

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA**

**FACULTATEA DE MECANICĂ**

*ing. GHERASIMOV ADRIAN*

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA  
SISTEMELOR DE MĂSURARE A FORȚELOR**

**Conducător științific:**

*Prof.univ.dr.doc.șt.ing.dhc. AUREL NANU*

<b>UNIV. "POLITEHNICA" TIMIȘOARA</b>	
BIBLIOTECA CENTRALĂ	
Nr. volan	3
Dulap	369 Lit. +

**2006**

# Cuprins

1. Introducere .....	3
2. Termeni, definiții și notații .....	5
2.1 Mărimi și unități .....	6
2.2 Măsurări .....	7
2.3 Dispozitive de măsurare .....	9
2.4 Caracteristici ale sistemelor de măsurare .....	10
2.5 Etaloane .....	11
2.6 Concepte utilizate în abordarea clasică a măsurărilor .....	12
2.7 Abrevieri .....	13
3. Obiective .....	14
4. Concepte și principii generale .....	15
4.1 Trasabilitatea măsurării forței .....	15
4.2 Etalonarea metrologică .....	19
4.2.1 Etaloane .....	20
4.2.2 Metode și proceduri de etalonare .....	21
4.3 Incertitudinea de măsurare .....	24
4.4 Optimizarea sistemelor de măsurare a forței .....	26
5. Stadiul actual al sistemelor de măsurare a forțelor .....	31
5.1 Etaloane naționale de forță .....	31
5.1.1 Integrarea în structurile europene și mondiale .....	32
5.1.2 Studiu comparativ .....	32
5.2 Etaloane de referință de forță .....	44
5.3 Etaloane de lucru de forță .....	46
5.4 Mijloace de lucru de măsurare a forței .....	47
5.4.1 Traductoare de forță .....	47
5.4.2 Sisteme de măsurare a forței .....	50
5.5 Concluzii .....	52
6. Contribuții la optimizarea SMF- factori și activități .....	53
6.1 Contribuții la optimizarea etaloanelor naționale de forță .....	53
6.1.1 Etalonarea greutateilor .....	56
6.1.2 Influența accelerației gravitaționale .....	62
6.1.3 Influența densității aerului .....	63
6.1.4 Influența densității greutateilor etalon .....	69
6.1.5 Influența erorilor determinate la compararea cu etaloane similare .....	71
6.2 Contribuții la optimizarea etaloanelor secundare, de referință și de lucru .....	73
6.2.1 Contribuții la optimizarea etaloanelor secundare, de referință	74
6.2.2 Contribuții la optimizarea etaloanelor de lucru .....	77
6.3 Contribuții la optimizarea mijloacelor de măsurare de lucru .....	86
6.3.1 Mașini de încercat materiale .....	86
6.3.2 Dinamometre .....	99

7. Comparări interlaboratoare, internaționale și naționale .....	101
7.1 Cea mai bună capabilitate de măsurare, <i>bmc</i> .....	102
7.2 Capabilitatea de etalonare și măsurare, CMC .....	103
7.3 Comparări interlaboratoare .....	104
7.3.1 Comparări internaționale ale etaloanelor naționale de forță ...	105
7.3.2 Comparări naționale ale laboratoarelor de metrologie .....	107
8. Optimizarea experimentală .....	112
8.1 Realizarea mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN .....	112
8.1.1 Identificarea sistemului .....	112
8.1.2 Activități de optimizare .....	117
8.1.3 Determinarea performanțelor metrologice .....	130
8.2 Realizarea mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN ...	132
8.2.1 Identificarea sistemului .....	133
8.2.2 Activități de optimizare .....	136
8.2.3 Determinarea performanțelor metrologice .....	145
8.3 Realizarea mașinii etalon de forță cu comparație de 1000 kN .....	148
9. Concluzii și perspective .....	153
10. Contribuții personale .....	161
11. Bibliografie .....	163

# 1. INTRODUCERE

Pentru conducerea eficientă a unui proces, indiferent de procedeele și mijloacele aplicate, informarea reprezintă o funcție esențială. Astfel, deciziile de conducere pot fi luate numai pe baza unor informații cât mai corecte și mai complete asupra unor parametri semnificativi pentru caracterizarea tehnică și economică a procesului, informații care pot fi obținute ca rezultat al unor operații de măsurare.

Sistemele de măsurare a forței constituie componente importante ale sistemelor de supraveghere a structurilor statice sau cinematice supuse unor regimuri variabile de solicitare și, în general, sunt utilizate pentru realizarea operațiunilor de măsurare a forțelor în diferite scopuri.

Utilizarea responsabilă a mijloacelor de măsurare în general, deci și a sistemelor de măsurare a forței, implică respectarea unor principii de bază:

- alegerea corespunzătoare a mijloacelor de măsurare, pe baza unei analize ale caracteristicilor tehnice și metrologice, pentru cunoașterea cât mai exactă a calității și performanțelor, în vederea stabilirii adecvării acestora la scopul propus (*adecvare*);
- integrarea mijloacelor de măsurare, prin încercări și etalonări, în sistemul național de trasabilitate a măsurărilor la unitățile de măsură acceptate internațional; demonstrarea performanțelor tehnice și metrologice (*trasabilitate*);
- stabilirea și utilizarea de tehnici de măsurare care să conducă la calitatea propusă a rezultatului de măsurare (*procedurare*).

Pentru aprecierea adecvării unui mijloc de măsurare la necesitățile de utilizare este importantă cunoașterea proprietăților acestuia. Printre acestea se numără proprietățile statice de transfer (de exemplu, exactitatea), proprietățile dinamice de transfer (de exemplu, timpul de răspuns, regimurile tranzitorii), fiabilitatea (de exemplu, rata defectărilor, timpul mediu de bună funcționare), rentabilitatea.

În acest context, problematica tipică asociată mijloacelor de măsurare este:

- asigurarea exactității de măsurare, conform specificațiilor și cerințelor;
- gestionarea corespunzătoare (energie, greutate, număr de bucăți, costuri);
- posibilitatea controlului (posibilitatea de a verifica performanțele declarate);
- asigurarea calității;
- comanda și/sau reglarea (disponibilitatea de a fi incluse în sisteme de comandă sau reglare);
- optimizarea;
- supravegherea (de exemplu, profilaxia defectelor, mentenabilitate);
- semnalizarea și/sau deconectarea (sisteme de protecție);
- conformitatea cu prescripțiile (de exemplu, gabarit, zgomot, protecția mediului).

Pentru mijloacele de măsurare de lucru (care se utilizează în mod uzual la determinarea valorilor unor mărimi în scopul obținerii, prelucrării, transmiterii sau stocării unor informații de măsurare) caracteristicile tehnice și metrologice necesare pentru stabilirea adecvării acestora la scopul măsurării sunt, de regulă, furnizate de către producător. Desigur, declararea performanțelor acestora se bazează pe o serie de încercări la care tipurile de mijloace de măsurare sunt supuse în prealabil. În ultimul timp, însă, sistemele de management a calității, care guvernează o mare parte din activitățile societății contemporane, stabilesc că declarațiile producătorului privind performanțele produselor sale trebuie să se bazeze pe analize sistematice, în conformitate cu prevederile unor standarde sau a unor practici recunoscute.



În consecință, se impune ca pentru recunoașterea performanțelor tehnice și metrologice declarate de către producătorul mijloacelor de măsurare să se efectueze analize sistematice independente (încercări, etalonări, verificări), inițiale și periodice, care să ateste conformitatea produselor cu specificațiile.

Caracterizarea etaloanelor (mijloace de măsurare destinate a defini, realiza, conserva și reproduce unitatea de măsură pentru a servi ca referință) este substanțial diferită de cea a mijloacelor de măsurare de lucru din același domeniu. Caracteristicile tehnice și metrologice ale etaloanelor se pot determina pe baza unor încercări specifice, de regulă laborioase și dificile. Existența unor etaloane naționale și de referință având caracteristici tehnice și metrologice corespunzătoare nivelului mondial este necesară pentru asigurarea unei baze științifice și tehnice pentru măsurările efectuate pe teritoriul național în domeniul considerat și pentru recunoașterea internațională a acestora.

O condiție esențială pentru efectuarea de măsurări corecte este asigurarea trasabilității metrologice, respectiv raportarea rezultatului măsurărilor la referințe stabilite (reglementări, standarde, practici etc), de regulă etaloane naționale sau internaționale, prin intermediul unui lanț neîntrerupt de comparații având, toate, incertitudini determinate.

Trasabilitatea măsurărilor la unitățile Sistemului Internațional (SI) este asigurată, la nivel național, prin intermediul unui sistem de trasabilitate ierarhizat și coerent.

În accepțiunea prezentei lucrări, sistemele de măsurare a forței sunt ierarhizate în funcție de locul și rolul pe care îl ocupă în sistemul de trasabilitate.

Una dintre problemele generale este de a asigura optimizarea a mijloacelor de măsurare, în legătură cu una sau mai multe aplicații. Optimizarea constă în a alege din mulțimea variantelor care constituie soluții ale problemei date, care reprezintă rezultatele unei abordări minimale, pe cea care asigură, în plus, obținerea unui optim în conformitate cu un criteriu de comparație adoptat.

Criteriile de optimizare prezentate pentru sistemele de măsurare a forței sunt sensibil diferite în funcție de locul și rolul ocupat în sistemul de trasabilitate. Pentru acest motiv, studiul sistemului de trasabilitate a măsurărilor de forță din România constituie o bază importantă pentru optimizarea sistemelor de măsurare a forței.

În cadrul sistemului de trasabilitate performanțele tehnice și metrologice declarate ale mijloacelor de măsurare, indiferent de nivelul ocupat, se certifică prin încercări și etalonări metrologice. Aceste operații stabilesc relația dintre valorile mărimii indicate de mijlocul de măsurare și valorile corespunzătoare realizate cu etaloane de ordin superior, precum și conformitatea cu cerințele specificate.

Asocierea incertitudinii de măsurare rezultatului măsurării este esențială pentru procesul de măsurare și etalonare deoarece, în absența acesteia, informația de măsurare nu este completă și, în general, nu poate fi utilă.

Pentru etaloanele naționale și cele de referință, compararea cu etaloanele similare ale altor țări sau, după caz, etalonarea în laboratoare recunoscute internațional, prezintă o importanță decisivă în recunoașterea internațională a rezultatelor de măsurare obținute pe teritoriul național. Acest aspect are o relevanță deosebită în contextul globalizării piețelor de consum.

În general, pentru realizarea unei măsurări corespunzătoare unui scop dat prin intermediul unui mijloc de măsurare, trebuie stabilite următoarele:

- principiul de măsurare, ca bază științifică a măsurării,
- metoda de măsurare, care este succesiunea logică a operațiilor utilizată în efectuarea măsurării,
- procedura de măsurare, respectiv descrierea în mod concret a operațiilor utilizate în efectuarea măsurării în conformitate cu metoda stabilită.

Pentru mijloacele de măsurare de lucru tehnica măsurării constă în preluarea mărimilor unidimensionale de măsurat și a vectorilor de măsurat multidimensionali care apar în procesele tehnice, traducerea semnalelor de măsurare obținute și convertirea acestora (sesizarea valorii de măsurat), precum și corectarea valorilor de măsurare obținute (prelucrarea valorii de măsurare), astfel încât să se obțină rezultatul măsurării cerute (valoarea măsurandului). În sistemele de măsurare a forței senzorii traduc mai întâi mărimea de măsurat (mărime neelectrică) în alte mărimi (neelectrice sau electrice) a căror măsurare poate fi efectuată în condiții acceptabile.

În prezent se poate remarca tendința clară de conversie a mărimii de măsurat (forța) în semnal electric care poate fi relativ ușor convertit (analog-digital), amplificat și prelucrat prin intermediul mijloacelor electronice de calcul.

Etaloanele de ordin inferior (etaloanele de lucru) și etaloanele de referință se utilizează la măsurări, de regulă, în conformitate cu standarde, proceduri sau practici recunoscute. Pentru etaloanele naționale deținătorul dezvoltă metode și proceduri de utilizare, cercetare, îmbunătățire caracteristice fiecărui etalon în parte. Studiul etaloanelor naționale reprezintă o activitate de cercetare științifică.

## 2. Termeni, definiții și notații

În prezenta lucrare termenul metrologic de „măsurare” a fost reconsiderat față de abordările anterioare. În abordarea clasică (CA) se consideră că măsurandul poate fi descris printr-o valoare singulară, considerată adevărată, dar se presupune că această valoare nu poate fi cunoscută exact, din cauza influenței mijloacelor și procedurilor de măsurare, care introduc în procesul de determinare a valorii măsurandului erori sistematice și aleatorii. Aceste erori sunt, în cazul abordării clasice, tratate diferențiat în „sistemul de propagare a erorilor”, considerându-se că acestea pot, întotdeauna, să fie identificate. Sunt folosiți termenii de „incertitudine sistematică” și „incertitudine aleatoare” fără să existe metode bine fundamentate de interpretare sau combinare a acestora. Acest mod de exprimare a incertitudinii a fost înlocuit cu noua abordare, pe baza incertitudinii (UA), un concept unitar, utilizat în măsurări. În această abordare noțiunea de „eroare” nu mai joacă un rol esențial în măsurare. În consecință, rezultă la finalul măsurării o singură incertitudine asociată valorii obținute prin măsurare, care este compusă din mai mulți factori contributivi. Această incertitudine caracterizează gradul în care valoarea necunoscută a măsurandului devine cunoscută după măsurare, prin analiza informațiilor obținute în procesul de măsurare. Această nouă abordare a măsurărilor bazată pe incertitudine este utilizată în prezenta teză de doctorat, în numeroase cazuri, pentru evaluarea contribuției factorilor de influență (perturbatori) asupra sistemelor de măsurare a forței.

Pentru interpretarea corectă a unor termeni utilizați în prezenta teză de doctorat, se definesc acești termeni după cum urmează:

## 2.1 Mărimi și unități

### 2.1.1 Mărime

Proprietate a unui fenomen, a unui corp sau a unei substanțe de a i se putea atribui o valoare cantitativă

### 2.1.2 Sistem de mărimi

Ansamblu de mărimi, împreună cu un ansamblu de ecuații relaționale necontradictorii care leagă acele mărimi

### 2.1.3 Sistem internațional de mărimi

Sistem de mărimi, împreună cu un ansamblu de ecuații relaționale, care stau la baza unui sistem internațional

### 2.1.4 Mărime fundamentală

Mărime, admisă prin convenție, utilizată într-un sistem de mărimi pentru a defini alte mărimi din acel sistem

### 2.1.5 Mărime derivată

Mărime definită într-un sistem de mărimi ca funcție de mărimile fundamentale ale aceluși sistem

### 2.1.6 Unitate de măsură

Mărime scalară, definită și adoptată prin convenție, cu care sunt comparate alte mărimi de aceeași natură, pentru exprimarea valorilor în raport cu acea mărime

### 2.1.7 Valoarea unei mărimi

Valoare cantitativă a unei mărimi reprezentată printr-un număr și o referință dată. Valoarea unei mărimi poate fi exprimată prin:

- un produs dintre un număr și o unitate de măsură;
- un număr (pentru mărimile având dimensiunea egală cu unu);
- o referire la o procedură de măsurare și la un număr de ordine

### 2.1.8 Unitate de măsură fundamentală

Unitate de măsură adoptată prin convenție și în mod unic pentru o mărime fundamentală a unui sistem de mărimi dat

### 2.1.9 Unitate de măsură derivată

Unitate de măsură a unei mărimi derivate

### 2.1.10 Sistem de unități

Ansamblu convențional de unități fundamentale și de unități derivate, împreună cu multiplii și submultiplii acestora, împreună cu reguli privind utilizarea acestora

### 2.1.11 Sistemul Internațional de Unități (SI)

Sistem coerent de unități, bazat pe un sistem internațional de mărimi, împreună cu numele și simbolurile unităților și regulile de utilizare a acestora, adoptat de către Conferința Generală de Greutăți și Măsuri (CGPM)

### 2.1.12 Valoare convențională a unei mărimi

Valoare atribuită prin convenție unei mărimi pentru un scop dat. De exemplu: accelerației căderii libere (denumită și accelerație gravitațională)  $i$  se atribuie valoarea standard,  $g_n = 9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}$ .

## 2.2 Măsurări

### 2.2.1 Măsurare

Proces experimental pentru obținerea informațiilor privind valoarea a unei mărimi

### 2.2.2 Metrologie

Domeniu al cunoașterii care se ocupă de măsurări

### 2.2.3 Măsurand

Mărime care urmează să fie măsurată. Definierea unui măsurand poate necesita precizări privind unele mărimi, cum ar fi: timpul, temperatura, presiunea etc.

