderile de calitate vor fi:

$A_1 = k_1 T_1^2 = 10000 \cdot (-0,010)^2 = 1$; $A_2 = k_2 T_S^2 = 2500 \cdot (0,020)^2 = 1$ adică $A_1 = A_2$, și deci R_k poate fi calculat direct din raportul toleranțelor, $R_k = 4$. Este recomandabil ca în procesul de proiectare, toleranțele bilaterale trebuie astfel alese, încât pierderile de calitate să fie egale la limitele de toleranță specificate.

- c. Dacă k_1 crește (descrește) proporțional cu k_2 , adică R_k rămâne constant, atunci δ_0 și R_L nu se modifică dar din ecuațiile precedente rezultă că $EL(0)$ și $EL(\delta_0)$ vor crește (descrește) în mod proporțional.

Dacă spre exemplu $k_1 = 30000$ și $k_2 = 7500$ atunci $R_k = 4$ și din Tabelul 2.1 rezultă $\delta_0 = 0,5492$ și $R_L = 1,3338$. Rezultatele sunt similare cu cele din exemplul precedent însă în acest caz $EL(0)$ și $EL(\delta_0)$ au valori de 3 ori mai mari, adică cu alte cuvinte dacă k_1 crește (descrește) proporțional cu k_2 , atunci δ_0 și R_L nu se vor modifica.

De asemenea din relația (2.57) se observă că $EL(\delta_0)$ este proporțional cu σ^2 . Dacă se reușește prin metode de îmbunătățire a calității reducerea lui σ^2 , atunci media procesului trebuie mutată mai aproape de valoarea nominală (țintă).

2.4.2 Analiza sensibilității lui $EL(\delta_0)$

Sensibilitatea lui $EL(\delta_0)$ poate fi măsurată prin creșterea relativă în pierderea așteptată de calitate, definită prin relația (2.70).

$$RIL(\delta) = \left[\frac{EL(\delta)}{EL(\delta_0)} - 1 \right] \times 100 \text{ [%]} \quad (2.70)$$

```

C:\Program Files\matlabR12\work\AdiPugna\AdiPugna\RIL.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 function val= RIL( pr)
2 - global Rk;
3 - X0=0;
4 - X = fzero('ELP',X0);
5 - tp0=EL(X);
6 - d=X-pr*X;
7 - tp=EL(d);
8 - val=(tp/tp0-1)*100;

```

C:\Program Files\matlabR12\work\AdiPugna\AdiPugna\calcril.m

File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help



```

1 %calculeaza RIL
2 - clear;
3 - global Rk;
4 - pr=50/100; %procentul
5 - Rk=2; %Rk
6 - val=RIL(pr)

```

Se evaluează $RIL\left(\delta_0 - \frac{p}{100} \delta\right)$ și $RIL\left(\delta_0 + \frac{p}{100} \delta\right)$. În primul caz în programul

CALCRIL se ia $pr = p/100$ iar în al doilea caz se ia $pr = -p/100$. În Tabelul 2.2 sunt date valorile lui $RIL(\delta)$ pentru $R_k = 2;3;4;5;6;7;8;9$ și 10, coloana A reprezentând procentul erorii valorii actuale a lui δ relativ la valoarea optimală δ_0 iar coloanele de la B la J prezintă valorile lui $RIL(\delta)$ pentru diferitele valori ale lui R_k .

| A | B | C | D | E | F |
|----------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Procent eroare | R_k | | | | |
| | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 |
| -50% | 1,9292 | 7,9314 | 13,5788 | 18,6816 | 23,3374 |
| -40% | 1,2316 | 5,0247 | 8,5438 | 11,6856 | 14,5226 |
| -30% | 0,6910 | 2,7978 | 4,7250 | 6,4248 | 7,9437 |
| -25% | 0,4792 | 1,9331 | 3,2536 | 4,4112 | 5,4401 |
| -15% | 0,1721 | 0,6889 | 1,1517 | 1,5525 | 1,9050 |
| -10% | 0,0764 | 0,3046 | 0,5076 | 0,6823 | 0,8351 |
| -5% | 0,0191 | 0,0758 | 0,1258 | 0,1687 | 0,2059 |
| -2,5% | 0,0048 | 0,0189 | 0,0313 | 0,0419 | 0,0511 |
| -1% | 0,0008 | 0,0030 | 0,0050 | 0,0067 | 0,0081 |
| 1% | 0,0008 | 0,0030 | 0,0050 | 0,0067 | 0,0081 |
| 2,5% | 0,0048 | 0,0188 | 0,0311 | 0,0415 | 0,0504 |
| 5% | 0,0190 | 0,0750 | 0,1238 | 0,1650 | 0,2004 |
| 10% | 0,0760 | 0,2986 | 0,4910 | 0,6526 | 0,7911 |
| 15% | 0,1708 | 0,6684 | 1,0957 | 1,4523 | 1,7564 |
| 25% | 0,4732 | 1,8384 | 2,9943 | 3,9478 | 4,7526 |
| 30% | 0,6805 | 2,6342 | 4,2770 | 5,5243 | 6,7558 |
| 40% | 1,2068 | 4,6373 | 7,4828 | 9,4898 | 11,7085 |
| 50% | 1,8809 | 7,1755 | 11,5087 | 14,9826 | 17,8451 |

Tab. 2.2 Analiza sensibilității funcției pierdere pătratică funcție de δ , $RIL(\delta)$.

2.5 Determinarea mediei optime a unui proces pentru o caracteristică de calitate indirectă

Nivelul optim al procesului este folosit pentru selectarea țintei de fabricare a unui produs. Selectarea nivelului optim al procesului va afecta în mod direct costul și nivelul defectivelor, rebuturilor, reperlucrărilor precum și pierderea indusă clientului. Determinarea unei metode pentru selectarea economică a mediei procesului prin aplicarea funcțiilor pierdere liniară sau pătratică a fost studiată pe larg de Li [L1],[L2], Li și Chen [L3], Li și Wu [L4] și alții. O metodă pentru alegerea mediei procesului atunci când acesta nu este capabil să “ intre “ în specificații pe termen scurt a fost descrisă de Wen și Mergen [W4]. Ei presupun că varianța procesului este cunoscută, media poate fi modificată relativ ușor și selectează media procesului pe baza minimizării costului depășirii limitei superioare specificate (USL) și coborârii sub limita inferioară specificată (LSL). Totuși s-a neglijat pierderea calității pentru un produs aflat în interiorul specificațiilor. În mod tradițional se presupune că, caracteristica de calitate poate fi măsurată direct, în unele situații însă caracteristica de calitate nu este măsurabilă și trebuie măsurată prin intermediul unei alte caracteristici. Li și Chou [L5] au abordat această problemă și au adoptat o funcție de pierdere a calității pătratică asimetrică pentru determinarea unei caracteristici de calitate indirecte, presupunând totodată că relația funcțională prespecificată dintre factorul măsurabil și caracteristica de calitate este liniară sau neliniară. De asemenea în modelul lor nu au folosit un cost fixat pentru produsul aflat în afara specificațiilor și nu au dat costuri diferite pentru produsul aflat în specificații respectiv în afara specificațiilor. Se propune analizarea unui model modificat al lui Wen și Mergen și îmbunătățit de Chen [C6].

2.5.1 Modelul Wen și Mergen

Există trei ipoteze în acest model:

1. Caracteristica de calitate X este distribuită normal, cu media μ necunoscută și varianța σ^2 cunoscută.
2. Caracteristica de calitate este de tipul NTB (valoarea nominală este cea mai bună).
3. Valoarea țintă T se află la mijlocul specificațiilor $T = (T_S + T_I) / 2$

Conform modelului pierderea totală per produs este dată de relația (2.71):

$$C_T = A_I \int_{T_S}^{\infty} f(x) dx + A_S \int_{-\infty}^{T_I} f(x) dx = A_S \left[1 - \Phi \left(\frac{T_S - \mu}{\sigma} \right) \right] + A_I \Phi \left(\frac{T_I - \mu}{\sigma} \right) \quad (2.71)$$

unde: T_I – limita inferioară specificată
 T_S – limita superioară specificată

C_T – costul total per produs datorită depășirii specificațiilor

A_S – pierderea monetară per produs a depășirii T_S

A_I – pierderea monetară per produs a fi sub T_I

$f(x)$ – funcția densitate de probabilitate normală

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < x < +\infty \quad (2.72)$$

$\phi(z)$ – funcția densitate de probabilitate normală normată

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad -\infty < z < +\infty \quad (2.73)$$

Ecuatia (2.71) se derivează de două ori în raport cu μ . În ipoteza că $T_I \leq \mu \leq T_S$ și că a doua derivată este pozitivă, rezultă prin egalarea primei derivate în raport cu μ cu zero, valoarea optimă a lui μ (notată μ^*) și care minimizează costul per produs.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \mu} C_T = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial \mu^2} > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \mu^* = T + \frac{\sigma^2}{T_S - T_I} \ln \frac{A_I}{A_S} \quad (2.74)$$

2.5.2 Modelul Wen și Mergen modificat

Presupunem că, caracteristica de calitate nu poate fi măsurată direct, însă poate fi măsurată indirect prin intermediul unui alt factor (caracteristică de calitate).

Există trei ipoteze asupra modelului Wen și Mergen modificat:

1. Caracteristica de calitate măsurabilă Y este distribuită normal cu media necunoscută μ și varianța σ^2 cunoscută.
2. Relația funcțională între caracteristica de calitate indirectă X și caracteristica de calitate măsurabilă Y este liniară de tipul $X = aY + b$, unde a și b sunt constante.
3. Pierderea calității are loc atunci când caracteristica de calitate indirectă se află în interiorul specificațiilor și este reprezentată de o funcție pierdere pătratică sau liniară asimetrică.

În conformitate cu ipoteza 2., caracteristica de calitate indirectă X este de asemenea distribuită normal cu media $a\mu + b$ necunoscută și varianța $a^2\sigma^2$ cunoscută.

2.5.2.1 Modelul Wen și Mergen modificat pentru o funcție pierdere pătratică asimetrică

Funcția obiectiv de minimizat a modelului Wen și Mergen modificat este în acest caz:

$$C_{\text{TMPA}} = C_T + \int_{T_1}^T k_1 (T - x)^2 g(x) dx + \int_T^{T_S} k_2 (x - T)^2 g(x) dx \quad (2.75)$$

unde: T – valoarea țintă.

k_1 – coeficientul pierderii calității pentru $x < T$.

k_2 – coeficientul pierderii calității pentru $x \geq T$.

$g(x)$ – densitatea de probabilitate a funcției X

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma}\right)^2\right] \quad -\infty < x < +\infty \quad (2.76)$$

Pierderea așteptată per produs pentru a fi sub T_1 este:

$$A_1 \int_{-\infty}^{T_1} g(x) dx = A_1 \int_{-\infty}^{T_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma}\right)^2\right] dx \quad (2.77)$$

Făcând schimbarea de variabilă $z = \frac{x - b - \mu a}{a\sigma}$, $dz = \frac{1}{a\sigma} dx$ se obține

$$C_1 = A_1 = \int_{-\infty}^{\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}} \phi(z) dz = A_1 \Phi\left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}\right) \quad (2.78)$$

Pierderea așteptată per produs pentru a fi peste T_S este:

$$C_2 = A_S \int_{T_S}^{\infty} g(x) dx = A_S \int_{T_S}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma}\right)^2\right] dx =$$

$$A_S \int_{\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}}^{\infty} \phi(z) dz = A_S \left[1 - \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right)\right] \quad (2.79)$$

Pierderea așteptată per produs între T_1 și T este:

$$\begin{aligned}
C_{3MPA} &= \int_{T_1}^T k_1 (T - x)^2 g(x) dx = \\
&= \int_{T_1}^T k_1 (T - x)^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma}\right)^2\right] dx = \\
&= \int_{\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}}^{\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}} k_1 (T - za\sigma - b - \mu a)^2 \phi(z) dz = \\
&= k_1 \left\{ \left[(b - T)^2 + a\mu(2b - 2T + a\mu) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] - \right. \\
&\quad - a\sigma(2b - 2T + 2a\mu) \left[\phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + \\
&\quad + a^2 \sigma^2 \left[-\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma} \phi\left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \right. \\
&\quad \left. \left. + \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\} \tag{2.80}
\end{aligned}$$

Pierderea așteptată per produs între T și T_S este:

$$\begin{aligned}
C_{4MPA} &= \int_T^{T_S} k_2 (x - T)^2 g(x) dx = \\
&= \int_T^{T_S} k_2 (x - T)^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma}\right)^2\right] dx = \\
&= \int_{\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}}^{\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}} k_2 (za\sigma + b + \mu a - T)^2 \phi(z) dz = \\
&= k_2 \left\{ \left[(b - T)^2 + a\mu(2b - 2T + a\mu) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] - \right. \\
&\quad - a\sigma(2b - 2T + 2a\mu) \left[\phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + \\
&\quad + a^2 \sigma^2 \left[-\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) \phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \frac{T - b - \mu a}{a\sigma} \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \right. \\
&\quad \left. \left. + \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\} \tag{2.81}
\end{aligned}$$

Pierderea totală per produs având în vedere funcția pierdere pătratică asimetrică este:

$$C_{\text{TMPA}} = C_1 + C_2 + C_{3\text{MPA}} + C_{4\text{MPA}} \quad (2.82)$$

$$C_{\text{TMPA}} = A_I \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + A_S \left[1 - \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right)\right] +$$

$$+ k_1 \left\{ \left[(b - T)^2 + a\mu(2b - 2T + a\mu) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] - \right.$$

$$- a\sigma(2b - 2T + 2a\mu) \left[\phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] +$$

$$+ a^2 \sigma^2 \left[- \left(\frac{T - b - \mu a}{a\omega}\right) \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma} \phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \right.$$

$$\left. \left. + \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\} +$$

$$+ k_2 \left\{ \left[(b - T)^2 + a\mu(2b - 2T + a\mu) \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] - \right.$$

$$- a\sigma(2b - 2T + 2a\mu) \left[\phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] +$$

$$+ a^2 \sigma^2 \left[- \left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\omega}\right) \phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \frac{T - b - \mu a}{a\sigma} \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \right.$$

$$\left. \left. + \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\} \quad (2.83)$$

Pentru cazul particular când $k_1 = k_2 = k$ pentru cazul funcției pierdere pătratică asimetrică, relația de minimizat simplificată este:

$$C_{\text{TMPA},k} = A_S \left[1 - \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right)\right] + A_I \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + k \left\{ \left[(b - T)^2 + \right. \right.$$

$$+ a\mu(2b - 2T + a\mu) \left. \right] \cdot \left[\Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] -$$

$$- a\sigma(2b - 2T + 2a\mu) \cdot \left[\phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] +$$

$$+ a^2 \sigma^2 \left[\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma} \cdot \phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma} \cdot \phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \right.$$

$$\left. \left. + \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\} \quad (2.84)$$

2.5.2.2 Modelul Wen și Mergen modificat pentru o funcție pierdere liniară asimetrică

Funcția obiectiv de minimizat a modelului Wen și Mergen modificat este în acest caz:

$$C_{TMLA} = C_T + \int_{T_1}^T k_1 (T - x) \cdot g(x) dx + \int_T^{T_S} k_2 (x - T) \cdot g(x) dx \quad (2.85)$$

Pierderea așteptată per produs între T_1 și T este:

$$\begin{aligned} C_{3MLA} &= \int_{T_1}^T k_1 (T - x) \cdot g(x) dx = \\ &= \int_{T_1}^T k_1 (T - x) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma} \right)^2 \right] dx = \\ &= \int_{\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma}}^{\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}} k_1 (T - za\sigma - b - \mu a) \cdot \phi(z) dz = \\ &= k_1 \left\{ (T - b - \mu a) \cdot \left[\Phi \left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + a\sigma \cdot \left[\phi \left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma} \right) - \phi \left(\frac{T_1 - b - \mu a}{a\sigma} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.86)$$

Pierderea așteptată per produs între T și T_S este:

$$\begin{aligned} C_{4MLA} &= \int_T^{T_S} k_2 (x - T) \cdot g(x) dx = \\ &= \int_T^{T_S} k_2 (x - T) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot a\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - b - \mu a}{a\sigma} \right)^2 \right] dx = \\ &= \int_{\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}}^{\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}} k_2 (za\sigma + b + \mu a - T) \phi(z) dz = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= k_2 \left\{ -a\sigma \cdot \left[\phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + \right. \\
&\quad \left. + (b + \mu a - T) \cdot \left[\Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.87}$$

Pierderea totală per produs având în vedere funcția pierdere liniară asimetrică este:

$$\begin{aligned}
C_{TMLA} &= C_1 + C_2 + C_{3MLA} + C_{4MLA} \tag{2.88} \\
C_{TMLA} &= A_S \left[1 - \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + A_I \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \\
&+ k_1 \left\{ (T - b - \mu a) \cdot \left[\Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + \right. \\
&+ a\sigma \cdot \left[\phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \left. \right\} + \\
&+ k_2 \left\{ -a\sigma \cdot \left[\phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + \right. \\
&\quad \left. + (b + \mu a - T) \cdot \left[\Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.89}$$

Pentru cazul particular când $k_1 = k_2 = k$ pentru cazul funcției pierdere liniară asimetrică, relația de minimizat simplificată este:

$$\begin{aligned}
C_{TMLA,k} &= A_I \Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + A_S \left[1 - \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] + \\
&+ k \left\{ (b + \mu a - T) \cdot \left[\Phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - 2\Phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] - \right. \\
&\quad \left. - a\sigma \cdot \left[\phi\left(\frac{T_I - b - \mu a}{a\sigma}\right) + \phi\left(\frac{T_S - b - \mu a}{a\sigma}\right) - 2\phi\left(\frac{T - b - \mu a}{a\sigma}\right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.90}$$

2.6 Raportul Semnal/Zgomot (S/N Ratio)

2.6.1 Utilizarea Raportului Semnal/Zgomot ca indicator de performanță în cazul criteriilor statice

Mijloacele pentru evaluarea performanței unui sistem au un rol critic mai ales atunci când se încearcă optimizarea rapidă a unui produs sau proces nou, făcută și în scopul reducerii costurilor asociate ciclului de dezvoltare a produsului sau procesului. Dacă se folosește metoda tradițională de evaluare a performanței, adică parcurgerea unei liste detaliate a problemelor specifice (*check-list*), atunci se poate obține, eventual, o îmbunătățire punctuală a produsului sau procesului, îmbunătățirea globală a calității acestora fiind incertă.

Având în vedere aceste lucruri este esențial să se dezvolte o “ *metrologie specifică și sintetică* ” care să permită evaluarea performanței într-o manieră eficientă. Se consideră că “ *Performanța* ” reprezintă “ *ieșirea* ” unui sistem cu una sau mai multe “ *intrări* ”. Atunci când se dorește evaluarea performanțelor unui sistem, trebuie considerate pe rând atât “ *ieșirile dorite* ” (cele pe care dorim să le obținem) cât și “ *ieșirile nedorite* ” (cele pe care dorim să le evităm).

La primele ne referim în calitate de “ *Semnale* ” și la celelalte în calitate de “ *Zgomote* ”, prin analogie cu folosirea tradițională a celor două noțiuni din expresia “ *Raportul Semnal/Zgomot (S/N)* ” utilizat în domeniul comunicațiilor electronice. Spre deosebire de abordările clasice (tradiționale) care tratează separat aceste două componente, G. Taguchi utilizează pentru a evalua calitatea unui produs sau proces, o măsură sintetică a performanței cu aceeași denumire (raport semnal/zgomot) care ia în calcul simultan atât *media* cât și *dispersia*.

Într-adevăr dacă ne gândim că scopul unui experiment este să se fixeze anumite valori pentru parametrii de intrare în sistem (*intrările*), ale unui produs sau proces, astfel încât acestea să atingă performanțele dorite (*ieșirile dorite*) și în plus să aibe o sensibilitate minimă la factorii necontrolabili (zgomote), adică *ieșirile nedorite*, atunci este logic ca cele două componente (*media și dispersia*) să fie optimizate împreună.

Observație:

Un exemplu în acest sens este cel prezentat în Fig.2.13 (a) și (b) în care se observă că pentru obținerea unei performanțe adecvate într-un proces de fabricație nu este suficient ca valoarea medie \bar{y} a unui lot de piese să fie egală cu valoarea nominală fixată, ci trebuie ca și dispersia în jurul valorii medii să fie suficient de mică. În termeni metrologici în cazul în care $\bar{y} = y_N$, atunci se spune despre un aparat de măsură că este “ *just* ”, orice abatere de la valoarea nominală numindu-se “ *eroare de justete* ”, iar în cazul când dispersia în jurul valorii medii este suficient de mică, se spune că aparatul de măsură este “ *fidel* ”, orice abatere de la valoarea medie numindu-se “ *eroare de fidelitate* ”. Pentru ca un aparat de măsură să aibe

performanțe bune (dorite) din punct de vedere metrologic, el trebuie să fie “*exact*” adică să fie simultan “*just*” și “*fidel*”

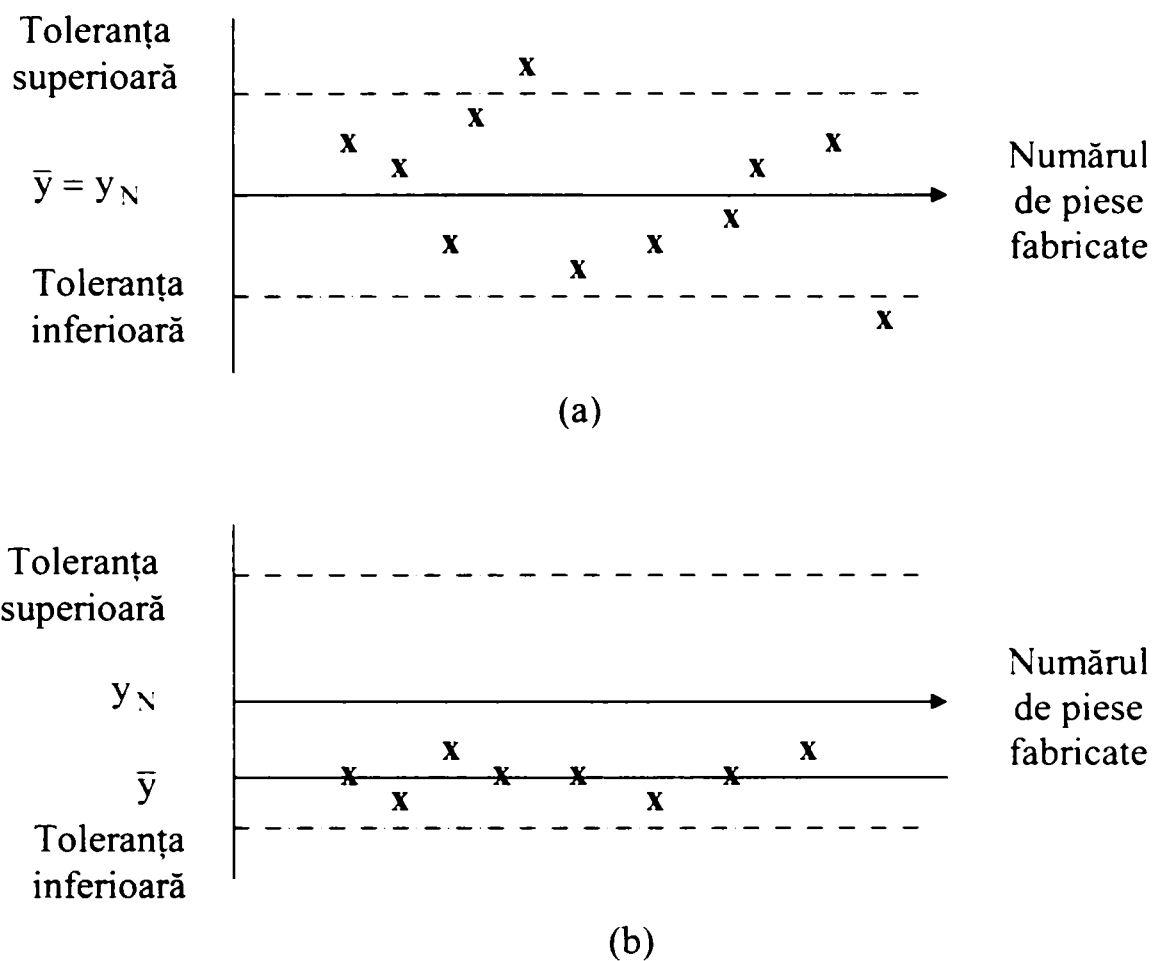


Fig. 2.13 (a) Valoarea medie a unei cote egală cu valoarea nominală dar cu dispersie mare în jurul valorii medii
 (b) Dispersie în jurul valorii medii, dar cu abatere mare a acesteia față de valoarea nominală

Având în vedere că obiectivul general a fost stabilit, măsura sintetică a performanței sistemului, adică indicatorul de performanță “*Raport Semnal/Zgomot*” are și următoarele caracteristici:

- ✓ Dacă mai mulți factori au fiecare în mod individual un efect asupra performanței, atunci este de dorit ca efectul combinat al acestora să fie suma efectelor individuale (proprietate numită și *aditivitate*).
- ✓ Maximizarea indicelui de performanță corespunde minimizării funcției pierdere a calității în sensul dat de G. Taguchi.
- ✓ Indicele de performanță este independent de nivelul fixat al performanței propriu-zise.

2.6.1.1 Raportul Semnal/Zgomot pentru criteriile țintă

Există sisteme la care în mod frecvent caracteristica de ieșire trebuie să îndeplinească un obiectiv de tipul: “ *optimumul este valoarea nominală* “ sau se folosește expresia “ *caracteristica de calitate este un criteriu țintă* “. Ambele exprimări, criteriu țintă sau valoare nominală, reprezintă de fapt un mod de a defini o *valoare nominală preferențială* pentru ieșirea unui sistem ce urmează a fi optimizat. Toate celelalte valori sunt mai puțin dorite decât valoarea nominală sau țintă.

Se presupun o serie de măsurări la care s-a putut determina media și respectiv s-a stabilit intervalul de variație a performanței ca fiind ± 1 . Numai pe baza acestor informații este greu să se facă aprecieri asupra performanței, neavând totodată informații asupra unității de măsură a performanței și nici un punct de referință pentru stabilirea ordinului de mărime al acesteia. (de exemplu pentru o valoare medie egală cu 10 intervalul de variație ar putea fi considerat prea mare, pentru o valoare medie egală cu 100 ar putea fi considerat relativ bun, pentru o valoare medie egală cu 1000, foarte bun etc.). Apare deci sugestia de a folosi pe post de indice de performanță, rezultatul împărțirii valorii medii la intervalul de variație.

Avantajele unui astfel de indice de performanță (care respectă și caracteristicile impuse de G. Taguchi) sunt:

- ✓ Prin împărțire (raport) este eliminată problema unității de măsură.
- ✓ Raportul include o referință privind ordinul de mărime ce va permite relativizarea valorii intervalului de variație.
- ✓ Acest mod de definire a indicelui de performanță îl face independent de modificările ulterioare ale nivelului performanței propriu zise.

Se consideră valorile raportului (indicelui de performanță) relativ la 3 soluții tehnice pentru un produs, reprezentate în Fig. 2.14.

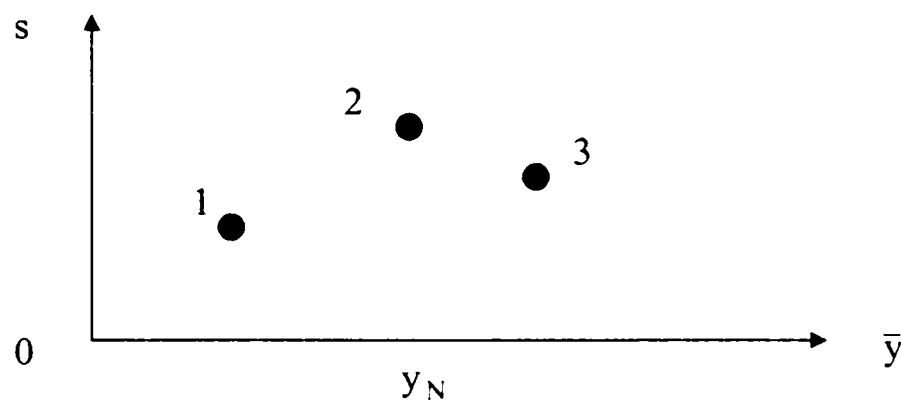


Fig. 2.14 Valorile raportului (indicelui de performanță) pentru 3 soluții tehnice ale unui produs

Se pune problema să se determine care din soluții este preferabilă. Răspunsul frecvent este: Soluția 1, întrucât intervalul de variație (notat cu s) este cel mai mic.

Dacă ne uităm însă la valoarea țintă notată y_N , se observă că semnalul de ieșire (valoare medie) a Soluției 1 are nevoie de o reglare a acestuia pentru a-l aduce mai aproape de valoarea țintă. Se pune acum problema cum va influența această reglare valoarea intervalului de variație.

Este evident că cea mai bună metodă este cea care utilizează un factor de reglare ce face să varieze media și abaterea standard (intervalul de variație) în aceeași proporție păstrând raportul lor constant. În consecință, reglarea valorii medii la valoarea țintă va plasa intervalul de variație (abaterea standard) în punctul 1' din Fig.2.15. În baza aceluiași raționament, intervalul de variație (abaterea standard) a Soluției 3 se va plasa în punctul 3' din Fig. 2.15.

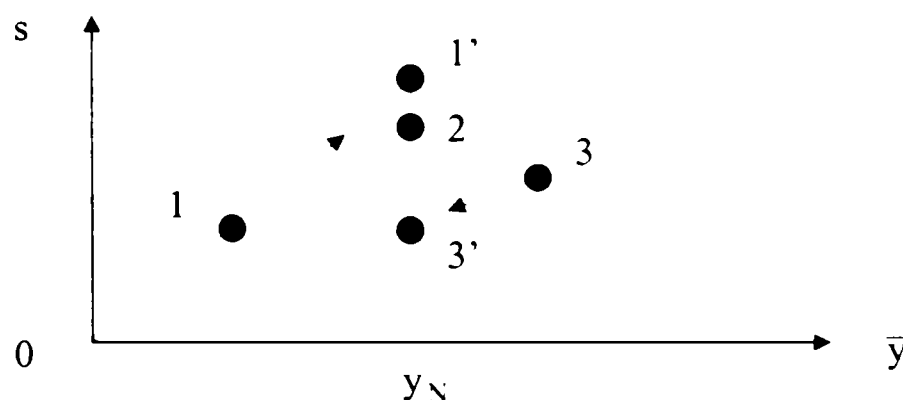


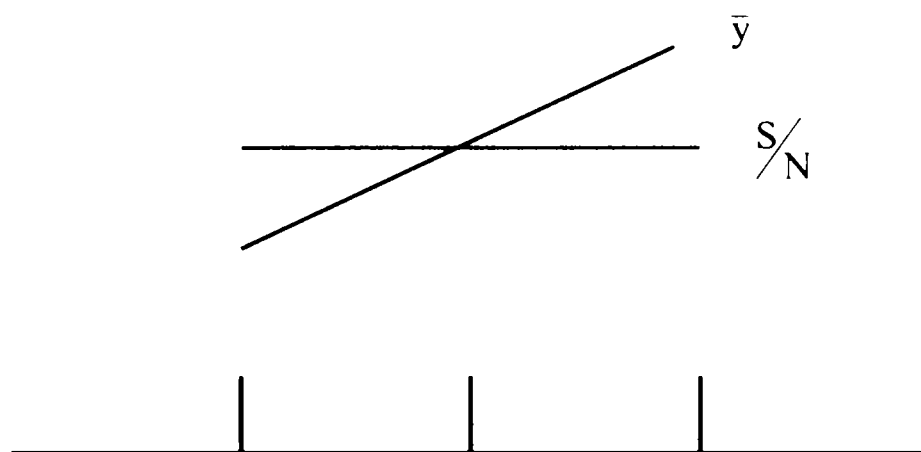
Fig. 2.15 Reglarea valorilor medii la valoarea țintă pentru cele 3 Soluții tehnice ale unui produs

Analizând Fig.2.15 se observă că Soluția 3 este cea care dă cel mai mic interval de variație și devine alegerea cea mai bună.

Concluzia este că trebuie aleasă acea soluție care are *raportul medie/interval de variație (abatere standard sau dispersie) cel mai mare și care dă cel mai mic interval de variație (abatere standard sau dispersie) după ajustarea valorii medii la valoarea țintă (nominală)*. Acest lucru spune că pentru un criteriu țintă raportul Semnal/Zgomot bazat pe raportul medie/interval de variație (abatere standard) este un indice de performanță ce rămâne constant în timpul ajustării mediei la valoarea țintă.

După efectuarea unui experiment de optimizare, trebuie identificat un factor de reglare astfel încât dacă este îndeplinită condiția prezentată anterior pentru soluția tehnică, atunci *media variază liniar cu factorul de reglare*.

Este evident că un astfel de factor reprezintă o idealizare, în realitate raportul Semnal/Zgomot este variabil cu factorii reali. Totuși, există posibilitatea, să se găsească valori noi după reglarea mediei și după mai multe iterații să se obțină o *Soluție Optimă*.



Intervalul de variație al factorului de reglare ideal

Fig. 2.16 Factor ideal pentru care media variază liniar cu acesta și raportul Semnal/Zgomot este constant

Pentru determinarea raportului Semnal/Zgomot bazat pe raportul medie/abatere standard se pornește de la funcția pierdere a calității a lui G. Taguchi pentru criteriul țintă pentru eșantion de “n” piese:

$$L(y) = k \left[s^2 + (\bar{y} - y_N)^2 \right] \quad (2.91)$$

Așa cum s-a arătat anterior pentru reducerea pierderii, răspunsul \bar{y} trebuie apropiat de valoarea nominală y_N cu păstrarea raportului y_N/\bar{y} . Având în vedere că factorul de reglare care produce deplasarea mediei păstrează constant și raportul medie/abatere standard, se poate spune că $s' = s (y_N/\bar{y})$, adică o dată ce răspunsul \bar{y} a fost reglat la y_N , abaterea standard va fi egală cu s' . Rezultă că funcția pierdere a calității poate fi scrisă:

$$L(y) = k \cdot s'^2 = k \cdot \left[s \left(\frac{y_N}{\bar{y}} \right) \right]^2 = k \cdot y_N^2 \cdot \frac{s^2}{\bar{y}^2} \quad (2.92)$$

În relația (2.92) k și y_N fiind constante, pentru minimizarea pierderii trebuie maximizat raportul adimensional \bar{y}^2/s^2 care corespunde speranței matematice atunci când $n \rightarrow \infty$. Expresia raportului Semnal/Zgomot pentru criteriile țintă este dată în relația (2.93). Se menționează că pentru îmbunătățirea aditivității se utilizează logaritmul raportului și prin analogie cu convenția din electronică și acustică, raportul

se exprimă în decibeli, respectiv formula se ajustează cu raportul $1/n$ pentru păstrarea rigurozității matematice atunci când numărul de măsurări este relativ mic.

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left[\frac{\bar{y}^2}{s^2} - \frac{1}{n} \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.93)$$

Concluzie: Cu cât valoarea algebrică a raportului S/N este mai mare cu atât performanța produsului sau procesului ce trebuie optimizat va fi mai bună (evident pierderea generată va fi mai mică).

Observații:

- Raportul S/N permite relativizarea valorii abaterii standard în raport cu valoarea medie, eliminând totodată problema unității de măsură.
- În cazul în care toate valorile măsurate sunt egale adică $s = 0$, atunci calculul direct al raportului S/N nu este posibil. Totuși pentru a putea evalua performanța prin calcularea raportului S/N, se alocă abaterii standard o valoare foarte mică.
- În cazul în care caracteristicile de performanță iau valori pozitive și negative, există posibilitatea ca valoarea medie să devină algebric inferioară abaterii standard și atunci intervalul de variație se măsoară utilizând varianța s^2 . Pentru calculul raportului S/N se folosește relația (2.94) în care semnul “-” indică faptul că valoarea algebrică a lui S/N va fi cu atât mai mare cu cât varianța s^2 este mai mică.
- Criteriile de performanță asimilate criteriilor țintă sunt de fapt un caz particular al criteriilor dinamice.

$$\frac{S}{N} = -10 \log s^2 \quad [\text{dB}] \quad (2.94)$$

2.6.1.2 Raportul Semnal/Zgomot pentru criteriile ce trebuie minimizate

În multe cazuri valoarea țintă pentru măsurarea performanței are valoarea zero. Pornind de la expresia funcției pierdere a calității pentru criterii ce trebuie minimizate (relația 2.95), se observă că pentru a minimiza pierderea trebuie minimizată expresia: $s^2 + \bar{y}^2$. Pentru a păstra regula de utilizare a raportului Semnal/Zgomot, acesta se exprimă tot în decibeli și este precedat de semnul “-”, (relația 2.96), semnificând faptul că pierderea va fi cu atât mai mică (adică performanța cu atât mai mare) cu cât dispersia se diminuează.

$$L(y) = k \cdot (s^2 + \bar{y}^2) \quad (2.95)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log(s^2 + \bar{y}^2) \quad [\text{dB}] \quad (2.96)$$

Dacă $\bar{y} = 0$, adică atunci când toate valorile măsurate sunt egale cu zero, atunci și $s = 0$ și apare o nedeterminare. Pentru a evalua performanța și a putea calcula raportul Semnal/Zgomot se alocă pentru \bar{y} și s valori foarte mici (de ex 0,0001).

În unele cazuri performanța poate fi tratată și ca un “ zgomot “ în cadrul unei probleme cu criteriu țintă, alteleori ca un “ zgomot “ corespunzător unui semnal de intrare nul. Este recomandabil să se trateze problema în regim dinamic luând în considerare întreaga plajă de intrări în loc de a se limita la o singură valoare a semnalului de intrare.

2.6.1.3 Raportul Semnal/Zgomot pentru criteriile ce trebuie maximizate

Se pornește de la expresia funcției pierdere a calității pentru criteriile ce trebuie maximizate conform relației (2.97). Minimizarea pierderii (creșterea performanței) înseamnă minimizarea expresiei: $(1/\bar{y}^2) \cdot (1 + 3s^2/\bar{y}^2)$.

$$L(y) = k \frac{1}{\bar{y}^2} \left[1 + 3 \frac{s^2}{\bar{y}^2} \right] \quad (2.97)$$

Expresia pentru raportul Semnal/Zgomot este dată în relația (2.98) și păstrează caracteristicile prezentate anterior.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\left(\frac{1}{\bar{y}^2} \right) \cdot \left(1 + 3 \frac{s^2}{\bar{y}^2} \right) \right] \quad (2.98)$$

2.6.1.4 Măsurarea performanței pentru criteriile dinamice

Cele trei criterii de calitate prezentate anterior corespund *caracteristicilor (criteriilor) de performanță statice* pentru care valoarea țintă este o constantă ce poate fi definită înainte de demararea experimentului. În cazul criteriilor dinamice există patru tipuri fundamentale:

- 1) Intrare variabilă / Ieșire variabilă
- 2) Intrare variabilă / Ieșire digitală
- 3) Intrare digitală / Ieșire variabilă
- 4) Intrare digitală / Ieșire digitală

Se va examina în continuare primul tip la care atât semnalul de intrare cât și cel de ieșire sunt variabile continue (semnale analogice). Pentru a alege criteriile de performanță adecvate semnalelor digitale, trebuie luat în considerare faptul că

semnalul digital poate fi considerat în fapt asocierea unui semnal analogic (variabilă continuă) cu un protocol capabil să distingă între 1 și 0.

Pentru tipul fundamental “ 1 ” este posibil să se definească performanța ca o relație liniară între semnalul de ieșire ca variabilă continuă și semnalul de intrare ca variabilă continuă.

Dacă toate punctele experimentale se plasează pe o dreaptă, performanța este perfectă și ecuația dreptei optime este:

$$y_{\beta} = \bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M}) \quad (2.99)$$

unde: \bar{y} - valoarea medie a lui y

β - panta dreptei

M - factorul semnal (semnalul de intrare)

\bar{M} - valoarea medie a factorului semnal

În realitate rezultatele măsurărilor nu se vor plasa exact pe o dreaptă, abaterea față de dreapta optimală fiind definită ca o eroare. Dreapta optimală este cea care minimizează suma pătratelor erorilor:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \{y - [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})]\}^2 \quad (2.100)$$

Valorile optime pentru \bar{y} și care minimizează relația (2.100), sunt cele care anulează derivatele parțiale în raport cu \bar{y} și β .

$$\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \frac{\partial}{\partial \bar{y}} \sum_{i=1}^n \{y - [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})]\}^2 = 0 \quad (2.101)$$

$$\frac{\partial}{\partial \bar{y}} \sum_{i=1}^n \{y^2 - 2y \cdot [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})] + \bar{y}^2 + \beta^2 \cdot (M - \bar{M})^2 + 2\bar{y}\beta(M - \bar{M})\} = 0 \quad (2.102)$$

$$-2 \sum_{i=1}^n \{y - [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})]\} = 0 \quad (2.103)$$

$$\sum_{i=1}^n y = n \cdot \bar{y} + \beta \underbrace{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})}_{=0} \Rightarrow \sum_{i=1}^n y = n \cdot \bar{y} \Rightarrow \quad (2.104)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y}{n} \quad (2.105)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^n \varepsilon^2 &= \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^n \{y - [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})]\}^2 = 0 \Rightarrow \\ \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^n \{y^2 + [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})]^2 - 2y \cdot [\bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M})]\} &= 0 \Rightarrow \\ \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^n [y^2 + \bar{y}^2 + \beta^2 (M - \bar{M})^2 + 2\bar{y}\beta \cdot (M - \bar{M}) - 2y\bar{y} - 2y\beta \cdot (M - \bar{M})] &= 0 \Rightarrow \\ \sum_{i=1}^n [2\beta \cdot (M - \bar{M})^2 + 2\bar{y} \cdot (M - \bar{M}) - 2y \cdot (M - \bar{M})] &= 0 \Rightarrow \\ \sum_{i=1}^n y \cdot (M - \bar{M}) - \underbrace{\bar{y} \sum_{i=1}^n (M - \bar{M})}_{=0} &= \beta \sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2 \Rightarrow \\ \beta &= \frac{\sum_{i=1}^n y \cdot (M - \bar{M})}{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2} \end{aligned} \quad (2.106)$$

Suma pătratelor erorilor poate fi scrisă:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n \left[y - \bar{y} - \frac{\sum_{i=1}^n y \cdot (M - \bar{M})}{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2} \cdot (M - \bar{M}) \right]^2 \quad (2.107)$$

Valoarea medie a erorii ε pe fiecare punct experimental este:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon^2}{n - 2} \quad (2.108)$$

Pierderea a două grade de libertate în relația (2.108) (adică împărțirea cu “n-2” în loc de “n”), este justificată de faptul că valoarea medie \bar{y} s-a calculat pe baza valorilor experimentale și dacă acestea ar fi limitate doar la două valori atunci s-ar putea construi o eroare egală cu zero. Putem considera pe V din relația (2.108) ca fiind incrementul mediu al erorii ε pe punctul de măsurare adițional (în afara

celorlalte două). V este deci varianța criteriului de calitate a lui “ y ”. Pentru calculul varianței factorului semnal M , se completează ecuația dată de relația (2.108) cu eroarea ϵ .

$$y = \bar{y} + \beta \cdot (M - \bar{M}) + \epsilon \quad (2.109)$$

Rezolvând această ecuație în raport cu M se obține:

$$M = \frac{1}{\beta} (y - \bar{y} + \beta \bar{M}) - \frac{\epsilon}{\beta} \quad (2.110)$$

Primul termen din dreapta expresiei reprezintă estimăția lui M :

$$\hat{M} = \frac{1}{\beta} (y - \bar{y} + \beta \bar{M}) \quad (2.111)$$

Varianța V' a lui M se poate deci scrie:

$$V' = \overline{(M - \bar{M})^2} = \frac{\overline{\epsilon^2}}{\beta^2} = \frac{V}{\beta^2} \quad (2.112)$$

Raportul Semnal/Zgomot va fi:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{1}{V'} = 10 \log \frac{\beta^2}{V} = 10 \log \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (2.113)$$

Observație:

Relația (2.106) în care s-a obținut valoarea lui β supraestimează valoarea reală deoarece include și efectul erorii. Raportul Semnal/Zgomot corectat este de forma dată în relația (2.114):

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\frac{1}{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2} \cdot (S_\beta - V)}{V} \quad (2.114)$$

$$\text{unde } S_{\beta} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n y \cdot (M - \bar{M})}{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2} \right] \cdot \sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2 \quad (2.115)$$

2.6.2 Generalizarea raportului Semnal/Zgomot

Obiectivul general în proiectarea unui sistem după metoda G. Taguchi este maximizarea unei “*metrici*” (numită *Raport Semnal/Zgomot*) asupra spațiului de proiectare unde fiecare evaluare include variațiile spațiului de zgomot. Adică pentru fiecare “*punct*” experimental în spațiul de proiectare (matrice internă) și pentru fiecare “*punct*” experimental din spațiul de zgomot (matrice externă), raportul Semnal/Zgomot este exprimat ca o funcție de aranjamentul experimental al parametrilor de proiectare (DP)_s \bar{x}_j (numiți în metoda G. Taguchi și factori de control și ale căror valori sunt alese în procesul de proiectare) ca în relația (2.116).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}_j) = -10 \log \left\{ \sum_{i=1}^m [PP(\bar{x}_j, \bar{p}_i) - \tau]^2 \cdot \frac{1}{m} \right\} \quad (2.116)$$

unde: PP – parametrul de performanță al sistemului.

m – numărul aranjamentelor factorilor de zgomot (dimensiunea factorului de zgomot \bar{p}).

\bar{p}_i – vectorul parametrilor (factorilor) de zgomot ales pentru a fi folosit la aranjamentul experimental particular “i”.

\bar{x}_j – vectorul parametrilor de proiectare (factorilor de control) ales pentru a fi folosit la aranjamentul experimental particular “j”.

τ – Valoarea țintă dorită.

2.6.2.1 Posibilități de extindere a raportului Semnal/Zgomot

Ecuția (2.116) definește o suprafață asupra spațiului de proiectare prin evaluarea funcției PP la fiecare aranjament al parametrilor de proiectare (DP)_s \bar{x}_j , prin însumare asupra zgomotului la fiecare \bar{p}_i , fiind ales setul de parametri de proiectare \bar{x}_j care maximizează raportul S/N. Această definiție generalizată a raportului Semnal/Zgomot este însă numai o aproximare asupra proporției alocate fiecărui aranjament experimental al factorilor de zgomot, bazată pe probabilitatea de a obține un anumit aranjament experimental.

2.6.2.1.1 Extinderea raportului Semnal/Zgomot bazată pe probabilitatea de apariție a experimentelor

Abordarea lui G. Taguchi alocă o proporție de $1/m$ fiecărui aranjament experimental, indiferent de probabilitatea de realizare a unui experiment particular. Pentru ca metoda să fie mai exactă, se vor lua în considerare probabilitățile de apariție a fiecărui experiment particular:

$$\frac{S}{N}(\bar{x}_j) = -10 \log \left\{ \sum_{i=1}^m [PP(\bar{x}_j, \bar{p}_i) - \tau]^2 \cdot Pr_i \right\} \quad (2.117)$$

unde: Pr_i – probabilitatea de apariție a aranjamentului “ i ” al parametrilor de zgomot, determinată prin combinarea probabilistică a funcțiilor densitate de probabilitate a factorilor de zgomot individuali.

Funcțiile densitate de probabilitate ale factorilor de zgomot trebuie discretizate într-o probabilitate, bazat pe cât de mult se dorește ca punctul experimental să reprezinte din aria de sub curba densitate de probabilitate (Fig.2.17).

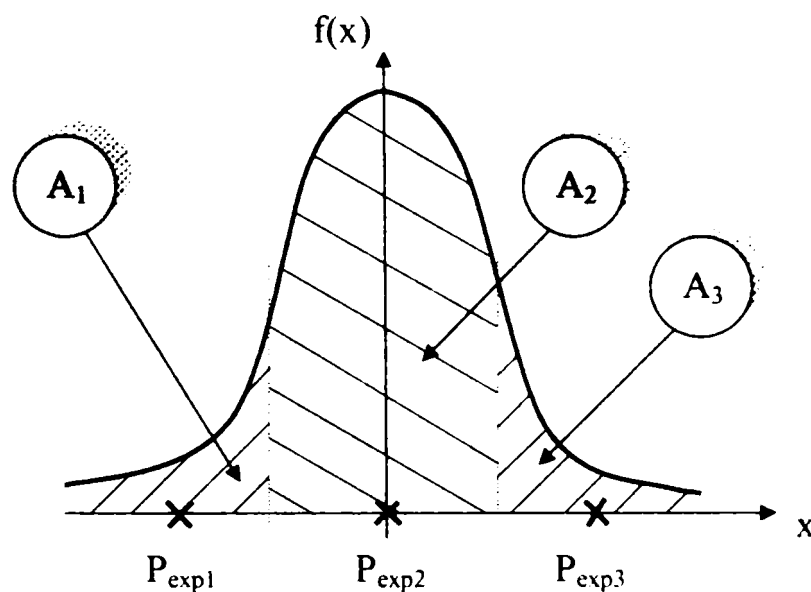


Fig. 2.17 Alocarea unei arii de sub curba densitate de probabilitate sub forma unei probabilități discrete fiecărui punct experimental

Pentru a determina unde să se afle punctele experimentale trebuie să se determine valorile așteptate pe baza împărțirii ariilor de sub curba densitate de probabilitate. Problema împărțirii ariei este una relativ imprecisă.

Metoda G. Taguchi impune ca fiecare factor de zgomot să fie independent unul în raport cu celălalt și în acest caz combinarea probabilistică a ponderii factorilor de zgomot se face prin înmulțirea acestor ponderi. În realitate acest lucru nu este întotdeauna posibil deoarece funcțiile densitate de probabilitate nu pot fi cunoscute aprioric ci numai după efectuarea experimentului (și nici atunci întotdeauna). Pentru

a obține cele mai bune rezultate aria de sub curba densitate de probabilitate trebuie împărțită în arii egale și atunci evident punctele experimentale vor avea aceeași pondere.

Ecuția (2.117) poate fi văzută din acest punct de vedere ca o posibilitate de creștere a exactității metodei G. Taguchi într-un mediu experimental incert. O altă ipoteză a metodei G. Taguchi este că densitățile de probabilitate sunt normale iar punctele experimentale se presupun a fi alese la valoarea nominală $\pm \sigma$ astfel încât toate au aceeași probabilitate de apariție (1/3) iar Pr_i este același, 1/m, pentru toate experimentele (factori cu 3 nivele). În realitate această ipoteză poate să nu fie adevărată dacă de exemplu experimentatorul decide să considere și cazurile care nu au o probabilitate foarte mare (fie din necunoașterea spațiului de zgomot fie că așa dorește).

Aceste observații conduc la expresia exactă asupra a ceea ce metoda lui G. Taguchi aproximează din punct de vedere experimental dacă zgomotul constă în întregime din *incertitudine probabilistică*. Expresia exactă a raportului Semnal/Zgomot în acest caz este:

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) = -10 \log \left\{ \int_{Pr(\bar{p}|\bar{x})} [PP(\bar{x}, \bar{p})]^2 d Pr(\bar{p}|\bar{x}) \right\} \quad (2.118)$$

Alegerea factorilor de control (parametrii de proiectare) după metoda lui G. Taguchi pe baza maximizării raportului Semnal/Zgomot este de fapt o aproximare experimentală a maximizării raportului din relația (2.118).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}^*) = \max_{\bar{x} \in (DP)_s} \left\{ -10 \log \left\{ \int_{Pr(\bar{p}|\bar{x})} [PP(\bar{x}, \bar{p}) - \tau]^2 d Pr(\bar{p}|\bar{x}) \right\} \right\} \quad (2.119)$$

unde $Pr(\bar{p}|\bar{x})$ - probabilitatea de a obține aranjamentul \bar{p} pentru factorii de zgomot, fiind dați factorii de control \bar{x} .

Observații:

- Având în vedere că relația (2.118) exprimă valoarea așteptată a lui $[PP(\bar{x}, \bar{p}) - \tau]^2$ asupra spațiului de zgomot (printr-o transformare -10 log), metoda G. Taguchi este o aproximare experimentală de aflare a punctului \bar{x}^* care minimizează valoarea așteptată a varianței țintă asupra spațiului zgomotului probabilistic
- Relația (2.119) se poate aplica și atunci când $Pr(\bar{p})$ se modifică în spațiul de proiectare (de exemplu “ zgomotul “ de fabricare se poate modifica prin schimbarea materialului unui factor de control).

2.6.2.1.2 Extinderea raportului Semnal/Zgomot bazată pe intervalele de necesitate

În cazul în care la un sistem există factori care trebuie să satisfacă un întreg domeniu de valori, performanța obținută trebuie catalogată ca fiind *cazul cel mai nefavorabil* dintre toate ce trebuie satisfăcute. Această observație permite extinderea metodei G. Taguchi și la sisteme care au astfel de cerințe și pentru care se poate calcula un raport Semnal/Zgomot extins conform relației (2.180).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) = -10 \log \left\{ \max_{\bar{n}|\bar{x}} \left\{ \int_{Pr(\bar{p}|\bar{x}, \bar{n})} [PP(\bar{x}, \bar{p}, \bar{n}) - \tau]^2 d Pr(\bar{p}|\bar{x}, \bar{n}) \right\} \right\} \quad (2.120)$$

unde: \bar{n} - vectorul factorilor cu interval de necesitate ca aranjament al acestora, aleși din spațiul traversat de intervalele de necesitate (posibil co-dependente) ale fiecărui factor, intervale ce pot varia cu \bar{x} .

Setul factorilor de control (parametrii de proiectare) vor fi aleși maximizând raportul Semnal/Zgomot extins conform relației (2.121).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}^*) = \max_{\bar{x} \in (DP)_s} \left\{ -10 \log \left\{ \max_{\bar{n}|\bar{x}} \left\{ \int_{Pr(\bar{p}|\bar{x}, \bar{n})} [PP(\bar{x}, \bar{p}, \bar{n}) - \tau]^2 d Pr(\bar{p}|\bar{x}, \bar{n}) \right\} \right\} \right\} \quad (2.121)$$

Pentru a incorpora acest tip de factori, similar metodei G. Taguchi, ei pot fi aproximați prin proiectare experimentală și calculând raportul Semnal/Zgomot extins aproximat dat de relația (2.122).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) \cong -10 \log \left\{ \max_{k=1..l} \left\{ \sum_{i=1}^m [PP_{ik}(\bar{x}) - \tau]^2 \cdot Pr_i \right\} \right\} \quad (2.122)$$

unde: k – indicele aranjamentelor experimentale corespunzătoare factorilor cu interval de necesitate.

i – indicele aranjamentelor experimentale corespunzătoare factorilor de zgomot probabilistic.

Setul factorilor de control (parametrii de proiectare) vor fi aleși maximizând raportul Semnal/Zgomot extins de aproximare conform relației (2.123).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) \cong \max_{\bar{x} \in (DP)_s} \left\{ -10 \log \left\{ \max_{k=1..l} \left\{ \sum_{i=1}^m [PP_{ik}(\bar{x}) - \tau]^2 \cdot Pr_i \right\} \right\} \right\} \quad (2.123)$$

Observații:

- Diferența între probabilitate și necesitate este ușor de observat în aproximarea experimentală a raportului Semnal/Zgomot. Experimentele cu incertitudine probabilistică sunt ponderate chiar de probabilitățile lor de apariție, pe când la experimentele cu incertitudine de necesitate acestea sunt ignorate cu excepția cazului experimentului cel mai defavorabil (care este de altfel necunoscut și trebuie aflat prin experimentare).
- Acesta este și mecanismul care trebuie aplicat atunci când se modelează variabilele probabilistice ce trebuie satisfăcute pe o anumită zonă a distribuției lor (de exemplu un factor de control cu interval de necesitate care trebuie satisfăcut pe domeniul probabilistic $\pm 3\sigma$).

2.6.2.1.3 Extinderea raportului Semnal/Zgomot bazată pe intervalele de variație liberă (intervale de posibilitate)

În cazul în care la un sistem există factori de control (parametrii de proiectare) care au posibilitatea să varieze liber într-un anumit interval, diferența între aceștia și factorii de control aleși de proiectant este una foarte subtilă. Incertitudinea datorată factorilor cu variație liberă nu este fixată ea putând să evolueze oportunistic pe domeniul de variație. Acest fenomen are implicații importante atunci când există (sau este nevoie) de o ierarhizare a variabilelor sistemului (vezi 2.6.2.1.2).

Metoda G. Taguchi nu are posibilitatea să distingă între o incertitudine ce apare datorită variației libere și un factor de control, ambele sunt reprezentate prin intervale, se folosește valoarea ce maximizează raportul Semnal/Zgomot și care nu este variabilă cu \bar{p} . Pe de altă parte dacă incertitudinea datorată variației libere apare după apariția incertitudinii probabilistice, metoda G. Taguchi poate fi extinsă pentru a decela între incertitudinea datorată variației libere și un factor de control. În acest caz se vorbește despre *parametrii de reglaj* (cu incertitudine ce poate varia liber). Atunci când incertitudinea liberă reprezintă un parametru (factor) de reglaj, incertitudinea probabilistică apare prima și în consecință parametrul de reglaj poate ajusta pentru a compensa influența de suprapunere a efectului parametrului probabilistic.

Dacă un parametru probabilistic \bar{p} variază, atunci un parametru de reglaj \bar{t} poate varia de asemenea pentru a compensa influența lui \bar{p} . Această observație permite extinderea metodei lui G. Taguchi și la parametrii de reglaj (în sensul definiției anterioare a acestora), calculând raportul Semnal/Zgomot extins conform relației (2.124).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) = -10 \log \left\{ \int_{\Pr(\bar{p}|\bar{x})} \min_{\bar{t}|\bar{x},\bar{p}} \left\{ [PP(\bar{x}, \bar{p}, \bar{t}) - \tau]^2 \right\} d \Pr(\bar{p}|\bar{x}) \right\} \quad (2.124)$$

unde: \bar{t} - parametrul de reglaj care nu are o valoare fixată (și atunci \bar{p} se suprapune efectului factorilor de control), variază mai degrabă pentru eliminarea efectului de confundare creat de factorii de zgomot și a aduce rezultatul la țintă.

Setul de parametri de control este ales conform maximizării raportului Semnal/Zgomot extins dat de relația (2.125).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}^*) = \max_{\bar{x} \in (PD)_s} \left\{ -10 \log \left\{ \int_{Pr(\bar{p}|\bar{x})} \min_{\bar{t}, \bar{p}} \left\{ [PP(\bar{x}, \bar{p}, \bar{t}) - \tau]^2 \right\} d Pr(\bar{p}|\bar{x}) \right\} \right\} \quad (2.125)$$

Deoarece metoda G. Taguchi nu conține o modalitate de incorporare a incertitudinii parametrilor de reglaj, totuși aceștia pot fi determinați prin aproximare experimentală calculând raportul Semnal/Zgomot extins aproximativ cu relația (2.126).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) \cong -10 \log \left\{ \sum_{i=1}^m \min_{k=1, l} \left\{ [PP_{ik}(\bar{x}) - \tau]^2 \cdot Pr_i \right\} \right\} \quad (2.126)$$

unde: k – indicele aranjamentelor experimentale corespunzătoare factorilor de reglaj.

i – indicele aranjamentelor experimentale corespunzătoare factorilor de zgomot probabilistic.

Setul de parametri de proiectare se aleg maximizând raportul Semnal/Zgomot extins de aproximare conform relației (2.127).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) \cong \max_{\bar{x} \in (DP)_s} \left\{ -10 \log \left\{ \sum_{i=1}^m \min_{k=1, l} \left\{ [PP_{ik}(\bar{x}) - \tau]^2 \cdot Pr_i \right\} \right\} \right\} \quad (2.127)$$

Modelul matematic al conceptului referitor la parametri de reglaj sunt într-un fel contrar filozofiei lui Taguchi, care susține că aceștia (în mod ideal) ar trebui eliminați (prin alegerea adecvată a valorilor nominale ale parametrilor de proiectare) întrucât adaugă costuri suplimentare de fabricație.

Totuși, când parametri de proiectare “scumpi” pot fi evitați prin reglare ulterioară fabricării, atunci poate fi avută în vedere și alegerea unui set de factori de reglaj care împreună cu ceilalți factori de proiectare să asigure costuri rezonabile.

2.6.2.1.4 Extinderea raportului Semnal/Zgomot la variabile ce necesită ierarhizare

În cazul în care problema supusă experimentării conține variabile de mai multe tipuri (probabilistice, cu intervale de necesitate sau cu intervale posibile) care trebuie ierarhizate, atunci relațiile ce descriu rapoartele Semnal/Zgomot extinse pot fi combinate. Dacă de exemplu, ordinea de ierarhizare este $\bar{x}, \bar{n}, \bar{p}, \bar{t}$ atunci setul optim de parametrii de proiectare \bar{x}^* se alege pe baza maximizării raportului Semnal/Zgomot extins conform relației (2.128).

$$\frac{S}{N}(\bar{x}^*) = \max_{\bar{x}} \left\{ -10 \log \left\{ \max_{\bar{n}, \bar{x}} \left\{ \int_{\Pr(\bar{p}|\bar{n}, \bar{x})} \min_{\bar{t}} [f(\bar{t}, \bar{p}, \bar{n}, \bar{x})] d \Pr(\bar{p}|\bar{n}, \bar{x}) \right\} \right\} \right\} \quad (2.128)$$

2.6.2.1.5 Extinderea raportului Semnal/Zgomot la problemele cu restricții

Metoda Taguchi consideră că determinarea punctelor experimentale se poate face fără restricții prin declararea ortogonalității. Totuși există foarte multe cazuri în care există variabile ce restricționează alegerea parametrilor de proiectare.

De fapt chiar metoda G. Taguchi conține restricții chiar dacă nu sub o formă explicită, acestea fiind de obicei restricții de inegalitate directă de tipul $x_i \leq 0$, dar nu conține restricții de tipul $g(\bar{x}) \leq 0$, care ar necesita un experiment suplimentar pentru evaluarea lui g dacă nu se cunoaște expresia sa analitică. Dacă în plus în expresia relației restricționale apare și o incertitudine de tipul $g_1(\bar{x}, \bar{p}) \leq 0$ atunci problema se complică și nici măcar o evaluare a lui g_1 în jurul fiecărui punct experimental nu mai este suficientă.

Similar celor prezentate anterior, pentru definirea problemei de optimizare cu restricții se poate defini un raport Semnal/Zgomot extins care trebuie maximizat conform relației (2.129). Evaluarea lui $g_1(\bar{x}, \bar{p})$ se poate face prin metodele cunoscute de cercetare a restricțiilor.

$$\frac{S}{N}(\bar{x}) = -10 \log \left\{ \int_{\Pr(\bar{p}|\bar{x})} [f(\bar{x}, \bar{p}) - \tau]^2 d \Pr(\bar{p}|\bar{x}) \right\} \quad (2.129)$$

cu restricțiile : $\min_j \left\{ \Pr[\bar{g}_j(\bar{x}, \bar{p}) \leq 0] \right\} \geq D$

unde: $f(\bar{x}, \bar{p})$ - parametrul de performanță (funcția de merit)

D - specificația unei probabilități acceptabile pentru realizarea restricțiilor \bar{g} .

j – indicele ecuațiilor restricțiilor.

2.7 Proiectarea Calității “off-line” Taguchi. Proiectarea parametrilor

Planurile de experiențe au fost dezvoltate de Jacques Hadamard și Ronald A. Fisher și constau în efectuarea unor experimente stabilite aprioric cu scopul de a determina cu minimum de încercări și maximum de precizie influențele posibile ale diferiților parametri astfel încât să se optimizeze performanțele unui sistem.

Se utilizează trei metode (planuri) de experimentare:

a) Plan de experiențe în care se variază un singur factor o dată

Este o metodă la care experimentarea se face prin tatonări succesive. Datorită influențelor parazite și întrucât efectele nu sunt întotdeauna independente unele de altele, această metodă se aplică numai cu mare precauție.

b) Plan de experiențe factorial complet

Acest plan studiază toate combinațiile posibile ale nivelurilor factorilor încercați. Din punct de vedere teoretic ele sunt complete, însă timpul necesar efectuării experimentelor și costurile sunt foarte mari (de exemplu pentru a experimenta 15 factori la 2 niveluri sunt necesare $2^{15}=32768$ de experimente).

c) Plan de experiențe factorial fracționat

Realizarea acestor planuri se bazează pe ideea că unele combinații posibile ale factorilor încercați aduc mai multe informații eficiente, reușindu-se astfel și reducerea considerabilă a numărului de experimente efectuate. În figura 2.18 se prezintă varianta unui plan de experiențe factorial complet clasic pentru 3 factori pe 2 niveluri, în figura 2.19 se prezintă un plan factorial complet Taguchi, iar în figura 2.20 se prezintă două variante de plan factorial fracționat Taguchi.

| | | | |
|----|----|----|----|
| | | C1 | C2 |
| A1 | B1 | R1 | R2 |
| | B2 | R3 | R4 |
| B1 | B1 | R5 | R6 |
| | B2 | R7 | R8 |

Fig. 2.18 Plan factorial complet clasic pentru 3 factori pe 2 niveluri

| Nr. încercare | Factori încercați | | | Rezultatul încercării |
|---------------|-------------------|---|---|-----------------------|
| | A | B | C | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | R1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | R2 |
| 3 | 1 | 2 | 1 | R3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | R4 |
| 5 | 2 | 1 | 1 | R5 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | R6 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | R7 |
| 8 | 2 | 2 | 2 | R8 |

Fig 2.19 Plan factorial complet Taguchi pentru 3 factori la 2 niveluri

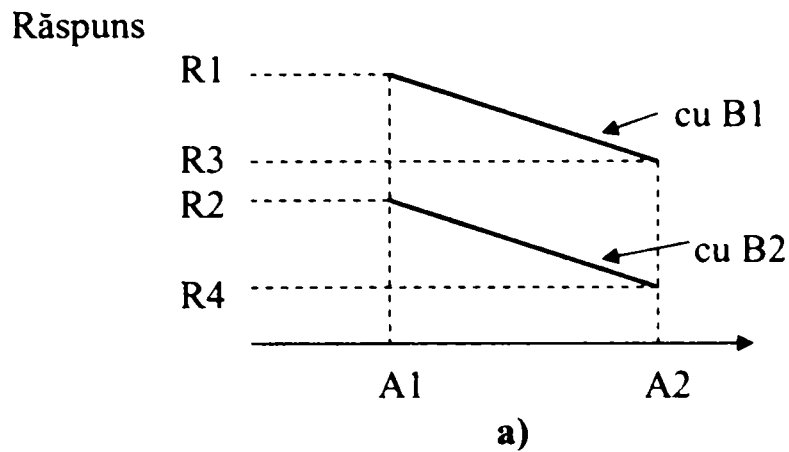
| Nr. încercare | Factori încercați | | | Rezultatul încercării |
|---------------|-------------------|---|---|-----------------------|
| | A | B | C | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | R1 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | R4 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | R6 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | R7 |

| Nr. încercare | Factori încercați | | | Rezultatul încercării |
|---------------|-------------------|---|---|-----------------------|
| | A | B | C | |
| 2 | 1 | 1 | 2 | R2 |
| 3 | 1 | 2 | 1 | R3 |
| 5 | 2 | 1 | 1 | R5 |
| 8 | 2 | 2 | 2 | R8 |

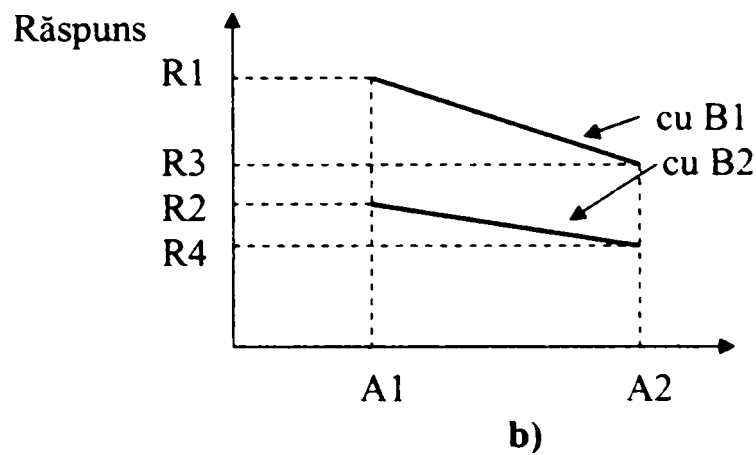
Fig 2.20 Planuri factoriale fracționate echivalente pentru 3 factori la 2 niveluri

Observații:

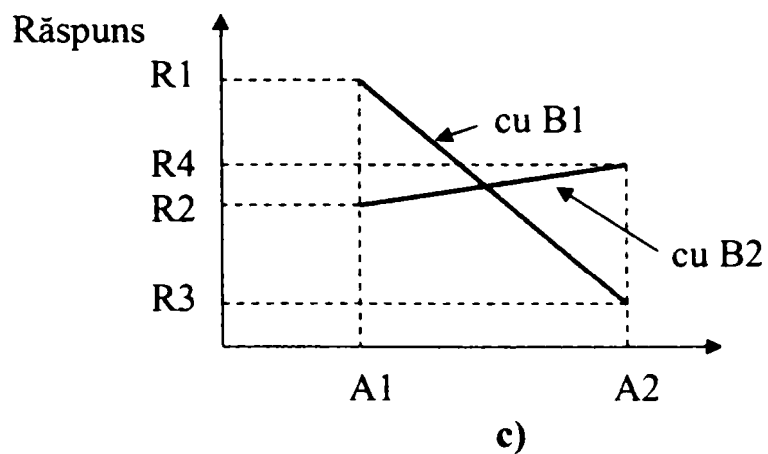
- Pentru a putea calcula efectele unui factor independent de alți factori, planul de experiențe trebuie să fie *ortogonal*.
- Într-o *matrice ortogonală* fiecare nivel al fiecărui factor este combinat cu fiecare nivel al celorlalți factori într-un număr egal de ori. În cazurile reale efectele unui factor pot depinde de nivelul altui factor. Se spune că între factori există o *interacțiune*.
- În figura 2.21 se prezintă cazurile posibile ale interacțiunii a doi factori.



Dreptele sunt paralele, efectul lui A este independent de nivelurile B, nu există interacțiune.



Dreptele nu sunt paralele, efectul lui A nu este independent de nivelurile lui B, există interacțiune.



Dreptele se intersectează, efectul lui A se inversează funcție de nivelurile lui B, există interacțiune foarte puternică.

Fig. 2.21 a),b),c) Cazuri posibile de interacțiune a doi factori

Pentru a măsura interacțiunea dintre doi sau mai mulți factori, trebuie rezervată o coloană în matricea de experiențe. De exemplu, se consideră un plan factorial complet care conține doi factori A și B fiecare testat la două niveluri (sunt necesare $2^2=4$ încercări). Se introduce o nouă coloană pentru a studia interacțiunea dintre cei doi factori, I_{AB} . Se constată că nivelurile corespund ca și cum această coloană ar fi alocată unui al treilea factor C. Calculându-se efectul mediu al lui C se constată că este egal cu efectul interacțiunii I_{AB} . Acest rezultat indică faptul că în realitate cele două efecte se confundă (sunt congruente). Dacă am aloca de la început colona a 3-a pentru factorul C s-ar obține un *plan factorial fracționat saturat* (conține coloane rezervate numai pentru factori independenți), un *plan factorial complet* pentru 3 factori având nevoie de $2^3=8$ încercări (experimente).

d) Grade de libertate (gdl)

Se definește numărul de grade de libertate (gdl) ale unui sistem, numărul minim de comparații care se efectuează. Gradul de libertate al unui factor este egal cu numărul de comparații necesare pentru a studia efectul său (de exemplu un factor cu 3 niveluri va avea două gdl). În cazul interacțiunilor, numărul gradelor de libertate este egal cu produsul gradelor de libertate ale factorilor individuali. Numărul de grade de libertate al unei matrici de experiențe este egal cu numărul de încercări (experimente) minus 1. Determinarea numărului de grade de libertate este importantă în vederea alegerii matricii de experiențe potrivite fiecărei aplicații în parte.

2.7.1 Matrici de experiențe fracționate ortogonale Taguchi standard

Matricile Taguchi standard se dovedesc suficient de largi pentru a satisface marea majoritate a situațiilor ce intervin în practica industrială. Simbolizarea matricilor Taguchi standard se face funcție de numărul de experimente (numărul de linii ale matricii), numărul de factori și interacțiuni (numărul de coloane ale matricii) respectiv numărul de niveluri. De exemplu $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ este o matrice care are 18 încercări, $2^1=1$ factor la 2 niveluri, $3^7=7$ factori la 3 niveluri.

a) Modul de alegere a unei matrici Taguchi standard

Așa cum s-a arătat anterior trebuie aleasă cea mai mică matrice care să furnizeze informațiile dorite în concordanță cu obiectivele experimentului. Se calculează numărul total al gradelor de libertate și se alege matricea Taguchi standard cea mai apropiată.

b) Tabele triunghiulare și grafuri liniare

Tabelele triunghiulare și grafurile liniare sunt asociate majorității matricilor Taguchi standard și se folosesc pentru a defini coloanele utilizate pentru studiul interacțiunilor și pentru adaptarea matricilor la nevoile specifice. Se consideră matricea standard L_8 din figura 2.22, Tabelul triunghiular corespunzător L_8 din figura 2.23, respectiv Grafurile liniare L_8 din figura 2.24.

| Nr. coloane | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
|---------------|-------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------|
| Nr. încercare | Factori încercați | | | | | | | Rezultatul încercării |
| | A | B | C | D | E | F | G | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | R1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | R2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | R3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | R4 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | R5 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | R6 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | R7 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | R8 |

Fig. 2.22 Matricea Taguchi standard L_8

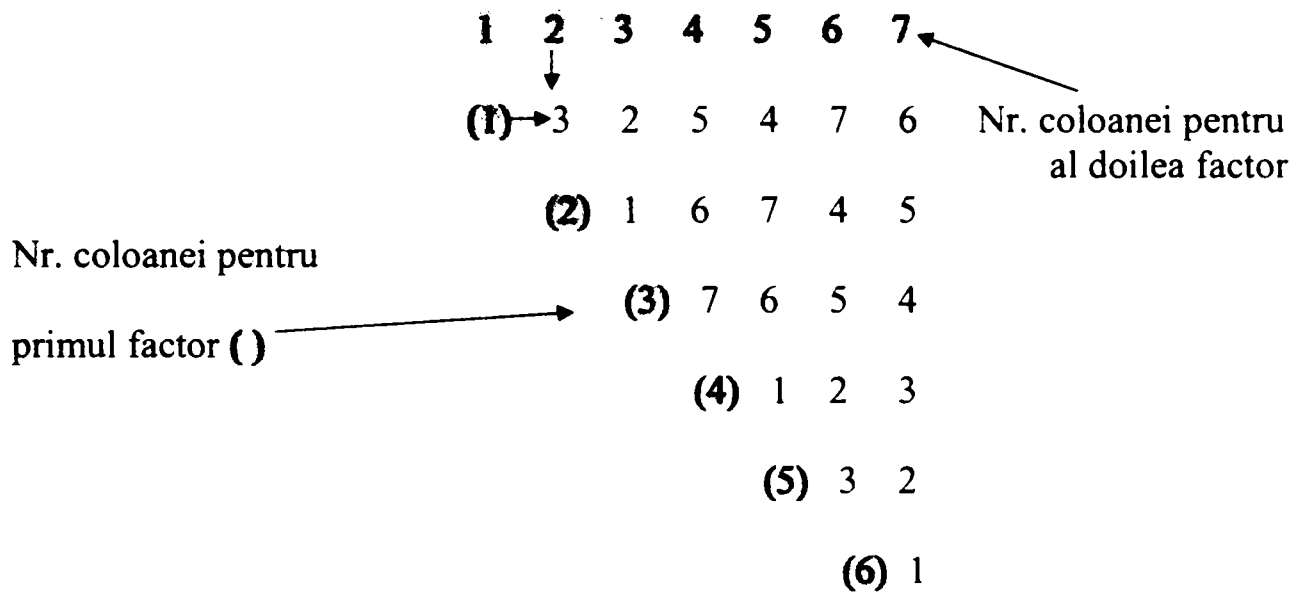


Fig. 2.23 Tabel triunghiular corespunzător matricii L_8

Dacă factorii A și B sunt repartizați în coloanele 1 respectiv 2 din matricea L_8 atunci coloana rezervată interacțiunii I_{AB} se obține la intersecția liniilor corespunzătoare coloanei factorului A respectiv B, adică în coloana 3.

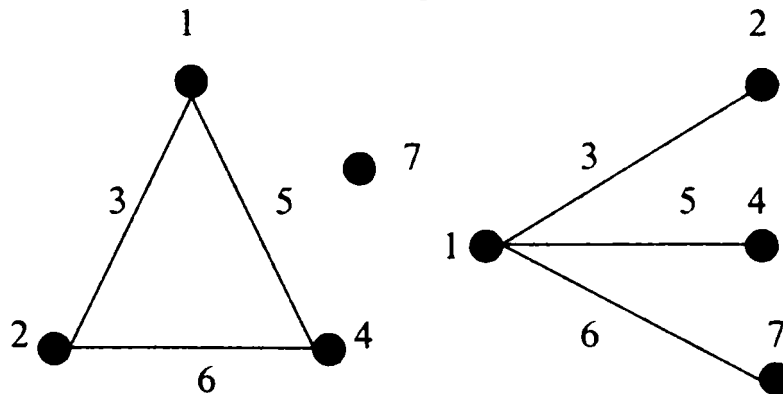


Fig. 2.24 Grafuri liniare asociate matricii L_8

Factorii sunt reprezentați prin cercuri, numărul corespunzător fiecăruia fiind cel al coloanei matricii. Numărul coloanei pentru interacțiuni este corespunzător segmentelor de legătură dintre cercuri. De exemplu, dacă factorul A este pe coloana 2 a matricii L_8 și factorul B este pe coloana 4 a matricii L_8 , atunci interacțiunea I_{AB} va fi repartizată pe coloana 6.

Observații:

- dacă se dorește neglijarea interacțiunii dintre doi factori, numărul segmentului care îi unește poate fi repartizat unui alt factor
- un graf liniar este reprezentarea grafică a unui tabel triunghiular
- pentru fiecare matrice Taguchi standard există atâtea grafuri liniare câte combinații posibile ale repartizărilor pot exista

c) Adaptarea matricilor Taguchi standard

Există cazuri când utilizarea matricilor Taguchi standard nu se poate face direct fiind necesare modificări ale acestora. În primul rând trebuie determinat numărul gradelor de libertate pe care matricea modificată ar trebui să le conțină. Se caută apoi printre matricile Taguchi standard matricea minimă care după modificare răspunde cerințelor impuse. Se pot în acest mod introduce factori cu 4 niveluri în matricile cu 2 niveluri etc.

2.7.2 Planuri de experiențe Taguchi

Metoda planurilor de experiențe Taguchi este o aplicație particulară a planurilor de experiențe clasice. Planurile de experiențe Taguchi tratează în mod unitar *media* și *variabilitatea* caracteristicilor măsurate.

Prin utilizarea raportului S/N se poate găsi în primă instanță o combinație a nivelurilor semnalelor de intrare (factori controlabili) care se dovedesc cei mai insensibili la factorii zgomot.

Exprimarea raportului S/N în dB independent de natura caracteristicilor măsurate permite compararea performanțelor mai multor caracteristici care se optimizează simultan. În figura 2.25 sunt redate etapele succesive ale metodei planurilor de experiențe Taguchi.

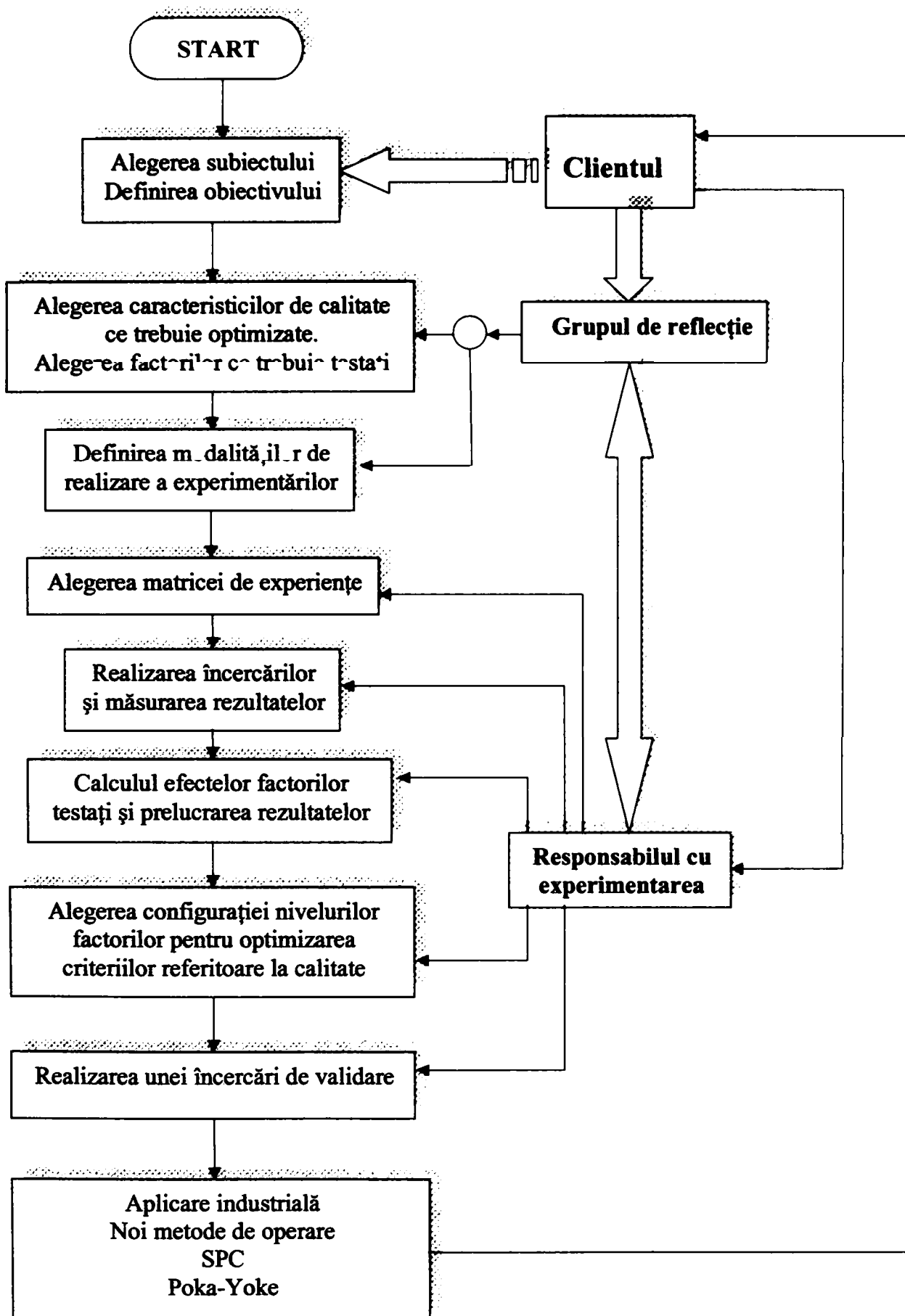


Fig. 2.25 Etapele de realizare a unui plan de experiențe Taguchi

Pentru realizarea și aplicarea corectă și completă a unui plan de experiențe Taguchi trebuie respectate în principiu următoarele 7 puncte cheie [A1]:

- 1) *Trebuie efectuate investigații prealabile asupra problemei puse de client pentru a se justifica necesitatea utilizării planurilor de experiențe Taguchi.*
- 2) *Grupul de reflecție trebuie astfel constituit încât să cuprindă toate persoanele calificate care cunosc problema de investigat.*
- 3) *Caracteristicile ce trebuie optimizate trebuie să fie în strânsă legătură cu energia în sistemul studiat.*
- 4) *Factorii studiați să fie selecționați funcție de impactul lor asupra energiei utilizate în sistemul studiat. Nivelurile factorilor trebuie alese cât mai depărtate în vederea obținerii de efecte cât mai bine diferențiate.*
- 5) *Studierea factorilor aduce mai multă informație decât studierea interacțiunilor. Se studiază în primă fază 2 până la 4 factori considerați mai influenți, și dacă este cazul, și interacțiunile dintre ei. Dacă este necesar se studiază aceste interacțiuni cu un experiment suplimentar de afinare a rezultatelor.*
- 6) *Toate modalitățile de realizare a încercărilor și măsurarea rezultatelor trebuie înregistrate în documente oficiale.*
- 7) *Încercarea de validare este obligatorie pentru confirmarea experimentelor.*

2.7.2.1 Procedura practică de realizare a unui plan de experiențe clasic

- a) se consideră un criteriu de calitate de optimizat de tip țintă "g". S-a determinat că sunt necesari 6 factori la 2 niveluri A, B, C, D, E, F, și o interacțiune AD.
- b) se caută cea mai mică matrice compatibilă cu scopurile experimentului. Se alege o matrice L_8 în care coloana 5 a fost rezervată pentru studiul interacțiunii AD.

| Nr. coloane | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 5 |
|---------------|--------------------|---|---|---|---|---|--------------|
| Nr. încercare | Factori controlați | | | | | | Interacțiune |
| | A | B | C | D | E | F | AD |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |

Fig. 2.26 Matrice L_8 (6 factori la 2 niveluri și o interacțiune)

- c) se prelevează 5 eșantioane numerotate de la 1 la 5 la intervale egale de timp
d) pentru fiecare încercare se calculează media celor 5 măsurători și se calculează media generală \bar{T} a tuturor răspunsurilor, întocmindu-se un tabel al rezultatelor încercărilor.

| Nr. înc. | Factori controlați | | | | | | Int. | Valori măsurate | | | | | Media |
|----------|--------------------|---|---|---|---|---|------|-----------------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| | A | B | C | D | E | F | AD | nr. 1 | nr. 2 | nr. 3 | nr. 4 | nr. 5 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | x_{11} | x_{12} | x_{13} | x_{14} | x_{15} | \bar{x}_1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | x_{21} | x_{22} | x_{23} | x_{24} | x_{25} | \bar{x}_2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | x_{31} | x_{32} | x_{33} | x_{34} | x_{35} | \bar{x}_3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | x_{41} | x_{42} | x_{43} | x_{44} | x_{45} | \bar{x}_4 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | x_{51} | x_{52} | x_{53} | x_{54} | x_{55} | \bar{x}_5 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | x_{61} | x_{62} | x_{63} | x_{64} | x_{65} | \bar{x}_6 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | x_{71} | x_{72} | x_{73} | x_{74} | x_{75} | \bar{x}_7 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | x_{81} | x_{82} | x_{83} | x_{84} | x_{85} | \bar{x}_8 |

Fig. 2.27 Tabel cu rezultatele încercărilor

- e) se calculează *răspunsul mediu* pentru fiecare nivel al fiecărui factor, corespunzător mediei rezultatelor tuturor încercărilor în care factorul se găsește la acel nivel. De exemplu:

$$\bar{A}_1 = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \bar{x}_4}{4} \quad (2.130)$$

$$\bar{B}_1 = \frac{\bar{x}_3 + \bar{x}_4 + \bar{x}_7 + \bar{x}_8}{4} \quad (2.131)$$

Observație:

Media generală \bar{T} corespunde valorii centrale a răspunsurilor medii pentru nivelurile fiecărui factor:

$$\frac{\bar{A}_1 + \bar{A}_2}{2} = \bar{T} \quad (2.132)$$

f) se calculează *efectul mediu* al fiecărui nivel al factorilor. De exemplu, efectul mediu al factorului A la nivelul 1 respectiv efectul mediu al factorului A la nivelul 2 și legătura dintre efectele medii sunt date de relațiile:

g) similar se calculează *efectul mediu al interacțiunii AD* și se întocmește un tabel cu răspunsuri:

$$E_{A1} = \bar{A}_1 - \bar{T} ; E_{A2} = \bar{A}_2 - \bar{T} ; E_{A1} = -E_{A2} \quad (2.133)$$

| Nr. factor | Efect asupra valorii măsurate | |
|------------|-------------------------------|-------------|
| | Nivel 1 | Nivel 2 |
| A | E_{A1} | E_{A2} |
| B | E_{B1} | E_{B2} |
| C | E_{C1} | E_{C2} |
| D | E_{D1} | E_{D2} |
| E | E_{E1} | E_{E2} |
| F | E_{F1} | E_{F2} |
| AD | $E_{(AD)1}$ | $E_{(AD)2}$ |

Tab. 2.3 Tabel cu răspunsuri

h) se reprezintă grafic valorile din tabelul cu răspunsuri

Efect asupra
valorii măsurate

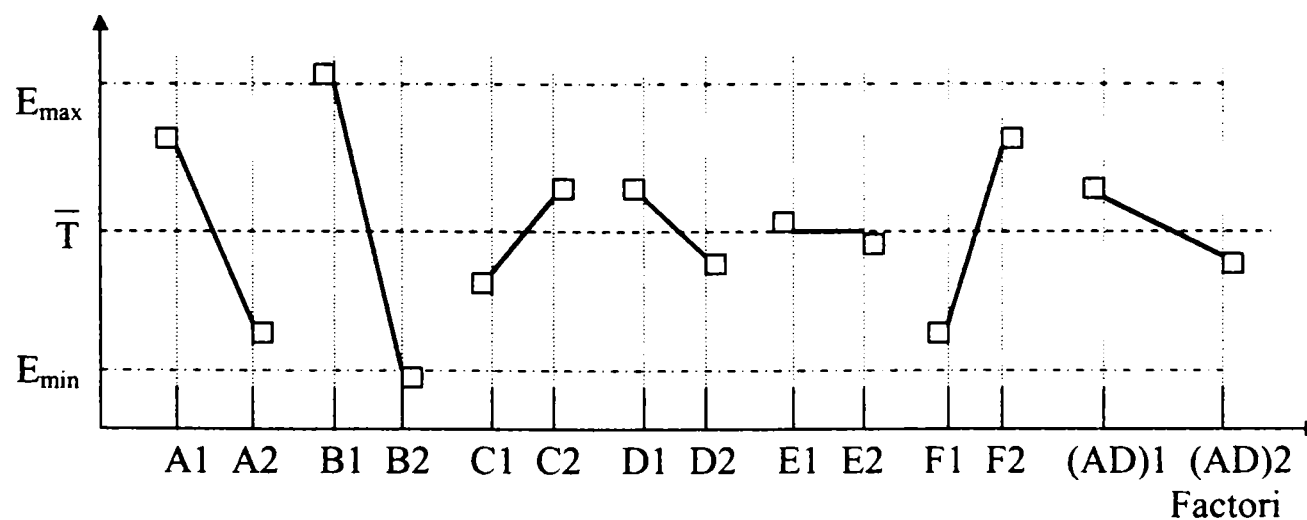


Fig. 2.28 Grafic cu răspunsuri

Observație:

Pentru detalierea efectului interacțiunii AD asupra valorii măsurate se analizează valorile relative ale diferitelor combinații posibile și anume A1D1, A1D2, A2D1, A2D2.

- ◆ se calculează răspunsul mediu pentru fiecare combinație posibilă:

$$\bar{A}_1\bar{D}_1 = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_3}{2}; \bar{A}_1\bar{D}_2 = \frac{\bar{x}_2 + \bar{x}_4}{2}; \bar{A}_2\bar{D}_1 = \frac{\bar{x}_5 + \bar{x}_7}{2}; \bar{A}_2\bar{D}_2 = \frac{\bar{x}_6 + \bar{x}_8}{2} \quad (2.134)$$

- ◆ efectul mediu al interacțiunii $E_{A_1D_1}$ cuprinde efectele proprii nivelurilor A1 și D1 precum și valoarea interacțiunii $I_{A_1D_1}$ dacă aceasta există.

$$E_{A_1D_1} = E_{A_1} + E_{D_1} + I_{A_1D_1} \quad (2.135)$$

dar conform relației (2.193) rezultă:

$$E_{A_1D_1} = \bar{A}_1\bar{D}_1 - \bar{T} \quad (2.136)$$

de unde rezultă valoarea interacțiunii $I_{A_1D_1}$:

$$I_{A_1D_1} = \bar{A}_1\bar{D}_1 - \bar{T} - (E_{A_1} + E_{D_1}) \quad (2.137)$$

- i) se modifică modul de prezentare a matricii de experiențe pentru a calcula direct cele 4 valori posibile ale interacțiunii AD, înlocuind cifrele din coloana 5 rezervată interacțiunii cu valorile 1, 2, 3, 4 corespunzătoare celor 4 combinații posibile prezentate anterior.

| Nr. coloane | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 5 |
|---------------|--------------------|---|---|---|---|---|---------------|
| Nr. încercare | Factori controlați | | | | | | Interacțiuni |
| | A | B | C | D | E | F | AD |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1=A1D1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2=A1D2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1=A1D1 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2=A1D2 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3=A2D1 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4=A2D2 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3=A2D1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4=A2D2 |

Fig. 2.29 Matricea L_8 cu explicitarea interacțiunii AD

- j) se determină nivelurile factorilor astfel încât să se optimizeze criteriul țintă ținând cont de următoarele aspecte:
- ◆ se determină *factorii care au cea mai mare influență* asupra criteriului țintă “g” și se aleg nivelurile corespunzătoare ale acestora.
 - ◆ se aleg *factorii neinfluenți* după criterii economice.
 - ◆ în ipoteza că toți factorii sunt reglați la nivelurile optime efectele lor medii individuale se adună.
 - ◆ se estimează valoarea “ g_{teoretic} ” utilizând numai efectele majore ale factorilor și interacțiunilor (se procedează astfel întrucât eroarea experimentală fiind repartizată în cadrul fiecărei medii calculate ar exista posibilitatea unei supraestimări).

$$g_{\text{teoretic}} = \bar{T} + \sum (E)_{\text{major}} + \sum (I)_{\text{major}} \quad (2.138)$$

- k) se realizează o încercare de validare prin verificarea fizică a ipotezei de aditivitate a efectelor tuturor factorilor și interacțiunilor.

2.7.2.2 Procedura practică de realizare a unui plan de experiențe Taguchi

- a) se consideră același criteriu de calitate de optimizat de tip țintă “g” prezentat în § 2.7.2.1, și se aplică etapele a)...i) de la analiza clasică.
- b) se calculează abaterea standard a fiecărei serii de măsurări s_1, s_2, \dots, s_8 .
- c) se calculează raportul S/N pentru fiecare serie de măsurări și se calculează media răspunsurilor S/N, $\bar{T}_{S/N}$
- d) se întocmește un tabel cu răspunsuri și parametri calculați anterior.

| Nr Înc | Factori controlați | | | | | | Int AD | Valori măsurate | | | | | | | |
|-----------|--------------------|---|---|---|---|---|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|----------------|--------------------|
| | A | B | C | D | E | F | | nr. 1 | nr. 2 | nr. 3 | nr. 4 | nr.5 | Media | Ab. Std | S/N [dB] |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | x ₁₁ | x ₁₂ | x ₁₃ | x ₁₄ | x ₁₅ | \bar{x}_1 | s ₁ | (S/N) ₁ |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | x ₂₁ | x ₂₂ | x ₂₃ | x ₂₄ | x ₂₅ | \bar{x}_2 | s ₂ | (S/N) ₂ |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | x ₃₁ | x ₃₂ | x ₃₃ | x ₃₄ | x ₃₅ | \bar{x}_3 | s ₃ | (S/N) ₃ |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | x ₄₁ | x ₄₂ | x ₄₃ | x ₄₄ | x ₄₅ | \bar{x}_4 | s ₄ | (S/N) ₄ |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | x ₅₁ | x ₅₂ | x ₅₃ | x ₅₄ | x ₅₅ | \bar{x}_5 | s ₅ | (S/N) ₅ |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | x ₆₁ | x ₆₂ | x ₆₃ | x ₆₄ | x ₆₅ | \bar{x}_6 | s ₆ | (S/N) ₆ |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | x ₇₁ | x ₇₂ | x ₇₃ | x ₇₄ | x ₇₅ | \bar{x}_7 | s ₇ | (S/N) ₇ |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | x ₈₁ | x ₈₂ | x ₈₃ | x ₈₄ | x ₈₅ | \bar{x}_8 | s ₈ | (S/N) ₈ |

Fig. 2.30 Rezultatele încercărilor, mediile, abaterile standard, rapoartele S/N

- e) se calculează *răspunsul S/N mediu* pentru fiecare nivel al fiecărui factor, corespunzător mediei raporturilor S/N ale tuturor încercărilor în care factorul se

găsește la acel nivel. Similar, se calculează răspunsul S/N mediu relativ la interacțiuni, de exemplu:

$$\bar{A}_{1,S/N} = \frac{(S/N)_1 + (S/N)_2 + (S/N)_3 + (S/N)_4}{4} \quad (2.139)$$

$$\bar{A}_{1,S/N} \bar{D}_{1,S/N} = \frac{(S/N)_1 + (S/N)_3}{2} \quad (2.140)$$

f) se calculează *efectul mediu S/N* al fiecărui nivel al factorilor în raport cu media răspunsurilor S/N ; se calculează valoarea interacțiunilor. De exemplu:

$$E_{A1,S/N} = \bar{A}_{1,S/N} - \bar{T}_{S/N} \quad (2.141)$$

$$I_{A1D1,S/N} = \bar{A}_{1,S/N} \bar{D}_{1,S/N} - \bar{T}_{S/N} - (E_{A1,S/N} + E_{D1,S/N}) \quad (2.142)$$

g) se întocmește un tabel cu răspunsuri pentru factori și interacțiuni:

| Nr. factor | Efect asupra raportului S/N | |
|------------|-----------------------------|--------------|
| | Nivel 1 | Nivel 2 |
| A | $E_{A1,S/N}$ | $E_{A2,S/N}$ |
| B | $E_{B1,S/N}$ | $E_{B2,S/N}$ |
| C | $E_{C1,S/N}$ | $E_{C2,S/N}$ |
| D | $E_{D1,S/N}$ | $E_{D2,S/N}$ |
| E | $E_{E1,S/N}$ | $E_{E2,S/N}$ |
| F | $E_{F1,S/N}$ | $E_{F2,S/N}$ |

| Interacțiune | A1D1 | A1D2 | A2D1 | A2D2 |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Efect asupra raportului S/N | $I_{A1D1,S/N}$ | $I_{A1D2,S/N}$ | $I_{A2D1,S/N}$ | $I_{A2D2,S/N}$ |

Tab.2.4 Tabel cu răspunsuri pentru raportul S/N

h) se reprezintă grafic valorile din tabelul cu răspunsuri S/N.

Efect asupra raportului S/N

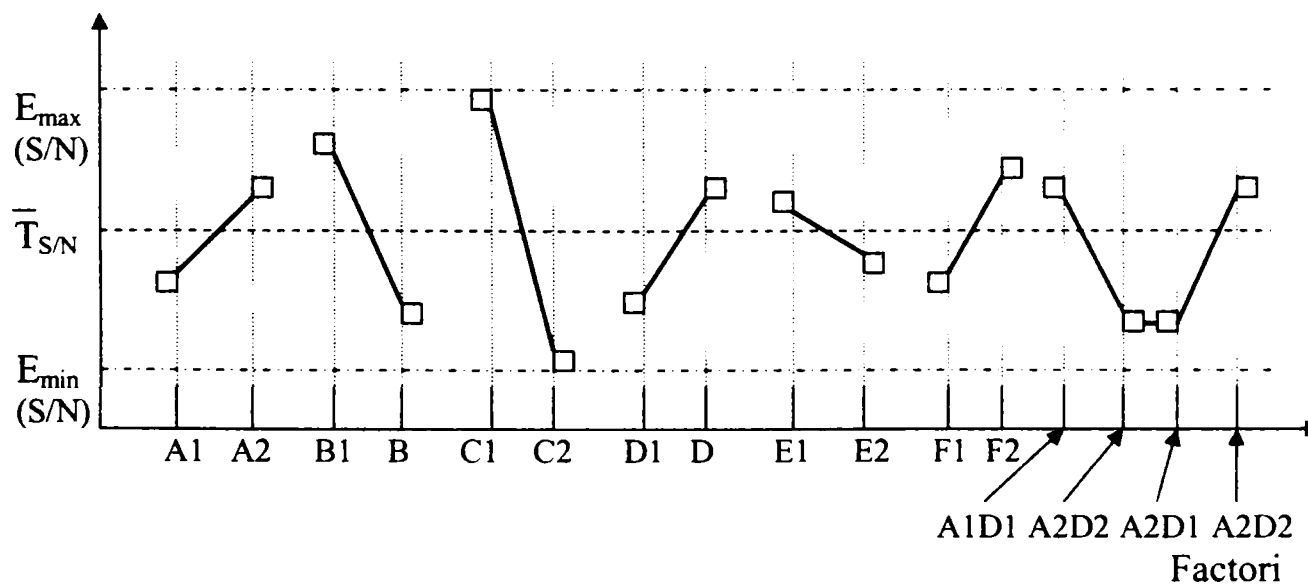


Fig. 2.31 Graficul cu răspunsuri pentru raportul S/N

i) se determină nivelurile factorilor ținând cont de următoarele aspecte:

- ◆ se determină *factorii care au cea mai mare influență* asupra raportului S/N și se aleg nivelurile corespunzătoare astfel încât valoarea algebrică a raportului S/N să fie cât mai mare.
- ◆ se aleg *factorii neinfluenți* după criterii economice.
- ◆ în ipoteza că toți factorii sunt reglați la nivelurile optime efectele lor medii S/N individuale se adună.
- ◆ se estimează valoarea “ \hat{u} ” a raportului S/N utilizând numai efectele majore ale factorilor și interacțiunilor (se procedează astfel întrucât eroarea experimentală fiind repartizată în cadrul fiecărei medii calculate ar exista posibilitatea unei supraestimări).

$$\hat{u} = \bar{T}_{S/N} + \sum (E_{S/N})_{\text{major}} + \sum (I_{S/N})_{\text{major}} \quad (2.143)$$

- ◆ se estimează valoarea criteriului țintă “ \hat{g} ” pe baza configurației factorilor determinați pe baza relației (2.143).

$$\hat{g} = \bar{T} + \sum (E)_{\text{major}} \langle \hat{u} \rangle + \sum (I)_{\text{major}} \langle \hat{u} \rangle \quad (2.144)$$

2.7.2.3 Optimizarea simultană a mai multor criterii referitoare la calitate

- a) se efectuează măsurările relative la diferitele caracteristici de calitate ce trebuie optimizate.
- b) se calculează media $\bar{T}_{S/N}$ pentru rapoartele S/N corespunzătoare.
- c) se stabilește pentru fiecare caracteristică tabelul cu răspunsuri și graficul corespunzător.
- d) se caută acele nivele ale factorilor care în mod global sunt cele mai eficiente.
- e) se calculează procentajul contribuției raportului S/N pentru factorii și interacțiunile considerate ca fiind majore. De exemplu:

$$\% \text{ contribuției S/N a lui } A_1 = \frac{E_{A_1}}{|\bar{T}_{S/N}|} \cdot 100 \quad (2.145)$$

$$\% \text{ contribuției S/N a lui } A_1 D_1 = \frac{I_{A_1 D_1}}{|\bar{T}_{S/N}|} \cdot 100 \quad (2.146)$$

- f) se înlocuiesc procentajele contribuțiilor factorilor și interacțiunilor în relația (2.143) obținându-se pentru raportul S/N expresia:

$$\hat{u} = \bar{T}_{S/N} + [\sum \% \text{ contribuției factorilor și interacțiunilor}] \cdot \frac{|\bar{T}_{S/N}|}{100} \quad (2.147)$$

- g) se amplasează într-un tabel rezultatele obținute anterior pentru ansamblul caracteristicilor ce trebuie optimizate.
- h) se determină nivelul fiecărui factor care dă $\sum \%$ contribuției S/N cea mai mare pentru ansamblul caracteristicilor.

- i) se realizează afinarea configurației nivelurilor factorilor ținând cont de următoarele aspecte:
- ◆ se pot favoriza unele caracteristici în detrimentul altora.
 - ◆ adunarea % contribuției S/N a factorilor relativi la caracteristici disparate trebuie efectuată cu precauție.
 - ◆ pentru ca îmbunătățirea unei caracteristici să fie relevantă raportul S/N teoretic rezultat trebuie să fie superior raportului S/N mediu al experimentării.

2.7.3 Planuri de experiențe Taguchi combinate

Planurile combinate reprezintă o configurație particulară a planurilor de experiențe și sunt folosite pentru studiul sensibilității unui sistem la factorii zgomot bine precizați. În planurile combinate se găsesc atât factorii ținuți sub control (*care pilotează sistemul*), cât și factorii zgomot (*pe care îi suportă sistemul*). Se folosesc două matrici de experiență astfel:

- ◆ o matrice internă ce conține factorii controlați.
- ◆ o matrice externă ce conține factorii zgomot.

Matricea externă are ca scop repetarea fiecărei încercări din matricea internă pentru fiecare configurație a factorilor zgomot. În figura 2.32 se prezintă un plan de experiență Taguchi combinat la care matricea internă este L_8 cu 7 factori la 2 niveluri, iar matricea externă este L_4 cu 3 factori zgomot cu două niveluri.

| Plan intern | | | | | | | | Plan extern | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---------------------------|---|---|---|----------------|
| | | | | | | | | Nr. de încercări repetate | | | | Factori zgomot |
| Factori ținuți sub control | | | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Nr.încercări | A | B | C | D | E | F | G | 1 | 2 | 2 | 1 | Q |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | R |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | | | |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | | | | | |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | | | | | |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | | | | | |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | | | | | |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | | | | | |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | | | | | |

Rezultatele repetărilor încercării nr. 5 din planul principal

Media valorilor măsurate pentru ansamblul rezultatelor încercării nr. 5

S/N pentru ansamblul rezultatelor de la încercarea nr. 5

Fig. 2.32 Plan de experiențe Taguchi pentru produse

2.8. Proiectarea parametrilor pe baza modelelor de programare neliniară

În cazul în care forma analitică a relației funcționale dintre parametrii de intrare și parametrii de ieșire (funcția de transfer) este cunoscută, atunci se poate aplica o strategie propusă de Fathi [F2] care presupune modele de programare neliniară cu restricții în care sunt minimizate fie pierderea așteptată, fie varianța.

Fie $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ un vector de variabile de proiectare aleatoare independente cu $E(X_i) = \mu_i$ și $\text{Var}(X_i) = \sigma_i^2$, $i = \overline{1, n}$ și care au valorile nominale $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$. Fie un răspuns (caracteristică de calitate) definit analitic sub forma $Y = h(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Atunci Y este tot o variabilă aleatoare a cărei distribuție depinde de forma funcției de transfer $h(X_1, X_2, \dots, X_n)$ și a distribuțiilor variabilelor X_1, X_2, \dots, X_n . Ideea de bază a proiectării parametrilor este să se determine valorile nominale ale parametrilor (factorilor) de control $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ care minimizează pierderea așteptată asociată caracteristicii de calitate. Trebuie însă ținut cont de posibilele restricții tehnice care pot apărea și trebuie încorporate în problemă. Presupunând funcția pierdere pătratică, modelul asociat proiectării parametrilor este dat în relația (2.148).

$$\text{Minimizează } E[L(Y)] = k \left[\sigma_Y^2 + (\mu_Y - y_N)^2 \right] \quad (2.148)$$

$$\text{Cu condiția : } (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \in M$$

Unde $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \in M$ reprezintă constrângerile posibile legate de cerințele tehnice, costurile de fabricație, etc.

În modelul prezentat în relația (2.148) valorile lui μ_Y și σ_Y^2 depind de variabilele $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, exprimarea lor fiind dificilă iar uneori imposibil de obținut. De obicei aceste valori sunt approximate pe baza formulei generalizate de propagare neliniară a erorilor până la momentul de ordin 4 al unei funcții de variabile aleatoare ale lui Tuckey [T19].