### 2.2.4 Rezultat de măsurare

Informație despre valoarea unei mărimi obținută experimental (prin măsurare)

### 2.2.5 Incertitudine de măsurare

Parametru care caracterizează împrăștierea valorilor unei mărimi care au fost atribuite măsurandului, pe baza informațiilor utilizate. Incertitudinea de măsurare caracterizează cantitativ informațiile obținute despre măsurand, pe baza informațiilor obținute în procesul de măsurare sau din alte surse. Incertitudinea de măsurare cuprinde, în general, mai multe componente. Unele din aceste componente pot fi evaluate pornind de la distribuția statistică a rezultatelor șirurilor de măsurări și pot fi caracterizate prin abateri standard experimentale. Celelalte componente, care pot fi, de asemenea, caracterizate prin abateri standard, sunt evaluate prin admiterea unor distribuții de probabilitate bazate pe experiență sau pe alte informații.

### 2.2.6 Evaluare de tip A a incertitudinii de măsurare

Metodă de evaluare a unei componente a incertitudinii de măsurare bazată pe analiza statistică a valorilor mărimilor obținute prin măsurări în condiții de repetabilitate

### 2.2.7 Evaluare de tip B a incertitudinii de măsurare

Metodă de evaluare a unei componente a incertitudinii de măsurare prin alte metode decât analiza statistică a valorilor mărimilor obținute prin măsurări

### 2.2.8 Incertitudine standard

Incetitudine de măsurare exprimată printr-o abatere standard

### 2.2.9 Incertitudine de măsurare extinsă

Semilărgimea unui interval de acoperire, centrat în jurul valorii estimate a unei mărimi, având specificată o probabilitate de acoperire

### 2.2.10 Factor de extindere

Număr cu care este multiplicată incertitudinea standard de măsurare a rezultatului unei măsurări pentru a obține incertitudinea de măsurare extinsă

### 2.2.11 Etalonarea unui sistem de măsurare

Definiția 1: Operație care stabilește relația dintre valorile mărimilor furnizate de etaloane de măsurare și valorile corespunzătoare indicate de sistemul de măsurare, obținute în condiții specificate și incluzând evaluarea incertitudinii de măsurare

Definiția 2: Operație care stabilește relația existentă în condiții specificate, între indicația unui sistem de măsurare și rezultatul de măsurare care ar trebui să fie obținut la utilizarea sistemului de măsurare, obținută prin raportarea la unul sau mai multe etaloane de măsurare

### 2.2.12 Schemă de ierarhizare

Secvență a unui sistem de etalonare care exprimă legătura dintre un sistem de măsurare și referința declarată

### 2.2.13 Trasabilitate metrologică

Proprietate a rezultatului unei măsurări de a putea fi raportată la o referință stabilită, de regulă etaloane naționale sau internaționale, prin intermediul unui lanț neîntrerupt de etalonări ale sistemului de măsurare sau prin comparații, având, toate, incertitudini declarate

### 2.2.14 Lanț de trasabilitate

Lanț compus din diferite sisteme de măsurare, împreună cu proceduri de măsurare și etaloane de măsurare, prin intermediul căruia rezultatul unei măsurări se raportează la referința declarată

### 2.2.15 Trasabilitate metrologică la o unitate de măsură

Trasabilitate metrologică a rezultatului unei măsurări la definiția unei unități de măsură prin intermediul unui lanț de trasabilitate declarat. Termenul de „trasabilitate la SI” are semnificația trasabilității metrologice la una din unitățile Sistemului Internațional de Unități

### 2.2.16 Mărime de influență

Mărime, alta decât măsurandul sau mărimea supusă măsurării, care, prin modificarea valorii acesteia, afectează relația dintre indicația unui sistem de măsurare și rezultatul măsurării

### 2.2.17 Corecție

Modificare efectuată asupra valorii unei mărimi obținută prin măsurare, pentru compensarea unor efecte sistematice

#### 2.2.18 Funcție de măsurare

Funcție care exprimă relația matematică între unul sau mai mulți măsuranzi și mărimea sau mărimile care trebuie măsurate, sau a căror valori trebuie obținute, pentru calcularea valorii fiecărui măsurand

#### 2.2.19 Mărime de intrare a unei funcții de măsurare

Mărime care trebuie măsurată, sau a cărei valoare trebuie obținută pentru a calcula o valoare a unui măsurand ca mărime de ieșire a unei funcții de măsurare. Indicațiile unui sistem de măsurare, corecțiile și mărimile de influență sunt mărimo de intrare a unei funcții de măsurare

#### 2.2.20 Exactitate de măsurare

Grad de concordanță între valorile unei mărimi obținute prin măsurări repetate a mărimii considerate, în condiții specificate. În mod obișnuit, exactitatea de măsurare este exprimată numeric prin estimarea „inexactității de măsurare”, utilizând abaterea standard, varianța sau coeficienții de variație

#### 2.2.21 Condiții de repetabilitate a măsurărilor

Condiții de măsurare care includ aceeași procedură de măsurare, același operator, același sistem de măsurare, aceleași condiții de lucru și aceeași locație, precum și repetarea măsurărilor după o perioadă scurtă de timp

#### 2.2.22 Repetabilitate a măsurării

Exactitate de măsurare în condiții de repetabilitate a măsurării

#### 2.2.23 Condiții de reproductibilitate a măsurărilor

Condiții de măsurare care includ diferite locații, diferiți operatori și diferite sisteme de măsurare

#### 2.2.24 Reproductibilitate a măsurărilor

Exactitate de măsurare în condiții de reproductibilitate a măsurărilor

### 2.3 Dispozitive de măsurare

#### 2.3.1 Aparat de măsurat

Dispozitiv sau o combinație de dispozitive care se utilizează pentru măsurarea mărimilor

#### 2.3.2 Traductor de măsurare

Dispozitiv care face ca unei mărimi de intrare să îi corespundă, conform unei relații determinate, o mărime de ieșire

#### 2.3.3 Sistem de măsurare

Ansamblu de mijloace de măsurare, împreună cu alte dispozitive, reunite și adaptate pentru măsurarea unor mărimi specificate, în intervale de valori specificate



#### 2.3.4 Senzor

Element al unui sistem de măsurare care este direct influențat de un fenomen, un obiect sau o substanță caracterizate printr-o mărime care trebuie măsurată

### 2.4 Caracteristici ale sistemelor de măsurare

#### 2.4.1 Indicație a unui sistem de măsurare

Valoare a mărimii furnizată la ieșirea unui sistem de măsurare

#### 2.4.2 Domeniu de indicații

Ansamblu de valori ale unei mărimi delimitate de indicațiile extreme posibile ale unui sistem de măsurare

#### 2.4.3 Domeniu nominal

Ansamblu de valori delimitate de valorile rotunjite sau aproximative ale indicațiilor extreme care se pot obține printr-o anumită configurare a unui sistem de măsurare și care este utilizat pentru definirea acelei configurații

#### 2.4.4 Domeniu de măsurare

Ansamblu de valori ale mărimilor de același fel care pot fi măsurate de un sistem de măsurare dat, cu o incertitudine de măsurare specificată, în condiții definite

#### 2.4.5 Condiții normale de funcționare a unui sistem de măsurare

Condiții care trebuie îndeplinite pe timpul măsurării pentru ca un sistem de măsurare să funcționeze așa cum a fost conceput

#### 2.4.6 Condiții de referință

Condiții de utilizare prescrise pentru evaluarea performanțelor unui sistem de măsurare sau pentru compararea rezultatelor măsurărilor. Condițiile de referință specifică domeniul valorilor pentru mărimile de influență

#### 2.4.7 Condiții optime pentru un sistem de măsurare

Condiții de utilizare a unui sistem de măsurare în care contribuția acestuia la incertitudinea de măsurare este minimă

#### 2.4.8 Sensibilitatea unui sistem de măsurare

Raport între modificarea indicației unui sistem de măsurare și modificarea corespunzătoare a valorii mărimii măsurate

#### 2.4.9 Rezoluție a unui sistem de măsurare

Cea mai mică modificare a valorii unei mărimi care este măsurată de un sistem de măsurare care provoacă o modificare perceptibilă a indicației corespunzătoare

#### 2.4.10 Rezoluție a unui dispozitiv de afișare

Cea mai mică diferență între indicațiile unui dispozitiv de afișare care poate fi percepută în mod semnificativ. Pentru un dispozitiv de afișare numeric, rezoluția reprezintă modificarea indicației cu o unitate a cifrei celei mai puțin semnificative

#### 2.4.11 Stabilitate a unui sistem de măsurare

Proprietate a unui sistem de măsurare de a-și menține constante caracteristicile sale metrologice în timp

#### 2.4.12 Derivă a unui sistem de măsurare

Modificare a indicației unui sistem de măsurare, în general înceată și continuă, care nu este determinată de modificarea mărimii măsurate sau a unei mărimi de influență

#### 2.4.13 Variație datorată unei mărimi de influență

Diferență între indicațiile unui sistem de măsurare pentru aceeași valoare a mărimii măsurate atunci când o mărime de influență determină succesiv două valori diferite

#### 2.4.14 Repetabilitate a unui sistem de măsurare

Proprietate a unui sistem de măsurare de a furniza indicații foarte apropiate între ele la măsurarea repetată a aceleiași mărimi, în condiții de repetabilitate

#### 2.4.15 Incertitudine instrumentală

Componentă a incertitudinii de măsurare care este atribuită unui mijloc de măsurare și este determinată prin etalonare

#### 2.4.16 Clasă de exactitate

Clasă de mijloace de măsurare care îndeplinesc cerințe metrologice declarate, pentru care incertitudinea instrumentală este păstrată în limite specificate, în condiții de funcționare specificate.

### 2.5 Etaloane

În știință și tehnică, cuvântul englez „standard” este utilizat cu două semnificații diferite: ca document tehnic normativ larg adoptat, specificație, recomandare tehnică sau un document similar (în limba franceză „norme”) și, de asemenea, ca etalon (în limba engleză „measurement standard”, iar în franceză „etalon”). În prezenta teză de doctorat este considerată numai cea de-a doua semnificație.

#### 2.5.1 Etalon

Realizarea definiției unei mărimi date, având o valoare declarată și o incertitudine de măsurare, utilizată ca referință. Un etalon poate fi utilizat ca referință pentru atribuirea rezultatelor de măsurare altor mărimi de același fel

#### 2.5.2 Etalon național

Etalon desemnat ca referință metrologică națională declarată

#### 2.5.3 Etalon primar

Etalon pentru care valoarea mărimii și incertitudinea de măsurare se stabilesc fără raportare la un alt etalon al unei mărimi de același fel. Aceasta implică faptul că un etalon primar trebuie să reproducă definiția unității de măsură respective, în mod particular a unei unități SI. Primul etalon într-o schemă de ierarhizare este întotdeauna un etalon primar



#### 2.5.4 Etalon secundar

Etalon pentru care valoarea mărimii și incertitudinea de măsurare se stabilesc în funcție de, sau prin comparație cu un etalon primar al unei mărimi de același fel

#### 2.5.5 Etalon de referință

Etalon utilizat pentru etalonarea etaloanelor de lucru într-o organizație dată, într-un anumit loc

#### 2.5.6 Etalon de lucru

Etalon utilizat în mod curent pentru a etalona, verifica sau încerca sisteme de măsurare, măsuri sau materiale de refrință

#### 2.5.7 Etalon itinerant

Etalon, uneori de construcție specială, prevăzut pentru a fi transportat în locuri diferite

#### 2.5.8 Etalon de transfer

Etalon utilizat ca intermediar pentru a compara între ele etaloane

### **2.6 Concepte utilizate în abordarea clasică a măsurărilor (CA)**

Unii dintre termenii utilizați în abordarea clasică a măsurărilor sunt exprimați identic cu cei din abordarea bazată pe incertitudine (UA). În cazurile considerate că ar putea produce confuzii, se va preciza apartenența termenilor utilizați la una din cele două abordări.

#### 2.6.1 Valoare adevărată a unei mărimi

Valoare compatibilă cu definiția unei mărimi. În abordarea clasică descrierea măsurandului este efectuată printr-o mărime unică. Valoarea adevărată poate fi obținută în urma unei măsurări perfecte, adică o măsurare fără eroare. Valoarea adevărată este, din această cauză, nu poate fi cunoscută. În conformitate cu definiția incertitudinii de măsurare, există o distribuție a valorilor adevărate compatibile cu definiția măsurandului. Această distribuție, de asemenea, nu poate fi cunoscută. Conceptul de „valoare adevărată” este evitat în abordarea măsurărilor prin incertitudine

#### 2.6.2 Exactitate de măsurare

Grad de concordanță între rezultatul unei măsurări și o valoare adevărată a măsurandului. Conceptul „exactitate de măsurare” este calitativ

#### 2.6.3 Exactitate a unui sistem de măsurare

Proprietate a unui sistem de măsurare de a furniza o valoare a unei mărimi apropiată de valoarea adevărată a măsurandului

#### 2.6.4 Eroare de măsurare

Diferență între valoarea unei mărimi obținută printr-o măsurare și valoarea adevărată a măsurandului

### 2.6.5 Eroare de indicație

Diferență între indicația unui sistem de măsurare și valoarea adevărată a măsurandului. În abordarea clasică a măsurărilor „indicația unui sistem de măsurare” și valoarea măsurandului sunt valori ale unor mărimi de același fel

### 2.6.6 Clasă de exactitate

În abordarea clasică, clasa de exactitate este clasa de sisteme de măsurare care satisfac anumite condiții metrologice destinate să mențină erorile în limitele specificate

### 2.6.7 Erori tolerate

Valori extreme ale unei erori admise prin specificații, reglementări etc. pentru un sistem de măsurare

### 2.6.8 Eroare într-un punct dat

Eroare de indicare a unui sistem de măsurare pentru o indicație specificată sau pentru o valoare specificată a măsurandului

### 2.6.9 Eroare de zero

Eroare într-un punct dat pentru valoarea zero a măsurandului

### 2.6.10 Eroare de justețe

Eroare sistematică a indicației unui mijloc de măsurare. Eroarea de justețe este estimată, de regulă, prin media aritmetică a erorilor de indicație obținute într-un număr adecvat de măsurări repetate

## 2.7 Abrevieri

BIPM	Biroul Internațional de Greutăți și Măsuri
<i>bmc</i>	Cea mai bună capabilitate de măsurare (a unui laborator de metrologie)
CA	Abordarea clasică a măsurărilor (Classical Approach)
CIPM	Conferința Internațională de Greutăți și Măsuri
CMC	Capabilitate de etalonare și măsurare
FCM	Etalon de referință de forță, utilizat în comparații internaționale
FSM	Etalon de forță, utilizat în comparații internaționale
JCRB	Comitetul de legătură între BIPM și RMO
MRA	Aranjament de recunoaștere mutuală, încheiat între institute naționale de metrologie
NIST	Institutul American pentru Etaloane și Tehnologie
OIML	Organizația Internațională de Metrologie Legală
RMO	Organizație regională de metrologie
SI	Sistemul Internațional de Măsuri
SMF	Sistem de măsurare a forței
UA	Abordarea măsurărilor pe baza incertitudinii (Uncertainty Approach)

### 3. Obiective

Prezenta teză de doctorat urmărește stabilirea unei baze teoretice pentru optimizarea sistemelor de măsurare a forței, în funcție de cerințele procesului de măsurare, după criterii de performanță și economice, precum și demonstrarea practică a valabilității soluțiilor de optimizare prin implementare (demonstrare practică).

Sistemele de măsurare a forței prezintă o diversitate mare sub diferite aspecte: construcție în funcție de destinație, principiul de funcționare, caracteristici tehnice și metrologice etc. Din mulțimea sistemelor de măsurare a forței, în prezenta lucrare sunt abordate, în principal, aspecte privind optimizarea:

- etaloanelor naționale de forță;
- etaloanelor de forță secundare, de referință;
- etaloanelor de forță, etaloane de lucru;
- sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale.

Limitele domeniului abordat sunt următoarele:

- domeniul de măsurare al sistemelor de măsurare a forței: de la 500 N la 5 000 kN;
- măsurare cvasistatică a forței.

În domeniul considerat, sunt relevate două direcții esențiale:

- identificarea, pe baza rezultatelor de cercetare, a situației existente pe plan național și internațional, precum și a problemelor rămase nerezolvate și,
- găsirea unor modalități pentru rezolvarea problemelor de optimizare a sistemelor de măsurare a forței, care nu au avut soluții până în prezent, sau au avut soluții incomplete.

Plecând de la cele precizate mai sus, principalele obiective ale prezentei lucrări sunt sintetizate astfel:

- stabilirea unei scheme de ierarhizare a sistemelor de măsurare a forței, în vederea furnizării unui model pentru asigurarea trasabilității măsurărilor la Sistemul Internațional de Unități (SI);
- definirea unor concepte și principii generale, care să constituie instrumente în abordarea și soluționarea problemelor de optimizare;
- efectuarea unui studiu comparativ al stadiului actual, pe plan internațional, al sistemelor de măsurare a forțelor (capabilități de etalonare și măsurare a etaloanelor naționale și secundare, de referință);
- identificarea condițiilor impuse pentru integrarea etaloanelor naționale de forță ale României în structurile de recunoaștere europene și mondiale;
- stabilirea modalităților de optimizare a etaloanelor naționale de forță, în vederea recunoașterii internaționale a capabilității de etalonare și măsurare;
- stabilirea unor direcții de acțiune pentru aducerea etaloanelor naționale și de referință de forță ale României la un nivel de exactitate corespunzător pentru recunoașterea internațională a rezultatelor de etalonare și măsurare;
- dezvoltarea unor metode de optimizare a etaloanelor secundare, de referință, de forță și a sistemelor de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru, plecând de la evaluarea contribuției incertitudinilor mărimilor de influență asupra incertitudinii compuse asociată rezultatului de măsurare;
- definirea unor metode de determinare a performanțelor sistemelor de măsurare a forței, în vederea evaluării rezultatelor de optimizare.

## 4. Concepte și principii generale

Definirea unor concepte și principii generale este necesară pentru stabilirea modalităților de optimizare a sistemelor de măsurare a forței.

### 4.1 Trasabilitatea măsurării forței

În domeniul metrologiei, trasabilitatea este cunoscută ca proprietate a unui rezultat al măsurării sau a valorii unui etalon de a putea fi raportat la o referință determinată, în general la etaloane naționale sau internaționale, prin intermediul unui lanț neîntrerupt de comparații, toate având incertitudini determinate.

Lanțul de comparații este constituit din seria de etalonări, efectuate în conformitate cu proceduri recunoscute, începând cu mijloacele de măsurare de lucru, trecând la etaloanele de lucru (de ordin inferior), etaloanele de referință și, în final, la etaloanele naționale. Prin aceste comparații se asigură de fapt, prin intermediul etaloanelor naționale sau internaționale, trasabilitatea rezultatelor măsurărilor efectuate pe teritoriul național la unitățile Sistemul Internațional (SI).

Sistemul Internațional este un sistem coerent de unități recomandat de Conferința Generală de Măsuri și Greutăți (CGPM), adoptat și menținut prin reglementare în România începând cu anul 1864.

Sistemul Internațional este bazat pe șapte unități fundamentale, admise prin convenție ca fiind independente funcțional unele de altele. Unitățile fundamentale ale Sistemului Internațional sunt redate în tabelul 4.1.

**Tabelul 4.1** Unitățile fundamentale SI

Mărimea		Unitatea fundamentală SI	
Denumire	Simbol	Denumire	Simbol
lungime	L	metru	m
masă	M	kilogram	kg
țimp	T	secundă	s
curent electric	I	amper	A
temperatură termodinamică	K	kelvin	K
cantitate de substanță	Q	mol	mol
intensitate luminoasă	C	candelă	cd

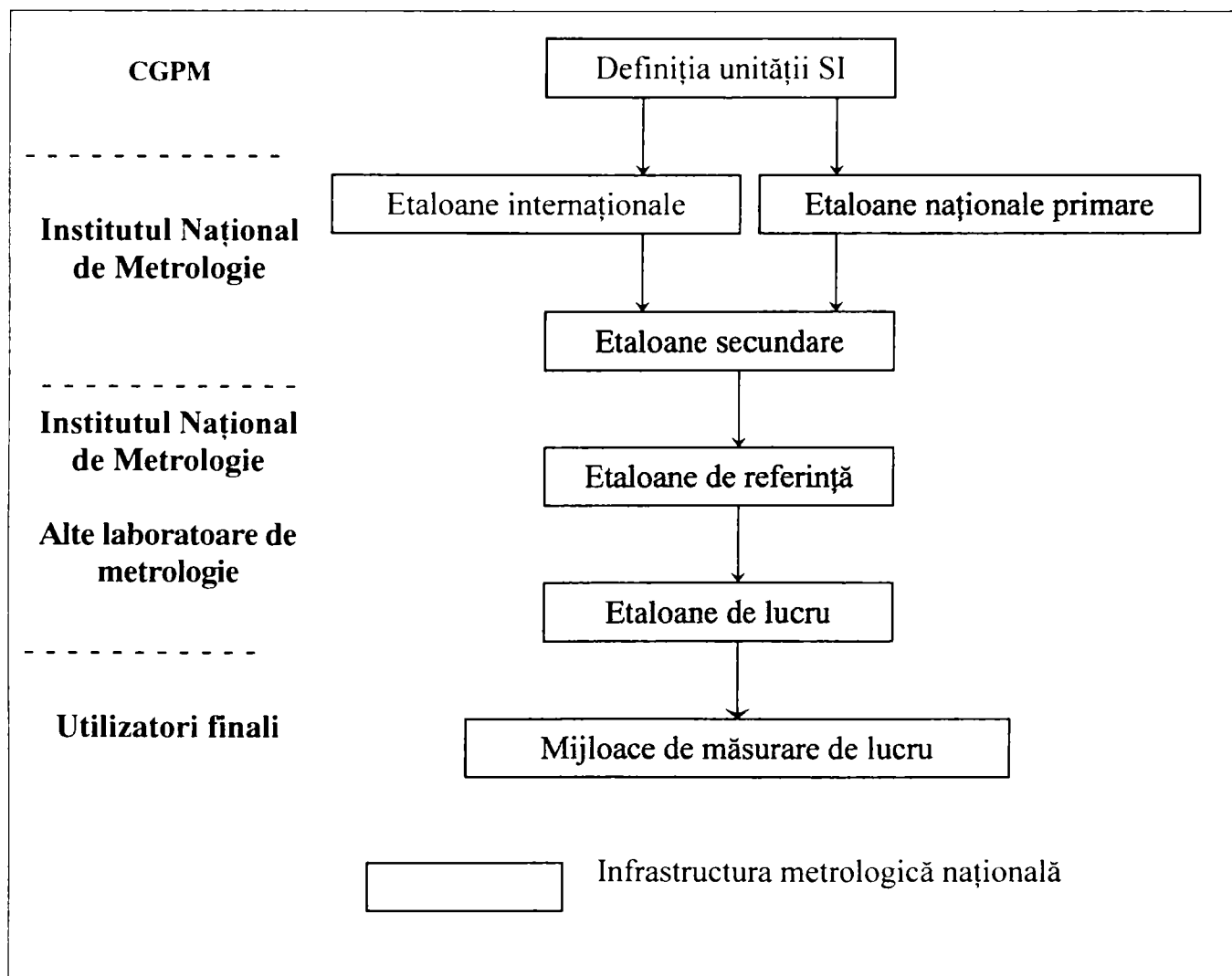
Asigurarea corectitudinii, uniformității și trasabilității măsurărilor pe teritoriul național revine infrastructurii metrologice din România. În principal, rolul fiecărei componente a infrastructurii metrologice naționale este particularizat astfel:

- Laboratoarele de metrologie aparținând Institutului Național de Metrologie duc o activitate sistematică pentru a menține un nivel corespunzător de exactitate a etaloanelor naționale, corelat cu etaloanele internaționale corespunzătoare sau, dacă acestea nu există, cu etaloanele similare ale altor țări. În același timp, Institutul Național de Metrologie asigură diseminarea unităților de măsură de la etaloanele naționale către nivelurile inferioare, până la etaloanele de lucru și mijloacele de măsurare de lucru.
- Laboratoarele de referință asigură trasabilitatea etaloanelor de lucru la Sistemul Internațional de Măsuri (SI).

Menționăm că, în conformitate cu reglementările naționale în vigoare în domeniul metrologiei, etaloanele naționale nu pot fi utilizate decât pentru reproducerea unităților de măsură și diseminarea acestora către etaloanele de ordin imediat inferior. Din acest motiv, etaloanele de referință ocupă un loc important în sistemul de trasabilitate, acestea având rolul de a conecta etaloanele de lucru la SI, utilizarea excesivă a etaloanelor naționale fiind evitată.

- Laboratoarele de etalonări și verificări efectuează încercarea și certificarea metrologică a mijloacelor de măsurare de lucru.

Schema generală de asigurare a trasabilității rezultatelor măsurărilor la SI în România este redată în figura 4.1.



**Figura 4.1:** Schema generală de trasabilitate a măsurărilor

În SI forța este definită ca mărime derivată, în funcție de mărimile fundamentale ale sistemului.

Dimensiunea mărimii *forță* se reprezintă în SI prin produsul puterilor factorilor mărimilor fundamentale ale sistemului:  $MLT^{-2}$ .

Unitatea de măsură a forței (newton, simbol N) reprezintă, în cadrul SI, o unitate de măsură derivată coerentă, adică o unitate de măsură care poate fi exprimată sub forma unui produs de puteri ale unităților fundamentale, factorul de proporționalitate fiind unu. Pentru newton:  $N = kg \cdot m \cdot s^{-2}$ .

În directă conexiune cu schema generală de trasabilitate a măsurărilor, diseminarea unității de forță în România pornește de la următoarele elemente:

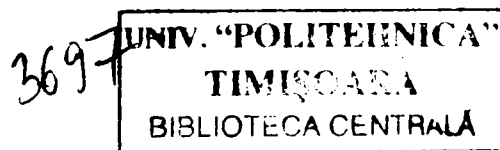
- a) *definirea unității de forță*: descrierea principiului și metodei pentru reproducerea unității de forță, precizarea mărimilor implicate (masă, lungime, timp) și a limitelor condițiilor de mediu impuse pentru măsurare;
- b) *etalioane naționale de forță*: constituie realizarea primară a unității SI de forță. Menționăm că etaloanele naționale de forță ale României sunt reprezentate prin trei mașini de forță cu încărcare directă având forța maximă produsă de 10 kN, 50 kN și 100 kN;
- c) *etalioane secundare și de referință*: etaloane având cele mai bune performanțe tehnice și metrologice, disponibile într-o organizație sau într-un loc dat, de la care pornește trasabilitatea pentru toate măsurările efectuate în acel loc. În general, etaloanele de referință de forță sunt constituite din mașini de forță cu încărcare directă, mașini de forță cu încărcare directă și amplificare hidraulică sau cu pârghie și mașini de forță cu comparare;
- d) *etalioane de referință și etaloane de lucru*: etaloane de la care se transmite unitatea de măsură a forței către mijloacele de măsurare de lucru, prin etalonări și verificări metrologice. Laboratoarele de etalonare stabilesc, în urma unei analize, care este cea mai bună cale de trasabilitate a etaloanelor proprii pentru a asigura trasabilitatea la SI. Schema de trasabilitate a măsurărilor de forță este prezentată în figura 4.2.

După cum se poate remarca din figura 4.2, structura lanțului de trasabilitate metrologică pentru definirea și diseminarea unității de forță în România este structurată pe nivele. Sunt evidențiate patru nivele: nivelul etaloanelor naționale și internaționale, nivelul laboratoarelor de referință, nivelul laboratoarelor de etalonări și verificări și nivelul utilizatorilor de mijloace de măsurare din domeniul forță.

**Nivelul etaloanelor naționale și internaționale** este constituit din etaloanele naționale ale unităților fundamentale implicate în definirea unității de forță (masă, lungime, timp), etaloanele de forță ale României și etaloanele de forță ale altor țări, cu care se efectuează comparații internaționale ale etaloanelor naționale de forță.

Etaloanele naționale de forță ale României sunt mașini de forță cu încărcare directă. Aceste etaloane reproduc unitatea de forță prin efectul direct al greutateii masei în câmpul gravitațional terestru. Etaloanele naționale de forță sunt direct trasabile la etaloanele naționale de masă, lungime și timp ale României, corespunzătoare definiției unității de forță. Este evident că există unii factori care influențează reproducerea unității de forță prin intermediul mașinilor cu încărcare directă, care nu pot fi complet definiți (de exemplu: erori în determinarea masei greutateilor, erori în determinarea accelerației gravitaționale, deplasări ale părților mecanice pe timpul funcționării, nealinieri, deformații elastice și plastice ale părților componente ale mașinilor etc.). Din acest motiv, având în vedere că pe plan mondial nu există (prin recunoaștere multilaterală) etaloane internaționale de forță, la acest nivel sunt necesare comparații interlaboratoare pentru asigurarea unei uniformități a măsurărilor de forță și recunoașterea mutuală a acestora.

Pentru efectuarea comparațiilor sunt utilizate traductoare de forță, etaloane de transfer, având performanțe metrologice foarte bune (stabilitate, reproductibilitate, sensibilitate etc.).





Caracterizarea metrologică cât mai completă și urmărirea în timp a performanțelor etaloanelor de transfer este esențială pentru asigurarea unor comparații interlaboratoare corespunzătoare și relevante.

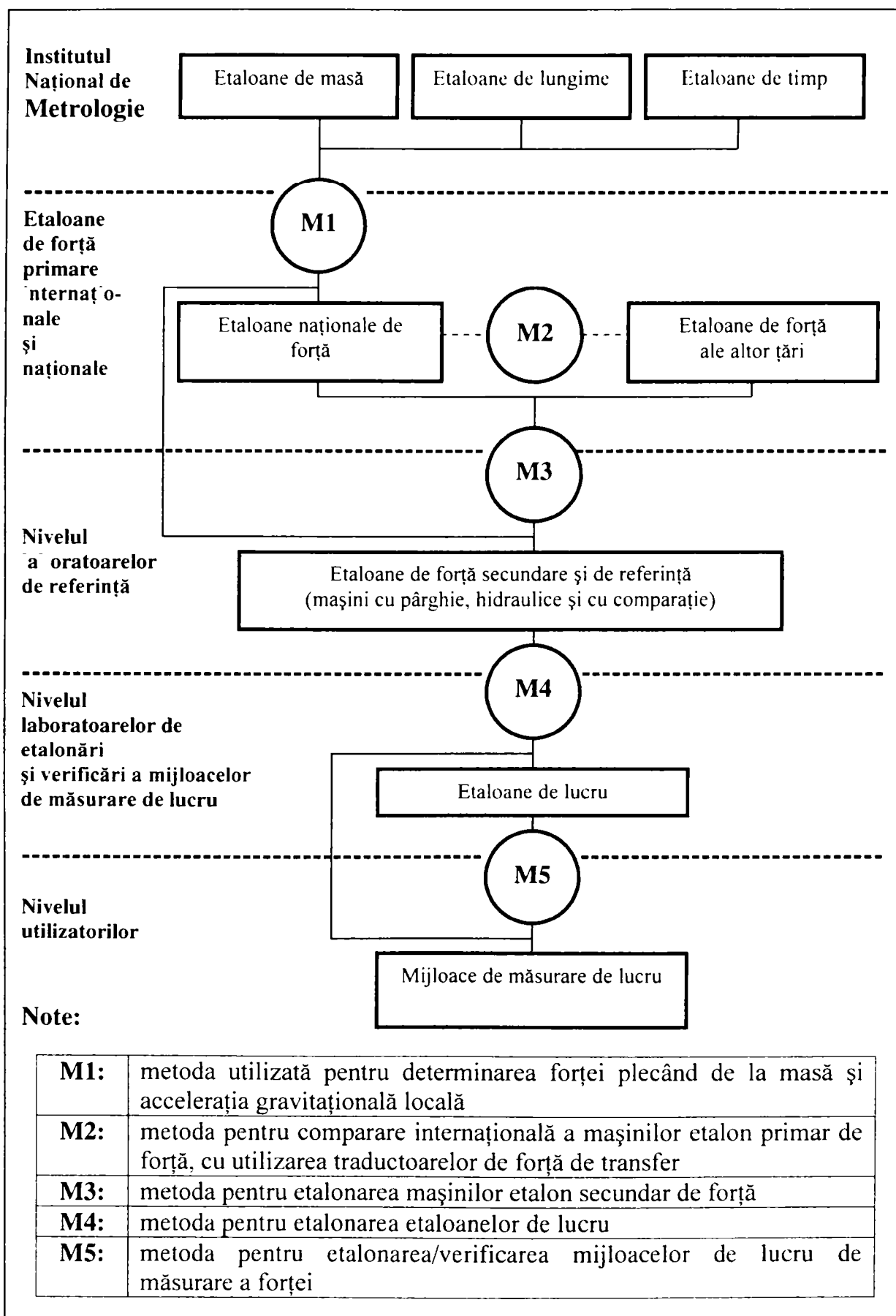


Fig. 4.2 Schema de trasabilitate a măsurărilor de forță din România

La **nivelul laboratoarelor de referință** sunt situate etaloanele de referință de forță. Aceste etaloane sunt, de regulă, mașini de forță cu încărcare directă, cu încărcare directă și amplificare cu pârghie sau hidraulică sau mașini de forță cu comparare, care utilizează traductoare de forță de referință. Acestea sunt utilizate pentru etalonarea mijloacelor de măsurare etalon de lucru. Ruta de trasabilitate este, în funcție de competența laboratoarelor naționale, la etaloanele naționale de forță sau la etaloanele de forță ale altor țări.