Presupunând că toate variabilele X_i , $i = \overline{1, n}$, sunt aleatoare independente identic distribuite cu mediile μ_i și varianțele σ_i^2 iar γ_i , Γ_i și G_i date în relația (2.209) sunt cunoscute, atunci se pot estima momentele centrate de ordin 1 și 2 conform relațiilor (2.150) și (2.151).

$$\gamma_i = \frac{\mu_i^3}{(\sigma_i^2)^{\frac{3}{2}}} ; \quad \Gamma_i = \frac{\mu_i^4}{(\sigma_i^2)^2} ; \quad G_i = \frac{\mu_i^5}{(\sigma_i^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (2.149)$$

Unde μ_i^3 ; μ_i^4 ; μ_i^5 sunt momentele centrate de ordin 3 ; 4 și respectiv 5.

$$\begin{aligned} \mu_Y \approx & h(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) + \frac{1}{2} \sum_i h_{ii} \sigma_i^2 + \frac{1}{6} \sum_i h_{iii} \gamma_i \sigma_i^3 + \frac{1}{24} \sum_i h_{iiii} \Gamma_i \sigma_i^4 + \\ & + \frac{1}{120} \sum_i h_{iiiii} G_i \sigma_i^5 + \frac{1}{12} \sum_{i \neq j} h_{iiij} \sigma_i^3 \sigma_j^2 + \text{termeni de ordin} \geq \sigma^6 \end{aligned} \quad (2.150)$$

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 = & \sum_i h_i^2 \sigma_i^2 + \sum_i h_i h_{ii} \gamma_i \sigma_i^3 + \frac{1}{3} \sum_i h_i h_{iii} \Gamma_i G_i^4 + \frac{1}{4} \sum_i h_{ii}^2 (\Gamma_i - 1) \sigma_i^4 + \\ & + \sum_{i < j} (h_i h_{ij} + h_{ij}^2 + h_{ij} h_j) \sigma_i^2 \sigma_j^2 + \frac{1}{12} \sum_i h_i h_{iii} G_i \sigma_i^5 + \frac{1}{6} \sum_i h_{ii} h_{iii} (G_i - \gamma_i) \sigma_i^5 + \\ & + \sum_{i \neq j} \left(\frac{1}{2} h_i h_{iij} + \frac{1}{2} h_{ii} h_{ij} + h_{ij} h_{ij} + \frac{1}{3} h_{iij} h_i \right) \gamma_i \sigma_i^3 \sigma_j^2 + \text{termeni de ordin} \geq \sigma^6 \end{aligned} \quad (2.151)$$

unde: - μ_Y este media lui Y ; σ_Y^2 este varianța lui Y

$$- h_i = \left. \frac{\partial h}{\partial x_i} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} ; h_{ii} = \left. \frac{\partial^2 h}{\partial x_i^2} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} ; h_{ij} = \left. \frac{\partial^2 h}{\partial x_i \partial x_j} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} ; \text{etc.}$$

- însumarea se face de la 1 la n

- toți termenii de ordin $\geq \sigma^6$ se neglijează

Unii autori [P7], [M7] preferă să lucreze cu versiunea compactă a relațiilor precedente utilizând relațiile (2.152) și (2.153).

$$\mu_Y \approx h(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (2.152)$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_i h_i^2 \sigma_i^2 \quad (2.153)$$

unde: - μ_Y este media lui Y ; σ_Y^2 este varianța lui Y

$$- h_i = \left. \frac{\partial h}{\partial x_i} \right|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n}$$

- însumarea se face de la 1 la n

Dacă se păstrează constanți ceilalți parametri ai variabilelor de intrare μ_Y și σ_Y^2 pot fi exprimați ca funcții de $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$.

Se notează cu μ vectorul $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, atunci se pot scrie μ_Y și σ_Y^2 cu relațiile $\mu_Y(\mu)$ și respectiv $\sigma_Y^2(\mu)$. Prin aplicarea relațiilor de aproximare (2.152) și (2.153), modelul dat în relația (2.148) poate fi rescris sub forma (2.154).

$$\text{Minimizează } E[L(Y)] = k \left[\sigma_Y^2(\mu) + (\mu_Y(\mu) - y_N)^2 \right] \quad (2.154)$$

Cu condiția: - $\mu_Y(\mu) = h(\mu)$

$$\begin{aligned} & - \sigma_Y^2(\mu) = \sum_i \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} \Big|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} \right)^2 \sigma_i^2 \\ & - (\mu) \in M \end{aligned}$$

Modelul matematic dat de relația (2.154) reprezintă o problemă de programare neliniară cu restricții (PDME), care poate fi rezolvată pentru cazurile concrete cu un algoritm adecvat.

O altă posibilitate de proiectare a parametrilor pe baza unui model de programare neliniară cu restricții (PDMV) este prin minimizarea varianței caracteristicii de calitate cu păstrarea mediei la valoarea țintă.. Modelul matematic asociat este dat în relația (2.155).

$$\text{Minimizează } \sigma_Y^2(\mu) = \sum_i \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} \Big|_{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n} \right)^2 \sigma_i^2 \quad (2.155)$$

Cu condiția: - $\mu_Y(\mu) = y_N$
- $(\mu) \in M$

În cazul în care se adoptă funcția pierdere cuartică, modelul asociat proiectării parametrilor este dat în relația (2.156).

$$\begin{aligned} E[L(Y)] = & k_2 \left[\sigma_Y^2 + (\mu_Y - y_N)^2 \right] + k_3 \left[\phi_Y + 3\sigma_Y^2(\mu_Y - y_N) + (\mu_Y - y_N)^3 \right] + \\ & + k_4 \left[\varphi_Y + 4\phi_Y(\mu_Y - y_N) + 6\sigma_Y^2(\mu_Y - y_N)^2 + (\mu_Y - y_N)^4 \right] \quad (2.156) \end{aligned}$$

Cu condiția : $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \in M$

unde : μ_Y - media lui Y

σ_Y^2 - varianța lui Y

ϕ_Y - momentul centrat de ordinul 3

φ_Y - momentul centrat de ordinul 4

Momentele centrate de ordin 3, ϕ_Y , și 4, φ_Y , se obțin pe baza aproximărilor lui Tuckey [T19] date în relațiile (2.157) și (2.158).

$$\begin{aligned} \phi_Y \approx & \sum_i h_i^3 \gamma_i \sigma_i^3 + \frac{3}{2} \sum_i h_i^2 h_{ii} (\Gamma_i - 1) \sigma_i^4 + 6 \sum_{i < j} h_i h_j h_{ij} \sigma_i^2 \sigma_j^2 + \\ & + \frac{1}{2} \sum_i h_i^2 h_{iii} (G_i - \gamma_i) \sigma_i^5 + \frac{3}{4} \sum_i h_i h_{ii}^2 (G_i - 2\gamma_i) \sigma_i^5 + \\ & + 3 \sum_i \left(h_i h_{ij}^2 + \frac{1}{2} h_i^2 h_{ijj} + h_{ii} h_{ij} h_j + h_i h_{ij} h_j \right) \gamma_i \sigma_i^3 \sigma_j^2 + \text{termeni de ordin } \geq \sigma^6 \end{aligned} \quad (2.157)$$

$$\begin{aligned} \phi_Y \approx & \sum_i h_i^4 (\Gamma_i - 3) \sigma_i^4 + 2 \sum_i h_i^3 h_{ii} (G_i - 4\gamma_i) \sigma_i^5 = \\ & + 12 \sum_{i \neq j} h_i^2 h_j h_{ij} \gamma_i \sigma_i^3 \sigma_j^2 + \text{termeni de ordin } \geq \sigma^6 + 3(\sigma_Y^2)^2 \end{aligned} \quad (2.158)$$

2.9 Proiectarea Calității “off-line” Taguchi. Proiectarea toleranțelor

Problema care se pune este cum și când să se specifice toleranțe mai strânse pentru un produs sau proces astfel încât calitatea și performanța/productivitatea să se îmbunătățească. Fiecare produs sau proces are un număr mare de componente și este un impuls natural să se creadă că, performanța și calitatea oricărui produs pot fi ușor îmbunătățite prin strângerea toleranțelor (a câtorva sau a tuturor).

Prin aceasta se înțelege că dacă versiunea veche a unui produs specifică de exemplu prelucrarea la $\pm 1\mu\text{m}$ atunci în mod natural se consideră că se poate obține o performanță mai bună specificând prelucrarea la $\pm 0.5\mu\text{m}$.

Acest lucru poate deveni însă prohibitiv, și de obicei nu este o garanție a unei performanțe mai bune. Problema selectării toleranțelor critice și respecificarea acestora este bine să se facă numai după studii intensive de proiectare a parametrilor. Proiectarea toleranțelor trebuie făcută numai ca un ultim mod de a îmbunătăți calitatea și productivitatea.

Cu ajutorul metodei Taguchi, prin funcția pierdere a calității (QLF), proiectantul poate determina toleranțele funcție de sensibilitatea clientului la pierderi. Regula ideală este să se plaseze un punct de echilibru între *costurile de reparare (retușare)* și *costul pierderii absorbite de client*. În acest sens G. Taguchi propune o *toleranță funcțională* (LD-50) (de remarcat că aceasta nu este o limită de specificație în sens clasic), care reprezintă valoarea la care 50 % din clienți (utilizatori) sunt nesatisfăcuți.

Pornind de la funcția pierdere a calității (QLF) și pe baza toleranțelor funcționale se definește coeficientul pierderii calității conform relației (2.159), impactul economic pe baza acestei definiții a coeficientului pierderii calității este prezentat în Fig. 2.33.

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (2.159)$$

unde : Δ_0 - toleranța funcțională (toleranța clientului) și care reprezintă intervalul maxim admisibil al unei caracteristici de calitate în raport cu valoarea sa țintă.

A_0 – pierderea clientului și care reprezintă pierderea medie în cazul în care caracteristica de calitate depășește toleranța funcțională (costul mediu suportat de client pentru reparare sau înlocuire și care este consumat pentru atingerea toleranței funcționale).

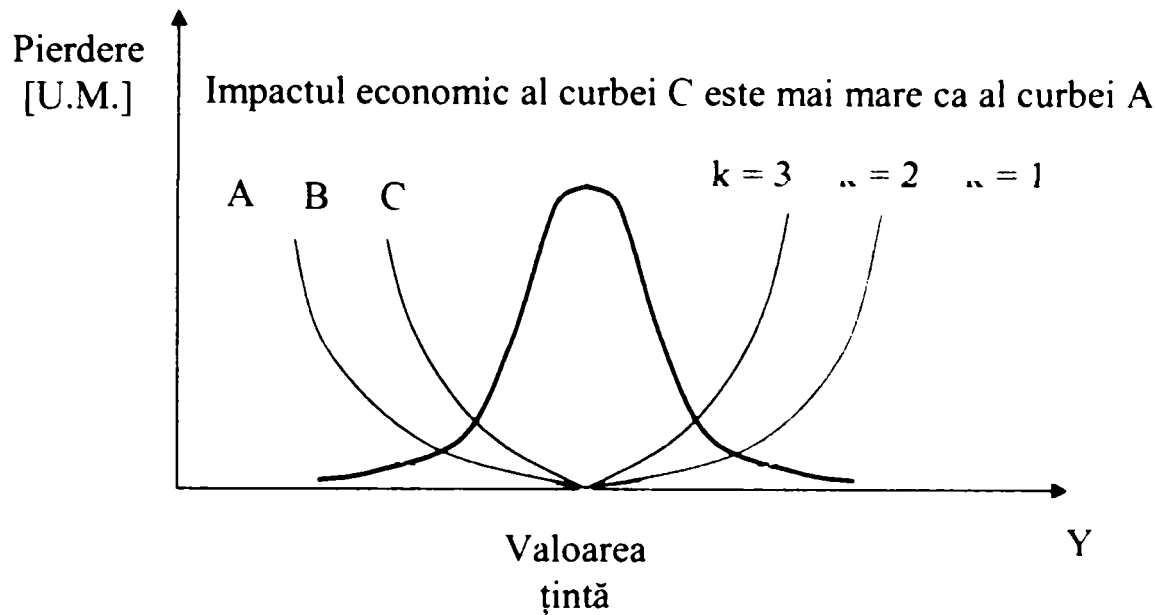


Fig. 2.33 Impactul economic funcție de coeficientul pierderii calității

2.9.1 Determinarea toleranțelor pe baza percepției clientului

Se consideră funcția pierdere a calității Taguchi conform relației (2.2), $L(y) = k(y - y_N)^2$, și se notează cu Δ toleranța de fabricație (dată de punctul de echilibru în termeni de pierderi financiare între producător și client) corespunzătoare cheltuielilor făcute de producător pentru calibrare/etalonare sau reparare/retușare înainte de livrarea produsului către client. Pentru toate produsele aflate în afara limitelor $y_N \pm \Delta$, producătorul trebuie să plătească în medie un preț A [U.M.] pentru repararea sau înlocuirea acestora. Ținând cont de relația (2.159) și de relația $\Delta = y - y_N$ se poate scrie relația (2.160).

$$A = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \cdot \Delta^2 \quad (2.160)$$

Rezolvând ecuația (2.160) în raport cu Δ se obține relația (2.221)

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \cdot \Delta_0 \quad (2.161)$$

2.9.2 Proiectarea toleranțelor pentru un subsistem cu toleranțe specificate inegale folosind funcția pierdere a calității Taguchi

2.9.2.1 Modelul probabilistic Tsai pentru proiectarea toleranțelor

Sunt 3 ipoteze în modelul lui Tsai [T21]

1. Relația între un produs (Y) și un subsistem (X) este probabilistică: $Y = \alpha + \beta X + \epsilon$, unde ϵ este un termen de eroare distribuit normal.
2. Produsul (Y) și subsistemul (X) sunt variabile dependente având coeficientul de corelație pozitiv ρ . Densitatea de probabilitate a funcției (X,Y) este corespunzătoare unei distribuții normale bivariate.
3. Funcția pierdere a calității este funcția pierdere pătratică Taguchi.

Modelul Tsai consideră subsistemul cu specificații limită simetrice și produsul ca având funcția pierdere a calității pătratică însă, subsistemul poate avea toleranțe asimetrice și produsul poate fi adecvat funcției pierdere a calității liniare.

Trietsch [T26] subliniază că „Sunt circumstanțe în care funcția pierdere a calității pătratică nu este aplicabilă. Un astfel de caz apare atunci când costul depășirii limitelor de toleranță nu este egal în stânga și dreapta valorii țintă. Greșind, tăind prea mult de exemplu, poate însemna rebut, în timp ce tăind prea puțin înseamnă numai reprelucrare (rebut recuperabil). În acest caz un răspuns posibil este alegerea unei funcții pierdere care nu este simetrică și nu neapărat pătratică”.

Se consideră un subsistem cu toleranțe asimetrice și produsul cu funcția pierdere a calității pătratică și liniară.

Potrivit lui Tsai, costul total așteptat per produs include costul așteptat per produs când caracteristica de calitate se abate de la valoarea țintă (m_0) și costul per produs a respingerii pentru un subsistem și este dată în relația (2.162)

$$\begin{aligned} \text{ETC} &= \int_{-\Delta}^{\Delta} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} k(y - m_0)^2 \phi(y|x) \cdot \phi(y) \right] \phi(x) dx + A \left[\int_{-\rho}^{-\Delta} \phi(x) dx + \int_{\Delta}^{+\infty} \phi(x) dx \right] = \\ &= k[\Phi(\Delta) - \Phi(-\Delta)] - 2k\rho^2 \Delta \phi(\Delta) + 2A\Phi(-\Delta) \end{aligned} \quad (2.162)$$

unde:

y – valoarea standardizată a caracteristicii unui produs

m_0 – valoarea țintă a caracteristicilor produsului, $m_0 = 0$

A_0 – pierderea asociată unui produs care nu îndeplinește specificațiile

Δ_0 – toleranța standardizată a unui produs

k – coeficientul pierderii calității $k = \frac{A_0}{\Delta_0^2}$

- x – valoarea standard a caracteristicii unui subsistem
- m – valoarea țintă standard a caracteristicii unui subsistem, $m = 0$
- A – pierderea atunci când caracteristica unui subsistem nu îndeplinește specificațiile
- Δ – toleranța standardizată a subsistemului
- ρ – efectul asupra caracteristicii produsului când x variază cu o unitate
- $\phi(y|x)$ - distribuția condiționată a lui Y fiind dat $X = x$ care are media ρx și varianța $1-\rho^2$
- $\phi(x)$ - densitatea de repartiție a distribuției normale X
- $\Phi(x)$ - funcția de repartiție a lui X
- $\phi(y)$ - densitatea de repartiție a distribuției normale a lui Y
- $\Phi(y)$ - funcția de repartiție a lui Y

Toleranța optimală a subsistemului este dată în relația (2.163)

$$\Delta = \sqrt{\frac{\frac{A}{A_0^2} \Delta_0^2 - 1 + \rho^2}{\rho^2}} \quad (2.163)$$

Costul total așteptat pentru acceptarea produsului fără inspecție este dat în relația (2.164)

$$ETC' = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} k(y - m_0)^2 \phi(y|x) \phi(y) \right] \phi(x) dx = k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (2.164)$$

Profitul așteptat per produs al proiectării toleranței pentru un subsistem este:

$$EPR = ETC - ETC' \quad (2.165)$$

2.9.2.2 Modelul probabilistic Tsai modificat

a. Funcția pierdere pătratică a calității pentru produs

Costul total așteptat per bucată pentru produs este:

$$ETC_1 = \int_{-\Delta_1}^{\Delta_2} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} k(y - m_0)^2 \phi(y|x) \cdot \phi(y) \right] \cdot \phi(x) dx + A_1 \int_{-\infty}^{-\Delta_1} \phi(x) dx + A_2 \int_{\Delta_2}^{+\infty} \phi(x) dx =$$

$$= k(1-\rho^2)[\Phi(\Delta_2) - \Phi(-\Delta_1)] + k\rho^2[-\Delta_2\phi(\Delta_2) - \Delta_1\phi(\Delta_1) + \Phi(\Delta_2) - \Phi(-\Delta_1)] + A_1\Phi(-\Delta_1) + A_2[1 - \Phi(\Delta_2)] \quad (2.166)$$

în care:

Δ_1 – limita inferioară a toleranței subsistemului

Δ_2 – limita superioară a toleranței subsistemului

A_1 – pierderea unde caracteristica subsistemului nu îndeplinește limita inferioară

A_2 – pierderea unde caracteristica subsistemului nu îndeplinește limita superioară

Prin derivarea relației (2.226) în raport cu $-\Delta_1$ și Δ_2 și egalarea primei derivate cu 0 se obține toleranța optimă pentru subsistem conform relațiilor (2.167) și (2.168)

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial ETC_1}{\partial(-\Delta_1)} = 0 \\ \frac{\partial ETC_1}{\partial(\Delta_2)} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{toleranța optimă pentru subsistem}$$

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{\frac{A_1}{A_0} \Delta_0^2 - 1 + \rho^2}{\rho^2}} \quad (2.167)$$

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{\frac{A_2}{A_0} \Delta_0^2 - 1 + \rho^2}{\rho^2}} \quad (2.168)$$

Costul așteptat pentru acceptarea produsului fără inspecție este:

$$ETC_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} k(y - m_0)^2 \phi(y|x) \cdot \phi(y) \right] \phi(x) dx = k \cdot \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (2.169)$$

Profitul așteptat per produs al proiectării toleranței subsistemului este:

$$EPR = ETC_1 - ETC_1' \quad (2.170)$$

b. Funcția pierdere liniară a calității pentru produs

Costul total așteptat per bucată pentru produs este:

$$\begin{aligned} ETC_2 &= \int_{-\Delta_1}^{\Delta_2} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} k(y - m_0) \phi(y|x) \phi(y) \right] \phi(x) dx + A_1 \int_{-\infty}^{-\Delta_1} \phi(x) dx + A_2 \int_{\Delta_2}^{+\infty} \phi(x) dx = \\ &= -k\rho[\Phi(\Delta_2) - \Phi(\Delta_1)] + A_1\Phi(-\Delta_1) + A_2[1 - \Phi(\Delta_2)] \end{aligned} \quad (2.171)$$

Prin derivarea relației (2.171) în raport cu $-\Delta_1$ și Δ_2 și egalarea primei derivate cu 0 se obține toleranța optimă pentru subsistem conform relațiilor (2.172) și (2.173)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial ETC_2}{\partial(-\Delta_1)} &= 0 \\ \frac{\partial ETC_2}{\partial(\Delta_2)} &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{toleranța optimă a subsistemului}$$

$$\Delta_1 = \frac{A_1}{A_0\rho} \cdot \Delta_0 \quad (2.172)$$

$$\Delta_2 = \frac{A_2}{A_0\rho} \cdot \Delta_0 \quad (2.173)$$

Costul total așteptat pentru acceptarea produsului fără inspecție este:

$$ETC_2' = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} k(y - m_0) \phi\left(\frac{y}{x}\right) \cdot \phi(y) \right] \cdot \phi(x) dx = k = \frac{A_0}{\Delta_0} \quad (2.174)$$

Profitul per bucată al proiectării toleranțelor pentru subsistem este:

$$EPR = ETC_2 - ETC_2' \quad (2.175)$$

2.10 Controlul Calității „on-line” Taguchi

Proiectarea robustă Taguchi insistă asupra necesității fundamentale de reducere a variației la produse și procese încă din stadiul concepției. Acestea asigură produse și procese robuste la diferitele condiții incontrolabile atât în timpul fabricației cât și la client.

Deși condițiile optime sunt determinate “off-line”, adică înainte de producție, totuși începând cu ziua în care produsul intră în fabricație apar un anumit număr de surse de variație ca de exemplu: componente aprovizionate din exterior, uzura utilajelor, modificarea nivelului de reglare a proceselor, oboseala materialelor, variații în timpul executării operațiilor de fabricare, erori de măsurare, erori umane, etc.

Dacă se dorește să se mențină beneficiile aplicării în amonte a proiectării robuste și respectiv a îmbunătățirii astfel a costurilor, trebuie stăpânite într-un mod economic și sursele de variație din timpul producției.

Genichi Taguchi a elaborat un ansamblu coerent de metode de control al calității ce se aplică în timpul producției în timp real („on-line”). Aceste metode se bazează pe conceptul general asociat al funcției pierdere a calității (QLF) și sunt un mijloc de a menține calitatea la un cost scăzut.

Indiferent de sistemul ales pentru stăpânirea „on-line” a calității, trebuie considerate două aspecte:

- Frecvența cu care caracteristica de calitate a produsului este evidențiată sau măsurată
- Limita care indică faptul că un proces a deviat suficient de la valoarea sa țintă pentru a necesita o acțiune imediată

Un „**Sistem atent la Calitate**” este un sistem automat de control care măsoară fiecare piesă pe linia de fabricație cu ajutorul unui dispozitiv automat dotat cu un sistem de etalonare integrat. De fiecare dată când un sistem variază în raport cu valoarea țintă, acest lucru este detectat iar un dispozitiv ajustează în mod automat utilajul de fabricație și reglajele mașinii. Dacă se constată un defect, sistemul oprește automat procesul și operatorul este alertat prin sisteme luminoase sau sonore. Un astfel de sistem furnizează o calitate foarte bună, dar este relativ scump de realizat.

Un „**Sistem atent la Costuri**” este un sistem bazat pe limitele de toleranță, reglajele fiind efectuate numai atunci când produsul este în afara toleranțelor, neinteresând de ceea ce se întâmplă în interiorul limitelor de toleranță. Un astfel de sistem nu este foarte scump de realizat, dar există un potențial de risc în ceea ce privește calitatea.

Un „**Sistem atent la Pierderi**” în abordarea lui Taguchi, încearcă să minimizeze costurile calității prin echilibrarea costurilor stăpânirii calității cu beneficiile reale rezultate din această stăpânire. Această abordare cercetează intervalele optime dintre observații și limitele de reglare, constituind în definitiv o soluție optimală a unei probleme de control a calității în producție.

Pierderea totală datorată variațiilor din producție cuprinde pierderea provenită din fluctuațiile caracteristicilor de calitate a pieselor produse și costurile asociate controlului, rebuturilor, reparațiilor și reglajelor (Fig. 2.34).

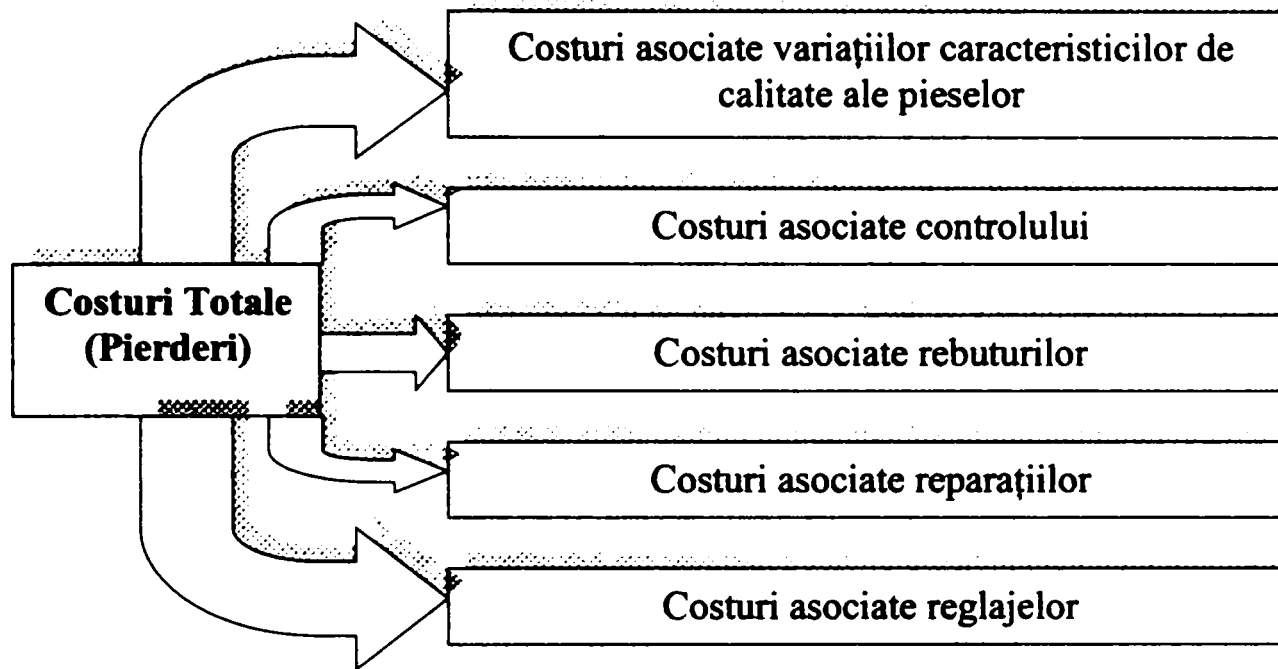


Fig. 2.34 Pierderile datorate variațiilor din producție

Mijloacele pentru reducerea acestor costuri (pierderi) sunt:

- ✓ Schimbarea sau modificarea echipamentelor de producție
- ✓ Modificarea parametrilor de producție
- ✓ Modificarea frecvenței controlului
- ✓ Modificarea intervalelor de reglare a echipamentelor
- ✓ Modificarea nivelului reglajului

Fiecărei din aceste proceduri îi este asociat un cost, demersul lui Taguchi ținând cont de aceste costuri pentru a determina frecvența la care o caracteristică de calitate dată este măsurată. Acest lucru permite să se dea producătorului o informație bazată pe criterii economice, privind măsurile necesare a fi luate în producție.

2.10.1 Fișele de control și Controlul Calității „on-line” Taguchi

Utilizarea fișelor de control permite reducerea variației, oferind producătorului posibilitatea de a reacționa, prin limitele de control, și indicând cauzele speciale sau banale și facilitând totodată calcularea capabilității procesului (C_p ; C_{pk}). Problema este însă că fișele de control nu permit identificarea soluțiilor pentru reducerea de o manieră economică a variațiilor. Retroacțiunea corectivă cu ajutorul SPC (fișe de control) este mult mai rapidă ca a altor metode însă acestea sunt greu de menținut și relativ costisitoare.

Metodele propuse de Taguchi pentru controlul „on-line” arată *când să se măsoare sau să se regleze* precum și *frecvența de măsurare sau reglare* de o manieră ce menține un echilibru între cost și calitate definit prin QLF.

Tehnicile de stăpânire „on-line” a calității bazate pe metodele Taguchi se împart în 3 categorii:

- ↓ **Măsurare și Sortare (M/S)** – referitoare la produs
- ↓ **Diagnostic și Reglaj (D/R)** – referitoare la proces
- ↓ **Predicție și Corectare (P/C)** – referitoare la proces

2.10.2 Procedul „Măsurare și Sortare” (M/S)

Idea de bază a acestui procedeu este sortarea (trierea) produselor în bun/rău, acceptabil/ inacceptabil (Fig. 2.35). În primul caz produsul se livrează iar în al doilea caz este fie considerat rebut fie poate fi reparat. Se observă că aici „Controlul” reprezintă chiar decizia de a livra sau nu produsul.

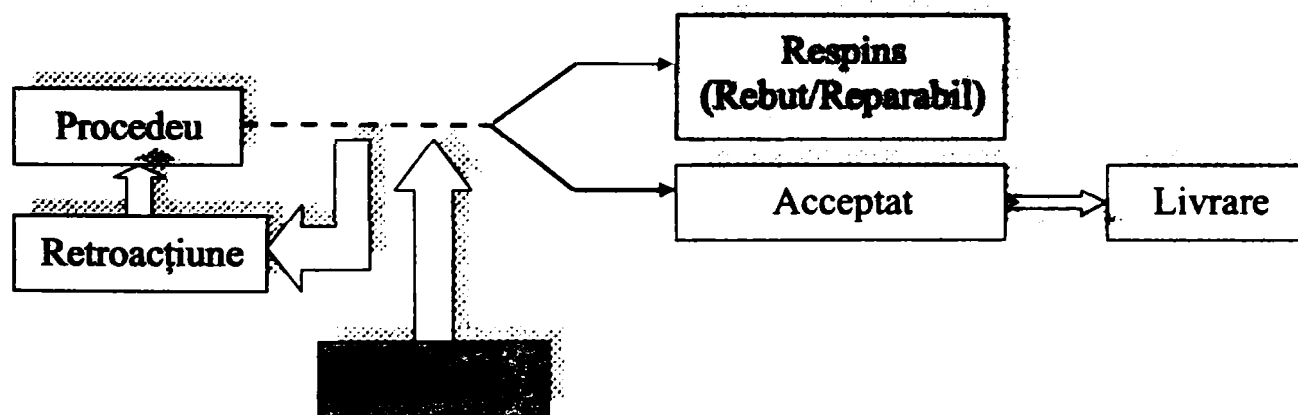


Fig. 2.35 Procedul Măsurare / Sortare

Regulile aplicate sunt cuprinse între controlul 0% și controlul 100%, între cele două existând metodele de control prin eșantionare.

Avantajele și dezavantajele metodelor de control prin eșantionare:

- ✓ Permit eliminarea loturilor defecte, dar numai după ce au fost fabricate.
- ✓ Permit determinarea nivelului general al calității produselor livrate, dar ele nu aduc nici o contribuție la prevenirea defectelor sau la evaluarea productivității.
- ✓ Un control 100% nu este în totalitate eficace (un operator antrenat, bine motivat, muncind în condiții bune și efectuând operațiile respective de examinare și măsurare în mediu industrial lasă să treacă ~ 20% din piesele defecte).
- ✓ Chiar când controlul este complet automatizat sunt lăsate să „treacă” ~ 10-20% piese defecte

Conform concepției lui Taguchi, controlul prin eșantionare nu are nici o utilitate, singurele alternative fiind controlul 0% sau controlul 100%. (Taguchi afirmă că decât să se facă un control prin eșantionare mai bine se aplică un control 100%).

Pentru a se decide pentru controlul 0% sau controlul 100% se estimează pierderea asociată cu una sau cu cealaltă opțiune.

În cazul controlului 0% se utilizează funcția pierdere a calității care oferă producătorului o estimare a costului livrării unui produs defect. Acest caz este apoi comparat cu cel al unui control 100% ce cuprinde costurile controlului, ale recalibrării, ale rebuturilor și ale reparării.

Fie un produs la care pentru o caracteristică de calitate se dă toleranța funcțională, numărul de măsurători asupra caracteristicii măsurate n , costul controlului și pierderea consumatorului A_0 .

Pentru un control 0% , funcția pierdere a calității este dată în relația (2.176):

$$L_{0\%} = k \cdot \text{MSD} \tag{2.176}$$

unde: MSD este abaterea medie pătratică în raport cu valoarea țintă

Dacă pierderea pentru controlul 100% (calculată pe baza costurilor acestuia) este mai mare ca pierderea pentru controlul 0%, adică $L_{100\%} > L_{0\%}$ atunci evident controlul 100% nu este rentabil. Cu cât un proces este mai puțin stăpânit cu atât sunt mai mari șansele ca un control 100% să coste mai mult ca un control 0%. Faptul că un proces este rău stăpânit se dovedește și prin faptul că un control 100% costă mai mult ca un control 0%. Atunci când controlul 0% este mai economic ca și controlul 100%, etapele următoare constau în instalarea controlului în timp real a procesului și folosirea metodelor D/R și P/C.

2.10.3 Procedeu „Diagnostic și Reglaj” (D/R)

Idea procedeuului D/R este de a verifica procesul în cadrul unei periodicități justificate din punct de vedere economic.

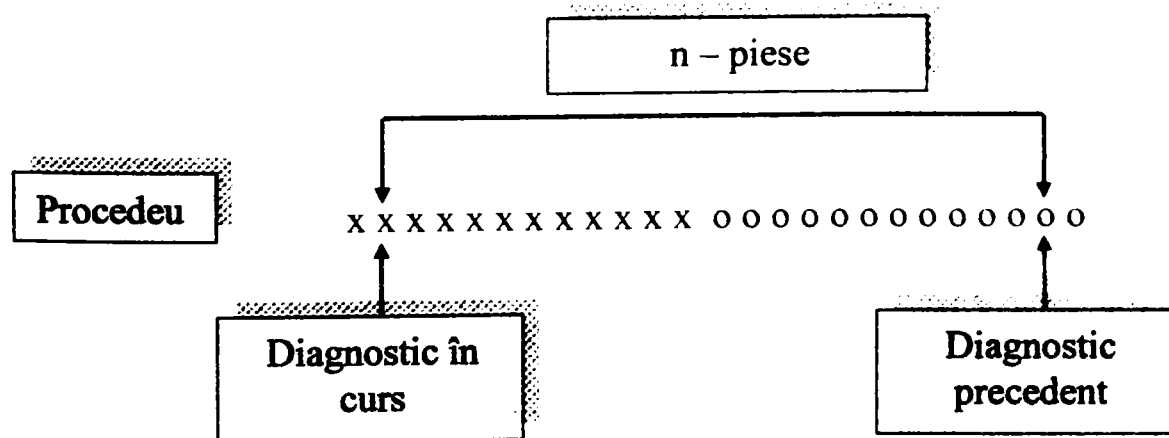


Fig. 2.36 Procedeu Diagnostic / Reglaj

Dacă procesul se află în interiorul limitelor dorite, atunci acesta este lăsat să continue, dar dacă apare ceva anormal atunci:

1. Producția este oprită.
2. Se determină și se elimină cauza anormalității și se face un reglaj.
3. Prima piesă după reglaj se verifică și dacă e bună atunci se reia procesul.

Ipoteza de bază a procedurii D/R este că o dată ce un proces începe să se încadreze între limite (să se stabilizeze), el va continua să evolueze în același fel. Prin comparație cu SPC care implică urmărirea unui anumit număr de valori medii obținute într-o perioadă de timp, procedeul D/R lucrează în timp real și oferă un răspuns la primul semn de slăbiciune. Cheia abordării economice devine pentru procedeul D/R determinarea periodicității optime a diagnosticului. Cu alte cuvinte intervalul între două examinări sau măsurări succesive care dă cel mai bun compromis între costul examinării (măsurării și reglajului) și respectiv costul cu pierderea de calitate rezultată datorită variației unei piese în raport cu alta.

Pentru a se efectua acest calcul, producătorul trebuie să identifice și să cuantifice următoarele date:

- ✓ Pierderea rezultată de fabricarea unui produs defect (rebut / reparare).
- ✓ Costul reglajului necesar pentru revenirea la normal în ceea ce privește produsul apoi pentru redemararea producției normale.
- ✓ Decalajul de timp între diagnostic și oprirea procesului în cazul depistării unui defect.
- ✓ Costurile rebuturilor / reparațiilor asociate defecțiunilor produse în perioada de timp precedent.
- ✓ Periodicitatea actuală a diagnosticului.

În cadrul procedurii D/R se minimizează costurile examinării (măsurării) și reglajului și se optimizează periodicitatea diagnosticului.

Costul funcției D/R este dat de relația (2.177)

$$L = \frac{B}{n} + \left[\frac{n+1}{2} \left(\frac{A}{u} \right) \right] + \frac{C}{u} + \tau \left(\frac{A}{u} \right) \quad (2.177)$$

în care:

A = funcția pierdere asociată producerii unei piese defecte

B = costul diagnosticului

C = costul reglajului

\bar{u} = frecvența medie de apariție a anomaliilor în timpul procesului exprimată în numărul de unități produse.

τ = decalajul între diagnosticul unei piese defecte și oprirea procesului exprimată în numărul de piese produse.

n = intervalul de diagnostic (nr. de unități produse între două diagnostice)

Intervalul de examinare (măsurare) optim se obține prin diferențierea relației (2.177) și anularea primei derivate:

$$\frac{dL}{dn} = 0 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{2(\bar{u} + 1)B}{A - \frac{C}{\bar{u}}}} \quad (2.178)$$

unde n - frecvența optimă a diagnosticului

După determinarea frecvenței optime se poate estima economia realizată per unitate prin compararea vechiului cost calculat al diagnosticului cu noul cost calculat al diagnosticului (totodată se poate calcula și economia anuală realizată). În acest scop se consideră relația (2.179):

$$L_0 = \frac{B}{n_0} + \frac{n_0 + 1}{2} \left(\frac{A}{\bar{u}} \right) + \frac{C}{\bar{u}} + \tau \left(\frac{A}{\bar{u}} \right) \quad (2.179)$$

în care n_0 - intervalul de diagnostic practicat inițial înaintea aplicării procedurii D/R.

Se determină n cu relația (2.177) și se calculează L cu relația (2.176). Economia realizată per piesă se determină calculând diferența conform relației (2.180)

$$\Delta L = L - L_0 \quad (2.180)$$

Odată cunoscut intervalul optim de control, este posibil să se modifice și alți factori ai relației (2.176) pentru a se reduce în continuare costurile de exemplu prin: îmbunătățirea metodelor de reparare și diagnostic fără a afecta calitatea, aplicarea metodelor „off-line”,mărirea intervalului de control prin utilizarea unor instalații mai fiabile, mentenabilitate, mărirea frecvenței controlului dacă costurile rebuturilor / reparațiilor sunt semnificative, diminuarea frecvenței dacă controlul este prea scump.

2.10.4 Procedul „Predicție și Corecție” (P/C)

Procedul P/C se mai numește și *control prin retroacțiune* (*feed-back*). Acest procedeu implică măsurarea unei caracteristici a procesului sau a produsului care permite predicția valorii unei alte caracteristici, ceea ce conduce la efectuarea corecției, bazat pe valoarea prezisă respectiv a limitelor în raport cu valoarea țintă. Într-o anumită măsură acest procedeu seamănă cu sistemul fișelor de control care constau în prezentarea grafică a elementelor ce descriu stabilitatea unui proces. Totuși diferențele dintre procedul P/C și sistemul fișelor de control sunt importante.

Sistemul fișelor de control impune faptul că un proces nu trebuie corectat dacă cauzele variațiilor nu permit stăpânirea în plus a procesului. Această abordare constă în identificarea cauzelor și efectuarea acțiunilor corective. În cazul în care procesul este stabil (nu riscă să iasă din limitele de control), dispersia în jurul valorii țintă este presupus a rămâne relativ constantă (în cazul în care nu se acționează asupra procesului). Abordarea lui Taguchi constă în a căuta contramăsuri asupra cauzelor variațiilor (dispersiei) prin metodele „off-line” și „on-line” de stăpânire a calității.

Procedul P/C este fondat pe o ipoteză dublă:

1. *Toate procesele lăsate să evolueze singure fără reglaj vor devia la un moment dat, fiind numai o chestiune de timp până când devierea procesului va scoate produsele din limitele specificate.*
2. *Abaterea medie pătratică, MSD, a caracteristicii măsurate va crește proporțional în timp. Cu cât sunt produse mai multe piese cu atât este mai mare dispersia.*

Obiectivul procedurii P/C este menținerea unei dispersii constante în jurul valorii țintă specificate cu ajutorul operațiunilor repetate de măsurare și corecție optimizate din punct de vedere economic. Acest procedeu nu are ca scop eliminarea uneia sau a alteia din cauzele particulare ce produc dispersia, ci se concentrează asupra unui sistem de control prin retroacțiune în care examinările (măsurările) sunt efectuate cu o periodicitate predeterminată și cu un cost minim.

Dacă procesul se află în intervalul limitelor de control optime predeterminate, producția continuă iar dacă procesul iese din aceste limite, atunci procesul este reglat și readus la țintă. Costurile și duratele asociate operațiilor de măsurare și corecție sunt complet determinate pe baza acestei abordări. Există trei factori de cost pentru determinarea valorilor optime ale intervalelor dintre controale, limitele de control și amplitudinea corecției.

- A – pierderea asociată unei piese defecte adică, în medie, pierderea datorată variabilității dintre piesele produse.
- B – costul măsurării.
- C – costul asociat corecției și reglării procesului.

Ținând cont de ipoteza a doua, o aproximare a lui MSD este dată în relația (2.181)

$$\text{MSD} \cong \frac{D^2}{3} + \left(\frac{n+1}{2} + \tau \right) \left(\frac{D^2}{\bar{u}} \right) \quad (2.181)$$

în care:

D = limitele de control

n = intervalul între examinări (măsurări) exprimat în numărul de unități produse

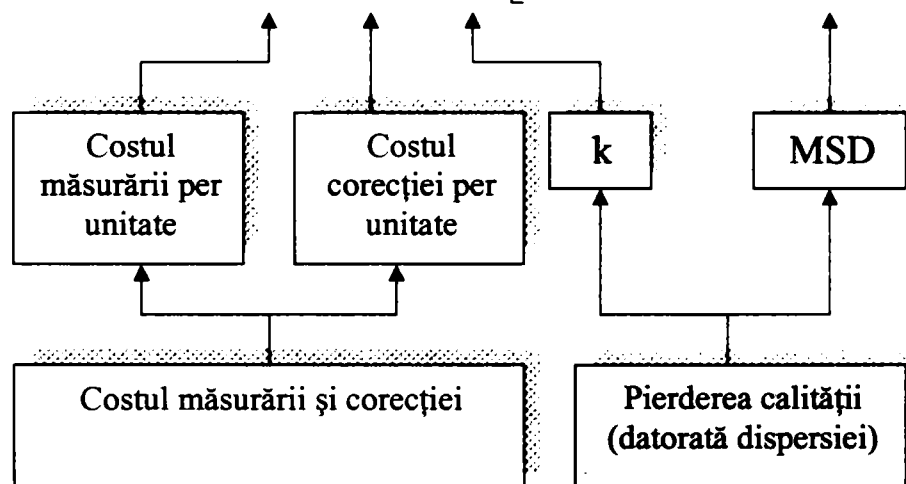
\bar{u} = intervalul mediu între corecțiile procesului

τ = decalajul între operația de măsurare și eventuala oprire a producției (procesului de fabricație)

Δ = limitele de toleranță (funcțională)

Costul per piesă al activității P/C este dat în relația (2.182)

$$L = \frac{B}{n} + \frac{C}{\bar{u}} + \frac{A}{\Delta^2} \left[\frac{D^2}{3} + \left(\frac{n+1}{2} + \tau \right) \frac{D^2}{\bar{u}} \right] \quad (2.182)$$



Procedul P/C este fondat pe capacitatea optimizării intervalelor de măsurare și a limitelor de control a unui proces în ceea ce privește costurile implicate.

Se presupune că înainte de studiul de optimizare există următoarele valori:

\bar{u}_0 = intervalul mediu între măsurări = (numărul total de piese produse) / (numărul total de corecții aplicate).

A_0 = pierderea actuală datorată pieselor defecte.

D_0 = limitele actuale de control.

Pentru obținerea intervalelor de control și a limitelor de control optime se anulează derivatele funcției de cost L în raport cu n și D .

$$\frac{\partial L}{\partial n} = 0 \Rightarrow n = \sqrt{\frac{2\bar{u}_0 B}{A D_0^2}} \cdot \Delta \quad (2.183)$$

$$\frac{\partial L}{\partial D} = 0 \Rightarrow D = \left(\frac{3C}{A} \cdot \frac{D_0^2}{\bar{u}_0} \cdot \Delta^2 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.184)$$

Cu aceste valori n și D se calculează L și se compară cu L_0 . Se presupun cunoscute următoarele valori inițiale:

- Δ = toleranțele dimensiunii inițiale
- n_1 = numărul de piese fabricate pe oră
- A = costul rebutului / reparării în caz de neconformitate
- B = costul inițial al măsurării efectuat inițial la un anumit interval de timp (de exemplu la fiecare două ore)
- C = costul reglajului efectuat inițial (de exemplu o dată pe zi)
- D_0 = limitele de control inițiale
- n_0 = intervalul inițial între măsurări (calculat în număr de piese produse $n_1 \cdot 2h$)
- \bar{u}_0 = intervalul inițial între două corecții / reglaje calculat în număr de piese $n_1 \cdot 8h$)
- τ = decalajul între prelevarea piesei și momentul reluării producției exprimat în număr de piese produse

Se calculează n și D cu relațiile (2.183) și respectiv (2.184) și apoi se calculează funcția cost asociată situației inițiale conform relației (2.185).

$$L_0 = \frac{B}{n_0} + \frac{C}{\bar{u}_0} + \frac{A}{\Delta^2} \left[\frac{D_0^2}{3} + \left(\frac{n_0 + 1}{2} + \tau \right) \frac{D_0^2}{\bar{u}_0} \right] \quad (2.185)$$

Se calculează noul interval de reglare cu relația (2.246)

$$\bar{u} = \bar{u}_0 \left(\frac{D^2}{D_0^2} \right) \quad (2.186)$$

Se determină L (pierderea calității după optimizare) cu relația (2.182) și se compară cu L_0 , calculându-se și economia realizată calculând diferența conform relației (2.187).

$$\Delta L = L_0 - L \quad (2.187)$$

2.11 Ingineria Robustă Taguchi

Pentru a concura cu succes în cadrul pieței globale, organizațiile trebuie să aibe abilitatea de a fabrica produse la un nivel calitativ ridicat, la un preț redus și care satisfac complet necesitățile clienților. Viitorul aparține acelor organizații care fac schimbări fundamentale în modul în care acestea dezvoltă tehnologiile, modul de proiectare și modul de fabricare a produselor.

Ingineria Robustă Taguchi este o metodă care apelează la conceptele și tehnicile lui Taguchi și care, implementată în cadrul organizațiilor, asigură o flexibilitate ce permite minimizarea costurilor dezvoltării și proiectării produselor, reducerea costurilor lansării produselor pe piață și creșterea productivității globale.

Conform *Ingineriei Calității* se consideră că există două tipuri de calitate:

- ❖ Tipul 1 : *Calitatea ideală* (la client) – dorită de client
- ❖ Tipul 2 : *Calitatea reală* (produsă) - nedorită de client

Calitatea ideală (Tipul 1), determină mărimea segmentului de piață și ea include funcțiunea propriu-zisă a produsului, caracteristicile produsului, culoare, design etc. Cu cât *calitatea ideală* este „mai bună” cu atât mai mare devine segmentul de piață sau se câștigă noi piețe (mărimea pieței este determinată și de preț). *Calitatea ideală* este abordată în timpul planificării produsului și nu este obiectul de studiu al Ingineriei robuste Taguchi.

Calitatea reală (Tipul 2), include defecte, căderi, zgomote, vibrații, fenomene nedorite, poluare etc. *Ingineria Robustă Taguchi* se ocupă de *calitatea reală* (produsă).

Observație:

- În timp ce *calitatea ideală* determină mărimea pieței, *calitatea reală* câștigă cota de piață în cadrul segmentului de piață.

Rolul *Ingineriei Robuste Taguchi* este de a crea și dezvolta un sistem ce îndeplinește cerințele cerute de *calitatea ideală*. În primă instanță sunt generate câteva concepte din care unul sau mai multe sunt dezvoltate în continuare. Dezvoltarea clasică a produsului se face astfel încât să-și îndeplinească funcțiunile în condiții normale de funcționare iar apoi va fi testat sub diferite condiții de utilizare la client. Când conceptul nu a îndeplinit o condiție atunci el va fi modificat și va fi testat la următoarele condiții (efectuând modificări la fiecare neîndeplinire a unei condiții).

Ingineria Robustă Taguchi în schimb optimizează în scopul obținerii unei *funcționări robuste*. Odată conceptul ales, diversele variante sunt testate la câteva condiții de utilizare la client pentru a optimiza conceptul la robustețe. Conceptul trebuie optimizat pentru robustețe *înainte de orice fel de modificări* iar dacă se adoptă totuși o funcție de compensare atunci și aceasta va trebui optimizată pentru robustețe.

În acest sens *Ingineria Robustă Taguchi* este o strategie de optimizare ideală pentru dezvoltarea de noi tehnologii [E1] (în zona proiectării produselor și proceselor) după cum urmează:

- ✓ Reprezintă aplicarea Metodelor Taguchi la începutul activității de cercetare/dezvoltare pentru optimizarea performanțelor.
- ✓ Se concentrează pe identificarea Funcției ideale pentru o anumită tehnologie sau proiectarea/procesul de realizare a unui anumit produs.
- ✓ Se concentrează pentru alegerea selectivă a celor mai bune valori nominale ale parametrilor de proiectare ce optimizează variația în timp a performanței (chiar în prezența unor factori ce cauzează variabilitate) la un preț minim.

Una din ideile importante ale *Ingineriei Robuste Taguchi* este că proiectanții pot deveni mai eficienți în evaluarea multitudinii problemelor asociate unui proiect nu prin luarea în considerare a *simptomelor proastei funcționări*, ci prin concentrarea asupra *funcționării propriu-zise*. Conform *Ingineriei Robuste Taguchi*, problemele sunt cauzate de variabilitatea în funcționarea produsului iar îmbunătățirea funcționării va duce la minimizarea problemelor. Un alt concept important al *Ingineriei Robuste Taguchi* este *starea de robustețe*. Termenul de *robustețe* este definit de Genichi Taguchi [T3] ca fiind: „*Starea în care performanța produsului sau procesului are o sensibilitate minimă la factorii ce cauzează variabilitatea (fie în mediul de fabricare fie la client) și la îmbătrânire la cel mai mic cost unitar de fabricare*”. Din această definiție rezultă că scopul *Ingineriei Robuste Taguchi* este căutarea și obținerea *stării de robustețe* în proiectarea produselor/proceselor iar măsurarea *robusteței* se face prin Raportul Semnal/Zgomot [T8].

2.11.1 Sisteme tehnice (tehnologice). Funcția Ideală

Sistemele tehnice (tehnologice) sunt sisteme create de om și care folosesc transformările energetice pentru conversia energiei de intrare în energie de ieșire dorită folosind legile fizicii. Astfel de sisteme sunt proiectate să ofere rezultate specifice dorite de client. În orice *sistem tehnic (tehnologic)* există *formă ideală* (sau perfectă) a relației dintre intrările și ieșirile din sistem. *Ingineria Robustă Taguchi* caută obținerea *stării ideale*, care va fi denumită în continuare *funcție ideală*.

Dacă în cazul sistemelor generale există un anumit tip de intrare și ieșire, în cazul *sistemelor tehnice (tehnologice)* acestea transformă energia astfel încât relația existentă între semnalul de intrare (energia de intrare în sistem) și răspunsul de ieșire rezultat (energia de ieșire din sistem) să fie respectată. Orice *sistem tehnic (tehnologic)* obține *funcția sa ideală* atunci când toată energia de intrare aplicată este transformată eficient pentru crearea energiei de ieșire dorită. Evident în realitate toate sistemele nu sunt 100% eficiente în transformările de energie, acest lucru însemnând că pierderile de energie creează *funcții nedorite*. Calitatea transformării energiei este exprimată ca fiind raportul dintre nivelul performanței funcției dorite și variabilitatea

acesteia (relația 2.188) și este un indicator al robusteții (raportul Semnal/Zgomot) Fig. 2.37.

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Energia transformată pentru a îndeplini funcția dorită (semnal)}}{\text{Energia transformată pentru funcții nedorite (zgomote)}} \quad (2.188)$$

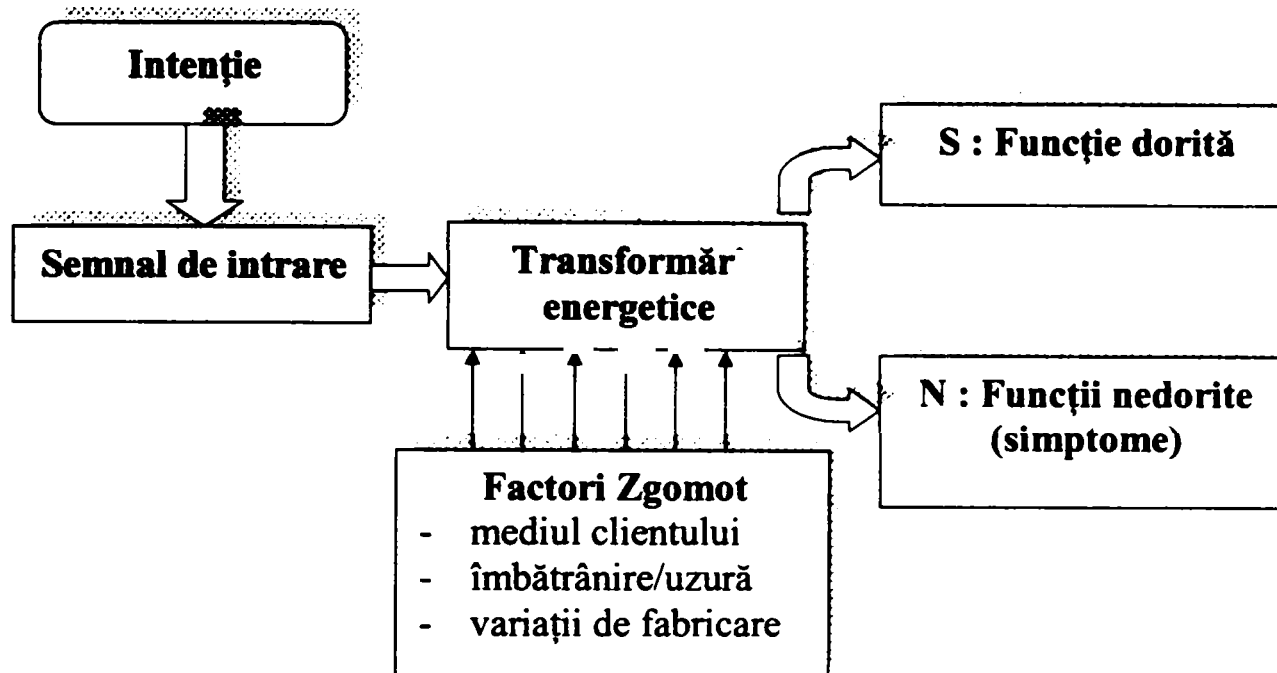


Fig. 2.37 Raportul Semnal/Zgomot, măsură a robusteții și a calității transformărilor energetice

2.11.2 Strategia semnalului, factorilor controlați și a zgomotului

În scopul îmbunătățirii valorii raportului Semnal/Zgomot, G. Taguchi recomandă proiectarea robustă a parametrilor (§ 2.7). Factorii controlați, sunt în accepțiunea lui G. Taguchi, oricare dintre parametrii de proiectare a unui sistem ce permit specificarea liberă a valorii lor nominale la un cost acceptabil [T3]. În această ordine de idei, G. Taguchi recomandă experimentarea parametrilor de proiectare în fazele inițiale ale unui proiect. Pe măsură ce proiectul avansează de la faza de R&D prin ciclul de dezvoltare spre client, apar tot mai mulți factori zgomot și, implicit, se restrânge libertatea de revizuire a principiilor fundamentale. De asemenea, G. Taguchi recomandă studierea în amonte a următoarelor tipuri de interacțiuni: *Factori controlați / Factori zgomot*, *Factori controlați / Factori semnal*, *Factori controlați / Factori controlați*. Studierea primului tip de interacțiuni în fazele din amonte ale proiectului permite selectarea modelului (conceptului, proiectului) mai robust precum și evitarea activităților de compensare din aval. Pentru studiul celui de-al doilea tip de interacțiuni, factorii semnal și factorii zgomot sunt variați în mod intenționat, factorul (factorii) semnal trebuind să acopere întregul domeniu de operare pentru asigurarea

performanței, inclusiv cerințele viitoare ale produsului. De asemenea sunt selectați și variați în experiment un anumit număr de factori zgomot (*Strategia Zgomotului*). Pentru al treilea tip de interacțiuni, este preferabil ca între factorii controlați să nu existe interacțiuni relativ la raportul Semnal/Zgomot, caz în care este foarte probabil ca robustețea să se mențină în condițiile din aval (la client). Dacă aceste interacțiuni totuși există, ele pot fi studiate cu matricile de experiențe Taguchi specifice (§ 2.7.1).

Ingineria Robustă Taguchi folosește o optimizare în două trepte:

1. *Reducerea variabilității funcționale*
2. *Ajustarea sensibilității*

Acest mod de optimizare este justificat de faptul că este mult mai dificil să se reducă variabilitatea decât să se ajusteze răspunsul mediu (sensibilitatea) la valoarea țintă. În cazul în care răspunsul reprezintă transformarea energiei sistemului, atunci ajustarea sensibilității este relativ mai ușor de realizat.

2.11.3 Strategia de implementare și aplicare a Ingineriei Robuste Taguchi

Implementarea *Ingineriei Robuste Taguchi* se face aplicând o metodologie în șase etape (Fig. 2.38). Dacă vechiul mod de gândire era „*Optimizează – Confirmă – Verifică*”, această metodologie reprezintă un nou mod de gândire și anume „*Construiește – Testează – Ajustează*” și ajută la creșterea eficienței altor programe de calitate: QFD, FMEA etc.

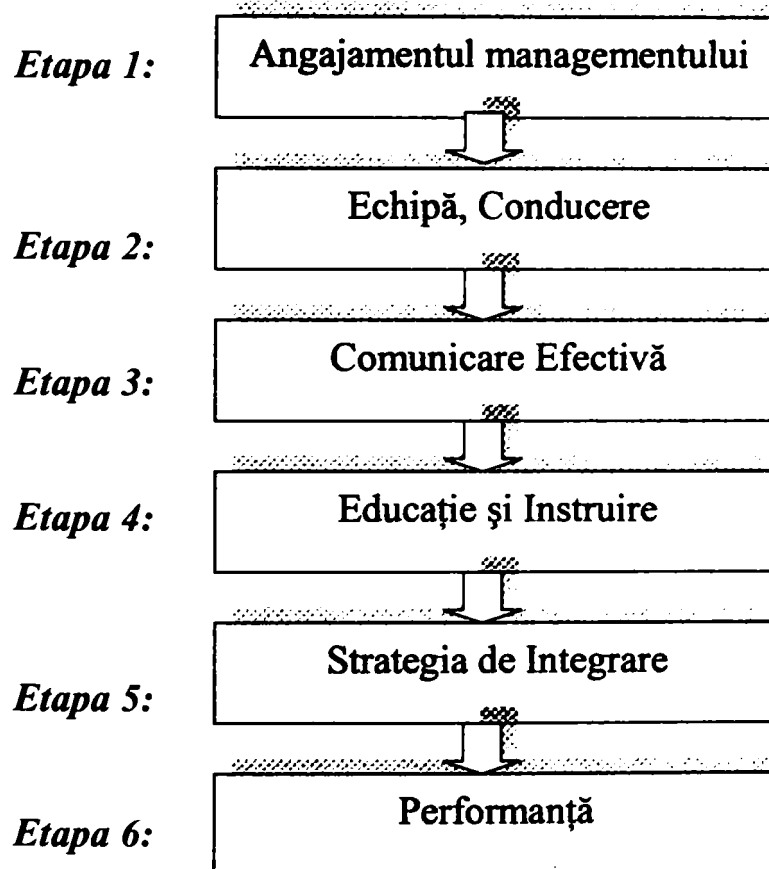


Fig. 2.38 Strategia de implementare a Ingineriei Robuste Taguchi

Strategia de aplicare a *Ingineriei Robuste Taguchi* păstrează principiul **PDCA** (Plan-Do-Check-Act) ; (Planifică-Efectuează-Verifică-Acționează) al lui Edwards. W. Deming (Cap. III, Fig. 3.14) și este prezentată în Fig. 2.39.

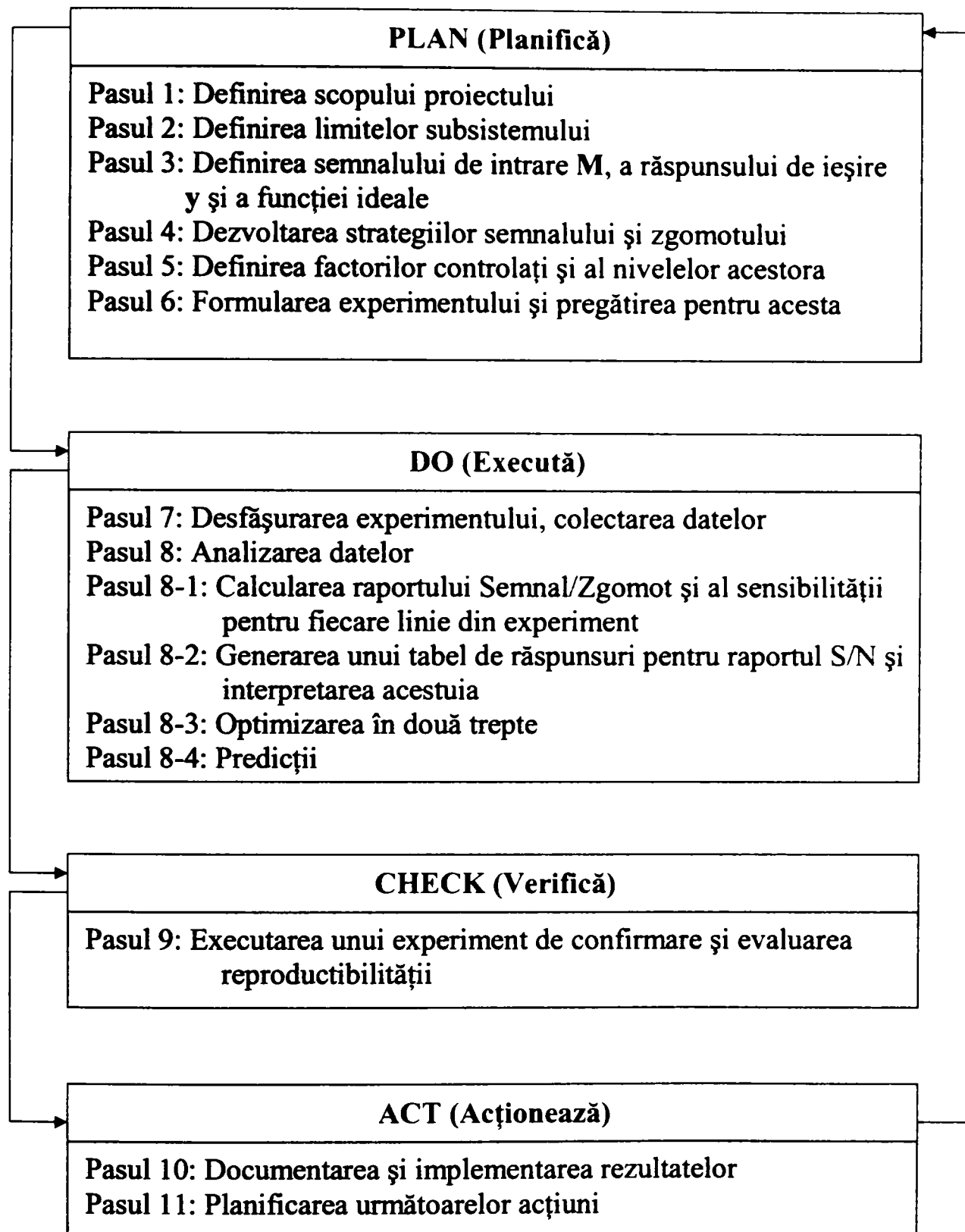


Fig. 2.39 Strategia de aplicare a *Ingineriei Robuste Taguchi*

Observații:

- Pasul 1 și Pasul 2 sunt cei mai importanți pași. Este absolut necesară concentrarea asupra transformărilor energiei și nu asupra simptomelor variabilității. Acest lucru depinde de următoarele criterii:
 - ✓ *Scala sistemului și subsistemelor.* Este mai utilă concentrarea asupra subsistemelor decât asupra sistemului (mai mare). Aceasta depinde de numărul subsistemelor din sistem, de interacțiunile dintre subsisteme și de numărul parametrilor de proiectare în subsistem.
 - ✓ *Tehnologia de măsurare.* Aceasta depinde de fezabilitatea/costul tehnologiei de măsurare. Uneori este necesar să se construiască un dispozitiv pentru a măsura transformările energiei.
 - ✓ *Simularea pe calculator.* Aceasta depinde de posibilitatea simulării pe calculator a funcției sistemului și este de obicei mai ieftină.
- Pasul 3 se folosește pentru definirea semnalului de intrare M și a răspunsului de ieșire y (atunci când măsurarea energiei propriu-zise nu este fezabilă, M și y trebuie astfel aleși încât ei să reprezinte transformările energiei). Se definește apoi funcția ideală ca fiind relația ideală între M și y , bazată pe legile fizice ale sistemului conform relației (2.189)

$$y = \beta \cdot M \quad (2.189)$$

unde β este panta dreptei (sensibilitatea)

- Pasul 8 se realizează prin calculul raportului Semnal/Zgomot și a sensibilității pentru fiecare linie din matricea de experiență. Panta caracteristicii Intrare/Ieșire trebuie să fie la valoarea specificată (de obicei 1). Este tratată ca LTB atunci când ieșirea este o caracteristică dorită (relația 2.190) și ca STB în cazul în care ieșirea este o caracteristică nedorită (relația 2.191). Pentru cazul în care relația între intrare și ieșire este una de directă proporționalitate, atunci reprezentarea grafică corespunzătoare trebuie să aibe deviații cât mai mici posibile față de dreaptă. În acest caz varianța este media abaterilor punctelor măsurate față de dreapta de regresie (relația 2.192). Această abordare este LTB și arată liniaritatea caracteristicii Intrare/Ieșire.

$$S = 10 \log \beta^2 \quad (2.190)$$

$$S = -10 \log \beta^2 \quad (2.191)$$

$$\eta = \frac{S}{N} = 10 \log \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (2.192)$$

2.12 Concluzii

- ✓ Pentru extinderea funcției pierdere Taguchi, se utilizează o funcție numită *funcție pierdere cuartică*, obținută prin dezvoltarea în serie Taylor a funcției pierdere $L(y)$ în raport cu y_N (valoarea țintă) până la termenul de ordin IV.
- ✓ Pentru determinarea mediei unui proces de fabricație în cazul unei caracteristici directe, aparținând tipului NTB, în cazul toleranțelor bilaterale asimetrice, se utilizează funcția pierdere pătratică asimetrică Phadke. În ipoteza că varianța procesului σ^2 este independentă de media procesului μ , pierderea așteptată EL (δ) este funcție de k_1 , k_2 , δ și σ , unde $\delta = (\mu - T) / \sigma$ iar T este valoarea nominală. Setarea optimă a mediei procesului rezultă la una din valorile $T \pm \delta_0 \sigma$, unde δ_0 corespunde pierderii așteptate minime, după cum devierile spre una din toleranțele superioară sau inferioară sunt mai importante (implică pierderi mai mari). Acest mod de determinare a valorii medii (țintă) este mai favorabil decât alegerea valorii țintă la valoarea nominală (T), la mijlocul intervalului de toleranță sau conform modelului Wen și Mergen.
- ✓ Pentru determinarea mediei optime a unui proces pentru o caracteristică de calitate indirectă, se utilizează modelul Wen și Mergen modificat de Chen atât pentru o funcție pierdere pătratică asimetrică cât și pentru o funcție pierdere liniară asimetrică.
- ✓ Pentru extinderea raportului Semnal/Zgomot trebuie luate în considerare următoarele aspecte:
 - Probabilitatea de apariție a fiecărui experiment particular.
 - Intervalele de variație liberă (intervalele de posibilitate) pentru anumiți factori (parametrii de reglaj).
 - Variabilele ce necesită ierarhizare.
 - Variabilele ce restricționează alegerea parametrilor de proiectare.
- ✓ În cazul în care este cunoscută forma analitică a relației dintre parametrii de intrare și parametrii de intrare (funcția de transfer), se aplică strategia lui Fathi care presupune modele de programare neliniară cu restricții în care sunt minimizate fie pierderea așteptată (modelul PDME) fie varianța caracteristicii de calitate cu păstrarea mediei la valoare țintă (modelul PDMV).
- ✓ Pentru proiectarea toleranțelor unui produs cu ajutorul funcției pierdere Taguchi la care un subsistem are toleranțele specificate inegale, se folosește modelul Tsai modificat de Chen și Chou atât pentru cazul pierderii pătratice cât și pentru cazul pierderii liniare.

CAPITOLUL III

METODA TAGUCHI. COMPARAȚII ȘI OPORTUNITĂȚI

3.1 Introducere

După cel de-al doilea război mondial produsele de înaltă tehnologicitate fabricate în SUA dominau piața mondială. O dată cu șocul pieței petrolului din anii '70, multe din avantajele economice asociate petrolului ieftin au fost pierdute și economiile în plină dezvoltare ale Asiei și Europei au devenit competitori puternici. Tehnologiile inovatoare ale SUA nu au mai putut "proteja" propria economie în fața abordărilor orientate spre client ale europenilor și asiaticilor.

Anii '90 au marcat un reviriment al economiei SUA, în special în industria de autovehicule. Acest lucru a fost posibil în parte datorită influențelor diverselor metode și tehnici de asigurare a calității introduse de japonezii K. Ishikawa, M. Kogure, Y. Akao, N. Kano, M. Ymai, G. Taguchi. O dată cu reducerea decalajului dintre SUA și Japonia a apărut necesitatea pentru noi abordări pentru a asigura satisfacerea clienților, reducerea costurilor, aducerea produselor mai rapid pe piață, mai pe scurt: " mai bine, mai ieftin, mai rapid "

Există în general două tipuri de probleme care trebuie rezolvate și anume: acelea cu soluții în general cunoscute și acelea cu soluții necunoscute. Problemele cu soluții în general cunoscute pot fi rezolvate de obicei cu ajutorul informațiilor găsite în cărți, reviste de specialitate sau cu ajutorul experților. Aceste soluții urmăresc modelul general de rezolvare a problemelor prezentat în Fig. 3.1.

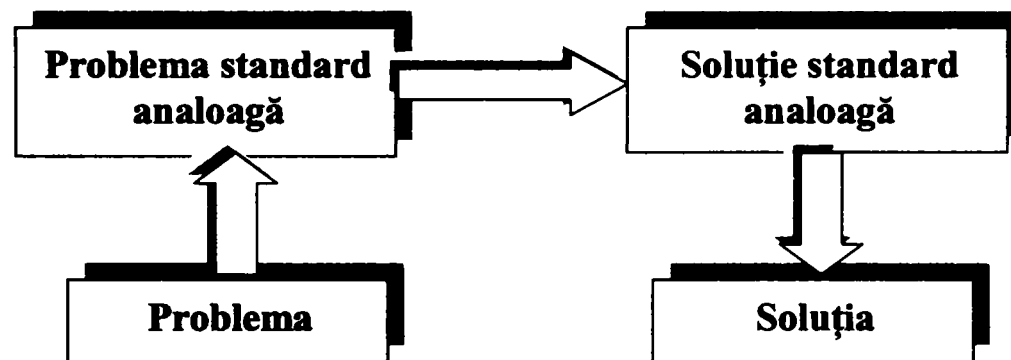


Fig. 3.1 Modelul general de rezolvare a problemelor

În acest caz problema particulară de rezolvat este comparată cu problemele standard similare sau analoage pentru care există (sau se cunosc) soluții standard. Alegând apoi o soluție standard ea devine o soluție pentru problema particulară de rezolvat. Problemele de invenție-inventivitate sunt acelea care nu au în general soluțiile cunoscute și conțin de obicei cerințe contradictorii. Pentru rezolvarea unui astfel de tip de problemă se sugerează folosirea de metode ca " *brainstorming* " și

" *trial-and-error* ", numărul de experimentări necesare depinzând de complexitatea problemei. Dacă în plus soluția problemei de rezolvat se află în afara domeniului de expertiză al celui (celor) care o caută, atunci numărul experimentărilor necesare este posibil să crească foarte mult. În acest caz intervine și modul de manipulare a metodelor prezentate anterior și în plus sunt necesare și metode psihologice cum ar fi intuiția și creativitatea. Având în vedere dificultatea transferării acestui tip de metode la nivelul organizației apare un fenomen numit " *inertie psihologică* " având ca și consecință căutarea soluțiilor numai în domeniul propriu de expertiză (Fig. 3.2). Atunci când se suprapun efectele limitatoare ale inerției psihologice peste " *harta* " soluțiilor se constată că *soluția ideală* poate să fie în afara domeniului de expertiză (Fig. 3.3). Dacă procesul de rezolvare a problemei (căutarea soluției ideale) a fost unul aleator, este de așteptat ca și *soluția ideală* să fie repartizată aleatoriu în *spațiul soluțiilor*. Inerția psihologică blochează procesul aleatoriu și conduce la căutarea *soluției ideale* numai în domeniul propriu de expertiză.

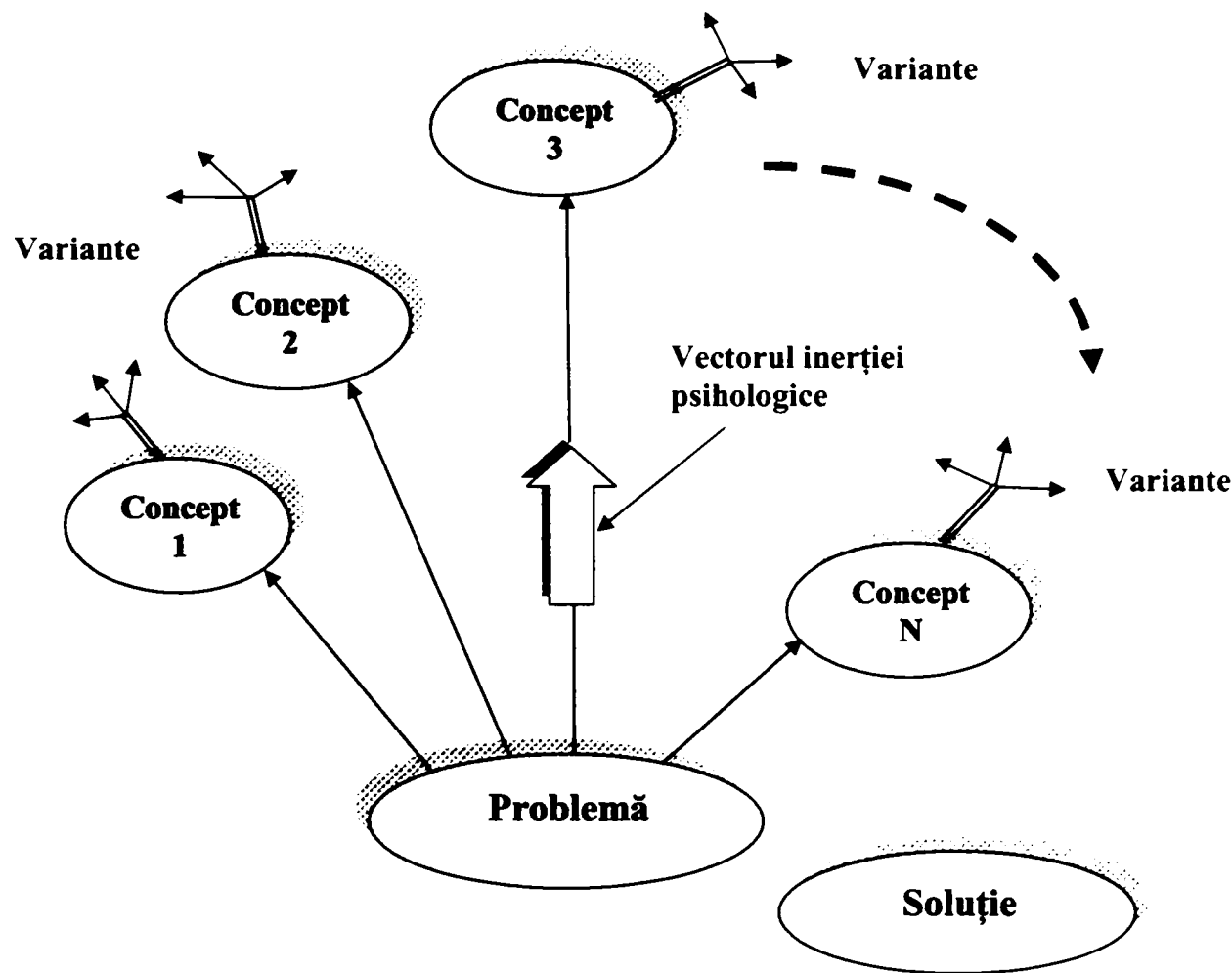


Fig. 3.2 Efectele limitatoare ale inerției psihologice

O soluție mai bună care să depășească impasul creat de inerția psihologică și care să se bazeze pe tehnologie a fost dezvoltată de Genrich Altshuller (născut în fosta URSS în 1926), numită **TRIZ** (acronimul rusesc pentru Teoria rezolvării problemelor de Inventică-Inventivitate) sau **TIPS** în țările anglofone (acronimul englezesc pentru Theory of Inventive Problem Solving).

Studiind peste 400.000 de patente (invenții) G.S. Altshuller a ajuns la concluzia că numai 40.000 aveau oarecum soluții inovatoare restul doar îmbunătățiri directe. Pornind de la acest studiu a definit ca fiind *probleme de inventică* (inventivitate)

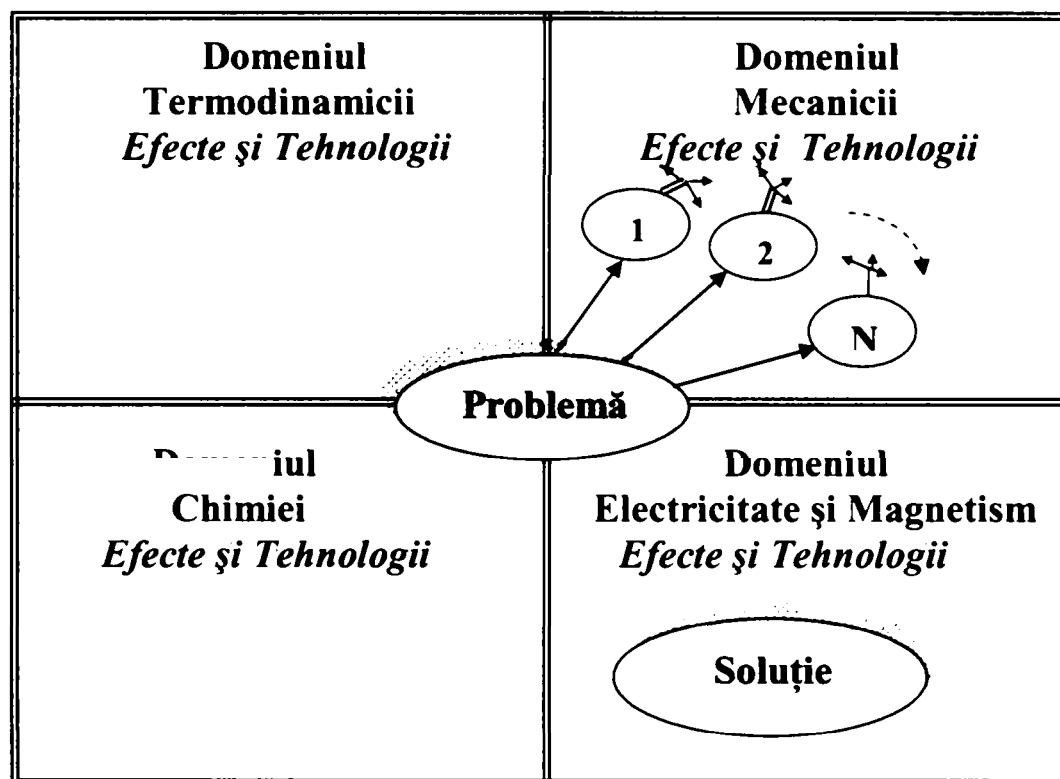


Fig. 3.3 Poziția soluției ideale în raport cu expertiza personală

acelea care conțin cerințe conflictuale numite "*contradicții*" și a observat că aceleași soluții și principii au fost utilizate în mod repetat pentru soluționarea lor. În această ordine de idei G.S. Altshuller a considerat că teoria inventicii trebuie să satisfacă ca și cerințe minime următoarele:

- Să fie o procedură realizată pas cu pas în mod sistematic
- Să fie un ghid prin spațiul soluțiilor care să conducă direct la soluția ideală
- Să fie repetabilă, fiabilă și să fie independentă de metodele psihologice
- Să fie capabilă să acceseze cunoștințele de bază ale inventicii
- Să fie capabilă să se alăture cunoștințelor de bază ale inventicii
- Să fie suficient de accesibilă utilizatorilor urmând modelul general de soluționare a problemelor din Fig. 3.1.

Constatând că atunci când se rezolvă o anumită problemă, soluția găsită cauzează o altă problemă, Altshuller a descoperit că există și soluții care elimină sau rezolvă contradicțiile și nu necesită compromisuri. Astfel a definit 39 de Proprietăți de bază și

40 de Principii pentru rezolvarea problemelor ce conțin contradicții în orice grup de 2 proprietăți. Proprietățile de bază le-a prezentat sub forma unei matrici cu mărimea 39 X 39, fiecare element al matricii conținând până la 4 principii pentru eliminarea sau rezolvarea contradicțiilor. Altshuller a pus și bazele unui algoritm pentru dezvoltarea unei abordări analitice pentru dezvoltarea problemelor de invenție cu următoarea axiomă: " *Evoluția tuturor sistemelor tehnice este guvernată de legi obiective* ".

Îmbunătățirea oricărui subsistem a unui sistem care deja a atins cel mai înalt nivel de performanță funcțională va conduce la un conflict cu un alt subsistem al sistemului. Aceasta va conduce la îmbunătățirea subsistemului mai puțin evoluat. Un astfel de proces continuu va conduce sistemul tot mai aproape de *starea sa ideală*.

De-a lungul timpului prin studierea a peste 2.500.000 de patente au fost dezvoltate și alte metode și tehnici care vor fi prezentate în continuare.

3.1.1 Nivelul invențiilor-inventivității

Spre deosebire de clasificarea clasică a invențiilor după domeniul de aplicare, Altshuller a clasificat invențiile (inventivitatea) în 5 categorii numite " *Nivele de inventivitate* " sau " *Nivele ale invențiilor* " sintetizate în Tabelul 3.1. Clasificarea a permis de asemenea să se constate că problemele de aceeași natură au fost rezolvate în mod similar utilizând numai cele 40 de principii de bază și că peste 90% din problemele cu care se confruntă inginerii au fost rezolvate anterior într-un anumit fel sau altul.

| Nivelul invențiilor | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|---|---------------------------------------|
| Nivel | Grad de inventivitate | % de patente | Sursa cunoștințelor | Numărul de soluții considerate |
| 1 | Soluție imediată, evidentă | 32% | Cunoștințe personale | 10 |
| 2 | Îmbunătățire minoră | 45% | Cunoștințe din cadrul organizației | 100 |
| 3 | Îmbunătățire majoră | 18% | Cunoștințe din cadrul domeniului | 1.000 |
| 4 | Concept nou | 4% | Cunoștințe din afara domeniului | 100.000 |
| 5 | Descoperire | 1% | Toate cunoștințele posibile | 1.000.000 |

Tab. 3.1 Nivelul invențiilor (inventivității)

Observații:

Nivelul 1: Soluție evidentă

- *acest nivel nu este în mod real unul inovator, realizându-se practic îmbunătățiri foarte simple unui sistem existent fără a se rezolva vreo problemă*
- *se folosesc exemple din același domeniu de activitate*
- *acest nivel este exclus din tehnicile și metodele TRIZ*

Nivelul 2: Îmbunătățiri minore, se înlătură câteva contradicții minore

- *se folosesc cele 40 de Principii pentru separarea și rezolvarea contradicțiilor tehnice*
- *necesită cunoștințe din zone diferite ale aceluiași domeniu*

Nivelul 3: Îmbunătățiri majore necesitând analiză " Substanță-Câmp "

- *se folosesc cele 76 Soluții Standard pentru rezolvarea contradicțiilor fizice*
- *se folosesc efecte - fizice, chimice, geometrice*
- *necesită cunoștințe din alte domenii*

Nivelul 4: Schimbări radicale / concept nou, necesită ARIZ

- *necesită ARIZ pentru descrierea problemei și aflarea de posibile soluții noi*
- *acest nivel îmbunătățește un sistem tehnic fără însă a rezolva o contradicție tehnică existentă, pur și simplu se înlocuiește o tehnologie veche cu una nouă în dorința de a înainta spre idealitate*

Nivelul 5: Descoperire

- *acest nivel este exclus din tehnicile și metodele TRIZ*

După cum se poate observa tehnicile folosite, devin în mod progresiv, tot mai elaborate și mai puternice pe măsura înaintării de la Nivelul 2 spre Nivelul 4. Nivelurile 2 și 3 se mai numesc și "Inovative" iar Nivelul 4 se mai numește și " Inventiv ". Fiecare nivel are definite propriile sale probleme și de asemenea propriile metode și tehnici. În acest sens Nivelul 4 nu este mai " bun " ca Nivelul 3 dacă soluția acestuia din urmă îl aduce mai aproape de idealitate. De asemenea nivelele superioare necesită o analiză mai detaliată și resurse mai vaste.

3.1.2 Matricea Contradicțiilor

Contradicțiile apar atunci când se încearcă să se îmbunătățească o anumită proprietate sau caracteristică dorită iar o altă proprietate sau caracteristică se deteriorează. Modul de abordare convențional conduce de obicei la o soluție de compromis. Așa cum s-a menționat anterior soluția "cea mai inventivă " se obține atunci când pentru o problemă tehnică ce conține o contradicție aceasta este complet eliminată. Altshuller a descoperit că există numai 39 de parametrii care ori se îmbunătățesc ori se deteriorează și a concluzionat că orice problemă poate fi

descrișă ca un conflict între o pereche de parametrii (2 din 39). Conflictele au fost rezolvate în totalitate fără a se recurge la compromisuri folosind numai 40 de principii inventive. Forma de prezentare este o matrice " 39 X 39 " cu 39 de parametrii care se îmbunătățesc și 39 de parametrii care se înrăutățesc (deteriorează). Fiecare celulă a matricii conține maximum 4 Principii Inventive cu ajutorul cărora se poate elimina contradicția. În continuare se prezintă cei 39 de parametrii cu explicațiile corespunzătoare. Unul din cele mai importante obiective în *Proiectarea Robustă Taguchi* este selectarea unui răspuns de ieșire adecvat al sistemului. Pentru identificarea unei caracteristici de ieșire adecvate, Genichi Taguchi propune următoarele:

- Identificarea funcției ideale sau a relației ideale intrare/ieșire pentru produs sau proces. Caracteristica de calitate trebuie să fie în legătură directă cu transferul de energie asociat mecanismului de bază al produsului sau procesului.
- Selectarea unei caracteristici de calitate care să fie, pe cât posibil, o variabilă continuă.
- Selectarea unei caracteristici de calitate aditive.
- Caracteristica de calitate să fie completă, adică să acopere întreg domeniul funcției ideale sau relației intrare/ieșire.
- Caracteristicile de calitate să fie ușor măsurabile.

Genichi Taguchi consideră că este important să se evite utilizarea "*simptomelor calității*" ca și caracteristici de ieșire (răspunsuri) deoarece îmbunătățirea unui "*simptom*" poate să nu fie utilă îmbunătățirii robusteții sistemului sau abilității sale de a-și îndeplini funcția. Înțelegerea funcției sistemului, în mod special a *funcției de bază*, este cheia dezvoltării unei tehnologii robuste sau a unui produs robust. Elementul central al identificării caracteristicii de calitate este, conform lui Genichi Taguchi, definirea *stării ideale a funcției de bază* numită *funcție ideală*. Așa cum s-au pronunțat și Pahl și Bietz [P6] respectiv Hubka [H1], motivul folosirii unui răspuns de ieșire în legătură cu energia, este faptul că un *sistem tehnic* este astfel proiectat încât să ofere funcția sa de bază, iar pentru aceasta trebuie să fie utilizat cel puțin unul din cele 3 tipuri de transformări din figura 3.4.

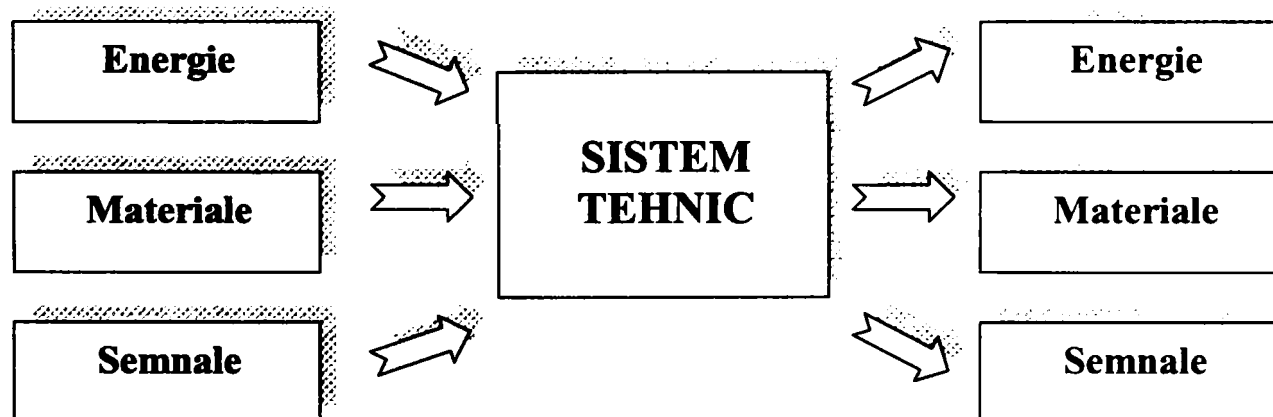


Fig. 3.4 Conversia energiei, materialelor, semnalelor într-un sistem tehnic

Nair [N2], citându-l pe Phadke [P7], consideră că găsirea răspunsului sistemului care să îndeplinească toate condițiile este relativ dificilă, chiar uneori imposibilă cu nivelul cunoștințelor ingineresti implicate. Genichi Taguchi spune pe de altă parte că metodele sale vor fi ineficiente dacă aceste condiții nu sunt îndeplinite. De aceea un răspuns al sistemului aflat în legătură cu energia este vital pentru a fi siguri că răspunsul este sub forma unei *funcții monotone*. În concepția lui Box și Draper [B4] *proprietatea de monotonie* implică faptul că efectele factorilor de control să fie simultan *liniare* și *aditive*. Wasserman [W3], consideră că din punct de vedere al metodologiei suprafețelor de răspuns (RSM), cerințele de monotonie sunt echivalente cu presupunerea că *răspunsul funcțional real* este pur aditiv și liniar în regiunea de interes. Legătura cu punctul de vedere al lui Genichi Taguchi se bazează pe ipoteza că, caracteristicile de calitate legate de energie, sunt folosite pentru a se asigura că interacțiunile sunt *minime*. În această ordine de idei, *transformarea cheie a procesului* este deosebit de importantă pentru identificarea și înțelegerea funcției ideale a procesului, iar prin alegerea unui răspuns funcțional bun există o șansă bună să se evite interacțiunile. Fără interacțiuni va exista aditivitate, consistență și reproductibilitate, iar experimentele de laborator vor putea fi reproduse mărindu-se simultan și eficiența cercetării.

3.2 Metoda Taguchi și Metoda TRIZ

TRIZ este acronimul rusesc pentru TIPS (Theory of Inventive Problem Solving). TRIZ este o metodă pusă la punct de Genrikh Altshuller [A2] despre cum poate fi redus timpul de inventare, cum poate fi structurat un proces pentru a se facilita gândirea constructivă. Prin studiul a peste 400.000 de patente G. Altshuller a observat o abordare comună pentru rezolvarea problemelor ingineresti. În centrul celei mai bune soluții, descrise de invenție, există un conflict ingineresc sau *contradicție*. Cele mai bune invenții rezolvă în mod consistent contradicțiile, fără compromisuri, iar după clasificarea soluțiilor inovative s-a constatat că există căi naturale pentru obținerea soluțiilor. G. Altshuller a descoperit că atunci când un sistem tehnic este redus astfel încât să arate contradicțiile esențiale, soluțiile inventive elimină complet aceste contradicții. O altă observație importantă este că aceste soluții inventive se repetă în timp și spațiu. O schemă generală a metodologiei TRIZ este dată în Fig. 3.5, iar principalele căi de aplicare în Fig. 3.6.

3.2.1 Analiza “Substanță – Câmp” (SC)

Analiza “Substanță – Câmp” (SU – Field Analysis) [T6] este o tehnică analitică pentru modelarea problemelor relativ la sistemele tehnologice existente. Modelul SC este un model al funcționării minime și controlabile al unui sistem tehnic. Fiecare sistem este creat să efectueze anumite funcții. Funcția dorită este “ieșirea” de la un obiect sau substanță S_1 cauzată de un alt obiect S_2 cu ajutorul unui tip de energie (câmp). Termenul general de substanță se folosește în literatura TRIZ când se face referire la un anumit obiect de orice nivel de complexitate.

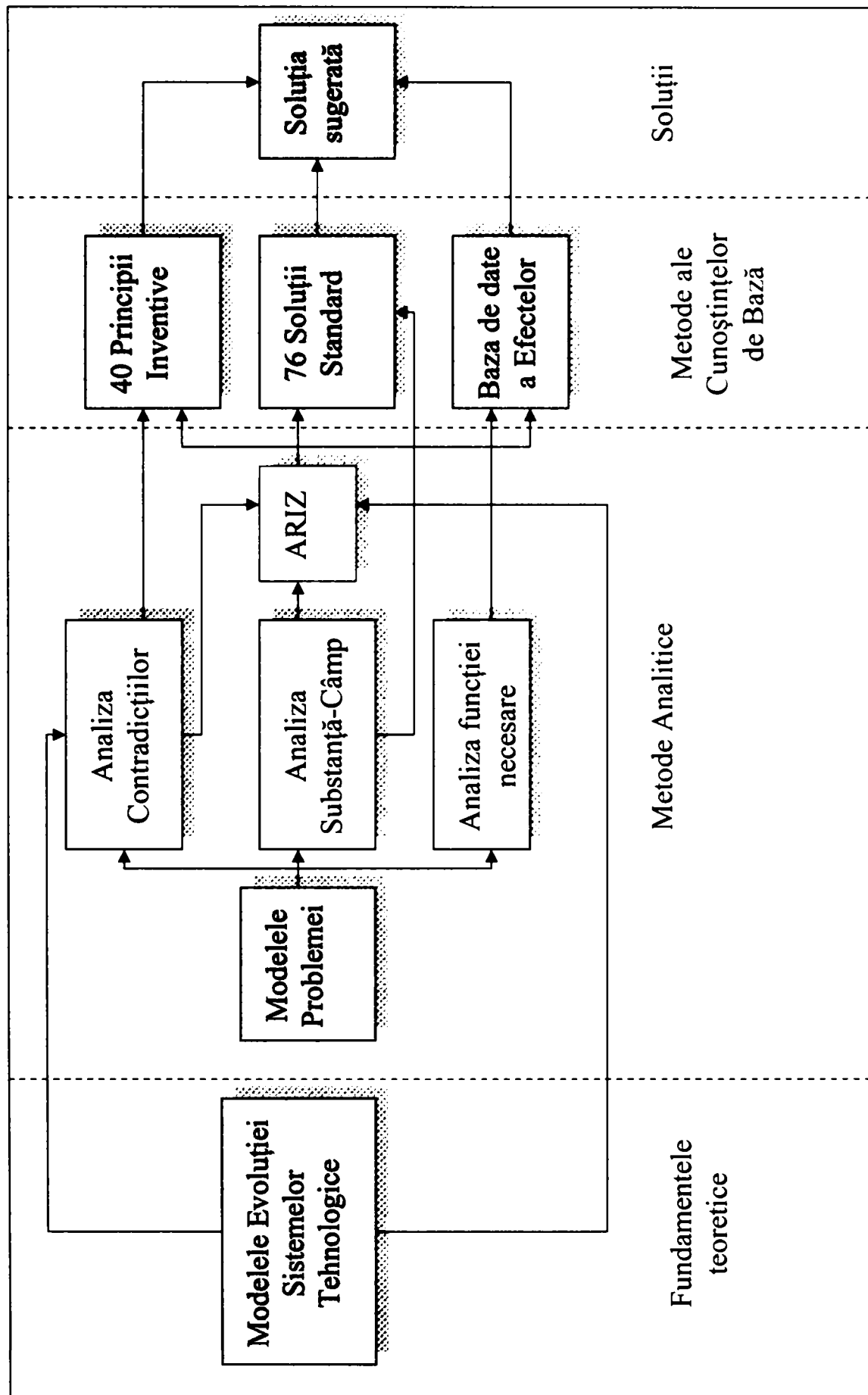


Fig 3.5 Structura metodologiei TRIZ

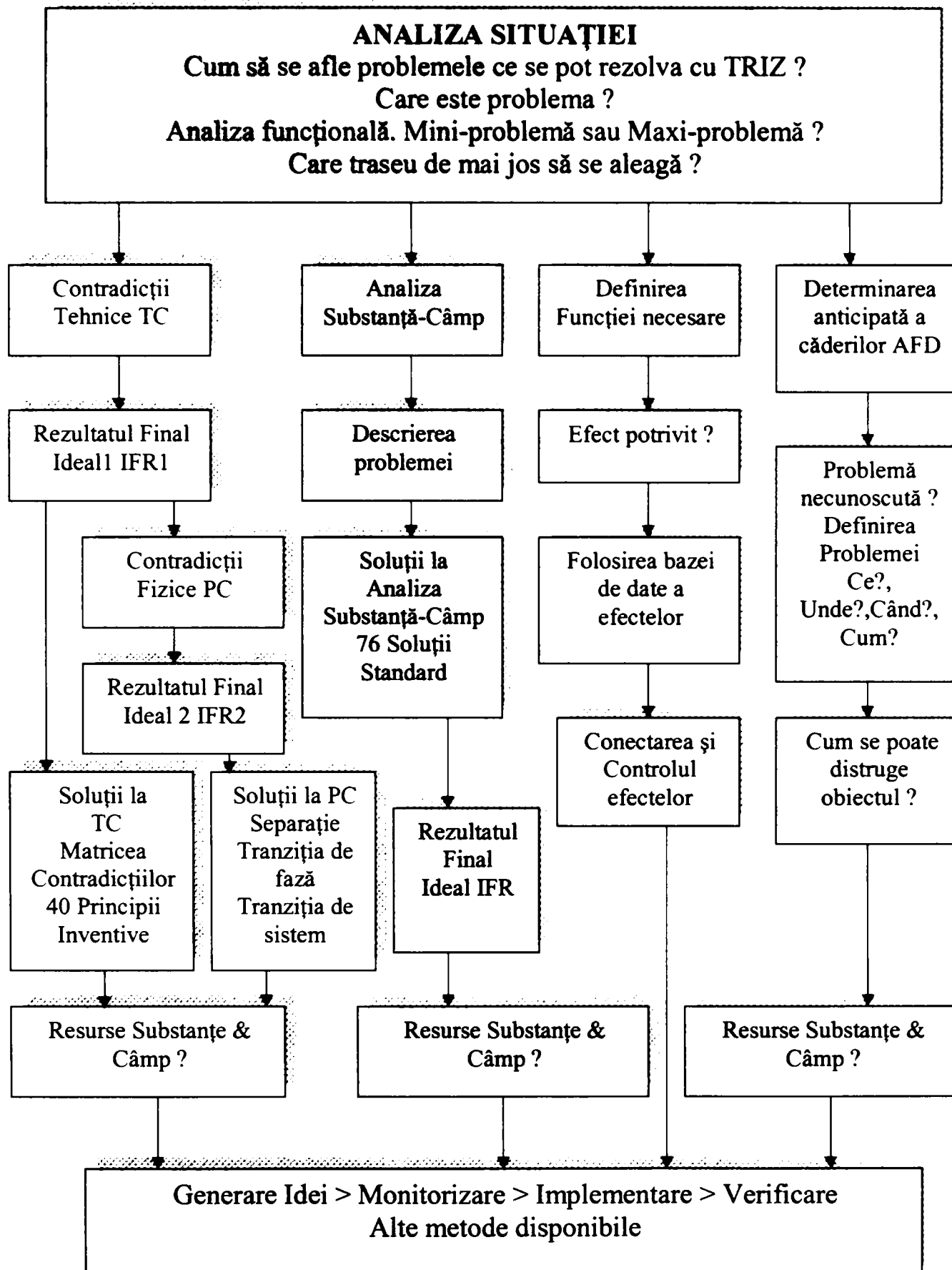


Fig. 3.6 TRIZ – moduri de aplicare

Una din ipotezele de bază ale lui Altshuller [A2] a fost că fiecare sistem tehnic poate fi conceput ca o rețea de subsisteme, fiecare din acestea efectuând o anumită funcțiune specifică. Astfel se poate spune că fiecare sistem are subsisteme și fiecare subsistem se spune că aparține unui supersistem. Subsistemele pot fi subdivizate în mod progresiv, obținându-se în final micronivele ca de exemplu molecule, atomi, electroni etc. Supersistemele sunt rezultatul “creșterii” sistemelor tehnice de la sisteme mai simple la sisteme complexe. În final fiecare supersistem va avea mediul ca și supersistem al său.

Un sistem tehnic, în unitatea sa cea mai mică, efectuează o anumită funcțiune (funcție). Altshuller definește funcțiunea (funcția) ca o interacțiune între două substanțe și un câmp acționând între cele două substanțe. Câmpul (energia) acționează asupra substanței S_2 pentru a modifica sau îmbunătăți interacțiunea cu substanța S_1 . Cele două substanțe se mai numesc “*unealtă*” (substanța S_2) respectiv “*obiect*” (substanța S_1).

Dintre toate posibilitățile existente cele mai importante sunt cele considerate “*interacțiuni utile*” și “*interacțiuni dăunătoare*”. În Fig 3.7 se prezintă un model Substanță – Câmp pentru interacțiuni utile și dăunătoare.

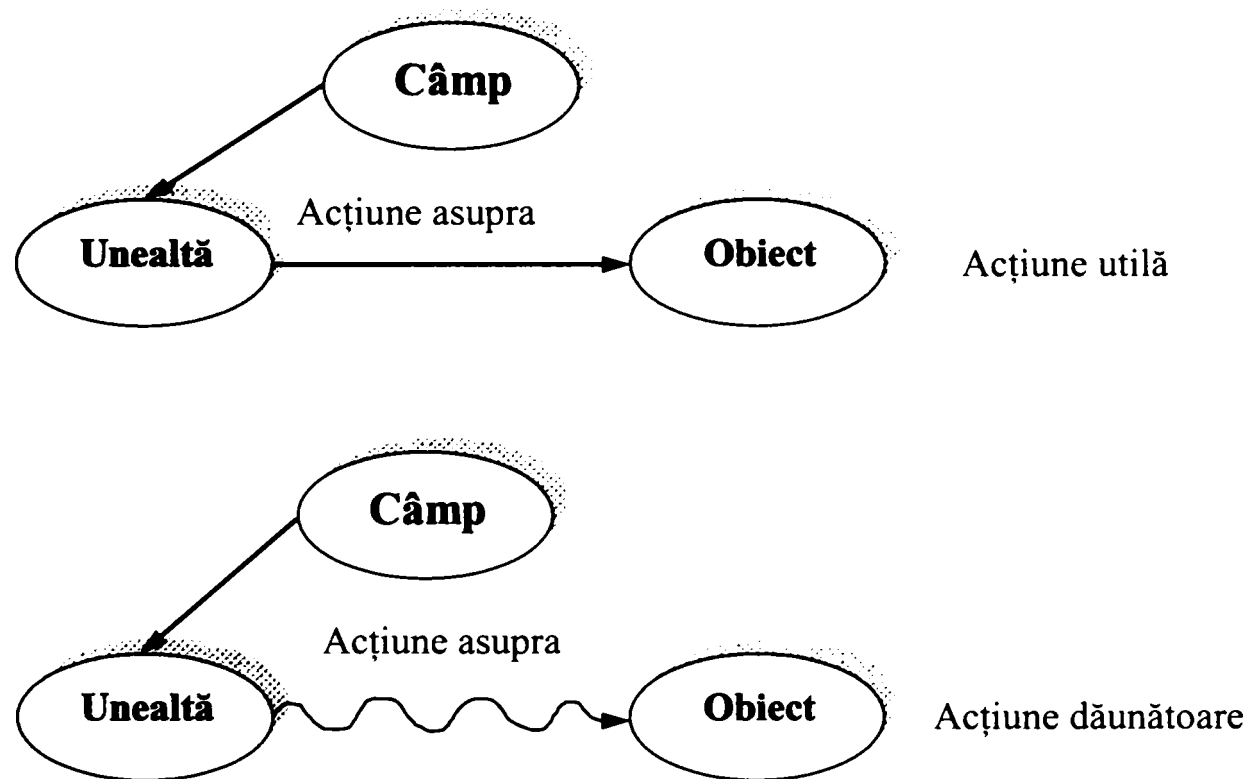


Fig. 3.7 Modelul Substanță – Câmp arătând acțiunile utile și dăunătoare

Analiza SC este folosită pentru focalizarea pe zona de interes și poate fi aplicată atât sistemelor cât și diferitelor nivele de abstractizare. În cazul sistemelor complexe se va aplica modelul SC pentru toate zonele de interes. Conform lui Altshuller, două substanțe și un câmp sunt necesare și suficiente pentru definirea unui sistem tehnic.

Această trilogie sugerează că triunghiul este cel mai mic bloc pentru tehnologie la fel cum triunghiul este cel mai mic bloc pentru trigonometrie.

Există 4 modele de bază:

1. *Sisteme complete eficiente*
2. *Sisteme incomplete* (necesită completare sau un sistem nou)
3. *Sisteme complete ineficiente* (necesită îmbunătățiri pentru crearea efectului dorit)
4. *Sisteme complete dăunătoare* (necesită eliminarea efectelor negative)

Câmpul, (care poate fi el însuși un tip de energie) furnizează energie, forță sau reacție pentru a asigura un anumit efect. Efectul poate fi asupra lui S_1 sau asupra ieșirii informației câmpului. Termenul “*Câmp*” este folosit aici în cel mai larg sens, incluzând câmpurile fizice (electromagnetic, gravitațional, interacțiuni nucleare slabe sau tari), câmpuri chimice, termice, mecanice, acustice, de iluminare etc. Cele două substanțe pot fi sisteme, subsisteme sau obiecte singulare și pot fi clasificate ca unelte sau articole. Un model complet este o triadă a două substanțe și un câmp. Problema inovativă este modelată pentru a arăta relația între două substanțe și un câmp, iar în cazul sistemelor complexe modelarea se face prin modele SC multiple conectate.

Există 4 etape pentru construirea unui model SC:

1. Identificarea elementelor.

Câmpul acționează fie asupra ambelor substanțe fie este conținut în S_2 ca și sistem.

2. Construirea modelului

După completarea acestor 2 etape se evaluează eficiența și gradul de completare al sistemului. Dacă unele elemente lipsesc se încearcă identificarea acestora.

3. Alegerea soluțiilor din cele 76 de Soluții Standard

4. Crearea unui concept pentru soluție

Observație: Etapele 3 și 4 necesită alte metode TRIZ

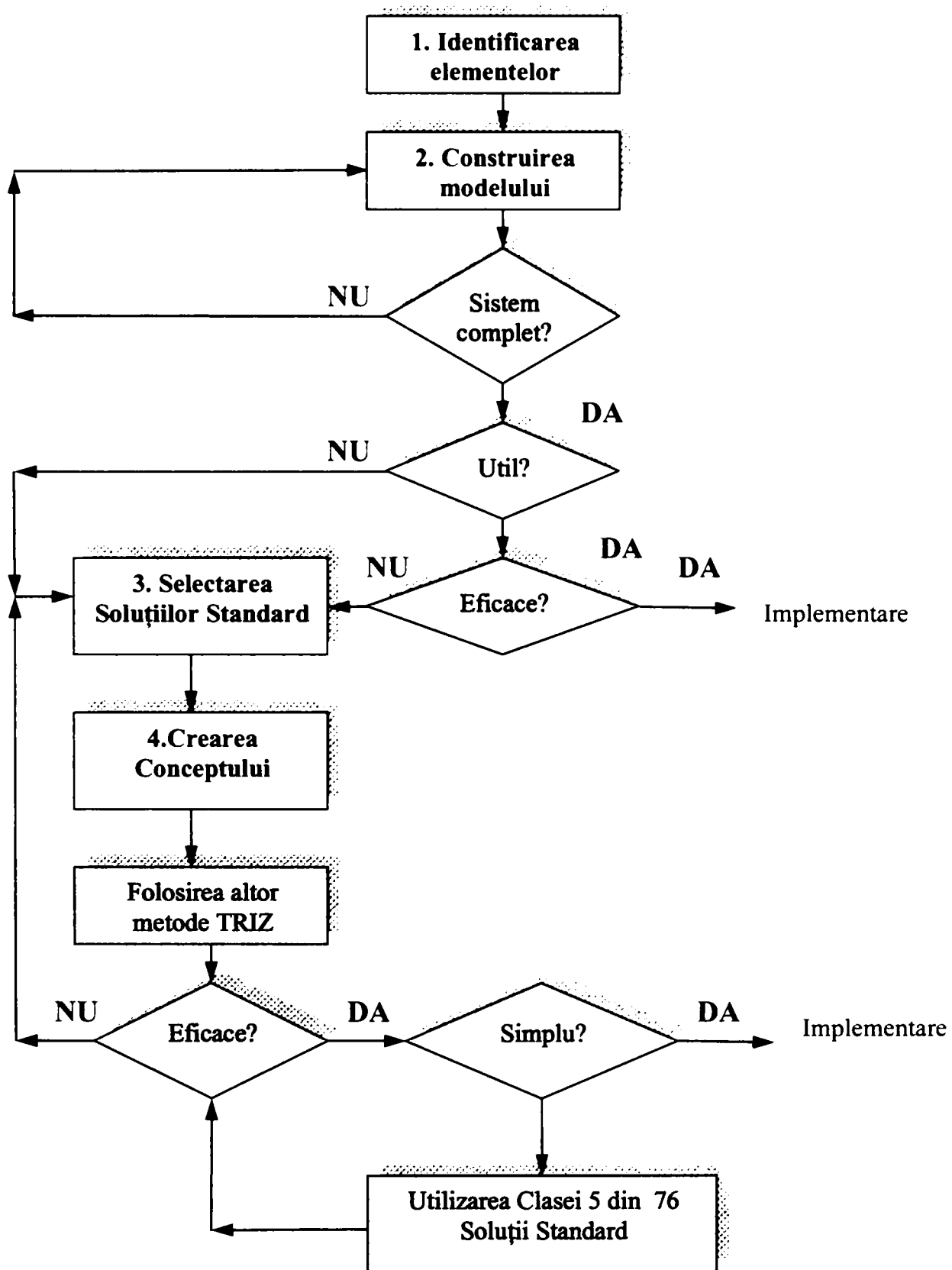


Fig. 3.8 Schema generală de rezolvare a problemelor cu ajutorul analizei SC

O dată ce funcția unui sistem tehnic este reprezentată în mod simplu printr-un model SC, atunci este posibil să se identifice problema curentă a sistemului cu o problemă “ generică ” asociată cu modelul SC. Altshuller a arătat că astfel de probleme “ generice ” au fost de asemenea rezolvate anterior iar soluțiile fac parte din diverse invenții. Cele 76 Soluții Standard au fost dezvoltate de Altshuller și școala sa între 1975 și 1985 și sunt grupate în 5 categorii mari [T7],[T8],[T9],[T10],[T11] după cum urmează:

1. Îmbunătățirea sistemului fără sau cu schimbări minore

13 soluții standard

Observație: Se mai utilizează și definiția lui Apte [A4] “ *Construiește sau distruge un SC*”, de obicei o “ *acțiune utilă* ” este construită în timp ce o “ *acțiune dăunătoare* ” este distrusă prin SC.