**Nivelul laboratoarelor de etalonări și verificări a mijloacelor de măsurare de lucru** este constituit, în marea majoritate, din dinamometre și traductoare etalon de forță. Mare parte din acestea trebuie să satisfacă prevederile standardelor aplicabile pentru etalonarea/ verificarea mașinilor de încercat materiale (de exemplu ISO 376 sau ASTM E 74). Aceste normative prevăd cerințe pentru asigurarea trasabilității măsurărilor (de exemplu, incertitudinea de măsurare a forței, periodicitatea de etalonare, metode de etalonare).

La **nivelul utilizatorilor** se situează mijloacele de lucru de măsurare a forței, utilizate în diferite domenii de activitate. Dintre acestea, marea majoritate este formată din sistemele de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale și dinamometrele de uz general.

Pentru demonstrarea asigurării trasabilității, mijloacele de măsurare corespunzătoare diferitelor nivele sunt cuprinse în procese de comparare a rezultatelor de măsurare, în conformitate cu proceduri specifice.

## 4.2 Etalonarea metrologică

Etalonarea metrologică constituie un ansamblu de operații în urma cărora se stabilesc, în condiții specificate, relația dintre valorile unei mărimi indicate de un aparat de măsurat sau un sistem de măsurare și valorile corespunzătoare realizate cu etaloane.

Termenul „indicație” are aici următoarea semnificație:

- în cazul aparatelor de măsurat indicatoare, înregistratoare sau integratoare: valoarea mărimii indicată de aparat;
- în cazul măsurilor: valoarea nominală sau valoarea specificată;
- în cazul traductoarelor: funcția de transfer sau valorile mărimii de ieșire corespunzătoare anumitor valori ale măsurandului.

Este evident, având în vedere definiția de mai sus, că etalonarea metrologică este aplicabilă numai mijloacelor de măsurare (etalonare și mijloace de măsurare de lucru).

Scopul etalonării poate fi:

- determinarea valorii (valorilor) unui măsurand;
- certificarea trasabilității la SI a măsurărilor efectuate cu etalonul sau mijlocul de măsurare respectiv, prin înscrierea rezultatelor etalonării în certificatul de etalonare;
- verificarea (metrologică), prin confruntarea rezultatelor etalonării cu specificațiile mijlocului de măsurare etalonat și/sau cerințele din normativele aplicabile.

În operațiile de etalonare, indicațiile etalonului sunt considerate valori convențional adevărate. Dacă este necesar, indicațiile etalonului vor fi valori corectate, ținând cont de valorile din certificatul de etalonare al etalonului utilizat și de condițiile în care se execută etalonarea.



De asemenea, indicațiile etalonului vor fi valorile medii ale rezultatelor unor măsurări repetate, în cazul în care la etalonare se execută șiruri de măsurări.

Pentru etalonarea unui mijloc de măsurare poate fi utilizat un singur etalon sau mai multe etaloane. Acest din urmă caz survine, de exemplu, când este necesară acoperirea unui domeniu de valori ale măsurandului, mai mare decât domeniul de lucru al etalonului: etalonarea unei greutăți de 5 kN cu ajutorul unor greutăți etalon de 0,5 kN, etalonarea unei mașini de forță cu încărcare directă și așplificare cu pârghie cu ajutorul dinamometrelor etalon etc. Un alt caz este acela al etalonărilor mijloacelor de măsurare a mărimilor derivate, pentru care se folosesc etaloane ale altor mărimi, legate funcțional de măsurand: etalonarea greutăților în raport cu etaloane de masă, lungime și timp (ultimile două necesare pentru determinarea accelerației gravitaționale).

În procesul de etalonare sunt, deci, implicate:

- Etalonul sau etaloanele necesare, alese adecvat (conform principiului de măsurare, a metodei și procedurii de măsurare);
- Mijlocul de măsurare de etalonat, cunoscut și caracterizat în prealabil,
- Metoda și procedura de etalonare, în care trebuie specificate obligatoriu condițiile de referință în care se efectuează etalonarea și, dacă este cazul, mijloacele de măsurare și utilajele suplimentare necesare.

#### 4.2.1 Etaloane

Etaloanele sunt mijloace de măsurare destinate a defini, realiza, conserva sau reproduce o unitate sau una sau mai multe valori ale unei mărimi pentru a servi ca referință în compararea altor mijloace de măsurare cu etalonul.

Etalonul poate fi o *măsură etalon*, un *aparat de măsurat etalon*, un *traductor etalon*, un *sistem de măsurare etalon* etc.

Mijloacele de măsurare etalon au o destinație bine precizată: etalonarea altor mijloace de măsurare. Etaloanele nu se folosesc pentru măsurări curente.

Asigurarea uniformității și compatibilității măsurărilor, la scară națională și internațională, se bazează pe etaloane care să asigure:

- reproducerea unităților de măsură, în conformitate cu definițiile lor acceptate;
- menținerea (conservarea) în timp a unităților de măsură;
- corelarea etaloanelor sau mijloacelor de măsurare de lucru prin comparații indirecte,
- efectuarea de etalonări pentru mijloacele de măsurare de lucru.

În funcție de destinația lor, etaloanele pot fi:

*Etaloane de definiție*, care constituie referința inițială pentru măsurarea unei mărimi, în conformitate cu definiția unității sale de măsură. Etalonul de definiție reproduce unitatea de măsură prin materializarea definiției sale, în cadrul unui experiment fizic bazat pe această definiție.

*Etaloanele de conservare*, care mențin o anumită valoare a unei mărimi fizice, cu o bună stabilitate în timp, fără a fi etaloane de definiție.

Sub forma cea mai simplă, etalonul de conservare este un obiect sau un sistem tehnic care are o anumită proprietate stabilă în timp. De exemplu, o greutate din oțel este folosită ca etalon de conservare pentru valoarea unei forțe.

Tot etaloane de conservare sunt diverse instalații relativ complexe, bazate pe anumite efecte fizice, în care intervin eventual și constante. De exemplu, o mașină etalon care reproduce valoarea forțelor într-un anumit domeniu, prin încărcare cu greutate și amplificare cu pârghie (cu brațe inegale).

*Etaloane de transfer*, care asigură corelarea etaloanelor sau a mijloacelor de măsurare de lucru prin comparații, atunci când compararea nu se poate face direct. Aceste etaloane conservă una sau mai multe valori ale unei mărimi preluate de la unul din mijloacele de măsurare de comparat și servește ulterior ca referință pentru celălalt mijloc de măsurare care se compară. Caracteristicile metrologice ale etaloanelor de transfer influențează rezultatul comparațiilor.

*Etaloane de lucru*, etalonate prin comparare cu un etalon de conservare, sunt destinate etalonării sau verificării mijloacelor de măsurare de lucru. Etaloanele de lucru nu sunt utilizate pentru compararea cu etaloane de exactitate inferioară.

Pentru asigurarea uniformității, corectitudinii și recunoașterii măsurărilor într-un anumit areal, etaloanele utilizate trebuie să facă parte dintr-un sistem organizat, controlat și coerent cu sistemele similare naționale și internaționale. Sistemul național de trasabilitate a măsurărilor la SI, stabilit pentru un domeniu de măsurare dat, constituie cadrul de organizare a etaloanelor în vederea asigurării îndeplinirii funcțiilor acestora.

Sistemele naționale de trasabilitate sunt sisteme ierarhizate. În funcție de locul ocupat în sistemul național de trasabilitate, etaloanele pot fi:

*Etaloane naționale*: etaloane recunoscute prin decizie națională (de exemplu hotărâre de guvern) care sunt destinate pentru a servi ca bază pentru atribuirea de valori altor etaloane ale mărimii considerate. Etaloanele naționale sunt, de regulă, etaloane de definiție.

*Etaloane secundare*: etaloane pentru care valoarea mărimii indicate se stabilește prin comparare cu etaloane de ordin superior ale aceleiași mărimi. Etaloanele secundare sunt etaloane de conservare.

*Etaloane de referință*: etaloane având cele mai bune performanțe tehnice și metrologice, disponibile într-o organizație sau într-un loc dat, de la care pornește trasabilitatea pentru toate măsurările efectuate în acel loc. Etaloanele de referință pot fi, în funcție de locul considerat și de exactitatea impusă activităților specifice desfășurate, etaloane de definiție, etaloane secundare sau etaloane de lucru.

*Etaloane de lucru*: etaloane de ordin inferior, destinate etalonării sau verificării mijloacelor de măsurare de lucru. În anumite condiții, funcțiile etalonului de referință și a etalonului de lucru pot fi reunite, fiind îndeplinite de același etalon.

#### **4.2.2 Metode și proceduri de etalonare**

Pentru scopul prezentei teze de doctorat, metodele de etalonare au fost clasificate în metode de comparare directă și indirectă.

- Prin metoda de comparare directă de etalonare, valorile mărimii indicate de mijlocul de măsurare de etalonat și cele corespunzătoare indicate de etalon se compară pornind de la aceeași valoare a măsurandului, în același timp. În unele cazuri, valoarea măsurandului este furnizată chiar de către etalon.

- Prin metoda de comparare indirectă de etalonare, valorile mărimii indicate de mijlocul de măsurare de etalonat și valorile corespunzătoare realizate cu etaloane se compară, în același timp sau succesiv, prin intermediul unui comparator adecvat.

Sunt evidențiate, în continuare, câteva metode generale pentru etalonarea mijloacelor de măsurare de diferite categorii.

**Etalonarea aparatelor de măsurat** se efectuează prin metoda măsurii etalon sau prin metoda aparatului etalon.

*Metoda măsurii etalon.* Pentru etalonare se efectuează măsurarea cu aparatul de măsurat a măsurandului de valoare cunoscută, furnizat de o măsură etalon. Aceasta este o metodă de comparare directă utilizată la etalonarea mijloacelor de măsurare. Exemplu: etalonarea unui sistem de indicare a forței a unei mașini de încercat materiale, utilizând greutateți etalon.

*Metoda aparatului etalon.* Pentru etalonare, se efectuează măsurarea aceluiași măsurand, de valoare inițial necunoscută, atât cu aparatul de măsurat cât și cu etalonul. Aceasta este, de asemenea, o metodă de comparare directă. Exemplu: etalonarea unui dinamometru, utilizând o mașină etalon de forță cu comparație (cu dinamometre de referință).

Cele două metode au o aplicabilitate largă în metrologie. În diferite domenii de măsurare se utilizează una sau alta dintre ele, în funcție de anumite criterii tehnice și economice. În principiu, metoda măsurii etalon este mai exactă. Modul concret de realizare a unui etalon bazat pe o asemenea metodă poate să fie foarte costisitor (de exemplu, realizarea unei mașini de forță cu încărcare directă). Pentru aplicarea metodei aparatului etalon, trebuie „generat” un măsurand corespunzător, care să fie suficient de stabil, reglabil în trepte etc. Realizarea unui astfel de proces implică rezolvarea unor probleme tehnice deosebite.

**Etalonarea măsurilor** se poate face, de asemenea, prin metoda măsurii etalon sau a aparatului etalon.

*Metoda măsurii etalon.* Pentru etalonarea măsurii, se efectuează compararea acesteia cu măsura etalon, folosind un aparat de comparare. Metoda este una de comparare indirectă. Exemplu: etalonarea unei greutateți prin comparare cu o masă etalon, folosind un comparator de masă.

*Metoda aparatului etalon.* Pentru etalonarea unei măsurii se efectuează măsurarea cu aparatul etalon a măsurandului furnizat de măsura de etalonat. Metoda aparatului etalon este o metodă de comparare directă de etalonare. Exemplu: Etalonarea unei greutateți utilizând un aparat de cântărit.

Dintre cele două metode de etalonare a măsurilor, se aplică mai frecvent metoda măsurii etalon; metoda aparatului etalon, deși este mai simplă și mai operativă, poate fi folosită numai dacă se dispune de un aparat cu o exactitate suficient de ridicată pentru scopul propus.

**Etalonarea traductoarelor** se poate face prin metoda aparatului etalon sau prin metoda traductorului etalon.

*Metoda măsurii/ aparatului etalon.* Pentru etalonarea traductoarelor se aplică un măsurand de valoare cunoscută la intrarea traductorului și se măsoară (sau se citește) mărimea de ieșire furnizată de traductor. Valoarea cunoscută a măsurandului este furnizată de o măsură etalon sau este determinată prin măsurare cu un aparat etalon.

Măsurarea mărimii de ieșire a traductorului se efectuează cu un aparat etalon sau se citește direct, dacă acest lucru este posibil. Metoda este de comparare directă. Exemplu: etalonarea unui traductor electric, tensorezistiv de forță utilizând greutateți etalon, cu măsurarea mărimii de ieșire cu un amplificator tensometric.

*Metoda traductorului etalon.* Această metodă folosește un traductor etalon (traductor cu caracteristica de conversie cunoscută), căruia i se aplică același măsurand ca și traductorului de etalonat. Metoda este de comparare directă. Exemplu: etalonarea unui traductor mecanic cu arc oval cu citirea deflexiei cu un comparator mecanic, utilizând o mașină etalon de forță cu comparație cu traductoare de forță de referință.

**Etalonarea sistemelor de măsurare** se poate efectua prin diverse metode (directe, indirecte sau combinate) a căror complexitate depinde de tipul sistemului de măsurare de etalonat. În consecință, etalonarea sistemelor de măsurare se poate face prin metoda măsurii etalon, metoda aparatului etalon sau prin metode speciale.

*Metoda măsurii etalon și metoda aparatului etalon* sunt similare cu cele precizate la etalonarea aparatelor de măsurat (metode de comparare directă). Exemplu: etalonarea sistemului de măsurare a forței a unei mașini pentru încercarea materialelor la solicitări mecanice, utilizând greutateți etalon sau dinamometre etalon.

*Metode speciale.* Metodele speciale se aplică pentru etalonarea sistemelor de măsurare de complexitate ridicată. Metodele speciale de etalonare pot include, pentru diferite subsisteme, metodele aplicabile aparatelor de măsurat, măsurilor și traductoarelor. Metodele speciale de etalonare a sistemelor de măsurare nu sunt standardizate, ele făcând obiectul unor proceduri de etalonare speciale. Exemplu: etalonarea unei mașini etalon de forță cu încărcare directă și amplificare cu pârghie se efectuează în conformitate cu o procedură care include etalonarea greutateților mașinii (etalonarea măsurilor), etalonarea traductoarelor de referință utilizate la compararea mașinii cu pârghie cu un etalon superior (etalonarea traductoarelor) etc.

Procedurile de etalonare descriu, în mod concret, fluxul activităților desfășurate pentru etalonarea mijloacelor de măsurare. Aceste proceduri includ, alături de detalierea metodei de etalonare aplicabile mijlocului de măsurare și fluxul activităților, specificarea etaloanelor utilizate, condițiile de mediu necesare, precizarea factorilor de influență și modul de calcul al eventualelor corecții în funcție de aceștia, modul de estimare a incertitudinii de măsurare, modul de raportare a rezultatelor etalonării.

Pentru categoriile de mijloace de măsurare uzuale, întâlnite des în practica metrologică, sunt disponibile normative sub formă de standarde, practici, proceduri, ghiduri etc. care pot fi utilizate ca proceduri specifice de etalonare. De exemplu, etaloanele de forță utilizate la verificarea sistemului de măsurare a forței al mașinilor uniaxiale de încercat materiale procedura de etalonare este prevăzută în standardul SR EN ISO 376. De asemenea, verificarea/ etalonarea sistemului de măsurare a forței al mașinilor uniaxiale de încercat materiale metalice se efectuează conform prescripțiilor cuprinse în standardul SR EN ISO 7500-1.