2. Îmbunătățirea sistemului prin schimbarea sistemului

23 soluții standard

Observație: Se mai utilizează definiția “ *Dezvoltă (sau creează) un SC* ”

3. Tranzițiile sistemului

6 soluții standard

Observație: Tranziția de la un sistem de bază la un super-sistem sau la un sub-sistem până la micro-nivel

4. Detectare și Măsurare

17 soluții standard

Observație: Se măsoară sau se detectează orice într-un sistem tehnic

5. Strategii pentru simplificare și îmbunătățire

17 soluții standard

Observație: Se descrie cum să se introducă în sistem substanțe și câmpuri

Total: 76 soluții standard

Cele 76 de Soluții Standard sunt utile pentru problemele inventive de Nivel 3 care reprezintă 18% din totalul invențiilor și care îmbunătățesc substanțial sistemele existente.

O contradicție este rezolvată în interiorul sistemului existent cel mai adesea prin introducerea unui element complet nou. Aceste invenții implică în mod uzual tehnologii caracteristice altor domenii decât cele în care apare problema inventivă. Soluția rezultată produce o schimbare majoră în paradigmele domeniului confruntat cu problema respectivă.

O inovație de nivel 3 este de obicei în afara domeniului de idei și principii acceptate în industrie. Uzual cele 76 de Soluții Standard sunt folosite ca o etapă în ARIZ [M6]după ce a fost aplicată analiza SC.

În Fig. 3.9 se prezintă schema generală de utilizare a celor 76 de Soluții Standard.

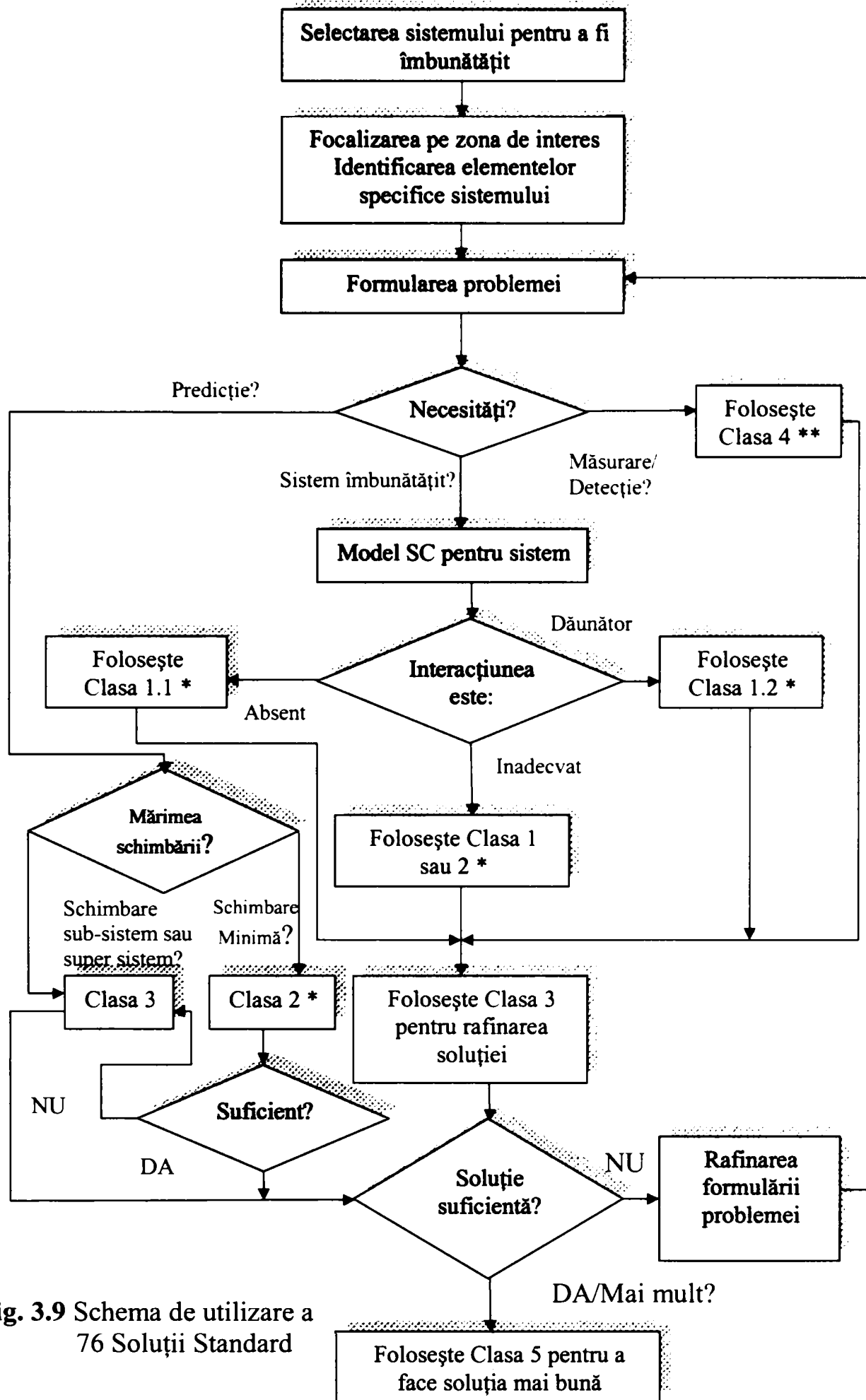


Fig. 3.9 Schema de utilizare a 76 Soluții Standard

* Clasa 1 și 2

- Potrivirea Modelului SC cu Standardul
- Completarea sau modificarea Modelului SC
- Identificarea substanțelor sau câmpurilor de introdus
- Considerarea Efectelor pentru îmbunătățirea interacțiunilor

** Clasa 4

- Poate fi evitată măsurarea sau detectarea?
- Focalizarea pe elementul cu proprietatea ce va fi măsurată
- Modelarea și potrivirea cu Standardul

3.2.2 Rezultatul Final Ideal (IFR)

Corespunzător legii idealității “ *Toate sistemele tehnice evoluează spre idealitate* “, adică devin mai fiabile, simple, eficiente, “ mai ideale “, un “ *Sistem Ideal* “ poate fi definit ca sistemul care își execută funcțiunile fără a exista. Fiecare proiectant trebuie să definească o funcție ideală pe care sistemul trebuie să o asigure, funcție numită și *Rezultatul Final Ideal (IFR)*.

Conceptul IFR poate fi aplicat la produse, procese, substanțe, făcându-se referire la “ *Prodot Ideal* “, “ *Proces Ideal* “, “ *Substanță Ideală* “. Un *Prodot Ideal* este unul care deși nu există își îndeplinește rolul, *Procesul Ideal* asigură acțiunile necesare fără consum de energie și timp. *Substanțele Ideale*, deși nu există, ajută câmpurile să acționeze asupra lor în maniera cerută.

Folosirea IFR permite realizarea efectelor și funcțiunilor fără adăugarea la sistemul tehnic de noi procese sau materiale.

IFR oferă:

- Descrierea liberă a implementării (după ce problema a fost rezolvată)
- Focalizarea asupra funcțiilor necesare, și nu asupra proceselor sau echipamentelor folosite la momentul analizei
- Elimină reparațiile prin rezolvarea “ adevăratei probleme “ de la început
- Conduce la o “Gândire Inovatoare”

IFR are următoarele caracteristici:

- Elimină deficiențele sistemului original
- Menține avantajele sistemului original
- Nu face sistemul original mai complicat (folosește resursele disponibile)
- Nu introduce noi dezavantaje
- Elimină Inerția Psihologică
- Refuză compromisurile
- Stabilește clar limitele soluțiilor

$$\text{Idealitatea} = \frac{\text{Beneficii}}{\text{Costuri} + \text{Dezavantaje}}$$

3.2.3 Sistemul Sistemelor și Resursele

Altshuller [A2] descrie fiecare sistem tehnic ca un sistem ierarhic cu 3 nivele: *sistemul de bază, subsistemele și supersistemul*. Orice sistem tehnic poate fi gândit ca unul ce furnizează anumite funcțiuni tehnice. Orice sistem de bază conține de aceea subsisteme care furnizează o paletă de funcțiuni.

Subsistemele pot fi gândite ca părți, componente etc, mergând până la molecule, ioni, atomi.

Fiecare sistem de bază aparține unui supersistem mergând până la nivelul mediului extern. Procesul de evoluție a sistemelor implică îmbunătățiri în unele componente, lucru ce creează conflicte cu componentele care nu sunt atât de dezvoltate, lucru care motivează îmbunătățirea în succesiune a acestora.

Realizarea acestui deziderat se face cu ajutorul *Resurselor Disponibile* și îmbunătățirea continuă până când aceste resurse sunt utilizate complet, sistemul atingând în final forma sa ideală.

În TRIZ sistemul este considerat ca “ *sistem al sistemelor* ” (sistem ierarhic), compus din supersistem, sistem de bază și subsisteme, astfel toate resursele disponibile ale acestora sunt considerate “ *resurse* ” ale sistemului.

- Resurse de spațiu
- Resurse de timp
- Resurse de sistem
- Resurse de funcțiuni
- Informații
- Substanțe
- Resurse de energie și câmpuri

Concluzia este că *progresul spre idealitate* este strâns legat de *utilizarea resurselor disponibile*. La Nivelele 1,2 și 3, soluțiile depind de utilizarea resurselor disponibile și de aceea se mai numesc și *soluții inovative sau inovații*.

Dezvoltarea ulterioară a funcțiilor sistemului este posibilă numai prin adăugarea de noi componente sau înlocuirea componentelor vechi cu altele noi, fiecare nou component aducând resurse adiționale. Soluțiile problemelor de Nivel 4 depind în principal de un nou sistem care implementează funcțiunea dorită fără a rezolva de fapt vreo contradicție. Acestea se mai numesc și *soluții inventive sau invenții*.

3.2.4 ARIZ - Algoritm pentru Rezolvarea Problemelor Inventive

ARIZ este tehnica analitică centrală a lui TRIZ [M6]. Este o procedură sistematică pentru identificarea soluțiilor, fără contradicții aparente, a problemelor foarte complexe. Această analiză pas cu pas conduce în final la reformularea problemei ce trebuie rezolvată și găsirea soluției la aceasta. ARIZ – 85C conține 9 etape:

ETAPA 1 : Identificarea și Formularea problemei**Metoda TRIZ : ISQ – folosirea Chestionarului Situației Inovative**

ISQ conține:

1. Numește sistemul și funcțiunea sa primară
2. Care este structura sistemului actuală și cea dorită?
3. Cum execută sistemul funcțiunea primară acum?
4. Care este mediul de operare?
5. Care sunt resursele disponibile și fenomenele naturale?
6. Care sunt problemele și oportunitățile?
7. Care este mecanismul ce împiedică realizarea? Istoric.
8. Poate fi rezolvată o problemă substituit?
9. Care sunt schimbările permise și interzise ale sistemului?
10. Care sunt restricțiile în termeni financiari, de personal asupra soluției?, Încercări anterioare?, Rezolvat altundeva?

ETAPA 2 : Crearea Modelului SC pentru părțile sistemului care au probleme**Metoda TRIZ : Folosirea Modelului Substanță - Câmp****ETAPA 3 : Formularea IFR și definirea Idealității****Metoda TRIZ : IFR și Idealitatea****ETAPA 4 : Efectuarea unei liste de resurse disponibile (ale sistemului, subsistemelor și ale supersistemului)****Metoda TRIZ : Evaluarea Resurselor Disponibile****ETAPA 5 : Cercetarea bazei de date și căutarea de soluții analoage****Metoda TRIZ : Efectuarea unei liste de resurse disponibile (ale sistemului, subsistemelor și ale supersistemului)****ETAPA 6 : Rezolvarea contradicțiilor tehnice sau fizice prin utilizarea principiilor inventive sau a celor de separare****Metoda TRIZ : Folosirea Matricii Contradicțiilor și Principiilor Inventive pentru rezolvarea Contradicțiilor Tehnice și Principiile Separării pentru rezolvarea contradicțiilor fizice.****ETAPA 7 : Generarea de concepte pentru soluție pornind de la Modelul SC****Metoda TRIZ : Folosirea Bazelor de date ale Efectelor și Standardelor****ETAPA 8 : Implementarea soluțiilor folosind doar resursele disponibile ale sistemului.****ETAPA 9 : Analizarea sistemului modificat pentru a vedea dacă nu apar noi probleme.**

3.2.5 Modul de rezolvare a problemelor cu ajutorul TRIZ

Rezolvarea problemelor cu ajutorul TRIZ începe cu punerea problemei în cadrul de lucru TRIZ și aplicând apoi metodele și tehnicile TRIZ. De exemplu problema de rezolvat poate fi în legătură cu:

1. *O contradicție tehnică*
2. *O contradicție fizică*
3. *O funcțiune trebuie îndeplinită dar nu există o metodă cunoscută*
4. *O acțiune utilă insuficientă*
5. *O acțiune sau un efect dăunător*
6. *O funcțiune trebuie îndeplinită în (cumva) alt mod*
7. *Sistemul este prea complex*

Descrierea problemei ca la (1), (2) și (3) satisface definiția clasică a unei *Probleme Inventive*. Descrierea problemei ca la (4) și (5) se clasifică în categoria *Problemelor Inovative*. Descrierea problemelor ca la (3) și (6) indică posibilitatea unor noi patente. Descrierea problemei ca la (7) satisface Nivelul 4 în sensul că nu sunt evidente contradicții și este necesar un sistem nou mai simplu.

Pentru rezolvarea problemelor se folosesc 5 metode și tehnici TRIZ:

1. **Principiile Inventive pentru rezolvarea contradicțiilor tehnice (Matricea Contradicțiilor)**
2. **Principiile separării pentru rezolvarea contradicțiilor fizice (folosind resursele disponibile)**
3. **Standarde pentru transformarea sistemelor tehnice (pentru îmbunătățirea funcțiilor utile și eliminarea celor dăunătoare)**
4. **Efecte Tehnice și Științifice (pentru sinteza funcțiilor)**
5. **ARIZ – Algoritm pentru rezolvarea Problemelor Inventive complexe (fără contradicții explicite)**

3.2.6 Comparație Taguchi – TRIZ pe baza focalizării funcției

Orice produs sau proces pot fi descompuse în sisteme operaționale orientate funcțional. *Funcția (funcțiunea)* reprezintă o cerință de bază pentru descrierea comportamentului produsului sau procesului și înțelegerea acesteia constituie fundamentul pentru alegerea mijloacelor pentru îmbunătățirea eficienței proiectării indiferent de metoda de proiectare aleasă. În acord cu dicționarul Webster, funcția (funcțiunea) are 3 explicații de bază.

- ↓ Acțiunea sau operațiile așteptate de la o persoană sau obiect.
- ↓ Acțiunea pentru care o persoană sau obiect sunt folosite sau pregătite.
- ↓ Operarea într-o manieră corectă sau așteptată.

Există un consens în ceea ce privește ideea că o *funcție (funcțiune)* descrie acțiunile unei persoane sau ale unui obiect (în sens larg) și care pot fi exprimate sub forma unei combinații a unui *substantiv* cu un *verb*. În Proiectarea Robustă Taguchi funcția este definită ca fiind ieșirea dorită, identică cu definiția din Webster, dar cu un accent mai mare în termeni de *funcție ideală*, adică cu un accent sporit asupra acelor elemente fundamentale pe care un sistem trebuie să le cunoască pentru ca transferul de energie să se realizeze fără pierderi. În această ordine de idei, în Proiectarea Robustă Taguchi, funcția este definită ca fiind *transformarea energiei*.

În metodologia TRIZ definirea *funcției (funcțiunii)* are în general același înțeles cu amendamentul unei “*gândiri negative*” în ceea ce privește *contradicțiile fizice*. În TRIZ se urmărește “*livrarea*” tuturor funcțiilor (funcțiunilor) sistemului simultan cu maximizarea resurselor existente.

| Metoda de proiectare | Focalizarea funcției | Unde poate fi aplicată cel mai bine | Procesul de gândire | Accent |
|-----------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| Proiectare Robustă Taguchi | Transformarea energiei | Optimizarea unei tehnologii specifice sau optimizarea conceptului sau structurii unui proiect | Cum poate fi optimizat un sistem tehnic (tehnologic) dat sau într-o structură dată, astfel încât să devină insensibil la efectele condițiilor incontrollable | Aplicarea efectivă a strategiilor ingineresti. Identificarea funcției (relației) ideale. Se începe cu un răspuns adecvat al sistemului apoi se maximizează funcția utilă a sistemului |
| TRIZ | Funcția de bază | Structura și fundamentul sistemului în proiectarea conceptuală | Gândire negativă. Se începe cu conflicte sau contradicții și se încearcă rezolvarea acestora | Abordarea contradicțiilor. Se începe cu parametrii de proiectare și apoi se revine la cerințele funcționale |

Tab. 3.2 Comparație Taguchi-TRIZ pe baza focalizării funcției

3.2.7 Comparație Taguchi –TRIZ pe baza efectelor factorilor și contradicțiilor

Se consideră două caracteristici de calitate Q_1 și Q_2 și un factor de control F . În Fig. 3.10 se arată dependența caracteristicilor de calitate funcție de 3 valori ale factorului de control, în care cu F_2 s-a notat valoarea nominală a lui F . Se observă că în cazul în care $F_2 \rightarrow F_1$, caracteristica de calitate Q_2 se îmbunătățește iar caracteristica de calitate Q_1 se înrăutățește. Dacă $F_2 \rightarrow F_3$, caracteristica de calitate Q_1 se îmbunătățește iar caracteristica de calitate Q_2 se înrăutățește.

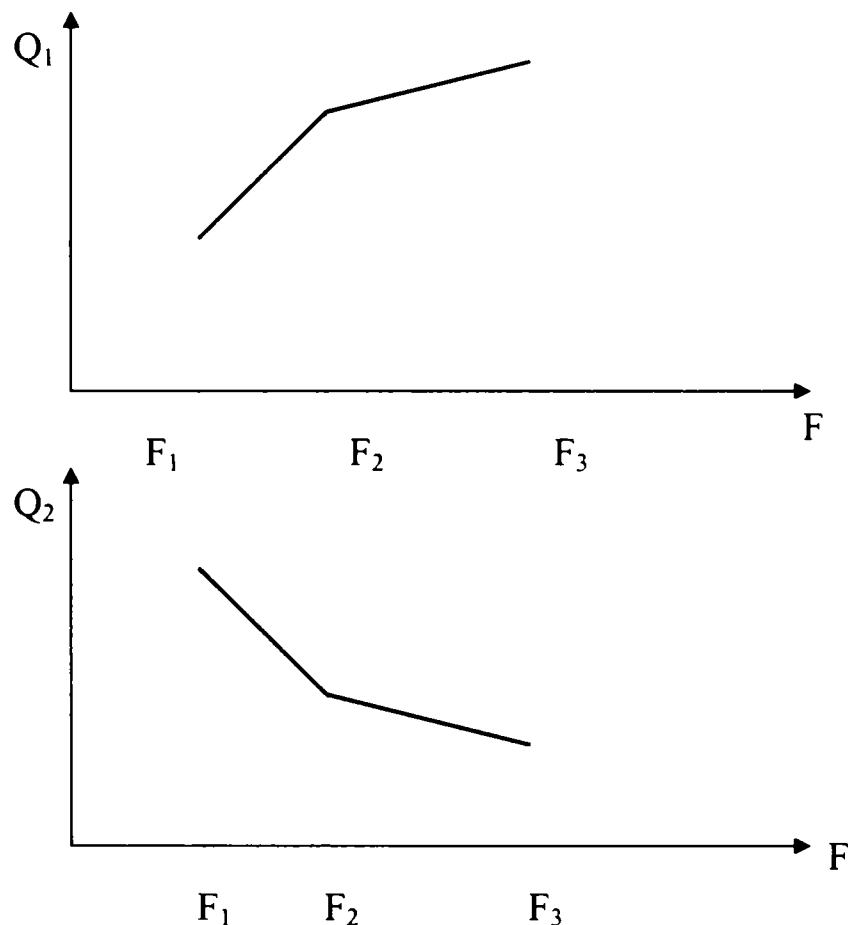


Fig. 3.10 Graficele efectelor factorului de control F asupra caracteristicilor de calitate Q_1 și Q_2

În TRIZ reprezentarea grafică a unei *contradicții tehnice* este de formă hiperbolică și este prezentată în Fig. 3.11. Reprezentarea grafică de tip hiperbolic a efectelor factorilor cu ajutorul metodei Taguchi indică prezența unei *contradicții tehnice* în sensul metodei TRIZ.

Dacă se consideră reprezentarea grafică a efectelor factorului de control F asupra caracteristicii de calitate Q din Fig. 3.12 (a), atunci cea mai bună valoare a factorului de control F este la valoarea F_2 . Dacă $F_2 \rightarrow F_1$ sau $F_2 \rightarrow F_3$, atunci caracteristica de calitate Q se înrăutățește, lucru care arată clar că valoarea cea mai bună este F_2 .



Fig. 3.11 Forma hiperbolică caracteristică unei contradicții tehnice în TRIZ

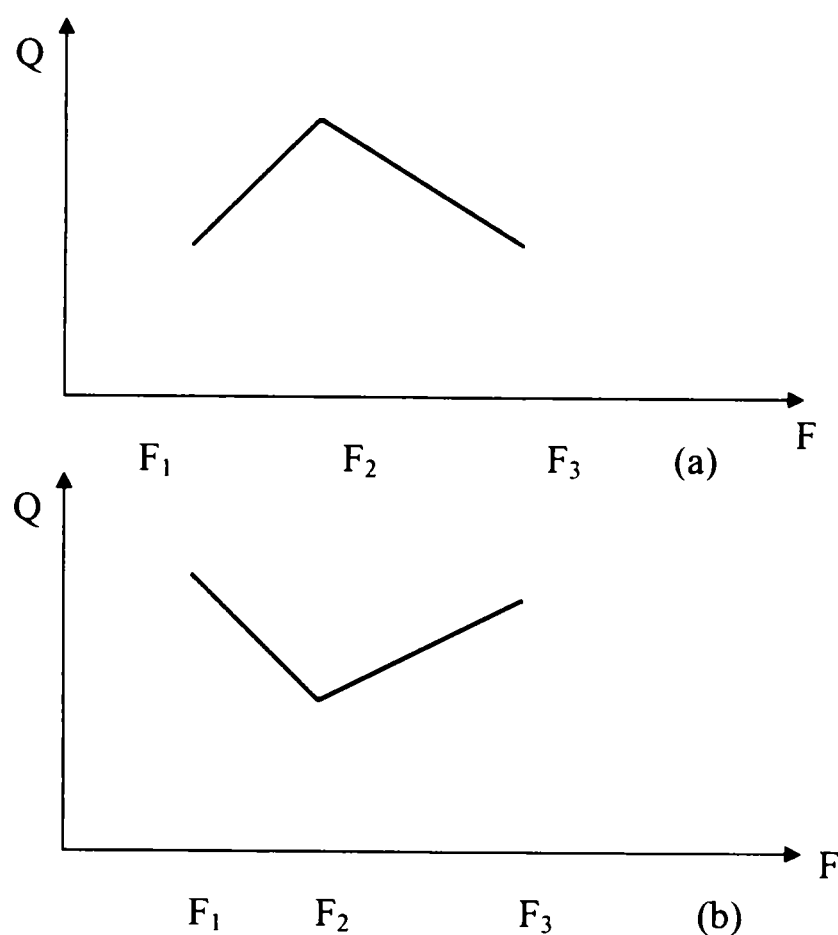


Fig. 3.12 Graficele efectelor factorului de control F asupra caracteristicii de calitate Q

Dacă se consideră reprezentarea grafică a efectelor factorului de control F asupra caracteristicii de calitate Q din Fig. 3.12 (b), atunci metoda Taguchi spune că cea mai bună setare a factorului F este fie F_1 fie F_3 iar TRIZ spune că pentru a obține cea mai bună caracteristică de calitate Q, F trebuie să fie la fel de bine “jos” sau “sus”.

În TRIZ reprezentarea grafică a unei *contradicții fizice* este de formă parabolică și este prezentată în Fig. 3.13. Reprezentarea grafică de tip parabolic a efectelor factorilor cu ajutorul metodei Taguchi indică prezența unei *contradicții fizice* în sensul metodei TRIZ.

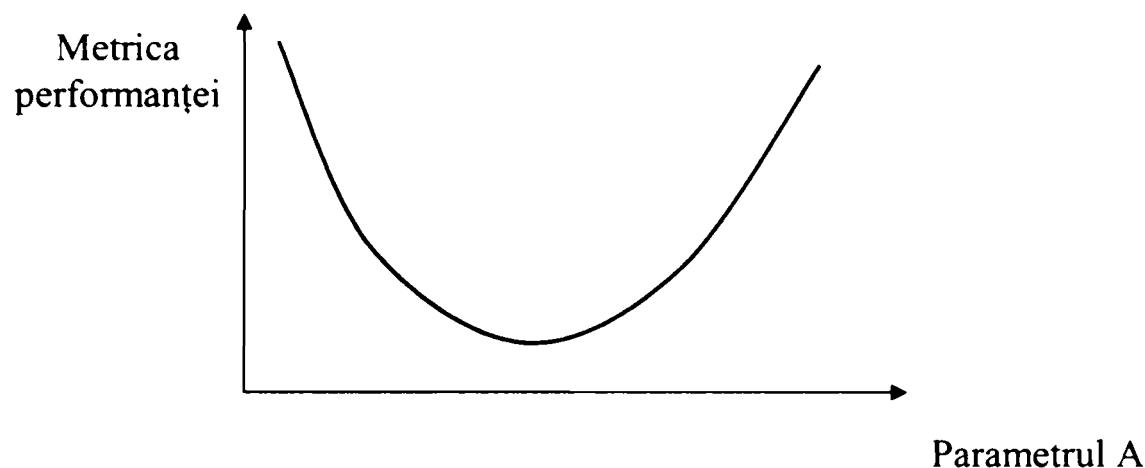


Fig. 3.13 Forma parabolică caracteristică unei contradicții fizice în TRIZ

Metoda Taguchi arată clar contradicțiile tehnice și fizice și ajută Metoda TRIZ în sensul că identificarea problemei devine mai ușoară iar apoi cu ajutorul tehnicilor din TRIZ aceste contradicții pot fi rezolvate. Pe de altă parte soluțiile inovative generate prin TRIZ pot fi evaluate și implementate prin planificarea unor experimente, cu ajutorul metodei Taguchi, în care setările parametrilor pot fi optimizate și de asemenea poate fi selectat cel mai bun proces.

3.2.8 Comparație Taguchi –TRIZ pe baza raportului Semnal/Zgomot

Metoda Taguchi poate fi considerată ca o metodă statistică experimentală utilizată pentru optimizarea unui proces tehnologic dat sau a unui produs dat cu referire la o *funcție obiectiv* (raportul Semnal/Zgomot) definită ca $\eta = (\Sigma \text{Utile}) / (\Sigma \text{Dăunătoare}) = (\text{Media pătratică}) / (\text{Varianță})$. Varianța se reduce în prezența zgomotelor și în final procesul/produsul devine “*mai robust*” la un “*cost mai scăzut*”. Atât pentru metoda Taguchi cât și pentru TRIZ (relația 3.1), valoarea ideală este $+\infty$. În metoda Taguchi acest lucru arată că de primă importanță este *reducerea varianței* (spre zero) în loc de *îmbunătățirea mediei* ca în abordarea clasică. Pentru aceasta trebuie identificat un factor de ajustare care are un efect minim asupra varianței dar care are un efect major asupra mediei și care se utilizează pentru aducerea mediei la valoarea țintă. Funcția obiectiv folosită în metoda Taguchi, numită și raport Semnal/Zgomot, este similară cu Rezultatul Ideal Final, IFR, din TRIZ în sensul că furnizează o *măsură a idealității sistemului*. Cu alte cuvinte, îmbunătățirea raportului Semnal/Zgomot ne aduce mai aproape de IFR. În metoda TRIZ există două direcții principale de a duce un sistem dat spre idealitate:

- Îmbunătățirea unei acțiuni utile parțiale sau/și ineficiente.
- Eliminarea acțiunilor sau/și efectelor dăunătoare.

Ambele direcții pot fi atinse prin utilizarea Analizei Substanță-Câmp și a Trendurilor evoluției. Pe de altă parte există 3 căi posibile pentru eliminarea acțiunilor/efectelor dăunătoare:

- ✓ Eliminarea cauzei de bază a acțiunii dăunătoare.
- ✓ Eliminarea a însăși acțiunii dăunătoare.
- ✓ Eliminarea efectelor acțiunii dăunătoare.

Este evident că primele două căi sunt foarte greu de atins. Prima cale are un caracter idealist iar cea de-a doua poate conduce la schimbarea totală a modelului Substanță-Câmp sau a implementării acestuia. Cea de-a treia cale este mai realistă, în sensul că se elimină efectele acțiunilor dăunătoare chiar în condițiile menținerii acțiunii dăunătoare (în multe cazuri este posibil ca acțiunile dăunătoare să producă și unele funcțiuni utile a căror eliminare nu este de dorit). Legătura cu metoda Taguchi este evidentă, această cale reprezentând în fapt *principiul de bază* al Proiectării Robuste Taguchi.

3.2.9 Comparație Taguchi –TRIZ pe baza etapelor procesului de rezolvare a problemelor

Procesul de rezolvare a problemelor în TRIZ, **DSSE** (**D**efine-**S**elect-**S**olve-**E**valuate) ; (Definește-Selectează-Rezolvă-Evaluează), păstrează principiul **PDCA** (**P**lan-**D**o-**C**heck-**A**ct) ; (Planifică-Efectuează-Verifică-Acționează) al lui Edwards. W. Deming (Fig. 3.14).

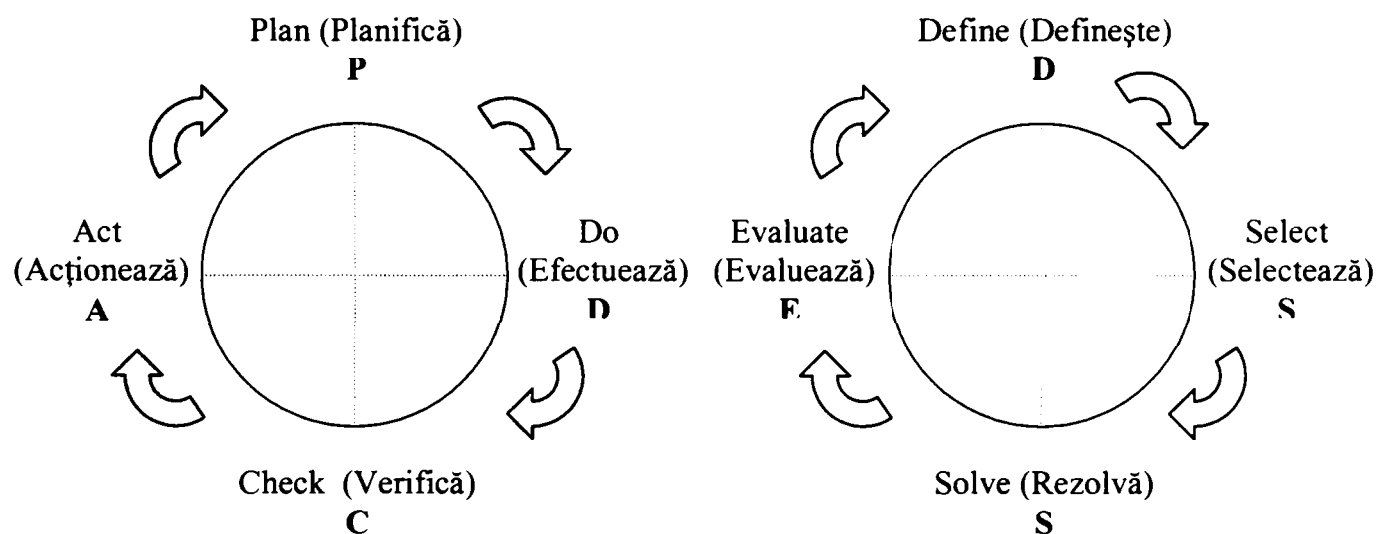


Fig. 3.14 Modelul PDCA a lui Deming și modelul DSSE utilizat în TRIZ

1. *Etapa I TRIZ – Definește.* Se definește problema în terminologie TRIZ, ca și contradicții tehnice sau fizice (care să fie eliminate), ca acțiuni parțiale sau ineficiente (care să fie îmbunătățite), respectiv ca și acțiuni/efecte dăunătoare (care să fie eliminate).
2. *Etapa II TRIZ – Selectează.* Selectarea din câteva probleme inovative și identificarea metodelor și tehnicilor TRIZ adecvate.
3. *Etapa III TRIZ – Rezolvă.* Rezolvarea problemei (contradicții, acțiuni utile insuficiente, efecte dăunătoare).
4. *Etapa IV TRIZ – Evaluează.* Evaluarea și verificarea că problema este rezolvată și nu apar noi probleme.

Metoda Taguchi clasifică importanța scopurilor urmărite ca în Fig. 3.15 și este utilă în procesul de rezolvare TRIZ deoarece poate fi folosită pentru următoarele aspecte:

- ✓ Identificarea contradicțiilor din graficul efectelor factorilor de control (§ 3.1.6).
- ✓ Utilizarea “*acțiunilor utile*” ca și caracteristici de calitate care să fie apoi maximizate (ca și în tipul “Cu cât mai mare cu atât mai bine”, LTB).
- ✓ Includerea în timpul experimentelor a “*acțiunilor dăunătoare*” în categoria factorilor de zgomot, insensibilitatea la factorii de zgomot făcând procesul/produsul mai robust.
- ✓ Graficele efectelor factorilor de control sunt folosite pentru a decide cum pot fi îmbunătățite simultan două sau mai multe caracteristici, chiar dacă acestea au comportări contradictorii în raport cu un factor de control.
- ✓ Evaluarea procesului modificat așa cum este el sugerat de analiza Substanță-Câmp și/sau ARIZ chiar prin îmbunătățirea caracteristicilor de calitate, făcând procesul mai robust și respectiv prin eliminarea/minimizarea contradicțiilor care sunt verificate/puse în evidență cu ajutorul graficelor efectelor factorilor de control.

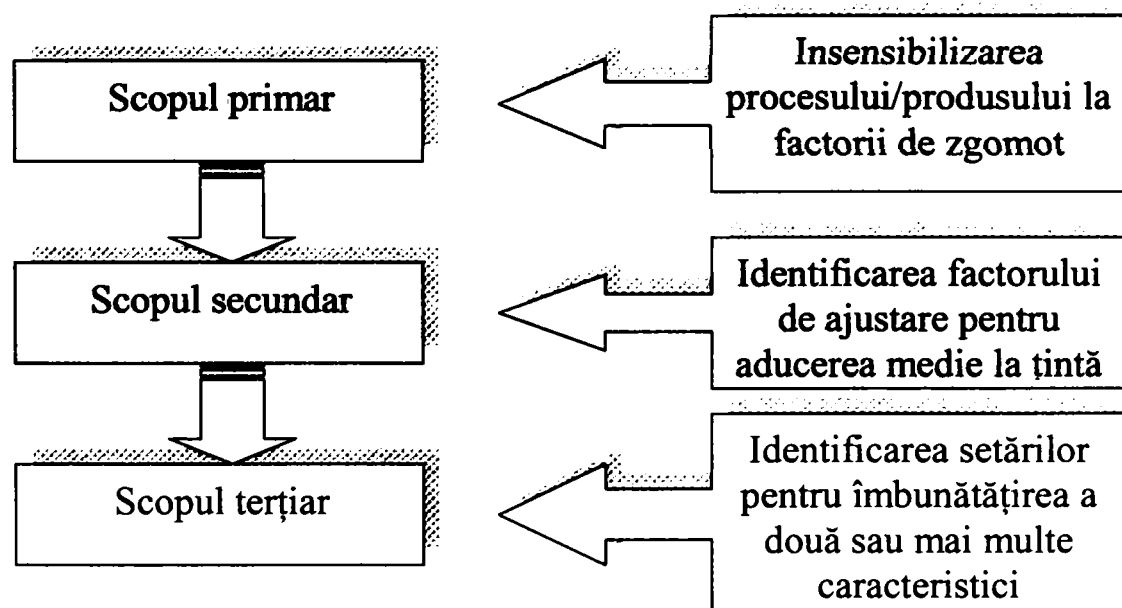


Fig. 3.15 Clasificarea importanței scopurilor urmărite în metoda Taguchi

3.2.10 Utilizarea conceptelor și tehnicilor metodei Taguchi la atingerea caracteristicilor și obiectivelor IFR

Rezultatul Final Ideal, IFR, utilizat în terminologia TRIZ are următoarele caracteristici:

- Eliminarea deficiențelor sistemului inițial.
- Păstrarea avantajelor sistemului inițial.
- Nu complică sistemul inițial prin utilizarea numai a resurselor disponibile sau libere.
- Nu introduce noi dezavantaje.

Metoda Taguchi este utilă pentru atingerea obiectivelor IFR datorită următoarelor aspecte:

- ✓ Reduce varianța, adică efectele dăunătoare ale factorilor de zgomot.
- ✓ Menține media sau dacă e cazul o ajustează la valoarea țintă.
- ✓ Factorii de control sunt astfel aleși încât nivelele lor să fie ușor de setat și fără costuri suplimentare.
- ✓ Pe lângă concentrarea asupra îmbunătățirii funcției principale, se măsoară/evaluatează și efectele secundare pentru evitarea apariției dezavantajelor suplimentare.

3.2.11 Utilizarea metodei Taguchi la tehnica “Trendul Evoluției”

| TRIZ | Metoda Taguchi |
|--|---|
| Identificarea problemelor potențiale în viitor. | Metoda Taguchi este o metodă R&D care include însă “zgomotul” ce poate apare în etapele ulterioare de fabricare, utilizare/operare, îmbătrânire/uzare. |
| Cele 4 etape ale Evoluției | - |
| Sinteza | Metoda Taguchi nu este utilizată în faza de dezvoltare/proiectare a conceptului. |
| Selectarea și îmbunătățirea elementelor sistemului | Metoda Taguchi este ideală și se folosește cu precădere la îmbunătățirea elementelor unui sistem. |
| Dinamizarea elementelor sistemului | Metoda Taguchi se folosește și pentru optimizarea sistemelor “modificate” sau “dinamizate”. |
| Auto-dezvoltarea elementelor sistemului | Metoda Taguchi nu se folosește în această etapă. De fapt merge chiar în direcție opusă, sugerându-se că tot feedback-ul trebuie să fie înlăturat iar Metoda Taguchi să optimizeze elementele individuale după care feedback-ul să fie restabilit. |

Tab. 3.3 Posibilități de utilizare a metodei Taguchi în tehnica “Trendul Evoluției”

3.2.12 Utilizarea metodei Taguchi la strategia “Utilizarea Resurselor”

Identificarea resurselor este o strategie foarte des utilizată în metoda TRIZ. Prin “resurse”, în metodologia TRIZ, se înțelege “*orice*” există în cadrul sau în jurul unui sistem și care nu este utilizat la potențial maxim.

| TRIZ | Metoda Taguchi |
|--|---|
| Identificarea resurselor neutilizate sau utilizate parțial/ineficient. | Metoda Taguchi se focalizează spre optimizarea echipamentului existent, materiile prime disponibile și respectiv forța de muncă disponibilă. De asemenea metoda Taguchi determină care <i>resursă</i> contribuie în mod dominant la <i>varianță</i> , recomandată de Proiectarea Toleranțelor. Calitatea resursei dominante este îmbunătățită în mod selectiv |
| Evaluarea modului de maximă utilizare a resurselor sistemului | - |
| <i>Resurse materiale</i> (sistem, subsisteme, mediu/supersistem) | De obicei resursele sistemului/subsistemului sunt folosite ca Factori de Control (dacă nivelele acestora pot fi setate ușor și fără costuri mari). Resursele mediului sunt denumite “zgomote” (controlul lor este dificil și costisitor). Metoda Taguchi determină care din resurse contribuie în mod dominant la reducerea varianței și de asemenea face procesul mai robust la variațiile de mediu. |
| <i>Resurse energetice</i> (mecanice, termice, electrice, chimice etc.). | Transformările energetice sunt implicate în toate funcțiunile fie că sunt utile fie că sunt dăunătoare. Experimentarea pe baza metodei Taguchi are ca scop minimizarea energiei necesare pentru funcția utilă astfel încât energia în exces (de preferat deloc) să nu rezulte în efecte dăunătoare. Scopul metodei Taguchi este cea mai bună utilizare a energiei. |
| <i>Resurse de spațiu</i> (în interiorul/în jurul sistemului/subsistemului/supersistemului | Dacă un proces este desfășurat în spațiu atunci efectele zgomotului asupra produselor vor fi receptate diferit la locații diferite (se face o mediere asupra întregii durate a procesului). Procesul optimizat va minimiza varianța asupra întregului lot de produse. Resursa de spațiu este folosită în mod efectiv pentru a face procesul robust. |
| <i>Resurse de timp</i> (înainte/în timpul/după ce funcția este îndeplinită în sistem/subsisteme. | Dacă un proces se desfășoară în mod continuu atunci efectul zgomotelor este diferit la momente de timp diferite (se face o mediere asupra întregii linii de fabricație). Procesul optimizat va minimiza varianța asupra întregului lot de produse. |

Tab 3.4 Folosirea metodei Taguchi la strategia “Utilizarea Resurselor” din TRIZ

3.2.13 Posibilități de utilizare pe etape a metodei Taguchi în tehnica ARIZ

| 8 etape în metoda Taguchi | 9 etape în ARIZ-85C |
|--|--|
| <i>Etapa 1.</i> Identificarea funcției principale, a efectelor colaterale și a modurilor de defectare. | <i>Etapa 1.</i> Identificarea și formularea problemei ✓ Graficul efectelor factorilor arată clar contradicțiile. ✓ “Efecte colaterale +modurile de defectare” = “intensificarea contradicțiilor”. |
| <i>Etapa 2.</i> Identificarea factorilor zgomot, testarea condițiilor pentru captarea efectelor acestora. | <i>Etapa 2.</i> Construirea modelului Substanță-Câmp asupra elementelor cu probleme ale sistemului. ✓ Includerea zgomotelor ca și acțiuni dăunătoare în modelul Substanță-Câmp. |
| <i>Etapa 3.</i> Identificarea caracteristicilor de calitate și a funcțiilor obiectiv. | <i>Etapa 3.</i> Formularea IFR și definirea Idealității. ✓ Folosirea raportului Semnal/Zgomot ca măsură a Idealității. |
| <i>Etapa 4.</i> Identificarea factorilor de control și a nivelurilor acestora. | <i>Etapa 4.</i> Lista resurselor disponibile ale sistemului, subsistemelor și supersistemului. ✓ Factorii de control reflectă resursele în echipamente, materii prime și forță de muncă. |
| <i>Etapa 5.</i> Selectarea matricii ortogonale de experiențe. | <i>Etapa 5.</i> Căutarea în baza de date pentru exemple și aflarea unei soluții analoge. |
| <i>Etapa 6.</i> Planificarea experimentelor pe baza matricilor internă și externă și măsurarea caracteristicilor de calitate inclusiv a efectelor colaterale | <i>Etapa 6.</i> Rezolvarea contradicțiilor fizice și tehnice prin folosirea principiilor inventive și de separare. ✓ Graficele efectelor factorilor de control arată contradicțiile dar nu ajută la eliminarea lor. |
| <i>Etapa 7.</i> Analiza ANOVA, graficele efectelor factorilor și precizarea celor mai bune niveluri ale factorilor și a celor mai bune rezultate. | <i>Etapa 7.</i> Modelare Substanță-Câmp pentru generarea soluțiilor folosind soluțiile standard. ✓ Nu se elimină zgomotele ci numai efectele acestora pentru a face sistemul mai robust. |
| <i>Etapa 8.</i> Experimente de confirmare, verificarea aditivității, compararea cu predicțiile și adoptarea de noi setări dacă este cazul. | <i>Etapa 8.</i> Implementarea soluțiilor folosind numai resursele disponibile și libere ale sistemului. ✓ Setarea optimă a factorilor de control implică utilizarea optimă a resurselor |
| | <i>Etapa 9.</i> Analiza sistemului în scopul verificării că nu apar probleme noi. ✓ Experimente de confirmare. |

Tab. 3.5 Utilizarea pe etape a metodei Taguchi în tehnica ARIZ

3.2.14 Comparație între punctele forte și slabe ale metodelor Taguchi și TRIZ

| TRIZ | |
|---|---|
| Puncte forte | Puncte slabe |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Domeniul de conflict bine definit. ✓ Evidențierea și eliminarea. contradicțiilor tehnice acționează mai precis asupra cerințelor funcționale și a proiectării parametrilor. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Se lucrează mai greu cu sisteme mari, complicate. ✓ Nu apare explicit rolul clienților/utilizatorilor. |
| Metoda Taguchi | |
| Puncte forte | Puncte slabe |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Îmbunătățirea robusteții tehnologiei de bază. ✓ O mai bună înțelegere a unei tehnologii date. ✓ O mai bună înțelegere a comportamentului funcțional al unui sistem dat. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Nu există un mod de abordare a proiectării conceptului unui sistem. ✓ Aplicare limitată în cazul unui concept de proiectare dat. ✓ Abordare de tip "black-box" (cutie neagră) |

Tab. 3.6 Punctele forte și slabe ale metodelor Taguchi și TRIZ

3.2.15 Concepte ale metodei Taguchi neutilizate în TRIZ

a. Se poate considera că aproape toate transformările energetice din natură sunt puternic neliniare. Metoda Taguchi exploatează aceste neliniarități ca în Fig. 3.29.

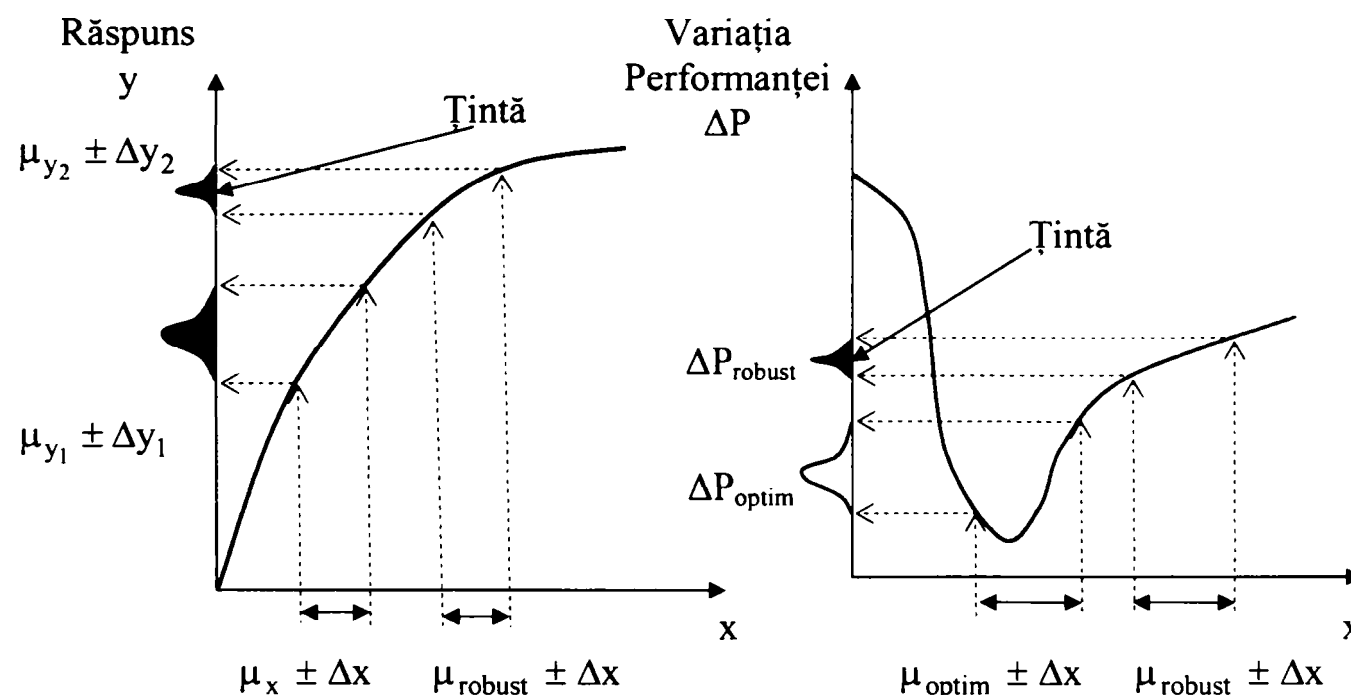


Fig. 3.16 Exploatarea neliniarităților în metoda Taguchi

Metoda TRIZ nu exploatează încă aceste neliniarități iar Analiza Substanță-Câmp nu poate pune în evidență aceste neliniarități.

b. Metoda Taguchi arată că există o interacțiune puternică între Factorii de Control și Factorii Zgomot, pe când în metoda TRIZ acest lucru nu este folosit.

c. Metoda Taguchi folosește forma logaritmică a funcției obiectiv pentru a o transforma într-o funcție liniară aditivă. Acest lucru permite calcule directe precum și o ușurință în identificarea nonaditivității. Metoda TRIZ nu folosește această abordare considerând că “*ceea ce nu poate fi măsurat nu poate fi îmbunătățit*”.

d. În cadrul metodei Taguchi, cauza de bază a tuturor pierderilor de calitate este considerată *varianța*. Dealtfel însăși definiția calității după Taguchi este definită în termeni de *varianță* având în vedere că *media* a fost scoasă din definiție prin utilizarea termenului de “*Pierdere de Calitate după ajustare*” ceea ce implică faptul că se cunoaște modul de aducere la țintă a *mediei*. În metoda TRIZ, ca și cauză de bază, este considerată *contradicția*, urmând apoi *acțiunile utile parțiale sau ineficiente* și respectiv *eliminarea acțiunilor, cauzelor și efectelor dăunătoare*.

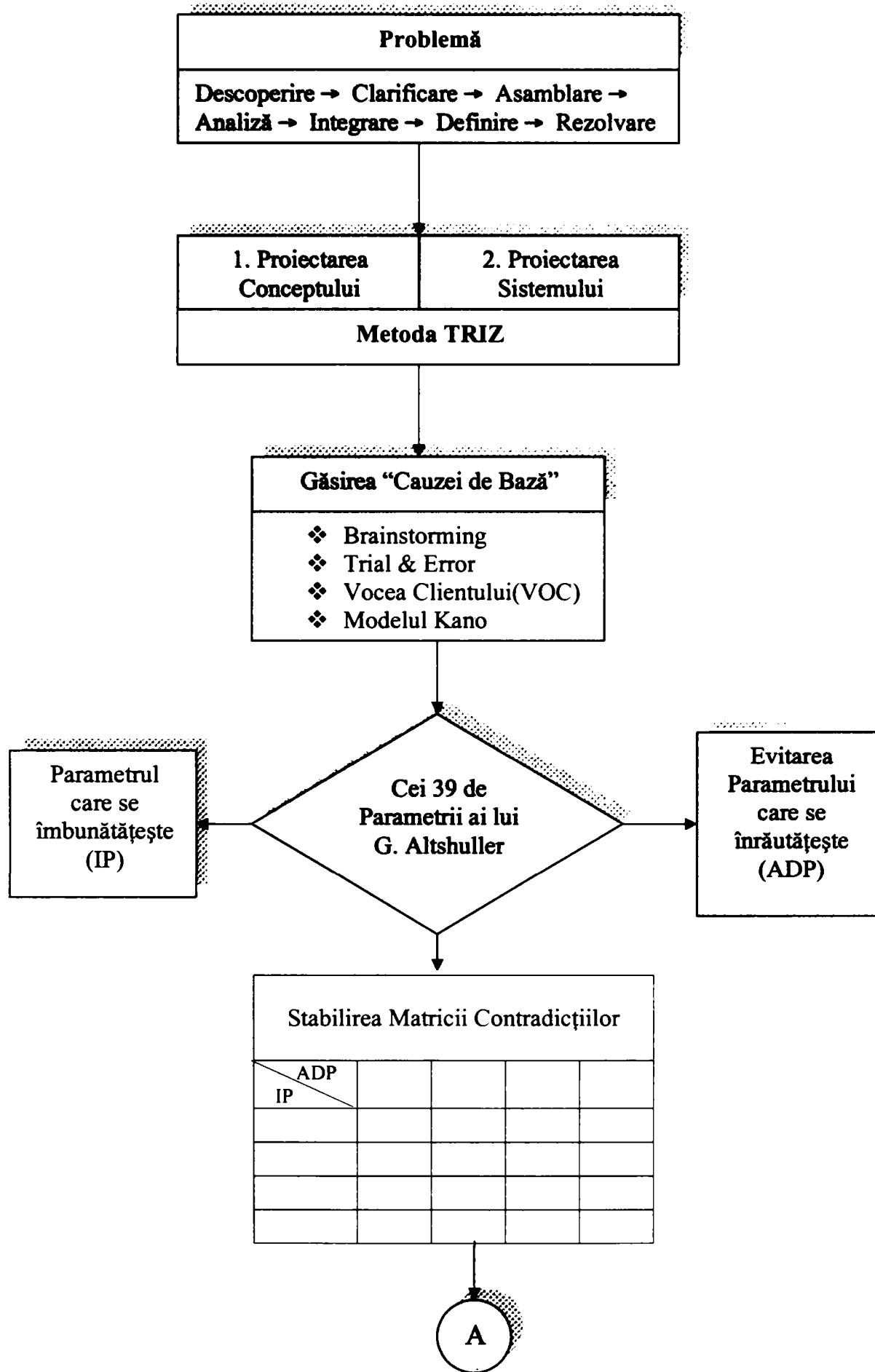
Observație:

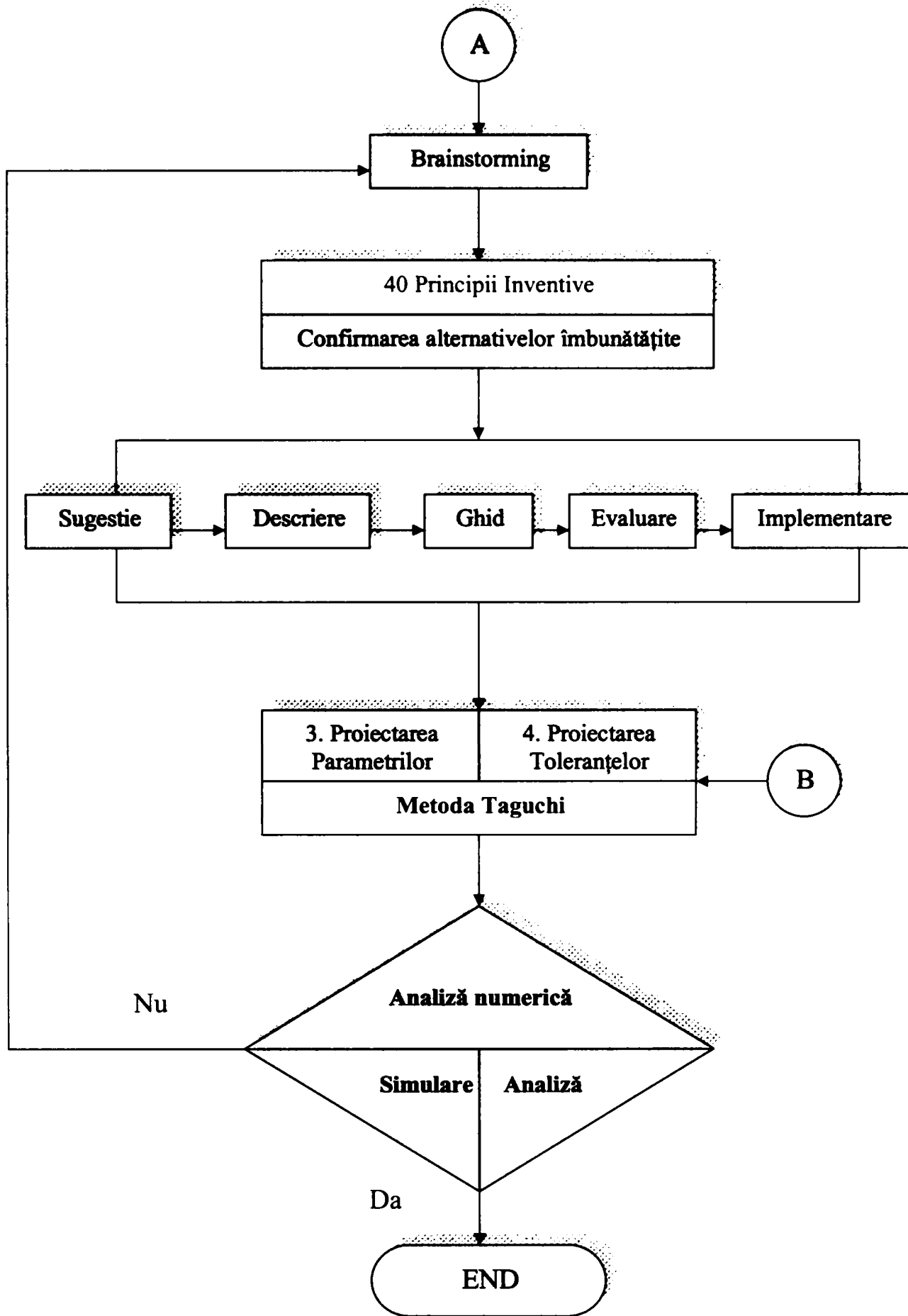
Există posibilitatea ca metoda TRIZ să cuantifice conceptul de “*eliminarea a efectelor dăunătoare*” în “*reducere a varianței*” și să se concentreze în principal asupra acestuia în loc de a se concentra asupra îmbunătățirii acțiunilor utile parțiale sau ineficiente.

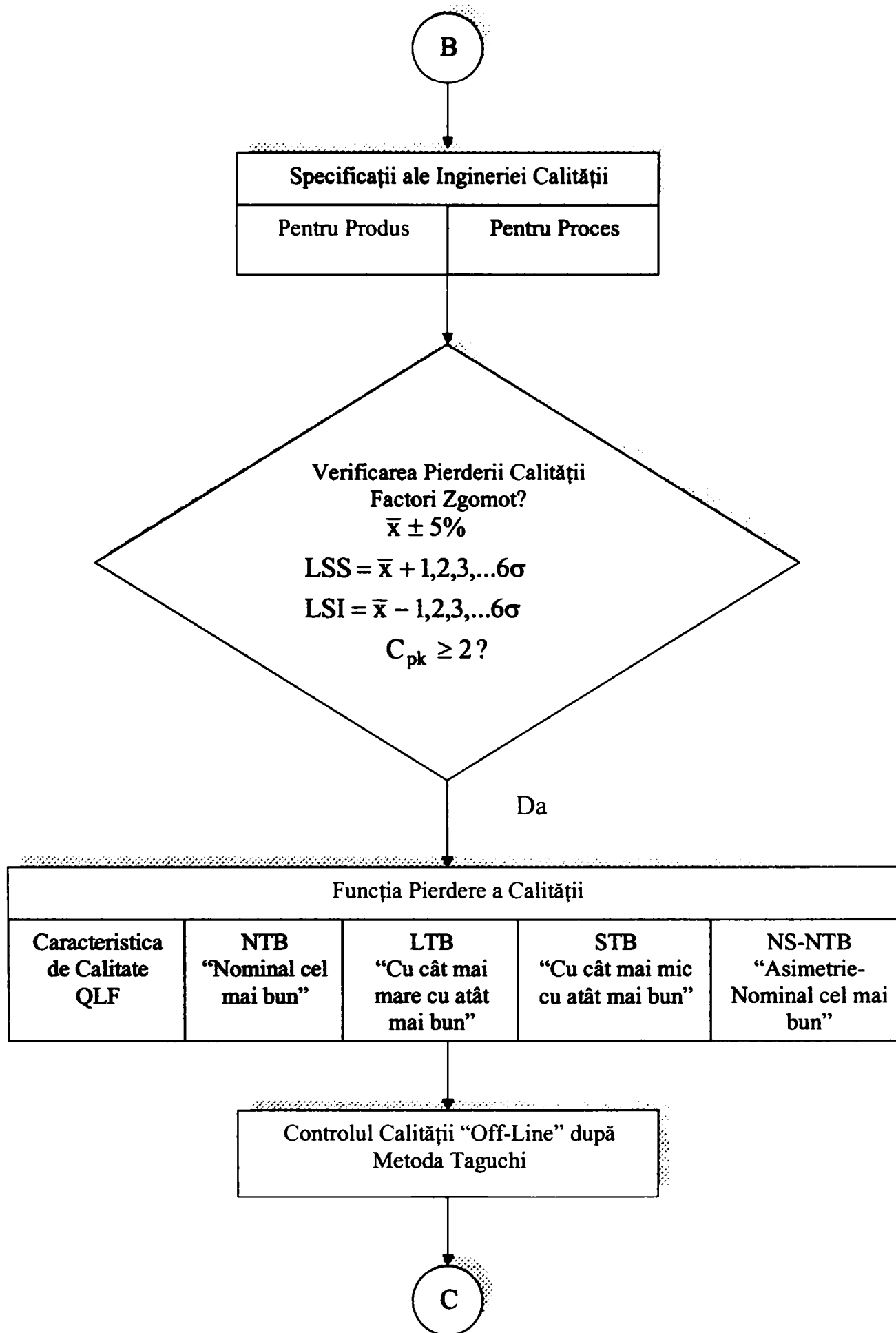
3.2.16 Metodologia de rezolvare a problemelor prin efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ

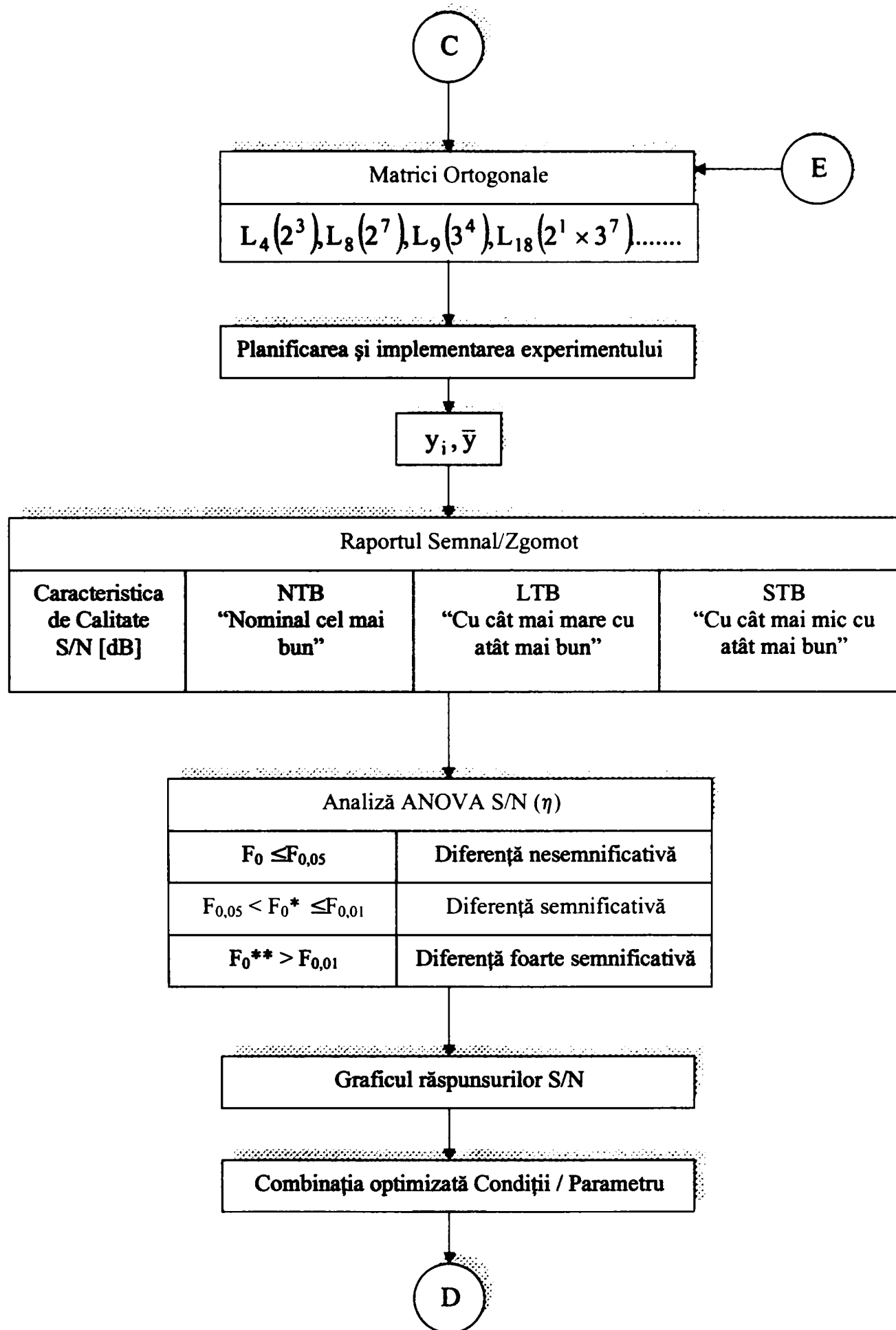
| Faza | Metodologia | Aplicare |
|-----------------------------|----------------|--|
| 1. Proiectarea conceptului | Metoda TRIZ | ✓ Inovare |
| 2. Proiectarea sistemului | | ✓ Invenție ✓ “Trial & Error” ✓ Proiecte mai bune |
| 3. Proiectarea parametrilor | Metoda Taguchi | ✓ Optimizare în 2 trepte |
| 4. Proiectarea toleranțelor | | i. Reducerea varianței prin Proiectarea Parametrilor ii. Ajustarea exactității prin Proiectarea Toleranțelor ✓ Proiectarea Experimentelor ✓ Ingineria Calității ✓ Proiectare Robustă |

Tab. 3.7 Cele 4 faze ale Proiectării Produselor









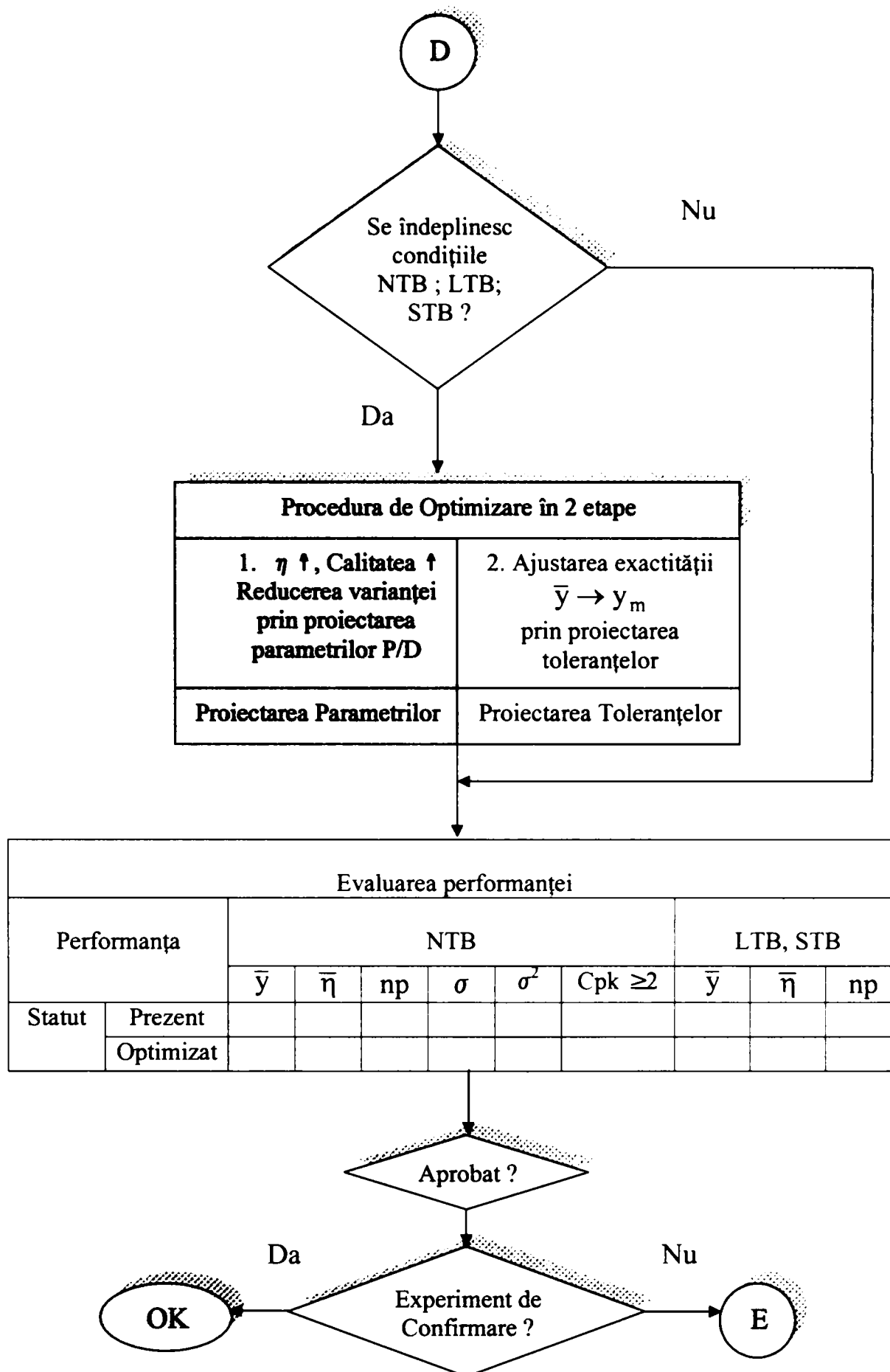


Fig 3.17 Procesul de rezolvare a problemelor cu metodologiile combinate ale metodelor TRIZ și Taguchi

3.3 Metoda Taguchi și Proiectarea Axiomatică

Proiectarea Axiomatică este o metodologie care ajută proiectanții să structureze și să înțeleagă problemele de proiectare facilitând astfel sinteza și analiza cerințelor de proiectare a soluțiilor și proceselor. Nam P. Suh [N1], inventatorul metodologiei spune:

“Scopul Proiectării Axiomatice este multiplu: să facă proiectanții mai creativi, să reducă cercetarea aleatoare a proceselor, să minimizeze procesul iterativ al încercărilor și să determine cel mai bun proiect dintre cele propuse”.

Proiectarea Axiomatică furnizează cadrul de bază pentru obiectul proiectului și un set de axiome pentru evaluarea relațiilor dintre funcțiunile dorite și modurile în care acestea sunt atinse, bazându-se pe următoarele concepte cheie:

- ❖ Există 4 domenii în cadrul general al problemelor de proiectare: *domeniul clientului, domeniul funcțional, domeniul fizic și domeniul procesului*, prezentate în Fig.3.18. Cerințele și necesitățile clientului (CNs) sunt identificate în domeniul clientului și sunt descrise sub forma funcționalității necesare a produsului în domeniul funcțional. Parametrii de proiectare (DPs) care satisfac cerințele funcționale (FRs) sunt definiți în domeniul funcțional, iar în domeniul procesului, variabilele de proces (PVs), definesc modul în care va fi proiectat produsul. Întregul proces de proiectare implică procesarea continuă a informațiilor între și în cele 4 domenii distincte.
- ❖ Soluțiile alternative sunt create prin conectarea cerințelor specificate într-un domeniu cu un set de parametrii caracteristici într-un domeniu adiacent. Conectarea între client și domeniul funcțional este definită ca *Proiectare Conceptuală*, conectarea între domeniul funcțional și cel fizic ca *Proiectarea Produsului* iar conectarea între domeniul fizic și cel al procesului ca *Proiectarea Procesului*.
- ❖ Procesul de conectare poate fi exprimat matematic sub formă de vectori caracteristici ce definesc *scopul proiectului și soluția proiectului*.
- ❖ Ieșirea fiecărui domeniu evoluează de la concepte abstracte spre informații detaliate, descompunerea ierarhică într-un domeniu neputând fi făcută independent de celelalte domenii.
- ❖ Cele 2 axiome asigură o bază rațională pentru evaluarea soluțiilor propuse și pentru selectarea celei mai bune alternative.

↓ **Axioma 1 (axioma independenței):** Menținerea independenței cerințelor funcționale (FRs).

↓ **Axioma 2 (axioma informației):** Minimizarea conținutului informațional al proiectului.

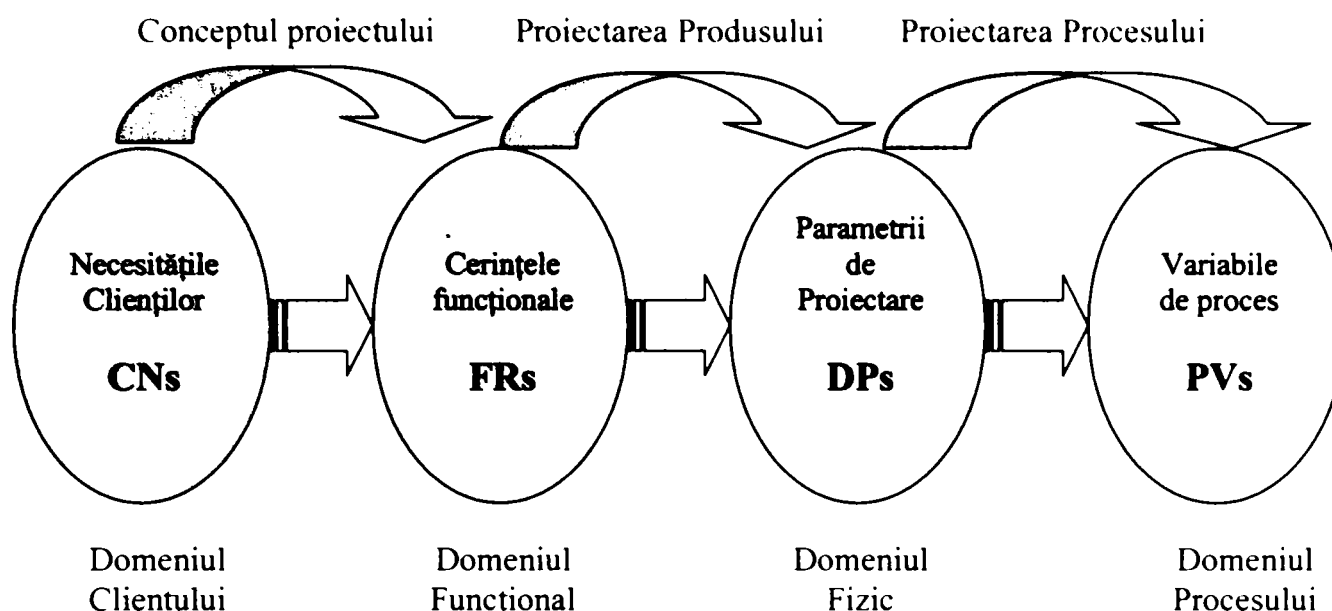


Fig. 3.18 Cele 4 domenii generale de proiectare în Proiectarea Axiomatică

Observații:

- Scopul proiectului este întotdeauna definit în *domeniul funcțional* iar metoda pentru obținerea acestuia este propusă în *domeniul fizic*.
- Proiectarea este un proces continuu și supus restricțiilor de influențare reciprocă între *ceea ce se dorește să se obțină* și *cum se dorește ca acest lucru să fie obținut*. Acest proces implică selectarea și de mijloace pentru satisfacerea obiectivelor implicând o serie de pași în care intrările sunt informațiile privind necesitățile clienților (care includ percepțiile sale asupra problemei și înțelegerea resurselor disponibile pentru soluția sa) și care sunt transformate într-o ieșire care este obiectul proiectului (soluția problemei).

Produsul este reprezentat ierarhic pe mai multe niveluri în fiecare domeniu de proiectare. Procedura de proiectare și procesul de dezvoltare a produsului implică interconectarea domeniilor printr-un proces de alocare în zigzag și prin structura de decompoziție multinivel în fiecare domeniu și la fiecare nivel ierarhic al procesului de proiectare (Fig 3.19).

Procesul de proiectare al produsului implică interconectarea FRs cu DPs. Cerințele funcționale (FRs) sunt definite ca setul minim de cerințe independente care caracterizează complet obiectivul proiectului pentru o necesitate specificată. Pe măsură ce numărul de cerințe funcționale crește, de asemenea crește și complexitatea problemei de proiectare. Alegerea FRs depinde de modul în care se speră să se satisfacă aceste necesități. Determinarea unui set corespunzător de FRs necesită expertiză, studii extensive de marketing și câteva iterații. FRs reprezintă în fapt modul proiectantului de a caracteriza percepția sa asupra necesităților clientului. Parametrii de proiectare (DPs) sunt variabile cheie care caracterizează entitatea fizică creată de către procesul de proiectare pentru a îndeplini cerințele funcționale.

În proiectarea procesului, un set de variabile de proces (PVs) este creat prin interconectarea DPs în domeniul fizic de domeniul procesului. PVs specifică metodele de fabricare produse de DPs.

Procesul de proiectare (al produsului și procesului) progresează de la nivelul sistemului la nivele mai detaliate. Decompoziția ierarhică a cerințelor funcționale a parametrilor de proiectare și a variabilelor de proces evidențiază tocmai acest progres. Deciziile luate la nivele ierarhice superioare ale proiectării influențează în mod evident obiectivele de la nivelele ierarhice inferioare, în plus identificarea FRs la fiecare nivel poate fi atinsă numai prin identificarea DPs la același nivel (similar și pentru DPvs vs. PVs). Acest lucru spune de fapt că descompunerea nu poate fi făcută până când nu au fost stabilite toate intercorelările pentru un anumit nivel ierarhic.

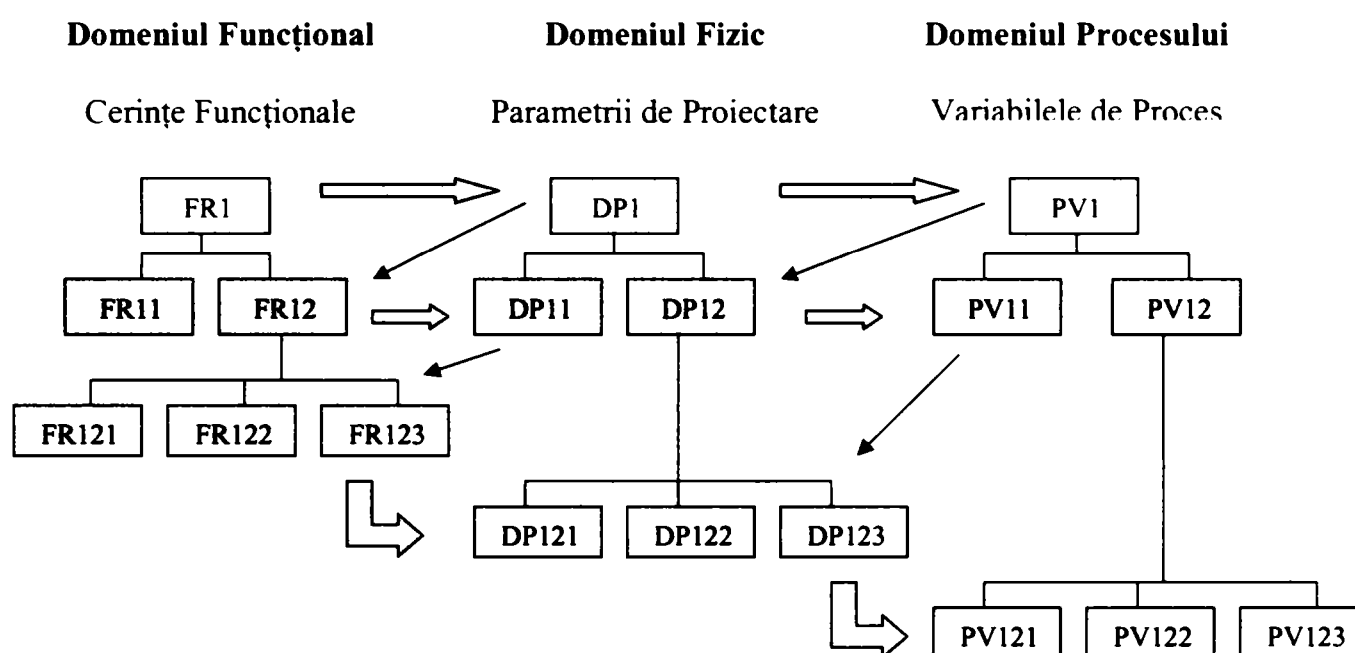


Fig. 3.19 Decompoziția ierarhică a problemei de proiectare și procesul de zigzag între domeniile de proiectare

Definind $\{FR\}$ ca un vector de cerințe funcționale, $\{DP\}$ ca vectorul corespondent de parametri de funcționare și $\{PV\}$ ca un vector de variabile de proces, interconectările între domeniul funcțional și domeniul fizic și respectiv între domeniul fizic și domeniul de proces pot fi exprimate matematic sub forma relațiilor (3.1) respectiv (3.2).

$$\{FR\} = [A] \times \{DP\} \quad (3.1)$$

$$\{DP\} = [B] \times \{PV\} \quad (3.2)$$

Matricile [A] și [B] sunt numite matrici de proiectare, indicând relațiile între FRs și DPs și respectiv DPs și PVs, la un nivel dat al ierarhiei proiectului. Matricile de proiectare rezultă din ecuațiile de proiectare sub forma din Fig. 3.20, iar elementele acestora sunt determinate din setul de ecuații date de relațiile (3.3) respectiv (3.4).

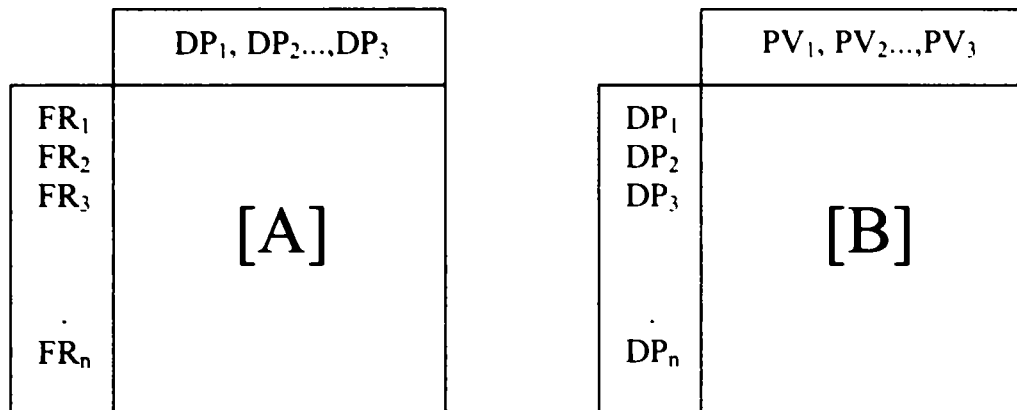


Fig. 3.33 Modul de obținere al matricilor de proiectare [A] și [B]

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta FR_1 = \frac{\partial FR_1}{\partial DP_1} \Delta DP_1 + \dots + \frac{\partial FR_1}{\partial DP_n} \Delta DP_n \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta FR_n = \frac{\partial FR_n}{\partial DP_1} \Delta DP_1 + \dots + \frac{\partial FR_n}{\partial DP_n} \Delta DP_n \end{array} \right. \quad (3.3)$$

$$\text{unde } A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta DP_1 = \frac{\partial DP_1}{\partial PV_1} \Delta PV_1 + \dots + \frac{\partial DP_1}{\partial PV_n} \Delta PV_n \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta DP_n = \frac{\partial DP_n}{\partial PV_1} \Delta PV_1 + \dots + \frac{\partial DP_n}{\partial PV_n} \Delta PV_n \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\text{unde } B_{ij} = \frac{\partial DP_i}{\partial PV_j}$$

Conform Proiectării Axiomatice, proiectele pot fi clasificate funcție de tipul matricilor de proiectare. Astfel se definește un *Proiect necuplat* acela a cărui matrice de proiectare [A] este o *matrice diagonală* obținută prin aranjarea corespunzătoare a FRs și DPs. Matricea proiectului necuplat arată că sarcinile proiectului sunt reciproc separabile și pot fi conduse concomitent astfel încât ciclul total de timp se reduce considerabil. Un *Proiect decuplat* este cel caracterizat de o *matrice triunghiulară*. Matricea proiectului decuplat arată etapele prin care trebuie conduse sarcinile proiectării precum și fluxul informațional între acestea astfel încât întregul proces să fie condus eficient. Un *Proiect cuplat* este cel caracterizat de orice altă matrice cu excepția precedentelor. Ținta proiectanților este evident un Proiect necuplat însă în realitate majoritatea problemelor se află fie în formă cuplată fie în formă decuplată. Proiectele cuplate sunt dificile în sensul că necesită un volum mare de timp, sunt dificil de asamblat și reglat datorită toleranțelor de fabricație strânse.

$$A_N = \begin{pmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{pmatrix} \quad A_D = \begin{pmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{pmatrix} \quad A_C = \begin{pmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{pmatrix}$$

Proiect necuplat Proiect decuplat Proiect cuplat

Fig. 3.21 Structura matricilor de proiectare pentru cele trei tipuri de proiecte

Prima axiomă (axioma independenței) spune că pentru un proiect bun, DPs să fie aleși astfel încât un singur DP satisface fiecare FR la fiecare pas al procesului de decompoziție și de zigzag.. Astfel numărul de FRs și DPs este egal, cel mai bun proiect având o relație strictă “*unu-la-unu*” între FRs și DPs și este de fapt un proiect necuplat. Axioma independenței este satisfăcută pentru matricea proiectului necuplat indicând că FRs sunt complet independente. Proiectele decuplate în care FRs sunt satisfăcute de mai mult de un DP, satisfac de asemenea axioma independenței atâta vreme cât matricea de proiectare este triunghiulară (elementele diferite de zero sunt fie deasupra fie dedesubtul diagonalei), arătându-se că DPs sunt specificați secvențial astfel că în ultima instanță fiecare FR este controlat de un unic DP.

Axioma informației (axioma 2), asigură un mod de evaluare a calității proiectării facilitând o selecție printre alternativele de proiect disponibile. Acest lucru se realizează comparând conținutul informației mai multor variante de proiect în ceea ce privește probabilitățile lor de a satisface cu succes FRs. Conținutul informațional este definit în termeni de entropie, care este exprimată ca logaritmul inversului probabilității de succes, conform relației (3.5).

$$I = \log_2 \frac{1}{p} \quad (3.5)$$

Probabilitatea de succes este funcție atât de *intervalul de proiectare* cât și de capabilitatea soluției propuse, numită și *intervalul sistemului* și care este dat în toleranțe. O soluție dorită corespunde regiunii de suprapunere între intervalul de proiectare și intervalul sistemului numită *interval comun*. În cazul distribuției uniforme densitatea de probabilitate funcție de cerințele funcționale este prezentată în Fig. 3.22 iar relația (3.5) se poate scrie conform relației (3.6).

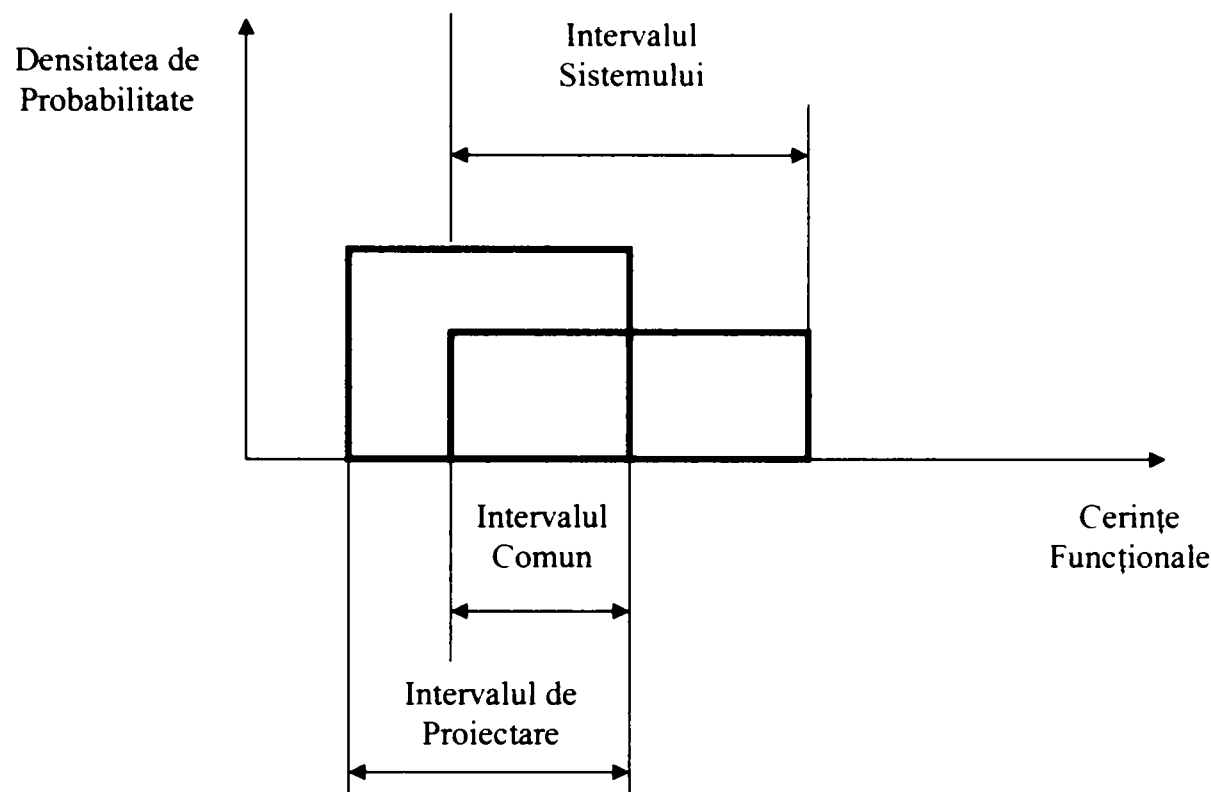


Fig. 3.22 Densitatea de probabilitate uniformă a parametrilor sistemului

$$I = \log_2 \left(\frac{\text{Intervalul Sistemului}}{\text{Intervalul Comun}} \right) \quad (3.6)$$

În cazul în care există n -cerințe funcționale, informația totală se calculează cu relația (3.7).

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (3.7)$$

- ⬇ **Corolarul 1** (Decuplarea Proiectelor Cuplate): Decompoziția sau separarea elementelor sau aspectelor unei soluții de proiect dacă FRs sunt cuplate sau devin interdependente în proiectul propus.

Acest corolar afirmă că independența funcțională trebuie asigurată prin decuplare în cazul în care proiectul propus cuplează cerințele funcționale. Decuplarea nu implică neapărat faptul că sistemul trebuie separat fizic în mai multe elemente sau ca un element nou să fie adăugat la sistemul existent (deși uneori e cea mai bună soluție).

- ⬇ **Corolarul 2** (Minimizarea FRs): Minimizarea numărului de cerințe funcționale și a restricțiilor.

Acest corolar arată că pe măsură ce numărul de cerințe funcționale și restricții crește, sistemul devine complex și în mod corespunzător conținutul informațional crește. Corolarul recomandă proiectantului o abordare cât mai simplă a caracteristicilor fizice și funcționale cât și a întregului proiect.

- ↓ **Corolarul 3** (Integrarea elementelor fizice): Integrarea elementelor de proiectare într-un singur proces, dispozitiv sau sistem atunci când FRs pot fi satisfăcuți independent în soluția nouă propusă.

Acest corolar arată că numărul componentelor fizice trebuie redus prin integrarea acestora fără cuplarea cerințelor funcționale. Evident integrarea fizică a componentelor nu este de dorit atunci când prin aceasta crește conținutul informațional sau apare cuplarea cerințelor funcționale.

- ↓ **Corolarul 4** (Utilizarea standardizării): Utilizarea standardizării sau a elementelor interschimbabile, dacă acest lucru este acceptabil din punctul de vedere al FRs și al restricțiilor.

Acest corolar arată regula cunoscută a proiectării: utilizarea elementelor standardizate, a metodelor, operațiilor și asamblării standard. Elementele nestandardizate și speciale trebuie pe cât posibil evitate în scopul minimizării costurilor. De asemenea interschimbabilitatea asigură reducerea stocurilor, simplificarea fabricării și operațiunilor de service reducându-se astfel conținutul informațional.

- ↓ **Corolarul 5** (Utilizarea simetriei): Utilizarea formelor și/sau aranjamentelor simetrice dacă acest lucru este acceptabil din punctul de vedere al FRs și al restricțiilor.

Acest corolar subliniază că elementele simetrice sunt mai ușor de fabricat. Nu numai forma trebuie să fie simetrică unde este posibil ci și alte elemente de poziționare, locație, ghidare în scopul minimizării informației necesare pentru fabricare și utilizare.

- ↓ **Corolarul 6** (Cea mai mare toleranță): Specificarea celei mai mari toleranțe admisibile în definirea cerințelor funcționale.

Acest corolar este o consecință a Axiomei 1 și Axiomei 2. Pe de o parte, este mai dificil să se fabrice un produs pe măsură ce toleranțele devin mai strânse fiind necesară o cantitate de informații mai mare, iar pe de altă parte dacă toleranțele sunt prea largi atunci erorile se pot cumula în ansamblul final existând pericolul ca cerințele funcționale să nu mai fie satisfăcute. De aceea toleranțele trebuie specificate astfel încât să fie cât mai largi posibil dar cu respectarea cerințelor funcționale.

- ✚ **Corolarul 7** (Proiecte necuplate cu informație cât mai mică): Căutarea unui proiect necuplat pentru satisfacerea cerințelor funcționale ,ce necesită mai puțină informație decât un proiect cuplat.

Acest corolar este o consecință a Axiomei 1 și Axiomei 2 și arată că există întotdeauna un proiect necuplat care implică mai puțină informație decât un proiect cuplat. Dacă un proiectant propune un proiect necuplat care are un conținut informațional mai mare decât un proiect cuplat, atunci proiectul trebuie revăzut și trebuie generat un alt proiect necuplat sau decuplat care să aibe mai puțină informație decât proiectul cuplat.

- ✚ **Teorema 1** (Cuplare datorită numărului insuficient de DPs): Atunci când numărul de DPs este mai mic decât numărul de FRs, va rezulta fie un proiect cuplat fie FRs nu pot fi satisfăcute.
- ✚ **Teorema 2** (Decuplarea proiectelor cuplate): Dacă un proiect este cuplat datorită faptului că numărul de FRs este mai mare decât DPs ($m > n$), atunci acesta poate fi decuplat prin adăugarea de noi DPs astfel încât numărul total al acestora să devină egal cu al FRs ($n = n$). O matrice de proiectare de dimensiune $n \times n$ este o matrice triunghiulară caracteristică proiectelor decuplate.
- ✚ **Teorema 3** (Cuplare sau redundanță datorită numărului mare de DPs): Atunci când numărul de DPs este mai mare decât numărul de FRs, va rezulta fie un proiect cuplat fie un proiect redundant.
- ✚ **Teorema 4** (Proiecte ideale): Într-un proiect ideal numărul DPs este egal cu numărul FRs.
- ✚ **Teorema 5** (Necesitatea unui proiect nou): Atunci când se schimbă un set de FRs fie prin adăugarea unui nou FR fie prin substituirea unui FR vechi cu unul nou fie printr-un set complet nou, soluția proiectului dată de DPs inițiali trebuie evident modificată.

3.3.1 Comparație Proiectare Robustă Taguchi - Proiectare Axiomatică pe baza focalizării funcției

În Proiectarea Axiomatică *funcția (funcțiunea)* este definită ca fiind ieșirea dorită, identică cu definiția originală (§ 3.2.6).

Importanța *cerințelor funcționale* nu este însă identificată corespunzător în modul de lucru al proiectării axiomatice, neexistând criterii pentru decompoziția acestora. Cerințele funcționale sunt tratate ca fiind de egală importanță, ceea ce nu este întotdeauna practic și fezabil.

| Metoda de proiectare | Focalizarea funcției | Unde poate fi aplicată cel mai bine | Procesul de gândire | Accent |
|-----------------------------|-----------------------------|---|--|---|
| Proiectare Robustă Taguchi | Transformarea energiei | Optimizarea unei tehnologii specifice sau optimizarea conceptului sau structurii unui proiect | Cum poate fi optimizat un sistem tehnic dat sau într-o structură dată, astfel încât să devină insensibil la efectele condițiilor incontroleabile | Aplicarea efectivă a strategiilor ingineresti. Identificarea funcției (relației) ideale. Se începe cu un răspuns adecvat al sistemului apoi se maximizează funcția utilă a sistemului |
| Proiectare Axiomatică | Ieșirea dorită | Structura și fundamentul sistemului în proiectarea conceptuală | Gândire pozitivă. Cum poate fi creat un "proiect perfect". Cum se asigură "imunitatea" unui proiect | Corelarea cerințelor funcționale cu cerințele de proiectare |

Tab. 3.8 Comparație Taguchi-Proiectare Axiomatică pe baza focalizării funcției

3.3.2 Comparație Proiectare Robustă Taguchi - Proiectare Axiomatică pe baza axiomelor de proiectare

| Metoda de proiectare | Axioma Independenței | Axioma Informației |
|-----------------------------|---|--|
| Proiectare Robustă Taguchi | Identificarea funcției ideale. Selectarea unei caracteristici de ieșire adecvate a sistemului. Selectarea factorilor de control pentru promovarea aditivității efectelor parametrilor | Maximizarea raportului Semnal/Zgomot (S/N) |
| Proiectare Axiomatică | Menținerea independenței cerințelor funcționale | Minimizarea informației |

Tab. 3.9 Comparație Taguchi-Proiectarea Axiomatică pe baza axiomelor de proiectare

3.3.3 Comparație Proiectare Robustă Taguchi - Proiectare Axiomatică pe baza corolarelor de proiectare

| Proiectarea Axiomatică | Proiectarea Robustă Taguchi |
|--|---|
| Corolarul 1 (Decuplarea Proiectelor Cuplate) | Graficele efectelor factorilor de control asupra caracteristicilor de calitate pot pune în evidență contradicțiile fizice și tehnice (în sensul TRIZ). Contradicțiile sunt similare cuplării funcționale din Proiectarea Axiomatică. Alegerea corectă a nivelurilor factorilor (eliminarea contradicțiilor) înseamnă înlăturarea cuplării funcționale din Proiectarea Axiomatică. |
| Corolarul 2 (Minimizarea FRs) | Funcția obiectiv folosită în metoda Taguchi, raportul Semnal/Zgomot (similară cu Rezultatul Ideal Final din TRIZ) furnizează o <i>măsură a idealității sistemului</i> . Îmbunătățirea raportului Semnal/Zgomot permite focalizarea proiectanților asupra conceptelor care minimizează cerințele în substanță, energie și complexitate ale produsului sau procesului. |
| Corolarul 3 (Integrarea elementelor fizice) | Metoda Taguchi nu are un corespondent pentru acest corolar. De fapt merge chiar în direcție opusă, sugerându-se că tot feedback-ul trebuie să fie înlăturat iar Metoda Taguchi să optimizeze elementele individuale după care feedback-ul să fie restabilit. |
| Corolarul 4 (Utilizarea standardizării) | Metoda Taguchi nu are un corespondent pentru acest corolar. |
| Corolarul 5 (Utilizarea simetriei) | Metoda Taguchi nu are un corespondent pentru acest corolar, însă principiul este respectat la utilizarea matricilor ortogonale pentru reducerea numărului experimentărilor. |
| Corolarul 6 (Cea mai mare toleranță) | Metoda Taguchi operează cu <i>toleranțe funcționale</i> și nu cu toleranțe specificate. Totuși se folosește același principiu de alocare a toleranțelor funcționale maxim admisibile. |
| Corolarul 7 (Proiecte necuplate cu informație cât mai mică) | Specificarea corectă a nivelurilor factorilor de control (respectarea axiomei 1) și insensibilizarea la factorii zgomot reduce în mod evident conținutul informațional al proiectului (respectarea axiomei 2). |

Tab. 3.10 Comparație Taguchi-Proiectare Axiomatică pe baza corolarelor de proiectare

3.3.4 Comparație între punctele forte și slabe ale Proiectării Robuste Taguchi și Proiectării Axiomatice.

| Proiectarea Axiomatică | |
|--|---|
| Puncte forte | Puncte slabe |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Oferă o fundamentare structurală pentru sistem (proiect conceptual). ✓ Axiomele de proiectare reprezintă o referință puternică. ✓ Domeniile sunt bine definite. ✓ Oferă modele cantitative pentru proiecte cuplate, proiecte decuplate și proiecte necuplate. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Rolurile clientului sunt relativ vag definite. ✓ Drumul (zigzag-ul) între domenii este relativ lung. ✓ Conținutul informațional este greu de aplicat. |
| Proiectarea Robustă Taguchi | |
| Puncte forte | Puncte slabe |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Îmbunătățirea robusteții tehnologiei de bază. ✓ O mai bună înțelegere a unei tehnologii date. ✓ O mai bună înțelegere a comportamentului funcțional al unui sistem dat. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Nu există un mod de abordare a proiectării conceptului unui sistem. ✓ Aplicare limitată în cazul unui concept de proiectare dat. ✓ Abordare de tip "black-box" (cutie neagră) |

Tab. 3.11 Comparație Taguchi-Proiectare Axiomatică pe baza punctelor forte și slabe

3.3.5 Legătura Proiectării Robuste Taguchi cu Proiectarea Axiomatică pe baza conținutului informațional al proiectului.

Prin folosirea axiomelor independenței și informației, Proiectarea Axiomatică oferă un mod științific de a privi procesul decizional în proiectare. Într-o altă abordare Proiectarea Robustă Taguchi folosește *funcția pierdere a calității* (QLF) și o măsură pentru calitate numită *raport Semnal/Zgomot* (S/N) pentru a prezice calitatea din punct de vedere al clientului.

Similar canalului de comunicare din *Teoria Informației a lui Shannon* se consideră că procesul de fabricație este un canal de comunicare (transmitere) în care un *parametru de proiectare D* este trimis de la o sursă (proiect) cu o anumită distribuție și un anumit interval. Recepționarea se va face după fabricare (produs) sub forma unui *parametru de proiectare modificat S* (numit variabilă de sistem în conformitate cu Proiectarea Axiomatică) cu altă distribuție și un alt interval [K1] ca în Fig. 3.23. Evident în cazul ideal, canalul de transmitere ar fi perfect și nu ar exista pierderi de informație. În realitate datorită limitărilor procesului de fabricare (a canalului de

transmitere) datorită “zgomotului”, s-ar putea să fie necesare informații adiționale pentru o încadrare a rezultatului în intervalul stabilit.

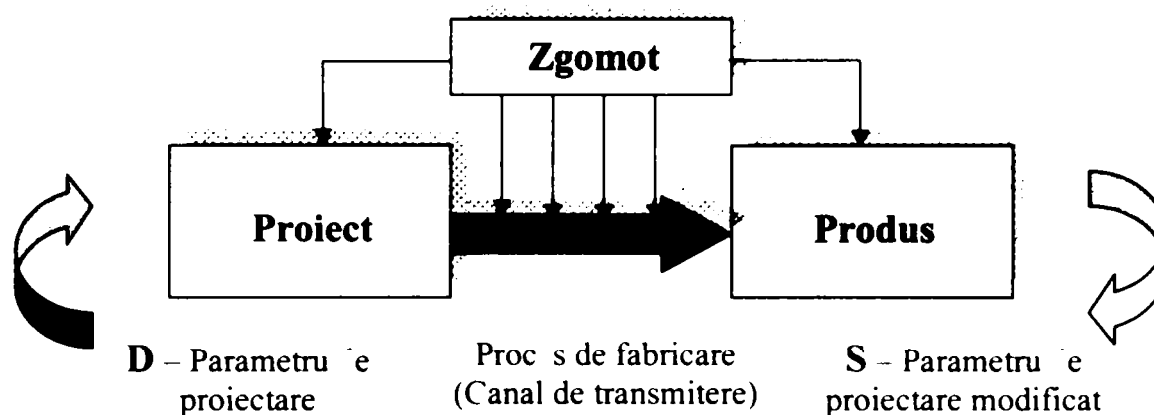


Fig. 3.23 Procesul de fabricare considerat ca un canal de transmitere a informației

Pentru canalul de fabricare (transmitere), informația mutuală între variabila de proiectare D (înainte de fabricare) și variabila de proiectare S (după fabricare), este reducerea în incertitudine a lui D datorită cunoștințelor despre S . Aceasta reprezintă informația transmisă de către D către S prin canalul de transmitere (fabricare) și poate fi scrisă conform Teoriei Informației ca în relația (3.8).

$$I(D,S) = H(D) - H(D|S) \quad (3.8)$$

Prin simetrie rezultă relația (3.10), adică D spune la fel de mult despre S ca și S despre D .

$$I(D,S) = H(S) - H(S|D) \quad (3.9)$$

Intervalul variabilei S obținut după fabricare are o anumită incertitudine asociată. În acest moment nu se poate deduce cantitatea de informație necesară pentru a aduce variabila S în conformitate cu variabila de proiectare D cerută de cerințele funcționale. În relația (3.8) se indică de fapt că “privind” prin canalul de fabricare la variabila de proiectare D , incertitudinea inițială $H(S)$ este redusă. Pentru un sistem perfect de fabricare informația mutuală $I(D,S)$ trebuie maximizată și presupunând un proces stabil în care $H(S)$ nu se modifică atunci evident trebuie minimizat $H(S|D)$ lucru care este și o indicație a calității procesului de fabricare.

Pentru un parametru de proiectare D repartizat uniform cu un interval de proiectare $(0, a)$ și pentru parametrul de proiectare modificat după fabricare S repartizat uniform cu intervalul de sistem $(a, a+s)$, ca în Fig. 3.24, se poate calcula probabilitatea condiționată $P(S|D)$ conform relației (3.11). Folosind formula entropiei a lui Shannon, pentru distribuții uniforme conform relației (3.6), se poate calcula $H(S|D)$

ca în relația (3.11) și care reprezintă conținutul informațional ce trebuie minimizat pentru a aduce intervalul parametrului de proiectare modificat S (după fabricare) în concordanță cu intervalul parametrului de proiectare D (înainte de fabricare) pentru a satisface cerințele funcționale relativ la acest parametru.