Aplicarea procedurilor de etalonare cuprinse în standarde și alte documente normative recunoscute pe plan internațional are avantajul de a conferi încredere în rezultatele de măsurare. Totuși, pentru anumite categorii de mijloace de măsurare (de exemplu, sisteme de măsurare cu un înalt grad de complexitate) nu sunt disponibile proceduri de etalonare general acceptate.



Pentru aceste mijloace de măsurare este necesar ca laboratoarele de etalonări să întocmescă proceduri specifice de etalonare. Pentru a conferi încredere în corectitudinea acestora, procedurile trebuie să fie validate. Validarea este o decizie de acceptare bazată pe un ansamblu de activități cum sunt: comparări interlaboratoare, repetarea etalonărilor și compararea rezultatelor etc.

Precizarea condițiilor de mediu necesare pentru efectuarea etalonărilor și pentru utilizarea corespunzătoare a mijloacelor de măsurare precum și a factorilor de influență care afectează exactitatea de măsurare a acestora constituie un capitol important al procedurilor de etalonare.

Uzual, etalonarea se efectuează în condiții de referință prestabilite. Stabilirea acestor condiții trebuie să țină cont atât de comportarea etalonului cât și a mijlocului de măsurare de etalonat, în funcție de factorii de influență identificați. Pe întreg procesul etalonării este necesară menținerea condițiilor de referință în limitele domeniilor de variație specificate pentru acestea în procedurile de etalonare. Este, de asemenea, necesar să se evalueze pe tot parcursul etalonării factorii de influență care nu pot fi controlați, în vederea unor eventuale corecții sau pentru aprecieri calitative a rezultatelor de etalonare.

### 4.3 Incertitudinea de măsurare

Scopul unei măsurări este de a determina valoarea măsurandului, adică valoarea mărimii particulare de măsurat.

În general, rezultatul unei măsurări este numai o aproximație sau o *estimație* a valorii măsurandului și, de aceea, este complet numai dacă este însoțit de specificarea incertitudinii.

În aplicații practice, specificația sau definiția măsurandului este impusă de exactitatea necesară de măsurare. Măsurandul trebuie definit suficient de complet în raport cu exactitatea de măsurare necesară. Exemplu: dacă trebuie determinată greutatea unei plăci din oțel cu greutatea de 500 N, cu o aproximație de circa 2 mN, atunci specificația sa trebuie să includă și temperatura, umiditatea aerului, presiunea atmosferică, precum și valoarea accelerației gravitaționale pentru care este definită greutatea. Dacă, însă, greutatea plăcii din oțel trebuie determinată numai cu o aproximație de 0,5 N, atunci specificația sa nu necesită definirea altor parametri.

În multe cazuri, rezultatul unei măsurări este determinat pe baza unui șir de observații obținute în condiții de repetabilitate. Variațiile dintre observațiile repetate apar datorită faptului că mărimile de influență care pot afecta rezultatul măsurării nu sunt menținute perfect constante.

Modelul matematic al măsurării care transformă ansamblul observațiilor repetate într-un rezultat al măsurării are o importanță deosebită, deoarece, pe lângă observații, el include diferite mărimi de influență care nu sunt cunoscute exact. Acest lucru contribuie la incertitudinea rezultatului măsurării, la fel ca și variațiile observațiilor repetate și orice incertitudine asociată modelului matematic însuși.

Incertitudinea rezultatului unei măsurări reflectă imposibilitatea cunoașterii exacte a valorii măsurandului. Rezultatul unei măsurări după corectarea erorilor sistematice identificate rămâne, încă, numai o *estimație* a valorii măsurandului, din cauza incertitudinii care provine din efectele aleatorii și din corectarea imperfectă a rezultatului măsurării.

În practică, la efectuarea unei măsuri, există numeroase surse posibile de incertitudine, care includ:

- definiția incompletă a măsurandului;
- realizarea imperfectă a definiției măsurandului;
- cunoașterea insuficientă a efectelor condițiilor de mediu asupra măsurării sau măsurarea imperfectă a mărimilor de mediu;
- erori de observator, la citirea indicației mijloacelor de măsurare (analogice);
- rezoluția limitată a mijloacelor de măsurare sau pragul de discriminare al acestora;
- valorile inexacte ale etaloanelor;
- valorile inexacte ale constantelor și ale altor parametri preluate din surse de informare externe și folosite în algoritmul de preluare a datelor;
- variațiile dintre observațiile repetate ale măsurandului în condiții aparent identice.

În funcție de metoda de evaluare, componentele incertitudinilor se clasifică în două categorii: incertitudini de tip A și incertitudini de tip B. Scopul acestei clasificări este să indice cele două modalități diferite de evaluare a lor. Nu există nici o diferență în natura componentelor ce rezultă din cele două tipuri de evaluare. Amândouă tipurile de evaluare se bazează pe distribuții de probabilitate și componentele incertitudinii provenite din fiecare din ele sunt cuantificate prin varianțe sau abatere standard.

Varianța estimată care caracterizează o componentă a incertitudinii obținute printr-o evaluare de tip A este calculată pe baza unui șir de observații repetate. Abaterea standard este rădăcina pătrată pozitivă a varianței și este denumită, pentru o evaluare de tip A, *incertitudine standard de tip A*. Pentru o componentă a incertitudinii obținută pe baza unei evaluări de tip B, varianța estimată este evaluată folosind informații disponibile (altele decât cele utilizate la evaluarea de tip A). Abaterea standard și este denumită, pentru o evaluare de tip B, *incertitudine standard de tip B*.

În cele mai multe cazuri, un măsurand  $Y$  nu este măsurat direct ci este determinat indirect, pe baza altor mărimi  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , prin mijlocirea unei relații funcționale  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4.1)$$

Dacă ecuația (4.1) pentru măsurandul  $Y$  este dezvoltată în serie Taylor în jurul valorilor nominale  $X_{i,0}$  ale mărimilor de intrare  $X_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), atunci, pentru ordinul întâi se obține aproximația (de regulă acceptabilă)  $Y = Y_0 + c_1\delta_1 + c_2\delta_2 + \dots + c_N\delta_N$ , unde  $Y_0 = f(X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{N,0})$ , coeficienții  $c_i = (\partial f / \partial X_i)$ , evaluați pentru  $X_i = X_{i,0}$ , iar  $\delta_i = X_i - X_{i,0}$ . Astfel, pentru nevoile unei analize a incertitudinii, un măsurand poate fi exprimat ca o funcție liniară de variabilele sale, transformând mărimile de intrare  $X_i$  în mărimile  $\delta_i$ .

Pentru mărimi de intrare necorelate (independente), incertitudinea standard a lui  $y$ , unde  $y$  este estimația (rezultatul măsurării) măsurandului  $Y$ , se obține combinând în mod adecvat incertitudinile standard ale estimațiilor  $x_1, x_2, \dots, x_N$  corespunzătoare mărimilor  $X_1, X_2, \dots, X_N$ .

Incetitudinea standard a rezultatului unei măsurări, atunci când acesta este obținut din valorile mai multor mărimi, este denumită *incertitudine standard compusă*. Aceasta este abaterea standard estimată asociată cu rezultatul măsurării. Incertitudinea standard compusă  $u_c(y)$  este egală cu rădăcina pătrată pozitivă a varianței compuse  $u_c^2(y)$ , care se exprimă prin ecuația:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (4.2)$$

Dacă  $Y$  este de forma  $Y = cX_1^{p_1} X_2^{p_2} \dots X_N^{p_N}$  și dacă exponenții  $p_i$  sunt numere cunoscute, pozitive sau negative, de incertitudini neglijabile, atunci varianța compusă exprimată prin ecuația (4.2) capătă forma:

$$[u_c(y)/y]^2 = \sum_{i=1}^N [p_i u(x_i)/x_i]^2 \quad (4.3)$$

În această ecuație, varianța compusă  $u_c^2(y)$  este exprimată ca o *varianță compusă relativă*  $[u_c(y)/y]^2$ , în funcție de *varianțele relative* estimate  $[u(x_i)/x_i]^2$  asociate cu fiecare estimatie de intrare  $x_i$ . În aceste condiții, *incertitudinea standard relativă* a fiecărei estimatii a mărimilor de intrare este  $u(x_i)/|x_i|$  iar *incertitudinea standard compusă relativă* este  $u_c(y)/|y|$ , cu  $|x_i| \neq 0$  și  $|y| \neq 0$ .

Pentru a satisface necesitățile unor aplicații date, o *incertitudine extinsă* se obține prin înmulțirea incertitudinii standard compuse cu un *factor de extindere*  $k$ . Scopul utilizării incertitudinii extinse este de a determina, în jurul rezultatului unei măsurări, un interval care este de așteptat să cuprindă o mare parte a distribuției valorilor ce, în mod rezonabil, pot fi atribuite măsurandului. Alegerea factorului  $k$  se bazează pe probabilitatea de acoperire sau nivelul de încredere necesar pentru interval.

O metodă mai simplă de evaluare a incertitudinii extinse, care survine deseori în practică, se întâlnește în situații de măsurare în care distribuția de probabilitate care caracterizează estimatia valorii de ieșire  $y$  și incertitudinea standard compusă  $u_c(y)$  este aproximativ normală și numărul efectiv de grade de libertate ale lui  $u_c(y)$  este semnificativ de mare. În acest caz se poate admite că luându-se  $k = 2$  se obține un interval cu un nivel de încredere de aproximativ 95%.

#### 4.4 Optimizarea sistemelor de măsurare a forței

Problema optimizării sistemelor de măsurare presupune un algoritm complicat, ca oricare problemă de optimizare, începând cu recunoașterea și clasificarea funcțiilor și tipologiei sistemului și până la aplicarea în practică a rezultatelor calculului de optimizare.

În contextul prezentei lucrări, noțiunea de „optim” nu este echivalentă cu „cel mai bun”, „cel mai ieftin”, „cel mai ...”, ci, mai degrabă drept „cel mai convenabil, după anumite criterii, în anumite condiții de restricție”. Optimul nu reprezintă, în mod obligatoriu, un maximum absolut, ci un extrem parțial, determinat în condiții (restricții) precizate și pentru obiective date. În cazul sistemelor complexe, cum sunt sistemele de măsurare a forței, activitatea de optimizare vizează proiectarea, conducerea și exploatarea sistemelor.

Modelele de optimizare conțin activități sau ansambluri de activități și măsuri tehnice, puse în slujba folosirii cu maximă eficiență a resurselor.

Optimizarea sistemelor de măsurare a forței presupune parcurgerea următoarelor etape generice:

- formularea (exprimarea) programului de optimizare care presupune enunțul temei, stabilirea indicilor cantitativi și calitativi urmăriți, a criteriilor în baza cărora se face optimizarea și a condițiilor în care funcționează sistemul;
- formularea (exprimarea) restricțiilor programului, date de nivelul consumurilor, al unor coeficienți de exploatare, nivelul altor parametri, legături funcționale de restricție etc.;
- elaborarea modelului (model funcțional);
- determinarea pe model a parametrilor optimi necesari pentru funcționarea rațională a acestuia;
- stabilirea măsurilor tehnice și organizatorice de aplicare în practică a parametrilor optimi determinați anterior, verificarea modelului optimal, efectuarea eventualelor corecții.

Principalele criterii considerate la optimizarea sistemelor de măsurare a forței sunt diferite, în funcție de locul și rolul ocupat de acestea în schema de trasabilitate. Astfel:

- a) pentru etaloanele naționale de forță:
  - minimizarea incertitudinii de realizare a unității de forță;
  - minimizarea influenței factorilor perturbatori;
  - maximizarea compatibilității cu etaloanele similare ale altor țări;
  - capacitate maximă de lucru;
  - scăderea posibilităților de intervenție a operatorului;
  - indicatori superiori de calitate;
  - fiabilitate maximă;
  - maximizarea duratei de folosință;
  - minimizarea cheltuielilor de realizare și întreținere.
- b) pentru etaloanele de referință de forță:
  - realizarea unei incertitudini de măsurare corespunzătoare nevoilor de etalonare;
  - minimizarea influenței factorilor de influență (perturbatori);
  - maximizarea compatibilității cu etaloanele similare ale altor țări;
  - capacitate maximă de lucru;
  - indicatori superiori de calitate;
  - minimizarea cheltuielilor de realizare și întreținere.
- c) pentru etaloanele de lucru:
  - realizarea unei incertitudini de măsurare corespunzătoare standardelor aplicabile;
  - minimizarea influenței factorilor de influență (perturbatori);
  - capacitate maximă de lucru;
  - indicatori superiori de calitate;
  - fiabilitate maximă;
  - maximizarea duratei de folosință.
- d) pentru mijloacele de măsurare de lucru:
  - realizarea unei incertitudini de măsurare corespunzătoare standardelor aplicabile;
  - încadrarea în erorile tolerate;
  - minimizarea influenței factorilor de influență (perturbatori);
  - capacitate maximă de lucru;



- indicatori superiori de calitate;
- fiabilitate maximă;
- consum unitar de energie minim;
- maximizarea duratei de folosință;
- minimizarea cheltuielilor fixe și variabile (unitare).

În cadrul procesului de optimizare, pentru etaloanele naționale de forță, a fost utilizată metoda de *modelare* – tehnică de cercetare a fenomenelor și proceselor, bazată pe folosirea modelelor. Eficiența modelării este dată de existența și/sau asigurarea unei strânse legături dintre sistemul care se studiază și model.

Privită ca un proces, modelarea include următoarele faze:

- cunoașterea în amănunt a programului de studiu, cu toate condițiile și restricțiile impuse;
- construirea propriu-zisă a modelului, în cazul abordat, prin combinarea/îmbunătățirea unor modele existente sau elaborarea unui model nou;
- experimentarea, studiul propriu-zis pe model, analiza proceselor funcționale, prognoza parametrilor sistemului, stabilirea valorilor optime ale acestuia.

Obiectivul principal al modelării este constituit prin stabilirea unor soluții optime (sau aproape optime) prin:

- aplicarea unor procedee de optimizare, pentru stabilirea celei mai avantajoase soluții, sub aspectul unuia sau mai multor criterii, în condiții date;
- folosirea metodelor euristice, care permit obținerea unor soluții satisfăcătoare, bune sau foarte bune, fără a exista certitudinea optimului sau posibilitatea estimării abaterii față de optim;
- folosirea unor metode aproximative prin care există posibilitatea obținerii prin iterații succesive a unei soluții apropiate de optim.

Modelarea utilizată poate fi:

- *modelare analogică*, bazată pe similitudini între sistemul cercetat și altele cunoscute, în ce privește proprietățile particularitățile, raporturile între componentele și parametrii acestora. Această metodă este utilizată, parțial, în cazul etaloanelor naționale și de referință de forță;
- *modelare matematică*, bazată pe stabilirea dependențelor dintre diferitele laturi ale procesului studiat, prezentate sub forma unor relații matematice. Modelarea matematică este întâlnită, cu diferite ponderi, în stabilirea soluțiilor optime pentru sistemele de măsurare a forței aflate pe diferitele poziții în schema de trasabilitate.