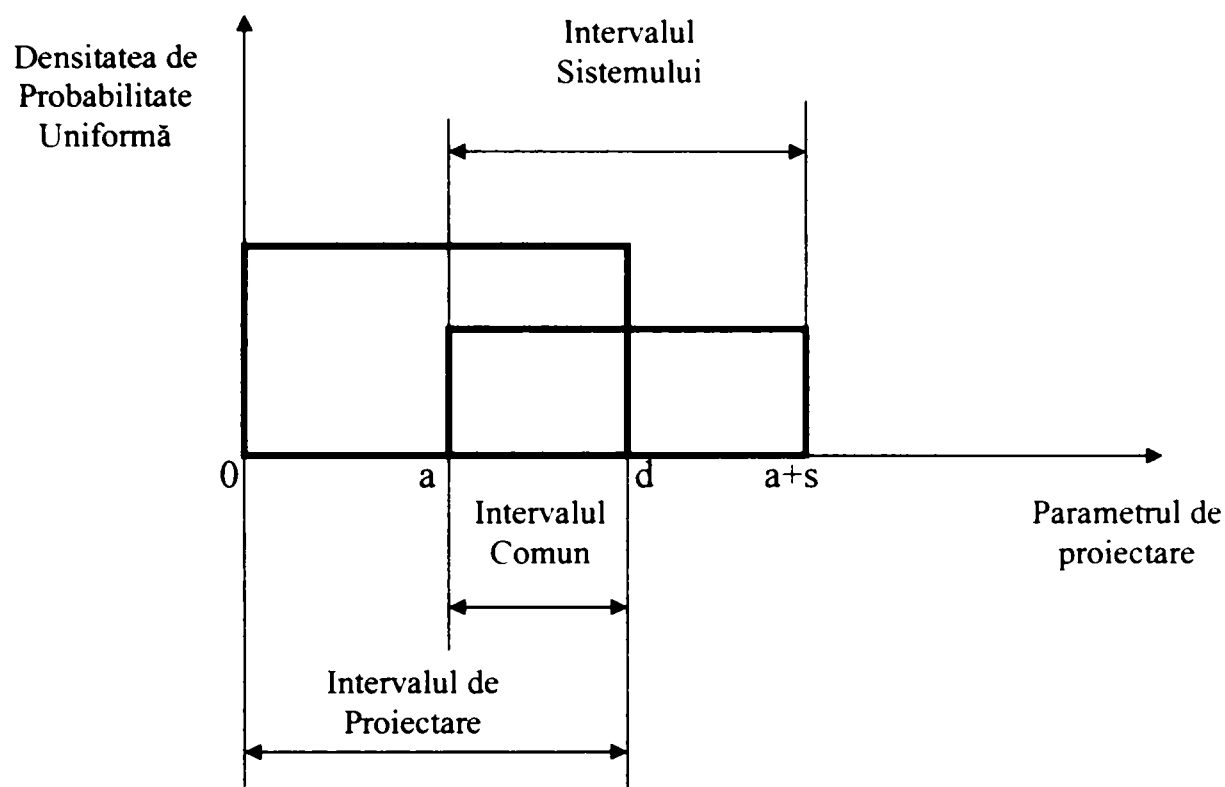


Fig. 3.24 Densitatea de probabilitate uniformă a parametrului de proiectare D și a parametrului sistemului S.

$$P(S|D) = \frac{P(S \cap D)}{P(D)} = \frac{\frac{d-a}{s}}{1} = \frac{d-a}{s} \quad (3.10)$$

$$H(S|D) = -\log_2 \frac{d-a}{s} = \log_2 \frac{s}{d-a} \quad (3.11)$$

Fie două distribuții date în relația (3.12). Informația medie pe care distribuția X_2 o dă despre distribuția X_1 se poate calcula conform relației (3.13) și se numește *măsura lui Kullback*.

$$X_1 : \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ p_1, p_2, \dots, p_n \end{pmatrix} \quad X_2 = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ q_1, q_2, \dots, q_n \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$I(p \parallel q) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log \left(\frac{p_i}{q_i} \right) \quad (3.13)$$

Observații:

- Măsura lui Kullback (informația medie) este nulă atunci când distribuțiile sunt identice.
- Informația medie se mai numește și *entropie relativă* sau distanță Kullback dintre două distribuții.
- Entropia relativă este o mărime nenegativă, asimetrică și nu este o distanță adevărată între distribuții întrucât nu satisface inegalitatea triunghiului [K1].

Bazat pe informația medie dintre două distribuții se definește *divergența simetrică* dată de relația (3.14). Această măsură a divergenței dintre distribuții este de fapt o măsură a dificultății discriminării dintre ele și poate fi văzută ca o măsură a distanței dintre distribuții. (Nu este numită chiar "*distanță*" în sens topologic deoarece deși îndeplinește proprietățile unei metrice nu îndeplinește și proprietatea inegalității triunghiului).

$$J(p \parallel q) = I(p \parallel q) + I(q \parallel p) \quad (3.14)$$

Pentru cazul a două distribuții normale $p(x) = N(m_p; \sigma_p^2)$, $q(x) = N(m_q; \sigma_q^2)$, măsura lui Kullback se obține conform relației (3.16).

$$I(p \parallel q) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_p^2 + (m_p - m_q)^2}{\sigma_q^2} - 1 - \log \frac{\sigma_q^2}{\sigma_p^2} \right] \quad (3.15)$$

Divergența simetrică pentru cazul a două distribuții normale se obține pornind de la relația (3.14) obținându-se relația (3.16).

$$\begin{aligned} J(p \parallel q) &= I(p \parallel q) + I(q \parallel p) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_p^2 + (m_p - m_q)^2}{\sigma_q^2} - 1 - \log \frac{\sigma_q^2}{\sigma_p^2} \right] + \\ & \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_q^2 + (m_q - m_p)^2}{\sigma_p^2} - 1 - \log \frac{\sigma_p^2}{\sigma_q^2} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_q^2 + (m_q - m_p)^2 - \sigma_p^2 - \sigma_p^2 \log \frac{\sigma_p^2}{\sigma_q^2}}{\sigma_p^2} \right] + \\ & + \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_p^2 + (m_p - m_q)^2 - \sigma_q^2 - \sigma_q^2 \log \frac{\sigma_q^2}{\sigma_p^2}}{\sigma_q^2} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_q^4 + \sigma_q^2 (m_q - m_p)^2 - \sigma_q^2 \sigma_p^2 - \sigma_p^4 - \sigma_p^2 (m_p - m_q)^2 + \sigma_p^2 \sigma_q^2}{\sigma_p^2 \sigma_q^2} \right] \end{aligned}$$

$$\frac{-\sigma_p^2 \sigma_q^2 + \sigma_p^4 + (m_p - m_q)^2 - \sigma_q^2 \sigma_p^2 - \left(\underbrace{\sigma_p^2 \sigma_q^2 \log \frac{\sigma_p^2}{\sigma_q^2} + \sigma_q^2 \sigma_p^2 \log \frac{\sigma_q^2}{\sigma_p^2}}_{=0} \right)}{\sigma_p^2 \sigma_q^2}$$

Deoarece $\log \frac{a}{b} + \log \frac{b}{a} = 0$, rezultă expresia divergenței simetrice sub forma:

$$J(p \parallel q) = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sigma_p^2 - \sigma_q^2)^2 + (m_p - m_q)^2 (\sigma_p^2 + \sigma_q^2)}{\sigma_p^2 \sigma_q^2} \right] \quad (3.16)$$

Utilizarea divergenței lui Kullback conform relației (3.13) ca măsură a conținutului informațional pentru satisfacerea cerințelor proiectantului (intervalul de proiectare) de către sistemul de fabricare (canalul de transmitere) pentru a obține intervalul sistemului are 2 neajunsuri majore. În primul rând această măsură este asimetrică și în al doilea rând există necesitatea ca ambele distribuții să fie diferite de zero în același domeniu (de aceea nu poate fi folosită pentru distribuțiile uniforme cu domenii diferite). Pentru depășirea acestor probleme se preferă folosirea distribuțiilor normale (continue) și respectiv utilizarea divergenței simetrice definite în relația (3.14).

Se consideră că intervalele proiectului și sistemului sunt distribuite normal cu mediile m_d și m_s și abaterile standard σ_d și σ_s (Fig. 3.25).

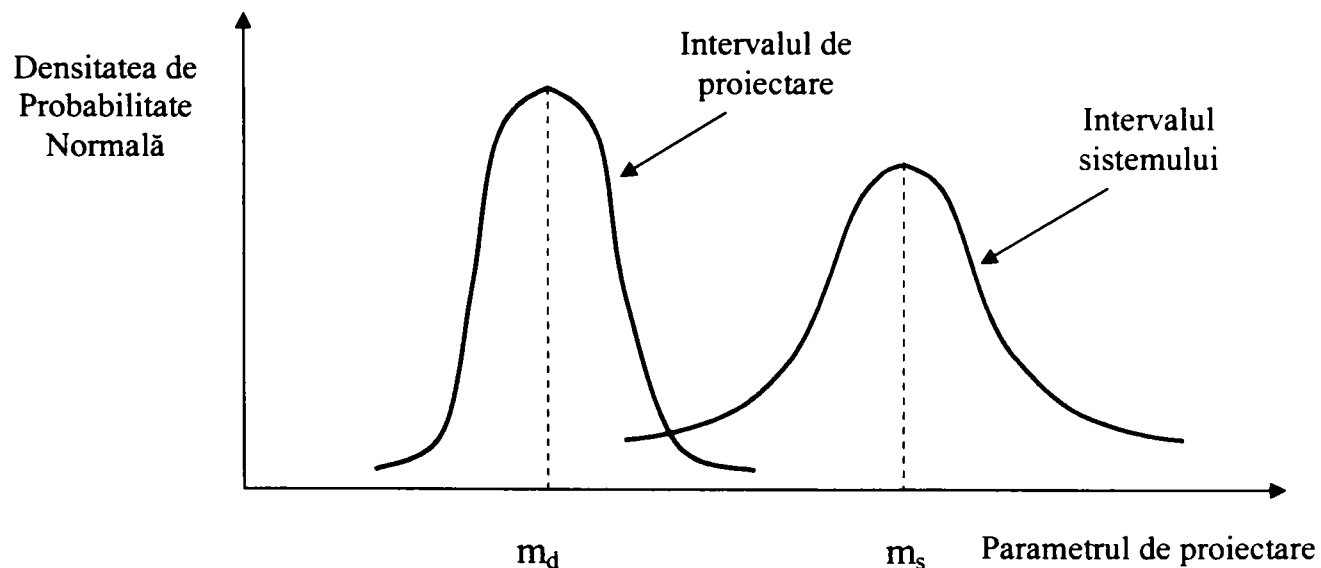


Fig. 3.25 Funcțiile densitate de probabilitate pentru intervalul de proiectare și intervalul sistemului

În acest caz conținutul informației intervalului sistemului cu privire la intervalul de proiectare se calculează utilizând relația (3.17).

$$J = \frac{1}{2} \left[\frac{(\sigma_s^2 - \sigma_d^2)^2 + (m_s - m_d)^2 (\sigma_s^2 + \sigma_d^2)}{\sigma_s^2 \sigma_d^2} \right] \quad (3.17)$$

Se observă o similitudine între măsura informației lui Kullback dată de divergența simetrică din relația (3.17) și conținutul informației Proiectării Axiomatice. Atunci când intervalele sistemului și de proiectare se suprapun complet, ambele măsuri ale informației sunt egale cu zero iar pe măsură ce gradul de suprapunere scade atunci măsura informației crește.

În cazul particular în care abaterile standard ale intervalului de proiectare și sistemului sunt egale $\sigma_s = \sigma_d$ însă mediile sunt diferite $m_s \neq m_d$ (Fig.3.26 a.), atunci divergența simetrică este dată conform relației (3.18) și este o funcție parabolică egală cu zero atunci când intervalele se suprapun $m_s = m_d$ (Fig 3.26 b.).

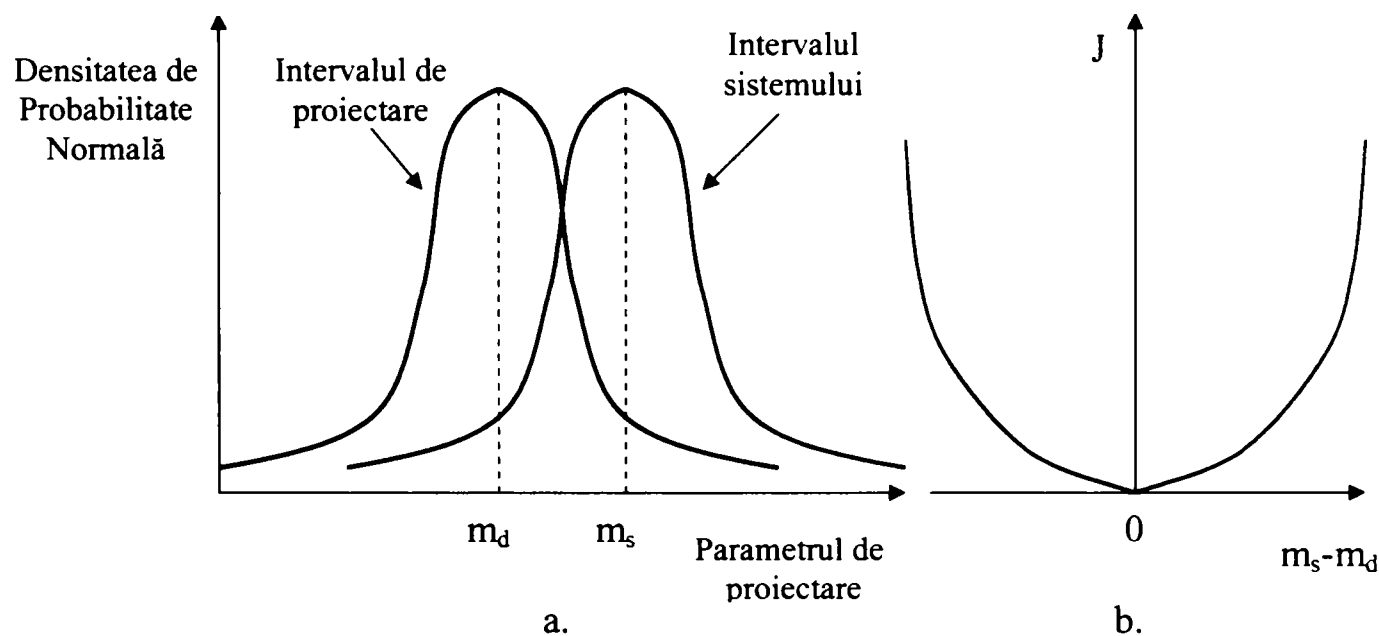


Fig. 3.26 a. Densitățile de probabilitate a intervalelor sistemului și de proiectare
b. Măsura informației pentru $\sigma_s = \sigma_d$

$$J = \frac{(m_s - m_d)^2}{\sigma_d^2} \quad (3.18)$$

Pentru cazul uzual în proiectare și fabricare, atunci când mediile sunt diferite $m_s \neq m_d$ și abaterea standard a sistemului este mai mare decât cea impusă de proiect $\sigma_s \gg \sigma_d$ (Fig. 3.27 a.), divergența simetrică este dată în relația (3.19). Se observă că

se obține tot o funcție parabolică care are valoarea minimă atunci când $m_s = m_d$ (Fig.3.27 b.)

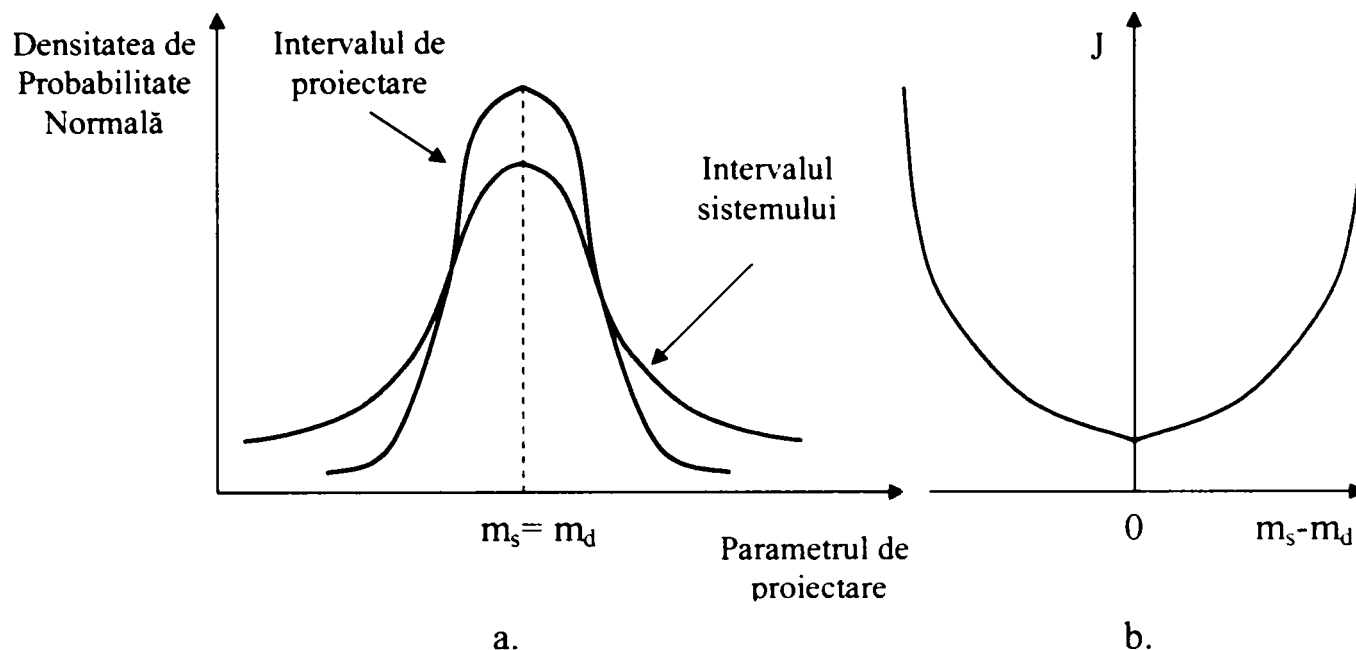


Fig. 3.27 a. Densitățile de probabilitate a intervalelor sistemului și de proiectare
b. Măsura informației pentru $\sigma_s \gg \sigma_d$

$$J \cong \frac{1}{2} \frac{\sigma_s^2 + (m_s - m_d)^2}{\sigma_d^2} \quad (3.19)$$

Dacă se consideră valoarea așteptată a funcției pierdere a calității Taguchi QLF conform relației (2.4) din § 2.2.1, în care media observată a sistemului este m_s , varianța observată este σ_s^2 iar valoarea țintă necesară a proiectului este m_d , atunci ea poate fi rescrisă sub forma (3.20).

$$E[L(y)] = k \left[\sigma_s^2 + (m_s - m_d)^2 \right] \quad (3.20)$$

Comparând relațiile (3.19) și (3.20) se observă că numărătorul relației (3.19) este direct proporțional cu valoarea așteptată a funcției pierdere a calității Taguchi. Măsura informației din relația (3.19) arată că pierderea de calitate este proporțională cu conținutul informației produsului după fabricare comparativ cu conținutul informației produsului proiectat și că pentru aceeași funcție pierdere a calității, informația necesară este invers proporțională cu varianța proiectată. Pe măsură ce varianța este mai mică cu atât este necesară mai multă informație pentru a se asigura același nivel de calitate. Pentru cazul proiectării multiparametrice conținutul informațional conform relației (3.19) poate fi calculat pentru fiecare parametru de proiectare și apoi însumat cu condiția ca parametrii să fie independenți statistic.

Pentru ca acest calcul al conținutului informației să fie posibil este necesară satisfacerea apriorică a Axiomei Independenței.

Dacă în relația (3.20) media sistemului m_s este modificată prin raportul (m_d / m_s), atunci ea poate fi adusă la valoarea țintă m_d . În ipoteza liniarității abaterea standard a sistemului după această modificare va fi $[(m_d / m_s) \cdot \sigma_s]$ și atunci valoarea așteptată a funcției pierdere Taguchi poate fi scrisă conform relației (3.21):

$$E[L(y)] = k \left(\frac{m_d^2}{m_s^2} \sigma_s^2 \right) = k \cdot m_d^2 \left(\frac{\sigma_s^2}{m_s^2} \right) \quad (3.21)$$

Pentru un proiect al unui produs dat, k și m_d sunt constante iar raportul $(m_d / \sigma_s)^2$ poate fi considerat ca “Raport Semnal/Zgomot”, deoarece σ_s^2 reprezintă efectul factorilor zgomot iar m_s este media dorită. În aceeași ordine de idei din relația (3.19) se obține pentru măsura conținutului informației relația (3.23).

$$J = \frac{1}{2} \frac{m_d^2 \sigma_s^2}{m_s^2 \sigma_d^2} = K \left(\frac{\sigma_s^2}{m_s^2} \right) = K \frac{N}{S} \quad (3.22)$$

unde $K = \frac{1}{2} \frac{m_d^2}{\sigma_d^2}$ este o constantă în cazul proiectului unui produs dat

Relația (3.22) arată că, conținutul informației unui proiect, în sensul Proiectării Axiomatice (definit prin divergența simetrică), este invers proporțional cu raportul Semnal/Zgomot, adică minimizarea conținutului informațional în proiectare/fabricare înseamnă maximizarea raportului Semnal/Zgomot în sensul definiției lui Taguchi. O concluzie importantă este că relația (3.22) poate fi folosită ca funcție obiectiv în locul raportului Semnal/Zgomot.

➤ Conținutul informațional în cazul criteriilor țintă

În cazul problemelor de tip NTB (“nominal cel mai bun”), pentru un proiect al unui produs dat (m_d și σ_d – date), conținutul informațional este dat de relația (3.24).

$$J_{NTB} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_s^2 + (m_s - m_d)^2}{\sigma_d^2} = c \left[\sigma_s^2 + (m_s - m_d)^2 \right] \quad (3.23)$$

unde $c = \frac{1}{2\sigma_d^2}$ este o constantă pentru un proiect al unui produs dat

Pentru cazul în care σ_s este constant, funcția din relația (3.23) este simetrică în jurul lui $m_s - m_d$. Minimizarea lui J_{NTB} (maximizarea raportului S/N) implică reducerea varianței intervalului sistemului și egalarea mediei sistemului cu media proiectului.

➤ *Conținutul informațional în cazul criteriilor ce trebuie minimizate*

Pentru problemele STB (“cu cât mai mic cu atât mai bun”), valoarea cea mai dorită este $m_d = 0$, conținutul informațional fiind dat în relația (3.24).

$$J_{STB} = c(\sigma_s^2 + m_s^2) \quad (3.24)$$

Minimizarea lui J_{STB} implică minimizarea m_s și σ_s (Fig. 3.28 a.).

➤ *Conținutul informațional în cazul criteriilor ce trebuie maximizate*

Pentru problemele LTB (“cu cât mai mare cu atât mai bine”), valoarea de proiectare dorită m_d este mare, conținutul informațional fiind dat în relația (3.25).

$$J_{LTB} = c[\sigma_s^2 + (m_s - m_d)^2] \quad (3.25)$$

Minimizarea lui J_{LTB} implică minimizarea lui σ_s iar m_s trebuie adus cât mai aproape de m_d . (Fig. 3.41 b.).

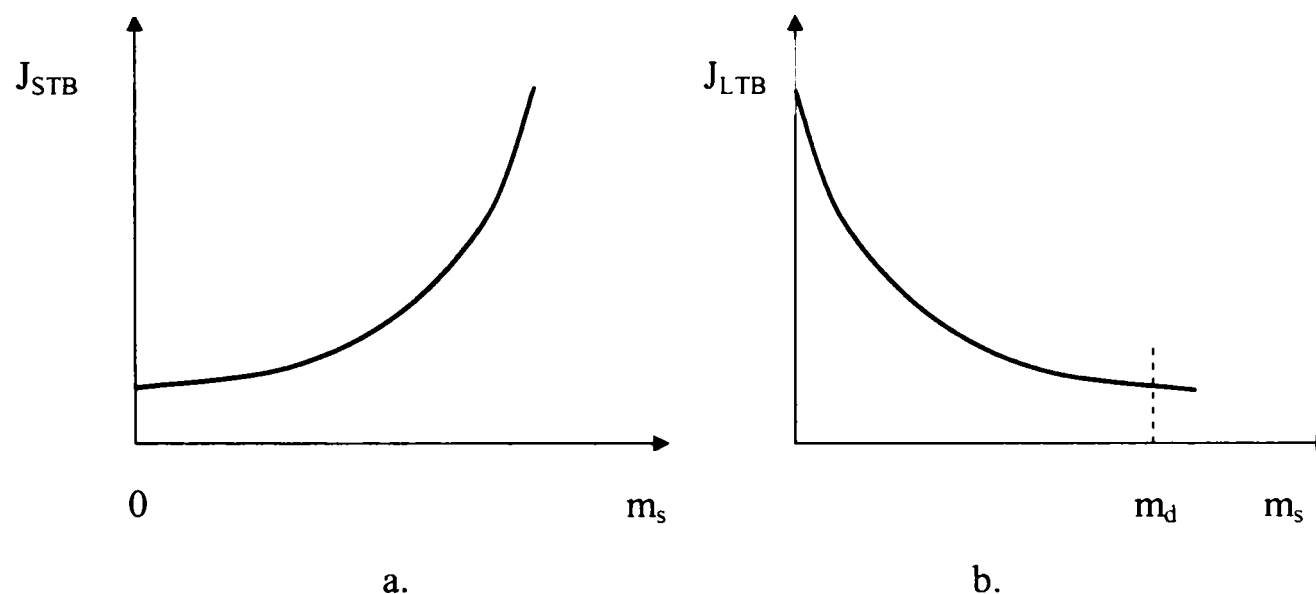


Fig 3.28 a. Comportamentul STB al funcției conținutului informațional
b. Comportamentul LTB al funcției conținutului informațional

3.4 Metoda Taguchi și QFD

Aplicarea QFD (Quality Function Deployment) a început ca un mijloc de mărire a segmentului de piață printru reducerea “distanței” dintre cerințele și nevoile clienților și performanța produselor și serviciilor oferite. Principiul fundamental al QFD este obținerea tuturor informațiilor relevante despre client și folosirea acestora pentru

conducerea procesului de proiectare a produsului, procesului de fabricare sau al serviciului. Funcțiunea primară a QFD este deci identificarea problemelor importante și legarea priorităților și valorilor țintă de nevoile și cerințele clienților. În acest sens un prim pas important este folosirea AHP (Analytic Hierarchy Process = Procesul Analitic de Ierarhizare) pentru identificarea segmentelor de clienți și apoi prioritizarea acestora. Al doilea pas important este VOC (Voice of Customer = Vocea Clientului) pentru definirea restricțiilor în modul de funcționare a produsului și serviciului la clienți. Dacă se aplică QFD pentru un produs nou, atunci pentru a putea aplica și Metoda Taguchi trebuie să se țină cont și de cerințele acestuia în ceea ce privește înțelegerea surselor de variație și libertatea de a modifica parametrii. Dacă QFD se aplică unui produs existent și se folosește “Casa Calității” atunci este important să se includă și sursele de variație pentru a obține date realiste.

Se prezintă, conform schemei din Fig. 3.29, modelul în 5 etape al QFD și modul în care Metoda Taguchi poate să ajute acest proces în tabelul 3.12.

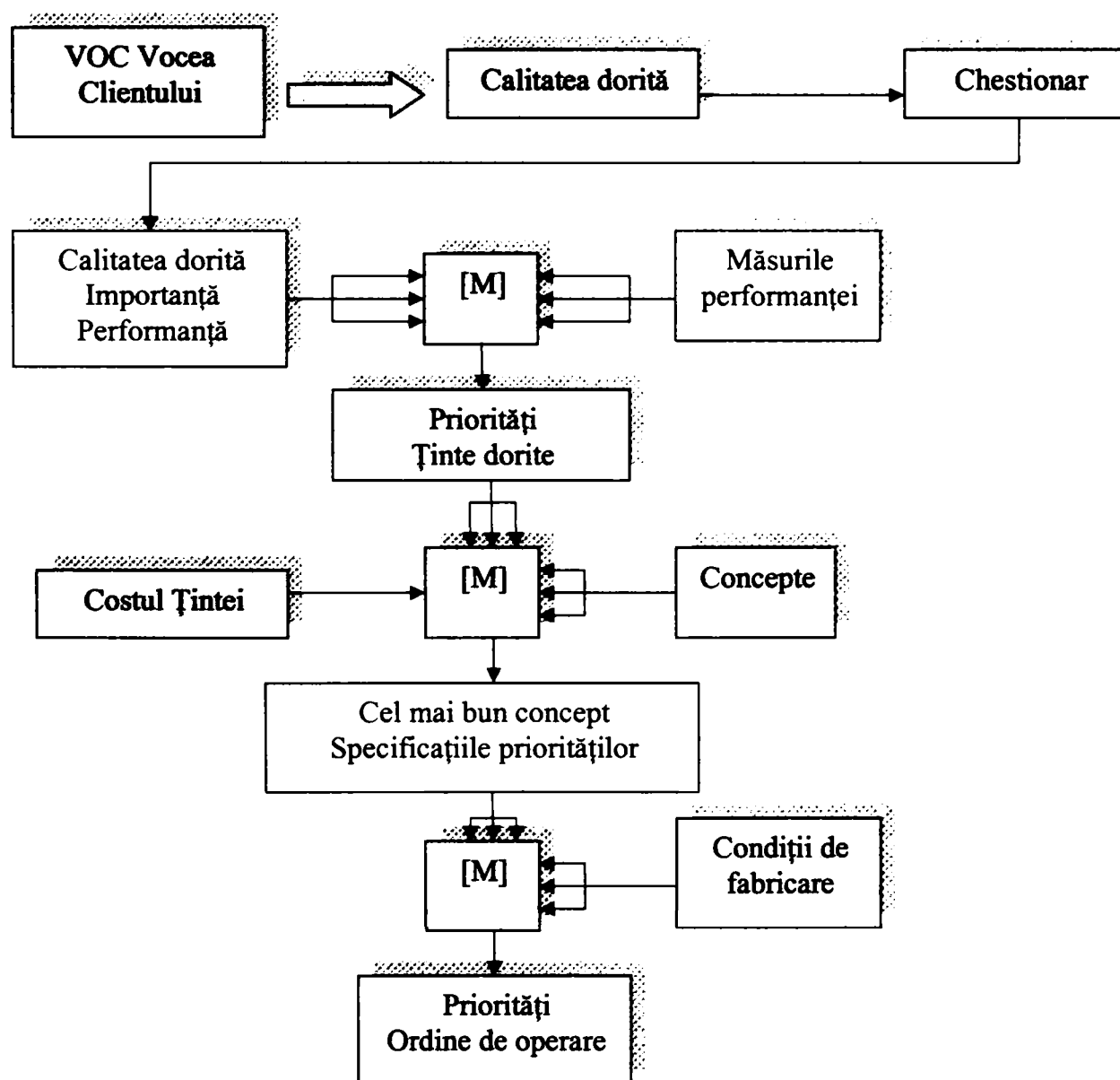


Fig. 3.29 Modelul QFD pentru proiectarea produselor

| Etapele QFD | Metoda Taguchi |
|--|---|
| <p>Etapa 1. Identificarea segmentelor de clienți, selectarea criteriilor pentru ierarhizarea segmentelor și ierarhizarea lor.</p> | <p>Metoda Taguchi nu are un corespondent pentru această etapă.</p> |
| <p>Etapa 2. Înțelegerea nevoilor clienților și a mediului. Sortarea necesităților clienților în calitate dorită, funcțiuni, probleme de fiabilitate, soluții, moduri de defectare, siguranță.</p> | <p>Metoda Taguchi oferă o altă perspectivă asupra surselor de variație și asupra funcției ideale.</p> |
| <p>Etapa 3. Corelarea informațiilor subiective, referitoare la calitatea dorită, de la client cu măsura obiectivă a performanței folosită de proiectant prin folosirea "Casei Calității". Dacă se dorește îmbunătățirea unui produs existent, atunci trebuie identificate conflictele între diferitele măsuri ale performanței. Aceste conflicte influențează compromisul făcut în setul valorilor țintă în urma adoptării unui referențial tehnic.</p> | <p>Metoda Taguchi folosește avantajele oferite de interacțiunile pozitive. În plus oferă funcția pierdere a calității ca o măsură mai bună a referențialului tehnic.</p> |
| <p>Etapa 4. Generarea conceptului</p> | <p>Metoda Taguchi determină cele mai bune valori ale parametrilor de proiectare pentru fiecare concept luat în considerare.</p> |
| <p>Etapa 5. Problematika procesului de fabricare, incluzând utilajele și capacitatea tehnologiei curente.</p> | <p>Utilizarea condițiilor robuste de operare Taguchi. Folosirea metodei Taguchi pentru găsirea semnalului de intrare adecvat în scopul selectării semnalului de ieșire dorit pentru procesul de fabricare. Dezvoltarea unei baze de date a experimentelor Taguchi pentru cele mai importante condiții de operare.</p> |

Tab 3.12 Posibilități de utilizare a Metodei Taguchi în QFD

3.5 Metoda Taguchi și Modelul Kano

La sfârșitul anilor '70 Dr. Noriaki Kano de la Universitatea Rika din Tokyo a îmbunătățit definiția calității adăugând o nouă dimensiune acesteia. Definițiile precedente ale calității până în acel moment au fost *liniare și unidimensionale* (Fig.3.30). Dr. Kano a integrat calitatea unui model bidimensional (Fig. 3.31),

considerând două dimensiuni: modul în care se comportă un produs sau serviciu din punct de vedere al performanței (axa X), și gradul de satisfacție al utilizatorului / clientului (axa Y).

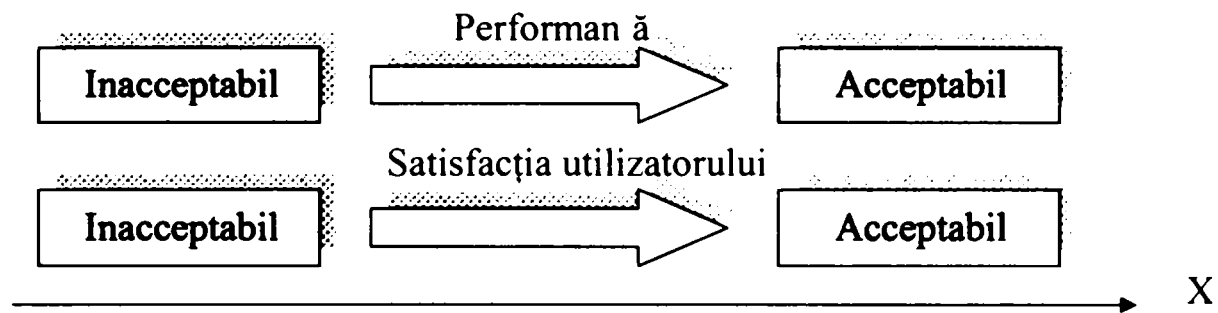


Fig. 3.30 Calitatea Unidimensională

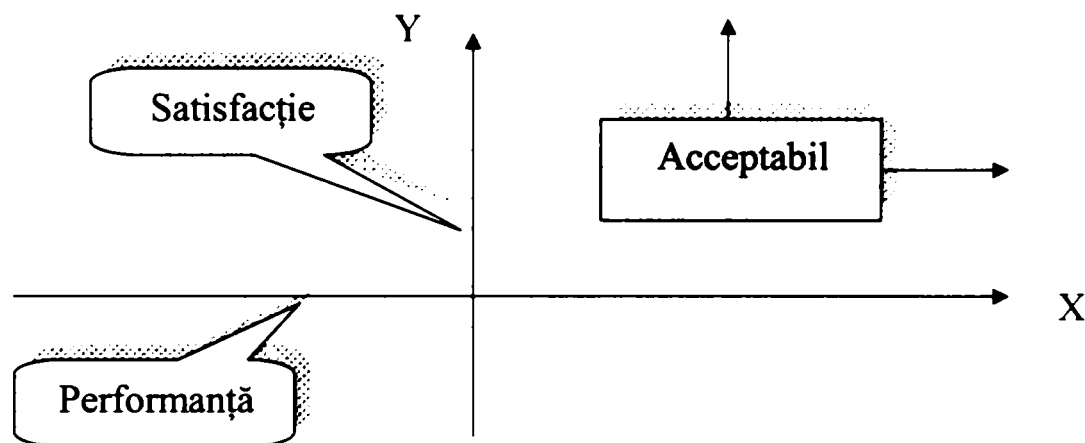


Fig. 3.31 Calitatea Bidimensională

Juxtapunerea parametrilor de performanță respectiv a satisfacerii utilizatorilor în 2 axe a creat posibilitatea definirii calității într-un mod mai sofisticat și holistic [U1]. Corelarea calității pe cele 2 axe (Fig. 3.32), a condus la 3 definiții unice ale calității și anume: *Calitatea de Bază* (BQ), *Calitatea de Performanță* (PQ) și *Calitatea de Încântare* (EQ).

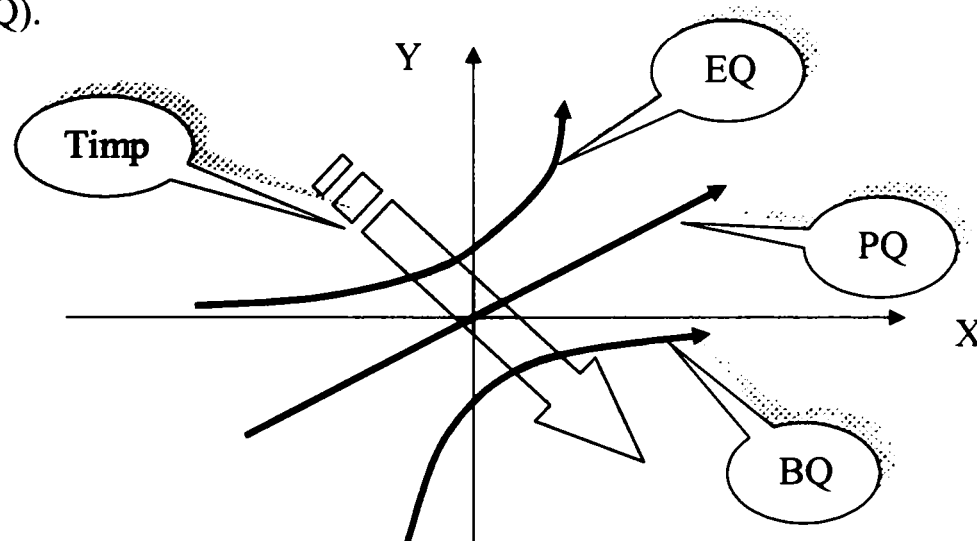


Fig. 3.32 Modelul Kano

Dinamica *calității de bază* (BQ) indică faptul că dacă cerințele unor clienți nu sunt îndeplinite atunci se creează insatisfacții majore iar dacă acestea sunt îndeplinite atunci creează numai efecte limitate asupra satisfacției acestora. Neîndeplinirea calității de bază este exprimată de clienți prin reclamații și plângeri. În industrie măsura pentru calitatea de bază o constituie plângerile clienților, datele de garanție, datele de service, produsele reclamate, numărul de acțiuni în instanță etc.

Un al doilea tip de cerințe ale clienților generează satisfacție proporțională cu performanța produsului sau serviciului. Atributele de *calitate de performanță* (PQ) cauzează în general un răspuns liniar, grade crescute de satisfacție fiind cauzate de grade ridicate de împliniri. Clienții își exprimă în mod liber dorințele relativ la calitatea de performanță, acest tip de informație fiind numită “Vocea Clientului” (VOC), deoarece sunt lucruri despre care clientul dorește să vorbească. La modul general se poate spune că cu cât performanța este mai bună cu atât satisfacția este mai mare.

Al treilea tip de calitate generează satisfacție pozitivă la orice nivel de execuție. Încântarea este generată de faptul că, clientul primește anumite elemente pe care nu le-a așteptat, cerut sau gândit. În general clienții nu definesc elementele de încântare în chestionare deoarece ei nu știu că le doresc. Pentru a genera încântarea clientului și loialitatea sa față de marcă, companiile trebuie să apeleze la resursele creative pentru a identifica idei și posibilități de inovare. *Calitatea de încântare* (EQ) devine principalul motiv pentru care clienții fac dintr-o anumită organizație alegerea de bază în raport cu competiția. Elementele de încântare cauzează un răspuns exponențial, mici îmbunătățiri în oferirea elementelor de încântare precum și acumularea acestora cauzează creșteri importante în gradul de satisfacție al clienților.

Dinamica calității în timp arată însă că cerințele clienților se schimbă în decursul timpului (Fig. 3.45). Sursele de încântare tind să devină “așteptate” pe măsură ce piața devine familiarizată și saturată cu ele. Elementul de încântare devine unul de performanță și posibil în timp unul de bază.

3.5.1 Calitatea tridimensională

Una din legile evoluției sistemelor este *Legea Dinamicității* care spune că un sistem va deveni mai flexibil și dinamic în timp (chiar Modelul Kano este un astfel de exemplu). *Legea tranziției la supersistem* (MONO-BI-POLI) spune că *monosistemele* se vor combina cu alte *monosisteme* pentru a forma *bisisteme*. Combinarea Calității, așa cum este exprimată în Modelul Kano, cu efectul sinergetic al TRIZ și al Metodei Taguchi într-un model tridimensional (Fig. 3.33) respectă această lege. Avantajul unui bisistem este că asigură o funcționalitate cu eficiență sporită și cu un consum de resurse mai mic decât al monosistemelor separate.

Așa cum Modelul Kano este compus din 3 elemente (BQ, PQ, EQ), interfața TRIZ+Taguchi este compusă din 3 subseturi independente dar complementare : 1) AFD+FMEA, 2) Mijloace clasice TRIZ+Taguchi și 3) DE.

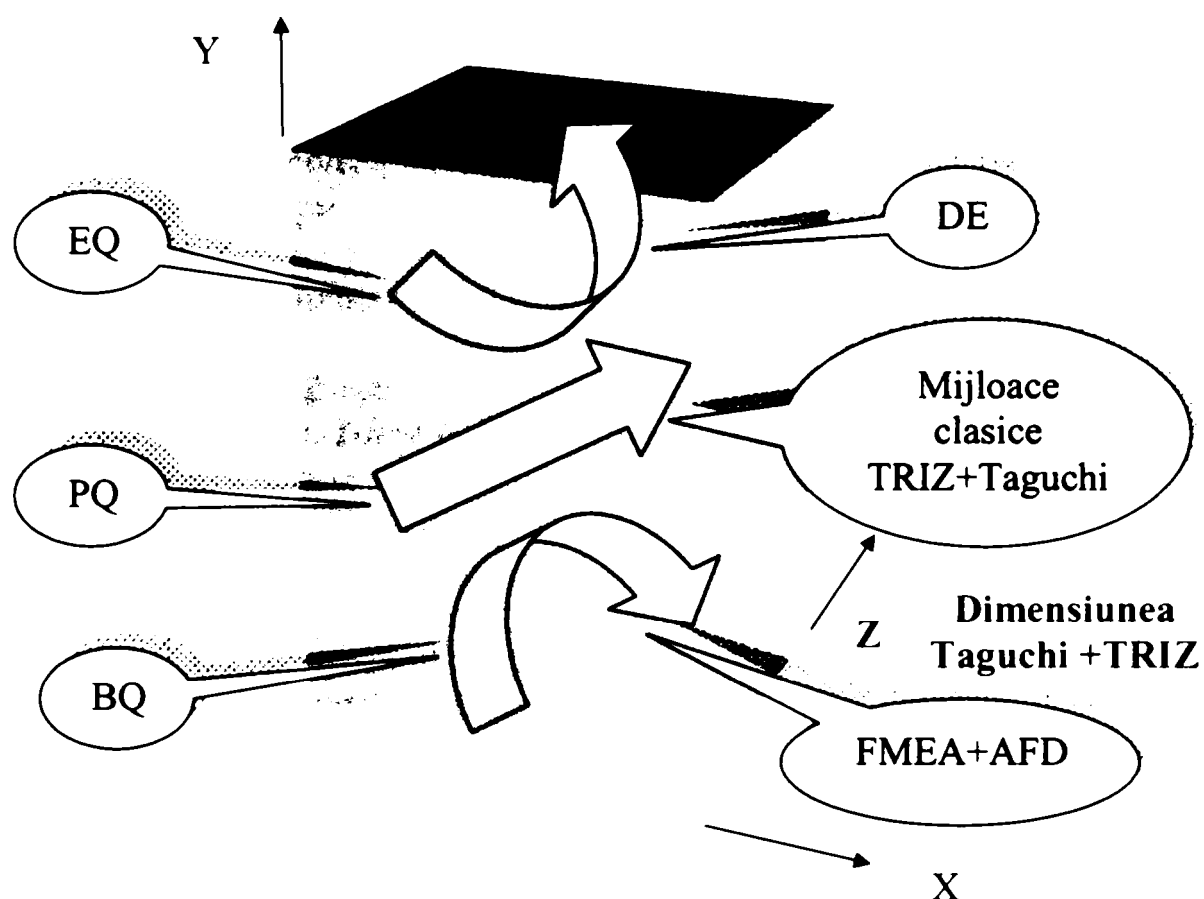


Fig. 3.33 Modelul tridimensional al calității

Cea de-a treia dimensiune adăugată calității de efectul sinergetic al metodelor TRIZ și Taguchi, permite explorarea, îmbunătățirea și optimizarea soluțiilor tehnologice pentru fiecare tip de calitate descris de Modelul lui Kano.

3.5.1.1 Calitatea de bază (BQ) și FMEA+AFD

Calitatea de bază se adresează funcțiilor care sunt “cerute” de către client deși sunt “nespuse până când sunt violate”. Acest lucru pare contradictoriu însă în realitate BQ este considerată a fi atât de evidentă încât nominalizarea ei este considerată redundantă. **Dacă BQ este prezentă, atunci clientul este neutru.** Metodele tradiționale de precizare a căderilor, FTA-Fault Tree Analysis, HAZOP-Hazards and Operations Analysis și în special FMEA-Failure Mode and Effect Analysis (Analiza modurilor de defectare și a efectelor acestora- AMDEC) utilizată în cadrul metodei Taguchi, sunt astfel construite încât să răspundă la întrebarea “Ce poate merge rău?”. Problema este însă că acest mod de abordare urmează scenariile tradiționale de cădere cărora le lipsește validitatea structurală pentru că sunt subiect al inerției psihologice. Un proiectant va explora situația numai din punctul său de vedere, această constrângere limitând analiza căderilor numai la o anumită regiune a spațiului total disponibil al căderilor. Pe de altă parte, AFD- Anticipatory Failure Determination (Determinarea Anticipată a Căderilor) (vezi Fig. 3.6), inversează situația punând întrebarea “Cum poate fi distrus sistemul?”. Există două beneficii

importante ce rezultă din abordarea “problemei inversate” și anume pe de o parte o nouă perspectivă asupra sistemului și pe de altă parte se pot folosi tehnicile TRIZ.

Abordarea combinată a FMEA și AFD adaugă o nouă dimensiune BQ atât prin modul de abordare a problemelor cât și prin efectul sinergetic al tehnicilor puse la dispoziție de metodele Taguchi și TRIZ.

3.5.1.2 Calitatea de performanță (PQ) și Taguchi + TRIZ

Calitatea de performanță este caracterizată de abilitatea produsului de a îndeplini gradele de realizare dorite. ***Dacă PQ este absentă, atunci clientul va fi nesatisfăcut și viceversa.*** Având în vedere natura liniară a PQ, este evident că atingerea nivelurilor mai înalte de performanță în special într-un mod eficient din punct de vedere al costurilor (Funcția pierdere a calității a lui Taguchi) creează diferențiere între produse asigurând avantajul competitiv. Înțelegerea modului în care se pot depăși barierele pentru creșterea performanței la costuri scăzute este cheia pentru depășirea competiției. Pe de altă parte, performanța produselor este limitată de conflictele inerente din cadrul sistemului. Conflictele tipice, numite în termeni TRIZ contradicții, pot fi rezolvate prin efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ așa cum s-a prezentat în § 3.2.7.

Funcția pierdere a calității a lui Taguchi împreună cu efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ în modul de abordare și rezolvare a contradicțiilor din cadrul sistemului adaugă o nouă dimensiune PQ.

3.5.1.3 Calitatea de încântare (EQ) și DE

Calitatea de încântare se adresează nevoilor “latente” sau neîndeplinite ale clienților. Interfața TRIZ pentru realizarea celei de a treia dimensiuni în cazul EQ este DE-Directed Evolution (Evoluție Direcționată) care este ultima etapă a “*Previziunilor Tehnologice*” (Technological Forecasting) și care are la bază “*Legile Evoluției Tehnologice*”. Aceste legi descriu progresia naturală a produselor (curbele S) și au fost completate cu “*Liniile Evoluției*” ce permit organizațiilor să “vadă” derivatele posibile viitoare ale produselor. Aceste produse derivate pot apărea în mod natural sau pot fi “direcționate” să apară ca parte a strategiei organizației de dezvoltare a produselor. ***Dacă EQ este absentă, clientul va fi neutru sau nu va fi nesatisfăcut. Dacă EQ este prezent și implementat corespunzător, atunci clientul va fi încântat.*** Aplicarea DE permite de asemenea protejarea proprietății intelectuale a organizațiilor prin patente.

Observații:

- BQ, PQ, EQ nu sunt elemente. Elementul este o soluție particulară sau un mod de a satisface o cerință.
- O *cerință de bază* reprezintă substratul pentru un element. Clientul dorește un anumit beneficiu și nu neapărat modul particular în care se oferă acesta.

- Modul de a afla informația despre ce clientul așteaptă în ceea ce privește *cerințele de performanță* se face întrebând “De ce?”. Se determină astfel elementul (elementele) pe care clientul le cere prin *cerința de bază*. După ce s-au obținut *cerințele de performanță*, ele pot fi clasificate apoi ca și BQ, PQ sau EQ.

3.5.2 Funcții “Pierdere a Calității” bazate pe modelul Kano

Așa cum s-a arătat anterior, funcția pierdere a calității (QLF), reprezintă un mecanism de evaluare a calității pe o scală monetară atunci când produsul (procesul) se abate de la o valoare țintă identificată de client. O caracteristică de calitate dorită are o valoare a pierderii *nenegativă* [T18] și pierderea este minimă față de valoarea țintă identificată de client (chiar zero). Atunci se poate face presupunerea că există o valoare țintă identificată de către client și care este valoarea cu care clientul este “*total satisfăcut*”, neavând motive de a fi “*încântat*”. Conform modelului lui Kano atunci când clientul primește performanța așa cum se așteaptă, atunci acesta este satisfăcut și nu există pierderi la acesta. De asemenea dacă clientul primește o performanță mai bună decât se așteaptă el este “*încântat*” și există anumite beneficii pentru acesta. Se poate spune în acest caz, conform modelului Kano, că pierderea calității poate fi *negativă*. Se poate spune deci că fiecare tip de *cerință de calitate* trebuie să se transforme în *cerință de performanță*. (Fig.3.34)

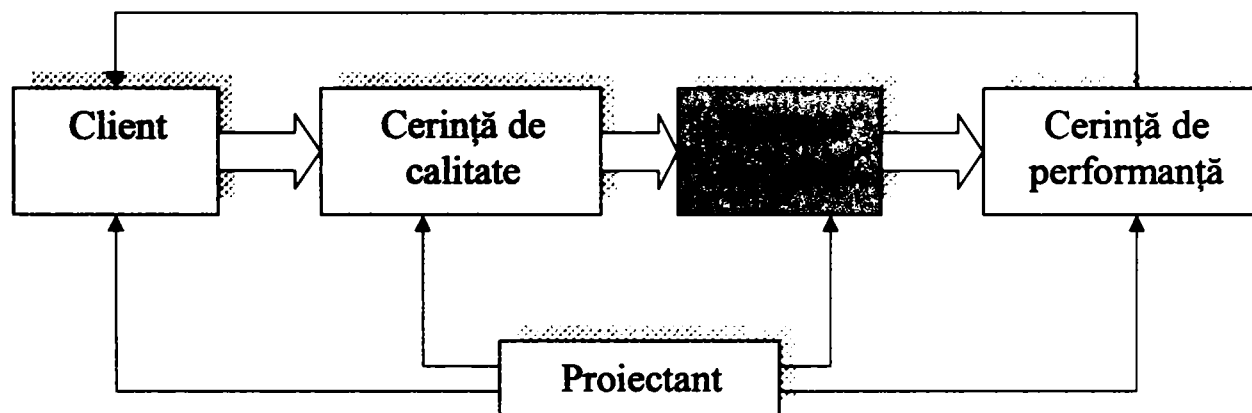


Fig. 3.34 Transformarea cerințelor de calitate în cerințe de performanță

3.5.2.1 Funcția “Pierdere a Calității” în cazul PQ

În cazul PQ, performanțele de calitate transformate pot fi împărțite în 3 tipuri:

a) Tipul LTB (“cu cât mai mare cu atât mai bine”)

Acest tip, LTB, înseamnă că clientul dorește o mare cantitate de cerințe de performanță. În mod ideal valoarea performanței se apropie de $+\infty$ și pierderea de calitate se apropie de 0, totuși clientul având o anumită valoare pentru care este

satisfăcut. În acest caz clientul este satisfăcut când se atinge această valoare și va fi încântat dacă ea este depășită.

Bazat pe conceptul de pierdere a calității a lui Taguchi, rezultă că atunci când clientul este neutru nu există pierdere pentru client, când este nesatisfăcut există o pierdere la client iar când este încântat pierderea va fi negativă (Fig. 3.35 a).

b) Tipul STB (cu cât mai mic cu atât mai bine)

Acest tip, STB, înseamnă că clientul este cu atât mai satisfăcut cu cât valoarea scade. Valoarea ideală este pe măsură ce valoarea performanței se apropie de $-\infty$ și pierderea calității se apropie de 0. Ca și în cazul precedent clientul are o valoare așteptată și când această valoare este atinsă nu există pierdere pentru client.

Bazat pe conceptul de pierdere a calității a lui Taguchi, rezultă că atunci când clientul este neutru nu există pierdere pentru client, când performanța este mai mare decât valoarea așteptată apare o pierdere la client iar atunci când performanța este mai mică decât valoarea așteptată clientul este încântat și pierderea va fi negativă (Fig. 3.35 b).

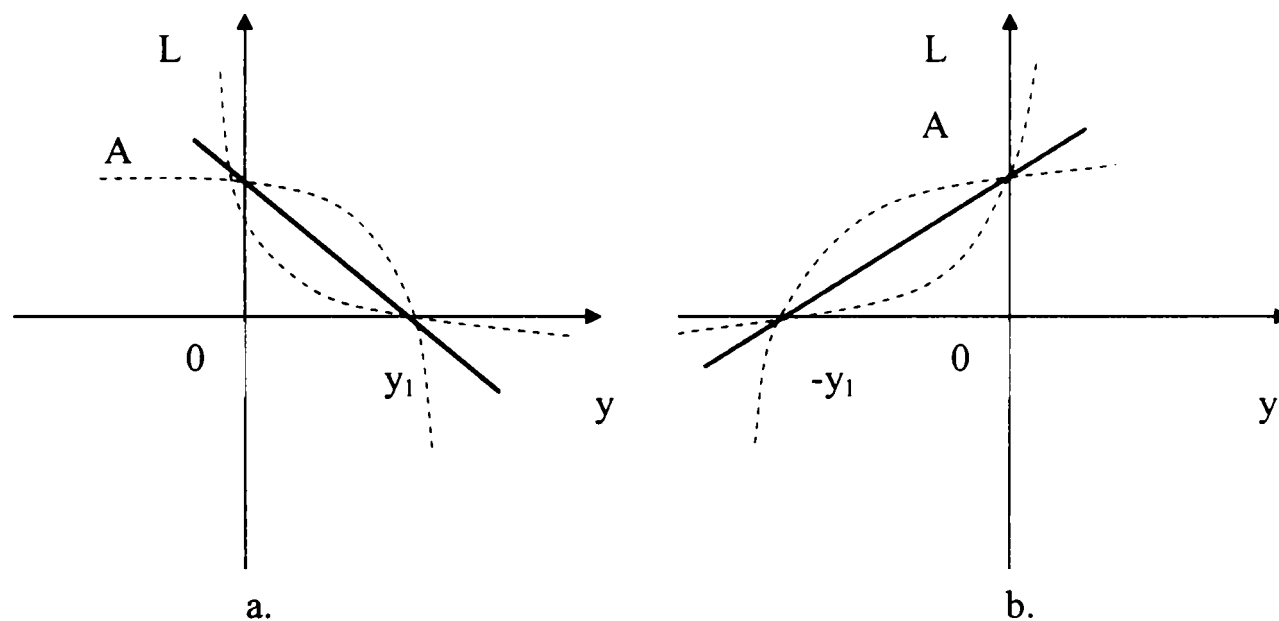


Fig. 4.35 Funcția pierdere a calității bazată pe modelul Kano în cazul PQ

a. L_{KLTB}

b. L_{KSTB}

c) Tipul NTB (nominal este cel mai bine)

Acest tip, NTB, înseamnă că clientul are o valoare așteptată și la această valoare pierderea este 0. Când performanța deviază de la valoarea așteptată (nominală), apare o pierdere la client. Pierderea 0 este cea mai mică pierdere pentru client (Fig. 4.36)

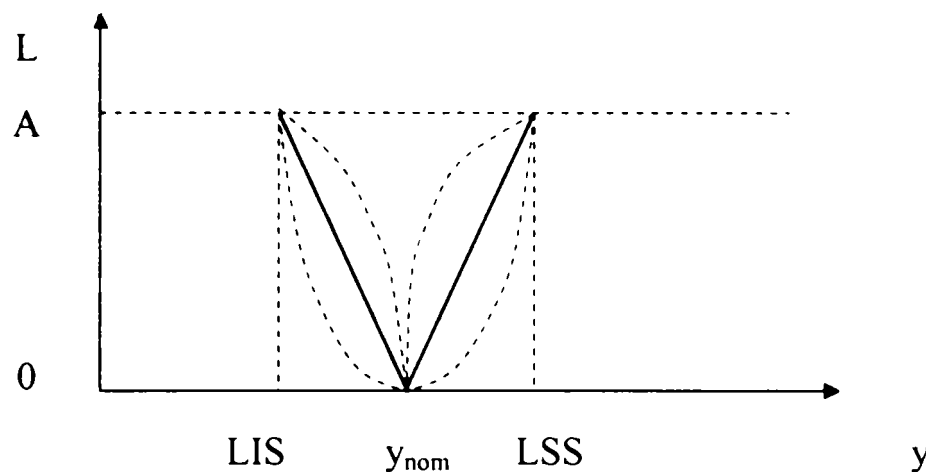


Fig. 4.36 Funcția pierdere a calității bazată pe modelul Kano în cazul PQ, L_{NTB}

3.5.2.2 Funcția “Pierdere a Calității” în cazul BQ

Așa cum s-a arătat anterior BQ este o cerință de calitate așteptată să fie întotdeauna prezentă. BQ acționează ca un calibrul “*Trece - Nu trece*” și de aceea dacă este prezentă clientul este neutru iar dacă lipsește va fi nesatisfăcut. Rezultă că pierderea va apare numai în cazul în care BQ lipsește, aceasta fiind egală cu 0 în prezența lui BQ. (Fig. 4.37 a)

3.5.2.3 Funcția “Pierdere a Calității” în cazul EQ

Și în acest caz EQ acționează ca un calibrul “*Trece - Nu trece*”, însă într-o manieră diferită decât în cazul precedent. Dacă EQ nu este prezentă atunci clientul va fi neutru și pierderea va fi egală cu 0 iar dacă EQ este prezentă atunci clientul va fi încântat și pierderea este negativă (apare un beneficiu) (Fig. 4.37 b)

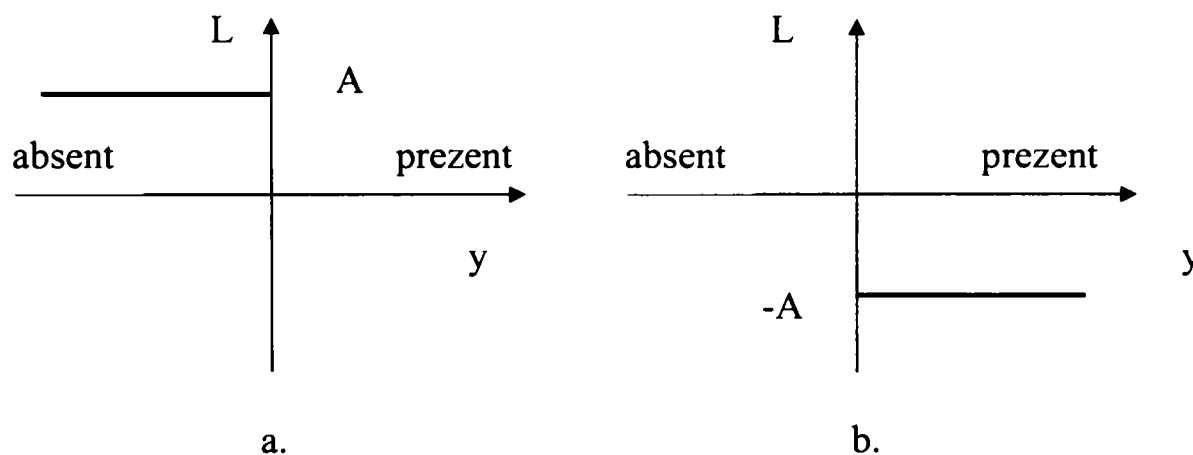


Fig. 4.37 Funcția pierdere a calității bazată pe modelul Kano în cazurile BQ și EQ

a. L_{KBQ}

b. L_{KEQ}

- 164 -

Observații:

- ✓ Modelul Kano furnizează o clasă generală de funcții pierdere. Funcțiile pierdere bazate pe PQ sunt similare cu funcțiile pierdere Taguchi pentru cazurile LTB, STB, NTB. Așa cum se observă din Fig. 4.47 și Fig. 4.48, funcțiile propuse au o flexibilitate mai mare (includ și funcția pierdere pătratică a lui Taguchi).
- ✓ Funcțiile pierdere propuse în cazurile BQ și EQ au o formă funcțională similară cu o parte a funcției pierdere treaptă (o formă convențională acceptabilă).

3.6 Metoda Taguchi și Procesul Global 8D (G8D)

Procesul global 8D este o metodologie de rezolvare a problemelor folosită pe scară largă pentru îmbunătățirea produselor și proceselor. G8D este structurat în 8 discipline punându-se accentul pe efectul sinergetic al echipei. Fiecare disciplină din cadrul G8D este susținută de o listă de întrebări. Pe toată durata procesului de rezolvare a problemelor, realizările fiecărei discipline sunt înregistrate și sumarizate în forme speciale. Structura Procesului Global 8D este dată în Fig. 4.50

| |
|--|
| D0 – Pregătirea pentru G8D |
| D1 – Stabilirea echipei de lucru |
| D2 – Descrierea problemei |
| D3 – Dezvoltarea “Acțiunii Interimare de Izolare” (ICA) |
| D4 – Definirea și verificarea “Cauzei de Bază” și a “Punctului de Ieșire” |
| D5 – Alegerea și verificarea “Acțiunilor Corective Permanente” (PCA) |
| D6 – Implementarea și validarea PCA |
| D7 – Prevenirea reparației |
| D8 – Recunoașterea meritelor echipei și ale membrilor |

Fig. 4.38 Structura G8D

↓ **D0** – *Pregătirea pentru G8D*

Scopul acestei etape preliminare este identificarea cantitativă a problemei și consecințelor pentru clienți și determinarea unei acțiuni imediate pentru izolarea consecințelor. În metoda Taguchi această etapă corespunde definirii problemei studiate, a alegerii factorilor de control și de zgomot.

↓ **D1** – *Stabilirea echipei de lucru*

Formarea echipei se bazează pe criteriul G8D cum că o singură persoană nu este capabilă să rezolve problema ci este nevoie de o echipă cu membrii a căror roluri să fie bine definite. În metoda Taguchi această etapă corespunde formării grupului de reflecție a echipei de lucru precum și stabilirea responsabilului cu experimentarea.

↓ **D2** – *Descrierea problemei*

În G8D, descrierea problemei se bazează pe o listă de întrebări cum ar fi:

- *Ce este în neregulă și cu ce ?*
- *Cum poate fi cuantificată problema ?*
- *Ce ?, Când ?, Unde ?, Cât de mult ?*
- *A fost completată o diagramă Ishikawa (cauză – efect) ?*
- *Problema descrie "ceva s-a schimbat ?" sau "aceasta nu a fost niciodată o situație de succes ?".*
- *Trebuie alocate resurse suplimentare ?*

Este evident că în metoda Taguchi este util să se urmeze până la un moment acest tip de chestionar cu scopul de a observa orice ar putea fi relevant în prepararea experimentelor.

↓ **D3** – *Dezvoltarea "Acțiunii Interimare de Izolare" (ICA)*

Această etapă din G8D dă instrucțiuni în ceea ce privește definirea, verificarea și implementarea unor măsuri preventive temporare (ICA) pentru izolarea efectelor dăunătoare ale problemei atât față de clienții interni cât și față de cei externi. Metoda Taguchi nu poate aduce contribuții în această etapă întrucât este o metodă analitică de rezolvare a problemelor.

↓ **D4** – *Definirea și verificarea "Cauzei de Bază" și a "Punctului de Ieșire"*

Sarcina disciplinei D4 este definită ca fiind izolarea și verificarea cauzei de bază prin testarea fiecărei cauze posibile ce acționează asupra problemei. De asemenea o cerință importantă este izolarea și verificarea locurilor din proces unde efectele cauzelor de bază au fost detectate. Metoda Taguchi acționează exact în sens opus, încercând să izoleze efectele cauzelor (zgomote) astfel încât să se obțină procese sau produse robuste. Din acest punct de vedere metoda Taguchi este mai rapidă și eficientă și poate fi folosită cu succes ca o parte în D4.

↓ **D5** – *Alegerea și verificarea "Acțiunilor Corective Permanente" (PCA)*

Această etapă include generarea soluțiilor problemei și selectarea celei mai bune soluții a PCA astfel încât să se genereze înlăturarea cauzelor de bază și fără să se mai producă efecte secundare nedorite. Etapa corespunzătoare din metoda Taguchi corespunde experimentelor de confirmare. Aceste experimente de confirmare constituie o bază pentru a arăta că problema s-a rezolvat și nu apar efecte suplimentare nedorite.

↓ **D6** – *Implementarea și validarea PCA*

După determinarea PCA, ele trebuie implementate pe când ICA trebuie îndepărtate, rezultatele pe termen lung trebuind a fi monitorizate. Metoda Taguchi consideră experimentele de confirmare ca fiind soluția pentru validarea experimentelor.

↓ **D7** – *Prevenirea reapariției*

O dată ce acțiunile permanente au fost implementate în G8D, prevenirea reapariției problemei se face prin modificarea tuturor elementelor sistemului inclusiv politici, practici sau proceduri. În cazul metodei Taguchi se consideră că elementele sistemului (factorii de control) au fost modificate deja în faza experimentărilor.

↓ **D8** – *Recunoașterea meritelor echipei și ale membrilor*

Deoarece atât G8D cât și metoda Taguchi se bazează pe echipe, această etapă este comună, recunoașterea meritelor echipei și membrilor săi fiind utile pentru motivare.

3.7 Concluzii

- ✓ Proiectarea Robustă Taguchi se focalizează pe *transformarea energiei* iar metoda TRIZ se focalizează pe *funcția de bază*.
- ✓ Procesul de gândire al Proiectării Robuste Taguchi se concentrează asupra modului de optimizare a unui sistem tehnic (tehnologic) astfel încât să devină insensibil la efectele condițiilor incontrolabile (zgomote) iar metoda TRIZ are un proces de gândire “negativ” în sensul că abordează inițial conflictele și contradicțiile care trebuie rezolvate.
- ✓ Proiectarea Robustă Taguchi pune accent pe aplicarea efectivă a strategiilor ingineresti, identifică *funcția ideală* și apoi maximizează *funcția utilă* a sistemului. Metoda TRIZ pune accent pe contradicții, începând cu studiul parametrilor de proiectare și revenind ulterior la cerințele funcționale.
- ✓ Metoda Taguchi arată clar contradicțiile tehnice și fizice și ajută metoda TRIZ în sensul că identificarea problemei de rezolvat devine mai ușoară iar contradicțiile pot fi eliminate cu tehnicile TRIZ.
- ✓ Eliminarea efectelor acțiunilor dăunătoare, care reprezintă principiul de bază al Proiectării Robuste Taguchi, reprezintă o cale realistă de a aduce un sistem spre idealitate, în sensul TRIZ.
- ✓ Metoda Taguchi poate fi folosită la atingerea obiectivelor IFR, ale “Trendului Evoluției” și la strategia “Utilizarea resurselor” folosite în TRIZ.
- ✓ Cele 8 etape ale metodei Taguchi pot fi folosite cu succes la îmbunătățirea celor 9 etape din ARIZ – 85C.
- ✓ Metoda Taguchi poate fi folosită în procesul de rezolvare a problemelor cu metoda TRIZ prin utilizarea “acțiunilor utile” ca și caracteristici de calitate care să fie apoi maximizate (similar cazului LTB), includerea în timpul experimentelor a “acțiunilor dăunătoare” în categoria factorilor de zgomot (insensibilitatea la zgomot făcând procesul mai robust), evaluarea procesului modificat, așa cum este el sugerat de analiza Substanță – Câmp și/sau ARIZ chiar prin îmbunătățirea caracteristicilor de calitate făcând procesul mai robust, eliminarea/minimizarea contradicțiilor care sunt verificate/puse în evidență cu ajutorul graficelor efectelor factorilor de control.
- ✓ Procesul de rezolvare a problemelor în TRIZ, **DSSE** (**D**efine-**S**elect-**S**olve-**E**valuate) ; (Definește-Selectează-Rezolvă-Evaluează), păstrează principiul **PDCA** (**P**lan-**D**o-**C**heck-**A**ct) ; (Planifică-Efectuează-Verifică-Acționează) al lui Edwards. W. Deming folosit în metoda Taguchi.

- ✓ Efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ poate fi folosit în fazele de proiectare ale produselor, unii din factorii de control putând fi aleși ca fiind chiar soluțiile inventive rezultate din matricea contradicțiilor.
- ✓ Proiectarea Axiomatică se focalizează pe *ieșirea dorită*, poate fi aplicată cu precădere la structura și fundamentul sistemului în proiectarea conceptuală, procesul de gândire al proiectării Axiomatice fiind unul “*pozitiv*” în sensul că încearcă crearea “*proiectului imun și perfect*”.
- ✓ Identificarea *funcției ideale*, selectarea unei caracteristici de ieșire adecvate a sistemului și promovarea aditivității efectelor factorilor de control din Proiectarea Robustă Taguchi este echivalentă cu menținerea independenței cerințelor funcționale din Proiectarea Axiomatică.
- ✓ Corolarele 1,2,3,6 și 7 ale Proiectării Axiomatice au corespondent în Proiectarea Robustă Taguchi.
- ✓ Maximizarea raportului Semnal/Zgomot din Proiectarea Robustă Taguchi este echivalentă cu minimizarea conținutului informației unui proiect din Proiectarea Axiomatică.
- ✓ Există o similitudine între măsura informației a lui Kullback dată de divergența simetrică și conținutul informației din Proiectarea Axiomatică.
- ✓ Măsura informației este direct proporțională cu valoarea așteptată a funcției pierdere a calității Taguchi.
- ✓ Conținutul informației unui proiect, în sensul Proiectării Axiomatice, este invers proporțională cu raportul Semnal/Zgomot (minimizarea conținutului informațional înseamnă maximizarea raportului Semnal/Zgomot).
- ✓ Combinarea calității, așa cum este exprimată în modelul Kano, cu efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ , conduce la un model tridimensional al calității.
- ✓ Modelul Kano furnizează o clasă generală de funcții pierdere similare cu funcțiile pierdere Taguchi pentru cazurile LTB, STB, NTB, dar cu o flexibilitate mai mare.
- ✓ Metoda Taguchi poate fi folosită în etapele de aplicare ale metodei QFD.

CAPITOLUL IV

TEHNICA CREȘTERII MONOCRISTALELOR DE DIMENSIUNI MARI

4.1. Tehnici de procesare a monocristalelor

4.1.1 Introducere

În stadiul actual al tehnologiei de vârf, procesele de creștere a cristalelor, în vederea obținerii monocristalelor cât mai pure sau dopate, au devenit importante, obținându-se produse cu largi aplicații în fizica corpului solid, în metalurgie, în industria optică (laseri, prisme, lentile, etc) și în industria de bijuterii, la obținerea de pietre prețioase sintetice (safirul sau rubinul) [B9], [P16], [S7]. Tehnicile folosite pentru creșterea și, implicit pentru doparea în timpul creșterii depind atât de parametrii de creștere ale diferitelor tehnici particulare precum și de proprietățile mecanice și termice ale materialului [L6], [L11]. Criteriile cele mai generale pentru selectarea metodei de creștere pentru un anumit material sunt date în tabelul 4.1. De exemplu, CaCO_3 se descompune înainte de a se topi, SiO_2 prezintă o transformare în fază solidă iar $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ nu se topește congruent [B10], [B11]; de aceea, aceste materiale nu se pot obține sub formă de monocristale din topitură. Anumite monocristale însă pot fi obținute prin mai multe tehnici, caz în care selectarea metodei se face pe baza cineticii de creștere (viteza de creștere) și a unor cerințe legate de dimensiune, formă, puritate și cost. Deoarece SiC este foarte puțin solubil în orice tip de solvenți, cristalele pure de SiC nu pot fi obținute din soluție [B10].

| Echilibrul solid-lichid-vapori | Parametrii de creștere ai cristalului | Parametrii materialului |
|---|--|--|
| Punctul de topire Congruența Domeniul de solubilitate | Metoda de creștere Temperatura de creștere Gradientul de temperatură | Variația densității Descompunerea fazelor Conductivitate termică Incinta de creștere Dilatare termică Coeficientul de difuzie Tensiunile de suprafață Vâscozitate |
| Domeniul de compoziție Presiunea vaporilor Transformările de fază polimorfe | Viteza de creștere Transferul de masă și de căldură Tratamentul de după creștere | Energia liberă interfacială Anizotropia |

Tab. 4.1 Criteriile pentru selectarea metodei de creștere pentru un anumit material

În funcție de starea de agregare a fazei inițiale, tehnicile de creștere a cristalelor pot fi clasificate în patru mari grupe:

- 1) Creșterea cristalelor din soluție
- 2) Creșterea cristalelor din fază gazoasă (transport de vapori)
- 3) Creșterea cristalelor din topitură
- 4) Creșterea cristalelor din fază solidă

În continuare sunt prezentate succint principalele metode de obținere a monocristalelor. În general, instalațiile experimentale și tehnologia obținerii cristalelor nu diferă dacă se obțin cristale pure sau dopate, singurul lucru care diferă fiind compoziția materialului nutritiv.

4.1.2 Creșterea cristalelor din fază gazoasă (transport de vapori)

Creșterea prin transport de vapori este larg utilizată în cazul obținerii materialelor care disociază la topire. O prezentare detaliată a acestei metode a fost făcută de Faktor și Garrett [B9], [S15]. Această tehnică este preferabil să se utilizeze pentru materialele care au o presiune a vaporilor relativ ridicată la o temperatură scăzută, se vaporizează congruent, nu prezintă tranziție de fază în stare solidă între temperatura camerei și temperatura de creștere și au o conductivitate termică ridicată. Schematic, creșterea cristalelor din fază gazoasă poate fi descrisă prin ecuația (4.1)



în care o sursă policristalină de material este transformată într-un monocristal.

Creșterea unui cristal prin transport de vapori poate fi împărțită în două categorii, depinzând de metoda utilizată pentru obținerea vaporilor. Dacă vaporii sunt obținuți prin sublimarea sau evaporarea materialului pur atunci procesul se numește depozitare fizică a vaporilor (PVD) sau transport fizic al vaporilor (PVT). Transportul poate fi congruent sau disociativ depinzând de modul prin care compusul vaporizează (fără descompunere sau cu disociere în timpul evaporării). Dacă reacția de transport include o specie chimică pentru transport care, printr-o reacție chimică formează compusul dorit, procesul de creștere a cristalului se numește transport chimic al vaporilor (CVT) sau depozitare chimică a vaporilor (CVD).

În continuare sunt prezentate exemple specifice de transport fizic și chimic al vaporilor și un exemplu de proces de vaporizare special utilizat pentru obținerea de filme subțiri, numit epitaxie prin fascicul molecular (MBE) [G7].

4.1.2.1. Creșterea prin transport fizic al vaporilor

Creșterea prin transport fizic al vaporilor (PVT) are loc într-o fiolă de cuarț sau orice alt material refractar [G7], [L7]. La un capăt al fiolei, vidată sau conținând gaz inert, este plasat materialul sursă iar la celălalt capăt este plasat germenele. Fiola este

apoi introdusă într-un gradient de temperatură. Metoda a fost larg utilizată pentru obținerea cristalelor de halogenuri de mercur. Halogenurile de mercur se descompun, la punctul de topire, în halogenuri mercurice, conform reacției:



Halogenurile de mercur pot fi cu succes obținute prin metoda PVT deoarece prezintă o presiune a vaporilor ridicată la temperaturi joase.

Pentru creșterea cristalelor prin această metodă se utilizează un cuptor cu cel puțin două zone, independent comandate și controlate termic (Fig. 4.1). Cristalul este crescut prin deplasarea fiolei în gradientul de temperatură. O altă variantă ar mai fi deplasarea cuptorului în lungul fiolei.

Viteza de creștere a cristalelor prin metoda PVT este mai mică decât valorile prezise teoretic. Aceasta ar putea fi datorată faptului că impuritățile eliminate în timpul creșterii cristalului tind să formeze un strat superficial la interfața de creștere, iar fluxul de creștere tinde să acumuleze impuritățile care nu sunt acceptate de interfață. În practică se folosesc mai multe metode pentru a facilita eliminarea acestor impurități, una dintre ele fiind creșterea în sistem deschis.

În cazul în care se dorește doparea în timpul creșterii prin această metodă, dopantul este introdus în incinta de creștere în aceeași zonă cu materialul policristalin. Este necesar ca dopantul să fie volatil la temperatura de lucru și să nu reacționeze chimic cu substanța de bază.

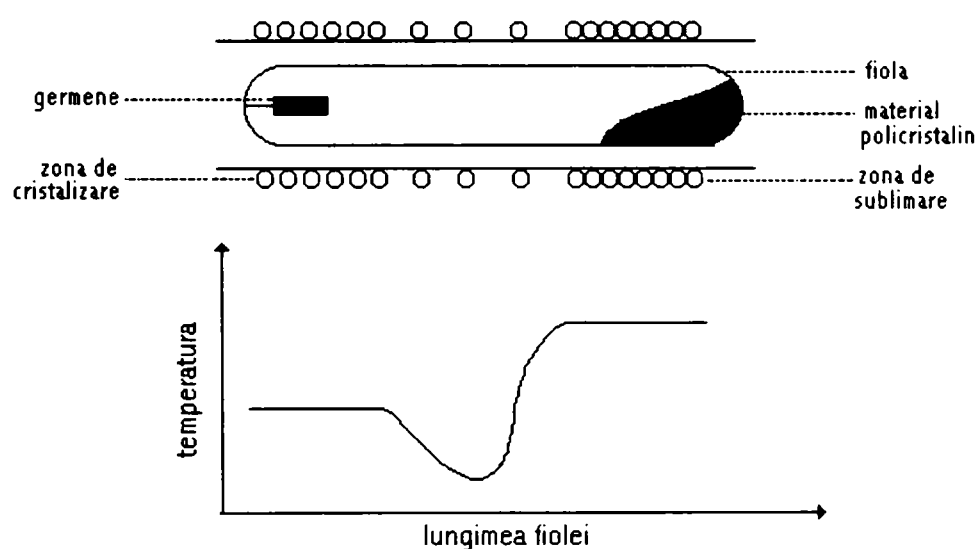


Fig. 4.1 Schema instalației PVT și profilul de temperatură

4.1.2.2 Creșterea prin transport chimic al vaporilor

Creșterea prin transport chimic al vaporilor (reacții chimice de transport, CVT sau CVD) este frecvent utilizată pentru a depozita o substanță solidă pe un substrat [G7], [B11]. De asemenea reacțiile chimice de transport se pot folosi pentru creșterea cristalelor atunci când nu este posibilă creșterea din topitură, soluție sau vapori.

Reacțiile chimice de transport se folosesc când substanța utilizată este insolubilă sau se descompune termic sub punctul de topire. Utilizarea proceselor de transport chimic este utilă deoarece sunt necesare temperaturi mult mai scăzute. Prin această metodă au fost obținute atât monocristale cât și straturi subțiri de diferite materiale magnetice, semiconductoare sau supraconductoare. Un alt domeniu de utilitate al tehnicii CVD este doparea materialelor semiconductoare în vederea inducerii unor proprietăți dorite ale acestora.

Un reactor CVT orizontal, utilizat pentru obținerea substraturilor de siliciu, este prezentat în Fig. 4.2. Aparatul este format dintr-un tub răcit cu apă în care este plasat un suport de grafit ce poate fi încălzit cu ajutorul unei bobine de RF. Un gaz purtător (H_2 , I_2 , N_2 , CH_4 , Cl_2 - depinde de sistemul cristalin ce trebuie crescut) este trecut prin aparat. Pentru creșterea siliciului se utilizează în general H_2 . Substratul se încălzește la temperatura dorită iar nutrientul se introduce în sistem prin intermediul gazului purtător. Se utilizează surse de material volatil cum ar fi: $SiCl_4$, SiH_4 , $SiHCl_3$, SiH_2Cl_2 . Pentru creșterea siliciului temperatura utilizată este între $1000\text{ }^\circ\text{C}$ și $1250\text{ }^\circ\text{C}$.

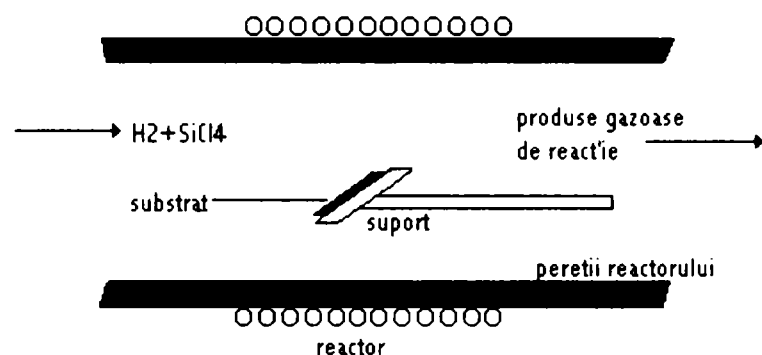


Fig. 4.2 Reactor CVT orizontal, utilizat pentru obținerea substraturilor de siliciu

4.1.2.3 Epitaxie prin fascicul molecular (MBE)

Epitaxia prin fascicul molecular presupune bombardarea unei suprafețe a unui cristal cu energia termică a unor fascicule moleculare în scopul de a crește cristale în condiții de vid foarte înalt (10^{-9} torr) [G7]. Un aparat MBE este compus dintr-o cameră de vid ultraînalt și o incintă de încălzire în care este produs fasciculul molecular. Incinta cu blocul de încălzire sunt montate pe un manipulator. În plus, mai sunt montate niște sisteme speciale de detecție care facilitează monitorizarea structurii suprafeței, a nivelului de impurități al filmului epitaxial și monitorizarea fascicolului molecular și a gazelor reziduale. Aceste facilități sunt foarte utile în stabilirea condițiilor de creștere și în controlul calității filmelor obținute. Acestea includ: spectrometrie de masă, spectroscopie electronică Auger și difracție cu electroni de energie înaltă.

Metoda este utilizată în special pentru studiul și obținerea structurilor compușilor de tip III-V, IV-VI și II-VI. Una dintre avantajele majore ale acestei tehnici constă în abilitatea controlului grosimii filmului cu un nivel submicrometric al acurateții s-au

obținut structuri de tip sandwich de 10^4 straturi de GaAs-AlAs, fiecare strat având grosime de monostrat). Astfel s-au obținut structuri multistrat binare, ternare sau cuaternare. De asemenea s-au obținut suprastructuri mai puțin uzuale și dispozitive cu caracteristici extraordinare.

4.1.3 Creșterea cristalelor din soluție

Esența metodei constă într-o soluție saturată a unui material într-un solvent corespunzător din care are loc creșterea după ce soluția a fost suprasaturată. Suprasaturarea poate avea loc fie prin evaporarea solventului (metodă izotermală) fie prin modificarea temperaturii acestuia (metode neizotermale) [G7], [L6].

Creșterea din soluție este mai lentă decât cea din topitură, însă există o serie de materiale (care se topesc incongruent, se descompun înainte de topire sau prezintă o tranziție de fază polimorfă între temperatura camerei și temperatura de topire) care nu pot fi obținute prin tehnicile din topitură. În aceste cazuri se necesită utilizarea metodelor de creștere din soluție sau din fază de vapori. În general, creșterea din fază de vapori este foarte lentă, ceea ce a făcut ca obținerea cristalelor din soluție să fie o metodă aplicată pe scară largă în industrie. Un alt motiv al aplicabilității metodei constă în faptul că se pot obține monocristale de dimensiuni mari, iar datorită solventilor utilizați, procesul de creștere are loc la temperaturi mai coborâte decât temperaturile necesare în cazul utilizării doar a materialului pur. Cantitățile ridicate de solvent care se utilizează au în schimb dezavantajul că agravează problema transferului de masă. În timpul procesului de creștere, dizolvarea la interfața lichid-solid complică cinetica creșterii interfaciale prin crearea unei competiții între atașarea solventului la rețea și separarea din solut.

Există o serie de alternative mai generale ale acestei metode, dintre care:

- Creșterea cristalelor din soluție apoasă,
- Metoda hidrotermală,
- Tehnici de creștere din gel,
- Epitaxie în fază lichidă,
- Tehnici de transport al solventului.

4.1.3.1 Creșterea cristalelor din soluție apoasă

În funcție de rezultatele dorite, suprasaturarea poate fi realizată și menținută în mai multe feluri: prin evaporarea apei, temperatura soluției poate fi micșorată sau se poate introduce în mod continuu, în camera de creștere, soluție saturată la o temperatură mai ridicată decât temperatura de creștere (Fig. 4.3).

Deși creșterea din soluție apoasă este utilizată pe scară largă la obținerea cristalelor de dimensiuni relativ mici [M15], [S15], metoda se poate folosi și pentru obținerea de cristale mari și de calitate bună (sarea Rochelle).

Avantaje: metoda este foarte simplă și ieftină. Cristalele obținute sunt suficient de bune. În plus, creșterea din soluție apoasă poate fi observată vizual, ceea ce face ca aceasta să fie utilizată pentru studiul parametrilor de creștere, a convecției și a transportului de masă prin intermediul fotografiei.

Principalul dezavantaj este că metoda este lentă. De asemenea ea necesită germeni de dimensiuni relativ mari și este limitată la materialele solubile în apă.

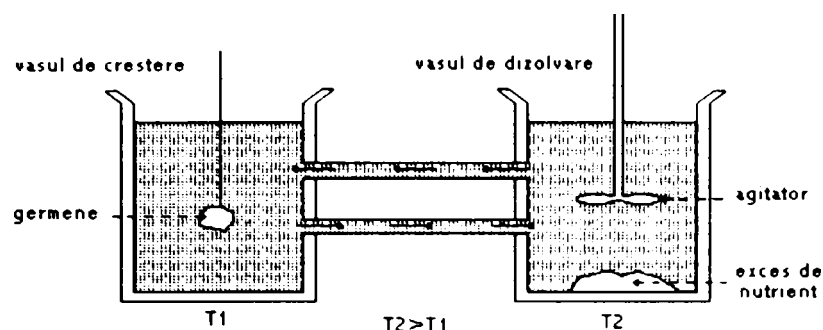


Fig. 4.3 Creșterea cristalelor din soluție apoasă

4.1.3.2 Metoda hidrotermală

Principiul metodei hidrotermale de obținere a cristalelor din materiale insolubile în condiții normale, constă în utilizarea unor solvenți specifici pentru fiecare material și folosirea unor temperaturi și presiuni ridicate pentru ca materialul nutritiv să se solubilizeze [A9], [D7], G5], [K3], [K4].

Dispozitiv sinteză (Fig. 4.4) este o incintă metalică închisă ermetic - numită autoclavă - în interiorul căreia se delimitează o zonă de alimentare cu material nutritiv numită *zonă de solubilizare* și o *zonă de cristalizare* între care se realizează o diferență de temperatură favorabilă convecției soluției îmbogățite cu material nutritiv - rezultat al suprasaturării soluției mineralizatoare în zona de solubilizare spre zona de cristalizare [M16], [M17], [P12], [P13], [P14],[P15].

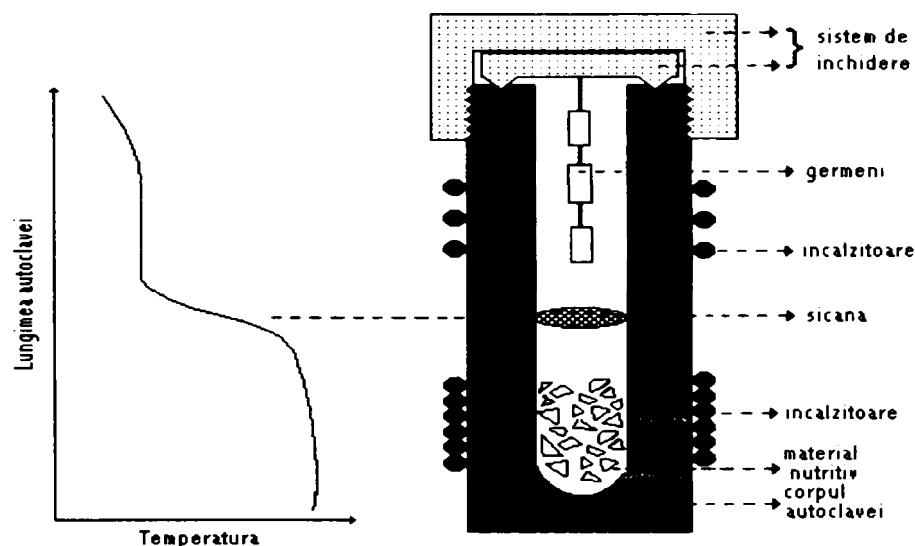


Fig. 4.4 Diagramă schematică pentru obținerea monocristalelor prin metoda hidrotermală și profilul de temperatură în lungul generatoarei autoclavei

Între cele două zone se poate intercala o șicană al cărei rol este de a dirija curenții de convecție ai soluției lichide dinspre zona de solubilizare spre cea de cristalizare și de a regla gradientul de temperatură în autoclavă. Cristalizarea se realizează fie pe germeni monocristalini introduși în prealabil, fie pe germeni obținuți prin nucleație spontană.

Pentru ca procesul de creștere hidrotermală să aibă loc în fază lichidă, trebuie depășită temperatura critică a solventului, ceea ce se realizează prin umplerea incintei de creștere peste procentul critic (32 % în cazul apei). Acest procent este în general cu mult mai mare, atingând valori de 70 - 85%. Peste această valoare a procentului de umplere, o dată cu creșterea temperaturii, meniscul lichid - gaz va urca până când în incintă se generalizează faza lichidă. Cu cât procentul de umplere este mai mare, cu atât va fi mai scăzută temperatura la care meniscul lichid - gaz va dispărea mai repede, deoarece presiunea solventului la temperaturi mai mari de 100°C crește foarte rapid.

În mediul de cristalizare se pot adăuga diferite săruri minerale (mineralizatori) care prezintă următoarele avantaje:

- modifică energia de activare a procesului de nucleație;
- formează cristale complexe mixte intermediare, mai solubile decât dizolvantul propriu zis dar mai stabile decât acesta;
- ajută la reducerea numărului de defecte ale monocristalului.

Coeficientul de temperatură al solubilității unui solvent scade cu creșterea punctului de topire al compusului. Cristalizarea hidrotermală necesită o solubilitate de câteva procente și un coeficient de variație al solubilității cu temperatura de 0,001-0,01 % pe grad pentru realizarea unei suprasaturări convenabile. De asemenea, convecția joacă un rol important, deoarece face ca solventul saturat din zona de dizolvare să fie transportat în zona mai rece unde devine suprasaturat, ceea ce duce la creșterea cristalului.

Avantaje: Cu ajutorul acestei metode se pot obține cristale de calitate foarte bună și de dimensiuni mari. De asemenea se pot obține cristale care nu pot fi obținute din topitură cum este chiar cazul cuarțului care suferă o tranziție de fază la 583 °C.

Dezavantaje: Datorită temperaturilor și presiunilor înalte, cerințele tehnice pentru instalația experimentală sunt severe. În plus, pentru obținerea unor cristale mari, creșterea durează un timp îndelungat (câteva săptămâni, până la câteva luni pentru cuarț). O problemă serioasă o constituie dificultatea găsirii condițiilor de creștere pentru un material nou.

4.1.3.3 Epitaxie în fază lichidă

Epitaxia în fază lichidă (LPE) este folosită pentru obținerea de monocristale din soluție, pe un substrat [L6], [L7], [S7]. Un substrat este adus în contact cu o soluție saturată iar temperatura este programată astfel încât soluția să devină suprasaturată, ceea ce duce la creșterea cristalului. Un lucru foarte important este prepararea unei suprafețe foarte curate a substratului pentru a se obține cristale de o bună cristalinitate

și cu o orientare cristalografică dorită. Această metodă se utilizează pe scară largă la obținerea filmelor pure și dopate de InAs (cu In ca solvent), GaP, GaAs (cu Ga ca solvent). Doparea straturilor poate fi controlată prin introducerea dopantului în soluție și prin controlul vitezei de creștere. O altă categorie de materiale ce se pot obține prin această metodă o constituie soluțiile solide ale compușilor III-V cum ar fi: $Ga_xIn_{1-x}As$ sau $GaAs_xP_{1-x}$.

De asemenea prin LPE se cresc filme magnetice de granat pentru care se folosește ca solvent o sare pe bază de plumb. Substratul este de obicei un multistrat gadoliniu-galiu-granat. Acesta este introdus într-o soluție în configurația cu germenele sus și rotit în timp ce temperatura este coborâtă programat până se atinge grosimea dorită a filmului.

Avantaje:

- În cazul semiconductorilor, puritatea atinsă de cristalele crescute prin LPE este mai bună decât la cristalele obținute din topitură. În plus sunt eliminate complicațiile legate de volatilitatea compușilor din grupa a V-a, complicații ce apar la creșterea din topitură. Grosimea straturilor depuse prin LPE poate fi controlată cu o precizie foarte bună.

Dezavantaje:

- Creștere lentă și limitată la cristale de dimensiuni mici, respectiv la straturi relativ subțiri. În plus puritatea cristalului este limitată de puritatea solventului.

4.1.3.4 Tehnici de creștere din gel. Tehnici de transport ale solventului.

Tehnica sol-gel este foarte utilizată pentru creșterea filmelor subțiri monocristaline [B10], [L6]. Această metodă utilizează reacții în fază lichidă, în mod analog cu reacțiile în fază gazoasă din metoda CVT. Calitatea monocristalelor depinde de condițiile de reacție din timpul creșterii cristalelor. Prin această metodă sunt obținute industrial filme subțiri de oxid de titan și cristale de zeolit.

Tehnica de transport a solventului presupune deplasarea unei zone subțiri a unei soluții prinsă între două suprafețe solide. Interfețele solid-soluție reprezintă interfețele de dizolvare și de depunere. Creșterea cristalului are loc prin depozitarea materialului la interfața mai rece. Materialul este preluat de la interfața mai caldă, care se dizolvă (solubilizează). Metoda este utilizată pentru obținerea cristalelor de InAs din indiu, ZnSb din zinc și $SrTiO_3$ din diferite soluții.

4.1.4 Creșterea cristalelor din topitură

Creșterea din topitură este cea mai utilizată metodă de preparare de cristale de dimensiuni mari [P16], [S7]. În principiu, toate materialele pot fi crescute din topitură în formă de monocristale cu condiția ca acestea să se topească congruent, să nu se descompună înainte de topire și să nu sufere o transformare de fază între temperatura camerei și temperatura de topire (transformările de fază sunt în general însoțite de variații ale volumului, ceea ce duce la apariția unor tensiuni în material care generează defecte sau policristalinitate). În aceste situații cristalul și topitura au

compoziții similare iar interfața de creștere corespunde cu izotermele de solidificare ale sistemului. Pentru a obține cristale de calitate prin această metodă este necesară o bună cunoaștere a diagramelor de fază, a transferului de masă și de căldură și a proprietăților fizico-chimice ale materialului. De asemenea condițiile de creștere sunt stabilite în funcție de acești parametri.

În esență, în toate procedeele, materia primă folosită sub formă de bară sau de pulberi este topită, iar topitura rezultată este adusă într-o stare de subrăcire sau de suprasaturație în prezența unor cristale de amorsare, cu structură orientată pe care se dezvoltă monocristalul sub formă de bară cilindrică.

În cazul ideal, prin procesul de creștere, structura amorsei este reprodusă tridimensional, într-un număr infinit de ori. Pentru obținerea unor cristale de o calitate superioară, trebuie să se asigure formarea unei zone de topire scurte și încălzirea uniformă a barei policristaline pe întreaga sa secțiune transversală. Stabilitatea zonei de topire este determinată de: diametrul barei policristaline, lungimea zonei de topire, densitatea și tensiunea superficială a topiturii.

În continuare se va face o prezentare generală a principalelor metode de creștere din topitură: metoda Czochralski, metoda Bridgmann, metoda Verneuil și metoda topirii zonale. De asemenea vor fi subliniate avantajele și limitările fiecărei metode în parte.

4.1.4.1 Metoda Czochralski

În cazul metodei Czochralski materia primă este topită într-un creuzet refractar, cu ajutorul unui sistem de încălzire rezistiv sau inductiv, adoptat în funcție de temperatura de topire a materialului (încălzirea inductivă fiind indicată pentru materiale greu fuzibile) [B9], [L6]. În acest creuzet se introduce cristalul de amorsare. Monocristalul depus pe cristalul de amorsare este extras treptat din topitură, cu viteză constantă de tragere. Pe măsură ce se formează cristalul sub formă de bară cilindrică, acesta se trage din baia metalică. În același timp are loc și rotirea în sens invers a creuzetului cu topitură, ceea ce asigură o bună omogenizare a topiturii și facilitează fenomenele de transport termic. Desfășurarea corectă a procesului de creștere depinde de o serie de parametri, printre care, în primul rând, temperatura topiturii, viteza de tragere a monocristalului din topitură și vitezele de rotație ale creuzetului și dispozitivului de susținere a cristalului de amorsare.

Viteza de creștere a monocristalului este determinată, în principal, de transferul căldurii de cristalizare prin intermediul amorsei, precum și de temperatura topiturii. Calitatea monocristalelor obținute depinde în mare măsură de calitatea amorsei (starea suprafeței, perfecțiunea rețelei cristaline) și de orientarea ei cristalografică.

Amorsa monocristalină se obține fie prin tăierea după anumite direcții a unui cristal existent, fie se crește un cristal amorsă din care se taie apoi bucăți care se montează apoi în portamorsă. Dacă temperatura topirii și viteza de tragere sunt corect alese, amorsa va constitui unicul centru de cristalizare și va servi drept germene de creștere pentru monocristalul ce va fi tras din topitură

Schema instalației experimentale este prezentată în Fig 4.5. Se observă că aceasta este compusă din:

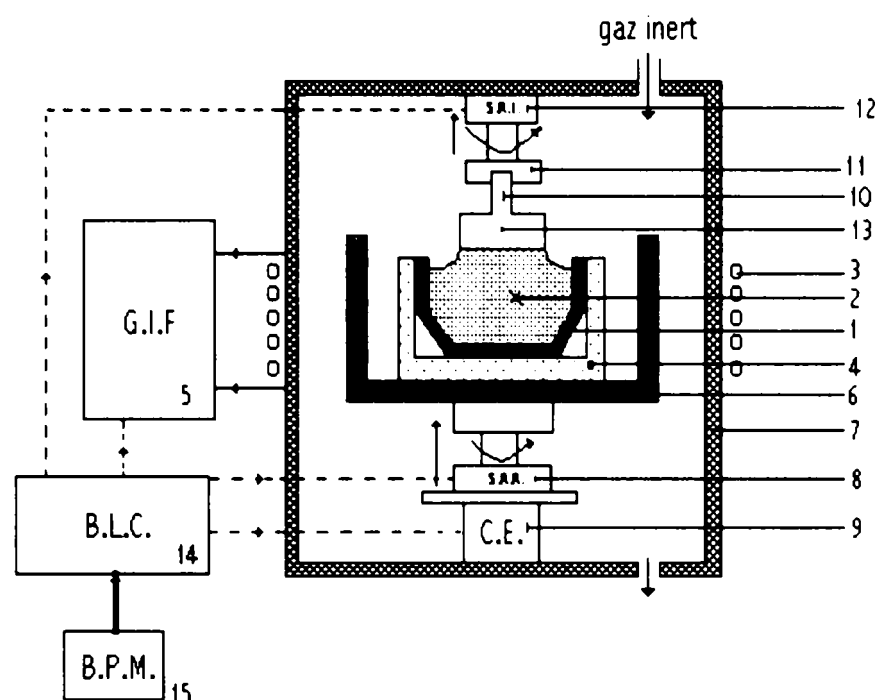


Fig. 4.5 Schema instalației Czoehralski

1. creuzet
2. topitură
3. primarul transformatorului de înaltă frecvență, realizat din țevă de cupru răcit cu apă
4. secundarul transformatorului de înaltă frecvență, realizat din grafit sau alt material electroconductor rezistent la temperatură
5. generator de înaltă frecvență (10-100 kHz)
6. ecran termic din praf de oxid de aluminiu
7. tub de cuarț prin interiorul căruia circulă un gaz inert
8. sistem mecanic de rotație și ridicare a creuzetului (SRR) cu rolul de a menține constant nivelul topiturii și de a asigura omogenizarea temperaturii topiturii
9. cântar electronic (CE) care furnizează o tensiune proporțională cu masa topiturii din creuzet în timpul tragerii cristalului
10. germen monocristalin
11. mandarină pentru prinderea germenului
12. sistem mecanic de rotire și tragere verticală a germenului și a cristalului (S.R.T.)
13. cristal tras
14. bloc logic de comandă (B.L.C.)
15. bloc de prestabilire a masei topiturii și implicit a diametrului cristalului tras.

Pentru obținerea barelor cristaline de siliciu dopat, substanța impurificatoare și siliciul policristalin se introduc în creuzetul de cuarț în care se vor topi în urma injectării de putere de la generatorul de înaltă frecvență. Incinta a fost în prealabil vidată apoi, în tot timpul desfășurării procesului, prin incintă va circula în permanență un gaz inert. Topitura se menține un anumit timp (1/2 h) la o temperatură puțin superioară temperaturii de topire a siliciului (1412°C) după care se pornește sistemul de rotire al creuzetului pentru uniformizarea temperaturii. Apoi temperatura se coboară lent până la o valoare apropiată de punctul de cristalizare după care se coboară portamorsa până când amorsa atinge topitura. Înainte de începerea tragerii cristalului, amorsa trebuie menținută un anumit timp cu extremitatea inferioară în topitură până când aceasta se topește și în jurul ei apare un disc monocristalin. Când acest disc are diametrul dorit se începe tragerea pornind sistemul de rotire și tragere.

Avantaje ale metodei Czochralski:

- Cristalul nu vine în contact cu pereții incintei de creștere și de aceea este aplicabilă în cazul materialelor care în urma solidificării își măresc volumul, cum ar fi materialele semiconductoare (în timpul solidificării InSb există o variație de volum de 13 %).
- Creșterea în afara creuzetului elimină complicațiile care pot apărea atunci când topitura udă pereții incintei de creștere.
- Prin această metodă se pot obține monocristale de dimensiuni mari și puritate înaltă, la viteză de creștere ridicată (câțiva cm pe oră în cazul siliciului).
- Metoda permite un bun control al compoziției chimice a monocristalului prin controlul compoziției topiturii, ceea ce permite utilizarea ei în cazul dopării monocristalelor.
- Atmosfera de creștere poate fi ușor controlată și modificată după necesități.

Limitări ale metodei Czochralski:

- Metoda prezintă dificultăți în cazul în care presiunea vaporilor materialului care trebuie crescut sau a unui component al acestuia, la temperatura de topire, este înaltă. O mare dificultate este creată de unele probleme tehnice datorate rotirii și tragerii cristalului, precum și configurației termice necesară menținerii echilibrului termodinamic dintre vapori și topitură.
- În cazul în care există unii componenți volatili în topitură, se utilizează un strat de oxid boric care izolează topitura de exterior și împiedică eliminarea componentului volatil (Fig. 4.6). Dezavantajul acestui strat este că alterează puritatea și cristalinitatea cristalului obținut.
- O altă sursă de impurități o constituie creuzetul care poate contamina topitura.
- Metoda nu poate fi ușor adaptată pentru o creștere continuă deoarece, cel puțin pentru materialele cu punct de topire înalt, este greu din punct de vedere tehnologic să se realizeze alimentarea continuă cu material nutritiv.

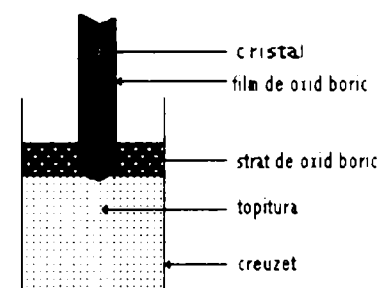


Fig. 4.6

4.1.4.2 Metoda Bridgman

În cazul metodei Bridgman, Fig. 4.7, materia primă este topită într-un creuzet refractar terminat cu o porțiune conică, unde se montează cristalul de amorsare [B9]. La atingerea echilibrului termic în topitură creuzetul este coborât lent, cristalizarea

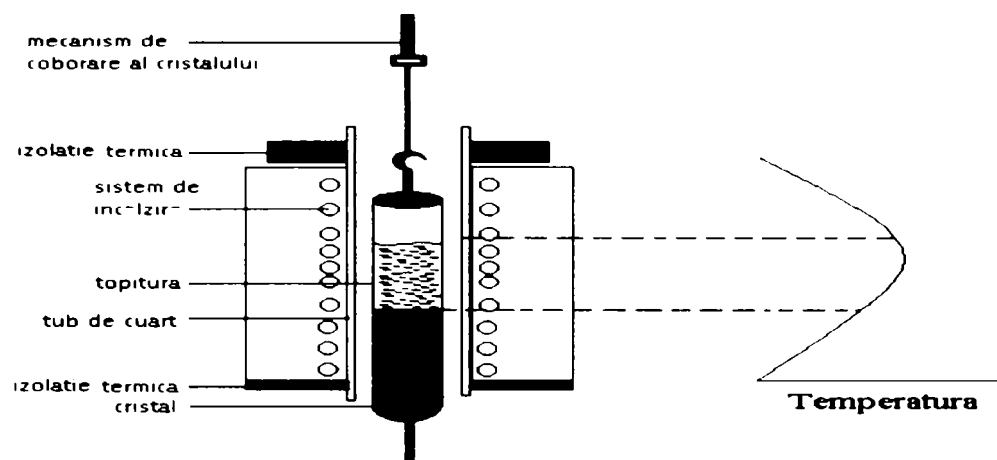


Fig. 4.7 Schema instalației Bridgman

având loc în partea de jos a creuzetului. Pentru a mări pierderea de căldură în zona de cristalizare, la partea inferioară a instalației se montează un sistem de răcire. Chiar dacă, în general este mai simplu (din punct de vedere mecanic) să se deplaseze creuzetul în gradientul de temperatură, în unele cazuri unde vibrația creuzetului este mare, acesta se menține fix iar cuptorul este deplasat în lungul unui sistem liniar. Este o metodă tipică de creștere în urma nucleației heterogene ce apare în lungul unui creuzet ce conține materialul nutritiv.

Pentru a se impune o anumită direcție de creștere creuzetul de formă cilindrică tronconic este prelungit în partea inferioară de o regiune cilindrică de diametru mult mai mic decât în partea superioară. În această prelungire a creuzetului se introduce un cristal cu o orientare cunoscută peste care se completează pudră până la umplerea completă.

Avantaje ale metodei Bridgman:

- Permite un control relativ ușor al presiunii vaporilor constituenților volatili;
- Creșterea poate avea loc atât în mediu închis cât și în mediu deschis;
- Se poate realiza un control convenabil al formei și dimensiunii cristalului;
- Creșterea poate avea loc într-un gradient de temperatură bine stabilit, ceea ce minimizează interfața de convecție și reduce segregarea.

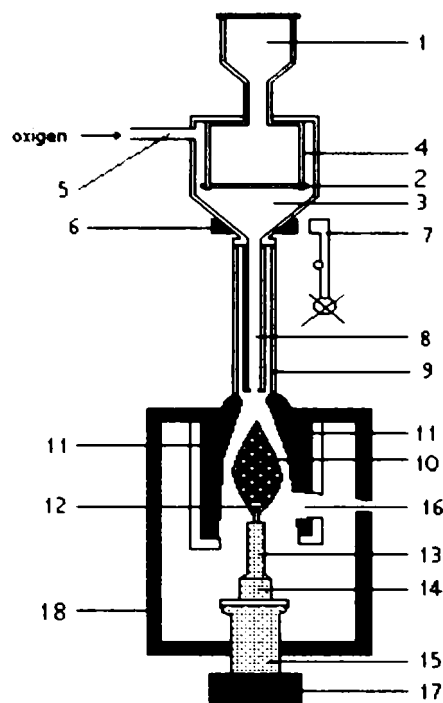


Fig. 4.8 Schema de principiu a instalației experimentale utilizată în cadrul metodei Verneuil

4.1.4.3 Metoda Verneuil

Creșterea cristalului prin această metodă constă în extinderea rețelei cristaline a unei amorse monocristaline pe care cade în permanență substanța în stare topită sau sub formă de pudră din care crește viitorul monocristal [B9]. Avantajul metodei constă în faptul că nu necesită creuzet, topirea având loc pe suprafața cristalului ce crește pe verticală, ceea ce permite să fie folosită pentru obținerea cristalelor cu punct ridicat de topire (2000°C) cum ar fi cazul Al_2O_3 . Schema de principiu a instalației experimentale utilizate în cadrul acestei metode este prezentată în Fig. 4.8.