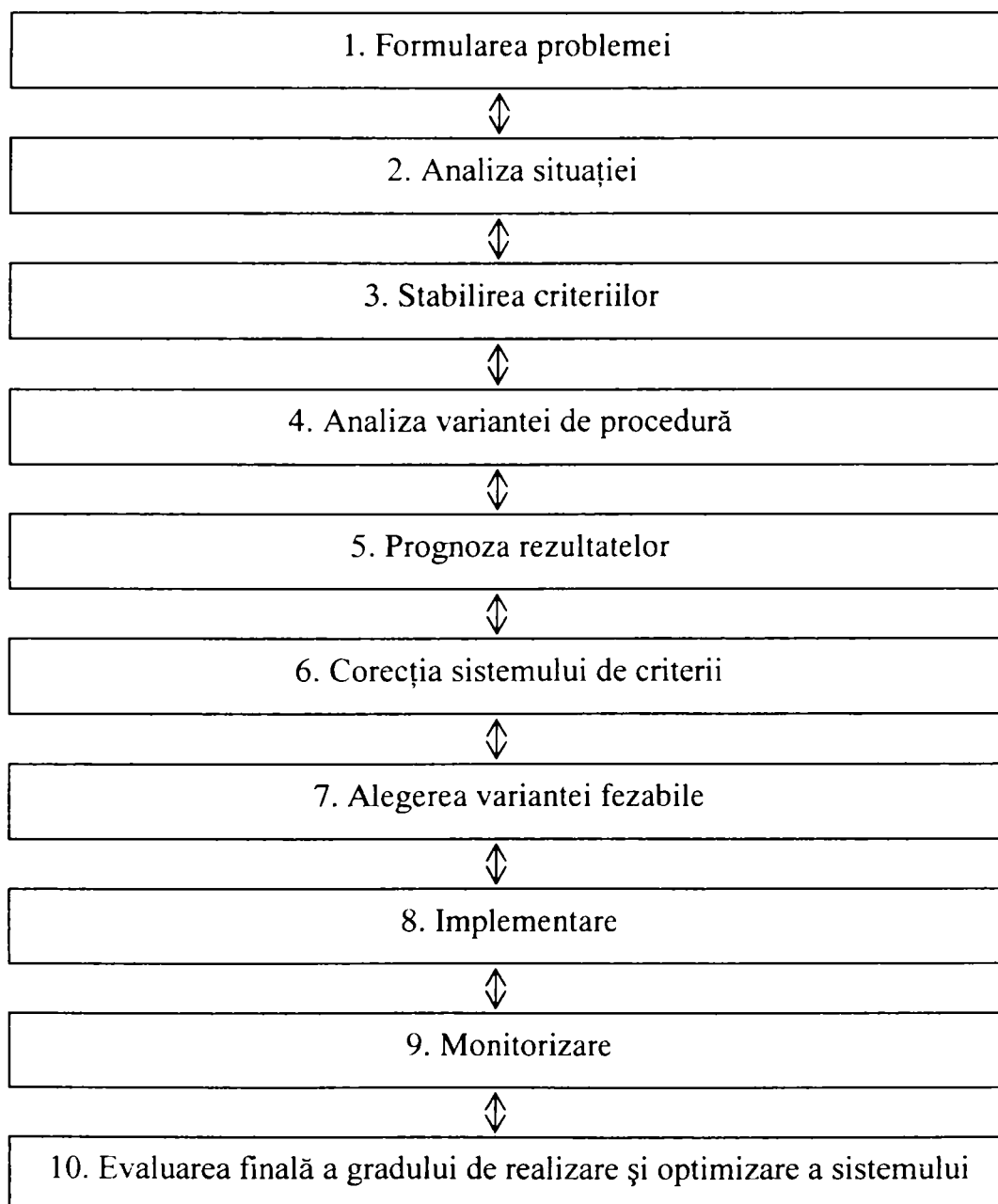
Scopul și rezultatul modelării este *modelul*, ca reprezentare a aspectelor esențiale ale sistemului. În funcție de metoda de modelare utilizată, modelele pot fi:

- *modele analogice*, sisteme având procesul de lucru asemănător sau chiar identic cu sistemul studiat. În cazul etaloanelor naționale și de referință modelele analogice sunt constituite din *modele funcționale*, care reflectă în totalitate comportarea sistemului studiat (prototipuri).
- *modele matematice*, constituite din scheme abstracte și simplificate, bazate pe relații matematice, care exprimă procesul de lucru al unui sistem.

Ca structură generală, procesul de optimizare este reprezentat de un ansamblu de operații care, pe baza unor intrări și a unui mecanism logic cunoscut, conduce la găsirea unor soluții optime. Schema generală de optimizare operațională a sistemelor de măsurare a forței este redată în figura 4.3.

Se face precizarea că schema prezentată în figura 4.3 reprezintă o secvență dintr-un proces iterativ, care presupune reluarea problemei ori de câte ori se constată apariția unor oportunități de optimizare sau insatisfacții ale optimizărilor anterioare.

Pentru studierea proceselor legate de optimizarea sistemelor de măsurare a forței, în special a sistemelor situate pe niveluri superioare a schemei de trasabilitate (etalioane naționale și etaloane de referință) s-a recurs la cercetarea experimentală.



**Fig. 4.3** Schema procesului de optimizare

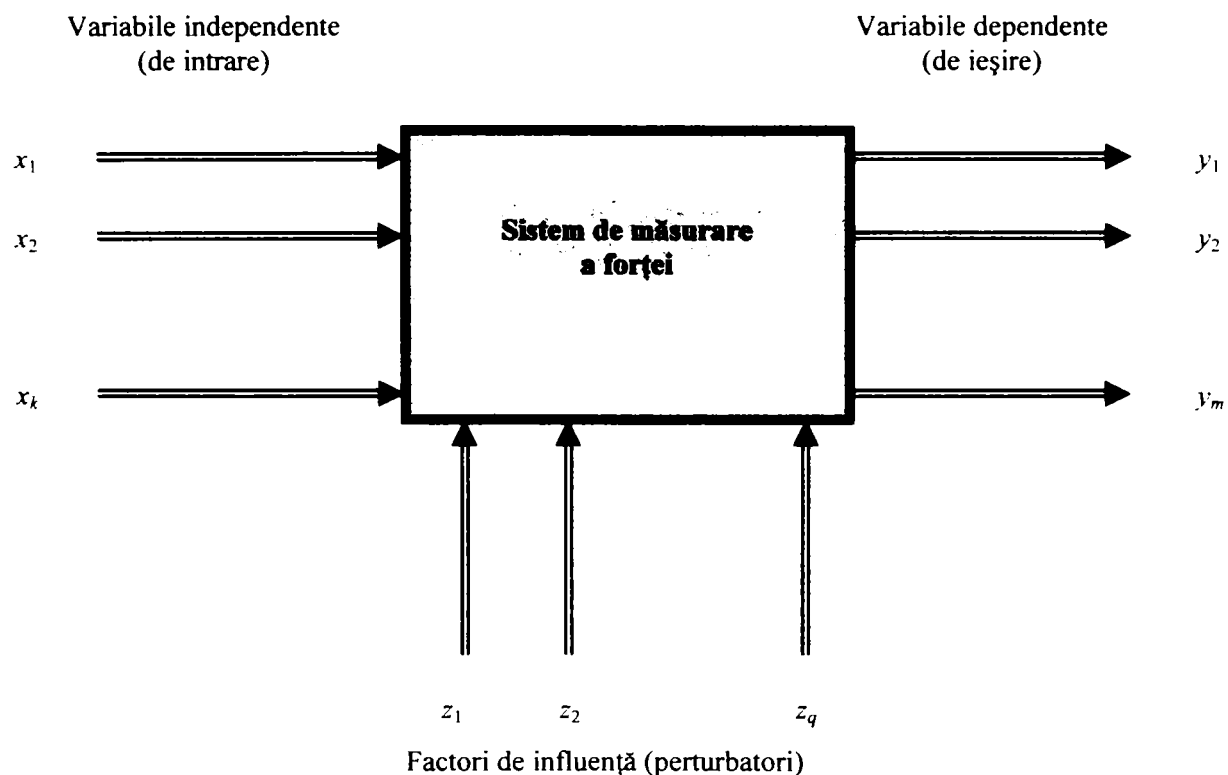
Modul de reprezentare a subiectului supus cercetării- sistemul de măsurare a forței- este unul de tip cibernetic, reprezentat în figura 4.4.

Procesele reale, în care se evidențiază relațiile funcționale între estimațiile valorilor mărimilor de intrare  $x_1, x_2, \dots, x_k$  și estimațiile valorilor mărimilor de ieșire  $y_1, y_2, \dots, y_m$  se desfășoară în condițiile existenței unor factori perturbatori, în mare parte necontrolabili  $z_1, z_2, \dots, z_q$ , cu caracter pseudoaleator, dar cărora li se poate asocia o anumită lege de distribuție de probabilitate.

În general, descrierea proceselor este realizată cu ajutorul modelelor matematice asociate acestora și care urmăresc explicitarea prin intermediul relațiilor matematice a legăturii funcționale dintre variabilele independente (de intrare) și o anumită funcție obiectiv  $y_m$ , adică prezentarea unei dependențe funcționale de forma:

$$y_m = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.4)$$

unde  $x_1, x_2, \dots, x_k$  sunt estimațiile mărimilor de intrare, iar  $y_m$  este estimația considerată a mărimii de ieșire.



**Fig. 4.4** Sistem cibernetic de măsurare a forței

În cazul sistemelor de măsurare a forței, mai ales pentru etaloanele naționale și de referință, obținerea unor modele analitice care să furnizeze integral rezultate utilizabile tehnologic este extrem de dificilă. În acest caz este aplicabilă modelarea mixtă, analitico-experimentală. În acest caz, alegerea formei matematice a modelului implică:

- informații cu privire la sisteme și modele similare cu cele cercetate;
- încercări proprii de modelare în domeniul respectiv.

## 5. Stadiul actual al sistemelor de măsurare a forțelor

Măsurarea forțelor este o necesitate în diferitele domenii ale activităților industriale, de cercetare științifică, sociale etc. Având în vedere complexitatea procesului de măsurare, o mare parte din mijloacele de măsurare a forțelor este constituită din *sisteme de măsurare*.

În ultima perioadă de timp au fost realizate progrese importante în obținerea unor parametri tehnici și metrologici deosebit de performanți pentru sistemele de măsurare a forțelor. Performanțele tehnice și metrologice avute în vedere se referă, în principal, la:

- exactitatea de măsurare;
- extinderea domeniului de măsurare;
- mărirea rezoluției;
- asigurarea unei bune stabilități în timp a caracteristicilor tehnice și metrologice;
- asigurarea unei bune imunități față de mărimile de influență.

Odată cu dezvoltarea sistemelor de măsurare a forțelor s-a intensificat și efortul de definire și cercetare a performanțelor acestora, în vederea stabilirii posibilităților și limitelor de utilizare. Această activitate are la bază dezvoltarea continuă a unor procese pentru încercarea și verificarea sistemelor de măsurare a forțelor, care cuprind:

- stabilirea și dezvoltarea unor standarde referitoare la sistemele de măsurare a forțelor;
- organizarea de laboratoare de încercări și perfecționarea continuă a acestora;
- dezvoltarea de etaloane care să asigure referințe stabile pentru încercarea sistemelor de măsurare a forțelor;
- perfecționarea continuă a capacității personalului angrenat în activitatea de încercare a sistemelor de măsurare și diseminarea experienței acestora.

Studiul stadiului actual de dezvoltare a sistemelor de măsurare a forțelor se va baza, în continuare, pe structurarea realizată prin schema de ierarhizare a mijloacelor de măsurare a forțelor prezentată anterior.

### 5.1 Etaloane naționale de forță

Etaloanele naționale de forță sunt etaloane recunoscute prin decizie națională (în România prin Hotărâre de Guvern) și sunt destinate pentru a servi ca bază pentru atribuirea de valori altor etaloane ale mărimii considerate (în cazul cazului considerat forță).

În România, etaloanele naționale de forță sunt constituite din trei mașini cu încărcare directă, având forța maximă reprodusă de 10 kN, 50 kN, respectiv 100 kN. Etaloanele naționale de forță ale României sunt redate în tabelul 5.1.

Efectul globalizării relațiilor economice își pune amprenta și asupra etaloanelor naționale. Astfel, la nivel internațional, se pune tot mai pregnant problema recunoașterii mutuale a rezultatelor de etalonare între institutele naționale de metrologie, ca bază pentru recunoașterea reciprocă și generală a rezultatelor de măsurare din domeniul considerat. În acest context, etaloanele naționale de forță trebuie să îndeplinească cerințele tehnice și metrologice impuse pe plan internațional, fiind necesar, în plus, ca organismele deținătoare a etaloanelor naționale să desfășoare activități care să conducă la recunoașterea acestora pe plan internațional.

Este, deci, necesar ca etaloanele naționale de forță să fie aduse la performanțele tehnice și metrologice necesare pentru recunoașterea internațională a rezultatelor de măsurare și etalonare efectuate, în conformitate cu acordurile internaționale.

**Tabelul 5.1:** Etaloanele naționale de forță ale României

Tipul etalonului	Forța maximă reprodusă	Descriere	Incertitudine extinsă relativă
Mașină de forță cu încărcare directă	10 kN	20 trepte de 0,5 kN Sens de solicitare: tracțiune/ compresiune	$5 \times 10^{-5}$
Mașină de forță cu încărcare directă	50 kN	19 trepte de 2,5 kN; 5 trepte de 0,5 kN Sens de solicitare: tracțiune/ compresiune	$5 \times 10^{-5}$
Mașină de forță cu încărcare directă	100 kN	20 trepte de 5 kN Sens de solicitare: tracțiune/ compresiune	$5 \times 10^{-5}$

Un cadru important pe plan internațional în care se desfășoară recunoașterea reciprocă a rezultatelor de etalonare este oferit de Conferința Internațională de Greutăți și Măsuri (CIPM). În cadrul acestei organizații funcționează acordul mutual de recunoaștere reciprocă a etaloanelor naționale și a rezultatelor de etalonare și măsurare (MRA) încheiat între institutele naționale de metrologie.

### 5.1.1 Integrarea în structurile europene și mondiale

La întâlnirea care a avut loc la Paris în 14 octombrie 1999, directorii institutelor naționale de metrologie din 38 de țări membre ale Convenției Metrului, precum și reprezentanții a două organizații internaționale au semnat un acord de recunoaștere reciprocă a etaloanelor naționale a unităților de măsură și a certificatelor de etalonare și măsurare emise de institutele naționale de metrologie. Acest acord a fost semnat și funcționează sub egida Comitetului Internațional de Greutăți și Măsuri (CIPM). Acordul este cunoscut sub acronimul CIPM MRA. Până în prezent, CIPM MRA a fost semnat de reprezentanții a 64 institute din 45 de țări membre, 17 asociați ai Congresului General de Greutăți și Măsuri (CGPM) și de două organizații internaționale, acoperind un număr de 84 de instituții desemnate de organisme semnatare. România a semnat acordul CIPM MRA în anul 2003.

Acordul de Recunoaștere Reciprocă (CIPM MRA) este un răspuns la nevoia crescândă pentru activități deschise, transparente și acoperitoare pentru a furniza clienților informații cantitative de încredere asupra compatibilității și echivalenței serviciilor metrologice. Acest acord pune bazele tehnice pentru îmbunătățirea circulației internaționale a bunurilor și serviciilor.

**Structura organizatorică** a MRA este următoarea:

- coordonarea generală este asigurată de Biroul Internațional de Greutăți și Măsuri (BIPM), sub autoritatea CIPM, care este la rândul ei sub autoritatea statelor membre ale Convenției Metrului;

- comitetele consultative ale CIPM, Organizațiile Regionale de Metrologie (RMO) și BIPM sunt responsabile de organizarea și desfășurarea comparațiilor cheie și suplimentare;
- Comitetul de Legătură al RMO și BIPM (JCRB) este responsabil de analiza capabilităților de etalonare și măsurare declarate de institutele naționale de metrologie și transmiterea acestora pentru a fi introduse în baza de date.

**Obiectivele** CIPM MRA pot fi sintetizate astfel:

- stabilirea gradului de echivalență a etaloanelor naționale ale unităților de măsură menținute de institutele naționale de metrologie;
- susținerea recunoașterii reciproce a certificatelor de etalonare și măsurare emise de institutele naționale de metrologie;
- prin acestea să asigure guvernelor și altor părți interesate o bază tehnică sigură pentru acorduri legate de piața internațională, comerț și reglementarea afacerilor.

**Procesul** care stă la baza CIPM MRA cuprinde:

- efectuarea de comparații internaționale ale măsurărilor, cunoscute sub denumirea de *comparații cheie*. Aceste comparații se realizează conform unor proceduri specifice, în urma cărora sunt furnizate date cantitative care caracterizează gradul de echivalență a etaloanelor naționale a unităților de măsură;
- efectuarea de comparații internaționale suplimentare ale măsurărilor;
- implementarea și menținerea sistemelor de management al calității și demonstrarea competenței de către institutele naționale de metrologie.

Împreună, aceste trei proceduri demonstrează institutelor participante gradul în care fiecare dintre ele poate să aibă încredere în rezultatele de măsurare raportate de celelalte și, astfel, să promoveze încrederea reciprocă.

**Rezultatul** acordului constă în declararea capabilităților de măsurare a fiecărui institut național de metrologie și acceptarea acestora, pe baza evaluării conform procedurilor specifice. Capabilitățile de măsurare acceptate sunt menținute în baza de date a Biroului Internațional de Măsuri și Greutăți (BIPM) și publicate pe pagina oficială Web a acestuia.