1. rezervor de alimentare
2. sită
3. pâlnie
4. mecanism de fixare a sitei
5. tub de alimentare cu oxigen
6. inel metalic
7. ciocănel
8. canal interior
9. tub
10. flacără oxihidrică
11. material refractar
12. germene
13. bară din material ceramic

Limitări ale metodei Bridgman:

Faptul că creșterea are loc în condiții de presiune face ca această metodă să prezinte limitări considerabile. Variațiile de volum care însoțesc procesul de solidificare duc la apariția unor presiuni în cristal și odată cu aceasta la o densitate mare de defecte de rețea. Chiar dacă variațiile de volum din timpul solidificării sunt ne semnificative, în cristal pot apărea tensiuni în cazul în care coeficientul de dilatare termică a cristalului este mai mare decât cel al containerului. Și chiar dacă nu este prezent nici un efect al presiunii, calitatea cristalului nu poate fi mai bună decât cea a germenului. În schimb, în cazul tehnicii Czochralski diametrul germenului poate fi redus suficient de mult astfel încât în prima etapă de creștere să aibă loc cățărarea dislocațiilor în afara cristalului.

14. suport metalic mobil
15. platformă
16. vizor
17. mecanism de deplasare a platformei.
18. incinta de reacție.

Temperatura necesară topirii se realizează cu ajutorul unei flăcări oxihidrice 10. Materialul policristalin, sub formă de pudră din care urmează a se crește cristalul se găsește într-un rezervor de alimentare 1 ce are la partea inferioară o sită 2 cu ochiuri corespunzătoare mărimii impuse de tehnologia de creștere (până la 20 μm). Prin vibrarea pâlniei 3 ce conține sita 2 substanța cade prin pâlnie, debitul acesteia fiind proporțional cu amplitudinea și frecvența vibrațiilor. Pâlnia 3 are la partea superioară un tub 5 prin care se face alimentarea cu oxigen, iar la partea inferioară, spre exterior, un inel metalic 6 a cărui lovire cu ajutorul unui ciocănel 7 acționat de un mecanism special, determină vibrația sitei. În partea inferioară, pâlnia se continuă cu un canal de aducțiune format din două tuburi concentrice. Prin canalul interior 8 trece oxigenul ce antrenează pulberea. La ieșirea din canalul 8 și 9 se realizează amestecul care prin aprindere dă naștere la flacăra oxihidrică 10 în care are loc topirea materialului. Flacăra se formează în interiorul unei diuze căptușite cu material refractar 11. Cuptorul este prevăzut cu un vizor 16 prin care se poate urmări poziția cristalului în flacăra și evoluția lui în timpul creșterii. Germenele 12 se fixează cu ajutorul unui liant rezistent la temperatură la partea superioară a unei bare 13 din material ceramic care, la rândul ei este fixată într-un suport metalic mobil pe orizontală 14. Suportul 14 se sprijină pe o platformă 15 ce poate fi deplasată pe verticală cu viteze corespunzătoare creșterii monocristalului, deplasarea fiind asigurată de mecanismul 17. După fixarea germenului 12 pe bara ceramică și introducerea acestora în cuptor se aprinde amestecul de hidrogen și oxigen. Temperatura flăcării se reglează prin debitul de oxigen astfel încât partea superioară a germenului să se topească. Acest lucru se poate observa prin vizorul 16. Se pornește apoi sistemul de vibrație, materialul căzând pe suprafața topită a germenului. Totodată se pornește și sistemul de deplasare în jos a platformei 15. Are loc așa numita fază de dilatare când diametrul cristalului crește de la cel al germenului (3 mm) până la cel final (1,5-2 cm). În acest timp crește debitul de oxigen care după faza de dilatare rămâne constant. Prin depunerea în continuare a materialului topit se obține un monocristal cu un diametru de 1,5-2 cm și lungime de 5-8 cm.

4.1.4.4 Metoda topirii zonale

Metoda topirii zonale se bazează pe topirea treptată a unei bare policristaline cu ajutorul unui fascicul de electroni sau prin încălzire inductivă. Se poate realiza și un efect de rafinare zonală [B9]. Bara este supusă mișcării de rotație, cristalul de amorțare fiind rotit în sens invers cu bara policristalină. Topitura care se formează la începutul procesului se solidifică orientat pe cristalul de amorțare. Pe măsura creșterii monocristalului, zona de topire se deplasează fie prin tragerea în jos a barei, fie prin

deplasarea în sus a sistemului de încălzire. Este o metodă de purificare avansată și de creștere a monocristalelor și constă în deplasarea de-a lungul cristalului a unuia sau mai multor încălzitoare ce topesc local cristalul.

Schema de principiu a unei instalații de topire zonală, prezentată în Fig. 4.9. Zona topită asigurată prin intermediul unei bobine alimentate în înaltă frecvență se poate deplasa pe verticală cu viteze de ordinul câtorva milimetri pe minut. Materialul topit dintre zonele solide nu va curge datorită efectului tensiunii superficiale. Prin rotirea părții superioare are loc și o omogenizare termică a zonei topite evitând apariția de tensiuni mecanice prin recristalizarea relativ rapidă. Dacă în partea inferioară se montează un germene atunci metoda poate fi folosită și pentru creșterea orientată a cristalelor.

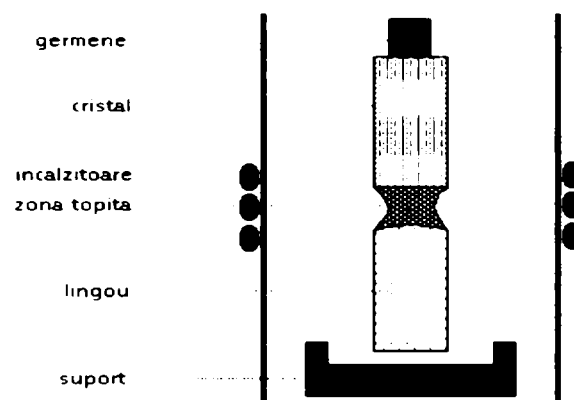


Fig. 4.9 Schema de principiu a instalației de topire zonală

Există o distincție între metoda Bridgman și metoda topirii zonale în ceea ce privește segregarea impurităților (Fig. 4.10). În primul caz segregarea este controlată de difuzia și convecția impurităților din topitură; în cazul topirii zonale zona topită este foarte mică, ceea ce face ca în această zonă să existe un coeficient efectiv de distribuție a impurităților egal cu unitatea. Rezultă astfel că, în cazul topirii zonale, se poate obține o distribuție uniformă a impurităților aproape în tot cristalul.

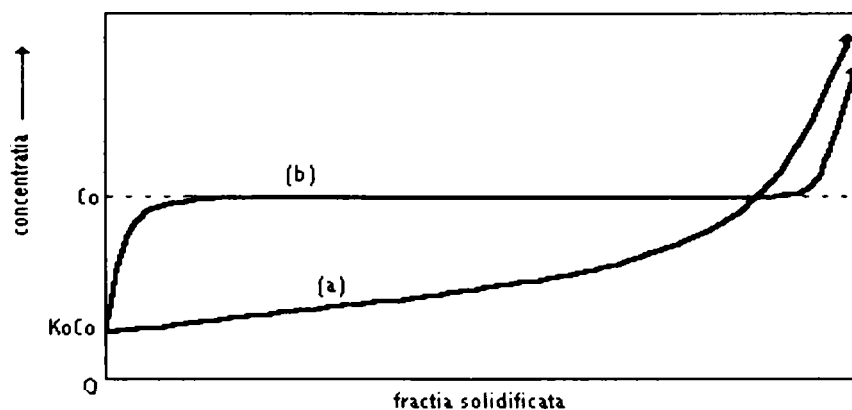


Fig. 4.10 Profilul de segregare în două cazuri: (a) metoda Bridgman; (b) metoda topirii zonale; C_0 reprezintă concentrația inițială a impurităților în topitură; K_0 coeficientul de distribuție al impurităților

Avantaje ale metodei topirii zonale:

- Metoda nu utilizează creuzet de creștere, ceea ce face ca să fie eliminate o serie de defecte ce apar datorită acestuia;
- Coeficientul efectiv de distribuție al impurităților egal cu unitatea duce la o macrosegregare omogenă;
- Pentru cristale cu diametru mic, instalația tehnologică este foarte simplă.

Limitări ale metodei topirii zonale:

- Metoda nu poate fi utilizată pentru obținerea materialelor cu presiune a vaporilor ridicată sau a celor care au componenți volatili.

4.1.5 Creșterea cristalelor din fază solidă

Această tehnică este cel mai puțin utilizată în industrie și, de aceea studiile actuale în acest domeniu sunt destul de restrânse în ciuda faptului că sinterizarea soluțiilor solide și tranzițiile de fază polimorfe sunt de mult timp cunoscute [B9], [L6]. Această tehnică produce în general, cristale cu dimensiuni mai mari decât nutrientul iar noua fază precipită din soluția solidă într-un gradient de temperatură. Există mai multe tehnici de obținere a cristalelor din fază solidă:

1. Tehnici de creștere prin răcire

Răcirea (într-un gradient de temperatură corespunzător) duce la inițierea unei recristalizări secundare atunci când este depășită tensiunea critică, legată de temperatura de recristalizare și variază invers cu ea. Cristalizarea primară are loc sub tensiunea critică, deasupra acesteia mulți grăunți nuclează și cresc. Această metodă a fost foarte utilă în obținerea monocristalelor de plumb, molibden sau wolfram.

2. Tehnica de sinteză la temperatură ridicată

Acesta este un fenomen foarte complex. El presupune difuzia în stare solidă, recristalizarea și microcristalizarea din faze solide lichide și gazoase. Această tehnică presupune prepararea unui amestec stoichiometric, închiderea acestuia într-un tub de cuarț și un tratament termic la temperatură înaltă. În momentul în care amestecul este încălzit au loc variații semnificative ale densității, porozității și tensiunilor mecanice. Tratamentul amestecului la temperaturi înalte facilitează reacția. Când temperatura este scăzută are loc formarea de mici cristalite. Prin această metodă s-au format cristale de BeO, ZnO, Al₂O₃ și AgInSnS₄ de dimensiuni de peste 1 mm însă calitatea acestora este foarte slabă. De asemenea această metodă a fost utilizată pentru obținerea unor cristale supraconductoare la temperaturi înalte cum ar fi YBa₂Cu₃O₇.

3. Tehnici ce au la bază tranziții de fază polimorfe

Aceste tehnici rezultă din studiul diagramelor de fază ale materialelor, mai exact din fazele metastabile ale acestora. Foarte multe materiale cristaline prezintă mai mult decât o singură structură cristalină iar aceste structuri se schimbă cu temperatura și/sau presiunea. În momentul în care este schimbat un parametru, monocristalul cu o anumită structură se transformă într-o altă fază solidă printr-o deplasare rapidă a pereților de domenii. Uneori, în anumite condiții de presiune și temperatură, materialul își schimbă structura printr-o transformare reversibilă. Un bun exemplu îl constituie halogenurile de mercur în care are loc o transformare de fază polimorfă de la structura tetragonală la cea ortorombică în cazul în care se descrește temperatura sub temperatura de tranziție. De asemenea se schimbă și proprietățile fizice care sunt legate de structura respectivă.

4.1.6 Metoda hidrotermală – unica metodă de creștere a monocristalelor de α -cuarț

Având în vedere fazele și tranzițiile de fază ale α -cuarțului, rezultă că acesta este termodinamic stabil numai în intervalul de temperaturi cuprins între temperatura ambiantă și 575°C [B6], [G2]. Proprietățile piezoelectrice ale cuarțului sunt caracteristice doar fazei alfa. Tranzițiile de fază caracteristice cuarțului conduc la distorsionarea ireversibilă a structurii cristaline ceea ce are ca efect diminuarea până la anulare a proprietăților piezoelectrice. Din acest motiv, singura posibilitate de obținere a fazei alfa a cuarțului este metoda hidrotermală, la presiuni de peste 1500 bar și temperaturi cuprinse între 300 și 450°C .

4.2 Creșterea cristalelor din soluție. Tehnica hidrotermală

4.2.1 Aspecte teoretice ale creșterii hidrotermale a cristalelor

4.2.1.1 Teorii bazate pe difuzie

Se evidențiază în continuare câteva din aspectele fundamentale ale teoriilor asupra creșterii cristalelor, utile pentru a înțelege și controla mecanismul cristalizării hidrotermale. Elwell D., Scheel H. J. prezintă mai multe aspecte ale acestei probleme [D7], [G5], [G6], [L7].

În cadrul teoriilor bazate pe difuzie, curenții de difuzie joacă un rol important în creșterea cristalelor. Aceste modele încearcă să determine niște relații între factorii determinanți în creșterea cristalelor și difuzie și se presupune că în zona de difuzie din jurul sămânței sau cristalului ce se dezvoltă, concentrația soluției variază de la valoarea C_2 , care reprezintă concentrația de suprasaturație a soluției, la valoarea C_1 , care reprezintă concentrația din apropierea interfeței de cristalizare. Desigur că din cauza extragerii din soluție a substanței care se depune pe cristal $C_1 < C_2$. În același

timp C_1 este mai mic și decât C_0 (concentrația soluției în care cristalul este în echilibru cu soluția). În timpul creșterii continue a cristalului se stabilește un echilibru între depunerea substanței și formarea rețelei cristaline și aportul prin difuzie al materialului nutritiv din soluție spre cristal, în sensul că viteza de creștere este egală cu viteza de difuzie. Dacă notăm cu dq cantitatea de substanță cristalizată în timpul dt atunci viteza de creștere a cristalului dq/dt este proporțională cu suprasaturația efectivă $C_1 - C_0$ în zona de difuziune a cristalului cu suprafața S . Viteza de cristalizare depinde și de alți factori cum este natura speciei atomice care difuzează, vâscozitatea soluției, natura și concentrația mineralizatorului, presiunea, gradientul de temperatură etc. care sunt înglobate în constante de proporționalitate K , numit coeficient de viteză. Acest coeficient depinde și de fața cristalografică pe care se face cristalizarea, adică de relieful de potențial microscopic al suprafeței și de tipul legăturilor de rețea care se formează. În acest fel, la scară microscopică viteza de creștere a cristalului poate fi exprimată prin legea lui Fich.

$$dq/dt = KS (C_1 - C_0) \quad (4.3)$$

Pe măsură ce cristalul crește, prin difuzie se transportă în zona din imediata apropiere a cristalului o cantitate echivalentă de substanță cu cea depusă, care este proporțională cu coeficientul de difuzie D , cu suprafața S a cristalului, cu gradientul de concentrație $(C_2 - C_1)$, cu timpul dt și invers proporțional cu grosimea zonei de difuzie δ .

$$dq / dt = DS / \delta (C_2 - C_1) \quad (4.4)$$

Deoarece viteza de creștere a cristalului este funcție de direcție, atunci pentru o față oarecare (hkl) a cristalului, coeficienții din relațiile de mai sus trebuie să conțină specificația fețelor respective adică,

$$dq/dt = K_{hkl} S (C_{1,hkl} - C_0) = DS (C_2 - C_{1,hkl}) / \delta_{hkl} \quad (4.5)$$

Exprimând egalitatea vitezei de creștere cu cea de difuzie și eliminând C_1 care nu poate fi măsurată prin interfață, se obține relația lui Berthoud care exprimă viteza de cristalizare în funcție de gradientul difuziei, coeficientul de difuzie, grosimea zonei de difuzie și coeficientul vitezei de cristalizare K_{hkl} :

$$\frac{1}{S} \frac{dq}{dt} = \frac{D}{\delta_{hkl} K_{hkl}} (C_2 - C_0) = R_{hkl} (C_2 - C_0) \quad (4.6)$$

În această relație dacă se are în vedere că dq este cantitatea de substanță cristalizată iar S este suprafața pe care se face cristalizarea atunci termenul stâng reprezintă viteza de creștere a cristalului în accepțiunea lui Friedel. În acest fel din (4.6) se ajunge la:

$$V_c = \frac{K_{hkl} D}{K_{hkl} + \delta_{hkl}} (C_2 - C_0) \quad (4.7)$$

Dacă se pune : $D/\delta_{hkl} = M_{hkl}$ se poate obține :

$$R_{hkl} = K_{hkl} * M_{hkl} / (K_{hkl} + M_{hkl}) \quad (4.8)$$

unde R_{hkl} se numește coeficient efectiv al vitezei de creștere a feței (hkl).

Această teorie a fost dezvoltată de Friedel pentru explicarea creșterilor convexe (efecte de vârf) pe baza curenților de difuzie convergenți precum și pentru studiul cristalizării unor soluții sau topituri.

În general, teoriile bazate pe difuzie nu explică în mod complet toate particularitățile creșterii cristalelor. În acest sens vor mai trebui explicitate viteza de reacție la suprafața cristalului care este un proces statistic, grosimea zonei de difuzie la interfață, difuzia la suprafață (nu spre suprafață), realizarea legăturilor în cristal etc.

Din toate teoriile de creștere bazate pe difuzie se degajă importanța unui factor legat de structura suprafeței cristalului care determină de fapt condensarea pe suprafața cristalului a particulelor din soluție. În jurul cristalului se formează o peliculă foarte îngustă (de dimensiuni moleculare) numită suprafață de interfață cu o concentrație mai mare decât concentrația de suprasaturație C_2 a soluției. În unele cărți acest strat de interfață solid-soluție se numește pătură de absorbție care este despărțită de soluție printr-o zonă cu concentrație mai scăzută.

4.2.1.2 Teorii bazate pe structura microscopică

Teoriile mai recente referitoare la creșterea cristalelor sunt bazate pe structura microscopică la scară atomică și ionică a cristalelor și acțiunea lor de a realiza legăturile electrovalente, covalente, cuantice, metalice. Primul care a făcut legătura între forma cristalelor și structura reticulară a fost Bravais care a formulat ideea că viteza de creștere a fețelor cristaline depinde de densitatea de noduri a planelor corespunzătoare, fețele cu densitatea mare de noduri dezvoltându-se mai repede [B6], [G6], [L7] [S15].

Cunoștințele actuale bazate pe structura și simetria cristalelor a permis dezvoltarea teoriilor celor mai recente asupra creșterii cristalelor ținând seama de structura intimă specifică acestora. Între aceste teorii amintim teoria lui Kossel, Stranski și alții care au dezvoltat teoria cinetico - moleculară a creșterii cristalelor .

În această teorie factorul, K , din teoria bazată pe difuzie, capătă o semnificație precisă. După Kossel un cristal care crește dintr-o soluție foarte slab suprasaturată se formează prin repetarea la infinit a unor pași energetici care constau din legarea unei particule (atom, ion sau grupare ionică) de o altă particulă, în mod periodic

conducând treptat la șiruri reticulare, plane reticulare și apoi structuri spațiale tridimensionale.

Prin legarea de suprafață a două particule (de exemplu ioni) se eliberează energie sub formă de căldură. Cu cât energia eliberată este mai mare, deci sistemul are densitate mică de legături libere, procesul de legare (cristalizare) a unei particule și fixare pe cristal, adică pasul energetic, va fi mai frecvent. Această energie poate fi calculată. Dacă notăm cu U_0 energia eliberată prin realizarea unei trepte energetice, adică prin legarea unui ion din soluție de un ion de semn contrar de pe cristal și notăm cu U' și U'' componentele energetice pe două direcții din planul cristalului și cu U''' componenta energetică normală la primele două (perpendiculară pe direcția de creștere) atunci:

$$U_0 = U' + U'' + U''' \quad (4.9)$$

Rezultă că pentru fixarea unei particule izolate la suprafața unui cristal se eliberează fracțiunea de energie U (componenta verticală a lui U_0). Pentru a începe construirea unui nou șir reticular, se eliberează fracțiunea de energie U''' (așezarea pe fața cristalului) și fracțiunea U'' , (alipirea la un plan reticular).

Pentru continuarea unui șir reticular se eliberează energia maximă și anume U' (pentru așezarea la capătul unui șir reticular), U'' (pentru alipirea de muchia unui plan reticular) și U''' (așezarea pe un plan reticular).

Dacă se cunoaște energia eliberată prin prinderea unui ion la capătul unui șir reticular paralel cu muchia unui cub, ținând seama de contribuția fiecărui ion din șir la legătură, se poate calcula energia eliberată la creșterea cristalelor.

Din cele discutate mai sus rezultă că începutul unui nou plan reticular eliberează cantitatea cea mai mică de energie, deci statistic apare rar. Continuarea creșterii feței se face apoi din ce în ce mai repede.

Dacă se aplică concret aceste considerații anumitor cristale unele valori ale energiilor pe diferite direcții, de exemplu U poate avea valoarea negativă, ceea ce arată că șirul reticular este de semn opus, adică o astfel de față nu se va putea forma, teoretic deci este instabilă.

Stranski tratează problema creșterii cristalelor mai complex, admitând depunerea de complecși bidimensionali, de o anumită mărime critică pe fața cristalului în creștere, prin depunerea cărora s-a realizat automat treptele necesare efectuării pasului energetic cu noi poziții de așezare a ionilor și dezvoltarea unui nou strat de ioni pe blocul cristalin.

Teoria cinetico-moleculară, asupra căreia am făcut câteva considerații, este un mijloc de a explica geneza formelor cristaline. Ea însă nu poate da răspuns la toate cazurile, având în vedere că de la bun început ea pornește cu premise simplificate în ceea ce privește desfășurarea normală a procesului de construire a cristalului.

Procesul în autoclave la presiuni mari și temperaturi ridicate este mult mai complicat mai ales în cazul prezenței unor substanțe străine în soluție sub formă de atomi sau ioni care intră fie în rețeaua cristalului, fie în interstiții. Aceștia modifică

câmpul energetic de la suprafața cristalului schimbând vitezele de creștere, structura și habitusul.

Cum creșterea unor cristale are loc la suprasaturări scăzute ale soluției, pentru a explica creșterea cristalelor în condițiile în care nucleația este bidimensională este necesar să se ia în considerație structura reală a cristalelor, cu defectele ei de structură.

Studiul dislocației elicoidale a permis elaborarea unei noi ipoteze asupra creșterii cristalelor și anume creșterea în spirală, elaborată de Frank. Conform acestei teorii creșterea pe o suprafață stabilă în prezența unei dislocații elicoidale are loc prin depunerea unor noi elemente structurale pe treapta proeminentă a dislocației, care astfel înaintază.

La rețeaua ideală, deplasarea are loc până ce toată suprafața se acoperă cu un strat nou și înaintarea treptei se oprește într-o dislocație. Treapta de cristalizare nu va putea înainta decât dacă se desfășoară în spirală. Astfel, teoria creșterii în spirală admite că în timpul creșterii sunt prezente în permanență trepte ale creșterii elicoidale.

Deoarece înălțimile treptelor spiralelor sunt de ordinul de mărime 10^{-8} cm, parametrii rețelei și spiralele de creștere nu pot fi observate la microscopul obișnuit decât în cazul unor specii cristaline particulare. După această teorie un cristal cu structură perfectă și fără dislocații spirale nu s-ar mai putea dezvolta decât foarte greu chiar dacă s-ar realiza condiții optime de cristalizare înceată, cum este cazul cristalizării α -cuarțului.

Unele considerații mai recente formulate de A. Lang arată însă că pe suprafața unui cristal pot apare diferite alte defecte, mici ondulații sau precipitate care dau naștere unor creșteri stratificate în formă de cercuri concentrice ce se pot transforma în trepte spiralate prin apariția unei abateri de poziție în stadiul inițial de forma treptelor.

4.2.2 Instalația pentru creșterea hidrotermală a cristalelor

Pentru realizarea condițiilor necesare procesului hidrotermal, în practică se folosesc dispozitive în care presiunea este creată în interiorul unei incinte de reacție numite autoclave [P12], [P13], [P14], [P15].

În principiu, un sistem autoclav Fig. 4.11, se compune dintr-un recipient cu pereți groși realizat dintr-un oțel cu o rezistență mecanică adecvată temperaturilor și presiunilor mari ce se realizează în ea și cu inerție chimică mare, prevăzut cu un sistem de etanșare de tip Bridgman modificat, un sistem de încălzire plasat de-a lungul recipientului și o izolație termică care învelește recipientul pentru a limita pierderile de căldură spre mediul exterior și pentru a asigura, prin geometria sa, regimul termic necesar desfășurării procesului hidrotermal.

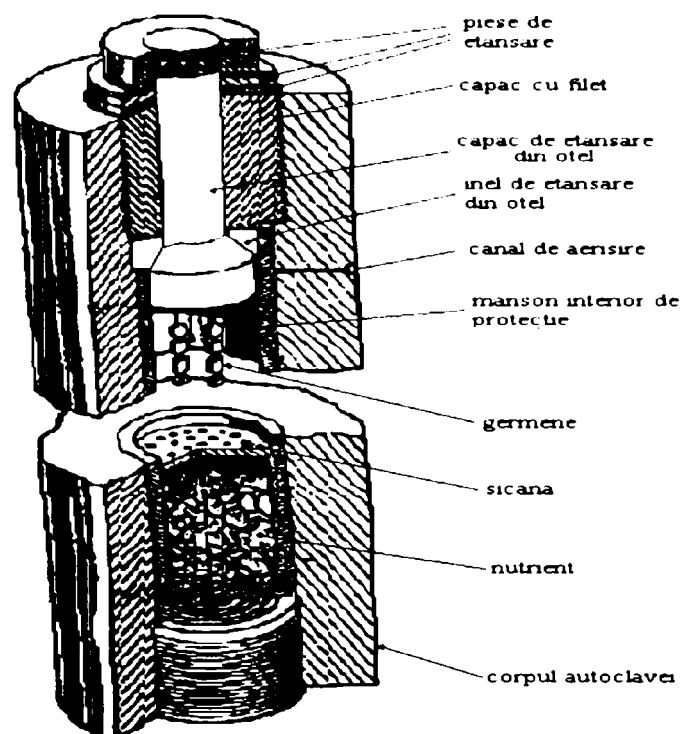


Fig. 4.11 Instalație de creștere a monocristalelor de alfa-cuarț

În procesele hidrotermale, mediul lichid în care are loc cristalizarea este puternic coroziv. Ca urmare se impune realizarea unei protecții anticorozive ce se realizează prin depunerea pe pereții interiori ai autoclavei a unui strat de aur, argint sau platină, sau, în unele cazuri, creșterea are loc în fiole de sticlă sau cuarț introduse în autoclavă.

În jurul autoclavei se află plasate o serie de încălzitoare menite să asigure regimul termic adecvat proceselor care au luat naștere în autoclavă ceea ce presupune ca, de exemplu, în porțiunea de jos a autoclavei să se obțină o temperatură cu cca 50°C mai mare decât în cea de sus.

Controlul temperaturii în autoclavă se realizează cu ajutorul unor termocuple plasate în puncte de interes situate pe generatoarea autoclavei, iar stabilirea și controlul regimului termic se face cu un dispozitiv automatizat.

Întregul sistem este izolat de mediul exterior printr-o izolație termică care împiedică pierderile de căldură.

În partea inferioară a recipientului se introduce un coș de oțel în care se pun bucățile de nutritiv natural de 5-6 mm, iar în partea superioară se prinde un suport de care se fixează germenii.

Între cele două zone se plasează un dispozitiv obturator numit șicană a cărei geometrie asigură o curgere laminară a soluției saturate cu material nutritiv de-a lungul germenilor și în același timp are un rol în asigurarea regimului termic adecvat din autoclavă contribuind la menținerea unei diferențe de temperatură între zona inferioară și cea superioară.

4.2.3 Principii fizico-chimice și hidrodinamice ale creșterii hidrotermale a monocristalelor

Acesta este probabil cel mai puțin cunoscut aspect în creșterea și doparea cristalelor din soluție. Nu există nici o carte de creștere a cristalelor în care să existe o descriere completă a aspectelor teoretice legate de această metodă de creștere. Există două aspecte majore legate de acest domeniu: studii fizico-chimice despre diferite soluții apoase în cadrul unui domeniu larg de presiune-temperatură și studii fizico-chimice legate de creșterea cristalelor din soluție.

În continuare sunt prezentate câteva probleme fundamentale legate de termodinamica și cinetica proceselor de solubilizare și cristalizare.

4.2.3.1 Minimizarea potențialului Gibbs

În timpul procesului de cristalizare din soluție saturată, numărul de moli ai solutului, n_i , se schimbă și, în consecință, se schimbă și energia liberă G , care este o funcție nu numai de presiunea p și temperatura T , ci și de numărul de moli n_i [B10], [B11]:

$$G=f(T, P, n_1, n_2, \dots, n_i, \dots) \quad (4.10)$$

$$dG=(\delta G/\delta T)_{P,n}dT+(\delta G/\delta P)_{T,n}dP+(\delta G/\delta n_1)_{P,T,n}dn_1+(\delta G/\delta n_2)_{P,T,n}dn_2+\dots \quad (4.11)$$

unde n include toți n_i , mai puțin cel după care se face derivarea.

Variația energiei libere poate fi exprimată în termeni de potențial chimic:

$$(\delta G/\delta n_i)_{P, T, n}=\mu_i \quad (4.12)$$

Dacă se păstrează constant P și T atunci ecuația (4.11) devine:

$$dG_{P, T}=\mu_1dn_1+\mu_2dn_2+\dots, \text{ sau } dG_{P, T}=(\sum\mu_i dn_i)_{P, T} \quad (4.12)$$

Integrarea ecuației (4.12) conduce la relația (4.13):

$$G_{P, T}=\sum\mu_i n_i \quad (4.13)$$

Prin diferențierea relației (4.13) rezultă relația (4.14):

$$dG_{P, T}=\mu_1dn_1+\mu_2dn_2+\dots+\mu_1dn_1+n_1d\mu_1+n_2d\mu_2+\dots+n_id\mu_i=\sum n_id\mu_i+\sum\mu_idn_i \quad (4.14)$$

Comparând relațiile (4.11) cu (4.14) rezultă relația (4.15):

$$\sum \mu_i dn_i = 0 \quad (4.15)$$

Ecuția (4.15) este considerată ca fiind condiția de echilibru într-un sistem cu număr variabil de moli în condiții de P și T constante.

Se consideră un sistem hidrotermal ce conține un număr de n_A de moli de solid A dizolvați parțial (n_{1A} moli) în n_B moli de solvent. Energia liberă a sistemului, conform ecuației (4.13) este dată de relația (4.16):

$$G = n_A \mu_A + n_{1A} \mu_{1A} + n_B \mu_B \quad (4.16)$$

Dacă procesul de dizolvare al componentului solid continuă, atunci energia liberă dG devine:

$$G + dG = (n_A - dn) \mu_A + (n_{1A} + dn) \mu_{1A} + n_B \mu_B \quad (4.17)$$

Variația energiei libere va fi deci:

$$dG = (\mu_{1A} - \mu_A) dn \quad (4.18)$$

sau

$$dG/dn = \mu_{1A} - \mu_A \quad (4.19)$$

Dacă $\mu_{1A} < \mu_A$, atunci dG/dn este negativ și procesul are loc de la sine, astfel încât energia liberă să descrească. Când $\mu_{1A} > \mu_A$ atunci are loc cristalizarea substanței din soluția B iar potențialul chimic descrește iar atunci când $\mu_{1A} = \mu_A$ procesul atinge starea de echilibru. Deci tranziția de fază se oprește atunci când potențialul chimic al componentului devine egal în ambele faze. Se observă că mecanismul descris anterior are loc doar atunci când, într-un proces de neechilibru, variația dG nu depinde de potențialul chimic sau de concentrația altor componente ai soluției.

Cele mai multe experimente hidrotermale au loc în condițiile unui gradient de temperatură fix în autoclave standard. Creșterea unui monocristal pe un germene poate avea loc în două moduri:

- recristalizarea substanței solide, incluzând și solubilizarea acesteia în faza lichidă, transferul de masă prin convecție a părții dizolvate a substanței în zona de creștere sau la germene.
- dizolvarea componentilor nutrientului cu ajutorul transportului de masă prin convecție în cadrul zonei de creștere și interacția cu componentii dizolvați de pe suprafața germenului.

Metodologia creșterii monocristalelor pe un germene este determinată de condițiile de creștere în care procesul este reprezentat de suma macro și microproceselor ce au loc la interfața cristal-soluție. Printre parametrii fizico-chimici de bază care determină viteza de dizolvare a nutrientului, transportul de masă și posibilitatea formării unor noi faze se enumără: compoziția și concentrația soluției, temperatura, presiunea, condițiile hidrodinamice, suprafața de contact dintre faze, etc.

Reacția chimică izotermă se poate exprima cu ajutorul ecuației van't Hoff:

$$\Delta G_{p, T} = RT \ln \pi a' - RT \ln K_a, \quad (4.20)$$

unde

$$\pi a' = \pi (a_i', \gamma_i)$$

$K_a = (a_i, \gamma_i)$ – constanta de echilibru termodinamic

γ_i – coeficient de activitate

a_i' – activitatea inițială de neechilibru a componentului nutrient în soluție

a_i – activitatea de echilibru a componentelor nutrientului în soluție

Se observă că ΔG depinde de valorile relative ale lui $\pi a'$ și K_a , astfel că dacă:

$$\pi a' > K_a, \Delta G < 0, \quad (4.21)$$

proces ireversibil, reacția are loc de la stânga la dreapta

$$\pi a' = K_a, \Delta G = 0, \quad (4.22)$$

reacția are loc în condiții de echilibru

$$\pi a' < K_a, \Delta G > 0, \quad (4.23)$$

procesul devine reversibil

Ca și rezultat variația lui ΔG din ec. (4.20) poate fi reprezentată ca în relația (4.24):

$$\Delta G = RT \ln(a_i/a_i') \quad (4.24)$$

unde a_i poate fi suprasaturația relativă.

Dacă, într-o regiune dată coeficientul de activitate, $\gamma = 1$ sau γ nu depinde de concentrație, atunci în ecuația (4.20) γ poate fi înlocuit prin fracția molară. Deci raportul a_i/a_i' se înlocuiește cu S_i/S_i' , raport care ne dă suprasaturația relativă sau gradul de suprasaturație.

În cazul prezenței unor impurități în sistem sau în cazul adaosului de dopant lucrurile se complică deoarece se mărește numărul componentelor din sistem. Însă principiile fizice care guvernează sistemul multifazic și multicomponent rămân aceleași (minimizarea potențialelor termodinamice, regula fazelor).

4.2.3.2 Principii de bază în formarea fazelor

Creșterea unui cristal presupune a prepara o fază anume, denumită monocristal. Pornind de la un sistem în care substanța de interes, eventual împreună cu altele, este prezentă în diverse faze printre care și faza monocristalină (germenele), se creează condiții critice astfel încât raportul cantitativ dintre faze să fie în continuă schimbare în sensul creșterii ponderii de interes. Această creștere se face pe seama celorlalte faze prin transformări de fază [L11], [S15].

În cazul creșterii din soluție avem în general germenele (faza solidă monocristalină) înconjurat de o singură fază lichidă (mediul) și o singură transformare de fază de interes, transformarea lichid-solid. În sistem, în general nu mai sunt prezente și alte faze, cum ar fi de exemplu faza de vapori. Atât timp cât această transformare se produce în mod continuu în timp și preponderent în sensul dorit, germenele crește, sau astfel spus, se obține o creștere de cristal. Așa după cum arată toate experimentele de creștere, transformarea de fază nu se produce simultan în tot volumul fazei ci este un proces discontinuu în spațiu, având loc doar într-o regiune foarte mică și subțire care înconjoară cristalul, numită interfață și având ca faze cristalul și mediul. Sigur că procesele care au loc la interfață sunt de o deosebită importanță pentru calitatea cristalului crescut și s-au propus mai multe mecanisme de creștere la nivelul interfeței. Este clar că pentru a asigura calitatea trebuie asigurate stabilitatea tuturor proceselor din ea și deci a condițiilor care le generează. Un rol primordial în acest sens îl au fenomenele de transport, de energie și materie prin faza fluidă, fenomene controlate prin geometria sistemului și prin parametrii fizici de temperatură, presiune și compoziție. Aceste probleme vor fi tratate în partea de cinetică a creșterii. Dacă însă nu ne oprim într-o primă aproximație la astfel de fenomene ci privim sistemul în ansamblul lui, vom vedea creșterea cristalului ca o transformare de fază de ordinul I, cu variație de volum și căldură (există căldură latentă). Putem astfel descrie creșterea cristalului prin diagrame de fază și echilibrul fazelor. Acest lucru se face în continuare.

Putem defini faza ca o porțiune de sistem bine separată și delimitată de restul sistemului și având la marginile ei, la interfață, o variație bruscă a energiei libere Gibbs. Căldura latentă corespunde unei creșteri bruște a energie (S) și deci unei scăderi bruște a energiei libere Gibbs (G) cu temperatura T la presiune constantă dacă $(\delta G / \delta T) = -S$. Ne întâlnim aici și cu o discontinuitate de natură matematică în funcția Gibbs formată prin intersecția funcțiilor Gibbs pentru cele două faze și rezultând din discontinuitatea spațială a celor două faze ce au centrii și volumele specifice diferite. Sigur că procesele de creștere nu sunt nici omogene spațial nici reversibile, iar diagramele de fază și echilibrul fazelor nu rezultă din principiile termodinamice, de aceea nici nu există a treia termodinamică adevărată a proceselor de creștere a cristalelor ci doar principiile termodinamice asupra diverselor aspecte ale teoriei creșterii. Regula de bază în formarea fazelor este regula Gibbs:

$$V=C-F+2 \tag{4.25}$$

- unde- V - numărul gradelor de libertate a sistemului;
- C - numărul componentelor din sistem: numărul minim de constituenți chimici din sistem care trebuie specificați pentru a putea descrie compoziția tuturor fazelor prezente în sistem
- F - numărul fazelor din sistem

Relațiile dintre fazele unui sistem se reprezintă prin intermediul diagramelor de fază.

Relația (4.25) este valabilă atât timp cât variabile sunt doar presiunea, temperatura și compoziția. Dacă se consideră și alte variabile (câmp magnetic, electric sau gravitațional), atunci numărul 2 din membrul drept al relației se va crește cu numărul de noi variabile considerate.

Metoda hidrotermală este considerată ca fiind una dintre cele mai bune metode pentru studiul relațiilor dintre faze în numeroase sisteme.

4.2.3.3 Soluții, solubilitatea și cinetica cristalizării

Acesta este cel mai important aspect din creșterea cristalelor din soluție. Cele mai multe eșecuri în încercarea creșterii din soluție a cristalelor se datoresc faptului că există o lipsă de date legate de tipul de solvent, solubilitate și interacția solut-solvent.

De aceea o mulțime de lucrări sunt focalizate în această direcție [G3], [G4], [K3], [K4].

În general se poate considera că o soluție hidrotermală este ideală cu toate că uneori, datorită interacției puternice dintre componentii soluției există abateri semnificative de la idealitate. În consecință, soluțiile hidrotermale reale diferă de soluțiile ideale și înțelegerea lor necesită o cunoaștere a influenței solventului în procesul dizolvării și cristalizării diferiților compuși. După cum se arată în majoritatea experimentelor, tipul solventului și concentrația sa determină un anumit proces hidrotermal cu caracteristicile sale importante cum ar fi: solubilitatea materialului inițial, cantitățile de substanțe în fiecare fază, compoziția fiecărei faze, cinetica și mecanismul de creștere al monocristalelor. Variația potențialului Gibbs este:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = RT \ln K, \quad (4.26)$$

sau

$$K = \exp(-\Delta H/T) \exp(\Delta S/R) \quad (4.27)$$

unde K este constanta de echilibru.

Expresia de mai sus ne arată influența entalpiei și entropiei asupra constantei de echilibru; deci entalpia și entropia solubilității (la P și T constante) este diferită pentru diferiți solvenți. De asemenea, solubilitatea uneia și aceeași specii solide se schimbă cu solventul. Nu există nici o teorie care să poată explica și estima solubilitatea într-o soluție reală, chiar dacă multe din problemele legate de solubilitate pot fi explicate pe baza principiilor și legilor fizico-chimice. În unele cazuri se poate folosi legea empirică conform căreia solubilitatea este mai mare în solvenții cu constantă dielectrică mai ridicată și cu tipuri de legături chimice care sunt asemănătoare cu cele ale solutului. Deviațiile de la aceste reguli au loc în cazul în care apar interacțiile specifice între substanța solidă și solvent. Sinteza și cristalizarea unui compus specific și creșterea monocristalelor pe germeni au loc dacă se utilizează solvenți

aleși pe baza unor considerente fizico-chimice. Pentru alegerea celui mai potrivit solvent se adoptă următoarele condiții:

1. *Variație relativ constantă a solubilității compușilor cu temperatura și presiunea;*
2. *Potențialul redox specific al mediului să asigure existența unor ioni de valență cerută;*
3. *Să formeze complecși mobili, ușor solubili în soluție;*
4. *O cantitate specifică din valoarea absolută a solubilității compusului să devină cristalizată;*
5. *Congruența dizolvării compușilor test.*
6. *Solventul va trebui să aibă vâscozitatea dorită, toxicitate minimă și activitate corozivă foarte mică asupra aparatului.*

Interacția dintre solut și solvent se numește solvatare. Moleculele de solvent devin legate de moleculele de solut care se dizolvă, iar speciile care rezultă conținând moleculele de solvent se numesc solvați. Depinzând de reactanți, legătura dintre solvent și solut poate prezenta diferiți factori specifici (coordinație) sau nespecifici (electrostatică) sau un proces de solvatare de diferite intensități include forme foarte variate. Totuși nu este posibil să găsim un singur parametru fizic al solventului care să caracterizeze întreg procesul de solvatare. Ionii simpli pot diferi considerabil în structura lor electronică, sarcină și raze. De aceea ionii solvatați pot fi de asemenea foarte diferiți în ceea ce privește numărul de molecule de solvent legate de ioni (numărul de solvatare), forța care dă naștere legăturii și proprietățile chimice rezultante (există diferite moduri de a determina numărul de solvatare cum ar fi: măsurători de vâscozitate, pH, măsurători de conductivitate, măsurători de densitate etc.). Procesul de solvatare este rezultatul diferitelor tipuri de asociații complexe care se formează între componentii solventului și solutului. Dacă în soluția de bază, pe lângă materialul nutritiv și solvent, se introduc și anumite tipuri de impurități, atunci aceste asociații dintre componente devin și mai complexe ducând în general la complicarea proceselor de creștere și implicit la micșorarea vitezei de creștere și a calității cristalului obținut. Există însă cazuri când adaosul de material străin contribuie în mod pozitiv la creștere. O categorie de astfel de materiale sunt mineralizatorii care nu sunt încorporați în structura cristalului obținut, dar care măresc solubilitatea soluției (de exemplu adaosul de KCl în soluția de hidroxid de sodiu utilizată la obținerea cristalelor de α -cuarț). În cazul în care are loc încorporarea materialului în cristalul obținut atunci vorbim despre dopare, proces care va fi discutat în alt paragraf.

4.2.3.4 Procese elementare implicate în obținerea cristalelor din soluție

Într-o primă aproximație s-ar părea că creșterea monocristalelor din soluție este determinată și controlată de transportul de masă spre fața fazei solide. Fenomenul este însă mult mai complex, implicând o succesiune de procese corelate. În cazul cristalizării hidrotermale, la presiuni mari și temperaturi ridicate, *procesele elementare* importante implicate sunt:

- solubilizarea nutrientului;
- transportul particulelor (ioni, atomi, complecși atomici) spre suprafața cristalului;
- transportul de căldură;
- difuzia particulelor din soluție pe suprafața cristalului;
- adsorbția pe suprafață;
- difuzia superficială în pozițiile impuse de relieful de potențial al suprafeței;
- fixarea în rețea prin formarea legăturilor specifice tipului de rețea cristalină.

Toate aceste procese concură la fenomenologia transferului de substanță a materialului de interes dintr-o fază și structură dezordonată (materialul nutritiv) în structura ordonată a monocristalului masiv. Acest proces global este constituit din succesiunea a trei procese fundamentale: solubilizarea nutrientului, recristalizarea pe suprafața germenului și transportul substanței din zona de solubilizare în zona de recristalizare. Abordarea fenomenologică a acestor procese fundamentale poate fi făcută separat. Faptul că procesele elementare enumerate mai sus corelează diversele aspecte cantitative ale proceselor fundamentale, precum și observația că desfășurarea acestora se petrece în interiorul aceluiași spațiu, impune observația că studiul cantitativ este de natură neliniară.

4.2.3.5 Procese de transport la interfața lichid-solid

Sunt de reținut câteva tendințe de elucidare a proceselor fizice la interfața solid-lichid [P16], [S7]:

a) În jurul cristalului se formează o peliculă foarte îngustă (de dimensiuni moleculare) numită suprafață de interfață cu o concentrație mai mare decât concentrația de suprasaturație a soluției, acest strat fiind numit "pătură de absorbție" care este despărțită printr-o zonă cu concentrație mai scăzută ;

b) O altă tendință se bazează pe structura microscopică la scară atomică și ionică a cristalelor și acțiunea lor de a realiza legăturile electrovalente, covalente, metalice;

c) Bravais face legătura între forma cristalului și structura reticulară și formulează ideea că viteza de creștere a fețelor cristaline depinde de densitatea de noduri a planelor corespunzătoare, fețele cu densitate mare de noduri dezvoltându-se mai repede;

d) Ulterior a fost dezvoltată teoria cinetico-moleculară a creșterii cristalelor. După Kossel, adept al acestei teorii, un cristal care crește dintr-o soluție foarte slab suprasaturată se formează prin repetarea la infinit a unor pași energetici care constau din legarea unei particule (atom, ion, grupare ionică) de o altă particulă în mod periodic, conducând treptat la șiruri reticulare, plane reticulare și apoi structuri spațiale tridimensionale;

e) Studiul dislocației elicoidale a permis elaborarea unei noi ipoteze asupra creșterii cristalelor și anume creșterea în spirală. Conform acestei teorii a lui Frank creșterea pe o suprafață stabilă în prezența unei dislocații elicoidale are loc prin

depunerea unor noi elemente structurale pe treapta proeminentă a dislocației, care astfel, înaintează. La rețeaua ideală, deplasarea are loc până ce toată suprafața se acoperă cu un strat nou și înaintarea treptei se oprește într-o dislocație. Cristalizarea va putea înainta doar dacă se desfășoară în spirală. Conform acestei teorii un cristal cu o structură perfectă nu s-ar putea dezvolta în lipsa dislocațiilor decât extrem de greu chiar dacă s-ar realiza condiții optime unei cristalizări lente cum este cea a fosfatului de aluminiu;

f) Considerații mai recente elaborate de A. Lang arată însă că pe suprafața unui cristal pot apare diferite alte defecte, mici ondulații, precipitate etc., care dau naștere unor creșteri stratificate în formă de cercuri concentrice ce se pot transforma în trepte spiralate prin apariția unei abateri de poziție în stadiul de formare a treptelor, lucru confirmat și de experimentele efectuate de noi pentru obținerea monocristalelor de α -cuarț.

Procesele fizice de creștere la interfața solid-lichid în procesul hidrotermal la temperaturi mari și presiuni ridicate sunt complicate nu numai de temperatură și necunoașterea cu precizie a ei la nivelul interfeței și de prezența presiunii, ci și de prezența în soluție a unor substanțe străine sub formă de atomi sau ioni care intră în rețea sau interstițiu în cristal și perturbă câmpul energetic de la suprafața cristalului schimbând viteza de creștere, structura și habitusul.

S-a constatat experimental că procesele fizice la interfața solid-lichid în zona de creștere după direcția axei optice Z se face cu includerea unei cantități minime de impurități în rețea, această direcție fiind preferată în procesele de obținere pe cale hidrotermală la temperaturi mari și presiuni ridicate a monocristalelor de alfa-cuarț.

4.2.3.6 Cristalizarea și nucleația

Studiile teoretice și experimentale au arătat că procesul de cristalizare se caracterizează prin formarea în prima etapă a unor cristale mici numite centre de cristalizare sau nuclee de cristalizare, care apoi se dezvoltă în cristale mai vizibile [B6], [G5], [G7], [S15].

Formarea germenilor de cristalizare este condiționată de realizarea unei stări de neechilibru prin modificarea parametrilor termodinamici de echilibru. Această stare de neechilibru corespunde subrăcirii soluțiilor. Suprasaturarea soluțiilor poate fi realizată și izoterm prin evaporarea unei părți din solvent așa cum vom vedea că nu este cazul pentru metoda de lucru utilizată de noi.

Gradul de neechilibru al unui sistem metastabil se exprimă în cazul topiturilor prin mărimea subrăcirii:

$$\Delta T = T_{\text{top}} - T \quad (4.28)$$

în cazul soluțiilor prin mărimea suprasaturării:

$$\Delta C = C - C_{\text{sat}} \quad (4.29)$$

iar în cazul fazelor gazoase (vapori) prin diferența de presiune:

$$\Delta p = p - p_{\text{sat}} \quad (4.30)$$

În aceste expresii T_{top} , C_{sat} și p_{sat} se referă la mărimile termodinamice de echilibru, iar T , C și p reprezintă valorile efective ale parametrilor sistemului. Pentru compararea a două sisteme se folosesc mărimile relative; de exemplu în cazul suprasaturării se folosește fie $C - C_{sat}/C_{sat}$, fie C/C_{sat} .

Răcind o soluție nesaturată până la temperatura de saturație, procesul de cristalizare nu are loc decât dacă există introdus în sistem un germene pe care să se producă cristalizarea. Formarea spontană a germenilor de cristalizare se produce dacă are loc o răcire avansată a soluției (subrăcire), ajungându-se într-o stare termodinamică metastabilă. Spre deosebire de soluțiile care cristalizează spontan la temperatura de saturație, soluțiile metastabile se pot păstra un timp fără formarea germenilor cristalini. Perioada de stabilitate cunoscută și sub numele de perioadă de inducție, poate varia de la zecimi de secunde până la câteva luni. Ea depinde de o serie de factori cum sunt natura substanței dizolvate și a dizolventului, mărimea suprasaturăției, prezența în sistem a unor impurități solubile, acțiuni mecanice asupra sistemului etc.

Formarea germenilor din faza omogenă ca urmare a suprasaturării reprezintă nucleația omogenă. Cristalizarea poate fi produsă însă prin nucleație eterogenă, adică prin introducerea în soluție a unor semințe pe care noi îi vom numi germeni de cristalizare.

Revenind la formarea germenilor prin cristalizare spontană precizăm că aceasta reprezintă un proces complex, spre deosebire de transformarea de fază (cristalizarea pe germeni) ce constituie un proces discontinuu la scara microscopică. Nucleația spontană se realizează într-un interval al parametrilor termodinamici și într-o perioadă variabilă de timp. În acest sens se poate spune că prin suprasaturare în soluții se formează agregate de particule cu o structură proprie care se află într-un echilibru cinetic cu soluția. Odată cu creșterea suprasaturăției crește gradul de asociere al particulelor și se formează subnuclee, cu o durată de existență redusă în sensul că ele se pot distruge în anumite părți ale soluției datorită fluctuațiilor spontane și locale de concentrație și se pot reface în alte părți.

Cristalizarea și nucleația pot fi puternic afectate și de impurități sau de dopantul cu care se lucrează. Efectul impurităților asupra cristalizării și nucleației nu se mai poate neglija dacă interacția dintre moleculele de impuritate și faza cristalină principală este aproape la fel de puternică ca și interacția dintre moleculele și ionii fazei principale.

4.2.3.7 Solubilizarea

Dacă se introduce un cristal într-un solvent, părțile periferice ale cristalului trec în soluție. În jurul cristalului se formează o soluție mai concentrată, care apoi este diluată prin curenții de difuzie ce tind să stabilească în toată masa dizolventului aceeași concentrație. Solubilizarea este deci un proces invers creșterii cristalelor [K3], [K4].

Viteza cu care se solubilizează un cristal depinde de natura cristalului, de dizolvent, temperatură, concentrație și de curenții care se produc. Solubilizarea este în primul

rând însă funcție de direcțiile din cristale, fiind o proprietate vectorială discontinuă, ca și viteza de creștere. Direcțiile de creștere maximă sunt în același timp direcții de solubilizare maximă, ele rezistă cel mai puțin la solubilizare și la atacul cu reactivi. Este evident că muchiile și colțurile vor fi mai repede distruse decât fețele, fiind treptat rotunjite și înlocuite prin fețe curbe. Când solubilizarea este mai înaintată în locul muchiilor apar fețe, iar în locul fețelor apar muchii. Formele cristalografice care iau naștere în felul acesta se numesc forme de solubilizare. Formele de solubilizare ale unui cristal păstrează aceeași simetrie indiferent de reactivul folosit.

Dacă cristalul supus solubilizării ar fi perfect cu fețele și muchiile fără defecte microscopice sau macroscopice (zgârieturi sau știrbiri) vitezele de descreștere ar trebui să fie egale cu vitezele de creștere în aceeași direcție. În acest caz ideal fenomenul solubilizării ar fi exact inversul fenomenului creșterii. Fețele se vor solubiliza încet pe când muchiile vor fi atacate mai repede, în locul lor apărând fețe virtuale care au dispărut repede în timpul cristalizării. Această situație ideală se întâlnește rar. O față de cristal sau o muchie prezintă adesea neregularități, care sunt imediat atacate dând naștere la un număr de fețe virtuale, fețe de mare viteză, care se solubilizează repede și distrug fețele corespunzătoare minimelor de creștere. S-a constatat că viteza de descreștere a fețelor virtuale este mai mare decât viteza lor de creștere ceea ce face ca în fenomenul solubilizării, fețele virtuale să se dezvolte mai mult decât ar corespunde stadiului respectiv al creșterii. În felul acesta formele de solubilizare care iau naștere sunt diferite (uneori foarte diferite) de formele de creștere.

Formele obținute prin solubilizarea unui poliedru cristalin convex nu tind către o formă invariabilă, ca în cazul creșterii, ci dimpotrivă, ele variază după forma inițială supusă solubilizării, și nu pot fi prevăzute.

Din cele de mai sus rezultă că fenomenele de creștere nu sunt simetrice cu fenomenele de solubilizare în cazul poliedrelor cristaline convexe. Acesta a făcut să se creadă că vitezele de creștere și vitezele de descreștere în aceeași direcție n-ar fi egale, în aceleași condiții.

În ceea ce privește figurile de coroziune care se fac pe un cristal perfect într-o soluție riguros omogenă trebuie să crească sau să descrească în mod uniform prin adaosul sau îndepărtarea unui nou strat de particule constitutive, rămânând astfel paralelă cu ea însăși.

Dacă însă fețele cristalelor au cavități sau ridicături, în timpul creșterii, fețele laterale ale ridicăturilor sau ale cavităților, fiind de obicei fețe de mare viteză, se dezvoltă mai repede, încât ridicăturile se largesc treptat până ocupă toată fața pe care s-au format iar gropile se umplu până dispar, sau din contră, se largesc dacă fața principală crește mai repede. Rezultatul este că în toate cazurile suprafața se nivelează.

Interesant este cazul descreșterii unei fețe care prezintă cavități și care este un exemplu de descreștere concavă. Prin atac, muchiile cavităților sunt mai puternic atacate decât fețele, în locul lor apărând fețe rapide care fac ca depresiunile să se lărgească luând forma unor gropi regulate.

4.2.3.8 Efectul impurităților asupra creșterii cristalelor

Impuritățile pot afecta cinetica creșterii cristalelor nu numai prin efectele pe care le au asupra nucleației și cristalizării ci și asupra solubilizării. Există însă și impurități care, datorită complexilor pe care îi formează în soluție, măresc solubilizarea [B6], [G6], [L11].

O impuritate într-un sistem care cristalizează este un material străin, diferit din punct de vedere chimic de componentul de bază și care se află în sistem în concentrații mici. Nu există o delimitare clară care să distingă între sistemele cu două sau mai multe componente și sistemul monocomponent cu impurități, dar în general se consideră impuritate un component care este prezent în sistem în concentrații de sub 1 %. În majoritatea proceselor chimice, substanțele străine cu concentrații sub un procent au efecte foarte mici asupra procesului. În schimb, în procesele de cristalizare unele substanțe, chiar la concentrații de câteva procente pe milion, au efecte puternice asupra parametrilor de cristalizare: nucleația, creșterea, habitusul cristalelor, aglomerările, tranzițiile polimorfe și distribuția dimensiunilor.

Un aspect important al impurităților îl constituie specificitatea. De exemplu unii cationi au efect foarte puternic asupra anumitor săruri (Pb în KCl sau Co în KNO_3). Moleculele organice au efect asupra cristalizării sărurilor anorganice (uree în clorura de sodiu sau acidul glutamic în oxalat de calciu). Macromoleculele și speciile polimerice solubile afectează precipitarea mineralelor solubile, fenomen care este de mare importanță în mineralizare biologică.

Deși impuritățile afectează fiecare etapă a cristalizării, influențele cele mai pronunțate au loc asupra vitezei de creștere și a habitusului unor săruri. Aceste efecte vor fi descrise în continuare. Exemplul clasic al modificării creșterii unui cristal în prezența substanțelor străine este în cazul sărurilor crescute în prezența ureei când, în loc să se formeze cristale cubice se formează cristale octoedrale. Un alt efect al impurităților constă în scăderea a vitezei de cristalizare. Aceste efecte pronunțate ale impurităților s-ar putea datora formării unui strat de adsorbție care întârzie cursul normal al cristalizării.

Dacă interacțiunea dintre moleculele de impuritate și faza cristalină principală este aproape la fel de puternică ca și interacția dintre moleculele și ionii fazei principale atunci efectul impurităților asupra nucleației poate fi substanțial. Efectul ionilor străini asupra nucleației poate fi obținut din evaluarea efectului acestora asupra parametrilor de cristalizare ce apar în ecuațiile care descriu nucleerea omogenă din soluție și, în special asupra suprasaturației critice. De exemplu, o concentrație mică de ioni de thoriu în precipitarea sulfatului de bariu mărește suprasaturația critică a acestuia, ceea ce duce la o variație corespunzătoare a vitezei de creștere dată de ecuația Volmer-Becker care leagă viteza de creștere de suprasaturație.

O problemă a apărut atunci când s-a observat că în unele cazuri există o dependență neregulată între efectul impurităților la concentrație joasă și la concentrație înaltă (N. Eidelman, S. Sarig). A. Winzer și H. Emos au observat că efectul asupra nucleației și cristalizării unei cantități mici de impurități este mult mai puternic decât în cazul cantităților mari de impurități. Acest studiu a pornit de la cristalizarea KCl din

soluție apoasă suprasaturată cu adaos de $PbCl_2$, $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ sau $K_3[Fe(CN)_6]$. Concluzia surprinzătoare a fost că atunci când se adaugă $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$, minimul cristalizării are loc la o concentrație de 5 mg la 100 ml soluție saturată de KCl iar maximul la 20 mg. Întrebarea care se pune este: cum o substanță, care acționează ca și un inhibitor care otrăvește pozițiile de creștere, să își schimbe caracterul în același sistem și să producă un efect invers? Încă nu se poate explica acest lucru. Concluzia care se poate trage este că uneori efectul asupra cristalizării și nucleației a unei cantități mici de impurități este adesea mai puternic decât efectul unei cantități mai mari. În unele cazuri particulare cum ar fi cazul influenței concentrației metilaminului asupra vitezei de creștere a nitratului de potasiu, S. M. Shor, M. A. Larson au arătat că la concentrații mici metilaminul mărește viteza de nucleere a nitratului de potasiu dar peste o anumită concentrație efectul este mai slab. Diferența dintre efectul impurităților la concentrații joase sau înalte a fost ușor de explicat cu ajutorul agenților activi de suprafață: atunci când se atinge o anumită concentrație numită concentrația critică, de miceli, moleculele surfactantului reacționează unele cu altele și formează miceli, acestea nu mai sunt capabile să interacționeze cu faza principală. Prezența impurităților într-un sistem de cristalizare poate modifica drastic modul în care are loc formarea cristalului, uneori crescând, dar de cele mai multe ori scăzând viteza de creștere, provocând sau prevenind agregarea și modificând habitusul cristalului. De obicei toate aceste efecte sunt concurente și de aceea este foarte dificil să se studieze un singur proces. O dificultate majoră este că nucleerea este urmată imediat de creștere iar un nucleu nu poate fi detectat decât după ce a crescut la o anumită dimensiune. Foarte rar este posibil să se găsească o explicație teoretică simplă a mecanismelor prin care o anumită impuritate afectează creșterea unui anumit cristal. O prezentare sumară a efectelor unor cantități mici de impurități solubile asupra creșterii cristalelor în soluție le împarte pe acestea în două categorii principale:

- Molecule mari, organice, care inhibă puternic creșterea chiar la concentrații de 0,0001 M dar nu afectează solubilitatea;
- Ioni complecși anorganici, care în general inhibă creșterea sau chiar o anulează iar unii dintre ei scad solubilitatea în timp ce alții nu.

De importanță mare sunt factorii de structură care influențează interacțiunile dintre impurități și cristalul afectat. Dacă o moleculă organică se poate adsorbi pe fața unui cristal datorită unei afinități de sarcină și a unei potriviri dimensionale, ea se poate adsorbi în poziții de creștere și poate încetini creșterea. Aceste probleme se studiază și se rezolvă prin modelare pe calculator.

4.3 Parametrii fizici și constructivi ce determină creșterea monocristalelor de α -cuarț

4.3.1 Concentrația și natura mineralizatorului

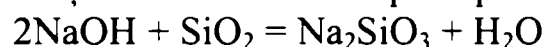
Mineralizatorul prin concentrația și natura sa constituie unul dintre factorii cei mai importanți în prezența cărora are loc solubilizarea materialului nutritiv și care

influențează sensibil viteza de creștere, factorii de decizie fiind interacțiunile și compușii intermediari care apar în cursul procesului hidrotermal [D7], [G4], [G7], [M15], [M18].

Referindu-ne pentru început la solubilizarea SiO_2 în apă pură, trebuie precizat faptul că între structura SiO_2 și a apei există asemănări izbitoare, observându-se – după unii autori – o trecere treptată între acizii de siliciu hidratați și rețeaua apei. Se presupune deci că există o oarecare dependență între densitatea apei determinată în primul rând de prezența ionilor de oxigen și solubilitatea diferitelor forme de SiO_2 , deoarece ambele însușiri sunt determinate de rețeaua formată de atomii de oxigen care, atât în molecula de SiO_2 cât și în apă ocupă cea mai mare parte a volumului moleculei, în timp ce atomii mici de Si și H ce intră în structura SiO_2 respectiv a apei au o contribuție redusă la volumul total al moleculei respective.

În acidul silicic rezultat prin hidratarea SiO_2 : $\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Si}(\text{OH})_4$, atomii de hidrogen ocupă spațiile mari dintre atomii de oxigen din molecule. Datorită complexității proceselor ce au loc la trecerea SiO_2 în apă și invers cu formarea unor compuși, au apărut o serie de divergențe privitoare la interfața SiO_2 - H_2O , fenomenele ce au loc fiind în contradicție cu teoria existenței stratului electric dublu la interfață.

Soluțiile suprasaturate ale $\text{Si}(\text{OH})_4$ se formează în cazul în care SiO_2 se află în apă la temperaturi ridicate și presiuni înalte. Dacă în soluția respectivă se introduc ioni de sodiu (Na^+) sau alți ioni concomitent cu radicalii OH^- , solubilizarea crește prin prezența celor doi ioni. Se presupune că are loc reacția:



Compusul intermediar Na_2SiO_3 este mai puțin stabil în apă decât SiO_2 care trece în soluție apoasă. Prin suprasaturarea provocată de temperatură procesul este reversibil.

Deplasarea concentrației de echilibru a sistemului de solubilizare al SiO_2 în apă produsă de prezența mineralizatorului (NaOH) depinde de natura cationului prin dimensiunea acestuia și reactivitatea lui chimică cât și prin concentrația lui.

Utilizarea diferiților mineralizatori a arătat că alegerea și concentrația lor se face dependent de condițiile fizice (P.T) din autoclavă. Prezența ionilor de litium în desfășurarea procesului hidrotermal contribuie la mărirea vitezei de creștere a monocristalului influențând în sens pozitiv și calitatea lui.

Pentru a obține viteze mari de creștere a monocristalului fără a înrăutăți calitatea cristalului crescut, concentrația ionilor de sodiu în soluție apoasă este cuprinsă între 0.2 și 1N la o temperatură între 350-400 °C și presiune sub 2000 atm. Temperaturi mai mari în zona de solubilizare conduc la viteze mai mari de creștere.

Viteza de cristalizare a alfa-cuarțului depinde, după cum s-a arătat, de solubilitatea cuarțului nutritiv în soluție și de concentrația solubilizantului. După A.A. Sternberg, viteza de creștere este dată de ecuația:

$$V = \frac{\Delta c \cdot m}{S} \quad (4.31)$$

unde Δc reprezintă concentrația solubilizantului exprimată prin volumul fazei solide

dizolvate în unitatea de volum a soluției, m este convecția masică a solubilizantului și S este suprafața cristalului în creștere.

În timpul creșterii, viteza trebuie să rămână constantă deoarece orice variație a ei determină o zonare a defectelor și impurităților, apărând tensiuni mecanice și fisuri care conduc la cristale de proastă calitate.

4.3.2 Gradul de umplere al autoclavei

Umplerea inițială a autoclavei este un parametru important în ceea ce privește creșterea cristalelor deoarece, la aceeași temperatură determină presiuni diferite în autoclavă, presiunea influențând, cum am mai arătat viteza de creștere și calitatea cristalului [S15].

Pentru obținerea monocristalelor de alfa-cuarț se poate opta pentru metoda la presiuni scăzute ~1300 atm sau la presiuni ridicate în jur de 2000 atm. la temperaturi de 400 °C. Se utilizează de obicei ultima metodă pentru a obține monocristale de calitate superioară cu o productivitate ridicată.

Procentul de umplere al autoclavei trebuie foarte riguros corelat cu temperatura deoarece modificarea cu variații foarte mici ale umplerii inițiale și cu câteva grade de temperaturii conduce la salturi importante ale presiunii. Aceste observații au condus la stabilirea dependenței presiunii din autoclavă de temperatură pentru diferite umpleri inițiale ale autoclavei. (Fig. 4.12)

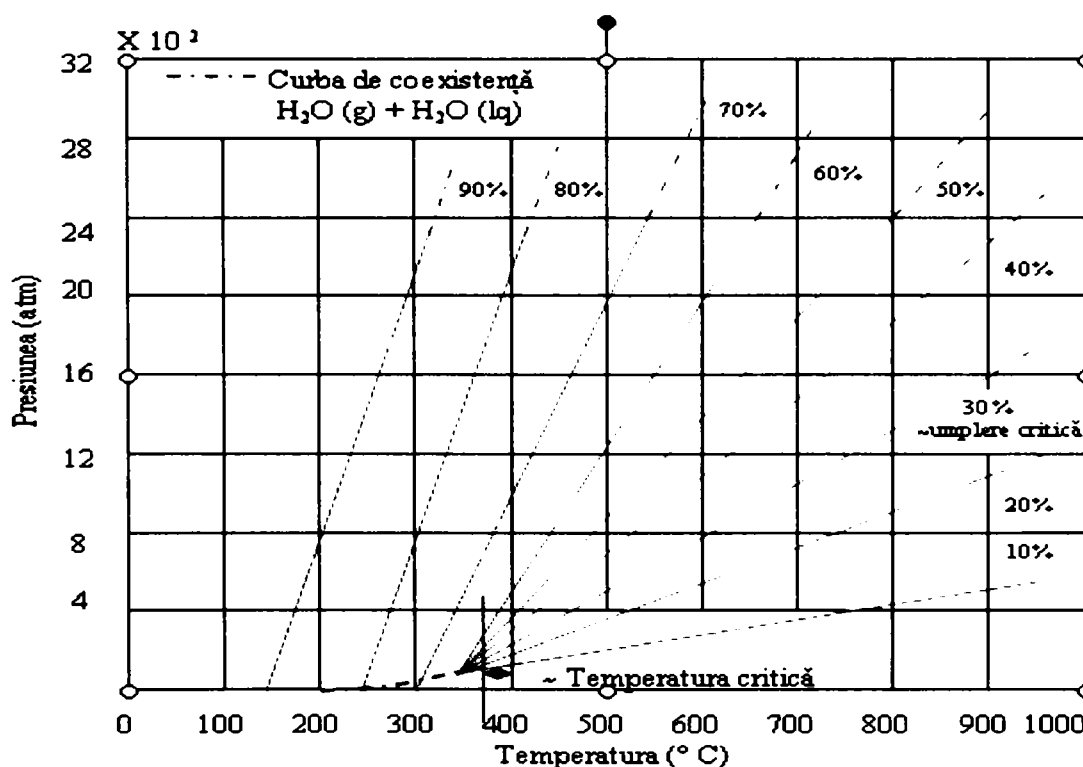


Fig. 4.12. Presiunea în funcție de temperatură pentru diferite grade de umplere inițială ale autoclavei

Se poate trage concluzia din aceste observații că un control riguros al temperaturii și presiunii și alegerea cu grijă a gradului de umplere inițială sunt esențiale pentru obținerea unei viteze de creștere optime, deci a unor cristale de calitate bună. Se prezintă în Fig.4.13 dependența vitezei de creștere (în mm/zi) de gradul de umplere pentru diferite temperaturi, utilizând NaOH ca mineralizator. Se observă că pentru umpleri inițiale sub 80%, dependența este aproape liniară.

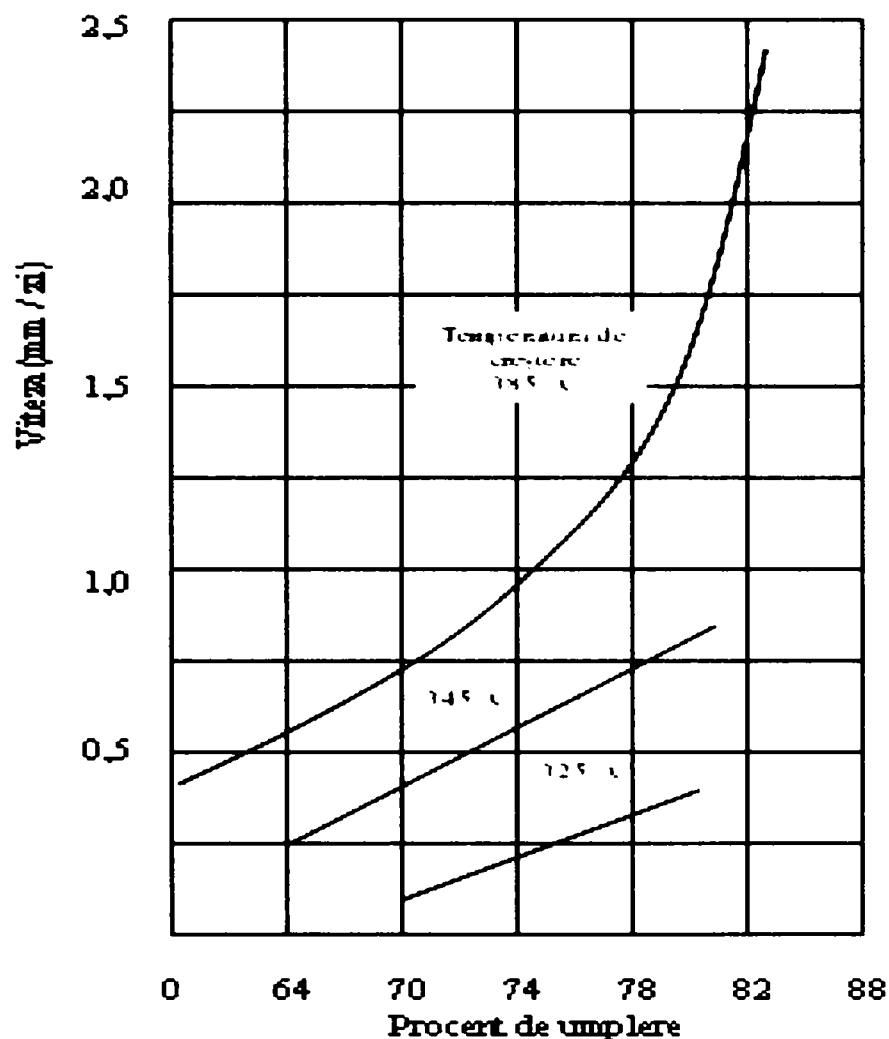


Fig. 4.13 Viteza de cristalizare în funcție de gradul de umplere

4.3.3 Suprafața de solubilizare și cristalizare

Cristalizarea pe germene a materialului nutritiv dizolvat în soluția mineralizatoare este în dependență directă de solubilizarea materiei prime în zona inferioară a autoclavei. Este util a se asigura inițial un raport destul de mare între suprafața de creștere (a germenilor) și suprafața materialului nutritiv. Este vorba evident de acea suprafață care se solubilizează, respectiv cristalizează cu viteza cea mai mare, deoarece, am observat în capitolele anterioare că solubilizarea, respectiv cristalizarea

sunt foarte pronunțate pentru o anumite axă (axa Z pentru cuarț) și nesemnificative pentru celelalte axe [S15].

Teoretic acest raport trebuie să fie cel puțin 6, dar practic el este mult mai mare, fiind de ordinul sutelor.

4.3.4 Temperatura de solubilizare și cristalizare. Gradientul de temperatură

Un rol deosebit de important pentru a obține o suprasaturare optimă a mineralizatorului cu material nutritiv, îl are regimul termic sub care se desfășoară procesul [G7], [G2], [G3].

Diferența de temperatură între cele două zone ale autoclavei influențează puternic cristalizarea. Astfel, alegerea unei diferențe mari de temperatură provoacă curenți ascensionali puternici, curgerea devine turbulentă în zona de cristalizare, ceea ce atrage după sine cristalizări spontane sau cristalizări dezordonate, haotice. Dacă însă se alege o diferență mică de temperatură apar condensări lente care deși conduc la obținerea unor cristale calitativ bune, nu sunt productive.

Se impune deci alegerea unei diferențe optime de temperatură pentru a se obține monocristale bune cu un randament ridicat.

Se prezintă în figura 4.14 viteza de cristalizare în funcție de ΔT într-o soluție 0.5N NaOH.

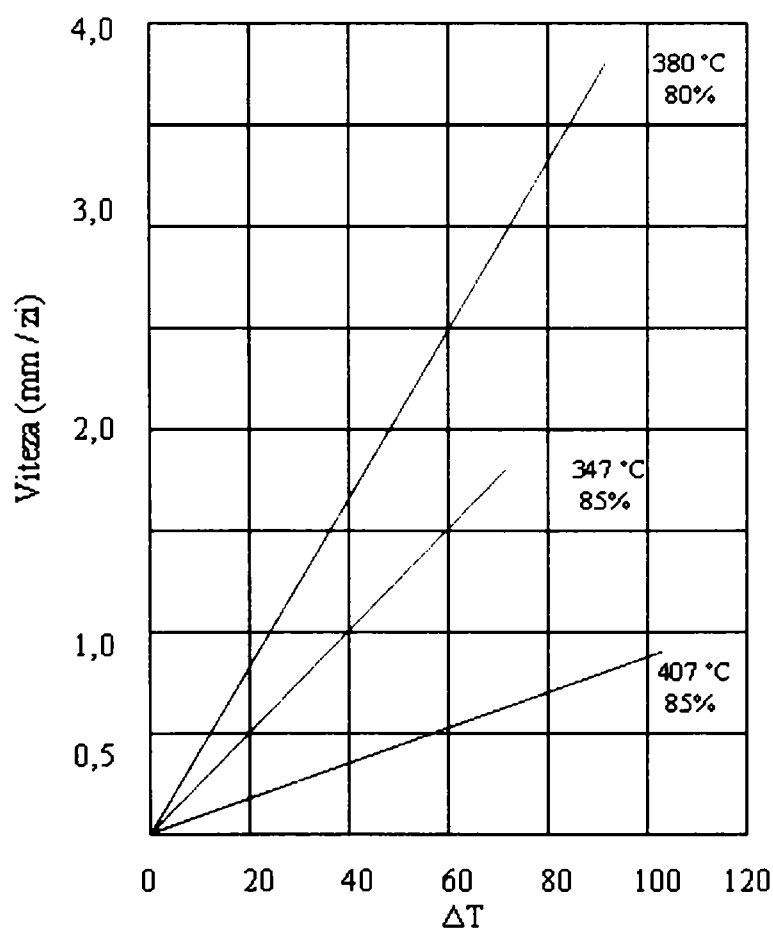


Fig. 4.14 Viteza de creștere în funcție de ΔT

4.3.5 Deschiderea șicanei

Realizarea, în zona de cristalizare a autoclavei a unei curgeri laminare a soluției suprasaturate a materialului nutritiv și deci pentru obținerea unei cristalizări bune cu o viteză optimă, a condus la necesitatea separării celor două zone printr-o șicană cu o geometrie adecvată. Ea are un rol important și la reglarea regimului termic între cele două zone ale autoclavei, deci și a vitezei de cristalizare.

În figura 4.15 este prezentată dependența vitezei de creștere (mm/zi) de deschiderea șicanei. Se observă că procentul de deschidere al șicanei influențează viteza de cristalizare atât a germenilor din partea superioară a zonei de cristalizare cât și a celor din partea inferioară.

Deschiderea șicanei trebuie astfel aleasă încât să se obțină viteză de cristalizare optimă pentru o cristalizare bună cu productivitate ridicată.

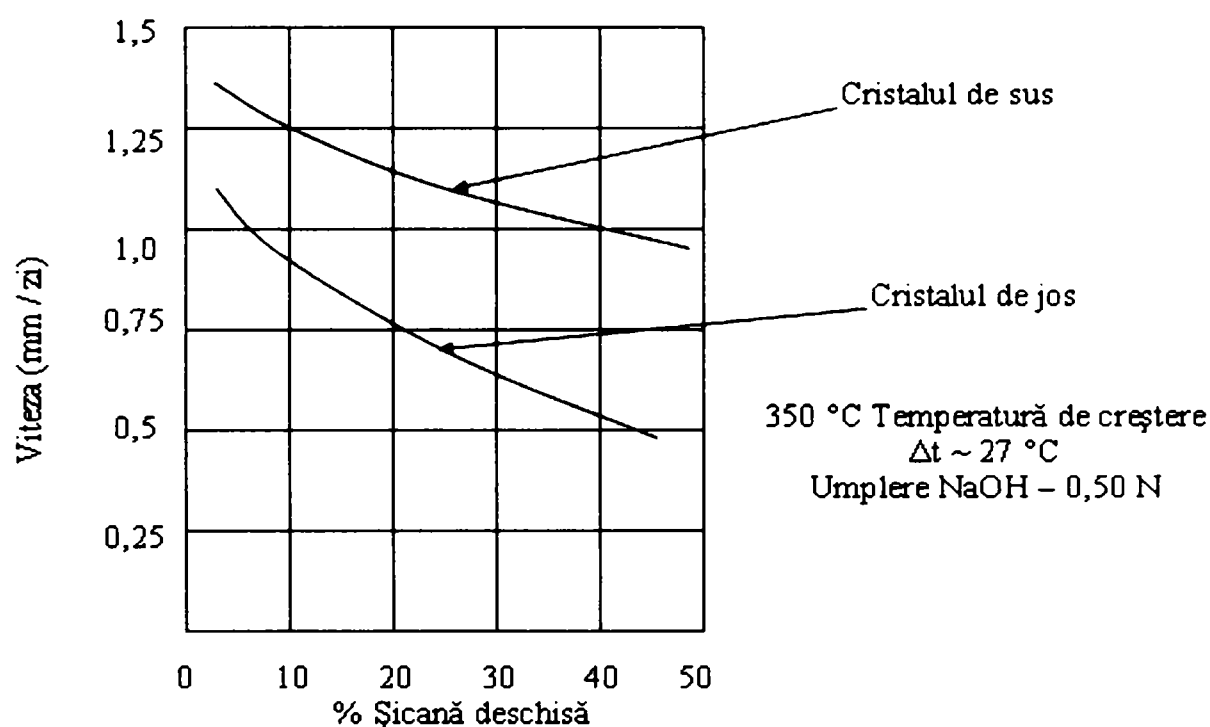


Fig.4.15 Viteza de creștere în funcție de procentul de deschidere al șicanei

4.3.6 Orientarea și prelucrarea germenilor

Pentru eficiența economică a obținerii unor monocristale, este necesară corelarea direcției preferențiale de creștere cu geometria dispozitivului obținut în urma prelucrării monocristalului [M15], [M18].

S-a observat anterior că viteza de cristalizare este puternic dependentă de orientarea cristalografică. Astfel, fețele cu indici cristalografici mari au energii superficiale mari și deci viteză de creștere mică, pe când fețele cu indici cristalografici mici au o densitate de noduri mare, deci viteza de creștere este

superioară. În cazul cuarțului, suprafața ce se dezvoltă cel mai rapid este cea perpendiculară pe axa optică, adică pe axa Z (0.001).

4.4 Considerații asupra fenomenelor de transport în autoclavă și la suprafața de cristalizare

4.4.1 Transportul global în autoclavă și în stratul limită

Studiile efectuate asupra cristalelor crescute hidrotermal au evidențiat o serie de particularități referitoare la proprietățile microscopice și macroscopice ale acestora. Dintre acestea amintim distribuția neuniformă a defectelor de rețea în plane paralele cu suprafețele de creștere ale cristalelor și distribuția neuniformă a defectelor în planele succesive. Întrucât grosimea cristalului și densitatea de defecte depind direct de viteza de cristalizare pe germene, s-a avansat ideea că, în principiu, se poate controla calitatea și dimensiunile cristalului prin controlul vitezei de creștere [S15].

Se cunoaște că viteza globală de creștere a cristalelor este dependentă de gradientul de temperatură dintre zona de solubilizare și cristalizare a autoclavei.

Teoria cinetico-moleculară a cristalizării explică corelația între viteza de creștere a cristalelor și temperatură. Dacă însă, temperatura la suprafața unui cristal nu este uniformă și deci se poate vorbi despre un câmp de temperaturi, este de așteptat ca prin intermediul vitezei de creștere, de acum neuniformă pe suprafață, grosimea cristalului să difere de la un punct la altul. Aceleași considerente sunt aplicabile și în ceea ce privește densitatea de defecte.

Câmpul de temperaturi de la suprafața cristalului precum și câmpurile de concentrație ale materialului nutritiv din soluție sunt rezultatul procesului de transport de masă și căldură din volumul soluției. Structura acestora este determinată de mulți factori, dintre care o parte sunt mărimile de comandă și control ale procesului creșterii cristalelor hidrotermale: temperatură, gradient de temperatură, umplerea inițială, natura și concentrația mineralizatorilor. Aceste mărimi depind de soluția constructivă a autoclavei ca: geometria incintei de reacție, raportul dintre lungime și secțiunea radială a autoclavei, forma, deschiderea și poziționarea șicanei etc.

În consecință prezintă interes stabilirea corelației cantitative dintre parametrii de proces ai metodei hidrotermale de creștere a cristalelor și câmpul vitezelor de cristalizare pe suprafața germenilor.

În cele ce urmează se va stabili o corelație cantitativă între parametrii de proces implicați în procesul de creștere hidrotermală a cristalelor și câmpul vitezelor de creștere a cristalului la suprafața germenului avându-se în vedere următoarele aspecte:

4.4.2 Procesele de transport în volumul de reacție

Procesele de transport în volumul de reacție sunt direct caracterizate de ecuațiile transferului de masă, impuls și căldură. Condițiile de frontieră asociate acestor ecuații se referă la suprafața de contact a fluidului cu peretele interior al incintei. În

aproximația că forma suprafeței și mărimea germenului sunt mult mai mici decât suprafața transversală a incintei și a volumului de reacție, prezența germenilor nu influențează semnificativ convecția. Soluțiile ecuațiilor transferului de masă și căldură sunt cele două câmpuri de interes: câmpul de temperatură $T(x,y,z)$ și câmpul de viteze $V(x,y,z)$. Cunoașterea acestor câmpuri permite stabilirea condițiilor de frontieră pentru ecuațiile ce descriu transportul la interfața lichid-solid (germene).

Având în vedere că soluția ecuațiilor transportului de masă și căldură depinde de constantele specifice ale fluidului de lucru (compoziția soluției), trebuie menționat rolul mineralizatorilor asupra coeficientului de vâscozitate al soluției. Este de menționat de asemenea faptul că vâscozitatea fluidului de lucru este sensibil diminuată de creșterea concentrației de acid clorhidric în dauna concentrației de acid sulfuric și fosforic. Se impune așadar realizarea unor determinări cantitative a dependenței vâscozității de concentrațiile mineralizatorilor.

4.4.3 Transportul global prin stratul limită de soluție.

Un germene monocristalin pe care are loc cristalizarea se află în totalitate scufundat în mediul fluid din interiorul fiolei. Sub influența gradientului de temperatură și de concentrație, soluția lichidă primește o mișcare de convecție, care în scurt timp ajunge în regim dinamic staționar. Intervalul de temperatură în care se stabilește gradientul de temperatură staționar este de 240-300 °C iar din rezultatele cercetărilor experimentale asupra dinamicii lichidului în incinte închise, s-a constatat că viteza de mișcare a fluidului în convecția staționară nu depășește 1 m/s, în aceste condiții fiind rezonabil să se considere că densitatea soluției și presiunea din interiorul volumului de reacție sunt practic constante. Particularitățile mișcării soluțiilor fluide la suprafața și în prezența unor suprafețe solide determină două regiuni distincte de curgere a fluidelor din care cea în contact cu suprafețele solide este afectată direct de acestea.

Suprafața de separare a acestor regiuni se află în imediata apropiere a suprafeței solide. Datorită vâscozității fluidului, aceasta se află în repaus în zona de contact cu germenul cristalin. Componenta pe axa Oy a vitezei fluidului crește de-a lungul normalei la suprafața de la valoarea nulă pe suprafața germenului la valoarea v_{ex} (exterior) corespunzătoare convecției libere. Spațiul dintre germene și mulțimea punctelor în care componenta v_x a vitezei are valoarea $0,995 V_{ex}$ este cunoscut ca *strat limită cinematic*, iar câmpul de temperaturi corespunzător este *stratul limită termic*.

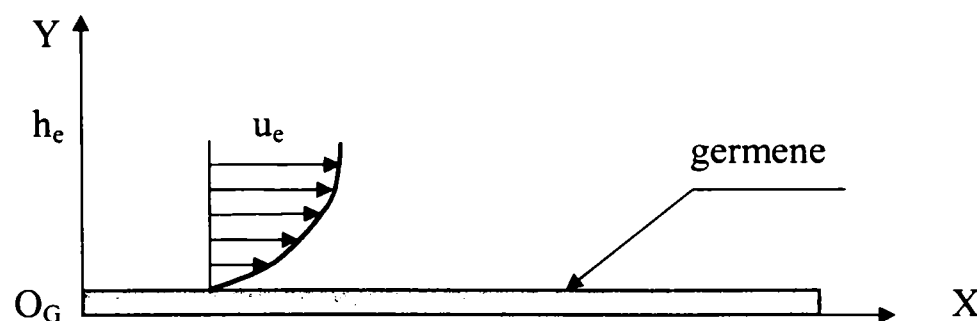


Fig. 4.16 Distribuția câmpului de viteze la suprafața germenului, unde h_e este căldura transportată la marginea stratului limită

Din considerente de similitudine, s-a arătat că în condițiile concrete ale cercetărilor noastre, cele două straturi limită pot fi considerate, cu bună aproximație ca având aceeași grosime. Fenomenele care au loc la interfața lichid-solid/germene în procesul de creștere hidrotermală sunt determinate de procesele de transport de căldură și de masa prin stratul limită. Pornind de la ecuațiile Navier-Stokes, în aproximația că fluidul evoluează în condiții de presiune și densitate globală aproximativ constante, ecuațiile de continuitate (în care sunt neglijate fluxurile diferențiale ale componentilor de interes și efectul câmpului gravitațional) și ecuația termică pentru stratul limită au forma tridimensională staționară din relațiile 4.32

$$\begin{cases} \nabla v = 0 \\ v \nabla v = (v_{ex} \cdot v_{ex,x} \cdot e_x + v_{ez} \cdot v_{ez,z} \cdot e_z) + v \nabla^2 v \\ v \cdot \nabla T = k \cdot \nabla^2 T \end{cases} \quad (4.32)$$

Primul termen din membrul stâng al ecuațiilor este o aproximație a termenului $(1/\phi) \nabla p$ în condiții de presiune p aproximativ constantă.

Ecuațiile stratului limită permit determinarea câmpurilor de temperatură și viteză în stratul limită. Stabilirea condițiilor de frontieră pentru sistemul de ecuații al stratului limită se face luând în considerare fenomenele conexe care au loc în interiorul autoclavei. Deoarece în exteriorul stratului limită soluția se deplasează datorită gradientilor de temperatură, a presiunii și vitezelor mici, se poate considera că, în ceea ce privește influența fenomenelor care au loc în stratul limită poate fi considerată de grosime uniformă. Câmpurile de viteze V_e și de temperatură T_e de pe suprafața exterioară a stratului limită se determină din ecuațiile care guvernează procesele de transport în exteriorul stratului limită. Câmpul de viteze la suprafața germenului este identic nul în toate punctele suprafeței.

Câmpul de temperaturi la suprafața unui germene implică aspecte netriviiale deoarece acesta este influențat atât de procesele de echilibrare a căldurii latente de cristalizare cât și de procesele de transport de căldură care au loc în volumul germenului. Problema aceasta se poate aborda și soluționa în două moduri: fie se folosește un sistem de măsură a câmpului de temperatură în timpul procesului de creștere, fie se face uz de formula transferului de căldură pentru a determina câmpul de temperatură $T_g = T_g(x, O, z)$ de la suprafața germenului. Această din urmă soluție are dezavantajul că, pentru a stabili expresia fluxului de căldură latentă de cristalizare este nevoie de câmpul vitezei de creștere a cristalului, ceea ce conduce la un sistem de ecuații care sunt dificil de rezolvat. În concluzie, condițiile de frontieră a stratului limită sunt:

$$y = h_e : v_e = v_e(x, h_e, z), T_e = T_e(x, h_e, z) \quad (4.33)$$

$$y = 0 : v_g = v_g(x, 0, z) = 0, T_{g,x} = 0, T_{g,z} = 0, T_{g,y} = -\frac{1}{k} q_y \quad (4.34)$$

și s-au determinat experimental sub forma $T_g = T_g(x, O, z)$.

4.4.4 Transportul materialului nutritiv din soluție prin stratul limită

Transportul materialului nutritiv din soluție prin stratul limită prezintă importanță deosebită deoarece acesta determină direct viteza de creștere. Ecuațiile care descriu bine acest fenomen sunt ecuațiile transportului de masă în cazul sistemelor multicomponente. Se pune deci problema determinării cantitative a transportului nutrientului prin stratul limită, deoarece creșterea densității soluției prin solubilizarea solvantului, format din material nutritiv este cu două ordine de mărime mai mică decât densitatea apei împreună cu cea a mineralizatorilor solubilizati, se consideră că procesele de transport în stratul limită în care sunt implicate sistemele de nutrienți, au o influență neglijabilă asupra soluțiilor ecuațiilor de transport din stratul limită.

Ecuația transportului de masă în cazul sistemelor multicomponent este de forma ecuației de continuitate :

$$\phi_{i,t} + \nabla(\phi_i \cdot v + j_i) = 0 \quad (4.35)$$

Pentru fiecare component, aceasta are forma :

$$\phi_{i,t} + \nabla(\phi_i \cdot v + j_i) = 0 \quad (4.36)$$

unde ϕ este densitatea componentului i , iar

j_i este vectorul fluxului diferențial de masă al componentului i dat de :

$$j_i = \phi_i \cdot (v_i - v) \quad (4.37)$$

Expresiile fluxurilor diferențiale j_i sunt date de legea difuziei: $j_i = -D_i \nabla \phi_i$ unde D_i este coeficientul de difuzie al componentului i , considerat constant.

Vectorii v_i caracterizează viteza componentelor din soluție. Aceste viteze sunt legate de câmpul global de viteze prin definiția: $v = (1/\phi) \sum \phi_i v_i$, deoarece densitățile componentelor solvantului în soluție sunt mult mai mici decât densitatea solventului. Se poate considera că, din punct de vedere dinamic, mișcarea componentelor de interes este decuplată de mișcarea globală a fluidului. Ca urmare, câmpurile de viteze v_1^r și v_2^r satisfac ecuații de tip Navier- Stokes, raportate la mișcarea globală a fluidului. În acest scop se definesc vitezele relative ale componentelor de interes față de sistemul de referință al vitezei v a fluidului :

$$v_i^r = (v_i - v) \quad i=1..2 \quad (4.38)$$

Aceste câmpuri de viteze satisfac și condițiile pe suprafața exterioară a stratului limită, identice cu cele ale fluidului :

$$v_i^r \nabla v_i^r = (v_{ex} v_{ex,x} c_x + v_{ez} v_{ez,z} c_z) + v_i \nabla^2 v_i^r \quad (4.39)$$

În concluzie, ecuațiile care guvernează difuzia componentelor de interes prin limită sunt :

$$\phi_{i,t} + \nabla(\phi_i \cdot v - D_i \nabla \phi_i) = 0 \quad i=1..3 \quad (4.40)$$

$$v_i^r \nabla v_i^r = (v_{ex} v_{ex,x} C_x + v_{ez} v_{ez,z} C_z) + v_i \nabla^2 v_i^r \quad (4.41)$$

În funcție de mărimea câmpului $v(x,y,z)$ și al gradientului acestuia în stratul limită furnizat de rezolvarea ecuațiilor se așteaptă ca ecuațiile de mai sus să poată fi reduse prin aproximații adecvate la o formă unidimensională, corespunzătoare direcției Oy.

Condițiile pe frontieră asociate acestor ecuații sunt :

$Y=h_c$; ϕ_{ie} este o constantă dată de aportul nutrientului (solvantului) la densitatea soluției : $v_{ie}^r(x, h_c, z) = 0$ $y=0$: $\phi_{ie} = \phi_i(x, 0, z)$; dată de densitatea centrelor de absorbție pe suprafața, iar $v_i^r = v_i^r(x, 0, z)$ dat de difuzia componentelor nutritive pe suprafața germenului.

La aceste relații se mai pot adăuga dacă este necesar, relațiile derivate din variația fluxurilor diferențiale la interfața lichid-solid.

Pe de altă parte, din punct de vedere practic există o probabilitate mare ca în timpul procesului hidrotermal să existe variații locale de temperatură la suprafața exterioară a autoclavei datorate imperfecțiunilor elementelor de răcire și de termoizolare sau pur și simplu datorită variației temperaturii aerului în jurul autoclavei. Datorită acestor aspecte, este foarte dificil să se obțină un model (prin rezolvarea ecuațiilor descrise anterior) care să conțină toate condițiile fizico-chimice existente în realitate.

Totuși tratarea cantitativă a problematicii dă o imagine globală definitivă asupra complexității proceselor din autoclave.

4.4.5 Transportul nutrientului la suprafața lichid-solid

Procesele de cristalizare din soluție pe germene monocristalin a materialului nutritiv are loc la interfața lichid-solid, substanța nutritivă fiind transportată de soluția fluidă spre interfață. Transportul soluției nutritive din zona de solubilizare a nutrientului spre zona de cristalizare se realizează printr-o curgere lentă, iar spre suprafața de cristalizare prin curgere laminară și lentă.

Distribuția uniformă a temperaturii în zona în care se găsește interfața lichid-solid (germene), lipsa curenților turbionari precum și suprasaturarea controlată și uniformă, conduce la o cristalizare uniformă pe germeni și la viteza de creștere constantă de-a lungul direcției de curgere spre interfață (pe suprafața germenilor).

Viteza de cristalizare depinde, după cum s-a specificat, de natura speciei ionice care difuzează, de vâscozitate, natura și concentrația mineralizatorului, fluxurile de masă, gradientul de temperatură și geometria interioară a recipientului.

Elucidarea proceselor fizice de la interfața lichid-solid (germene) și cristalizarea pe germene în condiții hidrotermale, rămâne încă o problemă deschisă cercetărilor, iar tendințele de a le explica sunt sintetizate astfel :

a) În jurul cristalului se formează o peliculă foarte îngustă (de dimensiuni moleculare/ionice) numită suprafață de interfață cu concentrație a materialului nutritiv mai mare decât concentrația de suprasaturație a soluției, acest strat este numit pătură de absorbtie ;

b) O altă explicație se bazează pe structura microscopică la scară atomică și ionică a cristalelor și acțiunea lor de a realiza legături pe suprafațe specifice speciei .

c) Bravais face legătura între forma cristalului și structura reticulară și formulează ideea că viteza de creștere a fețelor cristaline depinde de densitatea de noduri a planelor corespunzătoare, fețele cu densitate mare de noduri dezvoltându-se mai repede.

d) Teoria cinetico-moleculară de creștere a cristalelor, explică cristalizarea dintr-o soluție foarte slab suprasaturată prin repetarea la infinit a unor trepte energetice care constau din legarea unei particule (atom, ion, grupare ionică) de o altă particulă în mod periodic, ce conduce treptat la șiruri reticulare, plane reticulare și apoi structuri spațiale tridimensionale.

Procesele fizice de la interfața lichid-solid (germene) în condiții hidrotermale (la temperaturi mari și presiuni ridicate) sunt complicate nu numai datorită necunoașterii cu precizie a temperaturii și a distribuției ei la nivelul interfeței și de prezența presiunii, ci și de prezența în soluție a unor substanțe străine sub formă de atomi sau ioni care intră în rețea sau interstițiu în cristal și perturbă câmpul energetic de la suprafața germenului (cristalului) schimbând viteza de creștere, structura și habitusul.

Studiile efectuate evidențiază importanța cunoașterii calitative și cantitative a proceselor termodinamice ireversibile care au loc la interfața lichid-soluție. Astfel, fluxurile de substanță prin interfața lichid-soluție sunt de forma : $j \approx \Delta G / \Delta \phi \cdot e_y$. Variația entalpiei libere ΔG prin interfață este dată de :

$$\Delta G / (NkT_e) = \alpha (N_a(N - N_a) / N^2 - \ln(N / (N - N_a))) - (N_a / N) \ln((N - N_a) / N_a) \quad (4.42)$$

unde ϕ este densitatea soluției, N_a este numărul de atomi (depinde de natura substanței cristalizate, de orientarea germenului, de defectele de la suprafață și de gradul inițial de prelucrare a suprafeței germenului), N este numărul de atomi absorbiți pe suprafață, iar $\alpha \approx L_0 / kT_c$, L_0 fiind energia de legătură / atom iar T_e temperatura de echilibru a procesului.

Dacă Q_{ad} este energia de legătură pe suprafața atomilor, numărul de atomi la echilibru este :

$$N = N_a \exp(-Q_{ad} / kT_e) \quad (4.43)$$

Aceste mărimi determină cinetica cristalizării. Cristalizarea fiind un fenomen de neechilibru, pentru a realiza o creștere uniformă a cristalelor, este necesară stabilirea condițiilor fizico-chimice și a parametrilor de proces astfel încât, procesul de cristalizare să aibă loc într-un regim staționar.

4.5 Proiectarea unei instalații de creștere a monocristalelor de α - cuarț prin metoda hidrotermală

4.5.1 Memoriu de prezentare

Autoclava este un recipient închis etanș, în care se produc procese fizice și chimice sub presiune, de până la 3000 atmosfere ($p = 3000$ bar) și la temperatură ridicată, în cazul de față, până la 500°C . Ea poate fi folosită la efectuarea de sinteze hidrotermale de diferite materiale precum și la creșterea de cristale [M16], [M17], [N5], [P13], [T25], [S14].

Funcțiile esențiale ale autoclavei sunt:

- de rezistență la presiuni și temperaturi ridicate;
- de etanșare sigură la presiuni ridicate, prin asigurarea etanșărilor cu manșete și inele de etanșare;
- de siguranță împotriva exploziei, dacă în interior se depășesc presiunile maxime prescrise, prin supape de siguranță de presiune limită;
- de asigurare și modificare a temperaturilor în timpul procesului;
- de control al presiunii și al temperaturilor;
- de protecție a pereților interiori din oțel inoxidabil la atac chimic.

Coordonarea tuturor acestor funcții, în conformitate cu proiectarea experimentală, este asigurată de un sistem automatizat de comandă, control și monitorizare a parametrilor temperatură și presiune.

Subansamblurile componente ale instalației experimentale de autoclavare sunt:

1. *recipientul*
2. *sistemul de încălzire*
3. *sistemul de măsurare a temperaturilor*
4. *sistemul de măsurare a presiunilor*
5. *sistemul de comandă și control*

Elementele componente ale recipientului sunt:

1. *Corpul autoclavei din oțel inoxidabil*
2. *Capacul de închidere*
3. *Capacul de siguranță*
4. *Sistemul de închidere este cu filet sau închidere rapidă de tip baionetă cu elementele elastice de preluare permanentă a jocurilor.*

4.5.2 Breviar de calcul de dimensionare

4.5.2.1 Dimensiunea carcasei de rezistență

Dimensiunile de gabarit ale autoclavei rezultă din condiția de asigurare a volumului util al acesteia [S14]. S-au prestabilit dimensiunile de gabarit prezentate în figura de mai jos.

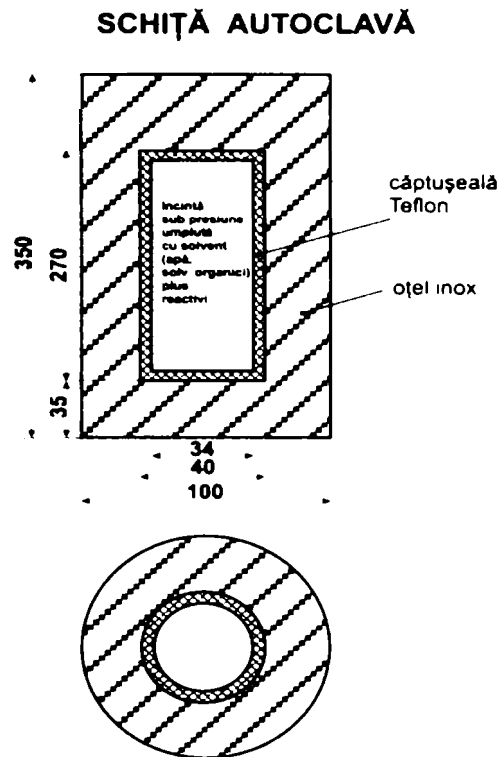


Fig.4.17 Dimensiunile autoclavei

4.5.2.2 Dimensionarea autoclavei ca tub cu pereți groși

Se reduce la determinarea coeficientului K ca raport dintre diametrul exterior și cel interior necesar al tubului, în funcție de rezistența admisă la întindere și de presiunea maximă din interiorul tubului cu pereți groși.

Pentru diametrul interior de 34 mm rezultă:

- raza interioară $r_i=17$ mm
- presiunea interioară maximă $p_i=1000$ daN/cm²
- rezistența admisibilă a materialului $\sigma_a=2400$ daN/cm²

Condiția de rezistență după ipoteza efortului unitar tangențial maxim [N5] este:

$$\sigma_{cp3} = \sigma_1 - \sigma_3 = p_i \frac{2K^2}{K^2 - 1} = \sigma_a \quad (4.44)$$

în care $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sunt tensiunile normale principale, date de semiaxele elipsoidului tensiunilor normale (Fig. 4.18) de ecuație:

$$\frac{p_x^2}{\sigma_1^2} + \frac{p_y^2}{\sigma_2^2} + \frac{p_z^2}{\sigma_3^2} = 1 \quad (4.45)$$

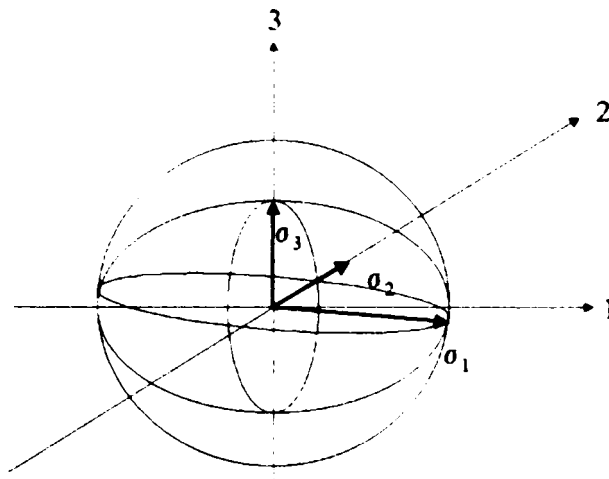


Fig.4.18 Elipsoidul tensiunilor sau elipsoidul lui Lamé

Tensiunile normale principale se calculează cu relația:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 - 4\tau_{xy}^2} \quad (4.46)$$

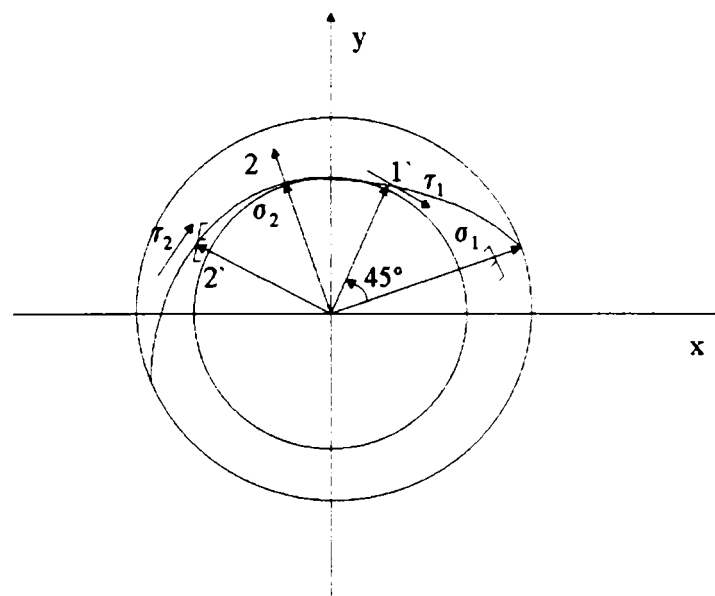


Fig. 4.19 Direcțiile tensiunilor normale σ_1 , σ_2 și tangențiale τ_1 și τ_2

Tensiunile tangențiale maxime apar în plane înclinate la 45° față de direcțiile principale. Valorile lor sunt date în relația (4.47)

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (4.47)$$

Distribuția pe grosimea peretelui a eforturilor unitare tangențiale σ_t și radiale σ_r sunt reprezentate în Fig. 4.20

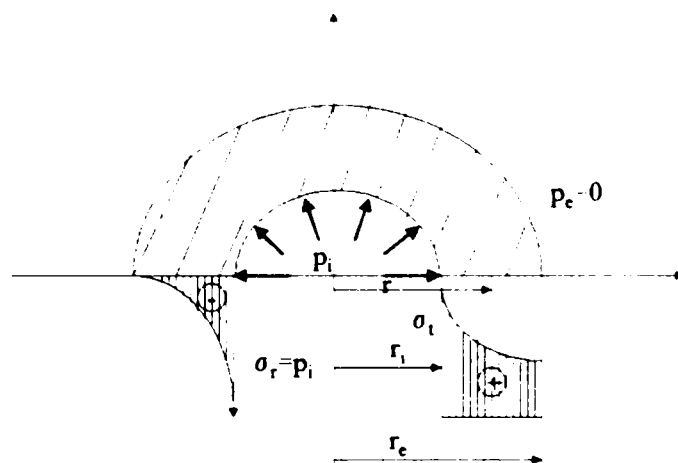


Fig. 4.20 Distribuția tensiunilor

Relațiile de calcul pentru fibra interioară r_i , efortul unitar tangențial și pentru cel radial sunt:

$$\sigma_t = p_i \frac{K_r^2 + K}{K_r^2(K^2 - 1)} \quad (4.48)$$

$$\sigma_r = p_i \frac{K_r^2 - K^2}{K_r^2(K^2 - 1)} \quad (4.49)$$

în care

$$K_r = \frac{r}{r_i}, \text{ variabil} \quad (4.50)$$

$$K = \frac{r_e}{r_i} = \text{constant} \quad (4.51)$$

Pentru dimensionare este necesar și suficient să se determine constanta K din relația (4.44). Rezultă ecuația (4.52)

$$2K^2 p_i^2 = K^2 \sigma_a - \sigma_a \quad (4.52)$$

sau

$$K^2(\sigma_a - 2p_i) = \sigma_a \quad (4.53)$$

și

$$K = \pm \sqrt{\frac{\sigma_a}{\sigma_a - 2p_i}} \quad (4.54)$$

Interesează numai rădăcina pozitivă, astfel:

$$K = \sqrt{\frac{2400}{2400 - 2 \cdot 1000}} = \sqrt{\frac{2400}{400}} = \sqrt{6} = 2,4495 \cong 2,45 \quad (4.55)$$

În acest fel, raza exterioară necesară va fi:

$$r_e = K r_i = 2,45 \times 17 = 41,65 \text{ mm} \quad (4.56)$$

Rezultă o grosime necesară a peretelui de

$$g = r_e - r_i = 41,65 - 17 = 24,65 \text{ mm} \quad (4.57)$$

și un diametru exterior

$$D_e = 2r_e = 2 \times 41,65 = \Phi 83,30 \text{ mm}$$

Tensiunea unitară radială maximă are loc în fibra interioară, lângă r_i , și este o compresiune:

$$\sigma_r = -1000 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \quad (4.58)$$

Tensiunea unitară tangențială maximă este dată de relația (4.48) pentru fibra interioară

$$\sigma_{t_i} = 1000 \frac{6+1}{6-1} = \frac{7000}{5} = 1400 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \quad (4.59)$$

Pentru fibra exterioară ($r = r_e$, $K = K_r$)

$$\sigma_{t_e} = p_i \frac{2K^2}{K^2(K^2 - 1)} = p_i \frac{2}{(K^2 - 1)} = 1000 \frac{2}{6-1} \quad (4.60)$$

$$\sigma_{t_e} = \frac{2000}{5} = 400 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \text{ și este minimă.} \quad (4.61)$$

Condiția de rezistență, după ipoteza lucrului mecanic modificator [N5] este:

$$\sigma_{cp5} = p_i \frac{\sqrt{3K^4 + 1}}{K^2 - 1} = \sigma_a \quad (4.62)$$

Ridicând la pătrat ambii termeni ai relației de mai sus și ordonând după puterile lui K , se obține:

$$(\sigma_a^2 - 3p_i^2)K^4 - 2\sigma_a^2 K^2 + (\sigma_a^2 - p_i^2) = 0 \quad (4.63)$$

din care se obține:

$$K^2 = \frac{\sigma_a^2 \pm \sqrt{[\sigma_a^4 - (\sigma_a^2 - 3p_i^2)(\sigma_a^2 - p_i^2)]}}{\sigma_a^2 - 3p_i^2} \quad (4.64)$$

și

$$K = \pm \sqrt{\frac{\sigma_a^2 \pm \sqrt{(\sigma_a^4 - (\sigma_a^2 - 3p_i^2)(\sigma_a^2 - p_i^2))}}{\sigma_a^2 - 3p_i^2}} \quad (4.65)$$

Soluțiile sunt:

$$K_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{(2400)^2 \pm \sqrt{2400^4 - (2400^2 - 3 \cdot 1000^2)(2400^2 - 1000^2)}}{2400^2 - 3 \cdot 1000^2}}$$

$$K_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{24^2 \pm \sqrt{24^4 - (24^2 - 3 \cdot 10^2)(24^2 - 10^2)}}{24^2 - 3 \cdot 10^2}} = \pm \sqrt{\frac{575 \pm \sqrt{331776 - 276 \cdot 476}}{276}} = \sqrt{\frac{576 \pm \sqrt{200400}}{276}}$$

$$K_{1,2} = \sqrt{\frac{576 \pm \sqrt{131374}}{276}} = \sqrt{\frac{576 \pm 447,66}{276}}$$

$$K_1 = \sqrt{\frac{1023,66}{276}} = 1,925853848 \quad (4.66)$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{128,34}{276}} = 0,6819090848 \quad (4.67)$$

Deoarece $0 < K > 1$, singura soluție valabilă este $K = K_1 = 1,926$. În acest fel, diametrul exterior necesar este de

$$\Phi D_e = K D_i = 1,926 \times 40 = \Phi 77,04 \text{ mm} \quad (4.68)$$

mai mic decât cel rezultat din condiția anterioară.