Pentru stabilirea condițiilor în care sunt acceptate certificatele de etalonare, de măsurare și de încercare emise de laboratoarele de metrologie din alte țări, organismele naționale de reglementare și cele de acreditare solicită acorduri sau înțelegeri multilaterale. Aceste acorduri sau înțelegeri depind, în ceea ce privește valabilitatea, de exactitatea etaloanelor naționale ale unităților de măsură și a certificatelor de etalonare și măsurare emise de institutele naționale de metrologie. Acordurile pot fi susținute de recunoașterea reciprocă a etaloanelor naționale ale unităților de măsură și a certificatelor de etalonare și măsurare emise de institutele naționale de metrologie și se bazează pe eforturile fiecărui institut de metrologie de a raporta rezultatele de măsurare și incertitudinile asociate la unitățile SI.

### 5.1.2 Studiu comparativ

Fixarea obiectivelor pentru performanțele tehnice și metrologice ale etaloanelor naționale de forță ale României se bazează pe situația internațională în acest domeniu. Studiul situației privind etaloanele naționale de forță ale diverselor state, acceptate pe plan mondial, constituie o informație importantă pentru optimizarea după criterii tehnice și economice a etaloanelor naționale de forță ale României, având drept obiectiv principal recunoașterea rezultatelor de etalonare și măsurare în domeniul forță.



Institutele naționale de metrologie a căror certificate de etalonare, de măsurare și de încercare a mijloacelor de măsurare în domeniul forță sunt acceptate, în conformitate cu acordul MRA, de către laboratoarele de metrologie din alte țări, organismele naționale de reglementare și cele de acreditare sunt redate în tabelul 5.2.

**Tabelul 5.2** Institute naționale de metrologie recunoscute pentru etalonări în domeniul forță

Țara	Institut de metrologie		Organizație regională de metrologie RMO	
	Acronim	Denumire	Acronim	Denumire
Africa de Sud	CSIR-NML	Council for Scientific and Industrial Research-National Metrology Laboratory	SADCMET	Southern-African Development Community Cooperation in Measurement Traceability
Anglia	NPL	National Physical Laboratory	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Argentina	INTI	Instituto Nacional de Tecnologia Industrial	SIM	Sistema Interamericano de Metrologia
Australia	NMIA	National Measurement Institute, Australia	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Austria	BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Belgia	SMD	Service de la Métrologie Belge	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Brazilia	INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial	SIM	Sistema Interamericano de Metrologia
China	NIM	National Institute of Metrology	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Republica Cehă	CMI	Czech Metrology Institute	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Danemarca	DFM	Danish Institute of Fundamental Metrology	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Elveția	METAS	Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Finlanda	MIKES	Mittatekniikan Keskus, Centre for Metrology and Accreditation	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Franța	LNE	Laboratoire National de Métrologie et d'Essais	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards

Germania	PTB	Physikalisch- Technische Bundesanstalt	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Hong Kong (China)	SCL	Standards and Calibration Laboratory	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Italia	IMGC	Instituto di Metrologia G. Colonnetti	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Japonia	NMIJ	National Metrology Institute of Japan	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Korea de Sud	KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Mexic	CENAM	Centro Nacional de Metrologia	SIM	Sistema Interamericano de Metrologia
Olanda	NMi-VSL	Nederlands Meetinstituut – Van Swinden Laboratorium	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Polonia	GUM	Główny Urząd Miar, Central Office of Measures	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Portugalia	IPQ	Instituto Portugues da Qualidade	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Romania	INM	Institutul Național de Metrologie	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Federația Rusă	VNIIM	D.I. Mendeleev Institute for Metrology, Rostekh-regulirovaniye of Russia	COOMET	Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions
Singapore	SPRING Singapore	Standards, Productivity and Innovation Board	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Spania	CEM	Centro Español de Metrologia	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
SUA	NIST	National Institute of Standards and Technology	SIM	Interamerican Metrology System
Suedia	SP	Swedish National Testing and Research Institute	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Taiwan	CMS	Center for Measurement Standards	APMP	Asia Pacific Metrology Programme
Turcia	UME	Tubitak Ulusal Metrology Enstitüsü	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
Ungaria	OMH	Országos Mérésügyi Hivatal	EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards



Capabilitățile de etalonare și măsurare (CMC) în domeniul forță a institutelor naționale de metrologie acceptate în cadrul acordului CIPM MRA pe baza evaluării conform procedurilor specifice sunt redată în tabelul 5.3.

**Tabelul 5.3** CMC în domeniul forță ale Institutelor naționale de metrologie

<b>Țara/Institut/Locație</b>	<b>Metodă (Tip mașină etalon)</b>	<b>Domeniul de forțe</b>	<b>CMC<sup>1)</sup></b>
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	1 N până la 1000 N	$3 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	2 kN până la 20 kN	$6 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	5 kN până la 50 kN	$6 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	2 kN până la 20 kN	$6 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	5 kN până la 50 kN	$6 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	10 kN până la 100 kN	$6 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	20 kN până la 200 kN	$1 \times 10^{-3}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	50 kN până la 500 kN	$9 \times 10^{-4}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	100 kN până la 1000 kN	$1,5 \times 10^{-3}$
Africa de Sud – CSIR NML Pretoria	Comparare cu tracatoare de referință	500 kN până la 5000 kN	$2 \times 10^{-3}$
Anglia – NPL Teddington	Încărcare directă	1,5 N până la 50 N	$8 \times 10^{-5}$
Anglia – NPL Teddington	Încărcare directă	0,025 kN până la 2,5 kN	$1 \times 10^{-5}$
Anglia – NPL Teddington	Încărcare directă	0,5 kN până la 20 kN	$1 \times 10^{-5}$
Anglia – NPL Teddington	Încărcare directă	10 kN până la 1200 kN	$1 \times 10^{-5}$
Anglia – NPL Teddington	Amplificare hidraulică	0,1 kN până la 5 MN	$5 \times 10^{-4}$
Anglia – NPL Teddington	Comparare cu tracatoare de referință	1 MN până la 30 MN	$1,5 \times 10^{-3}$
Argentina – INTI San Martin	Comparare cu tracatoare de referință	50 kN până la 110 kN	$2 \times 10^{-4}$
Argentina – INTI San Martin	Comparare cu tracatoare de referință	110 kN până la 150 kN	$3 \times 10^{-4}$
Argentina – INTI San Martin	Comparare cu tracatoare de referință	150 kN până la 200 kN	$3 \times 10^{-4}$
Argentina – INTI San Martin	Comparare cu tracatoare de referință	200 kN până la 500 kN	$4 \times 10^{-4}$
Argentina – INTI San Martin	Comparare cu tracatoare de referință	500 kN până la 1000 kN	$3 \times 10^{-4}$

Argentina – INTI San Martin	Comparare cu traductoare de referință	1500 kN până la 2000 kN	$1 \times 10^{-3}$
Argentina – INTI San Martin	Comparare cu traductoare de referință	2000 kN până la 5000 kN	$1 \times 10^{-3}$
Australia – NMIA Sydney	Încărcare directă	0,004 kN până la 5,5 kN	$2 \times 10^{-5}$
Australia – NMIA Sydney	Încărcare directă	5,5 kN până la 550 kN	$2 \times 10^{-5}$
Australia – NMIA Sydney	Amplificare hidraulică	0,5 MN până la 3 MN	$6 \times 10^{-4}$
Australia – NMIA Sydney	Amplificare hidraulică	2 MN până la 10 MN	$6 \times 10^{-4}$
Australia – NMIA Sydney	Amplificare hidraulică	0,5 MN până la 2 MN	$2 \times 10^{-4}$
Austria – BEV Viena	Încărcare directă	0,5 kN până la 20 kN	$2 \times 10^{-4}$
Austria – BEV Viena	Amplificare cu pârghie	10 kN până la 200 kN	$5 \times 10^{-4}$
Austria – BEV Viena	Amplificare hidraulică	40 kN până la 1000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Austria – BEV Viena	Amplificare hidraulică	0,5 MN până la 5 MN	$5 \times 10^{-4}$
Belgia – SMD Bruxelles	Încărcare directă	0,1 kN până la 20 kN	$5 \times 10^{-5}$
Belgia – SMD Bruxelles	Încărcare directă	5 kN până la 250 kN	$5 \times 10^{-5}$
Belgia – SMD Bruxelles	Amplificare cu pârghie	50 kN până la 2500 kN	$1 \times 10^{-4}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	1 N până la 44 N	$5 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	44 N până la 500 N	$5 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	500 N până la 1000 N	$5 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	1 N până la 2,5 kN	$2 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	2,5 kN până la 5 kN	$2 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	5 kN până la 10 kN	$2 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	10 kN până la 20 kN	$2 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	20 kN până la 50 kN	$2 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Încărcare directă	50 kN până la 110 kN	$2 \times 10^{-5}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Amplificare hidraulică	110 kN până la 150 kN	$1 \times 10^{-4}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Amplificare hidraulică	150 kN până la 200 kN	$1 \times 10^{-4}$

Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Amplificare hidraulică	200 kN până la 500 kN	$1 \times 10^{-4}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Amplificare hidraulică	500 kN până la 1100 kN	$1 \times 10^{-4}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Comparare cu trunctoare de referință	1000 kN până la 1500 kN	$8 \times 10^{-4}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Comparare cu trunctoare de referință	1500 kN până la 2000 kN	$8 \times 10^{-4}$
Brazilia – INMETRO Rio de Janeiro	Comparare cu trunctoare de referință	2000 kN până la 5000 kN	$8 \times 10^{-4}$
Republica Cehă – CMI Praga	Încărcare directă	10 N până la 3000N	$5 \times 10^{-5}$
Republica Cehă – CMI Praga	Încărcare directă	0,1 kN până la 10 kN	$4 \times 10^{-5}$
Republica Cehă – CMI Praga	Amplificare cu pârghie	0,5 kN până la 150 kN	$2 \times 10^{-4}$
Republica Cehă – CMI Praga	Amplificare cu pârghie	5 kN până la 1000 kN	$2 \times 10^{-4}$
China – NIM Beijing	Încărcare directă	0,01 kN până la 1000 kN	$2 \times 10^{-5}$
China – NIM Beijing	Comparare cu trunctoare de referință	1 MN până la 10 MN	$1 \times 10^{-3}$
China – NIM Beijing	Comparare cu trunctoare de referință	1 MN până la 20 MN	$1 \times 10^{-3}$
Danemarca – DFM Brøndby	Încărcare directă	0,1 N până la 1000 N	$1 \times 10^{-4}$
Danemarca – DFM Brøndby	Încărcare directă	1000 N până la 3300 N	$2 \times 10^{-4}$
Danemarca – DFM Brøndby	Comparare cu trunctoare de referință	1 kN până la 200 kN	$4 \times 10^{-4}$
Danemarca – DFM Brøndby	Comparare cu trunctoare de referință	1 kN până la 1000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Elveția – METAS Bern-Wabern	Încărcare directă	2,5 N până la 220 N	$2 \times 10^{-5}$
Elveția – METAS Bern-Wabern	Încărcare directă	50 N până la 5500 N	$2 \times 10^{-5}$
Elveția – METAS Bern-Wabern	Încărcare directă	1 kN până la 110 kN	$2 \times 10^{-5}$
Elveția – METAS Bern-Wabern	Amplificare cu pârghie	20 kN până la 2000 kN	$1 \times 10^{-4}$
Finlanda – MIKES Espoo	Încărcare directă	10 N până la 10000 N	$2 \times 10^{-5}$
Finlanda – MIKES Espoo	Încărcare directă	2 kN până la 100 kN	$5 \times 10^{-5}$
Finlanda – MIKES Espoo	Amplificare hidraulică	20 kN până la 1000 kN	$1 \times 10^{-4}$
Franța – LNE Paris	Încărcare directă	5 N până la 2000 N	$2,5 \times 10^{-5}$
Franța – LNE Paris	Încărcare directă	50 N până la 5000 N	$5 \times 10^{-5}$

Franța – LNE Paris	Încărcare directă	1 kN până la 50 kN	$1 \times 10^{-5}$
Franța – LNE Paris	Încărcare directă	10 kN până la 500 kN	$2 \times 10^{-5}$
Franța – LNE Paris	Comparare cu trunctoare de referință	50 kN până la 1000 kN	$2 \times 10^{-4}$
Franța – LNE Paris	Comparare cu trunctoare de referință	50 kN până la 1500 kN	$2 \times 10^{-4}$
Franța – LNE Paris	Comparare cu trunctoare de referință	100 kN până la 3000 kN	$3 \times 10^{-4}$
Franța – LNE Paris	Comparare cu trunctoare de referință	300 kN până la 9000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	0,5 N până la 200 N	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	2 N până la 20 N	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	5 N până la 200 N	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	50 N până la 2000 N	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	0,25 kN până la 20 kN	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	2 kN până la 100 kN	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	20 kN până la 1000 kN	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Încărcare directă	50 kN până la 2000 kN	$2 \times 10^{-5}$
Germania –PTB Braunschweig	Amplificare hidraulică	0,1 MN până la 5 MN	$1 \times 10^{-4}$
Germania –PTB Braunschweig	Amplificare hidraulică	0,1 MN până la 16,5 MN	$1 \times 10^{-4}$
Hong Kong, China– SCL Hong Kong	Încărcare directă	50 N până la 5000 N	$9 \times 10^{-5}$
Hong Kong, China– SCL Hong Kong	Încărcare directă	5 kN până la 60 kN	$4 \times 10^{-5}$
Hong Kong, China– SCL Hong Kong	Amplificare hidraulică	60 kN până la 600 kN	$2 \times 10^{-4}$
Hong Kong, China– SCL Hong Kong	Amplificare hidraulică	600 kN până la 3000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Italia – IMG Torino	Încărcare directă	1 N până la 200 N	$5 \times 10^{-5}$
Italia – IMG Torino	Încărcare directă	10 N până la 2500 N	$2 \times 10^{-5}$
Italia – IMG Torino	Încărcare directă	0,1 kN până la 30 kN	$2 \times 10^{-5}$

Italia – IMG Torino	Încărcare directă	2,5 kN până la 100 kN	$2 \times 10^{-5}$
Italia – IMG Torino	Încărcare directă	10 kN până la 1000 kN	$2 \times 10^{-5}$
Italia – IMG Torino	Amplificare hidraulică	2,5 kN până la 1000 kN	$1 \times 10^{-4}$
Italia – IMG Torino	Comparare cu tracatoare de referință	0,2 MN până la 9 MN	$5 \times 10^{-4}$
Japonia- NMIJ Tsukuba	Încărcare directă	0,01 kN până la 500 kN	$2 \times 10^{-5}$
Japonia- NMIJ Tsukuba	Amplificare hidraulică	0,5 MN până la 1 MN	$1 \times 10^{-4}$
Japonia- NMIJ Tsukuba	Amplificare hidraulică	1 MN până la 20 MN	$1 \times 10^{-4}$
Korea de Sud – KRISS Yuseong Daejeon	Încărcare directă	0,049 kN până la 500 kN	$2 \times 10^{-5}$
Korea de Sud – KRISS Yuseong Daejeon	Comparare cu tracatoare de referință	0,5 MN până la 2,2 MN	$2 \times 10^{-4}$
Korea de Sud – KRISS Yuseong Daejeon	Comparare cu tracatoare de referință	2,2 MN până la 10 MN	$5 \times 10^{-4}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	50 N până la 500 N	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	500 N până la 1000 N	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	1 kN până la 3 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	2,5 kN până la 5 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	5 kN până la 10 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	10 kN până la 20 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	20 kN până la 50 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	50 kN până la 110 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Încărcare directă	110 kN până la 150 kN	$2 \times 10^{-5}$
Mexic – CENAM Queretaro	Comparare cu tracatoare de referință	150 kN până la 200 kN	$4, \times 10^{-4}$
Mexic – CENAM Queretaro	Comparare cu tracatoare de referință	200 kN până la 500 kN	$4,7 \times 10^{-4}$
Mexic – CENAM Queretaro	Comparare cu tracatoare de referință	500 kN până la 1000 kN	$9,5 \times 10^{-4}$
Mexic – CENAM Queretaro	Comparare cu tracatoare de referință	1000 kN până la 1500 kN	$7 \times 10^{-4}$
Mexic – CENAM Queretaro	Comparare cu tracatoare de referință	1500 kN până la 2000 kN	$7 \times 10^{-4}$
Mexic – CENAM Queretaro	Comparare cu tracatoare de referință	2 MN până la 5 MN	$2,5 \times 10^{-3}$