În concluzie, diametrul exterior al corpului de rezistență al autoclavei se va alege:

$$D_e = \Phi 90 \text{ mm} \quad (4.69)$$

4.5.2.3 Calculul corpului autoclavei ca un cilindru cu pereți subțiri

Schema de solicitare a unui cilindru cu pereți subțiri este redată în Fig. 4.21. În acest caz se poate neglija variația tensiunilor pe grosimea tubului, considerându-se aceeași tensiune pe toată grosimea redusă a tubului.

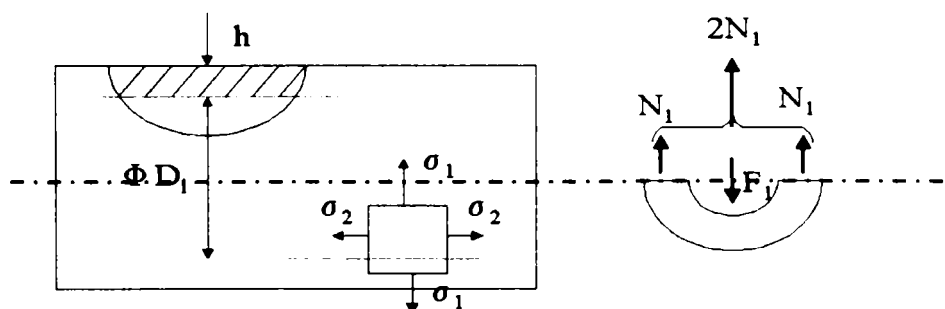


Fig. 4.21 Schema de solicitare a unui cilindru cu pereți subțiri

Învelișul sau corpul este solicitat la întindere după două direcții. Eforturile unitare într-un punct fiind σ_1 și σ_2 , primul normal pe generatoarea cilindrului, și σ_2 evident, transversal, tangent sau de-a lungul generatoarei.

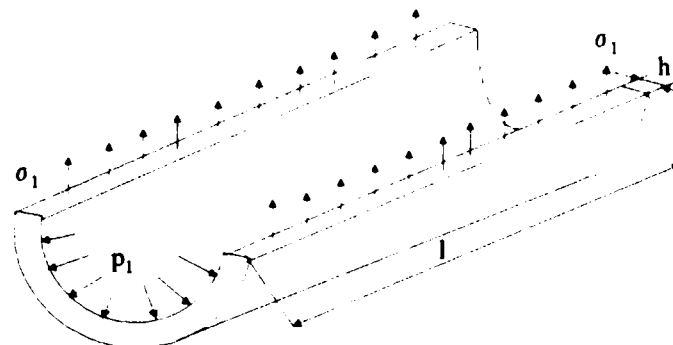


Fig. 4.22 Schema de calcul

Din ecuația de echilibru a semicilindrului izolat rezultă:

$$N_1 = \sigma_1 h l \quad (4.70)$$

$$F_1 = \int p_i l \sin \alpha dS = \int p_i l \sin \alpha \frac{p_i}{2} d\alpha = p_i D_i l \quad (4.71)$$

Din condiția de echilibru pentru grosimea peretelui de $h = 25\text{mm}$, $2N_1 = F_1$, astfel că

$$\sigma_1 = \frac{p_i D_i}{2h} = \frac{1000 \cdot 4}{2 \cdot 2,5} = \frac{4000}{5,8} = 690 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} < \sigma_a = 2400 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \quad (4.72)$$

Solicitarea la întindere longitudinală rezultă din ecuațiile de echilibru:

$$N_2 = \pi D_i h \sigma_2 \quad (4.73)$$

$$F_2 = \frac{\pi D_i^2}{4} p_i \quad (4.74)$$

Astfel rezultă că:

$$\sigma_2 = \frac{p_i D_i}{4h} = \frac{1000 \cdot 4}{4 \cdot 2,5} = 344 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \quad (4.75)$$

$$\sigma_2 \ll \sigma_a = 2400 \frac{\text{daN}}{\text{cm}^2} \quad (4.76)$$

Și deci solicitările sunt cu mult mai mici decât în cazul tubului cu pereți groși.

4.5.3 Determinarea pe cale grafică a variației tensiunilor în jurul unui punct. Cercul lui Mohr

4.5.3.1 Definiția și componentele tensiunii

Se consideră că un solid oarecare, sollicitat de forțe exterioare F_1, F_2, \dots, F_n , ce satisfac ecuațiile de echilibru, este secționat în două, partea superioară considerându-se îndepărtată. Pentru ca partea inferioară rămasă, să continue să fie în echilibru, în secțiunea considerată trebuie introduse forțe interioare, care să reprezinte acțiunea părții îndepărtate.

Pe o suprafață ΔA lucrează forța interioară $\Delta \vec{F}$ orientată bine definit față de normală și elementul de suprafață ΔA .

Tensiunea sau efortul unitar este intensitatea efortului într-un punct, adică:

$$\bar{p} = \lim \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta A} \quad (4.77)$$

Tensiunea \bar{p} are aceeași direcție și sens ca și vectorul $\Delta \vec{F}$.

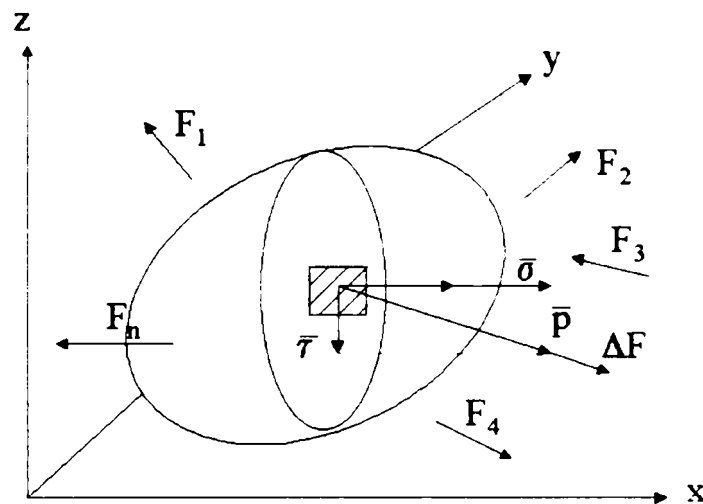


Fig. 4.23 Componentele tensiunii unui solid oarecare

Valoarea tensiunii depinde, însă, nu numai de cele 4 elemente ce caracterizează un vector - mărime, direcție, sens și punct de aplicație, ci și de orientarea elementului de secțiune ΔA , adică de cele trei cosinusuri directoare ale normalei \bar{n} a acestuia sau de unghiurile lui Euler, θ, φ, ψ . Ca urmare, tensiunea este o mărime mai complexă decât vectorul, este un *tensor*.

Tensiunea totală \bar{p} poate fi descompusă într-o componentă σ după normală \bar{n} la elementul de suprafață ΔA , numită tensiune normală și o componentă τ situată în planul elementului ΔA , numită tensiune tangențială. Există relațiile evidente $\bar{p} = \bar{\sigma} + \bar{\tau}$ sau $p^2 = \sigma^2 + \tau^2$

Tensiunea normală se consideră pozitivă dacă produce un efect de întindere și negativă dacă produce o compresiune.

4.5.3.2 Variația tensiunilor în jurul unui punct

Tensiunea \bar{p} într-un punct P, se poate descompune după cele trei axe de coordonate:

$$\begin{cases} p_x = \sigma_x l + \sigma_{xy} m + \sigma_{xz} n \\ p_y = \sigma_{yx} l + \sigma_y m + \sigma_{yz} n \\ p_z = \sigma_{zx} l + \sigma_{zy} m + \sigma_z n \end{cases} \quad (4.78)$$

sau vectorial:

$$\bar{p} = \bar{p}_x l + \bar{p}_y m + \bar{p}_z n \quad (4.79)$$

în care l, m, n sunt cosinuşii directori.

Dacă secțiunea, care conține punctul P, se rotește în jurul acestui punct, valorile tensiunilor σ și τ variază. Există trei direcții trirectangulare n_1, n_2 și n_3 , numite **direcții principale**, cărora le corespund tensiuni tangențiale nule, iar tensiunile normale iau, după aceste direcții, valorile σ_1, σ_2 și σ_3 numite **tensiuni normale principale**.

Secțiunile tetraedrului pe care apar tensiunile normale principale se numesc **plane principale**.

În planele bisectoare dintre planele principale se produc **tensiunile tangențiale principale**. Valorile acestora sunt:

$$\begin{cases} \tau_1 = \pm \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) \\ \tau_2 = \pm \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1) \\ \tau_3 = \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \end{cases} \quad (4.80)$$

Locul geometric al vârfului vectorului tensiunii totale $\bar{p} = \bar{p}_x + \bar{p}_y + \bar{p}_z$, când elementul de secțiune ABC (fața tetraedrului) se rotește în jurul unui punct $O \equiv P$, este un elipsoid numit **elipsoidul tensiunilor** sau **elipsoidul lui Lamé**. Direcțiile principale sunt $O1, O2$ și $O3$. Fiecărui punct al elipsoidului îi corespunde câte un elipsoid al tensiunilor.

4.5.3.3 Cazul stării de tensiune plane

Când nu există solicitări după direcția Oz, deci $\sigma_3 = 0$, tensiunile pe o secțiune incidentă cu unghiul φ față de axa Oy (Fig. 4.27) sunt date de relațiile:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\varphi + \tau_{xy} \sin 2\varphi \quad (4.81)$$

$$\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\varphi + \tau_{xy} \cos 2\varphi \quad (4.82)$$

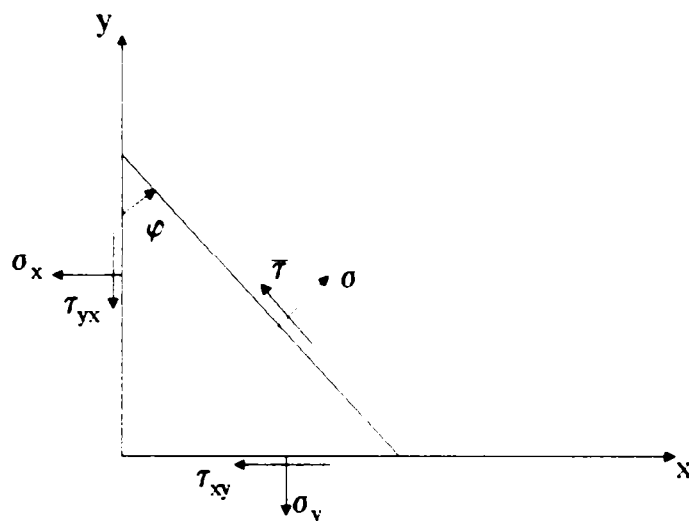


Fig. 4.27 Cazul stării de tensiune plane

Tensiunile normale principale se calculează cu relația:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (4.83)$$

Direcțiile principale se stabilesc cu ajutorul relației:

$$2\varphi_1 = \arctg \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4.84)$$

Tensiunile tangențiale maxime apar în plane înclinate la 45° față de direcțiile axelor principale. Valorile lor sunt:

$$\tau_{1,2} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (4.85)$$

4.5.3.4 Determinarea pe cale grafică a variației tensiunilor în jurul unui punct. Cercul lui Mohr. Utilizarea funcțiilor supermatematice

În cazul stării plane de solicitare, dacă se cunosc tensiunile σ_x , σ_y și τ_{xy} , pot fi determinate tensiunile σ și τ pe o secțiune înclinată cu unghiul φ și pe cale grafică, utilizând cercul lui Mohr. Trasarea cercului este redată pe larg în [T23] și [T24].

Într-un sistem de axe rectangular drept $\sigma O\tau$, cercul lui Mohr are centrul $C(e,0)$ pe axa $O\sigma$, în punctul de abscisă dat de relația (4.86).

$$R \cdot e = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (4.86)$$

Raza cercului lui Mohr este:

$$R = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \quad (4.87)$$

Cunoscându-se raza cercului R , excentricitatea numerică

$$e = \frac{eR}{R} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4.88)$$

și variabila $\alpha = 2\varphi_1$ la centrul O , toate funcțiile supermatematice circulare excentrice de variabilă la centru sunt definite [S14].

Rezultă:

$$\begin{cases} \sigma_{1,2} = R \cdot \operatorname{Re} x_{1,2} 0^\circ = x_{A,C} \\ \sigma_{x,y} = R \cdot \operatorname{Re} x_{1,2} \alpha \cdot \cos \theta'_{1,2} = R \cdot \operatorname{Ce}_{1,2} \alpha = x_{1,2} \\ \tau_{xy} = R \cdot \operatorname{Re} x_{1,2} \alpha \cdot \sin \theta'_{1,2} = R \cdot \operatorname{Se}_{1,2} \alpha = y_{1,2} \\ \sigma_{1,2} = R \cdot \operatorname{Re} x_{1,2} \frac{\pi}{2} \cdot \sin \theta''_{1,2} = R \cdot \operatorname{Se}_{1,2} \frac{\pi}{2} = y_{B,D} \end{cases} \quad (4.89)$$

Comparația dintre elementele cercului lui Mohr și elementele funcțiilor circulare excentrice de variabilă centrică sunt indicate în Fig. 4.28 a, b și c.

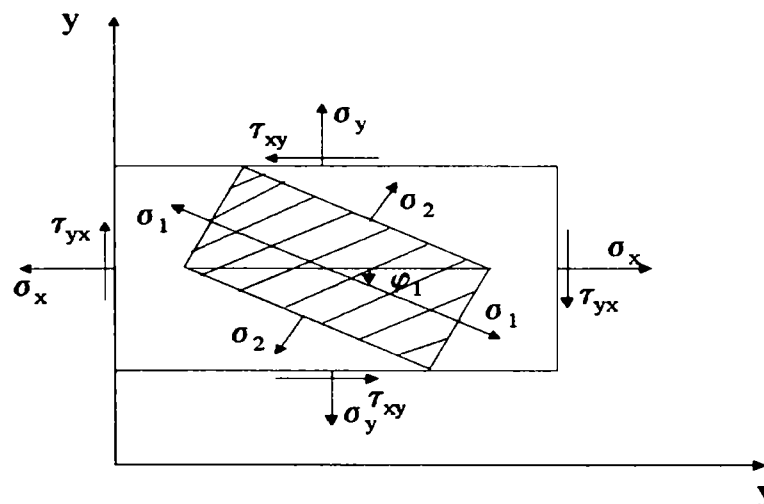


Fig. 4.28 a

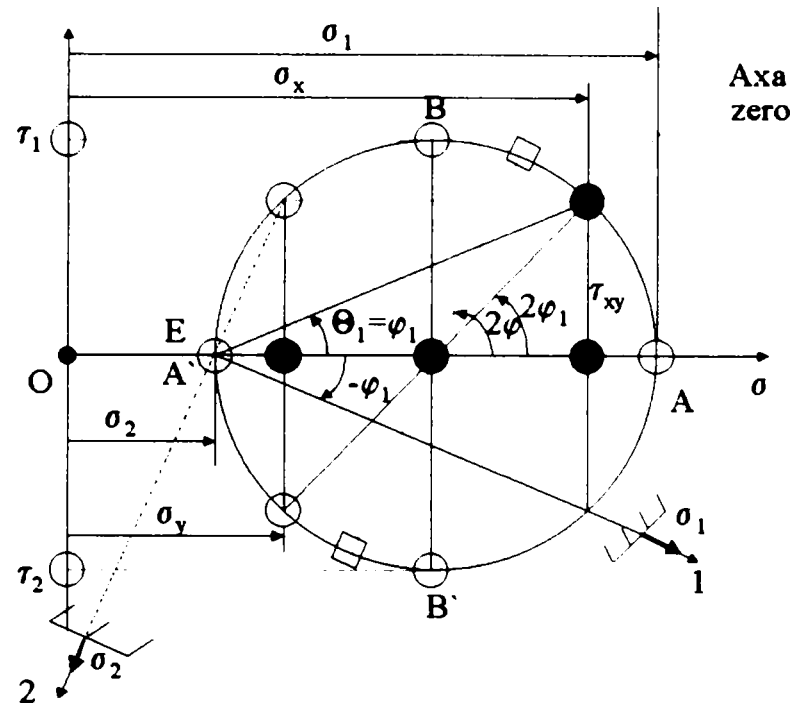


Fig. 4.28 b

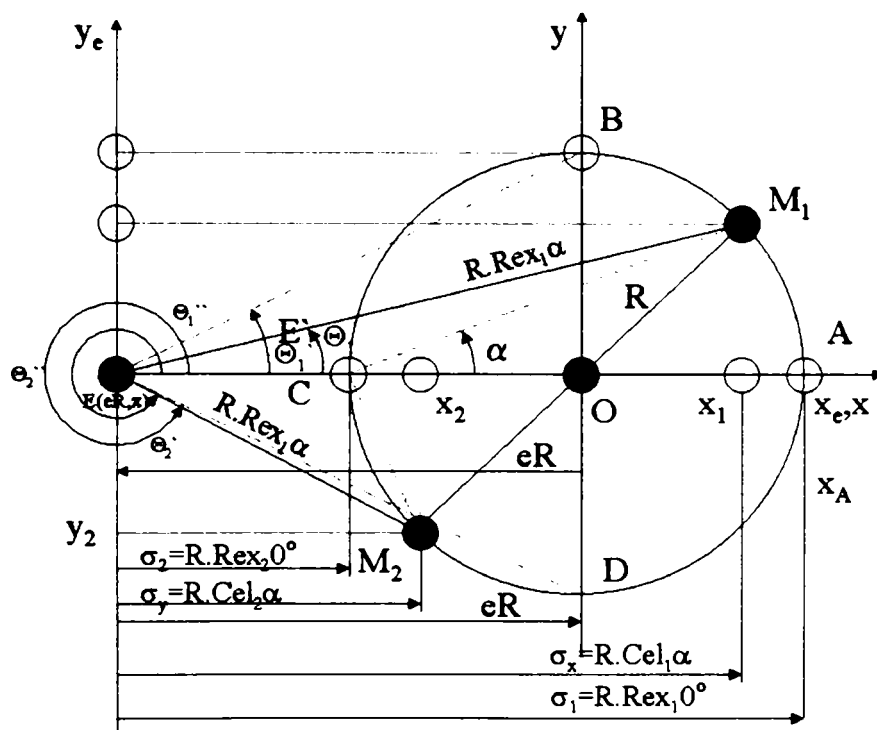


Fig. 4.28 c

Concluzii:

$$R = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \quad (4.90)$$

$$eR = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \rightarrow e = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4.91)$$

În cazul prezentat, alegând un excentric $E(C, \varepsilon)$ în punctul $A(-R, 0)$ în care excentricitatea numerică $e = -1$ și $\varepsilon = 0$ sau $e = 1$ și $\varepsilon = \pi$ - ceea ce este același lucru - s-au reprezentat tensiunile cu ajutorul funcțiilor supermatematice circulare excentrice de variabilă $\theta_1 = \varphi_1$, centrică $R \cos \alpha$, $C \cos \alpha$, $S \cos \alpha$.

Ele pot fi exprimate și în funcție de variabila excentrică θ , astfel:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = R(\cos \theta_1 + |e|) = x_1 \\ \tau_{xy} = R \sin \theta_1 = y_1 \\ \sigma_y = R \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) \right] = x_2 \\ \sigma_1 = R(|e| + \cos \theta_1) = x_A \\ \sigma_2 = R(|e| + \cos \theta_2) = x_C \\ \tau_{1,2} = R \sin(\pm \theta_{1,2}, E) = y_{B,D} = R \sin \left(\frac{\pi}{4}, E' \right) \end{array} \right. \quad (4.92)$$

Funcțiile supermatematice circulare excentrice de variabile centrice și excentrice sunt prezentate în Anexa 1 și Anexa 2. Prin aceste funcții, metodele grafice se transformă în metode analitice.

Dependențele dintre variabilele centrice și cele excentrice sunt date de relația invariantă:

$$\alpha_{1,2} = \theta \mp \arcsin[e \cdot \sin(\theta - \varepsilon)] \quad (4.93)$$

sau

$$\theta = \alpha \mp \arcsin \frac{e \cdot \sin(\alpha - \varepsilon)}{\sqrt{1 + e^2 - 2e \cos(\alpha - \varepsilon)}} \quad (4.94)$$

În cazul stării liniare de tensiune, $\sigma_2 = 0$ astfel că, raza cercului trece prin E și $R = \frac{\sigma_1}{2} = eR$, ($e = 1$ și $\varepsilon = 0$) sau ($e = -1$, $\varepsilon = 0$).

În cazul stării spațiale (3D) de tensiune, cele 3 tensiuni principale normale σ_1 , σ_2 și σ_3 determină pe axa $O\sigma$ 3 puncte (C_1 , C_2 și C_3) prin care trec câte trei cercuri. Distanțele dintre 2 puncte determină diametrele cercurilor, așa cum se observă din Fig. 4.29

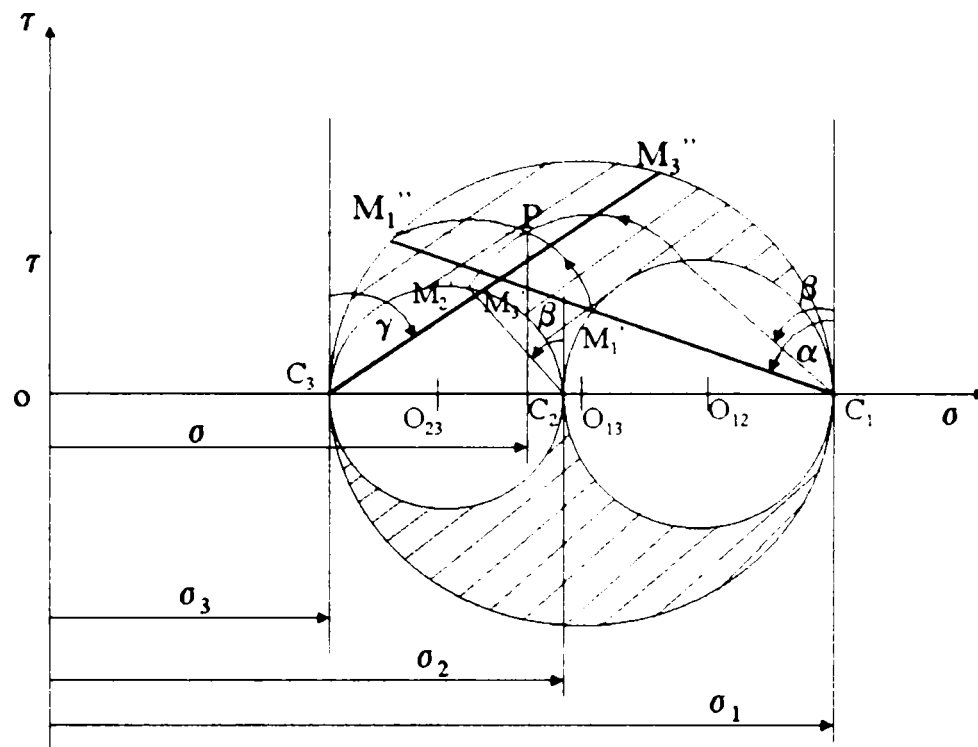


Fig. 4.29

Orice punct situat în zona hașurată, inclusiv de pe graniță, reprezintă o stare de tensiune posibilă. Astfel, coordonatele punctului $P(\sigma, \tau)$ sunt tensiunile normale σ și, respectiv, tangențiale τ într-un punct P dintr-o secțiune înclinată de versor \bar{n} ($\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$).

Unghiurile α , β , γ rezultă din figură. Prin punctele C_i se duc unghiurile α , β , γ și coardele C_1M_1' , C_2M_2' și C_3M_3' . Cu centrul în O_i se duc arcele C_iM_i' care se intersectează toate în punctul $P(\sigma, \tau)$.

Cercul lui Mohr pentru deformații, în cazul solicitării plane și, respectiv, cercurile lui Mohr din cazul solicitării 3D se construiesc asemănător. În Fig. 4.30 a,b se prezintă legătura dintre tensiunea σ și deformația specifică ϵ în cazul solicitării după două direcții. Curbele reprezintă două ovale ale lui Cassini și fac parte din familia lemniscatelor lui Booth. Ecuația în coordonate polare $\rho = R(\text{rex}_1\theta + \text{rex}_2\theta)$

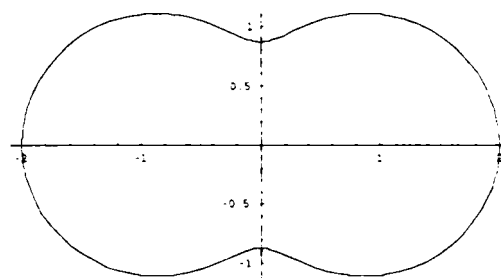


Fig. 4.30 a Ovalele lui Cassini. Raza cercului $R = 1$, Excentricitatea numerică $e = 0,9$

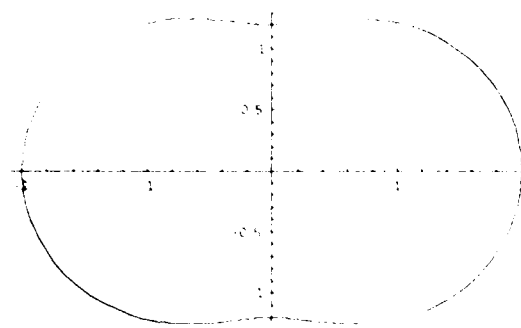


Fig. 4.30 b Ovalele lui Cassini. Raza cercului $R = 1$, Excentricitatea numerică $e = 0,8$

Acestea se pot reprezenta prin funcția radial excentric $rex_{1,2}(\theta)$. Pentru excentricitate cuprinsă în intervalul închis $[0, 1]$, lemniscatele lui Booth sunt prezentate în Fig. 4.31

Comparând, rezultă că atât tensiunile cât și deformațiile sunt reprezentate de funcții supermatematice circular excentrice, dar de excentricități ușor diferite.

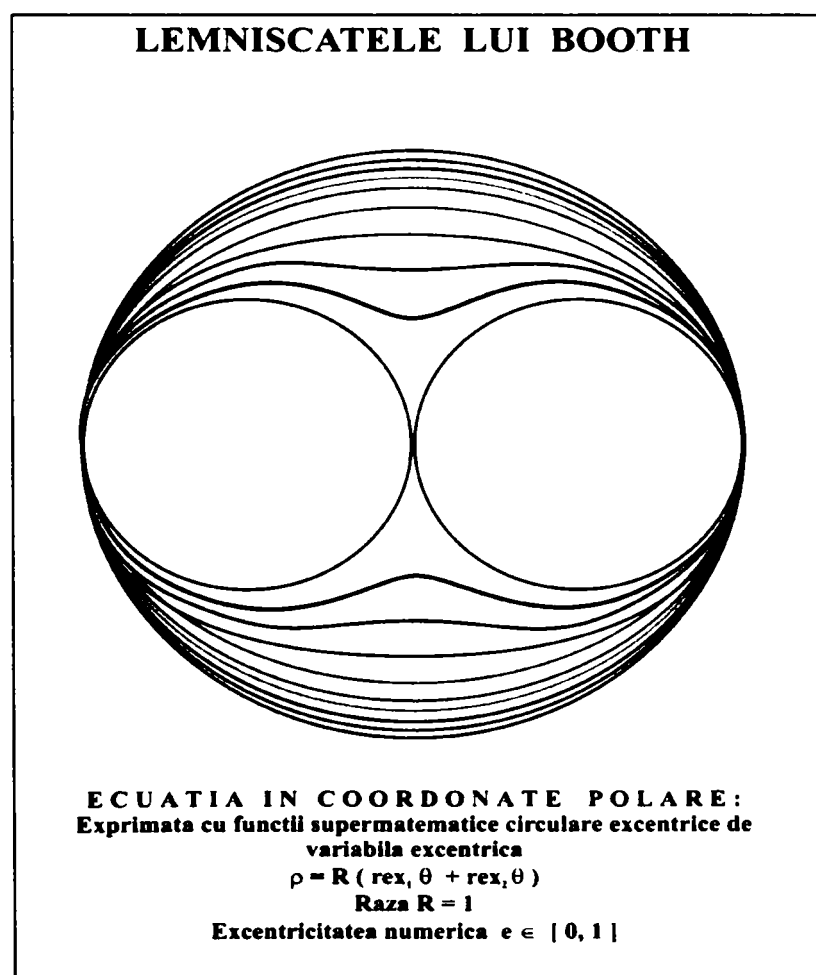


Fig. 4.31 Lemniscatele lui Booth

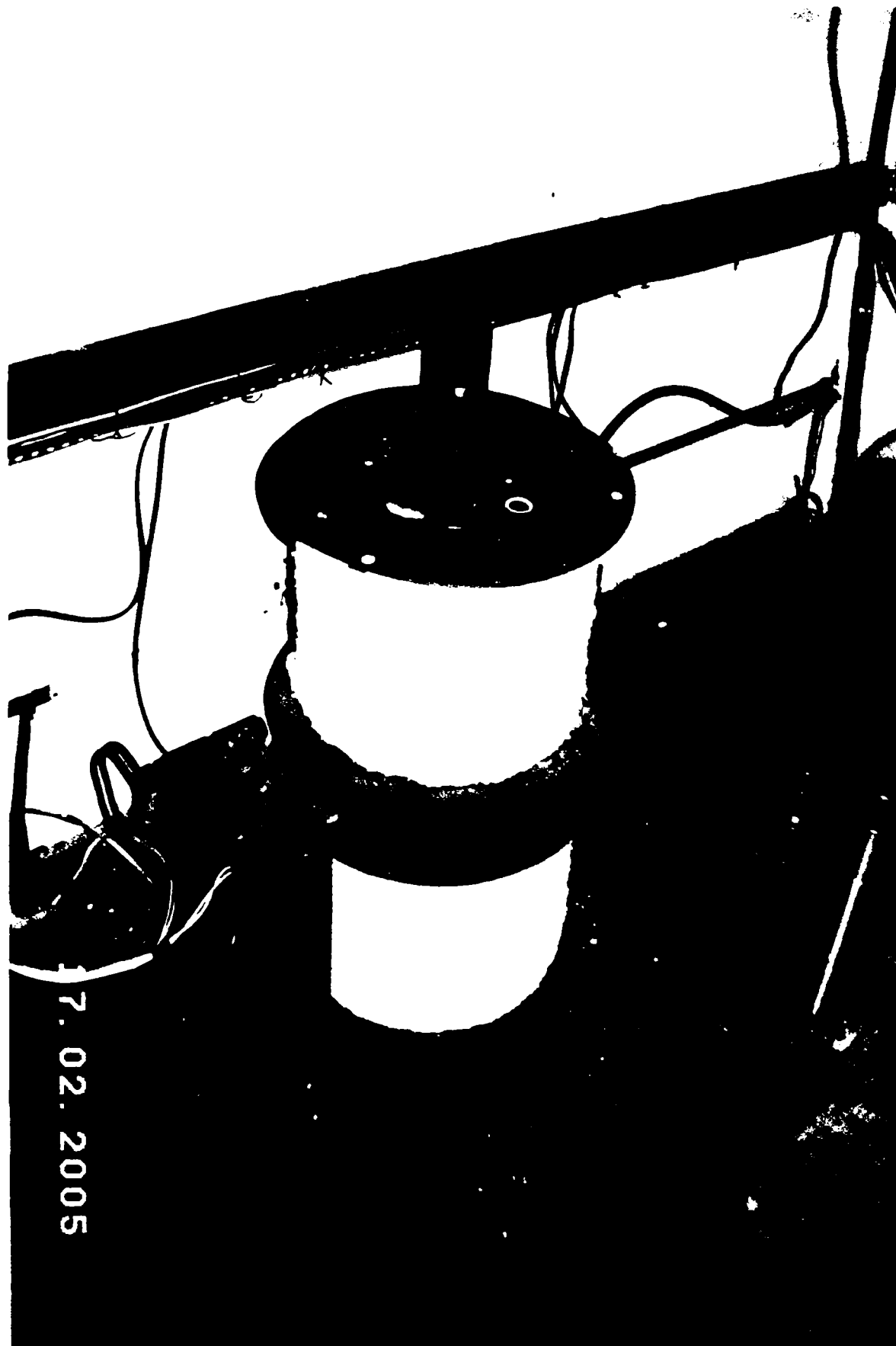


Fig. 4.32 Autoclava de laborator proiectată

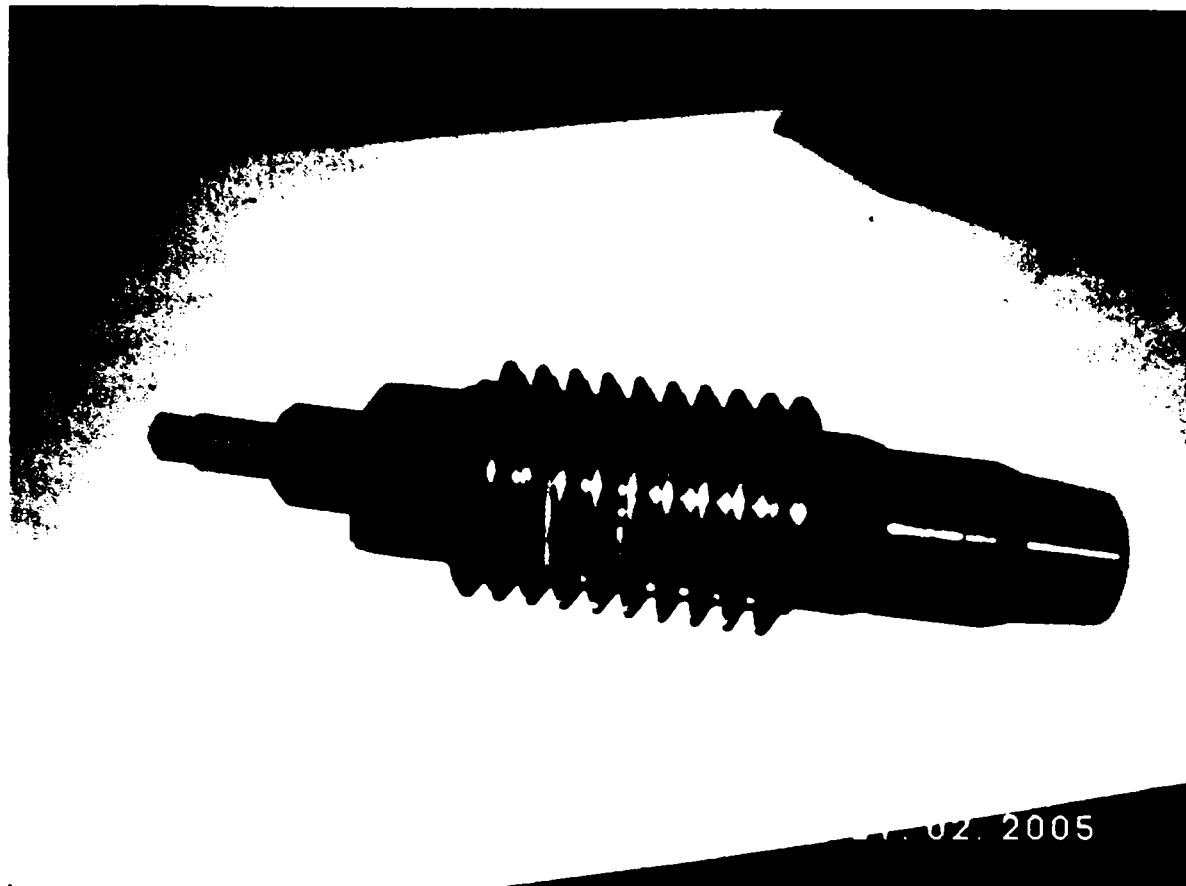


Fig. 4.33 Sistem de etanșare



Fig. 4.34 Monocristal de α - cuarț crescut în autoclava de laborator proiectată

4.6 Concluzii

- ✓ Procesele de creștere a cristalelor, în vederea obținerii monocristalelor cât mai pure sau dopate, au aplicații în fizica corpului solid, în metalurgie, în industria optică (laseri, prisme, lentile, etc.) și în mecanica fină (rubine și safire pentru lagăre).
- ✓ Metoda hidrotermală de obținere a cristalelor din materiale insolubile în condiții normale, constă în principiu, în utilizarea unor solvenți specifici pentru fiecare material și folosirea unor temperaturi și presiuni ridicate pentru ca materialul nutritiv să se solubilizeze.
- ✓ Procesul de creștere hidrotermală trebuie să aibă loc în faza lichidă, în acest scop trebuind depășită temperatura critică a solventului. Acest lucru se realizează prin umplerea incintei de creștere peste punctul critic (>32% în cazul apei). Cu cât procentul de umplere este mai mare, cu atât va fi mai scăzută temperatura la care meniscul lichid – gaz va dispărea mai repede deoarece presiunea solventului la temperaturi >100 °C, crește foarte rapid.
- ✓ Cristalizarea hidrotermală necesită o solubilitate de câteva procente și un coeficient de variație al solubilității cu temperatura de 0,001 – 0,001% pe grad pentru realizarea unei suprasaturări convenabile.
- ✓ Avantajele metodei hidrotermale sunt:
 - Se pot obține cristale de calitate foarte bună și de dimensiuni mari.
 - Se pot obține cristale care nu pot fi obținute din topitură (este și cazul cuarțului care suferă o tranziție de fază la 583 °C).
- ✓ Dezavantajele metodei hidrotermale sunt:
 - Sunt necesare condiții tehnice severe pentru instalația de creștere (etanșeitate, rezistență mecanică, la coroziune, la presiuni și temperaturi ridicate etc.).
 - Durata obținerii unor cristale de dimensiuni mari este foarte lungă (zile, săptămâni, luni).
- ✓ Creșterea unui monocristal pe un germene poate avea loc în două moduri:
 - Recristalizarea substanței solide incluzând și solubilitatea acesteia în faza lichidă, transferul de masă prin convecție a părții dizolvate a substanței.
 - Dizolvarea componentilor nutrientului cu ajutorul transportului de masă prin convecție în cadrul zonei de creștere și interacția cu componentii dizolvați de pe suprafața germenului.
- ✓ Cele mai multe eșecuri în încercarea creșterii din soluție a cristalelor, se datoresc faptului că există o lipsă de date legate de tipul de solvent și interacțiunea solut – solvent.
- ✓ S-a constatat experimental că procesele fizice la interfața solid – lichid în zona de creștere după direcția axei optice Z, se face cu includerea unei cantități minime de impurități în rețea, această direcție fiind preferată în procesele de obținere pe cale hidrotermală la temperaturi și presiuni ridicate a monocristalelor de α – cuarț.

- ✓ Mineralizatorul, prin natura și concentrația sa, constituie un factor important în prezența căruia are loc solubilizarea materialului nutritiv și care influențează viteza de creștere. Alegerea mineralizatorului și concentrația sa se face funcție de condițiile de presiune și temperatură din autoclavă. În cazul utilizării NaOH ca mineralizator, pentru a obține viteze mari de creștere a monocristalului fără a înrăutăți calitatea acestuia, concentrația ionilor de sodiu în soluția apoasă este cuprinsă 0,2 și 1N la o temperatură de 350 °C – 400 °C și o presiune < 2000 atm. Temperaturi mai mari în zona de solubilizare conduc la viteze de creștere mai mari.
- ✓ Umplerea inițială a autoclavei este un parametru important în ce privește creșterea cristalelor deoarece la aceeași temperatură aceasta determină presiuni diferite în autoclavă (presiunea influențează viteza de creștere și calitatea cristalului). Procentul de umplere al autoclavei trebuie corelat foarte riguros cu temperatura deoarece variații foarte mici ale umplerii inițiale și cu câteva grade a temperaturii conduce la variații importante ale presiunii.
- ✓ Cristalizarea pe germene a materialului nutritiv dizolvat în soluția mineralizatoare este în dependență directă de solubilizarea materiei prime în zona inferioară a autoclavei. Raportul teoretic între suprafața care se solubilizează și cea care se cristalizează trebuie să fie cel puțin 6.
- ✓ Diferența de temperatură între cele două zone ale autoclavei influențează puternic cristalizarea. O diferență mare de temperatură poate provoca curenți ascensionali puternici, curgerea devine turbulentă în zona de cristalizare și pot apare cristalizări spontane, dezordonate sau haotice. O diferență mică de temperatură conduce la condensări lente care deși duc la cristale calitative nu sunt productive.
- ✓ Separarea celor două zone din autoclavă cu ajutorul unei șicane cu o geometrie și procent de deschidere adecvate, conduce la o curgere laminară a soluției suprasaturate a materialului nutritiv și deci obținerea unei cristalizări cu o viteză optimă.
- ✓ Viteza de cristalizare este puternic dependentă de orientarea cristalografică. Pentru creșterea eficienței economice a obținerii unor monocristale, este necesară corelarea direcției preferențiale de creștere cu geometria dispozitivului obținut în urma prelucrării monocristalului (în cazul cuarțului, suprafața ce se dezvoltă cel mai rapid este cea perpendiculară pe axa optică, adică axa Z).
- ✓ Având în vedere fazele și tranzițiile de fază ale alfa-cuarțului, rezultă că acesta este termodinamic stabil numai în intervalul de temperaturi cuprins între temperatura ambiantă și 575⁰C . Proprietățile piezoelectrice ale cuarțului sunt caracteristice doar fazei alfa. Tranzițiile de fază caracteristice cuarțului conduc la distorsionarea ireversibilă a structurii cristaline ceea ce are ca efect diminuarea până la anulare a proprietăților piezoelectrice. Din acest motiv, singura posibilitate de obținere a fazei alfa a cuarțului este metoda hidrotermală, la presiuni de peste 1500 bar și temperaturi cuprinse între 300⁰C și 450⁰C.

CAPITOLUL V

REZULTATE EXPERIMENTALE

5.1 Introducere

O autoclavă este un recipient metalic închis ermetic, capabil să suporte cicluri de încălzire – răcire în plaja 25 – 500⁰C cu viteze variabile de încălzire și răcire. De asemenea se impune să fie inertă din punct de vedere chimic, mijloacele de izolare fiind diverse și accesibile. Autoclava este realizată dintr-un oțel de tip 12NiCr180, cu proprietăți termo-mecanice adecvate și rezistentă la acțiunea soluțiilor bazice.

Încălzirea autoclavei se realizează din exterior cu ajutorul unor rezistențe electrice de valori egale, dispuse pe generatoarea ei în zonele inferioară și superioară. O izolație termică împiedică schimbul termic între autoclavă și mediul exterior și, în același timp, prin configurația geometrică, reglează regimul termic în interiorul autoclavei. Presiunea în autoclavă se creează prin creșterea volumului de lichid cu creșterea temperaturii la volum constant.

În procesele hidrotermale, se impune de obicei stabilirea unei diferențe de temperatură între zona inferioară și cea superioară pentru a se crea un aflux de material precursor între cele două zone.

În cadrul experimentelor realizate pentru testarea autoclavei s-a urmărit atât testarea din punct de vedere termo-mecanic cât și stabilirea valorilor temperaturii și presiunii funcție de procentul de umplere cu lichid a autoclavei. Toate testele s-au realizat în prezența apei.

În tabelele de mai jos sunt date valorile presiunii și temperaturii pentru procente de umplere de 75%, 80%, 85%. S-a lucrat cu două valori ale vitezei de încălzire și răcire, respectiv 10⁰C și 15⁰C. Un singur experiment test s-a realizat cu răcire bruscă, prin introducerea autoclavei după atingerea temperaturii de 300⁰ C într-un recipient cu apă.

Testul de etanșeitate și rezistență mecanică a fost realizat în următoarele condiții:

- ✓ temperatura = 280 °C,
- ✓ procentul de umplere = 90%,
- ✓ presiunea = 2000 bari.

5.2 Testul de etanșeitate și rezistență mecanică

S-a realizat o încălzire “dură”, cu o viteză de 25⁰C / h până la 280⁰C, timp de 11 ore, presiunea atingând valoarea de 2010 bari. În cadrul primelor trei experimente au fost aduse îmbunătățiri sistemelor de etanșare, încălzire și izolație termică astfel încât pierderile să se reducă la minim și să crească siguranța în exploatare.

5.3 Teste (finale) pentru stabilirea regimurilor termice în autoclavă

Măsurarea temperaturii s-a făcut cu ajutorul termocuplelor Fe-Ct în două puncte care prezintă cea mai mare relevanță pentru configurația regimului termic, respectiv în punctele mediene ale zonelor inferioară și superioară ale autoclavei.

Presiunea s-a măsurat cu un manometru pentru 3000 bari.

Alimentarea cu energie electrică s-a făcut de la un sistem stabilizat de tensiune continuă, sub o tensiune electrică de 52V.

În funcție de procesul tehnologic proiectat, diferența de temperatură dintre cele două zone poate fi nulă sau poate atinge valori cuprinse între 25°C și 80°C. În timpul testelor, diferența de temperatură a fost creată începând de la valoarea de 170°C a temperaturilor în cele două zone prin asigurarea unei valori crescătoare a curentului I_1 (corespunzător rezistenței din zona inferioară) față de I_2 (corespunzător rezistenței din zona superioară).

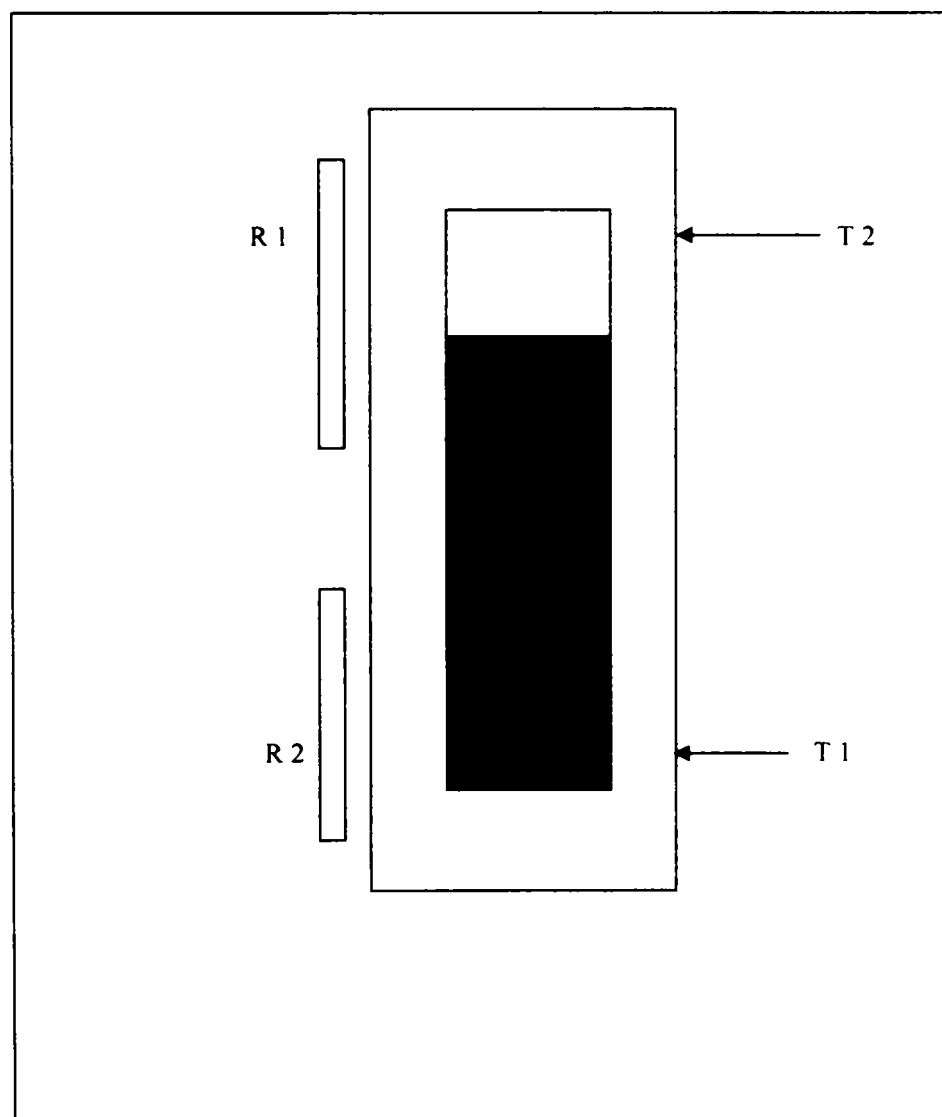


Fig. 5.1 Schema de măsurare a temperaturilor în autoclavă

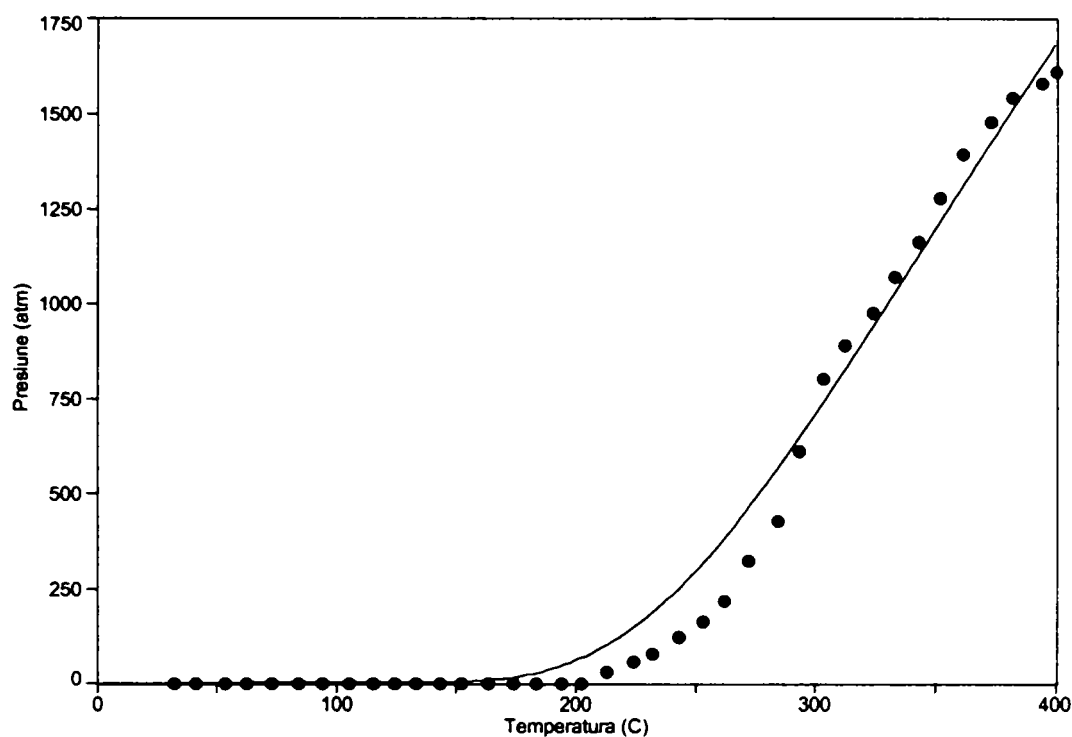
Testul nr.1:

| Nr. Crt | Timp (min) | Tensiune (V) | Curent (A) | | Presiune (bar) | Temperatură (°C) | | $\Delta T = T_2 - T_1$ (°C) | Obs |
|---|------------|--------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|-----------------------------|-----|
| | | | I ₁ | I ₂ | | T ₁ | T ₂ | | |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Viteza de încălzire = 10°C / oră, procent de umplere 75% | | | | | | | | | |
| 1 | 60 | 52 | 2,0 | 2,0 | 0 | 32 | 32 | 0 | |
| 2 | 120 | | 2,1 | 2,1 | 0 | 41 | 42 | 0 | |
| 3 | 180 | | 2,5 | 2,5 | 0 | 53 | 53 | 0 | |
| 4 | 240 | | 3,1 | 3,1 | 0 | 62 | 63 | 0 | |
| 5 | 300 | | 3,4 | 3,4 | 0 | 73 | 72 | 0 | |
| 6 | 360 | | 3,7 | 3,7 | 0 | 84 | 83 | 0 | |
| 7 | 420 | | 3,9 | 3,9 | 0 | 94 | 95 | 0 | |
| 8 | 480 | | 4,2 | 4,2 | 0 | 105 | 106 | 0 | |
| 9 | 540 | | 4,2 | 4,2 | 0 | 115 | 115 | 0 | |
| 10 | 600 | | 4,3 | 4,3 | 0 | 124 | 125 | 0 | |
| 11 | 660 | | 4,3 | 4,3 | 0 | 133 | 134 | 0 | |
| 12 | 720 | | 5,0 | 5,0 | 0 | 143 | 142 | 0 | |
| 13 | 780 | | 5,7 | 5,7 | 0 | 152 | 153 | 0 | |
| 14 | 840 | | 6,1 | 6,1 | 0 | 163 | 163 | 0 | |
| 15 | 900 | | 6,5 | 6,4 | 0 | 174 | 172 | 2 | |
| 16 | 960 | | 6,7 | 6,5 | 0 | 183 | 179 | 4 | |
| 17 | 1020 | | 6,9 | 6,9 | 0 | 194 | 189 | 5 | |
| 18 | 1080 | | 7,3 | 6,9 | 0 | 202 | 196 | 6 | |
| 19 | 1140 | | 7,8 | 7,3 | 28 | 213 | 206 | 7 | |
| 20 | 1200 | | 8,4 | 7,7 | 56 | 224 | 215 | 9 | |
| 21 | 1260 | | 9,0 | 8,0 | 75 | 232 | 221 | 11 | |
| 22 | 1320 | | 9,2 | 8,3 | 120 | 243 | 230 | 13 | |
| 23 | 1380 | | 10,1 | 8,7 | 160 | 253 | 237 | 16 | |
| 24 | 1440 | | 10,8 | 9,2 | 215 | 262 | 243 | 19 | |
| 25 | 1500 | | 11,4 | 9,3 | 320 | 272 | 249 | 23 | |
| 26 | 1560 | | 12,1 | 9,6 | 425 | 284 | 256 | 28 | |
| 27 | 1620 | | 13,0 | 9,8 | 610 | 293 | 259 | 34 | |
| 28 | 1680 | | 13,6 | 9,9 | 800 | 303 | 262 | 39 | |
| 29 | 1740 | | 14,1 | 10,2 | 890 | 312 | 268 | 44 | |
| 30 | 1800 | | 14,3 | 10,5 | 975 | 324 | 274 | 50 | |
| 31 | 1860 | | 14,4 | 11,1 | 1070 | 333 | 277 | 56 | |
| 32 | 1920 | | 14,5 | 11,6 | 1160 | 343 | 282 | 61 | |
| 33 | 1980 | | 14,5 | 11,8 | 1275 | 352 | 287 | 65 | |
| 34 | 2040 | | 14,7 | 12,1 | 1390 | 361 | 293 | 68 | |
| 35 | 2100 | | 14,8 | 12,5 | 1475 | 373 | 303 | 70 | |
| 36 | 2160 | | 14,9 | 12,8 | 1540 | 382 | 310 | 72 | |
| 37 | 2220 | | 14,9 | 12,8 | 1580 | 394 | 321 | 73 | |
| 38 | 2280 | | 14,9 | 12,8 | 1610 | 400 | 326 | 74 | |
| 39 | 2340 | | 14,9 | 12,8 | 1610 | 400 | 325 | 75 | |
| 40 | 2400 | | 14,9 | 12,8 | 1610 | 400 | 325 | 75 | |

Variatia presiunii cu temperatura (1)

Rank 1 Eqn 41 $\ln y = a + b/x$

$r^2=0.987848565$ DF Adj=0.988978811 FitStdErr=69.7900922 Fstat=3038.0874



| Rank 1 | Eqn 41 | $\ln y = a + b/x^2$ | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|-----------|--------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| Precision | | | | | |
| 18 | | | 3.885665e-16 | -2.60242e-18 | -7.8551e-18 |
| 17 | | | -1.54048e-15 | -2.16868e-17 | -4.62065e-19 |
| 16 | | | -3.06422e-14 | -4.03375e-16 | 1.254176e-17 |
| 15 | | | 2.663287e-13 | 9.417801e-15 | 5.886773e-15 |
| 14 | | | -3.65992e-12 | -8.82081e-14 | -3.91128e-14 |
| 13 | | | -3.15992e-12 | 4.117921e-13 | 4.608874e-13 |
| 12 | | | -1.96472e-10 | -1.46952e-12 | 1.210888e-12 |
| 11 | | | -2.1096e-09 | -2.82612e-13 | 2.871089e-11 |
| 10 | | | 4.641853e-08 | 6.700448e-10 | 4.121089e-11 |
| 9 | | | -2.5055e-07 | -9.15192e-09 | -5.83379e-09 |
| 8 | | | 4.662273e-06 | 1.178808e-07 | 5.541621e-08 |
| 7 | | | 2.41938e-05 | 5.060119e-07 | 1.804162e-07 |
| 6 | | | 0.0003152119 | 4.327985e-06 | 5.541621e-08 |
| 5 | | | -0.000671175 | -2.50783e-05 | -1.61945e-05 |
| 4 | | | 0.0187331543 | 6.305437e-05 | -0.000191176 |
| 3 | | | -0.157812538 | 0.0011824414 | 0.0035651455 |
| 2 | | | -0.698297893 | -0.065949529 | -0.051327077 |
| Removing | | | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
| a | | | -0.999805545 | -0.999805545 | -0.999805545 |
| b | | | 6.919648e+75 | 31.145284490 | 2.0575709076 |

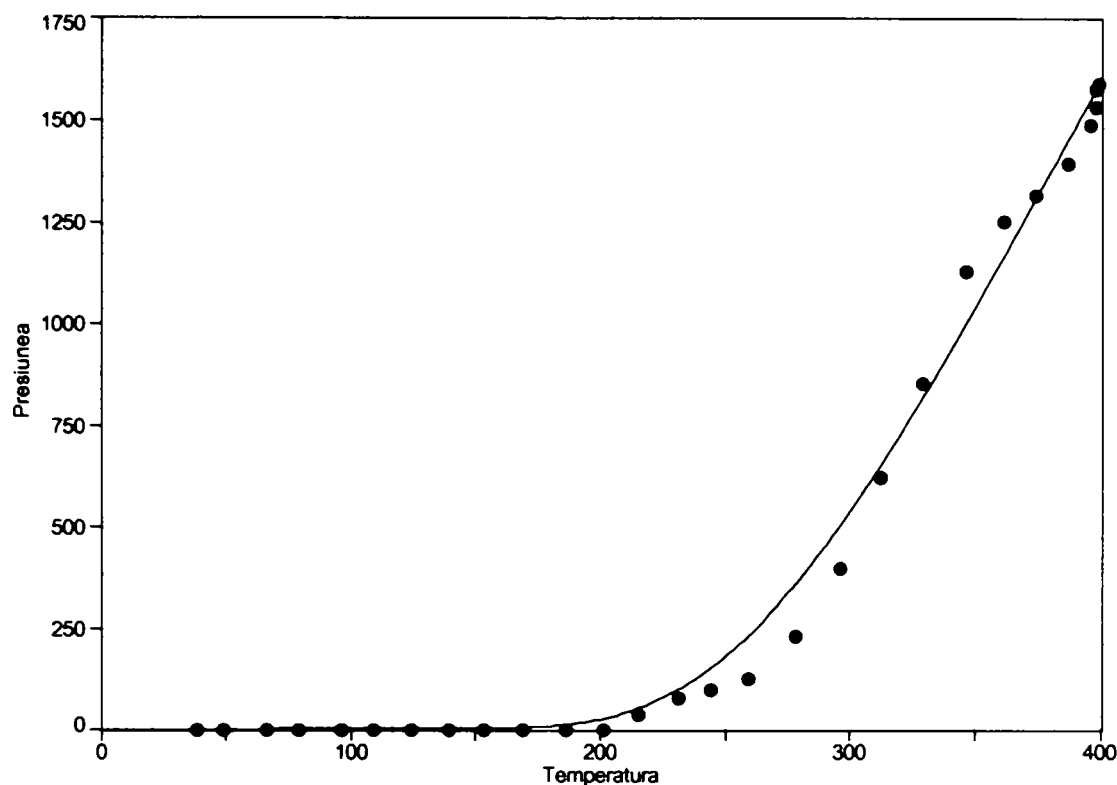
Testul nr.2:

| Viteza de încălzire = 15°C / oră, procent de umplere 75% | | | | | | | | | |
|--|------|----|------|------|------|-----|-----|----|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 60 | 52 | 2,5 | 2,5 | 0 | 38 | 39 | 0 | |
| 2 | 120 | | 2,7 | 2,8 | 0 | 49 | 47 | 0 | |
| 3 | 180 | | 3,6 | 3,5 | 0 | 66 | 67 | 0 | |
| 4 | 240 | | 4,3 | 4,4 | 0 | 79 | 78 | 0 | |
| 5 | 300 | | 5,1 | 5,2 | 0 | 96 | 97 | 0 | |
| 6 | 360 | | 6,2 | 6,1 | 0 | 109 | 111 | 0 | |
| 7 | 420 | | 7,1 | 7,0 | 0 | 124 | 126 | 0 | |
| 8 | 480 | | 8,0 | 7,9 | 0 | 139 | 142 | 0 | |
| 9 | 540 | | 8,9 | 8,8 | 0 | 153 | 156 | 0 | |
| 10 | 600 | | 9,5 | 9,2 | 0 | 169 | 163 | 0 | |
| 11 | 660 | | 10,0 | 9,6 | 0 | 186 | 181 | 5 | |
| 12 | 720 | | 10,6 | 10,1 | 0 | 201 | 189 | 12 | |
| 13 | 780 | | 10,9 | 10,6 | 35 | 215 | 196 | 19 | |
| 14 | 840 | | 11,6 | 10,9 | 75 | 231 | 207 | 24 | |
| 15 | 900 | | 12,2 | 11,2 | 96 | 244 | 215 | 29 | |
| 16 | 960 | | 12,8 | 11,2 | 124 | 259 | 225 | 34 | |
| 17 | 1020 | | 13,2 | 11,3 | 230 | 278 | 239 | 39 | |
| 18 | 1080 | | 13,5 | 11,3 | 395 | 296 | 251 | 45 | |
| 19 | 1140 | | 13,9 | 11,4 | 620 | 312 | 263 | 49 | |
| 20 | 1200 | | 14,3 | 11,4 | 850 | 329 | 275 | 54 | |
| 21 | 1260 | | 14,6 | 11,6 | 1125 | 346 | 287 | 59 | |
| 22 | 1320 | | 14,7 | 11,7 | 1250 | 361 | 299 | 62 | |
| 23 | 1380 | | 14,9 | 11,9 | 1315 | 374 | 310 | 64 | |
| 24 | 1440 | | 14,9 | 12,1 | 1390 | 387 | 322 | 65 | |
| 25 | 1500 | | 15,0 | 12,2 | 1485 | 396 | 329 | 67 | |
| 26 | 1560 | | 15,1 | 12,1 | 1530 | 398 | 329 | 69 | |
| 27 | 1620 | | 15,1 | 12,0 | 1575 | 398 | 328 | 70 | |
| 28 | 1680 | | 15,1 | 12,0 | 1590 | 399 | 328 | 71 | |

Variatia presiunii cu temperatura (2)

Rank 1 Eqn 41 $\ln y = a + b/x$

$r^2=0.992655762$ DF Adj=0.992068222 FitStdErr=54.9844577 Fstat=3514.19005



Rank 1 Eqn 41 $\ln y = a + b/x^2$

| Precision | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 18 | 2.91354e-16 | -7.63801e-19 | -5.6755e-18 |
| 17 | 9.991378e-16 | 2.732058e-17 | 1.086053e-17 |
| 16 | 1.504351e-14 | 5.841904e-16 | 3.370267e-16 |
| 15 | -2.63956e-13 | -8.54558e-15 | -4.17556e-15 |
| 14 | 3.18863e-12 | 7.057769e-14 | 1.723012e-14 |
| 13 | 1.051385e-11 | 6.488273e-13 | 4.800443e-13 |
| 12 | 1.51018e-10 | 6.213807e-12 | 3.736318e-12 |
| 11 | -5.41503e-10 | -1.16111e-11 | -2.54505e-12 |
| 10 | -1.44919e-08 | -4.68109e-10 | -2.28172e-10 |
| 9 | -1.55996e-07 | -7.03309e-09 | -4.48445e-09 |
| 8 | 1.931568e-06 | 5.64416e-08 | 2.435966e-08 |
| 7 | 1.588211e-05 | 5.129397e-07 | 2.49987e-07 |
| 6 | -0.000258093 | -3.61701e-06 | 7.374402e-07 |
| 5 | -0.000248096 | 6.383001e-06 | 1.07375e-05 |
| 4 | 0.0208417141 | 0.0006413355 | 0.0002992232 |
| 3 | -0.048413398 | -0.002139069 | -0.001328076 |
| 2 | 29.968770624 | 0.1129154738 | 0.0513529721 |

| Removing | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| a | -0.999846358 | -0.999846358 | -0.999846358 |
| b | 4.460387e+67 | 54.110890451 | 3.1077097722 |

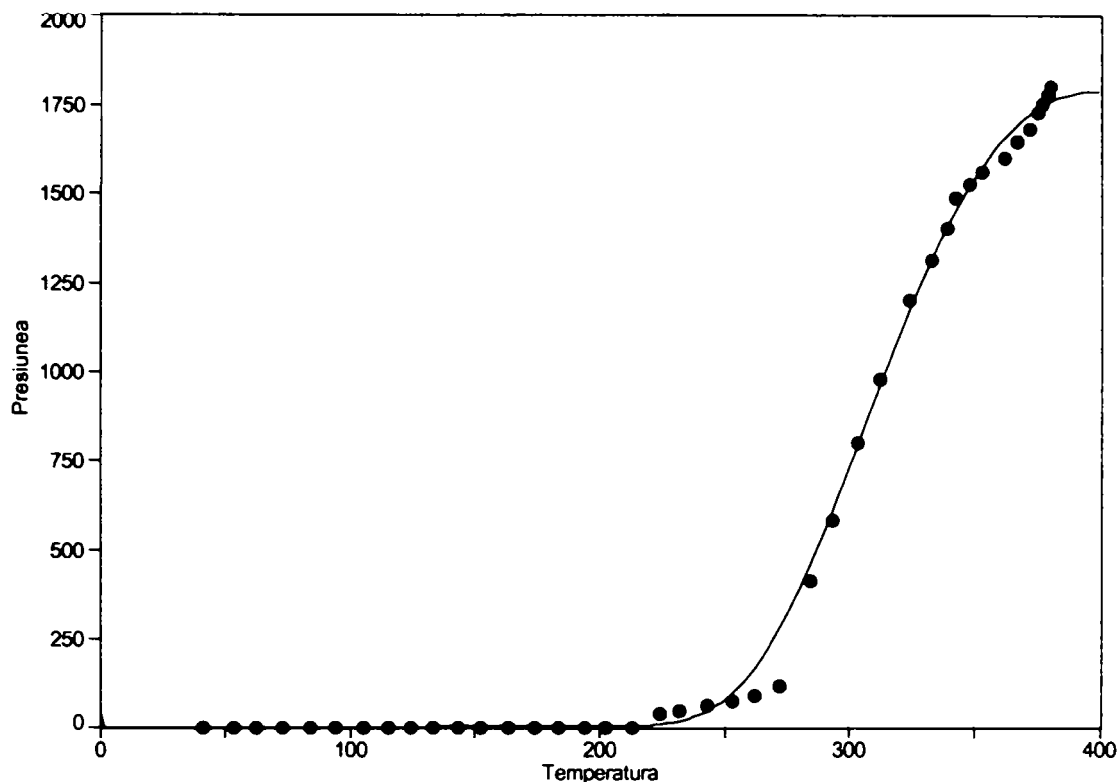
Testul nr. 3

| Viteza de încălzire = 10°C / oră, procent de umplere 80% | | | | | | | | | |
|--|------|----|------|------|------|-----|-----|----|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 60 | 52 | 2,2 | 2,2 | 0 | 41 | 42 | 0 | |
| 2 | 120 | | 2,5 | 2,5 | 0 | 53 | 53 | 0 | |
| 3 | 180 | | 3,1 | 3,2 | 0 | 62 | 63 | 0 | |
| 4 | 240 | | 3,3 | 3,4 | 0 | 73 | 72 | 0 | |
| 5 | 300 | | 3,8 | 3,7 | 0 | 84 | 83 | 0 | |
| 6 | 360 | | 4,0 | 3,9 | 0 | 94 | 95 | 0 | |
| 7 | 420 | | 4,2 | 4,1 | 0 | 105 | 106 | 0 | |
| 8 | 480 | | 4,2 | 4,2 | 0 | 115 | 115 | 0 | |
| 9 | 540 | | 4,3 | 4,4 | 0 | 124 | 125 | 0 | |
| 10 | 600 | | 4,4 | 4,4 | 0 | 133 | 134 | 0 | |
| 11 | 660 | | 4,9 | 5,0 | 0 | 143 | 142 | 0 | |
| 12 | 720 | | 5,6 | 5,4 | 0 | 152 | 153 | 0 | |
| 13 | 780 | | 6,0 | 5,8 | 0 | 163 | 163 | 0 | |
| 14 | 840 | | 6,3 | 6,2 | 0 | 174 | 172 | 2 | |
| 15 | 900 | | 6,5 | 6,3 | 0 | 183 | 179 | 4 | |
| 16 | 960 | | 6,7 | 6,6 | 0 | 194 | 189 | 5 | |
| 17 | 1020 | | 7,1 | 6,8 | 0 | 202 | 196 | 6 | |
| 18 | 1080 | | 7,3 | 7,3 | 0 | 213 | 206 | 7 | |
| 19 | 1140 | | 7,7 | 7,7 | 35 | 224 | 215 | 9 | |
| 20 | 1200 | | 8,2 | 8,0 | 46 | 232 | 221 | 11 | |
| 21 | 1260 | | 8,7 | 8,3 | 60 | 243 | 230 | 13 | |
| 22 | 1320 | | 9,1 | 8,7 | 72 | 253 | 237 | 16 | |
| 23 | 1380 | | 9,8 | 9,2 | 89 | 262 | 243 | 19 | |
| 24 | 1440 | | 10,4 | 9,3 | 115 | 272 | 249 | 23 | |
| 25 | 1500 | | 10,9 | 9,6 | 410 | 284 | 256 | 28 | |
| 26 | 1560 | | 11,3 | 9,8 | 580 | 293 | 259 | 34 | |
| 27 | 1620 | | 11,9 | 9,9 | 800 | 303 | 262 | 39 | |
| 28 | 1680 | | 12,4 | 10,2 | 975 | 312 | 268 | 44 | |
| 29 | 1740 | | 12,9 | 10,5 | 1200 | 324 | 274 | 50 | |
| 30 | 1800 | | 13,2 | 11,1 | 1310 | 333 | 277 | 56 | |
| 31 | 1860 | | 13,5 | 11,3 | 1400 | 339 | 282 | 57 | |
| 32 | 1920 | | 13,7 | 11,5 | 1485 | 342 | 283 | 59 | |
| 33 | 1980 | | 13,9 | 11,6 | 1525 | 348 | 287 | 61 | |
| 34 | 2040 | | 14,1 | 11,8 | 1560 | 353 | 290 | 63 | |
| 35 | 2100 | | 14,2 | 11,9 | 1600 | 362 | 302 | 63 | |
| 36 | 2160 | | 14,3 | 12,0 | 1645 | 367 | 302 | 65 | |
| 37 | 2220 | | 14,3 | 12,0 | 1680 | 372 | 306 | 66 | |
| 38 | 2280 | | 14,5 | 12,1 | 1725 | 375 | 308 | 67 | |
| 39 | 2340 | | 14,5 | 12,1 | 1750 | 377 | 309 | 68 | |
| 40 | 2400 | | 14,7 | 12,2 | 1775 | 379 | 310 | 69 | |
| 41 | 2460 | | 14,8 | 12,2 | 1775 | 379 | 309 | 70 | |
| 42 | 2520 | | 14,8 | 12,2 | 1800 | 380 | 310 | 70 | |

Variatia presiunii cu temperatura (3)

Rank 5 Eqn 1418 $\ln y = a + b \ln x + c/x^2$

$r^2=0.997842383$ DF Adj=0 997672045 FitStdErr=35 282427 Fstat=9018 24836



Rank 5 Eqn 1418 $\ln y = a + b \ln x + c/x^2$

| Precision | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|-----------|----------------|--------------|--------------|
| 18 | 3.330656e-15 | 1.457031e-16 | 6.245811e-17 |
| 17 | 9.170441e-14 | 3.975944e-15 | 1.686179e-15 |
| 16 | -2.73559e-13 | -1.61121e-14 | -7.18869e-15 |
| 15 | -7.02105e-13 | -6.36088e-14 | -3.15511e-14 |
| 14 | 8.597945e-11 | 4.065921e-12 | 1.768287e-12 |
| 13 | -1.35435e-10 | -6.05987e-12 | -2.8454e-12 |
| 12 | 1.269694e-08 | 5.299804e-10 | 2.256148e-10 |
| 11 | 2.483174e-09 | -1.00924e-10 | -6.72502e-11 |
| 10 | -8.21286e-07 | -3.64457e-08 | -1.54295e-08 |
| 9 | -4.0508e-06 | -1.94794e-07 | -8.48529e-08 |
| 8 | -3.38144e-05 | -1.09398e-06 | -4.51113e-07 |
| 7 | 0.0007485852 | 3.170061e-05 | 1.36751e-05 |
| 6 | 0.0102327679 | 0.0004354099 | 0.0001861652 |
| 5 | 0.0603495157 | 0.0027894230 | 0.0012032226 |
| 4 | -0.346543684 | -0.020405635 | -0.008821871 |
| 3 | -0.998684345 | -0.237294617 | -0.110335166 |
| 2 | -1.000000000 | -0.978333028 | -0.797704623 |
| Removing | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
| a | -0.971979212 | -0.971979212 | -0.971979212 |
| b | -1.000000000 | -1.000000000 | -1.000000000 |
| c | 5.938691e+1745 | 3.998433e+51 | 2.103925e+20 |

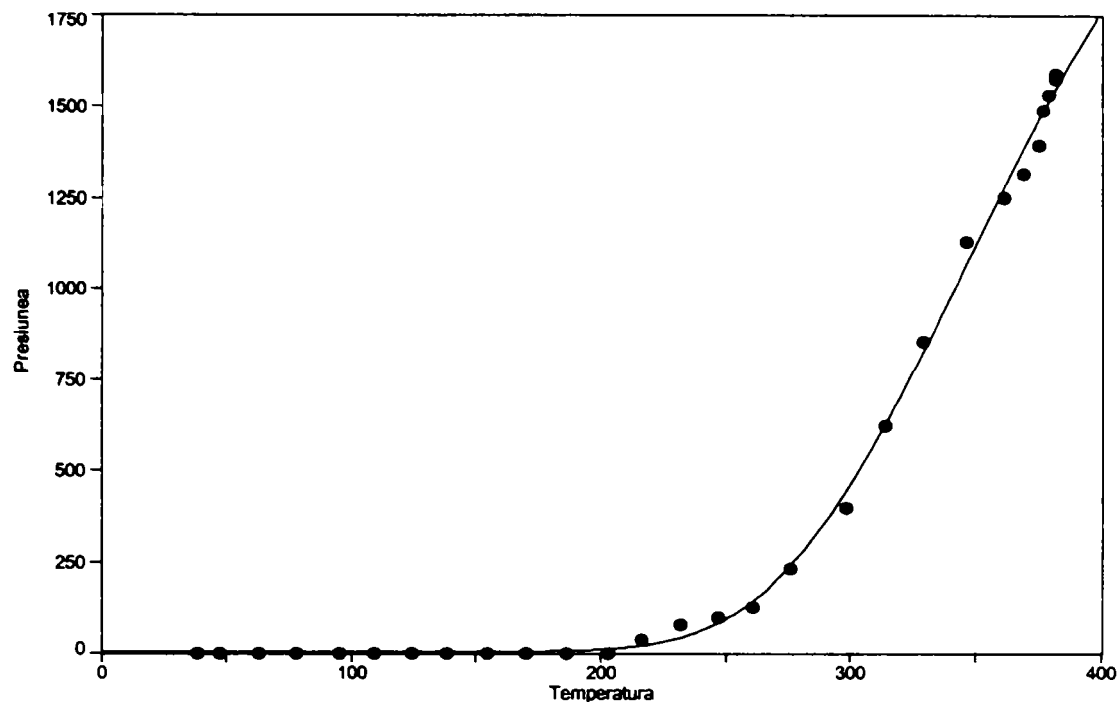
Testul nr. 4

| Viteza de încălzire = 15°C / oră, procent de umplere 80% | | | | | | | | | |
|--|------|----|------|------|------|-----|-----|----|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 60 | 52 | 2,5 | 2,5 | 0 | 38 | 39 | 0 | |
| 2 | 120 | | 2,7 | 2,8 | 0 | 47 | 47 | 0 | |
| 3 | 180 | | 3,6 | 3,5 | 0 | 63 | 65 | 0 | |
| 4 | 240 | | 4,3 | 4,4 | 0 | 78 | 78 | 0 | |
| 5 | 300 | | 5,1 | 5,2 | 0 | 95 | 97 | 0 | |
| 6 | 360 | | 6,2 | 6,1 | 0 | 109 | 110 | 0 | |
| 7 | 420 | | 7,1 | 7,0 | 0 | 124 | 125 | 0 | |
| 8 | 480 | | 8,0 | 7,9 | 0 | 138 | 140 | 0 | |
| 9 | 540 | | 8,9 | 8,8 | 0 | 154 | 155 | 0 | |
| 10 | 600 | | 9,5 | 9,2 | 0 | 170 | 169 | 0 | |
| 11 | 660 | | 10,0 | 9,6 | 0 | 186 | 182 | 4 | |
| 12 | 720 | | 10,6 | 10,1 | 0 | 203 | 192 | 11 | |
| 13 | 780 | | 10,9 | 10,6 | 35 | 216 | 200 | 16 | |
| 14 | 840 | | 11,6 | 10,9 | 75 | 232 | 211 | 21 | |
| 15 | 900 | | 12,2 | 11,2 | 96 | 247 | 220 | 27 | |
| 16 | 960 | | 12,8 | 11,2 | 124 | 261 | 229 | 32 | |
| 17 | 1020 | | 13,2 | 11,3 | 230 | 276 | 238 | 38 | |
| 18 | 1080 | | 13,5 | 11,3 | 395 | 298 | 255 | 43 | |
| 19 | 1140 | | 13,9 | 11,4 | 620 | 314 | 266 | 48 | |
| 20 | 1200 | | 14,3 | 11,4 | 850 | 329 | 278 | 51 | |
| 21 | 1260 | | 14,6 | 11,6 | 1125 | 346 | 292 | 54 | |
| 22 | 1320 | | 14,7 | 11,7 | 1250 | 361 | 302 | 59 | |
| 23 | 1380 | | 14,9 | 11,9 | 1315 | 369 | 306 | 63 | |
| 24 | 1440 | | 14,9 | 12,1 | 1390 | 375 | 312 | 63 | |
| 25 | 1500 | | 15,0 | 12,2 | 1485 | 377 | 312 | 65 | |
| 26 | 1560 | | 15,1 | 12,1 | 1530 | 379 | 312 | 67 | |
| 27 | 1620 | | 15,1 | 12,0 | 1575 | 382 | 313 | 68 | |
| 28 | 1680 | | 15,1 | 12,0 | 1590 | 382 | 312 | 68 | |

Variatia presiunii cu temperatura (4)

Rank 1 Eqn 8008 $y=a+berfc(((x-c)/d)^2)$ [Erfc Peak]

$r^2=0.998018853$ DF Adj $r^2=0.997874305$ FitStdErr=29.7239156 Fstat=4030.06382



Rank 1 Eqn 8008 $y=a+berfc(((x-c)/d)^2)$ [Erfc Peak]

| Precision | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 18 | 9.456606e-20 | 2.399835e-17 | 3.801379e-18 |
| 17 | -2.16556e-17 | -1.63767e-16 | -4.12414e-17 |
| 16 | 2.193933e-17 | -3.14972e-15 | -3.35525e-16 |
| 15 | 2.193933e-17 | 3.356407e-15 | 2.280038e-15 |
| 14 | 1.310515e-14 | 7.312727e-14 | 8.70444e-15 |
| 13 | 1.003269e-13 | 1.548369e-13 | 2.735742e-13 |
| 12 | 9.72545e-13 | -1.88074e-11 | 3.034362e-13 |
| 11 | 5.333635e-12 | -4.00146e-10 | -3.16466e-11 |
| 10 | 5.333635e-12 | 1.42883e-09 | 2.002987e-10 |
| 9 | 5.333629e-12 | -1.03812e-08 | -1.93108e-09 |
| 8 | -2.18001e-08 | -3.43453e-07 | -6.07121e-08 |
| 7 | 6.542168e-08 | -2.70095e-06 | -4.86859e-07 |
| 6 | -2.11512e-06 | 2.533879e-05 | 6.410568e-07 |
| 5 | -2.11512e-06 | -0.000224605 | -3.81317e-05 |
| 4 | -2.11512e-06 | -0.000585700 | -5.15108e-05 |
| 3 | -0.001310442 | -0.028533369 | -0.001195528 |
| 2 | 0.0030506477 | -0.073042369 | 0.0059592772 |

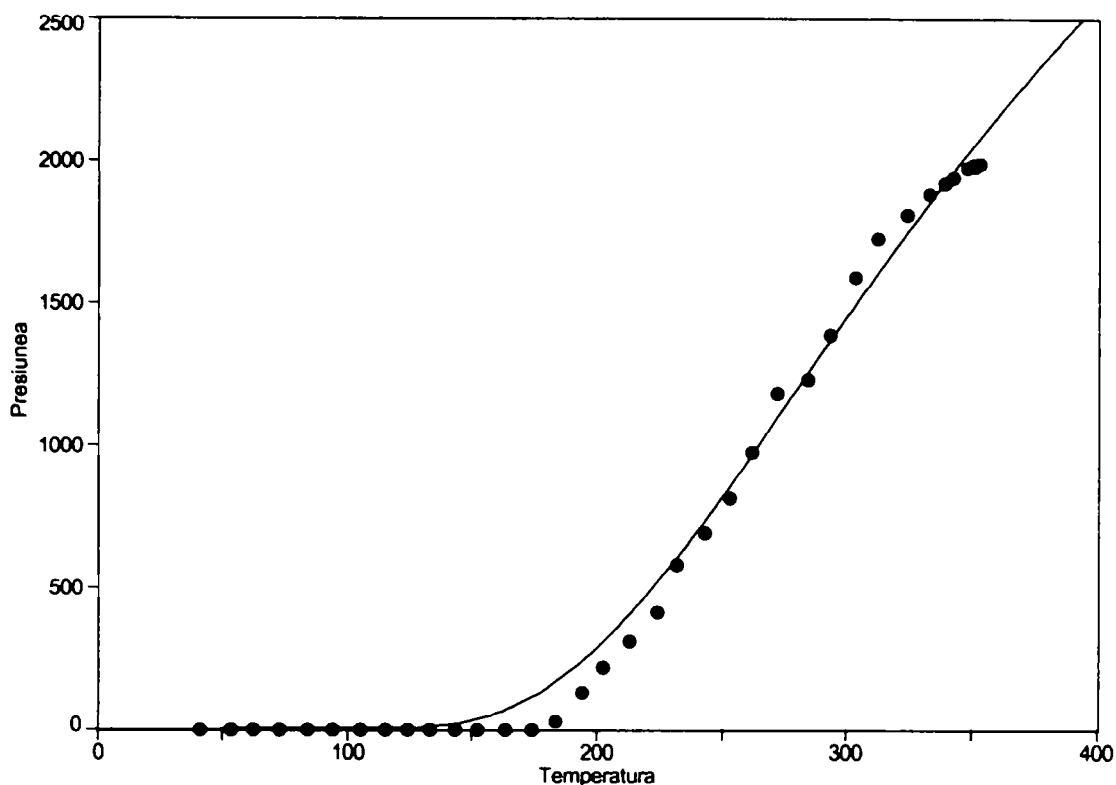
Testul nr.5

| Viteza de încălzire = 10 ⁰ C / oră, procent de umplere 85% | | | | | | | | | |
|---|------|----|------|------|------|-----|-----|----|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 60 | 52 | 2,2 | 2,2 | 0 | 41 | 42 | 0 | |
| 2 | 120 | | 2,5 | 2,5 | 0 | 53 | 53 | 0 | |
| 3 | 180 | | 3,1 | 3,2 | 0 | 62 | 63 | 0 | |
| 4 | 240 | | 3,3 | 3,4 | 0 | 73 | 72 | 0 | |
| 5 | 300 | | 3,8 | 3,7 | 0 | 84 | 83 | 0 | |
| 6 | 360 | | 4,0 | 3,9 | 0 | 94 | 95 | 0 | |
| 7 | 420 | | 4,2 | 4,1 | 0 | 105 | 106 | 0 | |
| 8 | 480 | | 4,2 | 4,2 | 0 | 115 | 115 | 0 | |
| 9 | 540 | | 4,3 | 4,4 | 0 | 124 | 125 | 0 | |
| 10 | 600 | | 4,4 | 4,4 | 0 | 133 | 134 | 0 | |
| 11 | 660 | | 4,9 | 5,0 | 0 | 143 | 142 | 0 | |
| 12 | 720 | | 5,6 | 5,4 | 0 | 152 | 153 | 0 | |
| 13 | 780 | | 6,0 | 5,8 | 0 | 163 | 163 | 0 | |
| 14 | 840 | | 6,3 | 6,2 | 0 | 174 | 172 | 2 | |
| 15 | 900 | | 6,5 | 6,3 | 25 | 183 | 179 | 4 | |
| 16 | 960 | | 6,7 | 6,6 | 130 | 194 | 189 | 5 | |
| 17 | 1020 | | 7,1 | 6,8 | 215 | 202 | 196 | 6 | |
| 18 | 1080 | | 7,3 | 7,3 | 310 | 213 | 206 | 7 | |
| 19 | 1140 | | 7,7 | 7,7 | 410 | 224 | 215 | 9 | |
| 20 | 1200 | | 8,2 | 8,0 | 580 | 232 | 221 | 11 | |
| 21 | 1260 | | 8,7 | 8,3 | 690 | 243 | 230 | 13 | |
| 22 | 1320 | | 9,1 | 8,7 | 815 | 253 | 237 | 16 | |
| 23 | 1380 | | 9,8 | 9,2 | 975 | 262 | 243 | 19 | |
| 24 | 1440 | | 10,4 | 9,3 | 1180 | 272 | 249 | 23 | |
| 25 | 1500 | | 10,9 | 9,6 | 1230 | 284 | 256 | 28 | |
| 26 | 1560 | | 11,3 | 9,8 | 1385 | 293 | 259 | 34 | |
| 27 | 1620 | | 11,9 | 9,9 | 1590 | 303 | 262 | 39 | |
| 28 | 1680 | | 12,4 | 10,2 | 1725 | 312 | 268 | 44 | |
| 29 | 1740 | | 12,9 | 10,5 | 1810 | 324 | 274 | 50 | |
| 30 | 1800 | | 13,2 | 11,1 | 1880 | 333 | 277 | 56 | |
| 31 | 1860 | | 13,5 | 11,3 | 1920 | 339 | 282 | 57 | |
| 32 | 1920 | | 13,7 | 11,5 | 1940 | 342 | 283 | 59 | |
| 33 | 1980 | | 13,9 | 11,6 | 1975 | 348 | 284 | 64 | |
| 34 | 2040 | | 14,1 | 11,6 | 1986 | 353 | 284 | 67 | |
| 35 | 2100 | | 14,0 | 11,7 | 1980 | 351 | 285 | 66 | |
| 36 | 2160 | | 14,0 | 11,6 | 1982 | 350 | 285 | 65 | |

Variatia presiunii cu temperatura (5)

Rank 1 Eqn 41 In y=a+bx

r²=0.993929857 DF Adj=0.993561969 FitStdErr=64.3375679 Fstat=5567.18569



Rank 1 Eqn 41 In y=a+b/x2

| Precision | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 18 | 6.943229e-17 | -4.31384e-18 | -5.66521e-18 |
| 17 | -1.11365e-15 | -3.76963e-17 | -1.12235e-17 |
| 16 | -6.86258e-15 | -5.49517e-17 | 1.079597e-16 |
| 15 | -1.27842e-13 | -6.39755e-15 | -3.49715e-15 |
| 14 | -1.95249e-12 | -1.11533e-13 | -6.75726e-14 |
| 13 | 1.044519e-11 | 8.227031e-13 | 5.929294e-13 |
| 12 | 1.929104e-10 | 1.133624e-11 | 7.00046e-12 |
| 11 | -1.63174e-09 | -9.37991e-11 | -5.70748e-11 |
| 10 | 1.036594e-08 | 4.404366e-10 | 2.034272e-10 |
| 9 | 6.585434e-08 | -1.38838e-09 | -2.99406e-09 |
| 8 | -5.0903e-07 | -3.10017e-09 | 8.980835e-09 |
| 7 | -2.39041e-05 | -4.71572e-07 | 8.797674e-08 |
| 6 | -0.000207348 | -1.1985e-05 | -7.31953e-06 |
| 5 | -0.000831907 | -6.36949e-05 | -4.53436e-05 |
| 4 | 0.0055318308 | 0.0005535742 | 0.0004350010 |
| 3 | 0.0682320435 | 0.0037315447 | 0.0022399215 |
| 2 | -0.817069139 | -0.040565053 | -0.001836203 |

| Removing | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| a | -0.999811918 | -0.999811918 | -0.999811918 |
| b | 1.801311e+30 | 11.713169237 | 1.5594924970 |

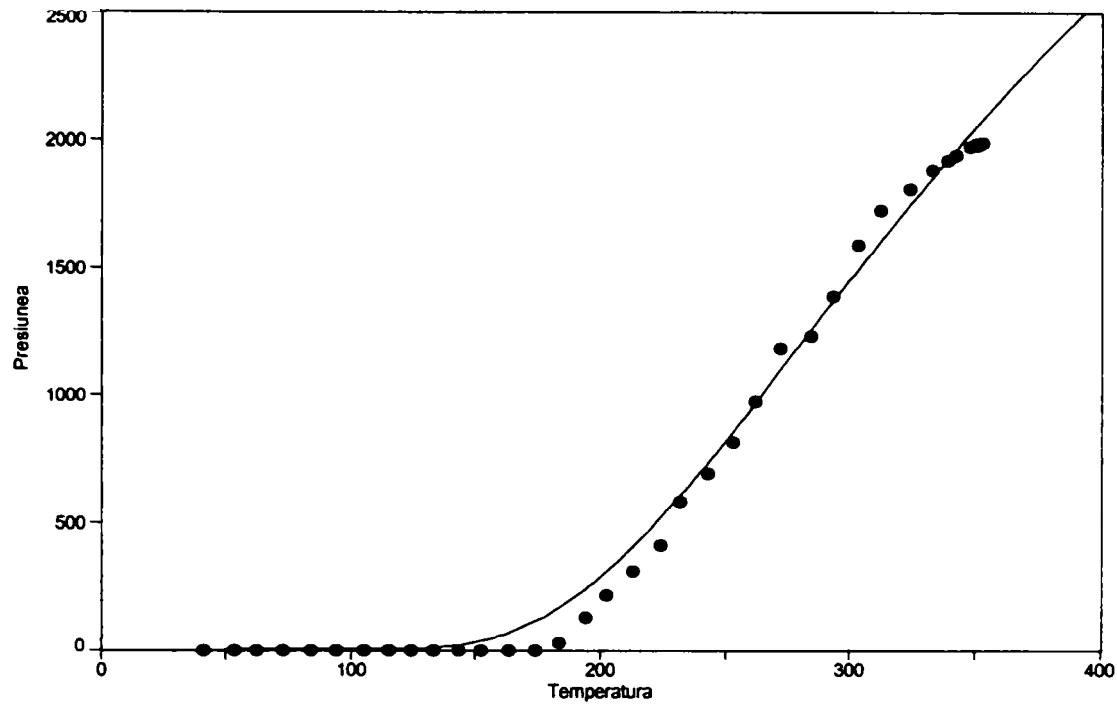
Testul nr.6:

| Viteza de încălzire = 15°C / oră, procent de umplere 85% | | | | | | | | | |
|--|------|----|------|------|------|-----|-----|----|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 60 | 52 | 2,5 | 2,5 | 0 | 38 | 39 | 0 | |
| 2 | 120 | | 2,7 | 2,8 | 0 | 47 | 47 | 0 | |
| 3 | 180 | | 3,6 | 3,5 | 0 | 63 | 65 | 0 | |
| 4 | 240 | | 4,3 | 4,4 | 0 | 78 | 78 | 0 | |
| 5 | 300 | | 5,1 | 5,2 | 0 | 95 | 97 | 0 | |
| 6 | 360 | | 6,2 | 6,1 | 0 | 109 | 110 | 0 | |
| 7 | 420 | | 7,1 | 7,0 | 0 | 126 | 125 | 0 | |
| 8 | 480 | | 8,0 | 7,9 | 0 | 143 | 140 | 0 | |
| 9 | 540 | | 8,9 | 8,8 | 0 | 159 | 155 | 0 | |
| 10 | 600 | | 9,5 | 9,0 | 0 | 175 | 169 | 0 | |
| 11 | 660 | | 10,0 | 9,2 | 40 | 190 | 182 | 8 | |
| 12 | 720 | | 10,6 | 9,5 | 210 | 208 | 192 | 16 | |
| 13 | 780 | | 10,9 | 9,8 | 395 | 227 | 200 | 27 | |
| 14 | 840 | | 11,6 | 10,2 | 595 | 243 | 211 | 32 | |
| 15 | 900 | | 12,2 | 10,4 | 810 | 259 | 220 | 39 | |
| 16 | 960 | | 12,8 | 10,7 | 1012 | 276 | 229 | 52 | |
| 17 | 1020 | | 13,2 | 11,0 | 1150 | 292 | 238 | 54 | |
| 18 | 1080 | | 13,5 | 11,2 | 1410 | 309 | 255 | 54 | |
| 19 | 1140 | | 13,7 | 11,3 | 1650 | 327 | 263 | 64 | |
| 20 | 1200 | | 13,9 | 11,4 | 1780 | 335 | 267 | 68 | |
| 21 | 1260 | | 14,1 | 11,4 | 1925 | 344 | 272 | 72 | |
| 22 | 1320 | | 14,2 | 11,5 | 1950 | 349 | 278 | 79 | |
| 23 | 1380 | | 14,3 | 11,6 | 1960 | 351 | 280 | 71 | |
| 24 | 1440 | | 14,2 | 11,6 | 1965 | 352 | 282 | 70 | |
| 25 | 1500 | | 14,2 | 11,5 | 1680 | 353 | 282 | 71 | |
| 26 | 1560 | | 14,2 | 11,5 | 1980 | 353 | 281 | 72 | |

Variatia presiunii cu temperatura (6)

Rank 1 Eqn 41 $\ln y = a + b/x^2$

$r^2=0.993929857$ DF Adj $\hat{r}=0.993561989$ FritStdErr=64.3375679 Fstat=5567.18569



Rank 1 Eqn 41 $\ln y = a + b/x^2$

| Precision | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 18 | 6.943229e-17 | -4.31384e-18 | -5.66521e-18 |
| 17 | -1.11365e-15 | -3.76963e-17 | -1.12235e-17 |
| 16 | -6.86258e-15 | -5.49517e-17 | 1.079597e-16 |
| 15 | -1.27842e-13 | -6.39755e-15 | -3.49715e-15 |
| 14 | -1.95249e-12 | -1.11533e-13 | -6.75726e-14 |
| 13 | 1.044519e-11 | 8.227031e-13 | 5.929294e-13 |
| 12 | 1.929104e-10 | 1.133624e-11 | 7.00046e-12 |
| 11 | -1.63174e-09 | -9.37991e-11 | -5.70748e-11 |
| 10 | 1.036594e-08 | 4.404366e-10 | 2.034272e-10 |
| 9 | 6.585434e-08 | -1.38838e-09 | -2.99406e-09 |
| 8 | -5.0903e-07 | -3.10017e-09 | 8.980835e-09 |
| 7 | -2.39041e-05 | -4.71572e-07 | 8.797674e-08 |
| 6 | -0.000207348 | -1.1985e-05 | -7.31953e-06 |
| 5 | -0.000831907 | -6.36949e-05 | -4.53436e-05 |
| 4 | 0.0055318308 | 0.0005535742 | 0.0004350010 |
| 3 | 0.0682320435 | 0.0037315447 | 0.0022399215 |
| 2 | -0.817069139 | -0.040565053 | -0.001836203 |
| Removing | Error @Xmin | Error @Xmean | Error @Xmax |
| a | -0.999811918 | -0.999811918 | -0.999811918 |
| b | 1.801311e+30 | 11.713169237 | 1.559492497 |

În urma testelor realizate pentru:

- ✓ verificarea rezistenței termo-mecanice – prin încălzirea rapidă până la temperatura de 300°C urmată de introducerea autoclavei într-un recipient cu apă;
- ✓ realizarea regimurilor termice și de presiune – s-au realizat un număr de 24 experimente la diferite procente de umplere cu apă, stabilindu-se variația presiunii cu temperatura și fiabilitatea sistemelor de alimentare, măsură și control;
- ✓ etanșeitățile sistemului de închidere – prin încălzirea rapidă până la temperatura de 280°C cu un procent de umplere cu apă de 90% atingându-se o presiune de 2010 bari.

Se poate afirma că autoclava corespunde din punct de vedere mecanic, termic și chimic.

5.4 Procedura experimentală de obținere a monocristalelor de α -cuarț

a. Prelucrarea materialului nutritiv. Materialul nutritiv (utilizat în scopul obținerii monocristalelor de cuarț impurificate), provenit din depozite naturale de cuarț, necesită o prelucrare ce se face în două etape:

i. Prelucrarea mecanică și selectarea, constă într-o mărunțire mecanică a materialului nutritiv apoi o selectare a policristalelor cu o granulație cuprinsă între 3-5 mm.

ii. Tratarea chimică se face în mai multe etape: în prima etapă materialul nutritiv este tratat cu soluție de bicromat de potasiu în mediu de acid sulfuric, în vase de PVC la temperatura camerei, timp de 12 ore. După acest tratament se separă soluția de material nutritiv, urmând spălarea cu apă distilată. Urmează apoi un nou tratament chimic cu acid clorhidric, la temperatura camerei, timp de 12 ore iar în final se face o spălătură prelungită cu apă distilată. Materialul nutritiv astfel tratat se păstrează în soluție slabă 0,2 N de NaOH pentru a evita depunerea de noi ingrediente organici.

b. Prelucrarea germenilor: germenii se taie pe anumite direcții (AT, X, Y sau Z), din cristale de cuarț cât mai de calitate, orientarea acestora realizându-se în raze X. După tăiere are loc o polizare și o corodare a germenilor cu scopul de a curăța urmele de material străine aderente pe suprafețele plăcii de cuarț și de a înlătura straturile superficiale de cuarț defecte sau perturbate datorită proceselor de șlefuire-polizare.

c. Pregătirea soluției : Solubilitatea cuarțului crește semnificativ dacă se utilizează ca și mineralizatori hidroxidul de sodiu (NaOH) sau alți hidroxizi. Astfel se utilizează o concentrație a soluției folosite ca și mineralizator de 2-5 % (procente masice). În cazul nostru s-a folosit o soluție 0,5 N de NaOH. În această soluție se pot adăuga și substanțe cu care se dorește impurificarea monocristalele obținute (oxid de titan, bicromat de potasiu, oxid de fier, sulfat de aluminiu etc).

d. Încărcarea autoclavei: materialul nutritiv se introduce într-un coș de oțel inoxidabil iar coșul se introduce în autoclavă; germenii se fixează de centrul pistonului autoclavei prin intermediul unui fir de inox sau de nichelină, prin agățare;

peste coșul cu material nutritiv din autoclavă se toarnă soluția preparată ca mai sus, astfel încât volumul de umplere al autoclavei să fie în jur de 80%.

e. Desfășurarea experimentului: în final, se închide autoclava și se conectează sistemul de încălzire și control al temperaturii. Încălzirea are loc progresiv, până ce sistemul intră în parametrii funcționali, după care temperatura se menține constantă pe tot parcursul experimentului. Apoi are loc răcirea sistemului deschiderea autoclavei și extragerea monocristalelor obținute.

Au fost realizate mai multe experimente de obținere de monocristale de alfa-cuarț. În continuare sunt descrise condițiile în care au fost realizate 5 experimente:

Experimentul nr. 1:

- Instalație experimentală: autoclavă de laborator de 560 ml;
- Două încălzitoare comandate separat;
- Termocuple de tip Fe-Constantan;
- Temperatura de creștere: 350 °C;
- Gradientul de temperatură: 60 °C;
- Presiunea: 800 bari;
- Solvent: 5% hidroxid de sodiu;
- Durata experimentului: 150 ore;
- Dimensiunea inițială a germenului pe direcțiile x/y/z: 32/12/1,65 mm;
- Dimensiunea finală a cristalului: 33/12,8/2,76 mm;
- Viteză de creștere: 0,1 mm/zi.

Experimentul nr. 2:

- Instalație experimentală: autoclavă de laborator de 500 ml;
- Două încălzitoare comandate separat;
- Termocuple de tip Ni-CrNi;
- Temperatura de creștere: 460 °C;
- Gradientul de temperatură: 30 °C;
- Presiunea: 1300 bari;
- Solvent: 5% hidroxid de sodiu;
- Durata experimentului: 180 ore
- Dimensiunea inițială a germenului pe direcțiile x/y/z: 45/16/2,45 mm;
- Dimensiunea finală a cristalului: 45/16/2,5 mm;
- Viteză de creștere: practic nulă.

Experimentul nr. 3:

- Instalație experimentală: autoclavă de laborator de 500 ml;
- Două încălzitoare comandate separat;
- Termocuple de tip Ni-CrNi;
- Temperatura de creștere: 460 °C;
- Gradientul de temperatură: 30 °C;
- Presiunea: 1300 bari;

- Solvent: 5% hidroxid de sodiu;
- Durata experimentului: 180 ore;
- Dimensiunea inițială a germenului pe direcțiile x/y/z: 45/16/2,45 mm;
- Dimensiunea finală a cristalului: 45/16/2,85 mm;
- Viteză de creștere: 0,05 mm/zi.

Experimentul nr. 4:

- Instalație experimentală: autoclavă de laborator de 560 ml;
- Două încălzitoare comandate separat;
- Termocuple de tip Fe-Constantan;
- Temperatura de creștere: 400 °C;
- Gradientul de temperatură: 40 °C;
- Presiunea: 1000 bari;
- Solvent: 5% hidroxid de sodiu;
- Durata experimentului: 120 ore;
- Dimensiunea inițială a germenului pe direcțiile x/y/z: 30/13/1,6 mm;
- Dimensiunea finală a cristalului: 30/13/1,6 mm.

Experimentul nr. 5:

- Instalație experimentală: autoclavă de laborator de 120 ml; un încălzitor;
- Termocuple de tip Ni-CrNi;
- Temperatura de creștere: 320 °C;
- Gradientul de temperatură: 30 °C;
- Presiunea: 300 bari;
- Solvent: 5% hidroxid de sodiu;
- Durata experimentului: 350 ore;
- Dimensiunea inițială a germenului pe direcțiile x/y/z: 31/12/1,65 mm;
- Dimensiunea finală a cristalului: 33/14/3,6 mm;
- Viteză de creștere pe direcția Oz: 0,1 mm/zi.

5.5 Optimizarea grosimii monocristalelor de α - cuarț

Pentru realizarea experimentelor s-au luat în considerare 5 factori cu 2 nivele și 2 interacțiuni, alegându-se o matrice de experiențe L_8 .

Condițiile de realizare a experimentelor au fost următoarele:

- Instalația experimentală: autoclavă de laborator de 150 l;
- Procent de umplere 80%;
- Două încălzitoare comandate separat;
- Termocuple de tip Ni-CrNi;
- Temperatura de solubilizare: max. 400 °C;
- Temperatura de cristalizare: max. 330 °C;
- Gradientul de temperatură: max. 100 °C;
- Presiunea: 2500 bari;
- Solvent 0,5 N NaOH și 0,5 N KOH;
- Durata experimentelor: max. 24 zile/experiment;
- Dimensiunea inițială a germenilor pe direcțiile x/y/z: 50/20/2,0 mm;

- Dimensiunea finală a cristalelor: conform datelor experimentale;
- Viteză de creștere pe direcția Oz: 1,5 mm/zi.

Observații:

- Factorii de control de la 1 la 5 se vor nota cu litere de la A la E;
- Factorul 2 (B) reprezintă diferența dintre temperatura de solubilizare și temperatura de cristalizare;
- Modul 1 de aranjare a germenilor este dat în Fig.5.3 a iar modul 2 în Fig. 5.4 b.

| Inner Array Design | | | | | | Print | OK |
|----------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|
| Array Type: L-8 | | | | | | Help | Cancel |
| Use ctrl + arrows to move cursor | | | | | | | |
| | Factors | Level 1 | Level 2 | Level 3 | Level 4 | | |
| 1 | Deschidere Sicana | 60% | 40% | ----- | ----- | | |
| 2 | Diferenta Temperatura | 380-280 | 380-310 | ----- | ----- | | |
| 3 | Tip Solvent | NaOH | KOH | ----- | ----- | | |
| 4 | Concentratie Nutrient | 0.4 g/l | 0.5 g/l | ----- | ----- | | |
| 5 | Aranjament Germeni | Mod 1 | Mod 2 | ----- | ----- | | |
| 6 | INTER COLS 3 x 5 | *INTER* | ----- | ----- | ----- | | |
| 7 | INTER COLS 3 x 4 | *INTER* | ----- | ----- | ----- | | |

Col Inter Inter Table Reset Col Delete Cell Unused Upgrade Test

Fig. 5.2 Nivelurile factorilor și coloanele atribuite factorilor și interacțiunilor

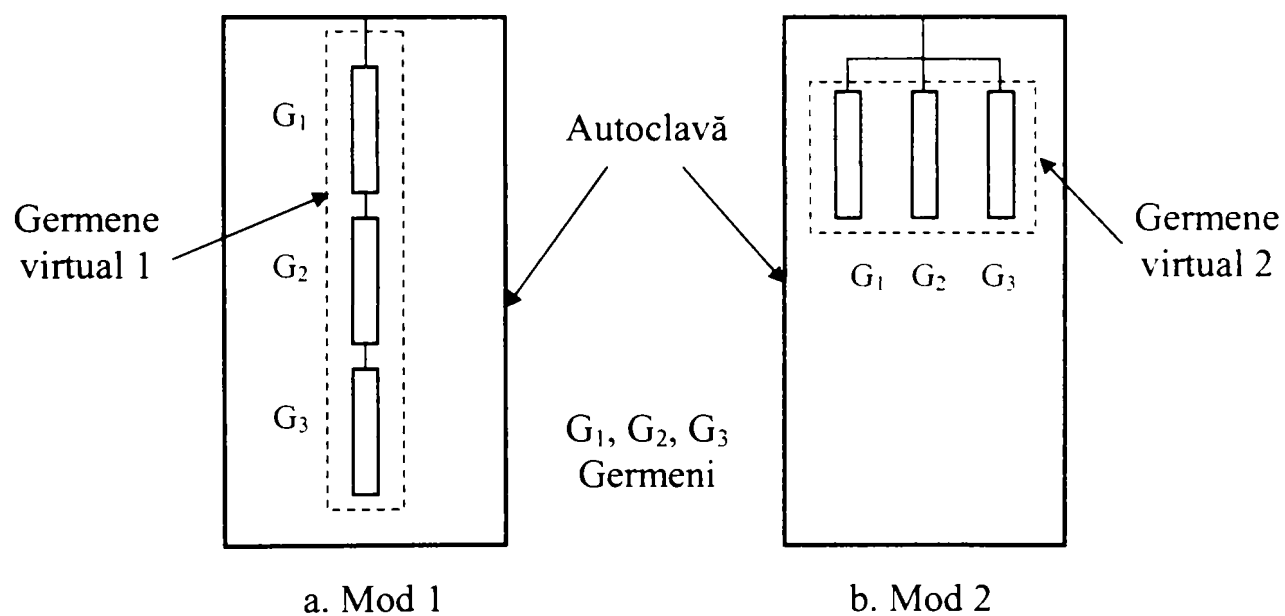


Fig. 5.3 Modul de aranjare a germenilor în autoclavă

Matricea de experiențe L_8 , datele experimentale, mediile, abaterile standard și rapoartele S/N sunt date în Tab. 5.1.

5.5.1 Calculul rapoartelor S/N cu relația care se bazează pe medie și variația în jurul acesteia și care nu utilizează valoarea țintă

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} - \frac{1}{n} \right) \text{ [dB]} \tag{5.1}$$

în care:

- \bar{y} – media aritmetică a valorilor măsurate;
- s – abaterea standard a valorilor măsurate;
- n – numărul măsurătorilor efectuate.

| Interacțiune | Interacțiune |
|--------------|--------------|
| CE | CD |
| 1=C1E1 | 1=C1D1 |
| 2=C1E2 | 2=C1D2 |
| 3=C2E1 | 3=C2D1 |
| 4=C2E2 | 4=C2D2 |
| 4=C2E2 | 3=C2D1 |
| 3=C2E1 | 4=C2D2 |
| 2=C1E2 | 1=C1D1 |
| 1=C1E1 | 2=C1D2 |

| Nr. exp | Factori controlați | | | | | Int. CE | Int. CD | Valori măsurate | | | Valori calculate | | |
|---------|--------------------|---|---|---|---|---------|---------|-----------------|------|------|------------------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | | | nr.1 | nr.2 | nr.3 | Media | Ab. Std. | S/N [dB] |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 24,5 | 24,5 | 25,1 | 24,7 | 0,346 | 37,072 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 24,7 | 25,2 | 24,2 | 24,7 | 0,500 | 33,873 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 23,9 | 25,1 | 23,5 | 24,2 | 0,832 | 29,272 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 25,3 | 24,9 | 24,3 | 24,8 | 0,503 | 33,857 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 4 | 3 | 23,5 | 23,7 | 24,2 | 23,8 | 0,360 | 36,404 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 25,2 | 24,3 | 24,1 | 24,5 | 0,585 | 32,439 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 25,1 | 23,9 | 23,8 | 24,3 | 0,723 | 30,528 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 24,5 | 25,2 | 24,5 | 24,7 | 0,404 | 35,725 |

Media generală a răspunsurilor : 24,466 33,646

Tab. 5.1 Rezultatele încercărilor, mediile, abaterile standard și rapoartele S/N bazate pe relația (5.1)

Răspunsurile medii și efectele medii ale factorilor de control asupra valorilor măsurate sunt date în tabelele 5.2 și 5.3.

| A | | | | B | | | | C | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| \bar{A}_1 | \bar{A}_2 | E_{A_1} | E_{A_2} | \bar{B}_1 | \bar{B}_2 | E_{B_1} | E_{B_2} | \bar{C}_1 | \bar{C}_2 | E_{C_1} | E_{C_2} |
| 24,6 | 24,3 | 0,13 | -0,13 | 24,4 | 24,5 | -0,03 | 0,03 | 24,6 | 24,3 | 0,13 | -0,13 |

Tab. 5.2 Răspunsurile medii și efectele medii ale factorilor A, B, C asupra valorilor măsurate

| D | | | | E | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| \bar{D}_1 | \bar{D}_2 | E_{D_1} | E_{D_2} | \bar{E}_1 | \bar{E}_2 | E_{E_1} | E_{E_2} |
| 24,2 | 24,7 | -0,23 | 0,23 | 24,5 | 24,4 | 0,07 | -0,07 |

Tab. 5.3 Răspunsurile medii și efectele medii ale factorilor D, E asupra valorilor măsurate

Răspunsurile medii ale interacțiunilor și efectele interacțiunilor asupra valorilor măsurate sunt date în tabelele 5.4 și 5.5.

| Răspunsul mediu al interacțiunii CE | | | | Răspunsul mediu al interacțiunii CD | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| C_1E_1 | C_2E_1 | C_1E_2 | C_2E_2 | C_1D_1 | C_1D_2 | C_2D_1 | C_2D_2 |
| 24,165 | 24,349 | 24,483 | 24,316 | 24,483 | 24,483 | 24,983 | 24,683 |

Tab. 5.4 Răspunsurile medii asupra valorilor măsurate ale interacțiunilor CE și CD

| Valoarea interacțiunii CE | | | | Valoarea interacțiunii CD | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| $I_{C_1E_1}$ | $I_{C_2E_1}$ | $I_{C_1E_2}$ | $E_{C_2E_2}$ | $I_{C_1D_1}$ | $I_{C_1D_2}$ | $I_{C_2D_1}$ | $I_{C_2D_2}$ |
| 0,505 | -0,505 | -0,505 | 0,505 | 0,117 | -0,117 | -0,117 | 0,117 |

Tab. 5.5 Efectele interacțiunilor CE și CD asupra valorilor măsurate

Răspunsurile medii și efectele medii ale factorilor de control asupra raportului semnal/zgomot sunt date în tabelele 5.6, 5.7 și 5.8

| A | | | | B | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| \bar{A}_1 | \bar{A}_2 | E_{A_1} | E_{A_2} | \bar{B}_1 | \bar{B}_2 | E_{B_1} | E_{B_2} |
| 35,185 | 33,774 | -0,127 | 0,127 | 34,947 | 32,345 | 1,3 | -1,3 |

Tab. 5.6 Răspunsurile medii și efectele medii ale factorilor A, B, asupra raportului semnal/zgomot

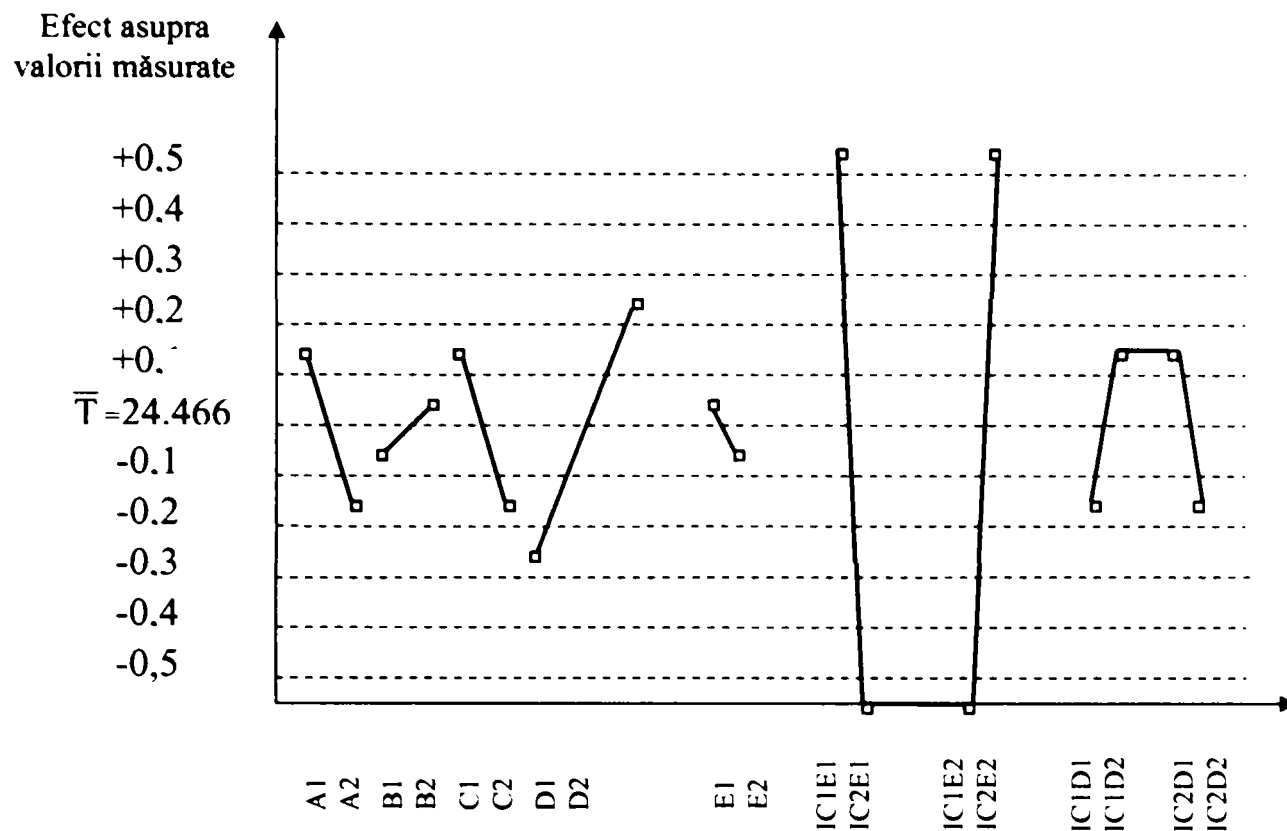


Fig. 5.4 Factori și interacțiuni (efecte asupra valorii măsurate)

| C | | | | D | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| \bar{C}_1 | \bar{C}_2 | E_{C_1} | E_{C_2} | \bar{D}_1 | \bar{D}_2 | E_{D_1} | E_{D_2} |
| 34,299 | 32,993 | 0,653 | -0,653 | 33,308 | 33,974 | -0,328 | 0,328 |

Tab. 5.7 Răspunsurile medii și efectele medii ale factorilor C și D asupra raportului semnal/zgomot

| E | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|
| \bar{E}_1 | \bar{E}_2 | E_{E_1} | E_{E_2} |
| 33,627 | 33,666 | -0,02 | 0,02 |

Tab. 5.8 Răspunsurile medii și efectele medii ale factorului E asupra raportului semnal/zgomot

Răspunsurile medii ale interacțiunilor și efectele interacțiunilor asupra raportului semnal/zgomot sunt date în tabelele 5.9 și 5.10.

| Răspunsul mediu al interacțiunii CE | | | | Răspunsul mediu al interacțiunii CD | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| C_1E_1 | C_2E_1 | C_1E_2 | C_2E_2 | C_1D_1 | C_1D_2 | C_2D_1 | C_2D_2 |
| 36,376 | 30,855 | 32,200 | 35,105 | 33,800 | 34,799 | 32,838 | 33,148 |

Tab. 5.9 Răspunsurile medii asupra raportului semnal/zgomot ale interacțiunilor CE și CD

| Valoarea interacțiunii CE | | | | Valoarea interacțiunii CD | | | |
|---------------------------|------------|------------|------------|---------------------------|------------|------------|------------|
| I_{C1E1} | I_{C2E1} | I_{C1E2} | I_{C2E2} | I_{C1D1} | I_{C1D2} | I_{C2D1} | I_{C2D2} |
| 2,118 | -2,118 | -2,118 | 2,118 | -0,172 | 0,172 | 0,172 | -0,172 |

Tab. 5.10 Efectele interacțiunilor CE și CD asupra raportului semnal/zgomot

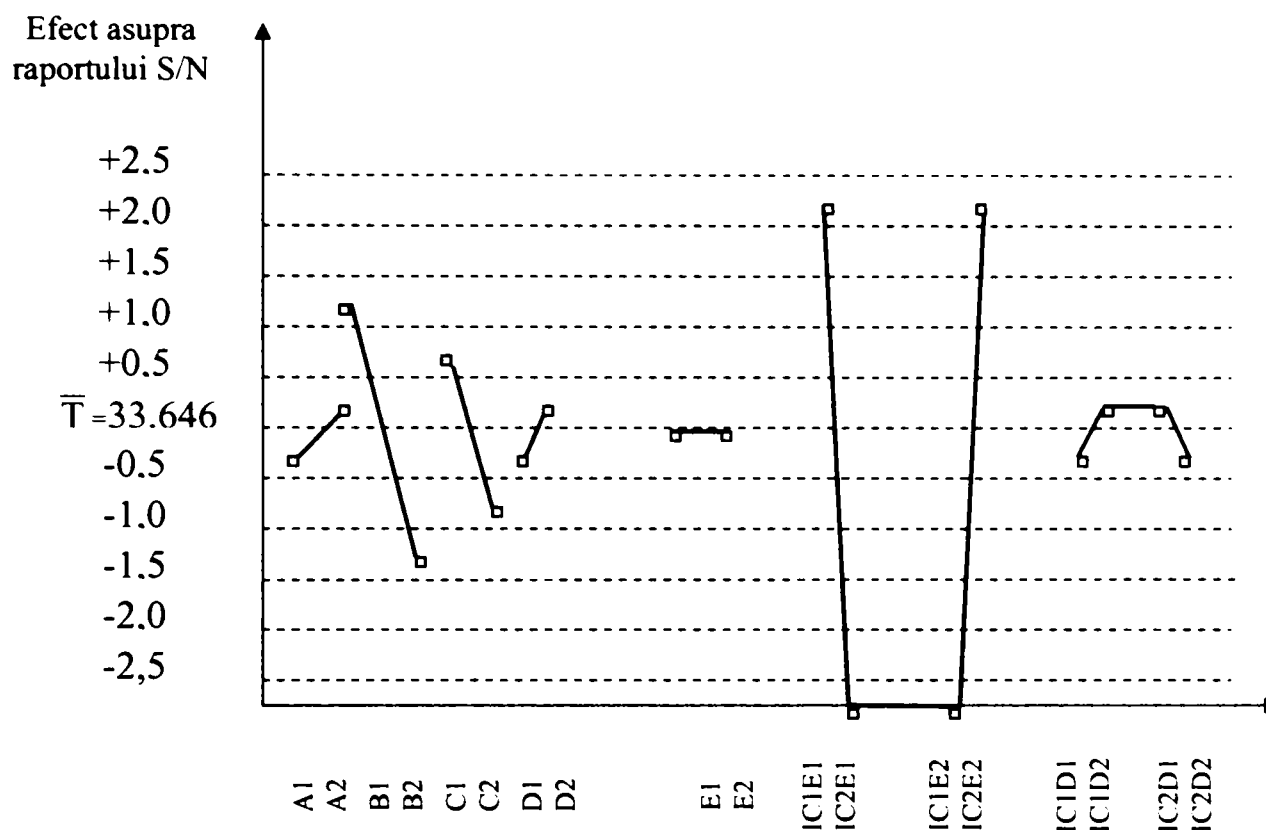


Fig. 5.5 Factori și interacțiuni (efecte asupra raportului S/N)

Dacă se iau în considerare numai efectele asupra valorilor măsurate atunci se caută o combinație a nivelurilor factorilor care să permită obținerea grosimii specificate a cristalului. Combinația de factori în acest caz este dată de relația (5.2):

$$A_2 B_2 C_1 D_1 E_1 I_{C1E1} I_{C1D2} \quad (5.2)$$

Conform relației (5.1) și, neglijând factorii și interacțiunile care nu sunt influenți/influente, va rezulta grosimea estimată a cristalului din relația (5.3).

$$g_{\text{clasic}} = 25,461 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Observație:

Factorii B și E și Interacțiunea I_{C1D2} s-au neglijat având în vedere contribuția lor. În plus se observă că rezultatul se află la limita superioară a toleranței.

Dacă se ia în considerare efectul asupra raportului S/N, atunci combinația de factori este dată în relația (5.4), grosimea estimată a cristalului având valoarea din relația (5.5)

$$A_2 B_1 C_1 D_2 E_2 I_{CIE1} I_{CID2} \tag{5.4}$$

$$g_{Taguchi} = 25,171 \text{ mm} \tag{5.5}$$

5.5.2 Calculul rapoartelor S/N cu relația care se bazează pe MSD, valoarea țintă fiind inclusă în formularea raportului S/N

$$\frac{S}{N} = -10 \log(\text{MSD}) \tag{5.6}$$

unde: $\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_n)^2$

n – numărul de rezultate

y_i – rezultatele măsurărilor

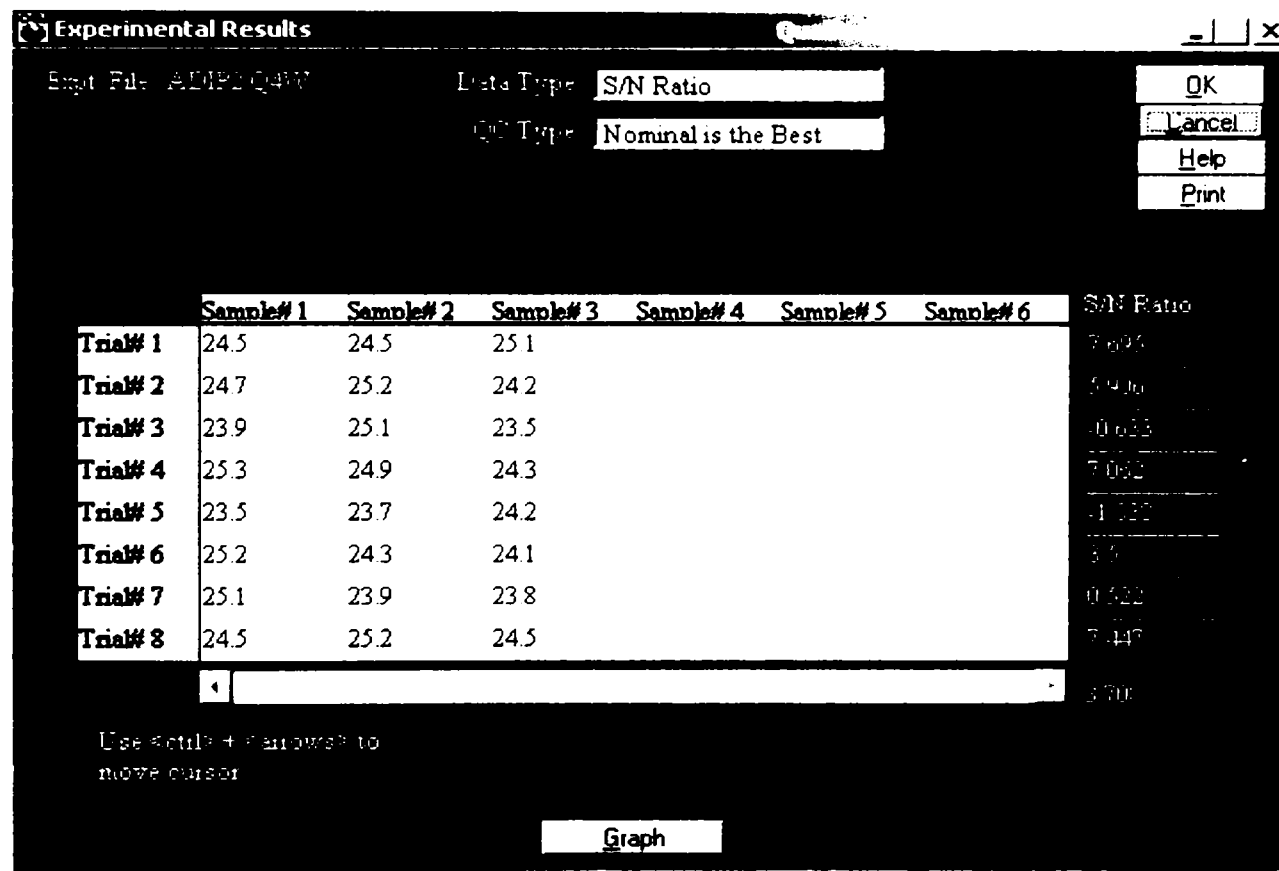


Fig. 5.6 Valorile rapoartelor S/N și media acestora pentru cele 3 serii de date

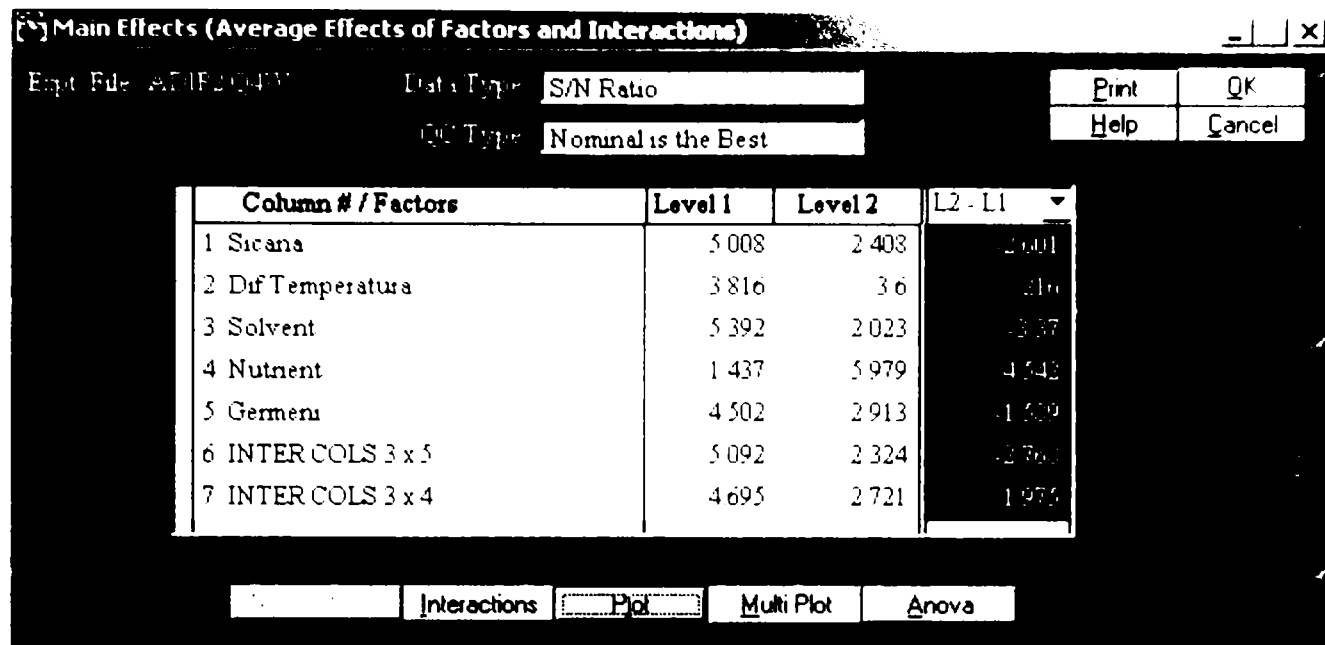


Fig. 5.7 Efectele medii ale factorilor și interacțiunilor

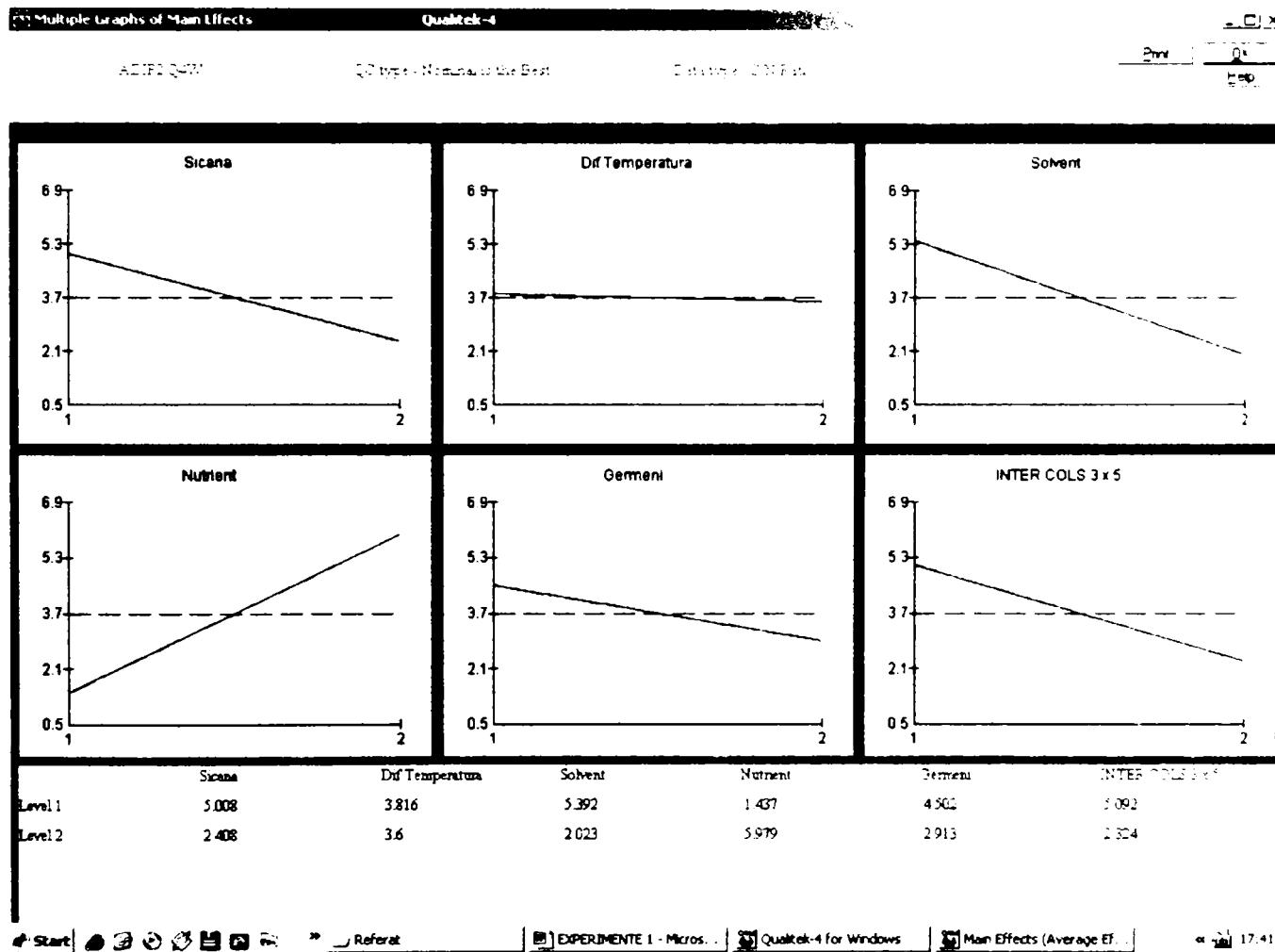


Fig. 5.8 Efectele principale ale factorilor și interacțiunilor

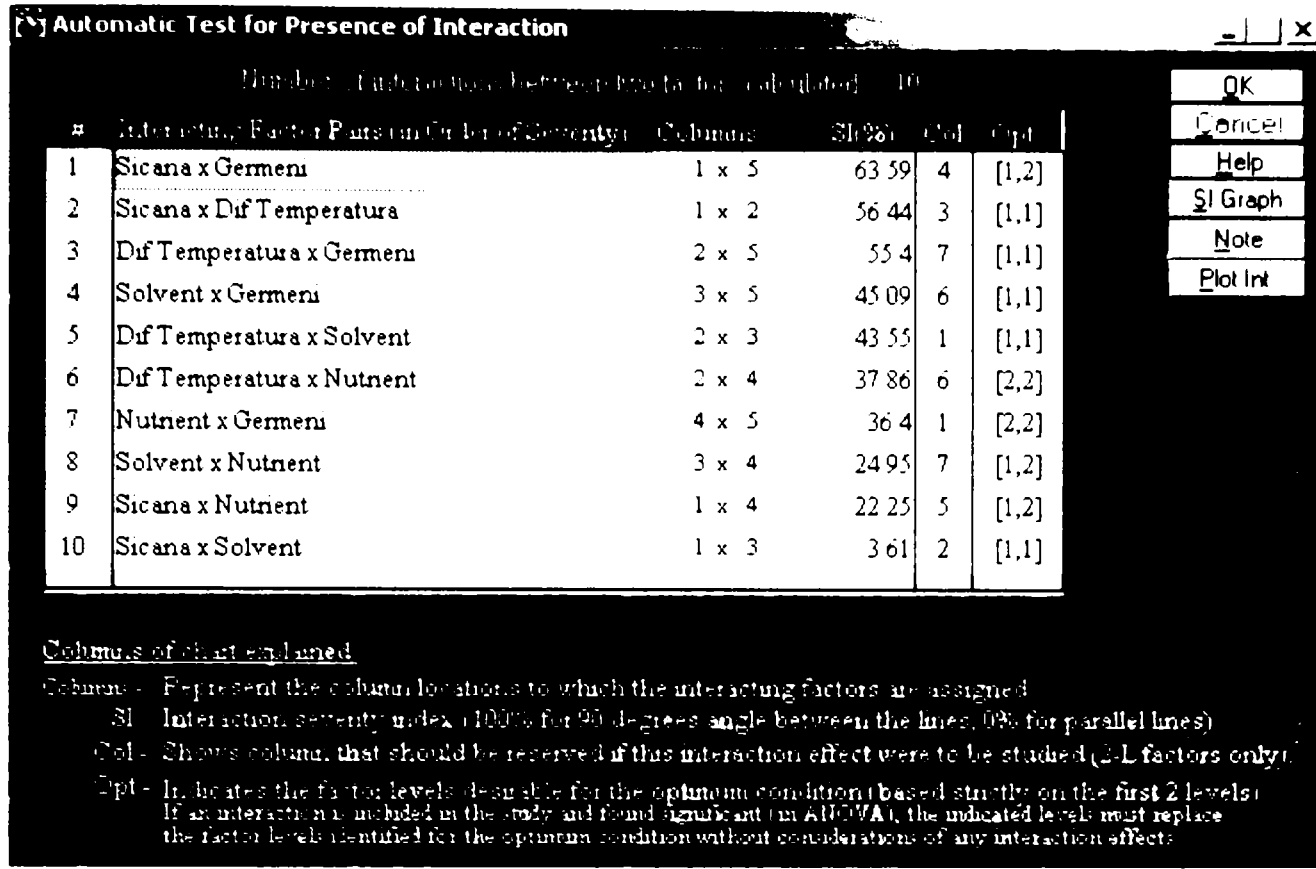


Fig. 5.9 Testul pentru prezența interacțiunilor

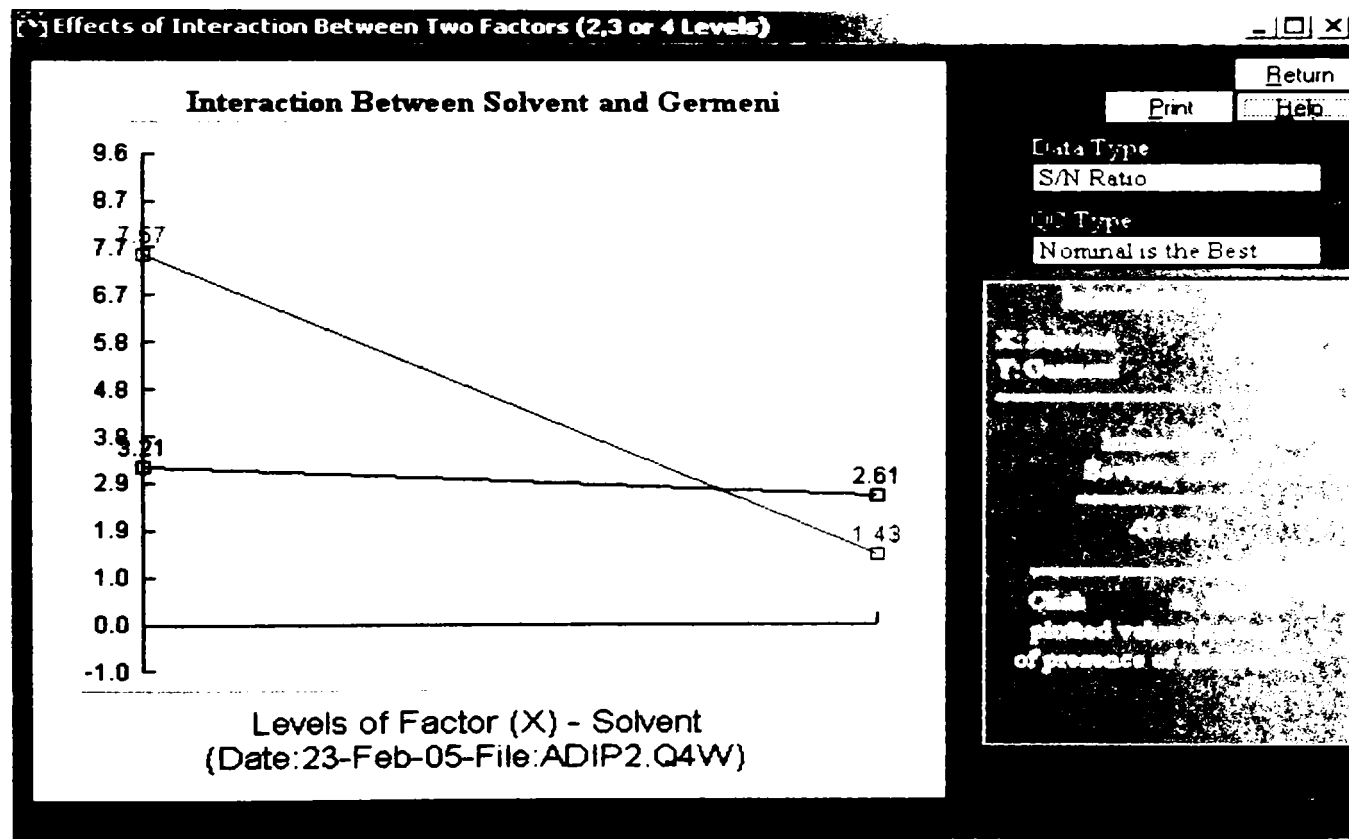


Fig. 5.10 Interacțiunea între tipul Solventului și aranjamentul Germenilor

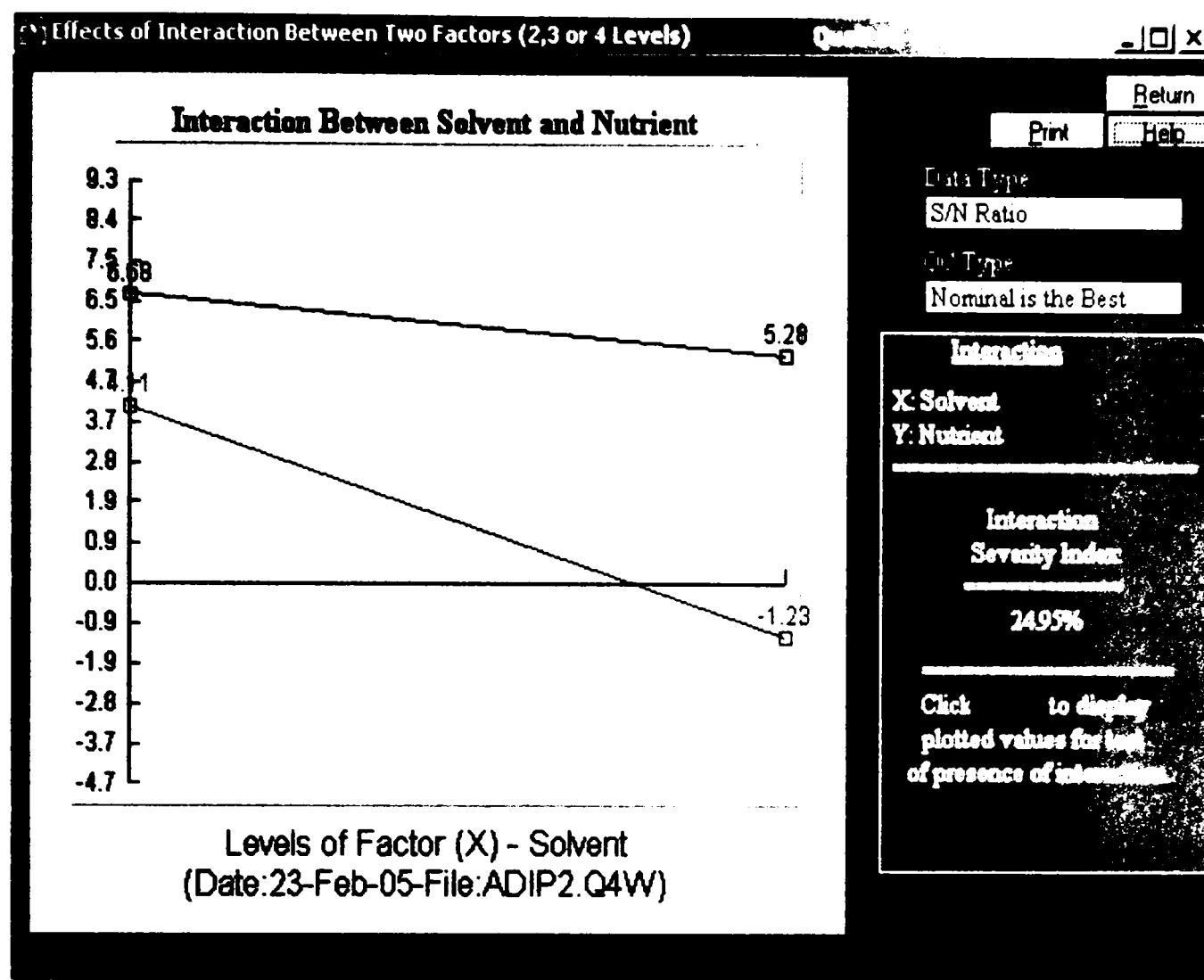


Fig. 5.11 Interacțiunea între tipul Solventului și concentrația Nutrientului

Observații:

- Indexul de severitate al celor două tipuri de interacțiuni este relativ moderat, însă ele au fost totuși studiate rezervându-li-se coloanele optime așa cum rezultă ele din tabelul 5.8 deoarece experimentele anterioare de creștere au dovedit că utilizarea NaOH ca și solvent este mai favorabilă decât utilizarea KOH respectiv o concentrație optimă de nutrient (D_2) conduce la eliminarea opacizării cristalului.[M21].
- Aranjamentul germenilor în Modul 1 este mai favorabilă deoarece transportul nutrientului din zona de solubilizare în zona de cristalizare se face în regim de curgere laminară și în plus o distanță mică față de pereții autoclavei poate cauza ca suprafața cristalului să nu fie plană.
- Celelalte tipuri de interacțiuni chiar dacă au din punct de vedere matematic un index de severitate mai mare, ele nu prezintă interes, neexistând o corelare cu fenomenele fizice și chimice din autoclavă.

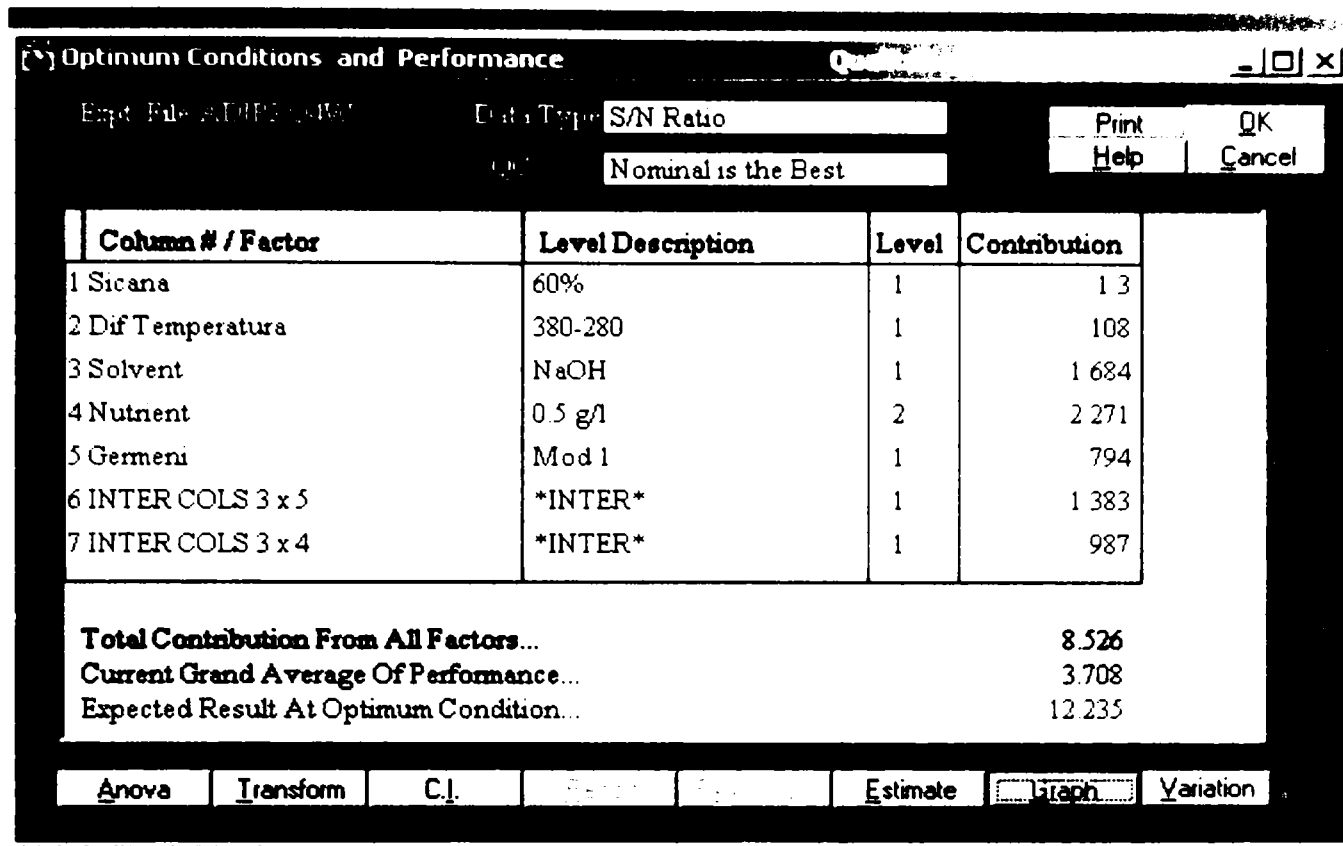


Fig. 5.14 Combinația optimă a nivelurilor factorilor și interacțiunilor precum și valoarea așteptată a raportului S/N la condițiile optime

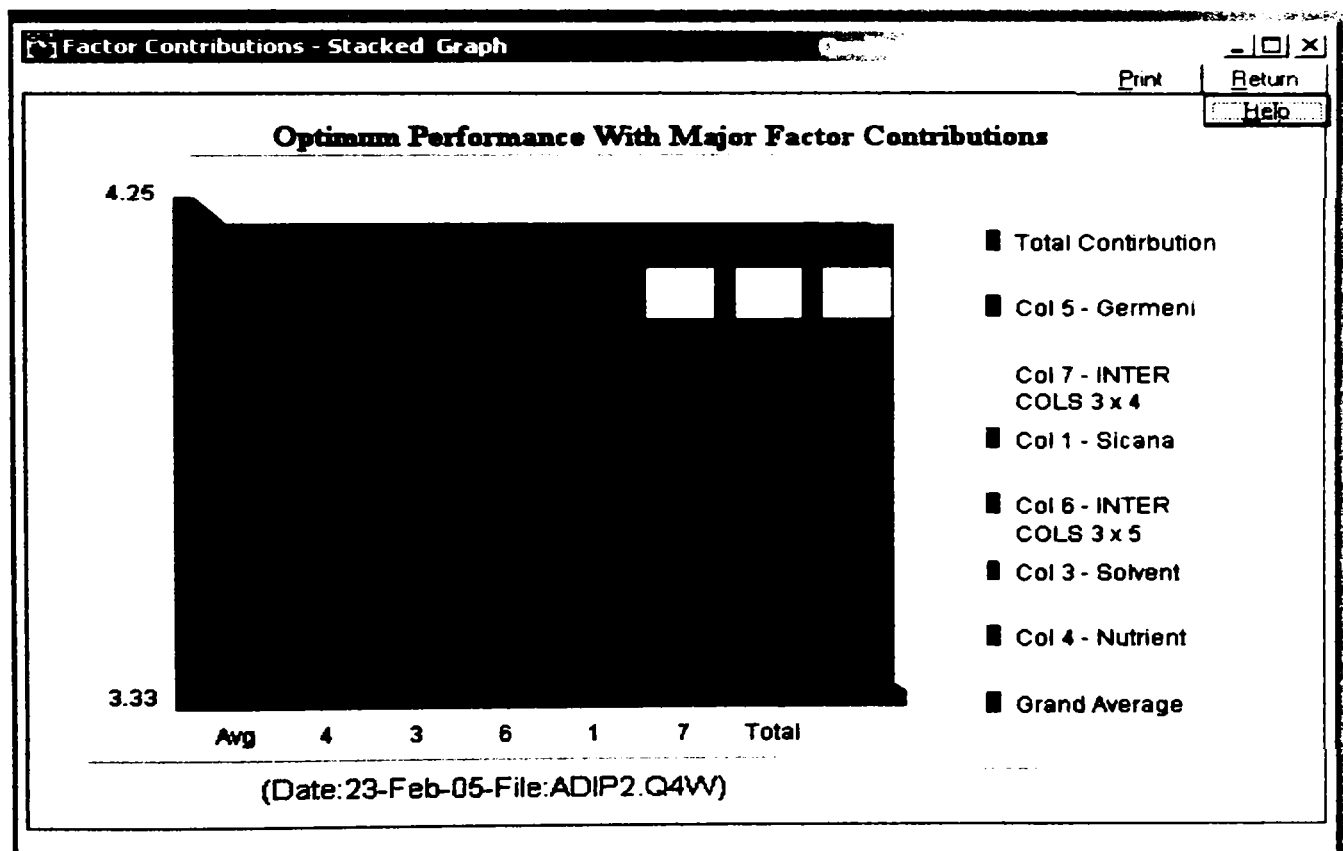


Fig. 5.15 Contribuția factorilor și interacțiunilor la performanța optimă

Input for Variation and Capability Statistics Qualitek-4

This option allows you to plot variation reduction achievable from the Optimum design condition. The improved S/N ratio at the optimum condition corresponds to a reduction in the standard deviation. The assumed normal distributions for the current and improved conditions are plotted. When there is no target/nominal value, average of the trial results is used as the target value. Std. deviation at the improved condition is assumed to be proportional to the change in S/N ratio. (Graph, Cp, and Cpk values are best estimates)

SAVINGS CALCULATION: Reduction of variation is expected to lower the rejection and warranty items. The resulting cost saving is expressed in terms of percentage of the Loss at the current condition. (expressed as Cents/\$1 of Loss, shown with the Variation Reduction Plot)

Note: All entries must consist of experimental or theoretically valid data

| | | |
|-----------------------------------|------------------------|---------------------|
| Current Status | Average Performance | 24.587 |
| | Nominal / Target | 25 |
| | S/N Ratio (SN1) | 3.708 |
| Improved Status | S/N Ratio (SN2) | 12.235 |
| | Quality Characteristic | Nominal is the Best |
| Specification (or Control) Limits | LSL | 23.483 |
| | USL | 26.516 |

Set to: +/- 3 Std. Dev

Expt. File: ADIP2.Q4W Qualitek-4 23-Feb-05

Fig. 5.16 Datele pentru calculul statistic, reducerea variației

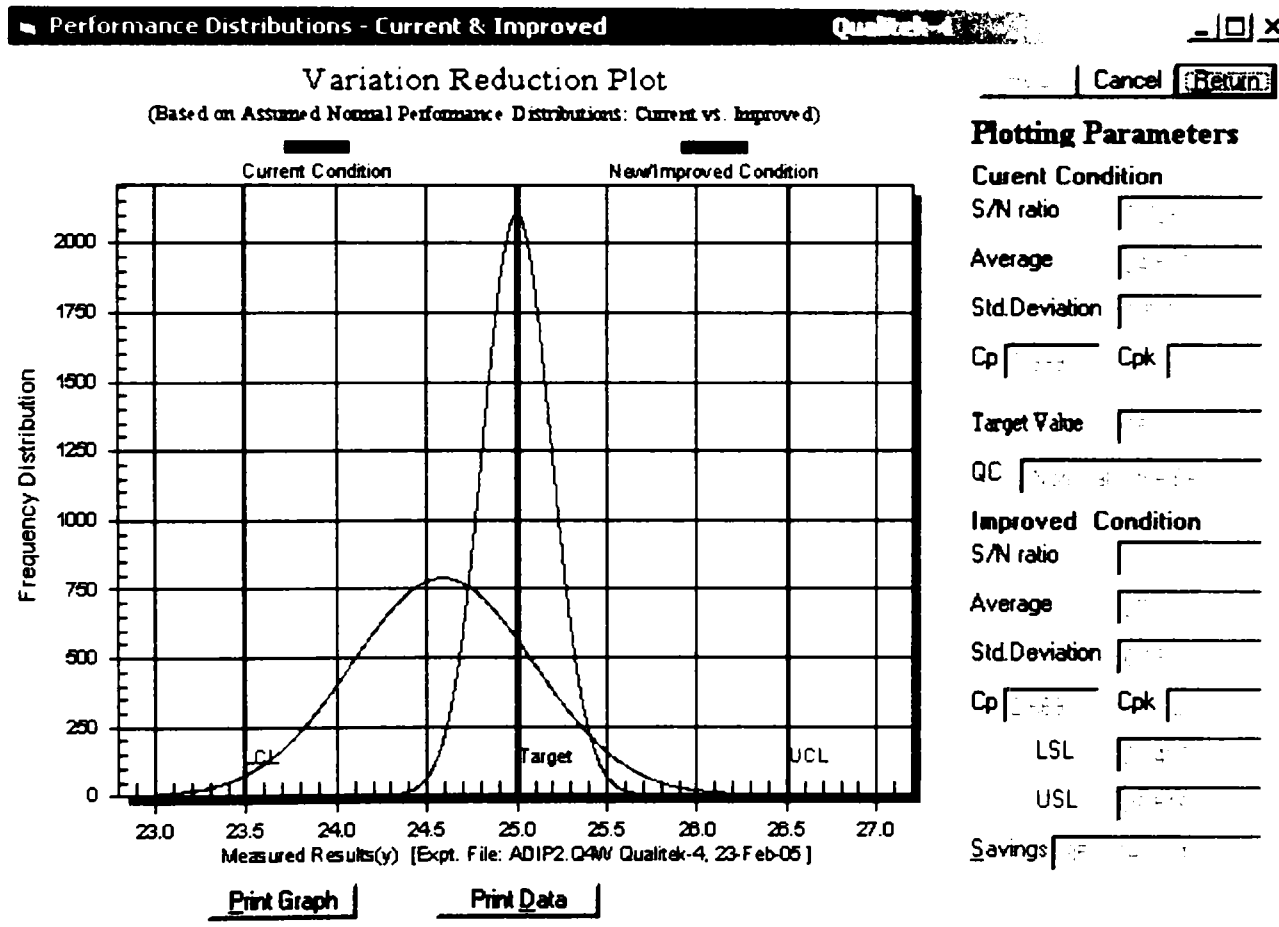


Fig. 5.17 Graficul reducerii variației pe baza ipotezei distribuției normale

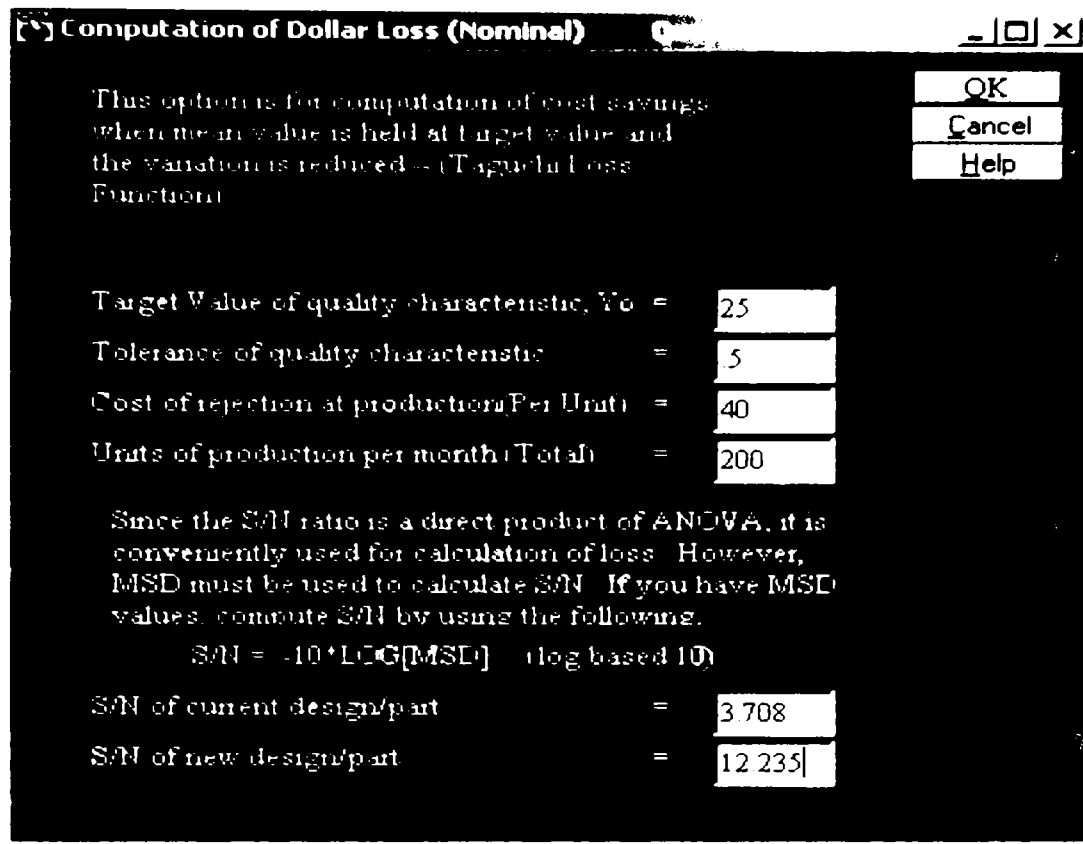


Fig. 5.18 Datele pentru estimarea QLF

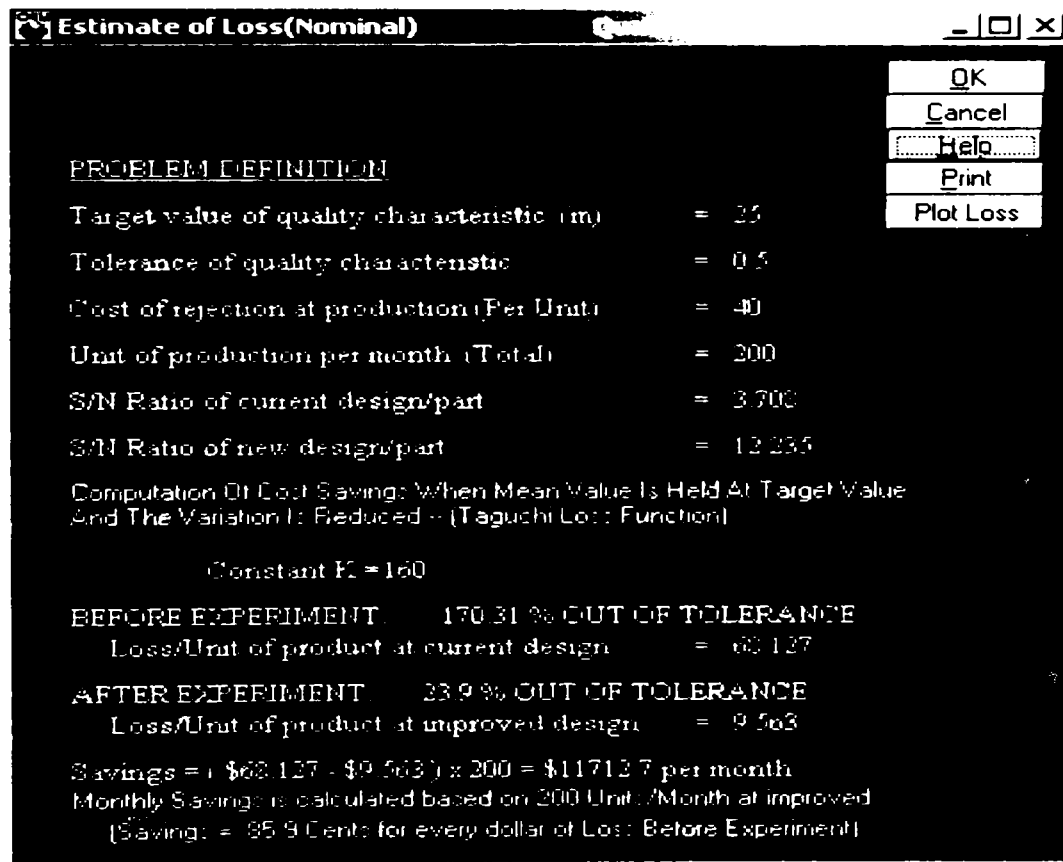


Fig. 5.19 Pierdere așteptată după efectuarea experimentelor în condiții optime

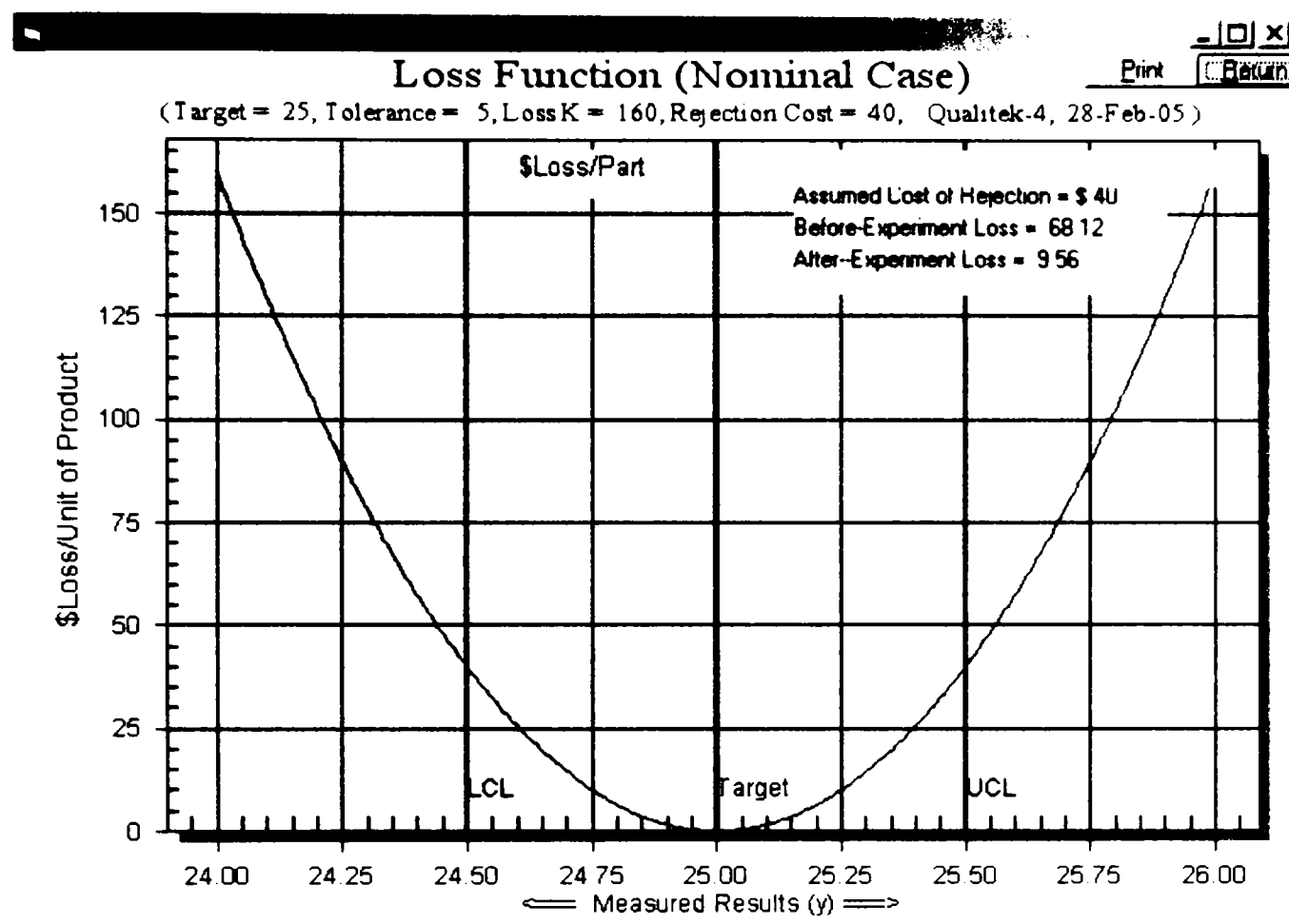


Fig. 5.20 QLF înainte și după experimentare utilizând condițiile optime ale factorilor și interacțiunilor

5.5.3 Experimente de confirmare (Pilot)

5.5.3.1 Experimentul de confirmare numărul 1 (Pilot 1)

Condițiile de realizare a experimentului au fost următoarele:

- Instalația experimentală: autoclavă de laborator de 150 l;
- Procent de umplere 80%;
- Două încălzitoare comandate separat;
- Termocuple de tip Ni-CrNi;
- Deschiderea șicanei: 60%;
- Temperatura de solubilizare: 380 °C;
- Temperatura de cristalizare: 280 °C;
- Gradientul de temperatură: 100 °C;
- Aranjamentul germenilor: Mod 1;
- Presiunea: 2500 bari;
- Solvent 0,5 N NaOH ;
- Durata experimentului: 24 zile;
- Dimensiunea inițială a germenilor pe direcțiile x/y/z: 160/40/2,0 mm;

- Dimensiunea finală a cristalelor: 25,1 ; 24,9 ; 25,1 ; 25,2 ; 24,8 ; 25,0;
- Viteză de creștere pe direcția Oz: 1,5 mm/zi.

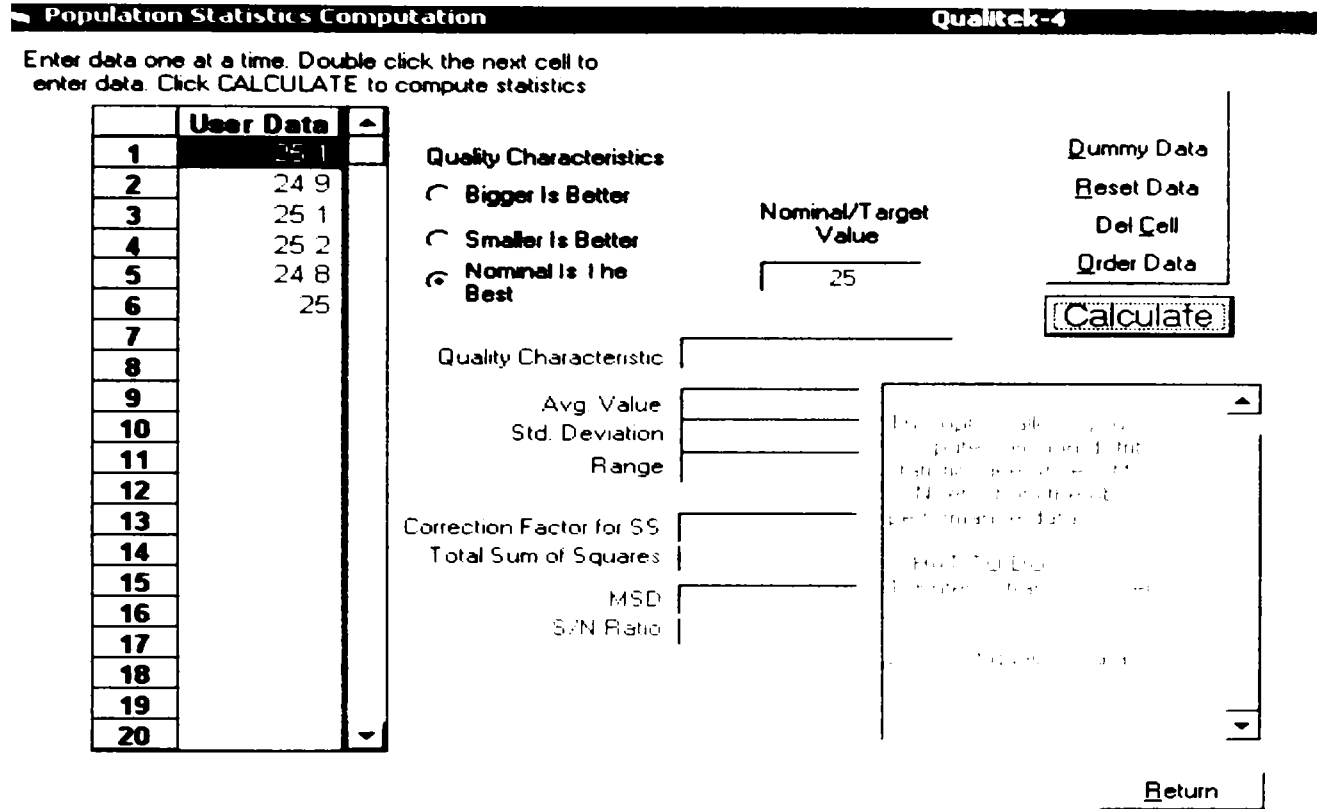


Fig. 5.21 Calculul elementelor statistice și a raportului semnal/zgomot pentru primul experiment de confirmare

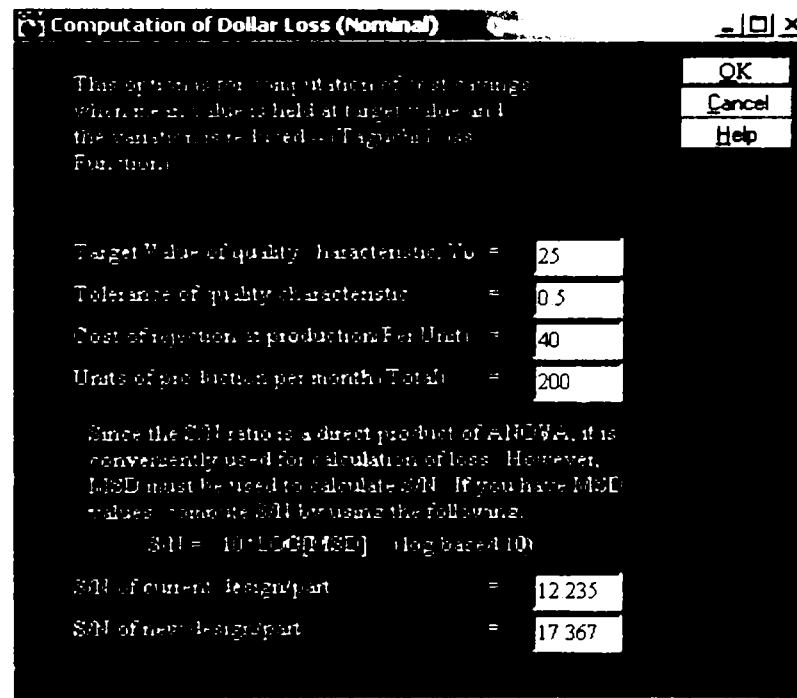


Fig. 5.22 Datele pentru estimarea QLF pentru primul experiment de confirmare

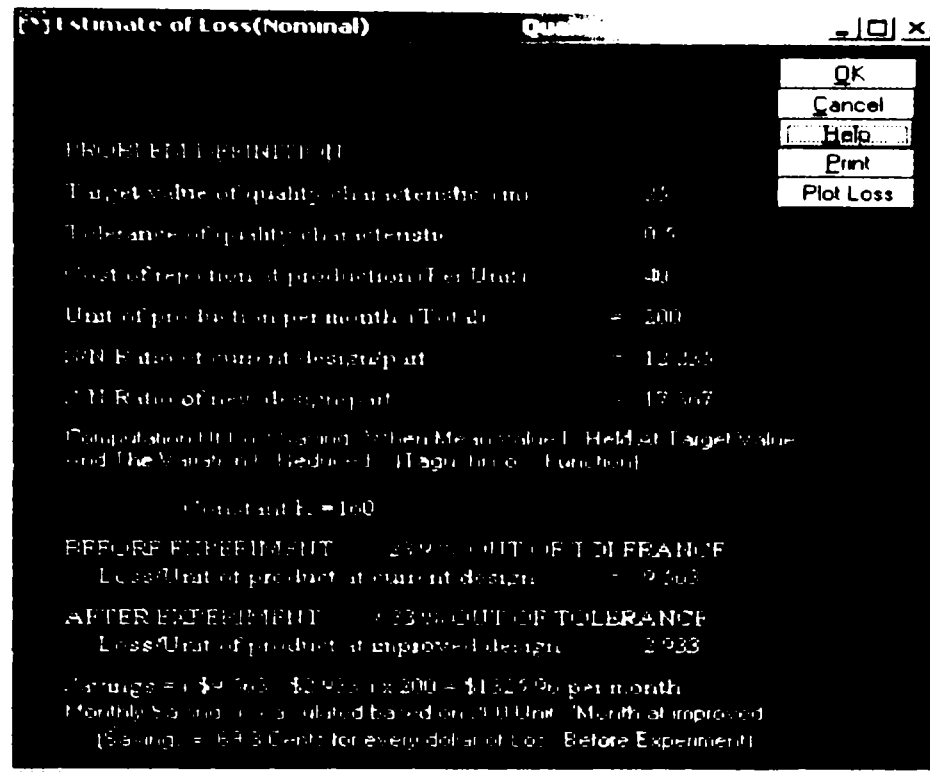


Fig. 5.23 Pierdere așteptată pentru primul experiment de confirmare

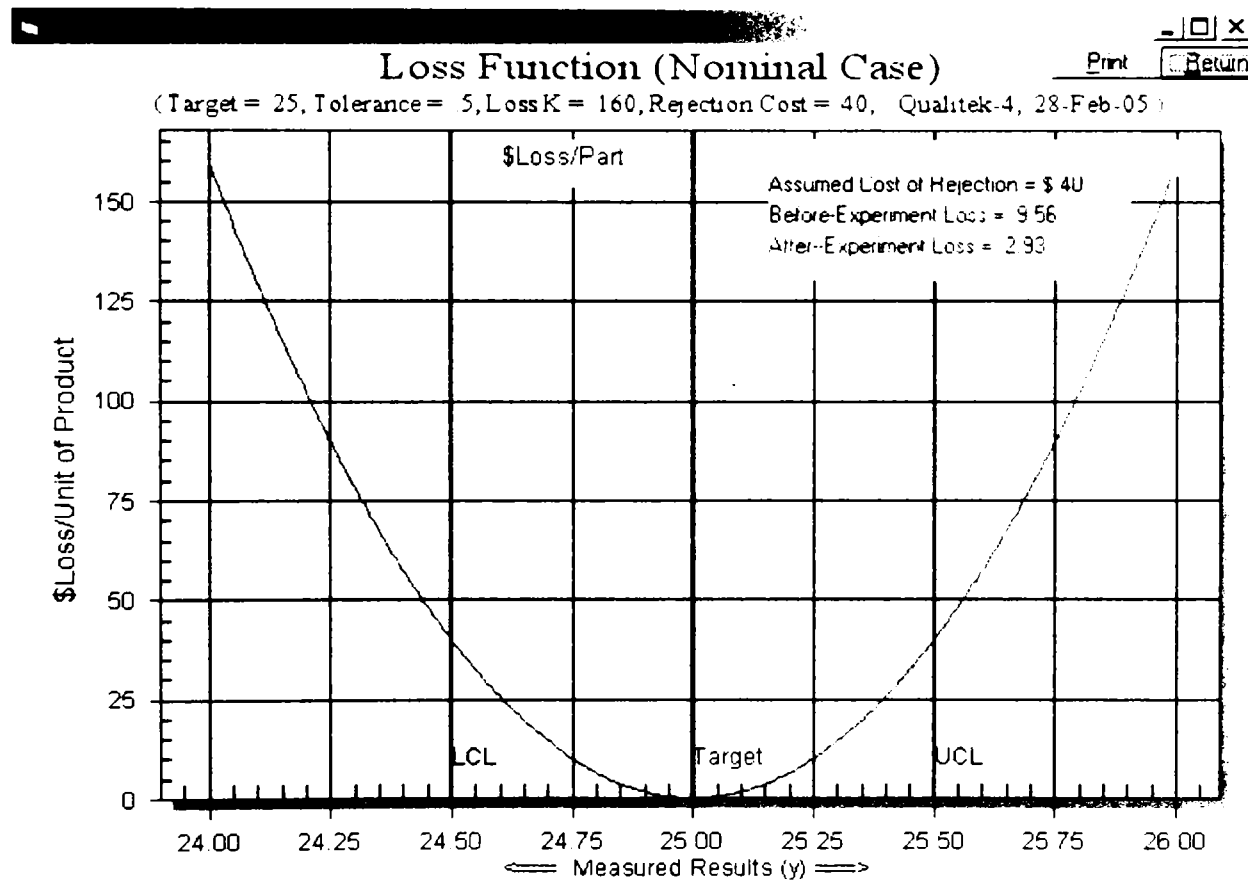


Fig. 5.24 QLF după primul experiment de confirmare

5.5.3.2 Experimentul de confirmare numărul 2 (Pilot 2)

Condițiile de realizare a experimentului au fost următoarele:

- Instalația experimentală: autoclavă de laborator de 150 l
- Procent de umplere 80%
- Două încălzitoare comandate separat
- Termocuple de tip Ni-CrNi
- Deschiderea șicanei: 60%
- Temperatura de solubilizare: 380 °C
- Temperatura de cristalizare: 280 °C
- Gradientul de temperatură: 100 °C
- Aranjamentul germenilor: Mod 1
- Presiunea: 2500 bari
- Solvent 0,5 N NaOH
- Durata experimentului: 24 zile
- Dimensiunea inițială a germenilor pe direcțiile x/y/z: 160/40/2,0 mm
- Dimensiunea finală a cristalelor: 25,1 ; 25,0 ; 24,9 ; 25,2 ; 24,8 ; 25,2
- Viteză de creștere pe direcția Oz: 1,5 mm/zi

Population Statistics Computation **Qualitek-4**

Enter data one at a time. Double click the next cell to enter data. Click CALCULATE to compute statistics.

| User Data | |
|-----------|------|
| 1 | 25.2 |
| 2 | 24.9 |
| 3 | 25 |
| 4 | 25.2 |
| 5 | 24.8 |
| 6 | 25.1 |
| 7 | |
| 8 | |
| 9 | |
| 10 | |
| 11 | |
| 12 | |
| 13 | |
| 14 | |
| 15 | |
| 16 | |
| 17 | |
| 18 | |
| 19 | |
| 20 | |

Quality Characteristics

Bigger Is Better
 Smaller Is Better
 Nominal Is The Best

Nominal/Target Value:

Dummy Data
Reset Data
Del Cell
Order Data
Calculate

Quality Characteristic:

Avg. Value:
 Std. Deviation:
 Range:

Correction Factor for SS:
 Total Sum of Squares:

MSD:
 S/N Ratio:

OPTION UTILITY

=====

This option allows you to compute common distribution statistics like StDev, MSD, S/N, etc. from the observed performance data.

WHAT TO DO?

1. Enter or transfer observed data
2. Select quality characteristic
3. Click on Calculate

Return

Fig. 5.25 Calculul elementelor statistice și a raportului semnal/zgomot pentru al doilea experiment de confirmare

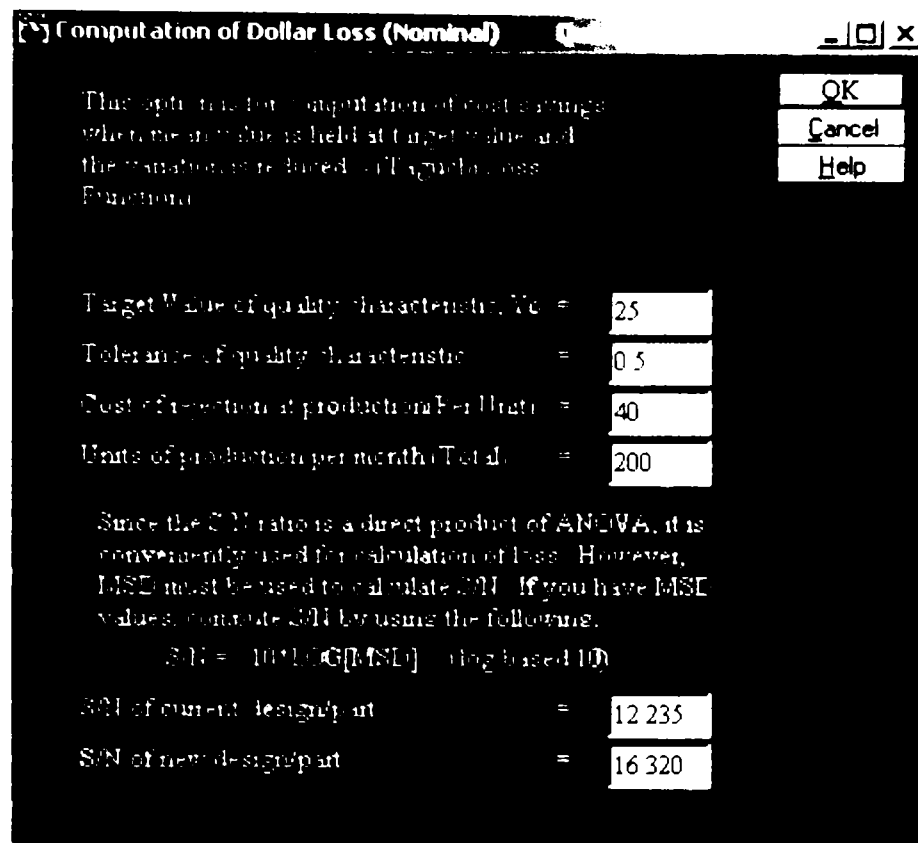


Fig. 5.26 Datele pentru estimarea QLF pentru al doilea experiment de confirmare

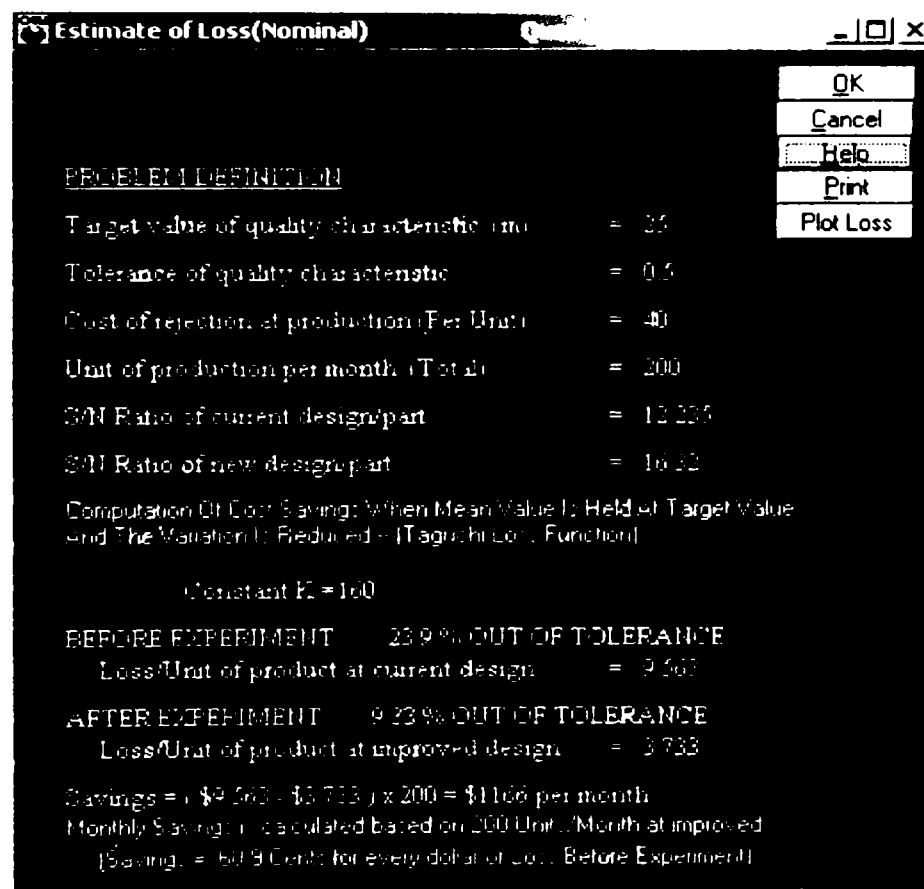


Fig. 5.27 Pierdere așteptată pentru al doilea experiment de confirmare

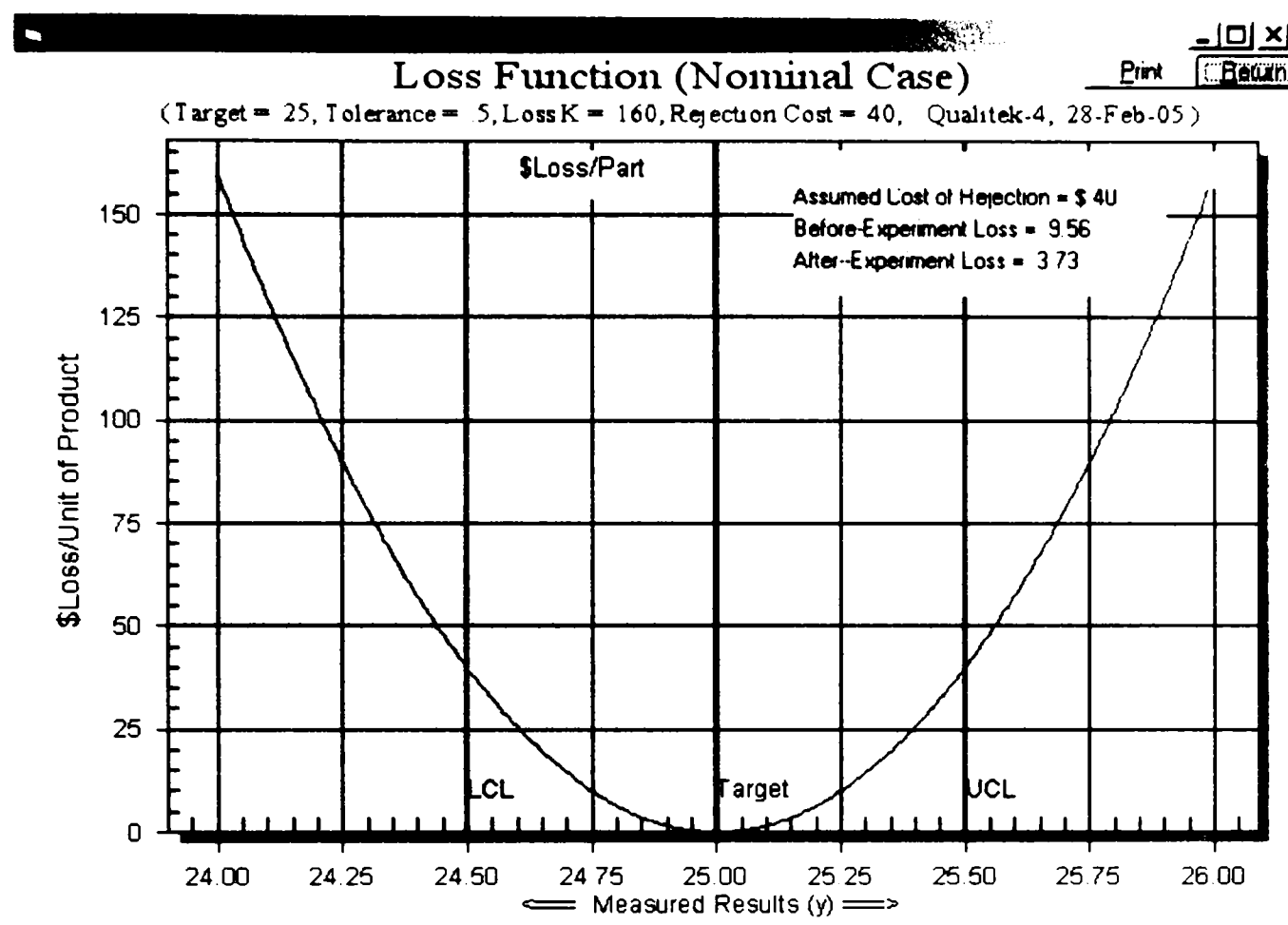


Fig. 5.28 QLF după al doilea experiment de confirmare

5.5.3.3 Experimentul de confirmare numărul 3 (Pilot 3)

Condițiile de realizare a experimentului au fost următoarele:

- Instalația experimentală: autoclavă de laborator de 150 l
- Procent de umplere 80%
- Două încălzitoare comandate separat
- Termocuple de tip Ni-CrNi
- Deschiderea șicanei: 60%
- Temperatura de solubilizare: 380 °C
- Temperatura de cristalizare: 280 °C
- Gradientul de temperatură: 100 °C
- Aranjamentul germenilor: Mod 1
- Presiunea: 2500 bari
- Solvent 0,5 M NaOH
- Durata experimentului: 24 zile
- Dimensiunea inițială a germenilor pe direcțiile x/y/z: 160/40/2,0 mm
- Dimensiunea finală a cristalelor: Tab. 5.11
- Viteză de creștere pe direcția Oz: 1,5 mm/zi

| Coloana de cristale | Dimensiunea finală a cristalelor [mm] | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Coloana/Rândul | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 24,9 | 24,8 | 24,9 | 25 | 25,1 | 24,8 |
| 2 | 25,2 | 25,1 | 24,9 | 25,1 | 25,1 | 24,9 |
| 3 | 25,2 | 25,1 | 25 | 24,8 | 24,8 | 25 |
| 4 | 24,9 | 25,1 | 24,8 | 24,9 | 24,8 | 25,1 |

Tab. 5.11 Dimensiunea finală a cristalelor din Experimentul de confirmare numărul 3

Population Statistics

Enter data one at a time. Double click the next cell to enter data. Click CALCULATE to compute statistics.

| | User Data |
|----|-----------|
| 1 | 24.8 |
| 2 | 24.9 |
| 3 | 24.9 |
| 4 | 25 |
| 5 | 25.1 |
| 6 | 24.8 |
| 7 | 25.2 |
| 8 | 25.1 |
| 9 | 24.9 |
| 10 | 25.1 |
| 11 | 25.1 |
| 12 | 24.9 |
| 13 | 25.2 |
| 14 | 25.1 |
| 15 | 25 |
| 16 | 24.8 |
| 17 | 24.8 |
| 18 | 25 |
| 19 | 24.9 |
| 20 | 25.1 |

Calculate

Return

Dummy Data
Reset Data
Del Cell
Order Data
Plot Normal Distribution

Quality Characteristics

Bigger Is Better
 Smaller Is Better
 Nominal Is The Best

Nominal/Target Value
25

Quality Characteristic

Avg. Value

Correction Factor for 95

MSD

Fig. 5.29 Calculul elementelor statistice și a raportului semnal/zgomot pentru al treilea experiment de confirmare

Input for Variation and Capability Statistics Qualitek-4

This option allows you to plot variation reduction achievable from the Optimum design condition. The improved S/N ratio at the optimum condition corresponds to a reduction in the standard deviation. The assumed normal distributions for the current and improved conditions are plotted. When there is no target/nominal value, average of the trial results is used as the target value. Std. deviation at the improved condition is assumed to be proportional to the change in S/N ratio. (Graph, Cp, and Cpk values are best estimates)

SAVINGS CALCULATION: Reduction of variation is expected to lower the rejection and warranty items. The resulting cost saving is expressed in terms of percentage of the Loss at the current condition. (expressed as Cents/\$1 of Loss, shown with the Variation Reduction Plot)

Note: All entries must consist of experimental or theoretically valid data

| | | |
|-----------------------------------|------------------------|--|
| | Average Performance | 24.97 |
| | Nominal / Target | 25 |
| | S/N Ratio (SN1) | 12.235 |
| | | |
| Improved Status | S/N Ratio (SN2) | 17.269 |
| | Quality Characteristic | Nominal is the Best |
| Specification (or Control) Limits | | |
| LSL | 24.272 | |
| USL | 25.727 | |
| | | <input checked="" type="checkbox"/> Set to: +/- 3 Std. Dev |

Expt File: ADIP2.Q4W Qualitek-4 06-Apr-05

Fig. 5.30 Datele pentru calculul statistic, reducerea variației, pentru experimentul de confirmare numărul 3

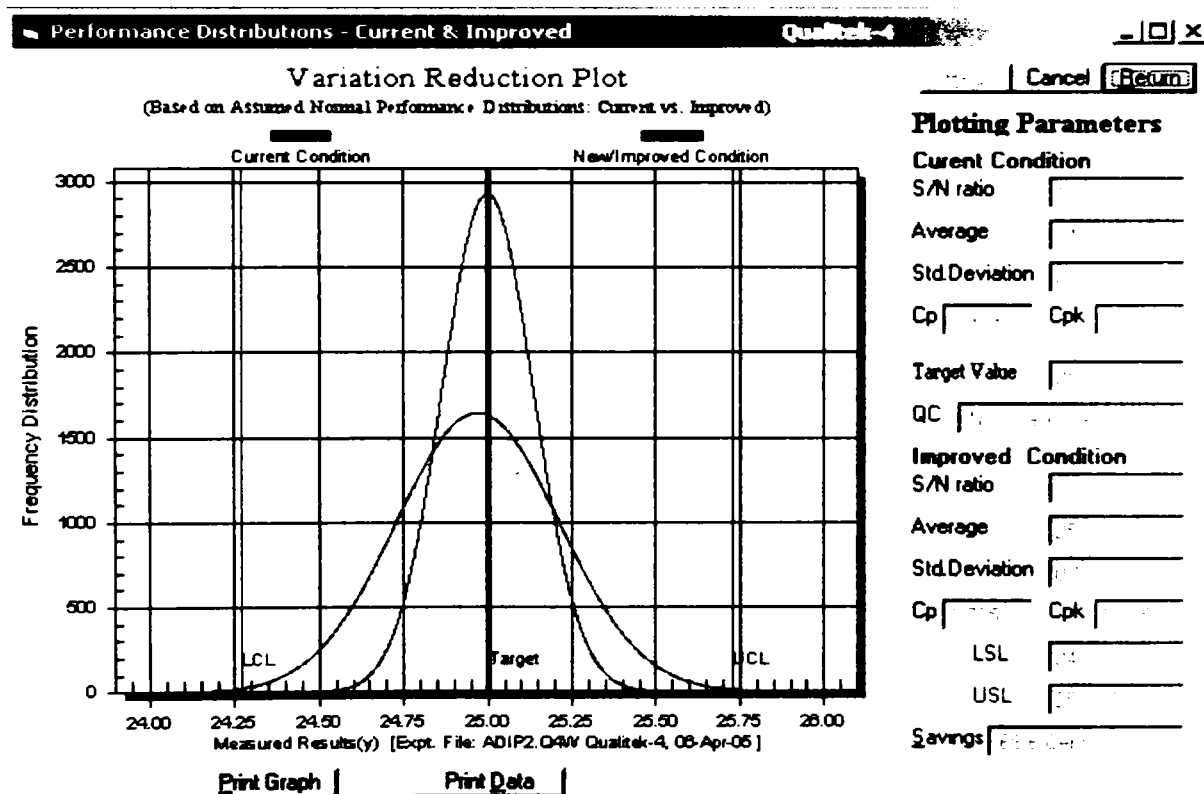


Fig. 5.31 Graficul reducerii variației pe baza ipotezei distribuției normale

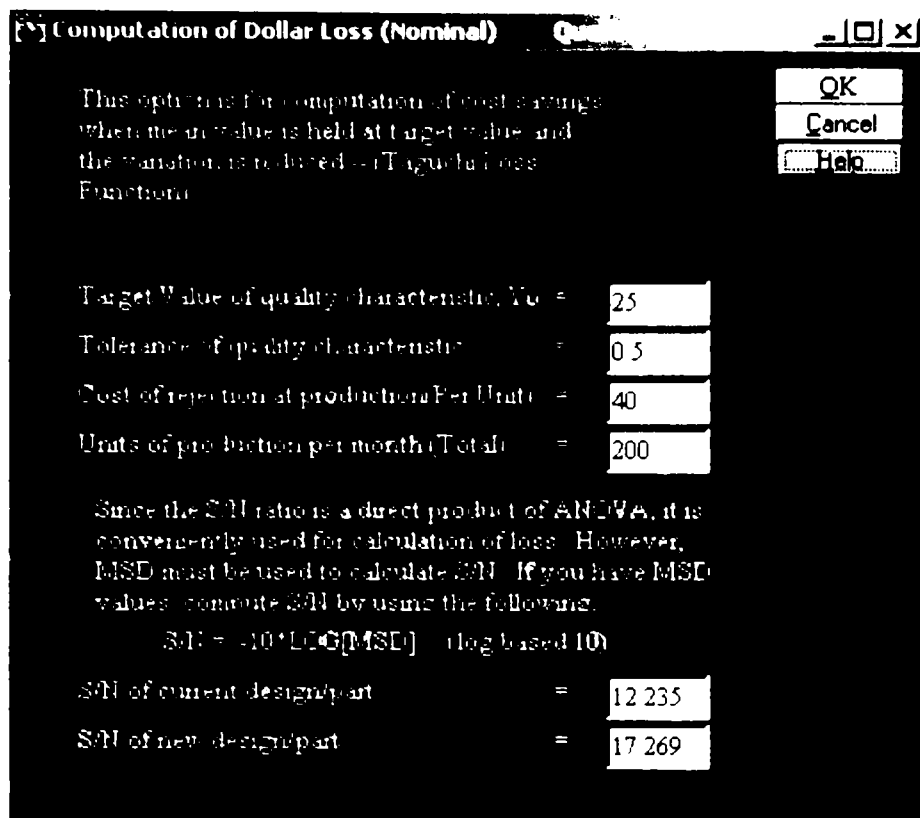


Fig. 5.32 Datele pentru estimarea QLF pentru al treilea experiment de confirmare

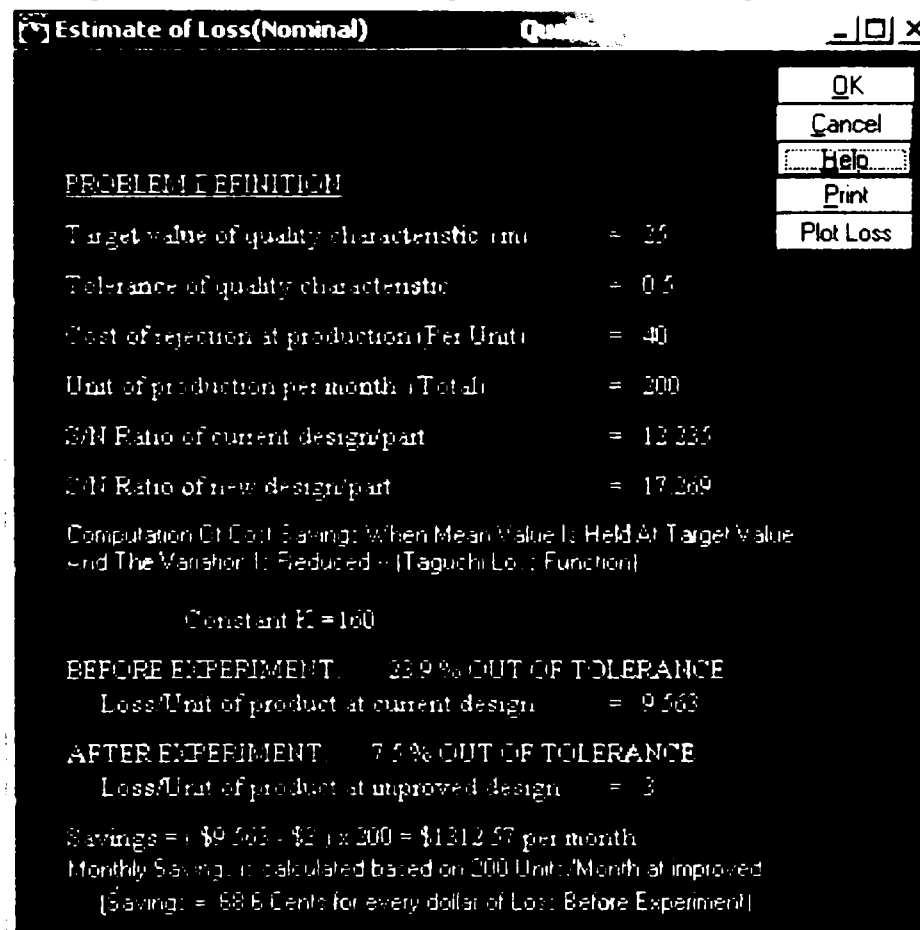


Fig. 5.33 Pierdere așteptată pentru al treilea experiment de confirmare

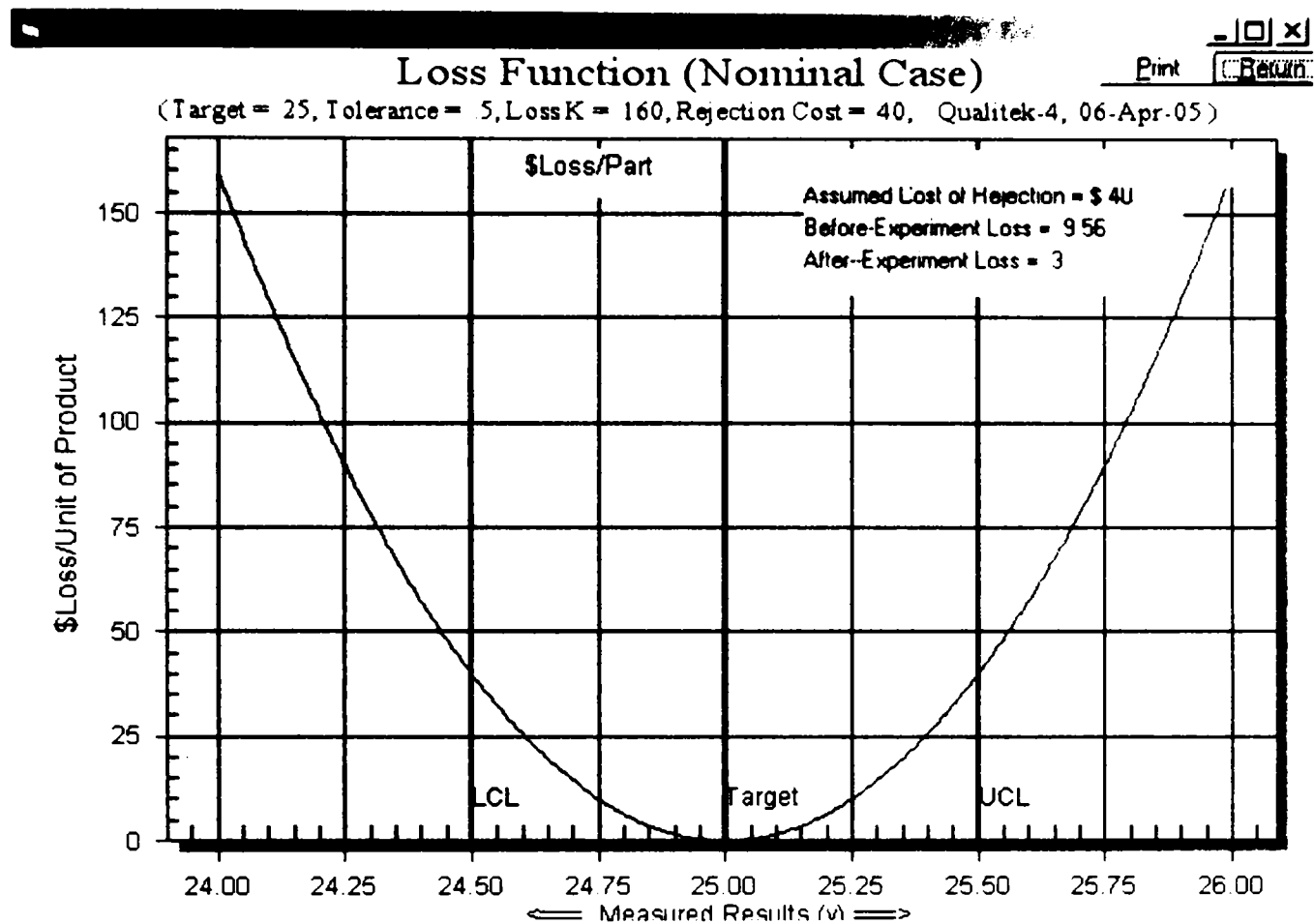


Fig. 5.34 QLF după al treilea experiment de confirmare

Concluzii:

- Combinația de factori și interacțiuni din relația (5.2) propune folosirea unei deschideri a șicanei de 40% însă conform Fig 4.15 (Cap IV), deschiderea șicanei influențează viteza de creștere și de aceea trebuie optat pentru o deschidere de 60%. De asemenea concentrația nutrientului de 0,4 g/l nu este favorabilă datorită motivelor prezentate anterior.
- Combinația de factori și interacțiuni din relația (5.3) are același inconvenient privitor la deschiderea șicanei și în plus propune aranjamentul 2 al germenilor care este defavorabil pentru motivele prezentate anterior.
- Combinația de factori și interacțiuni din Fig. 5.14 este considerată cea corectă. Se observă că valorile preconizate sunt net îmbunătățite conform celor prezentate în Fig. 5.16, Fig. 5.17 și Fig. 5.20.
- Experimentele 1 și 2 (volum redus) de confirmare arată o îmbunătățire a raportului S/N față de cel preconizat, o reducere a abaterii medii pătratice respectiv o reducere semnificativă a pierderii așteptate
- Experimentul 3 de confirmare arată de asemenea o îmbunătățire a raportului S/N față de cel preconizat, o reducere a abaterii medii pătratice respectiv o reducere semnificativă a pierderii așteptate

5.6 Determinarea permitivității dielectrice a monocristalelor de α -cuarț

Determinarea permitivității dielectrice s-a făcut printr-o metodă de rezonanță combinată cu una de substituție, folosind Q-metrul TESLA BM 311E, condensatorul de măsură TESLA BP 3110 și pentru realizarea acordului pe diverse game de frecvență, bobine cu diferite valori de inductanță [M21].

Proba de cuarț se introduce între plăcile condensatorului de măsură și alegându-se o bobină cu o valoare potrivită a inductanței, se realizează rezonanța prin ajustarea condensatorului de acord al Q-metrului. Indicația voltmetrului electronic de ieșire al Q-metrului are în acest caz indicația maximă.

Se scoate proba de cuarț din condensatorul de măsură și se modifică distanța dintre plăci până la realizarea din nou a rezonanței (indicație maximă a voltmetrului de ieșire).

Pentru ambele situații, rezonanța are loc la aceeași valoare a capacității condensatorului de măsură iar distanța dintre electrozi și suprafața plăcilor este măsurată cu șurubul micrometric al condensatorului de măsură.

Dimensiunile plăcilor circulare ale condensatorului de măsură fiind de 50 mm și deoarece cristalele crescute în autoclava Pilot au o secțiune dreptunghiulară cu arie mai mică, s-au realizat probe de cuarț cu aria de 600 mm² și o grosime de 3mm, erorile în determinarea lui ϵ prin folosirea unei probe cu suprafață mai mică fiind abia la a treia zecimală [M21].

Capacitatea condensatorului de măsură atunci când se introduce proba de cuarț se determină cu relația (5.7).

$$C = \epsilon_{xc} \frac{S_C}{d_1} + \epsilon_0 \frac{S - S_C}{d_1} \quad (5.7)$$

unde: S_C – aria probei de cuarț

S – aria plăcilor condensatorului

d_1 – distanța dintre plăcile condensatorului (grosimea probei)

ϵ_{xc} – permitivitatea dielectrică a probei

ϵ_0 – permitivitatea dielectrică a aerului

Dacă rezonanța se realizează fără introducerea probei de cuarț în condensatorul de măsură, capacitatea acestuia se determină cu relația (5.8).

$$C' = \epsilon_0 \frac{S}{d_2} \quad (5.8)$$

unde d_2 – noua distanță dintre plăcile condensatorului

Așa cum s-a arătat anterior $C = C'$ și deci rezultă relația (5.9)

$$\epsilon_{xc} \frac{S_C}{d_1} + \epsilon_0 \frac{S - S_C}{d_1} = \epsilon_0 \frac{S}{d_2} \quad (5.9)$$

Expresia permitivității dielectrice relative a cuarțului rezultă conform relației (5.10)

$$\epsilon_{\text{quartz}} = \frac{S}{S_C} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right) + 1 \quad (5.10)$$

Observații:

- Precizia de măsurare este $\pm (4 + 1,5/d_2)$ % adică 5%
- Probele de cuarț au fost tăiate din două cristale obținute în cele două experimente de confirmare și pentru comparare au fost folosite două probe tăiate în același mod (din zona Z de creștere). O probă a fost tăiată dintr-un cristal crescut în autoclava Pilot cu caracteristicile date mai jos și una dintr-un cristal crescut în Japonia.
- Dimensiunile probelor sunt date în tabelul 5.12.
- S-au folosit trei bobine pentru lucrul în gamele 1,1 – 3,8 MHz; 8,5 – 27 MHz; 28 – 50 MHz.
- Rezultatele experimentale pentru determinarea permitivității dielectrice relative a cuarțului sunt date în tabelul 5.13.

Condițiile de obținere a cristalului de comparare crescut în autoclava Pilot

- Instalația experimentală: autoclavă de laborator de 150 l
- Procent de umplere 80%
- Două încălzitoare comandate separat
- Termocuple de tip Ni-CrNi
- Deschiderea șicanei: 60%
- Temperatura medie în zona de creștere: 360 °C
- Presiunea: 2200 bari
- Solvent 0,5 N NaOH
- Timp de creștere: 504 ore
- Dimensiunea inițială a germenilor pe direcțiile x/y/z: 143/22/2,0 mm
- Dimensiunea finală a cristalului: 19,2
- Viteză de creștere pe direcția Oz: 0,4 mm/zi
- Factorul de calitate $Q_R=1,4 \cdot 10^6$

| Dimensiuni | Probă de cuarț din Experimentul de confirmare 1 | Probă de cuarț din Experimentul de confirmare 2 | Probă de cuarț din cristalul de comparare Românesc | Probă de cuarț din cristalul de comparare Japonez |
|-------------------------|---|---|--|---|
| X [mm] | 30 | 30 | 30 | 42,7 |
| Y [mm] | 20 | 20 | 20 | 21,8 |
| Z [mm] | 3 | 3 | 3 | 1,5 |
| Aria [mm ²] | 600 | 600 | 600 | 930,8 |
| Q | | | $Q_R = 1,4 \cdot 10^6$ | $Q_J = 1,8 \cdot 10^6$ |
| Orientare | Axa Z perpendiculară pe planul probei | Axa Z perpendiculară pe planul probei | Axa Z perpendiculară pe planul probei | Axa Z perpendiculară pe planul probei |

Tab. 5.12 Dimensiunile probelor de cuarț pentru determinarea permitivității

Permitivitatea medie relativă pentru cristalul obținut din Exp.de confirmare 1

$$\epsilon_{\text{quartz},1} = 4,178 \pm 0,09$$

Permitivitatea medie relativă pentru cristalul obținut din Exp.de confirmare 2

$$\epsilon_{\text{quartz},2} = 4,186 \pm 0,09$$

Permitivitatea medie relativă pentru cristalul de comparare Românesc

$$\epsilon_{\text{quartz},CR} = 4,25 \pm 0,09$$

Permitivitatea medie relativă pentru cristalul de comparare Japonez

$$\epsilon_{\text{quartz},CJ} = 4,18 \pm 0,09$$

Concluzie:

Se observă că permitivitățile medii relative pentru cristalele obținute din experimentele de confirmare 1 și 2 sunt comparabile cu permitivitatea medie relativă a cristalului Japonez.

5.7 Determinarea factorului de calitate Q în infraroșu al monocristalelor de α -cuarț

Calitatea monocristalelor depinde de concentrația de impurități, care pot substitui atomii de siliciu sau oxigen sau pot fi așezate în interstiții, lucru realizat funcție de diametrul atomilor de impuritate, valență etc. [M21], [M22].

Una din cele mai importante impurități nedorite este hidrogenul a cărui prezență determină înmulțirea și mobilitatea dislocațiilor prin incluziunile interstițiale pe care le formează.

Hidrogenul se fixează în rețea sub formă de grupare OH, în locul oxigenului, datorită afinității deosebite pe care o manifestă față de oxigen, comportându-se ca hidrogen interstițial.

Factorul de calitate electric Q_e al unui dispozitiv este bine corelat cu factorul de calitate Q al materialului, care se apreciază prin absorbția în infraroșu.

S-a constatat experimental că odată cu creșterea factorului de calitate Q al materialului, apare o creștere mai rapidă a factorului de calitate Q_e al dispozitivului. De asemenea proprietățile fizice ale monocristalelor cum ar fi tensiunea de spargere, duritatea, uniformitatea, fragilitatea sunt reflectate de valoarea factorului de calitate Q. În plus, monocristalele cu valoare ridicată a factorului de calitate Q sunt mai ușor de prelucrat, adâncimea distrugerii rețelei cristaline (determinată de polizare) crește cu scăderea factorului de calitate Q (monocristalul devine mai fragil).

Factorul de calitate Q în infraroșu este bine corelat cu conținutul de hidrogen al cristalului [M21]. Parametrul care se măsoară este un coeficient de absorbție α în infraroșu, definit astfel încât o probă de grosime d, transmite o fracțiune T din lumina incidentă conform relației (5.11).

$$T = \frac{(1 - R)^2 \cdot 10^{-\alpha d}}{1 - R^2 \cdot 10^{-2\alpha d}} \quad (5.11)$$

unde: R – coeficientul de reflexie al suprafeței ($R \approx 0,04$) ce depinde de lustruirea suprafeței

α – funcție de frecvență (uzual raportată la numărul de undă ν)

Observații:

- Scopul nu este cunoașterea lui α , ci numai a acelei părți α^* , care este corelată cu conținutul de hidrogen.
- Valoarea măsurată a lui α^* depinde de puterea de rezoluție a spectrometrului, depinde într-o oarecare măsură de grosimea probei [M21], de polarizarea fascicolului luminos etc.

Relația (5.12) este dată de Brice în [B16] pentru Q în infraroșu a monocristalelor.

$$Q = C \cdot 10^5 \frac{1}{\alpha^*_{\nu}} \quad (5.12)$$

unde: C = 1,35 pentru $\nu = 3500 \text{ cm}^{-1}$

C = 1,69 pentru $\nu = 3410 \text{ cm}^{-1}$

Valorile lui C pentru $\nu = 3585 \text{ cm}^{-1}$ sunt date în tabelul 5.13

| Rezoluția spectrometrului [cm^{-1}] | C |
|---|------|
| $\leq 1,2$ | 1,60 |
| 1,4 | 1,56 |
| 1,6 | 1,46 |
| 1,8 | 1,41 |
| $\geq 2,0$ | 1,39 |

Tab. 5.13 Valorile lui C din relația (5.8) pentru α^*_{3585}

Observații:

- Relația (5.8) pentru determinarea lui Q nu este unanim acceptată [M21].
- În domeniul $1,8 \cdot 10^6 - 2,0 \cdot 10^6$, divergența pentru diferite lungimi de undă este de maximum 10%.

Conform firmei Toyo-Quartz [M21] se calculează coeficientul de absorbție α la 3585 cm^{-1} cu relația (5.13) iar apoi se calculează valoarea lui Q cu relația (5.14).

$$\alpha = \frac{1}{d} \log \frac{T_0}{T} \quad (5.13)$$

unde: T_0 – este procentul de transmisie la 3900 cm^{-1}

T – este procentul de transmisie la 3585 cm^{-1}

d – grosimea probei [cm]

$$\frac{10^6}{Q} = 0,04 \cdot \alpha^2 + 7,44 \cdot \alpha + 0,168 \quad (5.14)$$

Conform firmei Sawyer [M21], se calculează coeficientul de absorbție α cu relația (5.15) iar valoarea lui Q cu relația (5.16). Proba se taie perpendicular pe axa Y și se trimite un fascicol IR de-a lungul axei Y. Se înregistrează absorbțiile la 2857 nm (3500 cm^{-1}) și 2632 nm (3800 cm^{-1}).

$$\alpha = (\log T_{3800} - \log T_{3500}) \cdot \frac{1}{d} \quad (5.15)$$

$$\frac{10^6}{Q} = 0,114 + 7,47 \cdot \alpha - 0,45 \cdot \alpha^2 \quad (5.16)$$

Pentru determinarea factorului de calitate s-au folosit două monocristale obținute în experimentul de confirmare numărul 3 (Fig. 5.35). Modul de tăiere a probelor din cristalul de comparare [M22], sunt prezentate în Figura 5.36. Sunt prezentate de asemenea sectoarele și zonele în care s-au făcut determinările de absorbție în IR.

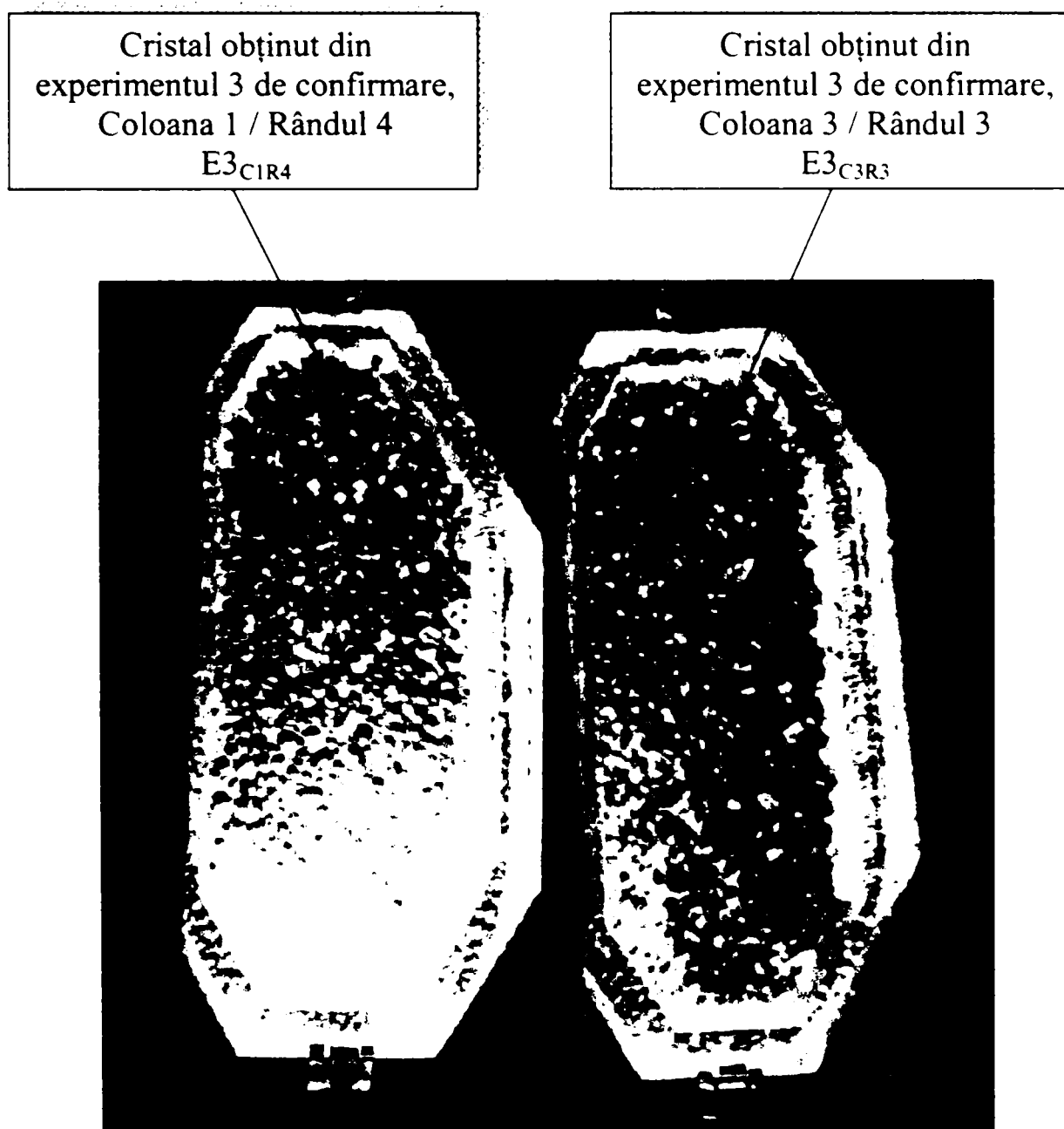


Fig. 5.35 Monocristale de α -cuarț obținute în experimentul de confirmare numărul 3

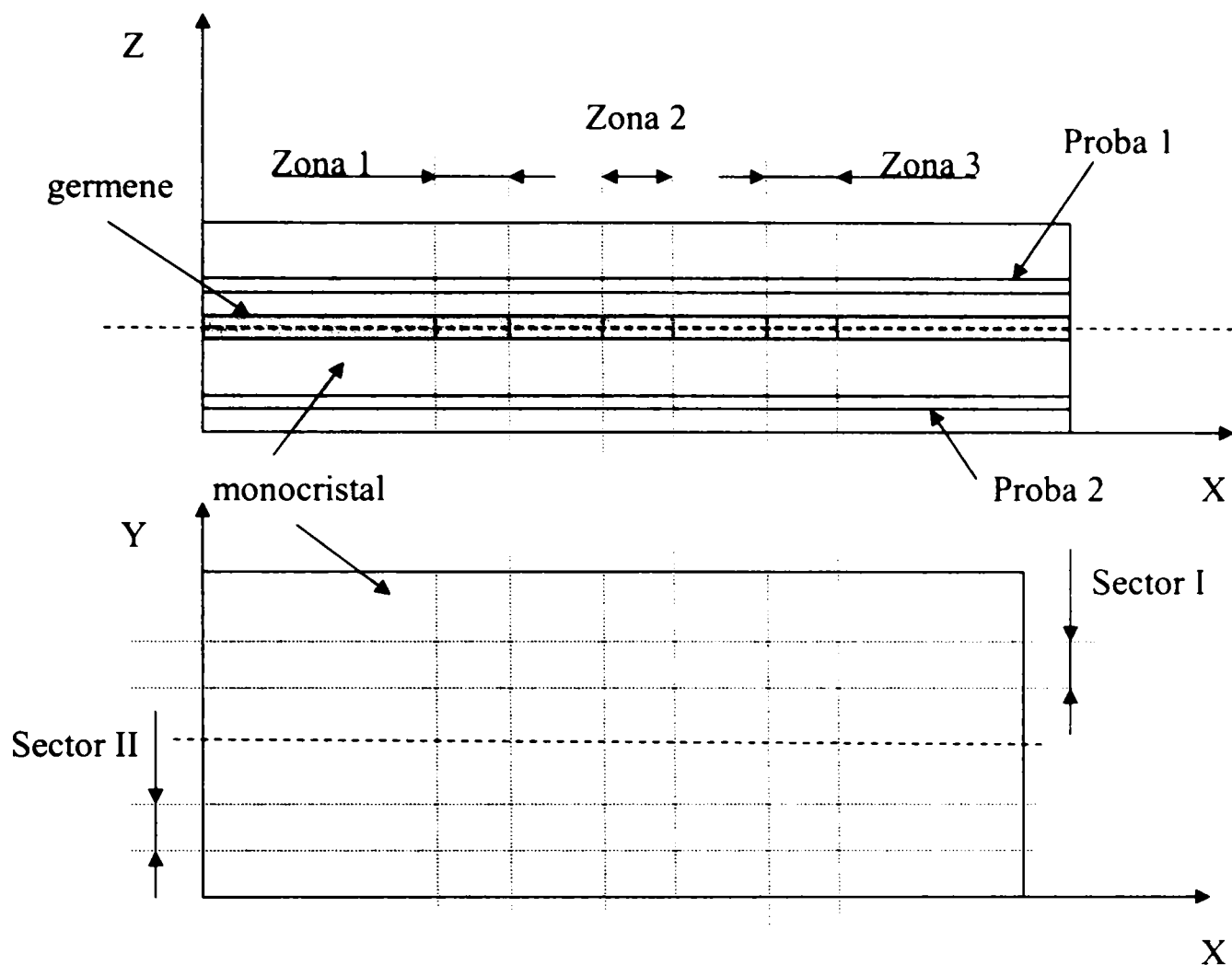


Fig. 5.36 Modul de tăiere a probelor și zonele și sectoarele pentru înregistrarea spectrogramelor pentru cristalul de comparare

Valorile T_0 , T , α și Q pentru probele obținute din monocristalele crescute în experimentul de confirmare numărul 3, respectiv pentru probele obținute din monocristalul de comparare, sunt prezentate în Tab. 5.14 – Tab. 5.17.

| Monocristal de comparare | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|------|--------|-------|-------|----------|----------------|----------------------|
| Proba | Sector | Zona | d [cm] | T_0 | T | α | $Q \cdot 10^6$ | $Q_{med} \cdot 10^6$ |
| 1 | I | 1 | 1,02 | 80,18 | 66,44 | 0,080 | 1,309 | 1,312 |
| | | 2 | | 79,96 | 66,26 | 0,079 | 1,313 | |
| | | 3 | | 79,94 | 66,33 | 0,079 | 1,316 | |
| | II | 1 | | 85,88 | 75,34 | 0,080 | 1,308 | 1,308 |
| | | 2 | | 85,78 | 75,62 | 0,080 | 1,303 | |
| | | 3 | | 79,97 | 66,33 | 0,079 | 1,314 | |

Tab. 5.14 Valorile T_0 , T , α și Q pentru monocristalul de comparare, Proba 1

| Monocristal de comparare | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|------|--------|----------------|-------|-------|-------------------|-----------------------------------|
| Proba | Sector | Zona | d [cm] | T ₀ | T | α | Q·10 ⁶ | Q _{med} ·10 ⁶ |
| 2 | I | 1 | 0,71 | 62,63 | 55,61 | 0,072 | 1,407 | 1,414 |
| | | 2 | | 62,45 | 55,47 | 0,072 | 1,413 | |
| | | 3 | | 62,51 | 55,58 | 0,071 | 1,422 | |
| | II | 1 | | 85,94 | 76,32 | 0,072 | 1,411 | 1,418 |
| | | 2 | | 86,07 | 76,50 | 0,072 | 1,419 | |
| | | 3 | | 85,78 | 76,29 | 0,071 | 1,424 | |

Tab. 5.15 Valorile T₀, T, α și Q pentru monocristalul de comparare, Proba 2

| Monocristal E3 _{C1R4} | | | | | | | |
|--------------------------------|------|--------|----------------|-------|-------|-------------------|-----------------------------------|
| Sector | Zona | d [cm] | T ₀ | T | α | Q·10 ⁶ | Q _{med} ·10 ⁶ |
| I | 1 | 2,5 | 71,25 | 53,59 | 0,049 | 1,872 | 1,846 |
| | 2 | | 72,46 | 54,35 | 0,050 | 1,846 | |
| | 3 | | 70,11 | 52,21 | 0,051 | 1,821 | |
| II | 1 | | 69,38 | 51,25 | 0,052 | 1,797 | 1,813 |
| | 2 | | 70,28 | 52,11 | 0,051 | 1,821 | |
| | 3 | | 71,86 | 53,32 | 0,051 | 1,821 | |

Tab. 5.16 Valorile T₀, T, α și Q pentru monocristalul E3_{C1R4}

| Monocristal E3 _{C3R3} | | | | | | | |
|--------------------------------|------|--------|----------------|-------|-------|-------------------|-----------------------------------|
| Sector | Zona | d [cm] | T ₀ | T | α | Q·10 ⁶ | Q _{med} ·10 ⁶ |
| I | 1 | 2,5 | 68,46 | 51,38 | 0,049 | 1,872 | 1,846 |
| | 2 | | 67,68 | 50,44 | 0,051 | 1,821 | |
| | 3 | | 66,51 | 49,81 | 0,050 | 1,846 | |
| II | 1 | | 74,23 | 56,11 | 0,049 | 1,872 | 1,881 |
| | 2 | | 73,48 | 55,28 | 0,049 | 1,872 | |
| | 3 | | 72,23 | 54,84 | 0,048 | 1,899 | |

Tab. 5.17 Valorile T₀, T, α și Q pentru monocristalul E3_{C3R3}

Valoarea medie a factorului de calitate pentru monocristalul E3_{C1R4} :

$$Q_{med, E3_{C1R4}} = 1,829$$

Valoarea medie a factorului de calitate pentru monocristalul E3_{C3R3} :

$$Q_{med, E3_{C3R3}} = 1,863$$

Valoarea medie a factorului de calitate pentru monocristalul de comparare :

$$Q_{med, CR_{Proba2}} = 1,416$$

Se observă că factorii de calitate pentru cristalele obținute în experimentul de confirmare 3 sunt mai buni ca ai monocristalului de comparare Românesc și sunt comparabili cu ai monocristalului Japonez.

În figura 5.37 sunt prezentate spectrogramele pentru monocristalul E3_{C1R4}.

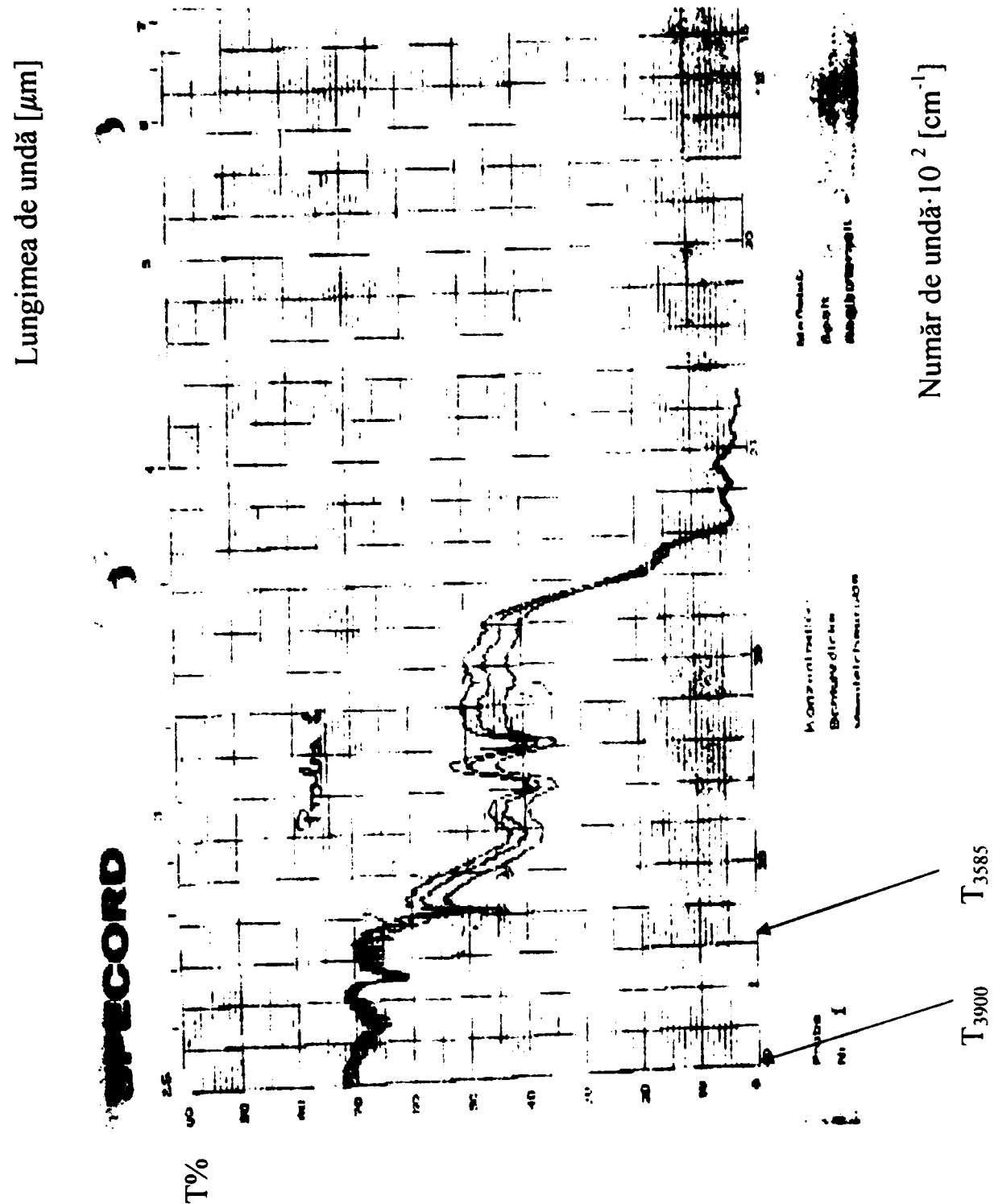


Fig. 5.37 Spectrogramele pentru monocristalul E3_{C1R4}, Sector I, Zonele 1,2,3

În figura 5.38 sunt prezentate spectrogramele pentru monocristalul E3_{C3R3}.

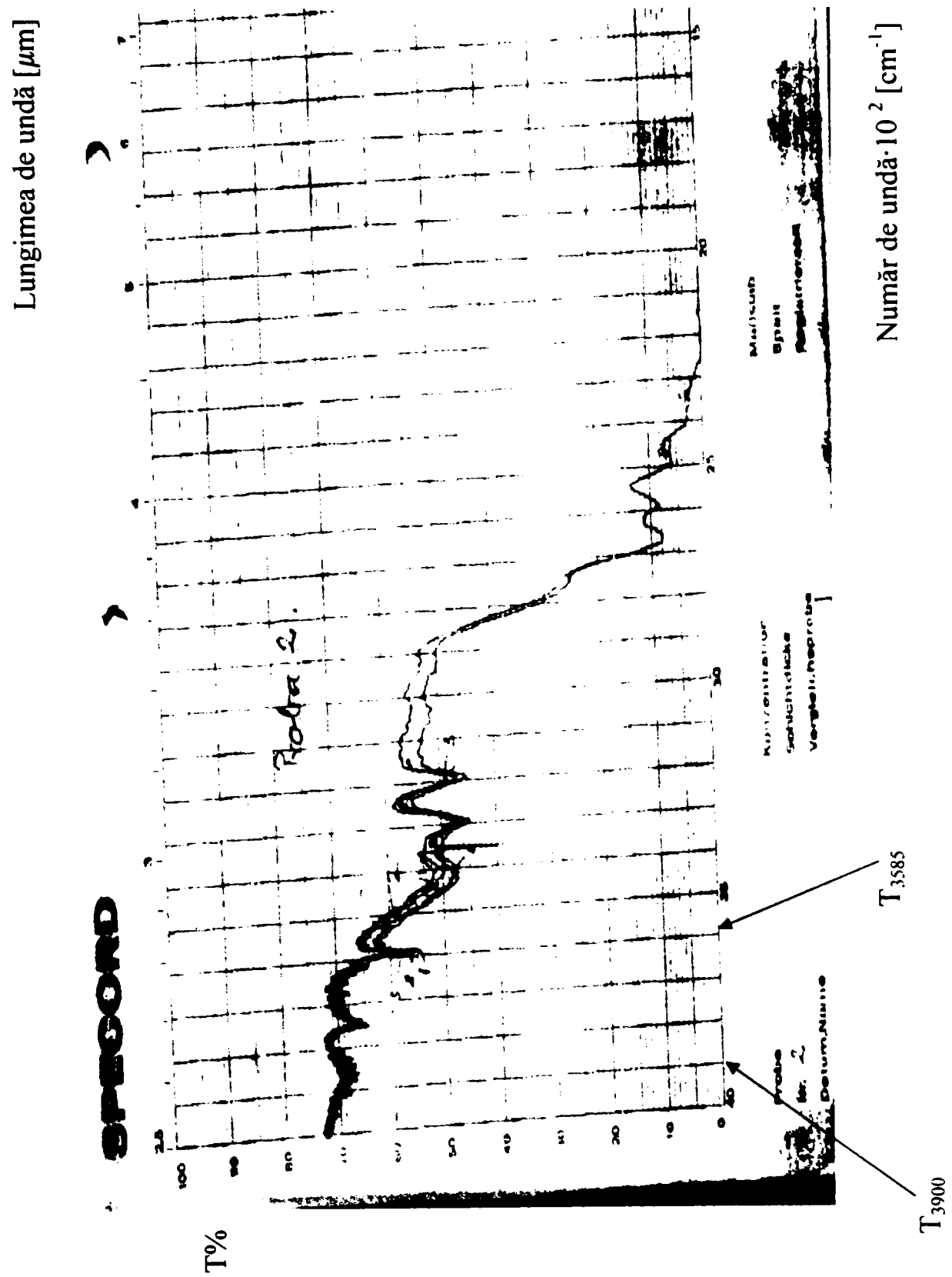


Fig. 5.38 Spectrogramele pentru monocristalul E3_{C3R3}, Sector II, Zonele 1,2,3



Fig. 5.39 Spirale de creștere pe suprafața monocristalul E3_{C3R3}



Fig. 5.40 Spirale de creștere pe suprafața monocristalul E3_{C3R3} (detaliu)

5.8 Concluzii

- ✓ Pentru autoclava de laborator proiectată s-a efectuat un test de etanșeitate și rezistență mecanică printr-o încălzire dură cu o viteză de 25 °C/h până la 280 °C, timp de 11 ore, presiunea atingând 2010 bari.
- ✓ Pentru autoclava proiectată s-a efectuat un test pentru verificarea rezistenței termo-mecanice printr-o încălzire rapidă până la 300 °C urmată de introducerea autoclavei într-un recipient cu apă (răcire bruscă).
- ✓ S-au realizat 24 de experimente la diferite procente de umplere cu apă, stabilindu-se variația presiunii cu temperatura. Pentru cele 6 experimente de bază s-au utilizat procente de umplere de 75%, 80% și 85% lucrându-se cu două valori ale vitezei de încălzire și răcire (10 °C și 15 °C). Temperatura a fost măsurată cu termocuple Fe-FeCr în punctele medii ale zonelor inferioară și superioară ale autoclavei iar presiunea cu un manometru de 3000 bari. Alimentarea cu energie electrică s-a făcut de la un sistem stabilizat de tensiune continuă, sub o tensiune de 52 V. Diferența de temperatură dintre zonele de solubilizare și cristalizare a fost realizată prin creșterea curentului I_1 (zona inferioară) și I_2 (zona superioară).
- ✓ În cadrul acestor experimente s-a analizat fiabilitatea sistemelor de alimentare, sistemelor de măsură și control și s-au adus îmbunătățiri sistemului de etanșare, încălzire și izolație termică.
- ✓ S-au realizat 5 experimente preliminare utilizându-se 3 tipuri de autoclave de laborator, 2 tipuri de termocuple, 4 temperaturi de creștere diferite, 4 gradienti de temperatură diferiți, 4 presiuni diferite, 4 durate de experimentare diferite, 4 tipuri de germeni și 4 viteze de creștere diferite.
- ✓ S-au realizat 8 experimente în autoclava proiectată luând în considerare 5 factori cu 2 niveluri și 2 interacțiuni, alegându-se o matrice de experiențe L_8 Taguchi, utilizându-se germeni de dimensiuni reduse.
- ✓ S-a determinat combinația optimă de factori și interacțiuni pentru obținerea grosimii specificate astfel:
 - a. prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra valorilor măsurate.
 - b. prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra raportului Semnal/Zgomot.
 - c. prin luarea în considerare a efectelor factorilor și interacțiunilor asupra raportului Semnal/Zgomot și prin includerea valorii țintă în formularea raportului S/N.

S-a ajuns la concluzia că abordarea *c* este cea mai adecvată.

- ✓ S-au realizat două moduri de aranjare a germenilor, concluzionându-se că Modul 1 de aranjare (rezultat din experimente) este cel mai favorabil deoarece în acest caz transportul nutrientului din zona de cristalizare în zona de solubilizare se face în regim de curgere laminară. În cazul Modulului 2 de aranjare apare o curgere turbulentă datorită apropierii de pereții autoclavei și în plus suprafața germenilor nu este plană (pentru germenii situați lângă pereții autoclavei).

- ✓ În afară de interacțiunile considerate în planul de experimentare, au fost studiate și interacțiunile cu index de severitate mare și s-a constatat că nu există pentru acestea o corelare cu fenomenele fizice și chimice din autoclavă.
- ✓ După efectuarea experimentelor s-a previzionat că utilizarea combinației optime de factori și interacțiuni obținută conform modelului c, aduce o îmbunătățire a procesului de creștere și o stabilitate dimensională bună.

| Experimente inițiale | Condiții curente | Condiții îmbunătățite |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Raportul S/N | 3,708 | 12,235 |
| Media | 24,587 | 25 |
| Abaterea standard | 0,505 | 0,189 |
| CP | 0,999 | 2,669 |
| CPk | 0,728 | 2,669 |
| Proc. în afara toler. [%] | 170,31 | 23,9 |
| Pierdere/unitate [\$] | 68,127 | 9,563 |
| Economii lunare [\$/lună] | - | 11712,7 |

- ✓ S-au realizat 3 experimente de confirmare în autoclava Pilot prin transferul condițiilor optime obținute în autoclava de laborator. Primele două experimente au fost realizate utilizându-se 3 germeni iar la experimentul de confirmare 3 s-au utilizat 24 de germeni dispuși în 4 coloane pe 6 rânduri. S-au obținut rezultatele:

| Pilot 1 | Condiții previzionate | Condiții realizate |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Raportul S/N | 3,708 | 17,367 |
| Media | 24,587 | 25,016 |
| Abaterea standard | 0,505 | 0,147 |
| CP | 0,999 | - |
| CPk | 0,728 | - |
| Proc. în afara toler. [%] | 170,31 | 7,33 |
| Pierdere/unitate [\$] | 68,127 | 2,933 |
| Economii lunare [\$/lună] | 11712,7 | 13038,66 |

| Pilot 2 | Condiții previzionate | Condiții realizate |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Raportul S/N | 3,708 | 16,32 |
| Media | 24,587 | 25,003 |
| Abaterea standard | 0,505 | 0,163 |
| CP | 0,999 | - |
| CPk | 0,728 | - |
| Proc. în afara toler. [%] | 170,31 | 9,33 |
| Pierdere/unitate [\$] | 68,127 | 3,733 |
| Economii lunare [\$/lună] | 11712,7 | 12878,7 |

| Pilot 3 | Condiții previzionate | Condiții realizate |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Raportul S/N | 3,708 | 17,269 |
| Media | 24,587 | 24,97 |
| Abaterea standard | 0,505 | 0,136 |
| CP | 0,999 | 1,785 |
| CPk | 0,728 | 1,783 |
| Proc. în afara toler. [%] | 170,31 | 7,5 |
| Pierdere/unitate [\$] | 68,127 | 3 |
| Economii lunare [\$/lună] | 11712,7 | 13025,25 |

- ✓ Determinarea permitivității dielectrice s-a făcut printr-o metodă de rezonanță combinată cu una de substituție, folosind Q-metrul TESLA BM 311E, condensatorul de măsură TESLA BP 3110 și pentru realizarea acordului pe diverse game de frecvență, bobine cu diferite valori de inductanță. S-a constatat că permitivitățile medii relative pentru cele două cristale obținute din experimentele de confirmare 1 și 2 sunt comparabile cu permitivitatea medie relativă a unui cristal de comparare Japonez.
- ✓ Pentru determinarea factorului de calitate Q în infraroșu s-au utilizat două monocristale obținute în experimentul de confirmare 3. Pentru comparare s-a folosit un cristal românesc. S-a optat pentru tăierea a două probe din acest cristal pentru care s-au stabilit două sectoare și trei zone în care s-au făcut măsurările. Debitarea și șlefuirea probelor și respectiv înregistrarea spectrogramelor s-a făcut la RomCuarț București.
- ✓ Prin analizarea spectrogramelor și calcularea lui Q s-a constatat că factorii de calitate medii pentru cristalele din experimentul de confirmare sunt comparabili cu cel al cristalului Japonez și superiori celui românesc. Se observă de asemenea că pentru cristalele obținute din experimentul de confirmare 3 există o constantă a valorii lui Q pe zonele și sectoarele în care s-au făcut determinările.

CAPITOLUL VI

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1 Concluzii finale

Metoda Taguchi reprezintă o modalitate prin care produsele și procesele de fabricație pot fi optimizate în ceea ce privește robustețea lor la factorii de zgomot încă din fazele inițiale ale proiectării.

Metoda de proiectare “off-line” Taguchi asigură determinarea combinației optime a factorilor de control și a interacțiunilor dintre aceștia, în cazul proiectării statice, și folosește avantajele interacțiunilor dintre factorii semnal și cei de zgomot în cazul proiectării dinamice. Proiectarea toleranțelor după metoda Taguchi folosește funcția pierdere a calității pătratică (QLF) pentru minimizarea pierderilor clienților.

Pentru extinderea funcției pierdere a calității Taguchi, QLF, se poate folosi o funcție pierdere care se obține prin dezvoltarea în serie Taylor a funcției pierdere în raport cu valoarea țintă până la termenul de ordin IV. Funcția obținută va fi numită *funcție pierdere cuartică* și care în loc de a avea numai termenul de ordin 2, ca în cazul funcției pierdere pătratică a lui Taguchi, va avea și doi termeni de ordin superior care reprezintă *asimetria și flexibilitatea* profilului funcțional.

În cazul caracteristicilor de calitate NTB pentru care sunt necesare toleranțe bilaterale asimetrice, s-a determinat că există o valoare optimă la care pierderea este minimă și care este diferită de valoarea nominală și de valoarea medie a intervalului de toleranță.

Prin analizarea raportului Semnal/Zgomot s-a constatat că acesta poate fi extins bazat pe probabilitatea de apariție a experimentelor, pe intervalele de necesitate, pe intervalele de variație liberă (intervale de posibilitate), de asemenea poate fi extins la variabilele ce necesită ierarhizare și la problemele cu restricții.

Prin compararea metodei Taguchi cu metoda TRIZ s-a constatat că:

- ✓ Prezența contradicțiilor fizice și tehnice, în sensul TRIZ, poate fi indicată de metoda Taguchi cu ajutorul efectelor factorilor.
- ✓ Soluțiile inovative generate prin TRIZ pot fi evaluate și implementate prin planificarea unor experimente cu ajutorul metodei Taguchi (pot fi optimizate setările parametrilor și poate fi selectat cel mai bun proces).
- ✓ În cazul ambelor metode, *eliminarea efectelor acțiunilor dăunătoare* este calea cea mai realistă pentru aducerea unui sistem spre idealitate.
- ✓ Metoda Taguchi poate fi folosită cu succes la îmbunătățirea tehnicilor “Trendul Evoluției” și ARIZ, la strategia “Utilizarea Resurselor” precum și la atingerea obiectivelor IFR din TRIZ.
- ✓ Metoda Taguchi exploatează neliniaritățile, lucru care poate fi implementat și în TRIZ.

- ✓ Efectul sinergetic al celor două metode este relevant în metodologia de rezolvare a problemelor în sensul că metoda TRIZ poate fi utilizată cu precădere în fazele de generare a conceptului și proiectare a sistemului iar metoda Taguchi în fazele de proiectare a parametrilor și toleranțelor.

Prin compararea Proiectării Robuste Taguchi cu Proiectarea Axiomatică s-a constat că:

- ✓ Proiectarea robustă Taguchi poate decela între cerințele funcționale mai bine decât Proiectarea Axiomatică (care le tratează ca fiind de egală importanță).
- ✓ Axiomele de proiectare ale Proiectării Axiomatice își găsesc echivalentul în identificarea funcției ideale. Selectarea unei caracteristici de ieșire adecvate a sistemului, selectarea factorilor de control pentru promovarea aditivității efectelor parametrilor respectiv maximizarea raportului Semnal/Zgomot (S/N) din metoda Taguchi.
- ✓ Corolarele 1,2,3,6 și 7 ale Proiectării Axiomatice au corespondent în Proiectarea Robustă Taguchi.
- ✓ Conținutul informației unui proiect, în sensul Proiectării Axiomatice (definit prin divergența simetrică), este invers proporțional cu raportul Semnal/Zgomot, adică minimizarea conținutului informațional în proiectare/fabricare înseamnă maximizarea raportului Semnal/Zgomot în sensul definiției lui Taguchi.

Prin compararea metodei Taguchi cu modelul Kano s-a constatat că:

- ✓ Combinarea Calității, așa cum este exprimată în Modelul Kano, cu efectul sinergetic al TRIZ și al Metodei Taguchi generează un model tridimensional al calității care respectă *Legea Dinamicității* și *Legea tranziției la supersistem* (MONO-BI-POLI).
- ✓ Modelul Kano furnizează o clasă generală de funcții pierdere. Funcțiile pierdere bazate pe PQ sunt similare cu funcțiile pierdere Taguchi pentru cazurile LTB, STB, NTB și care au o flexibilitate mai mare (inclus și funcția pierdere pătratică a lui Taguchi). Funcțiile pierdere propuse în cazurile BQ și EQ au o formă funcțională similară cu o parte a funcției pierdere treaptă (o formă convențională acceptabilă).

Pentru cazul stării plane de solicitare, toate funcțiile supermatematice circulare excentrice de variabilă centrică și excentrică – Șelariu pot fi definite și comparate cu elementele cercului lui Mohr. Prin aceste funcții, metodele grafice se transformă în metode analitice și pot fi aplicate cazurilor stărilor liniare și spațiale de tensiune. Legătura dintre tensiunea σ și deformația specifică ϵ în cazul solicitării după două direcții se prezintă sub forma unor curbe, numite ovalele lui Cassini, care fac parte din familia lemniscatelor lui Booth, acestea putând fi reprezentate prin funcția supermatematică radial excentrică – Șelariu. Concluzia este că atât tensiunile cât și

deformațiile sunt reprezentate de funcții supermatematice circular excentrice – Șelariu, dar de excentricități ușor diferite.

Proiectarea Robustă Taguchi este o metodă care poate fi folosită nu numai pentru atingerea robusteții produselor sau proceselor de fabricație ci poate fi folosită în cercetarea experimentală fundamentală.

Creșterea monocristalelor de α - cuarț de dimensiuni prelucrabile și factor de calitate ridicat depinde de o gamă largă de parametri fizici și chimici. Proiectarea experimentelor de creștere și în final producția de monocristale de α -cuarț s-au realizat cu ajutorul metodei Taguchi.

Selectarea parametrilor și determinarea valorilor optime ale acestora precum și combinația optimă a factorilor de control s-au realizat prin aplicarea metodei Taguchi și s-a ajuns la concluzia că în cazul stabilității dimensionale a monocristalelor de α -cuarț cel mai bine este să se calculeze raportul Semnal/Zgomot pe baza MSD (abaterea medie față de valoarea țintă).

De asemenea aplicarea metodei Taguchi permite reducerea substanțială a numărului de experimente, lucru foarte important având în vedere durata mare a experimentelor specifice tehnicii de creștere hidrotermală a monocristalelor de α -cuarț.

Proiectarea robustă a parametrilor cu ajutorul metodei Taguchi a arătat că pe lângă o stabilitate dimensională corespunzătoare, se îmbunătățesc și caracteristicile de permitivitate dielectrică respectiv valorile factorului de calitate Q.

6.2 Contribuții personale

Principalele contribuții din cadrul tezei sunt grupate în două categorii:

- I. Contribuții teoretice
- II. Contribuții aplicative

| Nr. Crt | Descrierea contribuției | Tipul contribuției | Cap. | Pag. |
|---------|--|--------------------|------|-------|
| 1 | Prezentarea stadiului actual al metodelor și tehnicilor proiectării robuste – Taguchi. | teoretică | II | - |
| 2 | Prezentarea funcției pierdere cuartice ca extindere a funcției pierdere pătratică Taguchi. | teoretică | II | 20-25 |
| 3 | Calcularea pierderii așteptate pătratică în cazul toleranțelor bilaterale asimetrice | teoretică | II | 26-29 |
| 4 | Elaborarea unui program de calcul pentru determinarea relațiilor între R_L , δ_0 și R_k realizat cu ajutorul MATLAB | aplicativă | II | 31-32 |
| 5 | Compararea mediei optime cu media calculată cu modelul Wen și Mergen și respectiv cu media intervalului de toleranță. | aplicativă | II | 36-37 |
| 6 | Prezentarea posibilităților de extindere a raportului Semnal/Zgomot. | teoretică | II | 56-62 |

| | | | | |
|----|--|------------|-----|---------|
| 7 | Compararea metodei Taguchi cu metoda TRIZ, prezentarea posibilităților de îmbunătățire reciprocă. | teoretică | III | 120-131 |
| 8 | Elaborarea schemei logice a procesul de rezolvare a problemelor cu metodologiile combinate ale metodelor TRIZ și Taguchi. | teoretică | III | 132-136 |
| 9 | Compararea metodei Taguchi cu Proiectarea Axiomatică, prezentarea posibilităților de îmbunătățire reciprocă. | teoretică | III | 137-155 |
| 10 | Compararea metodei Taguchi cu QFD, prezentarea posibilităților de îmbunătățire reciprocă precum și efectul lor sinergetic asupra proiectării produselor și proceselor. | teoretică | III | 155-157 |
| 11 | Prezentarea posibilității de adăugare a unei noi dimensiuni modelului Kano prin efectul sinergetic al metodelor Taguchi și TRIZ. | teoretică | III | 157-160 |
| 12 | Prezentarea posibilităților de îmbunătățire a activității procesului 8-D prin utilizarea metodei Taguchi. | teoretică | III | 165-166 |
| 13 | Prezentarea stadiului actual al cercetărilor privind sinteza materialelor prin metoda hidrotermală la presiuni și temperaturi mari. | teoretică | IV | - |
| 14 | Studiul teoretic al influenței parametrilor fizici și constructivi asupra monocristalelor de α -cuarț. | teoretică | IV | 202-207 |
| 15 | Definirea funcțiilor supermatematice circulare excentrice de variabilă centrică. | teoretică | IV | 224 |
| 16 | Compararea dintre elementele cercului lui Mohr și elementele funcțiilor circulare excentrice de variabilă centrică și excentrică. | teoretică | IV | 224-226 |
| 17 | Prezentarea legăturii dintre tensiunea σ și deformația specifică ε în cazul solicitării după două direcții prin funcția radial excentric. | teoretică | IV | 227-228 |
| 18 | Elaborarea și realizarea unor experimente de laborator pentru testarea la etanșitate și rezistență mecanică a incintei autoclavei de laborator. | aplicativă | V | 233-246 |
| 19 | Îmbunătățirea sistemelor de etanșare, încălzire și izolație termică astfel încât pierderile să se reducă la minim și să crească siguranța în exploatare. | aplicativă | V | - |
| 20 | Stabilirea valorilor temperaturii și presiunii funcție de procentul de umplere cu lichid a autoclavei. Trasarea diagramelor p(T) pentru autoclava de laborator. | aplicativă | V | 235-246 |

| | | | | |
|----|---|------------|---|---------|
| 21 | Stabilirea parametrilor și a valorilor optime ale acestora pentru obținerea de monocristale de α -cuarț de calitate superioară la nivelul autoclavei de laborator. | teoretică | V | 249-250 |
| 22 | Utilizarea metodei Taguchi pentru realizarea planurilor de experiențe și alegerea metodei optime de calculare a raportului Semnal/Zgomot astfel încât să se obțină combinația optimă a factorilor de control. | aplicativă | V | 251-255 |
| 23 | Transferul la nivelul autoclavei Pilot a condițiilor fizico-chimice realizate în autoclava de laborator pentru obținerea stabilității dimensionale a producției de monocristale de α -cuarț. | teoretică | V | - |
| 24 | Realizarea a trei experimente de confirmare | aplicativă | V | 263-272 |

6.3 Direcții viitoare de cercetare

O direcție importantă de cercetare o reprezintă studiul unor funcții pierdere care pot fi folosite în cazuri speciale. Se pot studia funcțiile pierdere obținute prin inversarea funcțiilor “Putere”, “Rayleigh”, “Alpha”, care pot fi utile în cazul pierderilor asimetrice. De asemenea există posibilitatea studierii funcțiilor pierdere cu ajutorul funcțiilor supermatematice – Șelariu și realizarea unui model general care să permită alegerea unei funcții pierdere particulare.

O altă direcție importantă de cercetare o reprezintă extinderea aplicării metodei Taguchi la proiectarea robustă a procesului de obținere a monocristalelor de α -cuarț prin metoda hidrotermală. Se pot folosi și factori de zgomot astfel încât să se realizeze o matrice de experiențe combinată și de asemenea se pot optimiza simultan mai multe caracteristici de calitate. Metoda Taguchi se poate aplica și la proiectarea robustă a monocristalelor dopate și de asemenea la proiectarea robustă a tehnologiei de obținere a germenilor.

BIBLIOGRAFIE

- [A1] **ALEXIS, J.** – *Metoda Taguchi în practica industrială* – Editura Tehnică, București, 1999.
- [A2] **ALTSHULLER, G.** – *Creativity as an Exact Science. The Theory of the Solutions of Inventive Problems*– Gordon&Breach Science Publishers, New-York, 1988
- [A3] **ALTSHULLER, G.** – *And Suddenly the Inventor Appeared” TRIZ the Theory of Inventive Problem* – Technical Innovation Center, Inc., USA, 1994.
- [A4] **APTE, P.** – *Introduction to TRIZ. Innovative Problem Solving* – http://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TRIZ_INTRO.htm
- [A5] **APTE, P.** – *Introduction to Taguchi Method* - http://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm
- [A6] **APTE, P., MANN, D.L.** – *Taguchi and TRIZ: Comparisons and Opportunities* – The TRIZ Journal, Nov., 2001.
- [A7] **Altshuller, G.** – *40 principles, TRIZ keys to Technical Innovation* – Technical Innovation Center, Worcester, MA, 1997.
- [A8] **AKIYAMA, K.** – *Function Analysis: Systematic Improvement of Quality and Performance* – Productivity Press, Cambridge, 1991.
- [A9] **ABE, K., MATSUMOTO, S.** – *Hydrothermal Processing of Functional Ceramic Powders* – Ceramic Transactions, Vol.22, pp 15-25, Ceramic Powder Science, American Ceramic Society, Westerville, OH, USA, 1991.
- [A10] **AVRAM, N., MATEESCU, GH.D.** – *Spectroscopie în infraroșu. Aplicații în chimia organică* – Editura Tehnică, București, 1996.
- [A11] **Aft, L.S.** – *Fundamentals of Industrial Quality Control* – 2nd Edition, St. Lucie Press, Boca Raton, USA, 1998.
- [B1] **BARON, T., ș.a.** – *Calitate și Fiabilitate. Manual practic (2 vol.)* – Editura Tehnică, București, 1988.
- [B2] **BIJI, M., BIJI, E.** – *Statistică Teoretică* – Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [B3] **BURACU, M., VODĂ, V.GH.** – *Tehnici moderne în controlul statistic al calității. Seria Tehnica la zi* – Editura Tehnică, București, 1989.
- [B4] **BOX, G.E.P., DRAPER, N.R.** – *Empirical Model-Building and response Surface Methodology* – John Wiley & Sons, NY, USA, 1988.
- [B5] **BOX, G.E.P.** – *Signal-to-noise ratios, performance criteria and transformations (with discussions)* – Technometrics 30(1):1-40, 1988.
- [B6] **BURNS, G.** – *Space groups for solid state scientist* – pp 212-220, 1995.
- [B7] **BUCCIARELLI, L.L.** – *Designing Engineer*es – MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1994.
- [B8] **BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S.** – *Statistics for experimenters* – John Wiley & Sons, NY, USA, 1978.
- [B9] **BIRĂU, O., ș.a.** – *Safirul și Rubinul* – Editura Facla, Timișoara, 1986.
- [B10] **BECHERESCU, D., ș.a.** – *Chimia Stării Solide* – Vol I, EDP, București, România, 1983.

- [B11] **BECHERESCU, D., ș.a.** – *Chimia Stării Solide* – Vol II, EDP, București, România, 1987.
- [B12] **BOURCHE, J.M., SAPORTA, G.** – *L'analyse des données* – PUF, Paris, 1987.
- [B13] **BRAVENER, L.C.** – *QFD: The Proper Tool for the Job* – The English International Congress on CIM Database, 1992.
- [B14] **BROH, R.A.** – *Managing Quality for Higher Profits* – McGraw-Hill, NY, USA, 1982.
- [B15] **BOUNDS, M., ș.a.** – *Beyond Total Quality Management Toward the Emerging Paradigm* – McGraw-Hill International Editions, NY, USA, 1994.
- [B16] **BRICE, J.C., COLE, A.M.** – Proceedings Annual Symp. Freq. Control, 32 - 1, 1979.
- [C1] **CĂTUNEANU, V.M., POPENȚIU, F.** – *Optimizarea fiabilității sistemelor* – Editura Academiei, București, 1989.
- [C2] **CRSTICI, B., ș.a.** – *Matematici speciale* – Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [C3] **CLAUSING, D.** – *Product Development, Robust Design and Education* – 4th Annual Total Product Development Symposium, ASI, 1998.
- [C4] **CLAUSING, D.** – *Total Quality Development* – MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1994.
- [C5] **CHEN, C.H., CHOU, C.Y.** – *Tolerance design for a Subsystem with Unequal Specification Limits Using Taguchi's Quadratic Loss Function* – Information and Management Sciences, Vol. 14, Number 1, pp 31-36, 2003.
- [C6] **CHEN, C.H.** – *Determining the Optimum Process Mean for an Indirect Quality Characteristic* – Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 6, No. 4, pp 235-240, 2003.
- [C7] **CROSS, N., ș.a.** – *Research in Design Thinking* – Delft University Press, Delft, Netherlands, 1992.
- [C8] **CROSS, N., ș.a.** – *Engineering Design Methods* – John Wiley & Sons, Chicester, 1994.
- [C9] **CROSBY, P.B.** – *Quality is Free* – McGraw-Hill Book Company, NY, USA, 1979.
- [C10] **CHANG, R.Y.** – *Continuous process improvement* – Kogan Press, London, 1995.
- [C11] **CIUREA, S., DRĂGULĂNESCU, N.** – *Managementul calității totale* – Editura Economică, București, 1995.
- [C12] **CAMPANELLA, J.** – *Principles of Quality Costs* – ASQC, Milwaukee, WI, USA, 1990.
- [C13] **CREȚU, E.** – *Calculul și construcția aparaturii optoelectronice* – Editura Academiei Tehnice Militare, București, 2000.
- [D1] **DOMB, E.** – *Tutorial on Contradictions* – The TRIZ Journal, July 1997.
- [D2] **DOMB, E., ș.a.** – *The 39 Features of Altshuller's Contradiction Matrix* – The TRIZ Journal, Nov., 1998.
- [D3] **DOMB, E.** – *The Seventy-Six Standard Solutions, How They Relate to the 40 Principles of Inventive Problem Solving* – The TRIZ Journal, May, 1999.
- [D4] **DETAINT, J., ș.a.** – *Experimental thermal behaviour of berlinite resonators* – Annual Frequency Control Symposium, pp 93-97, 1980.

- [D5] **DIAMOND, W.J.** – *Practical Experiment Designs* – Lifetime Learning Publications, Belmont, CA, USA, 1981.
- [D6] **DONOHUE, J.M.** – *Simulation designs for quadratic response surface models in the presence of model misspecification* – *Management Science* 38 (12), pp 1765-1791, 1992.
- [D7] **DAWSON, W.L.** – *Hydrothermal synthesis of advanced ceramic powders* – *Ceramic Bulletin* 67, pp 1673-1678, 1988.
- [D8] **DALE, B.G.** – *Managing Quality* – 3rd Edition, Prentice Hall, Herts, 1998.
- [D9] **DEMING, W.E.** – *Out of the Crisis* – MIT, Cambridge, Mass., USA, 1982.
- [D10] **DEMING, W.E.** – *The New Economies* – MIT, Cambridge, Mass., USA, 1993
- [E1] **EALEY, L.A.** – *Les méthodes Taguchi dans l'industrie occidentale* – Les Editions D'Organisation, Paris, 1990
- [F1] **FEIGENBAUM, A.V.** – *Total quality control* – Third Edition, McGraw-Hill, New-York, 1983.
- [F2] **FATHI, Y.** – *A Nonlinear Programming Approach to the Parameter design Problem* – *European Journal of Operational research*, Vol. 53, pp 371-381, 1991.
- [F3] **FOWLKERS, W.Y., CREVELING, C.M.** – *Engineering Methods for Robust Production Design Using Taguchi Methods in Technology and Product* – Addison-Wesley, 1997.
- [F4] **FREY, D.D., ș.a.** – *Computing The information Content of Decoupled designs* – 1st International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, USA, June 2000.
- [G1] **GAFIȚANU, M., ș.a.** – *Asigurarea calității în Învățământul Superior Tehnic din România* – Editura Gh. Asachi, Iași 1997.
- [G2] **GROZESCU, I., ș.a.** – *Thermographic Analyse for polycrystalline nutrient and $AlPO_4$ monocrystal hydrothermally grown* – 1st International Conference on Chemical Sciences and Industry, Greece, 1998.
- [G3] **GROZESCU, I., MUȘCUTARIU, I.** – *Researches on the obtaining of $AlPO_4$ Monocrystals at High Pressure and High Temperature* – Romanian Conference on Advanced Materials, Romanian Academy, București, Romania, 1995.
- [G4] **GROZESCU, I., ș.a.** – *The influence of pressure and molar concentration upon the berlinit solubilization temperatures* – The Second International Conference about Microelectronics, Chișinău, Republica Moldova, 1997.
- [G5] **GROZESCU, I., ș.a.** – *The study of polar dielectric behaviour in radiofrequency field temperatures* – The Second International Conference about Microelectronics, Chișinău, Republica Moldova, 1997.
- [G6] **GROZESCU, I., BĂRZESCU, M.** – *Cercetarea obținerii pulberilor policristaline de $AlPO_4$* – Simpozionul „Progrese în Fizică”, Sibiu, Romania, 1994.
- [G7] **GROZESCU, I., ș.a.** – *Nonlinear-optic Bulk Crystal Growth by Hydrothermal Technique* – Conferința Națională de Materiale Avansate a Academiei Româno-Americane, secțiunea PH-1, Cleveland, USA, iulie 2000.

- [G8] **GROZESCU, I.** – *Cercetări privind echilibrele de fază și tranzițiile de fază de speța I-a (Solid soluție) și speța a II-a (în stare solidă ordonată tridimensională) la presiuni mari și temperaturi ridicate în compuși oxidici poli și monocristalini de tipul $X_1Y_1O_4$ ($X_1 = Al$, $Y_1 = P$)* – Contract de Cercetare Științifică Nr. 947B/1993, Institutul de Cercetare a Materiei Condensate, Timișoara, 1993
- [H1] **HUBKA, V., EDER, W.** – *Theory of Technical System : A Total Concept Theory for engineering Design* – Springer-Verlag, 1984.
- [H2] **HRARUTUNIAN, V., ș.a.** – *Decision Making and Software Tools for Product Development Based on Axiomatic Design Theory* – CIRP Annals, Vol. 45/1, 1996.
- [H3] **HAHN, T.** – *International Tables for Crystallography* – pp 128-130 Dordrecht/Boston/London, 1996.
- [H4] **HAUSER, J.R., CLAUSING, D.** – *La maison de la qualité* – Harvard-L'Expansion, Special No., 1988-1999.
- [I1] **ILIESCU, D.V., VODĂ, V.GH.** – *Statistică și Toleranțe* – Editura Tehnică, București, 1977
- [I2] **ISPĂȘOIU, GH., VODĂ, V.GH.** – *Problema valorilor aberante în metrologie* – Revista Metrologie Aplicată Nr. 2, București, 1979.
- [I3] **ISPĂȘOIU, GH., VODĂ, V.GH.** – *Problema valorilor aberante din șirurile de valori cu repartiție statistică normală* – Revista Metrologie Aplicată Nr. 3, București, 1979.
- [I4] **ISAIC-MANIU, AL.** – *Metoda Weibull. Aplicații* – Editura Academiei, București, 1983.
- [I5] **ISHIZAVA, N., HAYASHI, M., ș.a.** – *Report of the research Laboratory of Engineering Materials* – Institute of Technology 16, pp 9-14, 1991.
- [I6] **ISHIKAWA, K.** – *Report of statistical application research, union of japanese scientist and engineers* – Seven Management-tools, Vol. 33, No.2, June 1986.
- [I7] **IMAI, M.** – *Kaizen. The Key to Japan's Competitive Success* – Random House Division, NY, USA, 1986.
- [I8] **IZVERCIANU, M.** – *Elemente de Marketing* – Editura Solness, Timișoara, 2002
- [J1] **JURAN, J.M., GRINA, F.M. jr.** – *Calitatea produselor* – Editura Tehnică, București, 1972.
- [J2] **JACOBSON, S.A., ș.a.** – *Driving frequency selection for frequency domain simulation experiments* – Operations research 39 (6), pp 917-924, 1991.
- [J3] **JURAN, J.M.** – *Quality Control Handbook* – McGraw-Hill, NY, USA, 1974.
- [J4] **JURAN, J.M.** – *Juran on Leadership for Quality* – The Free Press, NY, USA, 1989.
- [J5] **JURAN, J.M.** – *Juran on Quality by Design* – The Free Press, NY, USA, 1992..
- [K1] **KAR, K.A.** – *Linking Axiomatic Design and taguchi Methods via Information content in Design* – Proceedings of ICAD 2000, 1st International Conference on Axiomatic design, Cambridge, MA, USA, June 21-23, 2000.
- [K2] **KERMANI, H.M.** – *Empowering Six Sigma methodology via the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ)* – www.IIITS.org/.
- [K3] **KOLB, E.D., ș.a.** – *Solubility, crystal growth and perfection of aluminum ortophosphate* – Journal Crystal Growth 50, 1980.

- [K4] **KOMARNEMI, S., ș.a.** – *Hydrothermal route to ultrafine powders utilizing single and diphasic gels* – Advanced Ceramic Materials, pp 87-99, 1991.
- [K5] **KAPLAN, S.** – *An Introduction to TRIZ ; The Russian Theory of Inventive Problem Solving* – Ideation International, Inc. Draft., 2000.
- [L1] **LI, M.H.C.** – *Optimal Setting of the Process Mean for Assymetrical Quadratic Quality Loss Function* – Proceedings of the Chinese Institute of Industrial Engineers Conference, pp 415-419, 1997.
- [L2] **LI, M.H.C.** – *Quality Loss Function Based Manufacturing Process Setting Models for Unbalanced Tolerance Design* – International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, pp 39-45, 2000.
- [L3] **LI, M.H.C., CHEN, J.C.** – *Determining Process Mean for Machining while Unbalanced Tolerance Design Occurs* – Journal of Industrial technology, Vol. 17, Number 1, Nov. 2000 to Jan. 2001.
- [L4] **LI, M.H.C., WU, F.W.** – *A General Model of Manufacturing Setting with Asymmetric linear Loss Function* – The 38th Annual Conference of Chinese Society for Quality and 6th National Quality Management Symposium, pp 1137-1143, 2002.
- [L5] **LI, M.H.C., CHOU, C.Y.** – *Target Selection for an Indirectly Measurable Quality Characteristic in Unbalanced Tolerance Design* – International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 17, pp 516-522, 2001.
- [L6] **LIDE, D.R.** – *Handbook of Chemistry and Physics* – 76th Edition, CRM Press, NY,USA, 1996.
- [L7] **LAUDISE, R.A.** – *The Growth of Single Crystals* – Prentice Hall, Englawood Ciffs, NJ, USA, 1970.
- [L8] **LEONARD, D.A., SUH., N.P.** – *Axiomatic Design and Concurrent Engineering* – Computer-Aided Design, Vol. 26,N7, July 1994.
- [L9] **LEON, R.V., ș.a.** – *Performance measures independent of adjustement: an explanation and extension of Taguchi's signal-to-noise ratio (with discussion)* – Technometrics, Vol. 29, pp 253-285, 1987.
- [L10] **LAW, A.M., KELTON, W.D.** – *Simulation modelling and analysis* – 3rd Edition, McGraw-Hill, NY, USA, 2000.
- [L11] **LAZĂU, I.** – *Chimia Fizică a Stării Solide-Silicați* – Vol Ib., Centrul de multiplicare, Universitatea Tehnică Timișoara, 1993.
- [M1] **MILITARU, C.** – *Fiabilitatea și Precizia în tehnologia construcțiilor de mașini* – Editura Tehnică, București, 1987.
- [M2] **MITONNEAU, H.** – *O nouă orientare în managementul calității. Șapte instrumente noi* – Editura Tehnică, București, 1998.
- [M3] **MOISESCU, E.** – *Control tehnic de calitate:tricotaje* – Editura Gh. Asachi, Iași, 2000.
- [M4] **MOȚOIU, R.** – *Ingineria Calității* – Editura Chiminform Data, București, 1994
- [M5] **MIHOC, GH., ș.a.** – *Bazele matematice ale teoriei fiabilității* – Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1976.
- [M6] **MEREUȚĂ, C., GAYRAUD, J.** – *Măsuri practice pentru creșterea siguranței în funcționare* – Editura Tehnică, București, 1980.

- [M7] **MONTGOMERY, D.C** – *Design and analysis of experiments* – John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [M8] **MARCONI, J.** – *ARIZ – The Algorithm for Inventive Problem Solving* – The TRIZ Journal, June 2001.
- [M9] **MANN, D.** – *Assesing the Accuracy of the Contradiction Matrix for recent Mechanical Innentions* – The TRIZ Journal, Feb. 2002.
- [M10] **MANN, D., DOMB, E..** – *40 Inventive (Business) Principles with examples* – The TRIZ Journal, Sept. 1999.
- [M11] **MANN, D.ș.a** – *40 Inventive (Achitectural) Principles with examples* – The TRIZ Journal, July 2001.
- [M12] **MARCONI, J.** – *ARIZ – The Algorithm for Inventive Problem Solving , An Americanized Learning Framework*– The TRIZ Journal, Apr. 1998.
- [M13] **MAZUR, G.** – *Theory of Inventive Problem Solving* – www.mazur.net/triz/.
- [M14] **MILES, L.D.** – *Techniques of Value Analysis and Engineering* – 2nd Edition, McGraw-Hill, NY, USA, 1972.
- [M15] **MUȘCUTARIU, I., ș.a.** – *Hydrothermal procesess in a aqueous solution and growing of minocrystalline quartz* – Analele Universității din Timișoara, Seria Physics, Vol. XXII, pp 19-24, 1984.
- [M16] **MUȘCUTARIU, I., ș.a.** – *System for achieving 2000 atm pressures and temperatures by 500 °C used for the hydrothermal growth of monocrystals* –Analele Universității din Timișoara, Seria Physics, Vol. XXII, pp 11-18, 1984.
- [M17] **MUȘCUTARIU, I., ș.a.** – *The Laboratory Installation used for Oxidic Macrocrystals Growth at High Presures and High Temperatures* – 7th National Electronic Symposium, Herculane, Romania, 1987.
- [M18] **MUȘCUTARIU, I., ș.a.** – *Research on Quartz Monocrystals Growth* – The First Symposium on Nonlinear Optic Materials, Romanian Academy, Timișoara, 1995.
- [M19] **MOEENI, F., ș.a.** – *A robust design methodology for kanban system design* – International Journal of Production research 35 (10), pp 2821-2838, 1997.
- [M20] **MYERS, R.H., ș.a.** – *Response Surface alternatives to the Taguchi robust parameter design approach* – the American Statistician 46 (2), pp 131-139, 1992.
- [M21] **MUȘCUTARIU, I., ș.a.** – *Cercetări privind obținerea cuarțului monocristalin prin metoda hidrotermală, proiectarea și realizarea instalației de laborator și a instalației experimentale pentru microproducție, elaborarea tehnologi de obținere a cuarțului* – Contract de Cercetare Științifică Nr. 409/1985, Universitatea din Timișoara, 1985.
- [M22] **MUȘCUTARIU, I., ș.a.** – *Cercetări privind obținerea la nivel de instalație pilot a monocristalelor piezoelectrice de alfacuarț, elaborarea tehnologiei de obținere a monocristalelor în instalația pilot și asimilarea producerii monocristalelor la Intreprinderea „Steaua Electrică Fieni” – Faza I – 1989, Contract de Cercetare Științifică Nr. 6378/1988, Universitatea din Timișoara, 1988.*
- [N1] **NICHICI, AL., ș.A.** – *Prelucrarea datelor experimentale* – Centrul de multiplicare Universitatea “Politehnica” Timișoara, 1996.
- [N2] **NAIR, V.N.** – *Taguchi’s parameter design : A Panel Discussion* – Echometrics, Vol. 34, No. 2, May 1992.

- [N3] **NAKAMURA, Y.** – *Combination of ARIZ 92 and NM (Nakayama, Masakazu) Method for the 5-th level problems* – Altshuller's Institute TRIZCON 2003, Philadelphia, USA, March 2003.
- [N4] **NICOARĂ, I.** – *Calculul și construcția aparatelor optice*, Note de curs – Timișoara, 1983-1984.
- [N5] **NĂDȘAN ȘT., ș.a.** – *Probleme de rezistența materialelor* – Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968.
- [N6] **NOORI, H., RADFORD, R.** – *Production and Operations Management – Total Quality Response* – McGraw-Hill, NY, USA, 1995.
- [N7] **NICOARĂ, I., ș.a.** – *Aparate Optice, Vol. I* – Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000.
- [O1] **OPREAN, A., ș.a.** – *Fiabilitatea mașinilor-unelte* – Editura Tehnică, București, 1979.
- [O2] **OTTO, K., WOOD, K.** – *Product Design* – Prentice Hall, NJ, USA, 2001.
- [O3] **OZIMEK, E.J., CHAI, B.H.T.** – *Piezoelectric properties of single crystals berlinite* – Annual Frequency Control Symposium, pp 80-84, 1995.
- [O4] **OLARU, M.** – *Managementul Calității* – Editura Economică, București, 1999.
- [O5] **OAKLAND, J.** – *Total Quality Management* – Butterworth-Heinemann, London, UK, 1995.
- [P1] **PANAITE, V., MUNTEANU, R.** – *Control statistic și fiabilitate* – Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [P2] **POTIÉ, CH.** – *Diagnosticul calității. Metode de expertiză și investigații* – Editura Tehnică, București, 2001.
- [P3] **PURI, G., PUGNA, A.** – *Metrologie Generală* – Lito IPTVT, Timișoara, 1990.
- [P4] **PAPP, I.** – *Control Tehnic* – Lito Institutul de subingineri Târgu-Mureș, 1986.
- [P5] **PUGNA, A.** – *Metode Matematice de Analiză a Calității, Partea I* – Editura SOLNESS, Timișoara, 2003.
- [P6] **PAHL, G., BEITZ, W.** – *Engineering Design : A Systematic Approach* – Springer-Verlag, 1988.
- [P7] **PHADKE, M.S.** – *Quality Engineering Using Robust Design* – Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1989.
- [P8] **PUGH, S.** – *Total Design* – Addison-Wesley, Workingham, England, 1991.
- [P9] **PUGH, S.** – *Creating Innovative Products using Total Design* – Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1996.
- [P10] **PEACE, G.S.** – *Taguchi Methods* – Addison-Wesley, 1993.
- [P11] **PIGNATIELLO, J.J.JR., RAMBERG, J.S.** – *Top ten triumphs and tragedies of Genich Taguchi* – Quality Engineering 4 (2), pp 211-235, 1991.
- [P12] **PURI, G., PERJU, D., PUGNA, A., ș.a.** – *Manometre pentru măsurarea presiunilor mari la lichide agresive cu temperatură ridicată* – Sesiunea de Comunicări Științifice „Tehnic 2000” Electrotimiș, Vol. II, pp 65-71, Timișoara, Romania, 5-6 Mai 1989.
- [P13] **PURI, G., PERJU, D., PUGNA, A., ș.a.** – *Măsurarea presiunilor mari la lichide agresive cu temperatură ridicată* – Simpozionul Național de Mecanisme și transmisii Mecanice „Robot 88”, Ediția a V-a, pp 703-708, Cuj-Napoca, 20-22 Oct. 1988.

- [P14] **PERJU, D., PURI, G., PUGNA, A., ș.a.** – *Moeglichkeiten der Verwirklichung von Geraeten zum Messen grosser Drucke von Aggresiven Fluessigkeiten mit hoher Temperatur* – Buletinul Științific și Tehnic al IPTVT, Seria Mecanică, Tom 34 (48), Fascicola 1,2, pp 33-38, Timișoara, 1989.
- [P15] **PURI, G., PERJU, D., PUGNA, A., ș.a.** – *Messen grosser Drucke von aggresiven Fluessigkeiten mit hoher Temperatur* – Kongressmesse fuer Industrielle Messtechnik Messe und Verarbeiten elektrischer und nichtelektrischer Groessen, Vol. 6B 5.1-5.6, Wiesbaden, BR Deutschland, 28-29 Sept. 1998.
- [P16] **PAMPLIN, B.R.** – *The Evolution of Crystal Growth Technique* – Crystal Growth Characterization 1, pp 5-22, 1977.
- [P17] **POPA, B., ș.a.** – *Solicitări termice în construcția de mașini* – Editura Tehnică, București, 1978.
- [P18] **PUGNA, A., STAICU, F.** – *Creșterea eficienței economice prin utilizarea tehnologiilor neconvenționale la executarea magneților permanenți din componența aparatelor magnetoelectrice* – Conferința de organizare “Calitate și Eficiență”, Timișoara, 10-11 Oct., 1986.
- [P19] **PUGNA, A., PURI, G.** – *Tendențe noi în utilizarea roboților industriali la măsurare și control* – Sesiunea de comunicări științifice “Activitatea de cercetare și proiectare în sprijinul producției” IMU Arad, 16-18 pp. 247-251, Arad, Nov. 1988.
- [P20] **PUGNA, A., PURI, G.** – *Considerații privind utilizarea roboților industriali la măsurare și control* – Sesiunea de comunicări științifice “Tehnic 2000” Electrotimiș Timișoara, Vol. II, pp 165-179, Timișoara, 5-6 Mai 1989.
- [P21] **PUGNA, A., PURI, G.** – *Posibilități de realizare a unui robometru pentru măsurări dimensionale (partea I-a)* – Simpozionul național de roboți industriali ‘Robot 89’ Baia-Mare, Vol. II pp 54-59, 26-28, Baia-Mare, Oct. 1989.
- [P22] **PUGNA, A., PURI, G.** – *Creșterea productivității operațiilor metrologice prin utilizarea roboților industriali* – Conferința de organizare “Conducere, calitate, eficiență economică”. Ediția a X-a, Vol. III pp 125-132, Timișoara, 8-9 Dec. 1989.
- [P23] **PUGNA, A., ș.a.** – *Mathematical Model for the determination of dynamic parameters at the Oscilation Dampers* – Conferința a III-a de Mecanică Fină și Optică “COMEFIN-3”. Universitatea Transilvania Brașov, Vol, I pp 55-61, Brașov, 1990.
- [P24] **PUGNA, A., ș.a.** – *Considerations regarding the accuracy of a wider measurement range of a Kinematic Viscometer* – Conferința a III-a de Mecanică Fină și Optică “COMEFIN-3”. Universitatea Transilvania Brașov, Vol, II, Brașov, 1990.
- [P25] **PUGNA, A., ș.a.** – *Considerations regarding the systematic errors at the length measuring instruments in direct contact with workpiece* – Conferința a III-a de Mecanică Fină și Optică “COMEFIN-3”. Universitatea Transilvania Brașov, Vol, II, Brașov, 1990.
- [P25] **PUGNA, A., PURI, G.** – *Posibilități de realizare a unui robometru pentru măsurări dimensionale (partea a II-a)* – Simpozionul național de roboți industriali “MERO 91”, IP București., ARR, Vol. I pp 261-274, București, 18-20 Apr. 1991.

- [P26] **PUGNA, A., COFAN, N.** – *Unele aspecte ale fiabilității în industria constructoare de mașini* – Simpozionul Internațional de Management Industrial. UTTimișoara ,AIR, Vol. II pp 118-123, Timișoara 26-27 Sept. 1991.
- [P27] **PUGNA, A., ș.a.** – *Posibilități de realizare a unui aparat pentru măsurarea tensiunilor din cabluri* – Analele Universității din Oradea. Fascicola mecanică, Secțiunea OM, Tribologie, Mecanică Fină, Geometrie Descriptivă, Oradea, 1992.
- [P28] **PUGNA, A., ș.a.** – *Utilizarea RI la măsurarea relativă a caroseriilor auto (partea I-a)* – Analele Universității din Oradea. Fascicola mecanică, Secțiunea MU, RI, Sisteme flexibile de prelucrare, Oradea, 1992.
- [P29] **PUGNA, A., ș.a.** – *Utilizarea RI la măsurarea relativă a caroseriilor auto (partea II-a)* – Analele Universității din Oradea. Fascicola mecanică, Secțiunea MU, RI, Sisteme flexibile de prelucrare, Oradea, 1992.
- [P30] **PUGNA, A., ș.a.** – *Strategii de programare pentru utilizarea RI în operații de măsurare* – Analele Universității din Oradea. Fascicola mecanică, Secțiunea MU, RI, Sisteme flexibile de prelucrare, Oradea, 1992.
- [P31] **PUGNA, A., ș.a.** – *Unele aspecte privind realizarea unei celule flexibile pentru operații metrologice* – Analele Universității din Oradea. Fascicola mecanică, Secțiunea MU, RI, Sisteme flexibile de prelucrare, Oradea, 1992.
- [P32] **PUGNA, A., ș.a.** – *Considerații privind evaluarea , analiza și tratarea neconformităților complexe* – Buletinul științific și tehnic al Universității “Politehnica” din Timișoara, România .Seria Management. Inginerie Economică. Ingineria Transporturilor, Tom 48 (62),. Fascicola 1-2, pp179-194, Timișoara, 2003.
- [P33] **PUGNA, A., ȘTEFĂNESCU, W.** – *Considerații privind managementul proiectării robuste* – Simpozionul Internațional de Management, SIM 2003, Timișoara, 2003.
- [R1] **RUMȘISKI, L.Z.** – *Prelucrarea matematică a datelor experimentale* – Editura Tehnică, București, 1974.
- [R2] **RETSEPTOR, G.** – *40 Inventive principles in Quality Management* – the TRIZ Journal, March 2003.
- [R3] **ROSS, P.J.** – *Taguchi Techniques for Quality Engineering* – McGraw-Hill, NY, USA, 1996.
- [R4] **ROY, R.** – *A Primer on the Taguchi Method* – Van Nostrand – Reinhold, NY, USA, 1990.
- [R5] **RAMBERG, J.S., ș.a.** – *A critique and enhancement of the Taguchi Method* – ASQC Quality Conngress Transactions, pp 491-498, 1992.
- [R6] **RAMBERG, J.S., ș.a.** – *Designind simulation experiments :Taguchi methods and Response Surface Models* – Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Elactronic Engineers, Piscataway, NJ, USA, 1994.
- [S1] **SUH, N. P.** – *The Principles of Design* – Oxford Univerity Press, Inc, NY , USA,1994.
- [S2] **SODERLIN, P.** – *TRIZ the Simple Way* – The TRIZ Journal, May 1999.
- [S3] **SHPAKOVSKY, N., ș.a.** – *Structural Scheme for Solving a Problem Using TRIZ* – The TRIZ Journal, Jan. 2002.
- [S4] **SALAMATOV, Y., DOMB, E.**– *The Right Solution at the Right Time* – Insytec, The Netherlands, 1998.

- [S5] **SAWAGUCHI, M.** – *Effective Approaches to Solving Technical Problems by Combining TRIZ with VE* – The Altshuller's Institute TRIZCON 2000, May1,2000.
- [S6] **SCHLUETER, M.** – *QFD by TRIZ* – The Altshuller's Institute TRIZCON 2001, March 2001.
- [S7] **SOMYA, S., ș.a.** – *Hydrothermal ceramic very fine powder-overview* – Frontiers in Materials Research, Electronic and Optical Materials, pp 145-151, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1991.
- [S8] **SUH, N. P., SEKIMOTO, S.** – *Design of Design Thinking Machine* – Ann. CIRP, Vol. 39, No. I, pp 145-148, 1990.
- [S9] **SHINYA, S., KAWASAKI, U.** – *A Study of Creative Design Based on the Axiomatic Design Theory* – DE, Vol. 68, Design Theory and Methodology – DTM 94, ASTM 1994.
- [S10] **SACKS, J., ș.a.** – *Design and analysis of computer experiments (with discussion)* – Statistical Science 4, pp 403-435, 1991.
- [S11] **SANCHEZ, S.M.** – *A robust design tutorial* – Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Piscataway, NJ, USA, 1994.
- [S12] **SANCHEZ, S.M.** – *A simulation framework for robust system design* – Ch. 12 in Concurrent Design of Products, Manufacturing Processes and Systems, pp 279-314, Gordon-Breach, NY, USA, 1998.
- [S13] **SCHRUBEN, L.W., ș.a.** – *Variance relocation in Taguchi's robust design framework* – Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Piscataway, NJ, USA, 1992.
- [S14] **ȘELARIU, M.** – *Supermatematica* – Cm VII, Conferința Internațională de Inginerie Managerială și Tehnologică, TEHNO '95, Vol. 9, Matematică, pp 41-64, Timișoara, Romania, 1995.
- [S15] **SCHOBER, H., DORNER, B.** – *J. Phys.: Condensed Matter* – 5351, 1994.
- [S16] **SAUCET, M.** – *La sémantique générale aujourd'hui* – Le Courrier du Livre, Paris, 1997.
- [S17] **SULLIVAN, L.P.** – *Quality Function Deployment* – Quality Progress, June, 1986.
- [S18] **SAYLOR, J.H.** – *TQM Simplified* – 2nd Edition, McGraw-Hill, NY, USA, 1996.
- [T1] **TÂRCOLEA, C., ș.a.** – *Tehnici actuale în teoria fiabilității* – Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1989.
- [T2] **TĂNĂSESCU, F.T., ș.a.** – *Agenda Tehnică* – Editura Tehnică, București, 1990.
- [T3] **TAGUCHI, G., ș.a.** – *Robust Engineering* – McGraw-Hill, New York, 2000.
- [T4] **TAGUCHI, G.** – *System of Experimental Design* – Vol I & II, Unipub/Kraus International Publications, White Plains, NY, USA, 1987.
- [T5] **TAGUCHI, G.** – *Introduction to Quality Engineering* – Unipub/Kraus International Publications, White Plains, NY, USA, 1986.
- [T6] **TAGUCHI, G., WU, Y.** – *Introduction to off-line quality control* – Central Japan Quality Association, Nagoya, Japan, 1980.

- [T7] TAGUCHI, G., ș.a. – *Quality Engineering in Production Systems* – McGraw-Hill, NY, USA, 1989.
- [T8] TAGUCHI, G. – *Taguchi on Robust Technology : Bringing Quality Engineering Upstream* – ASME Press, NY, USA, 1993.
- [T9] TATE, K. – *40 Inventive Principles with Examples* – The TRIZ Journal, July 1997.
- [T10] TERNINKO, J. – *Su-Field Analysis* – The TRIZ Journal, Feb. 2002.
- [T11] TERNINKO, J., ș.a. – *The Seventy-Six Standard Solutions, with Examples Section One* – The TRIZ Journal, July 2000.
- [T12] TERNINKO, J., ș.a. – *The Seventy-Six Standard Solutions. Class 2* – The TRIZ Journal, March 2000.
- [T13] TERNINKO, J., ș.a. – *The Seventy-Six Standard Solutions. Class 3* – The TRIZ Journal, May 2000.
- [T14] TERNINKO, J., ș.a. – *The Seventy-Six Standard Solutions. Class 4* – The TRIZ Journal, April 2000.
- [T15] TERNINKO, J., ș.a. – *The Seventy-Six Standard Solutions. Class 5* – The TRIZ Journal, July 2000.
- [T16] TERNINKO, J. – *The QFD and Taguchi Connection : Customer-Driven Robust Innovation* – The Ninth Symposium on Quality Function Deployment, June 10, 1997.
- [T17] TERNINKO, J. ș.a – *Step by Step TRIZ* – Responsible Management Nottingham, NH, USA, 1997.
- [T19] TEERAVARAPRUG, J. – *Incorporating KANO'S Model in Quality Loss Function* – International Journal of Production Research 47 (1), pp 37-54, 2002.
- [T20] TUCKEY, J.W. – *Propagation of Errors, Fluctuations and Tolerances* – No.1 : Basic Generalized Formulas, Technical report No. 10, Princeton University, Princeton, NJ, 1957.
- [T21] TSAI, H.T.–*The probabilistic tolerance design for a subsystem using Taguchi's quadratic loss function* – Communications in Statistics, Theory and Mathematics, Vol. 19, pp 3243-3258, 1990.
- [T22] TSAI, H.T.–*The probabilistic tolerance design for a subsystem under Burr distribution using Taguchi's loss function* – Communications in Statistics, Theory and Mathematics, Vol. 19, pp 4679-4696, 1990.
- [T23] TENNANT, G. – *TRIZ for Six Sigma* – E-book, Mulbury Six Sigma, 2003.
- [T24] THEOCARIS, P.S., ș.a. – *Analiza experimentală a tensiunilor. Bazele teoretice ale metodelor tensometrice și indicații practice privind utilizarea acestora* – Vol. I și II, Editura Tehnică, București, 1997.
- [T25] TUDOSE, I., ș.a. – *Rezistența Materialelor* – EDP, București, 1981.
- [T26] TRIETSCH, D. – *Statistical Quality Control : A Loss Minimization Approach* – World Scientific Publishing Company, 1999.
- [U1] Ungvari, S. – *TRIZ within yhe Context of the Kano Model or Adding the Third Dimension to Quality* – The TRIZ Journal, Oct. 1999.
- [U2] ULLMAN, D.G.–*The Mechanical Design Process*–McGraw-Hill, NY, USA,1992.
- [V1] VASILIU, F., VERCIUC, N. – *Metode grafice de analiză a calității produselor* – Editura Ceres, București, 1983.

- [V2] **VODĂ, V.GH.** – *Noi modele statistice în studiul durabilității produselor* – Editura Academiei, București, 1980.
- [V3] **VODĂ, V.GH.** – *Controlul durabilității produselor industriale* – Editura Tehnică, București, 1983.
- [V4] **VINING, G.G., MYERS, R.H.** – *Combining Taguchi and response surface philosophies : A dual response approach* – Journal of Quality Technology 22, pp 38-45, 1990.
- [W1] **WIENER, U., ș.a.** – *Aplicații ale rețelelor probabiliste în tehnică* – Editura Tehnică, București, 1983.
- [W2] **WHEELER, D.J., CHAMBERS, D.S.** - *Understanding Statistical Process Control* – SPC Press Inc, Knoxville, Tennessee, 1986
- [W3] **WASSERMAN, G.S.** – *The Use of Energy-Related Characteristics in Robust Product Design* – Quality Engineering 10 (2), pp 213-222, 1997-1998.
- [W4] **WEN, D., MERGEN, A.E.** – *Running a Process with poor Capability* – Quality Engineering, Vol. 11, pp 505-509, 1999.
- [W5] **WELCH, W.J., ș.a.** – *Computer experiments for quality control by robust design* – Journal of Quality Technology 22, pp 15-22, 1990.
- [W6] **WILD, R.H., PIGNATIELLO, J.J.JR.** – *An experimental using Strategy for designing robust Systems using discrete-event simulation* – Simulation 57 (6), pp 358-368, 1991.
- [Y1] **YANG, K., ZHANG, H.** – *A comparison of TRIZ and Axiomatic Design, Part 2* – The TRIZ Journal, Sept. 2000.
- [Z1] **ZHU, J., TING, K.L.** – *Performance Distribution Analysis and Robust Design* – ASME Journal of Mechanical Designs, Vol. 123, pp 11-17, 2001.
- [Z2] **ZLOTIN, B. , ZUSMAN, A. , ș.a** – *The Theory and Practice of Applying TRIZ to Non-technical Areas* – The TRIZ Journal, ianuarie 2001

www.mv.com/

www.amsup.com/

www.asq.org/

www.doe.articleinsider.com/

www.isixsigma.com/

www.wtec.org/

www.rkroy.com/

www.itl.nist.gov/

www.csupomona.edu/

www.orszulik.free-online.co.uk/

www.design.caltech.edu/

www.wikipedia.org/

www.hq.nasa.gov/

www.dmem.strath.ac.uk

www.hotdot-bullseye.com/

www.npd.edu/

www.statease.com/

www.asiqs.co.uk/

www.sixthsigma.com/

www.stat.rutgers.edu/

www.rasch.org/

www.ee.iitb.ac.in/~apte/

www.mazur.net/triz/

www.IIITS.org/

www.triz-journal.com/

www.citeseer.com/

www.skymqrk.com/

www.rgu.ac.uk/

ANEXA I

FUNCTII SUPERMATEMATICE CIRCULARE EXCENTRICE DE VARIABILA EXCENTRICA θ

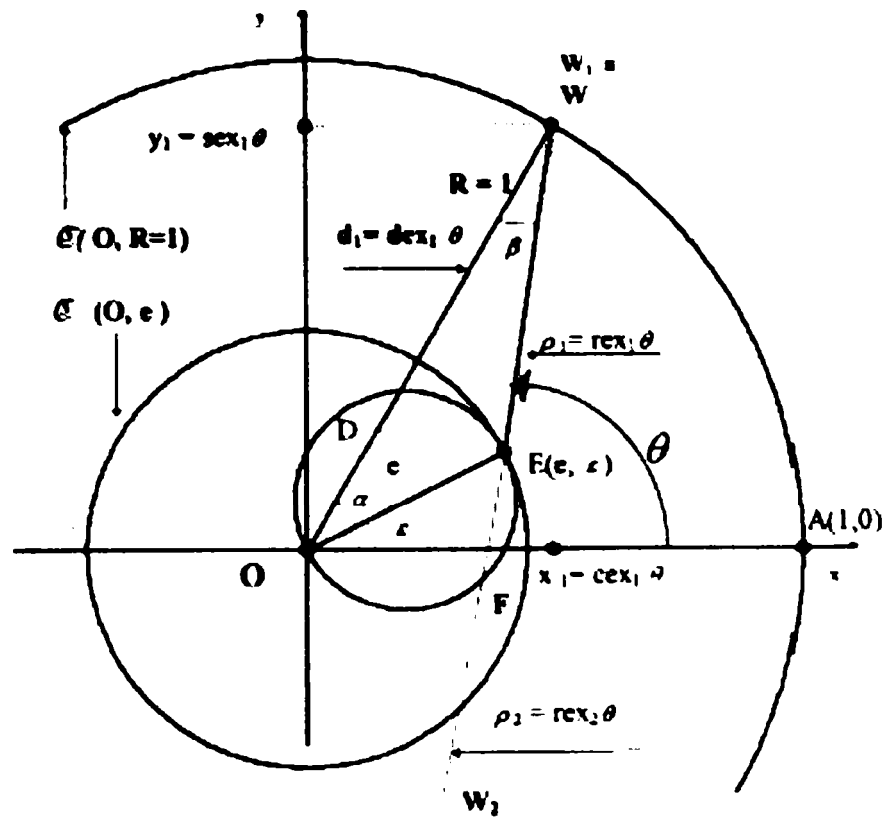


Fig. 1. Functii supermatematice circulare excentrice de excentru punct E fix si de variabila excentrica θ . Schita explicativa

$$\rho_2 = rex_{1,2} \theta - |EW_2| = -e \cdot \cos(\theta - \epsilon) = \sqrt{1 - e^2 \sin^2(\theta - \epsilon)}$$

$$d_{1,2} = dex_{1,2} \theta \cdot |D_{1,2}W_{1,2}| = 1 - \frac{e \cos(\theta - \epsilon)}{\pm \sqrt{1 - e^2 \sin^2(\theta - \epsilon)}}$$

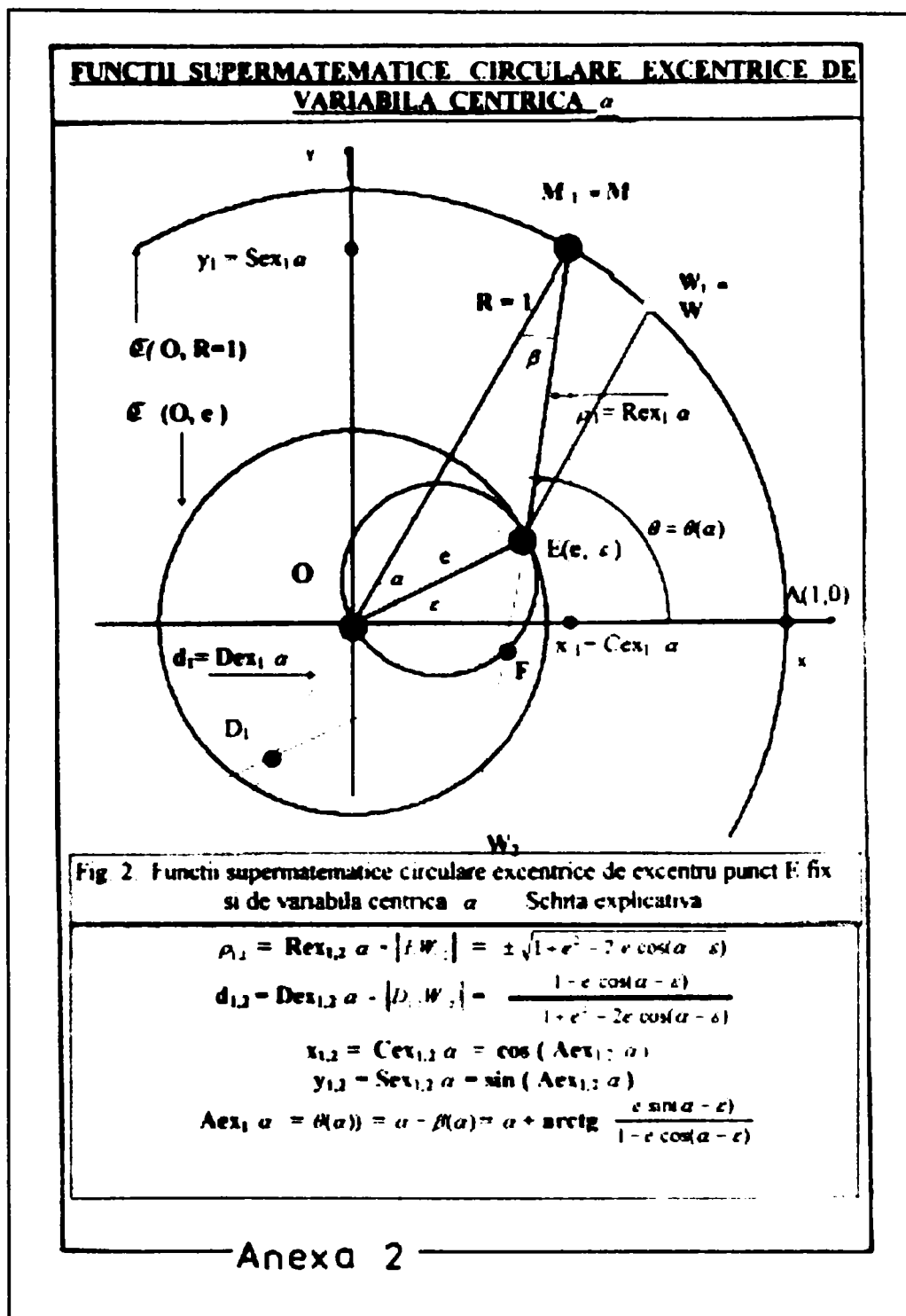
$$x_{1,2} = cex_{1,2} \theta = \cos(\alpha ex_{1,2} \theta)$$

$$y_{1,2} = sex_{1,2} \theta = \sin(\alpha ex_{1,2} \theta)$$

$$\alpha ex_1(\theta) = \alpha(\theta) = \theta - \beta(\theta) = \theta - \arcsin(e \cdot \sin(\theta - \epsilon))$$

Anexa 1

ANEXA II



ANEXA III

**REZULTATE EXPERIMENTALE PENTRU DETERMINAREA
PERMITIVITĂȚII DIELECTRICE RELATIVE A CUARȚULUI**

| Proba de cuarț. ϵ_{quartz} | Permitivitatea medie relativă | Proba de cuarț. Cristal de comparare Românească | | | Permitivitatea medie relativă | Proba de cuarț. Cristal de comparare Japoneză | | | Permitivitatea medie relativă |
|---|-------------------------------|---|-------|----------------------------|-------------------------------|---|-------|----------------------------|-------------------------------|
| | | d_1 | d_2 | ϵ_{quartz} | | d_1 | d_2 | ϵ_{quartz} | |
| 4,210 | 4,189 $\pm 0,09$ | 3,17 | 1,59 | 4,251 | 1,55 | 0,61 | 4,247 | 4,247 $\pm 0,09$ | |
| 4,180 | | 3,17 | 1,58 | 4,293 | 1,55 | 0,61 | 4,247 | | |
| 4,180 | | 3,14 | 1,58 | 4,231 | | | | | |
| 4,216 | | 3,13 | 1,57 | 4,251 | | | | | |
| 4,251 | | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | |
| 4,110 | | 3,15 | 1,57 | 4,293 | | | | | |
| 4,180 | | 3,15 | 1,57 | 4,293 | | | | | |

| Dom. de frecvență [MHz] | Frecvență [MHz] | Proba de cuarț. Experiment de confirmare I | | | Permitivitatea medie relativă | d | |
|-------------------------|-----------------|--|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|----------------|
| | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | | d ₁ | d ₂ |
| 1,1 – 3,8 | 1,1 | 3,16 | 1,58 | 4,183 | 4,179 ± 0,09 | 3,14 | 1,59 |
| | 1,5 | 3,17 | 1,59 | 4,210 | | 3,15 | 1,58 |
| | 2,0 | 3,17 | 1,59 | 4,210 | | 3,16 | 1,59 |
| | 2,5 | 3,16 | 1,58 | 4,110 | | 3,17 | 1,60 |
| | 3,0 | 3,15 | 1,57 | 4,180 | | 3,16 | 1,58 |
| | 3,5 | 3,16 | 1,57 | 4,110 | | 3,15 | 1,58 |
| | 3,8 | 3,15 | 1,58 | 4,180 | | 3,15 | 1,59 |

| Proba de cuarț. Experiment de confirmare 2 | Permitivitatea medie relativă | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Românească | | | Permitivitatea medie relativă | Proba de cuarț. Cristal de comparare Japoneză | | | Permitivitatea medie relativă |
|--|-------------------------------|----------------|---|----------------|----------------|-------------------------------|---|----------------|-----------------|-------------------------------|
| | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | |
| 3,16 | 1,57 | 4,210 | 3,18 | 1,58 | 4,313 | 1,53 | 0,61 | 4,180 | 4,166 ± 0,09 | |
| 3,16 | 1,58 | 4,210 | 3,16 | 1,57 | 4,314 | | | | | |
| 3,17 | 1,58 | 4,110 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | |
| 3,15 | 1,60 | 4,182 | 3,15 | 1,59 | 4,210 | | | | | |
| 3,15 | 1,58 | 4,182 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | | | | | |
| 3,14 | 1,57 | 4,251 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | 1,51 | 0,61 | 4,110 | | |
| 3,16 | 1,57 | 4,220 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| Dom. de frecvență [MHz] | Frecvență [MHz] | Proba de cuarț. Experiment de confirmare 1 | | | Permitivitatea medie relativă |
|-------------------------------|--------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------------|
| | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 8,5 - 27 | 8,5 | 3,15 | 1,58 | 4,180 | 4,185 ± 0,09 |
| | 9 | 3,15 | 1,58 | 4,192 | |
| | 9,5 | 3,16 | 1,59 | 4,210 | |
| | 10 | 3,16 | 1,58 | 4,210 | |
| | 10,5 | 3,15 | 1,57 | 4,251 | |
| | 11 | 3,14 | 1,58 | 4,210 | |
| | 11,5 | 3,15 | 1,58 | 4,110 | |

| Proba de cuarț. Experiment de confirmare 2 | | | Permiti viteza medie relativă | | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Românesc | | | Permiti viteza medie relativă | | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Japonez | | | Permiti viteza medie relativă | | |
|--|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|--|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|
| d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} |
| 3,16 | 1,57 | 4,180 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,58 | 4,172 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | | | | | | | | | |
| 3,17 | 1,58 | 4,172 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,57 | 4,214 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | | | | | | | | | |
| 3,18 | 1,56 | 4,110 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | | | | | | | | | |
| 3,18 | 1,58 | 4,180 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,58 | 4,180 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | 3,16 | 1,58 | 4,272 | | | | 1,54 | 0,61 | 4,214 | | | |
| | | | 4,187 ± 0,09 | | | | | | 4,26 ± 0,09 | | | | | | 4,166 ± 0,09 | | |

| Dom. de frecvență [MHz] | Frecvență [MHz] | Proba de cuarț. Experiment de confirmare 1 | | | Permitivitatea relativă medie |
|-------------------------------|--------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------------|
| | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 8,5 - 27 | 12 | 3,15 | 1,58 | 4,110 | 4,185 ± 0,09 |
| | 12,5 | 3,15 | 1,58 | 4,183 | |
| | 13 | 3,16 | 1,59 | 4,186 | |
| | 13,5 | 3,15 | 1,57 | 4,192 | |
| | 14 | 3,16 | 1,58 | 4,192 | |
| | 14,5 | 3,17 | 1,57 | 4,214 | |
| | 15 | 3,16 | 1,57 | 4,214 | |

| Proba de cuarț. Experiment de confirmare 2 | | | Permiti viteza medie relativă | | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Românesc | | | Permiti viteza medie relativă | | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Japonez | | | Permiti viteza medie relativă | | |
|--|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|--|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|
| d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} |
| 3,14 | 1,58 | 4,182 | 3,15 | 1,57 | 4,274 | 3,15 | 1,58 | 4,210 | | | | | | | | | |
| 3,14 | 1,59 | 4,252 | 3,15 | 1,58 | 4,293 | 3,17 | 1,58 | 4,293 | | | | | | | | | |
| 3,15 | 1,58 | 4,274 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | 3,15 | 1,57 | 4,293 | | | | | | | | | |
| 3,14 | 1,57 | 4,274 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,57 | 4,110 | 3,14 | 1,57 | 4,272 | 3,14 | 1,57 | 4,272 | | | | | | | | | |
| 3,14 | 1,57 | 4,110 | 3,14 | 1,57 | 4,272 | 3,14 | 1,57 | 4,272 | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,58 | 4,180 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | | | | | |
| 4,187 ± 0,09 | | | | | | 4,26 ± 0,09 | | | | | | 4,166 ± 0,09 | | | | | |

| Dom. de frecvență [MHz] | Frecvență [MHz] | Proba de cuarț. Experiment de confirmare 1 | | | Permiți vitate medie relativă |
|-------------------------------|--------------------|---|----------------|---------------------|--|
| | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 8,5 - 27 | 15,5 | 3,17 | 1,57 | 4,251 | 4,185 ± 0,09 |
| | 16 | 3,17 | 1,57 | 4,110 | |
| | 16,5 | 3,15 | 1,58 | 4,110 | |
| | 17 | 3,15 | 1,59 | 4,183 | |
| | 17,5 | 3,16 | 1,58 | 4,193 | |
| | 18 | 3,16 | 1,58 | 4,210 | |
| | 18,5 | 3,17 | 1,57 | 4,214 | |

| Proba de cuarț. Experiment de confirmare 2 | Permiti viteza medie relativă | | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Românească | | | Permiti viteza medie relativă | | | Proba de cuarț. Cristal de comparare Japoneză | | | Permiti viteza medie relativă | | | |
|--|-------------------------------|----------------|---------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|---|-----------------|---------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|--|
| | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 3,16 | 1,58 | 4,172 | 4,187 ± 0,09 | 3,16 | 1,59 | 4,210 | 4,26 ± 0,09 | | | | 4,166 ± 0,09 | | | | | |
| 3,15 | 1,58 | 4,210 | | 3,17 | 1,60 | 4,293 | | | | | | | | | | |
| 3,15 | 1,57 | 4,180 | | 3,17 | 1,59 | 4,293 | | | | | | 1,55 | 0,62 | 4,163 | | |
| 3,17 | 1,58 | 4,210 | | 3,16 | 1,59 | 4,251 | | | | | | | | | | |
| 3,14 | 1,59 | 4,110 | | 3,16 | 1,58 | 4,272 | | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,58 | 4,110 | | 3,16 | 1,59 | 4,272 | | | | | | | | | | |
| 3,16 | 1,57 | 4,251 | | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | | | | | | | | | |

| Dom. de frecvență [MHz] | Frecvență [MHz] | Proba de cuarț. Experiment de confirmare 1 | | | Permitivitatea relativă medie |
|-------------------------------|--------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------------|
| | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 8,5 - 27 | 19 | 3,15 | 1,57 | 4,183 | 4,185 ± 0,09 |
| | 19,5 | 3,14 | 1,57 | 4,251 | |
| | 20 | 3,15 | 1,58 | 4,110 | |
| | 21 | 3,16 | 1,58 | 4,183 | |
| | 22 | 3,16 | 1,59 | 4,183 | |
| | 23 | 3,15 | 1,58 | 4,210 | |
| | 24 | 3,16 | 1,57 | 4,214 | |

| Proba de cuarț. Experiment de confirmare 2 | | | Permiti vitea medie relativă | Proba de cuarț. Cristal de comparare Româneșc. | | | Permiti vitea medie relativă | Proba de cuarț. Cristal de comparare Japonez | | | Permiti vitea medie relativă |
|--|----------------|---------------------|------------------------------|--|----------------|---------------------|------------------------------|--|----------------|---------------------|------------------------------|
| d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 3,16 | 1,57 | 4,214 | 4,187 ± 0,09 | 3,14 | 1,57 | 4,272 | 4,26 ± 0,09 | | | | 4,166 ± 0,09 |
| 3,16 | 1,57 | 4,214 | | 3,17 | 1,59 | 4,251 | | | | | |
| 3,15 | 1,58 | 4,180 | | 3,17 | 1,60 | 4,211 | | | | | |
| 3,14 | 1,57 | 4,210 | 4,186 ± 0,09 | 3,16 | 1,62 | 4,110 | 4,20 ± 0,09 | | | | 4,151 ± 0,09 |
| 3,15 | 1,58 | 4,180 | | 3,14 | 1,59 | 4,190 | | | | | |
| 3,16 | 1,58 | 4,110 | | 3,17 | 1,59 | 4,251 | | | | | |
| 3,16 | 1,59 | 4,214 | | 3,14 | 1,58 | 4,231 | | 1,55 | 0,62 | 4,163 | |
| 3,16 | 1,57 | 4,214 | | 3,14 | 1,59 | 4,190 | | | | | |
| 3,17 | 1,57 | 4,180 | | 3,15 | 1,58 | 4,251 | | 1,54 | 0,61 | 4,110 | |
| 3,16 | 1,58 | 4,180 | 3,16 | 1,59 | 4,231 | 1,53 | 0,61 | 4,180 | | | |

| Dom. de frecvență [MHz] | Frecvență [MHz] | Proba de cuarț. Experiment de confirmare J | | | Permitivitatea relativă medie |
|-------------------------------|--------------------|---|----------------|---------------------|-------------------------------------|
| | | d ₁ | d ₂ | ε _{quartz} | |
| 8,5 - 27 | 25 | 3,16 | 1,57 | 4,183 | 4,185 ± 0,09 |
| | 26 | 3,16 | 1,57 | 4,210 | |
| | 27 | 3,15 | 1,58 | 4,110 | |
| 28 - 50 | 28 | 3,17 | 1,57 | 4,180 | |
| | 29 | 3,17 | 1,59 | 4,180 | |
| | 30 | 3,15 | 1,58 | 4,110 | |
| | 35 | 3,16 | 1,57 | 4,214 | |
| | 40 | 3,17 | 1,57 | 4,214 | |
| | 45 | 3,16 | 1,58 | 4,180 | |
| | 50 | 3,16 | 1,59 | 4,182 | |

Tab. 1 Rezultate experimentale pentru determinarea permitivității dielectrice relative a cuarțului

ANEXA IV



Fig. 1 Autoclava Pilot cu sistem de etanșare



Fig. 2 Rastel cu cristale de α -cuarț pentru autoclava Pilot (experimentul de confirmare numărul 3)

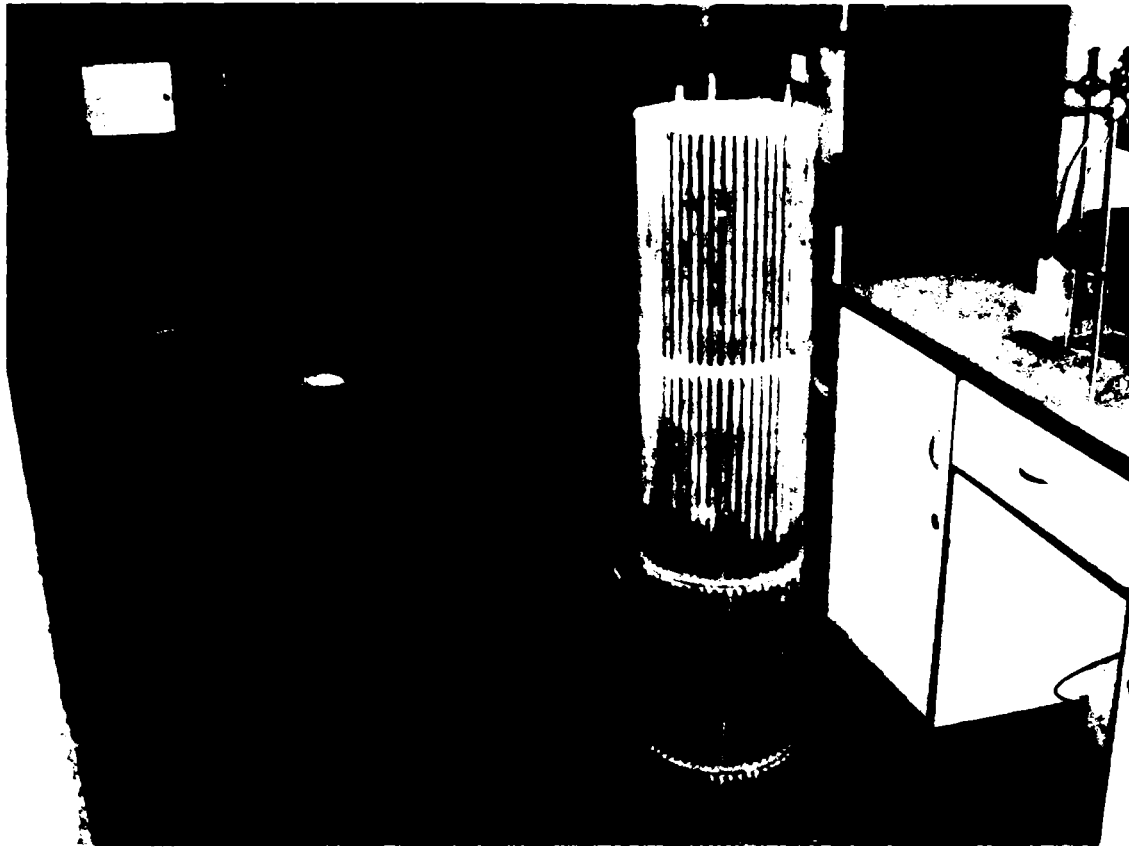


Fig. 3 Coș pentru materialul nutritiv (autoclava Pilot)



Fig. 4 Șicană (variantă)

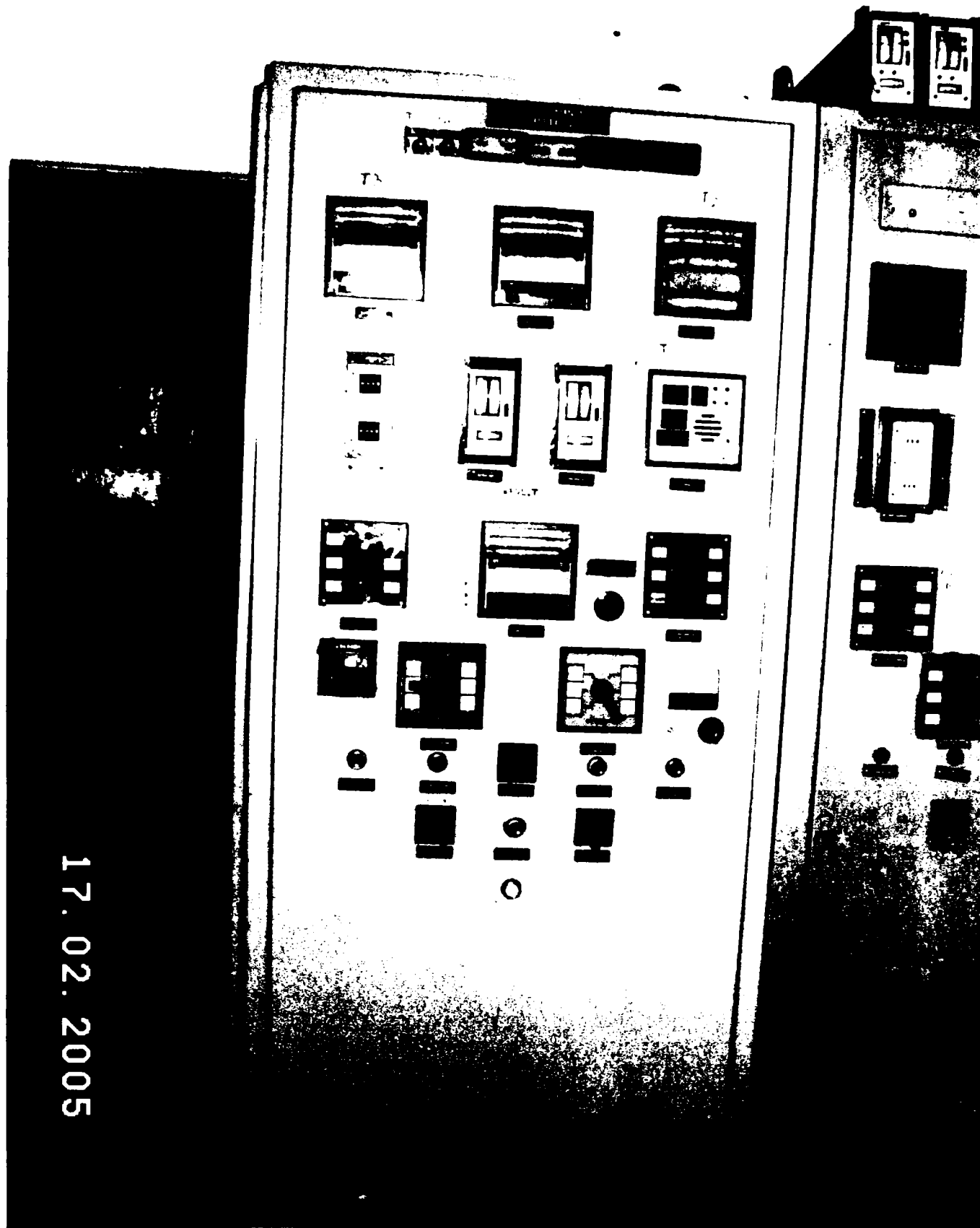


Fig. 5 Sistem de comandă și control al parametrilor



Fig. 6 Cristal de α - cuarț crescut în autoclava Pilot



Fig. 7 Material nutritiv, germene, monocristale