Olanda – NMI VSL Gravenhage	Încărcare directă	10 N până la 5500 N	$1 \times 10^{-4}$
Olanda – NMI VSL Gravenhage	Încărcare directă	2,5 kN până la 25 kN	$1 \times 10^{-4}$
Olanda – NMI VSL Gravenhage	Amplificare cu pârghie	25 kN până la 250 kN	$1 \times 10^{-4}$
Olanda – NMI VSL Gravenhage	Comparare cu tracatoare de referință	0,01 MN până la 5 MN	$4 \times 10^{-4}$
Polonia – GUM Varșovia	Încărcare directă	10 N până la 5000 N	$6 \times 10^{-5}$
Polonia – GUM Varșovia	Încărcare directă	1 kN până la 55 kN	$1 \times 10^{-4}$
Polonia – GUM Varșovia	Încărcare directă	10 kN până la 500 kN	$6 \times 10^{-5}$
Polonia – GUM Varșovia	Comparare cu tracatoare de referință	300 kN până la 3000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Portugalia – IPQ Caparica	Încărcare directă	50 N până la 5000 N	$2 \times 10^{-5}$
Portugalia – IPQ Caparica	Încărcare directă	1 kN până la 100 kN	$2 \times 10^{-5}$
Romania – INM Timișoara	Încărcare directă	0,5 kN până la 10 kN	$5 \times 10^{-5}$
Romania – INM Timișoara	Încărcare directă	5 kN până la 100 kN	$5 \times 10^{-5}$
Romania – INM Timișoara	Comparare cu tracatoare de referință	50 kN până la 1000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Încărcare directă	10 N până la 200 N	$2 \times 10^{-5}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Încărcare directă	0,1 kN până la 5 kN	$2 \times 10^{-5}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Încărcare directă	2 kN până la 100 kN	$2 \times 10^{-5}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Încărcare directă	10 kN până la 1000 kN	$2 \times 10^{-5}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Amplificare cu pârghie	40 kN până la 2000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu tracatoare de referință	5 kN până la 50 kN	$1 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu tracatoare de referință	10 kN până la 100 kN	$1 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu tracatoare de referință	20 kN până la 200 kN	$1 \times 10^{-4}$



Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu trunctoare de referință	50 kN până la 500 kN	$1 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu trunctoare de referință	100 kN până la 1000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu trunctoare de referință	200 kN până la 2000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu trunctoare de referință	300 kN până la 3000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu trunctoare de referință	400 kN până la 4000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Federația Rusă – VNIIM St. Petersburg	Comparare cu trunctoare de referință	500 kN până la 5000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Singapore – SPRING Singapore	Încărcare directă	0,05 kN până la 5 kN	$5 \times 10^{-5}$
Singapore – SPRING Singapore	Comparare cu trunctoare de referință	5 kN până la 20 kN	$5 \times 10^{-4}$
Singapore – SPRING Singapore	Comparare cu trunctoare de referință	20 kN până la 500 kN	$5 \times 10^{-4}$
Singapore – SPRING Singapore	Comparare cu trunctoare de referință	500 kN până la 2000 kN	$5 \times 10^{-4}$
Spania – CEM Tres Cantos	Încărcare directă	10 N până la 1000 N	$2 \times 10^{-5}$
Spania – CEM Tres Cantos	Încărcare directă	200 N până la 20000 N	$2 \times 10^{-5}$
Spania – CEM Tres Cantos	Încărcare directă	5 kN până la 500 kN	$2 \times 10^{-5}$
Spania – CEM Tres Cantos	Comparare cu trunctoare de referință	100 kN până la 1500 kN	$2 \times 10^{-4}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	44 N până la 500 N	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	500 N până la 1000 N	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	1 kN până la 2,5 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	2,5 kN până la 5 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	1 kN până la 2,5 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	5 kN până la 10 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	10 kN până la 20 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	20 kN până la 50 kN	$1 \times 10^{-5}$

SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	50 kN până la 110 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	110 kN până la 150 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	150 kN până la 200 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	200 kN până la 500 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	500 kN până la 1000 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	1000 kN până la 1500 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	1500 kN până la 2000 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Încărcare directă	2000 kN până la 4448 kN	$1 \times 10^{-5}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Comparare cu trductoare de referință	5 MN până la 13 MN	$1,7 \times 10^{-3}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Comparare cu trductoare de referință	13 MN până la 40 MN	$5 \times 10^{-3}$
SUA – NIST Gaitersburg MD	Comparare cu trductoare de referință	40 MN până la 53 MN	$5,9 \times 10^{-3}$
Suedia – SP Borås	Încărcare directă	1 N până la 2000 N	$1 \times 10^{-4}$
Suedia – SP Borås	Încărcare directă	0,25 kN până la 100 kN	$5 \times 10^{-5}$
Suedia – SP Borås	Amplificare cu pârghie	2,5 kN până la 1000 kN	$1 \times 10^{-4}$
Suedia – SP Borås	Comparare cu trductoare de referință	0,1 MN până la 6 MN	$5 \times 10^{-4}$
Taiwan – CMS Hsinchu	Comparare cu trductoare de referință	50 N până la 500 N	$2 \times 10^{-5}$
Taiwan – CMS Hsinchu	Comparare cu trductoare de referință	5 kN până la 50 kN	$3 \times 10^{-5}$
Taiwan – CMS Hsinchu	Comparare cu trductoare de referință	50 kN până la 500 kN	$3 \times 10^{-4}$
Taiwan – CMS Hsinchu	Comparare cu trductoare de referință	500 kN până la 2000 kN	$3 \times 10^{-4}$
Turcia – UME Tubitak	Încărcare directă	0,5 N până la 110 N	$2 \times 10^{-5}$
Turcia – UME Tubitak	Încărcare directă	20 N până la 600 N	$2 \times 10^{-5}$
Turcia – UME Tubitak	Încărcare directă	0,1 kN până la 11 kN	$2 \times 10^{-5}$
Turcia – UME Tubitak	Încărcare directă	2 kN până la 110 kN	$2 \times 10^{-5}$
Turcia – UME Tubitak	Amplificare cu pârghie	20 kN până la 1100 kN	$1 \times 10^{-4}$
Turcia – UME Tubitak	Comparare cu trductoare de referință	50 kN până la 3000 kN	$4 \times 10^{-4}$

Ungaria – OMH Budapesta	Încărcare directă	0,1 N până la 1500 N	$3 \times 10^{-5}$
Ungaria – OMH Budapesta	Încărcare directă	10 N până la 500 N	$3 \times 10^{-5}$
Ungaria – OMH Budapesta	Încărcare directă	100 N până la 2000 N	$3 \times 10^{-5}$
Ungaria – OMH Budapesta	Încărcare directă	500 N până la 10000 N	$3 \times 10^{-5}$
Ungaria – OMH Budapesta	Încărcare directă	5 kN până la 50 kN	$1 \times 10^{-4}$
Ungaria – OMH Budapesta	Încărcare directă	50 kN până la 300 kN	$2 \times 10^{-4}$
Ungaria – OMH Budapesta	Amplificare cu pârghie	100 kN până la 1000 kN	$1 \times 10^{-4}$
Ungaria – OMH Budapesta	Comparare cu trductoare de referință	200 kN până la 4000 kN	$1 \times 10^{-3}$

**Nota 1:** Capabilitatea de etalonare și măsurare (CMC) este exprimată ca incertitudine compusă relativă extinsă, factor de extindere  $k=2$ , corespunzător unei distribuții de probabilitate normală, pentru un nivel de încredere de aproximativ 95%.

## 5.2 Etaloane de referință de forță

Practica mondială și, uneori, reglementările naționale recomandă/ prevăd anumite limite în utilizarea etaloanelor naționale, în vederea protejării acestora împotriva degradării performanțelor din cauza utilizării excesive. Astfel, etaloanele naționale sunt folosite la conservarea unităților de măsură ale mărimii considerate (forță) și la diseminarea acestora către etaloanele imediat inferioare. În general, nu se admite utilizarea etaloanelor naționale de forță pentru efectuarea de etalonări uzuale. Sarcina asigurării trasabilității măsurărilor de forță este preluată de etaloanele de referință.

Pentru anumite domenii sau intervale de măsurare, în special din motive economice, nu sunt disponibile, la nivelul unei țări, etaloane naționale. Etaloanele de referință asigură, în acest caz, trasabilitatea măsurărilor din domeniul sau intervalul respectiv la unitățile de măsură prin etalonarea acestora în raport cu etaloanele recunoscute ale altor țări.

Etaloanele de referință de forță sunt definite ca etaloane, în general de cea mai înaltă calitate metrologică, disponibile într-un loc dat sau într-o organizație dată, de la care derivă măsurările în domeniul forță care sunt efectuate în acel loc.

Etaloanele de referință de forță pot fi (în ordinea exactității):

- mașini etalon cu greutate, cu încărcare directă;
- mașini etalon cu greutate și amplificare hidraulică sau cu pârghie;
- mașini etalon cu comparare cu tructoare de referință;
- tructoare de forță.

Caracteristicile tehnice și metrologice ale etaloanelor de referință trebuie să corespundă cerințelor privind realizarea condițiilor necesare pentru asigurarea trasabilității măsurărilor în domeniul considerat. În general, la acest nivel, cerințele sunt exprimate în standarde, proceduri, ghiduri sau practici acceptate pe scară largă.

Pentru caracterizarea etaloanelor de referință trebuie luate în considerare următoarele caracteristici tehnice și metrologice:

a) Pentru mașinile de forță cu încărcare directă:

- limita maximă a domeniului de forțe realizat de mașină;
- incertitudinea de realizarea forței;
- metoda de realizare a forței;
- treptele de realizare a forței în domeniul de forțe al mașinii;
- materialul din care sunt realizate greutatea;
- modul de asigurare a încărcării și descărcării greutatea;
- limitele condițiilor de mediu posibil de asigurat în laborator;
- posibilitatea modificării vitezei de aplicare a forței;
- cunoașterea accelerației gravitaționale locale;
- dimensiunile maxime ale mijloacelor de măsurare care pot fi etalonate.

b) Pentru mașinile de forță cu greutate și amplificare hidraulică sau cu pârghie, caracteristicile tehnice și metrologice precizate la lit.a) se completează, după caz, cu:

- presiunea maximă din sistemul hidraulic;
- suprafețele efective ale sistemelor cilindru-piston;
- raportul de amplificare;
- diferențele dintre diametrele cilindrilor și pistoanelor;
- sensibilitatea transmisiei hidraulice;
- raportul pârghiilor;
- lungimea brațelor pârghiilor.

c) Pentru mașinile de forță cu comparare cu traductoare de referință:

- limita maximă a domeniului de forțe realizat de mașină;
- incertitudinea de realizarea forței;
- metoda de realizare a forței;
- treptele de realizare a forței în domeniul de forțe realizat de mașină;
- modul de asigurare a încărcării și descărcării sarcinii;
- limitele condițiilor de mediu posibil de asigurat în laborator;
- posibilitatea modificării vitezei de aplicare a forței;
- dimensiunile maxime ale mijloacelor de măsurare care pot fi etalonate;
- numărul de traductoare de referință utilizate;
- modul de etalonare a traductoarelor de referință.

d) Pentru traductoarele de forță:

- limita minimă și maximă a domeniului de forțe;
- incertitudinea atribuită la etalonare;
- incertitudinea de măsurare;
- stabilitatea în timp a caracteristicilor metrologice;
- rezoluția;
- reproductibilitatea măsurărilor.

Etaloanele de referință de forță ale României, deținute de Institutul Național de Metrologie, sunt redată în tabelul 5.4.

**Tabelul 5.4** Etaloanele de referință de forță ale României

Tipul etalonului	Forța maximă	Descriere	Incertitudine extinsă relativă
Mașină etalon cu încărcare directă și amplificare hidraulică	1000 kN	Trepte de forță cu încărcare directă : 19 trepte de 2,5 kN; 5 trepte de 0,5 kN Factor de amplificare: 20 Sens de solicitare: tracțiune/ compresiune	$1 \times 10^{-4}$
Mașină etalon cu comparare cu traductoare de referință	1000 kN	Traductoare de referință utilizate: 100 kN; 200 kN; 500 kN; 1000 kN Sens de solicitare: tracțiune/ compresiune	$5 \times 10^{-4}$
Mașină etalon cu comparare cu traductoare de referință	3000 kN	Traductoare de referință utilizate: 3000 kN Sens de solicitare: tracțiune/ compresiune	$1 \times 10^{-3}$

### 5.3 Etaloane de lucru de forță

Etaloanele de lucru de forță sunt utilizate, în mod obișnuit, pentru a etalona sau verifica mijloace de măsurare de lucru a forței. De regulă, etaloanele de lucru sunt etalonate în raport cu etaloanele de referință.

Etaloanele de lucru de forță pot fi:

- dinamometre etalon;
- traductoare de forță etalon;
- greutăți etalon.

Caracteristicile tehnice și metrologice ale etaloanelor de lucru de forță trebuie să corespundă cerințelor pentru asigurarea trasabilității măsurărilor, exprimate în standarde, proceduri, ghiduri sau practici acceptate pe scară largă. De exemplu, pentru etalonarea/verificarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor uniaxiale de încercat materiale metalice se utilizează traductoare etalon de forță. În majoritatea cazurilor, aceste etaloane trebuie să satisfacă cerințele standardului ISO 376. În funcție de caracteristicile metrologice determinate pentru traductoarele etalon de forță în cadrul procesului de etalonare, acestea sunt clasificate în clase de exactitate. Standardul prevede valorile maxime pentru incertitudinea forței aplicate în procesul de etalonare a traductoarelor utilizate la etalonarea/verificarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor uniaxiale de încercat materiale metalice. Acest lucru are o importanță deosebită pentru stabilirea condițiilor de asigurare a trasabilității măsurărilor la etaloanele naționale sau internaționale ale unităților de măsură, respectiv la determinarea incertitudinii maxime asociate rezultatelor de măsurare pentru tot sistemul de trasabilitate în acest domeniu.

Principalele performanțe metrologice cerute de standardul ISO 376 pentru etaloanele de lucru de forță sunt redată în tabelul 5.5.

**Tabelul 5.5** Condiții prevăzute de ISO 376 pentru etaloanele de lucru de forță

Clasa	Eroare relativă a etalonului %					Incertitudinea forței aplicate %
	reproductibilitate <i>b</i>	repetabilitate <i>b'</i>	interpolare <i>f<sub>c</sub></i>	de zero <i>f<sub>o</sub></i>	reversibilitate <i>v</i>	
00	0,05	0,025	± 0.025	± 0,012	0,07	± 0,01
0,5	0,10	0,05	± 0.05	± 0,025	0,15	± 0,02
1	0,20	0,10	± 0.10	± 0,050	0,30	± 0,05
2	0,40	0,20	± 0.20	± 0,10	0,50	± 0,10

## 5.4 Mijloace de lucru de măsurare a forței

Termenul *mijloc de măsurare de lucru* este un termen generic care desemnează un mijloc tehnic utilizat pentru obținerea, prelucrarea, transmiterea și stocarea unor informații de măsurare obținute din măsurări uzuale (altele decât cele utilizate pentru etalonări).

Analiza efectuată asupra mijloacelor de măsurare de lucru are la bază următoarele criterii:

- caracteristicile tehnice și metrologice declarate de producător;
- caracteristicile tehnice și metrologice determinate în procesul de încercare/etalonare;
- adecvarea caracteristicilor tehnice și metrologice la necesitățile procesului de măsurare.

Caracteristicile tehnice și metrologice declarate de producător, de regulă prin specificații, pot oferi o bază pentru alegerea respectivelor mijloace de măsurare pentru o aplicație dată.

Pentru a verifica declarațiile producătorului și a conferi încrederea necesară pentru utilizarea unui mijloc de măsurare în condiții conforme cu specificațiile, caracteristicile tehnice și metrologice ale mijlocului de măsurare trebuie verificate/ certificate prin etalonare. Etalonările se execută inițial, la fabricație și ulterior, ori de câte ori este nevoie.

Pe baza analizei specificațiilor și declarațiilor producătorului și a validării acestora în procesul de etalonare, se pot lua decizii privind adecvarea mijlocului de măsurare la procesul de măsurare, pentru care acesta este dedicat.

Există o mare varietate de mijloace de lucru de măsurare a forței. Acestea pot fi elemente, componente, părți ale aparatelor de măsurat, traductoare, dispozitive, echipamente de măsurare, sisteme și instalații de măsurare etc.

În general, procesul de asigurare a trasabilității mijloacelor de măsurare de lucru este standardizat, având în vedere nevoia generală de asigurare a uniformității măsurărilor.

### 5.4.1 Traductoare de forță

În prezent, există o foarte mare răspândire a mijloacelor de măsurare a forței, constituite din traductoare de forță, denumite, în funcție de măsurand, *celule de sarcină* sau *celule de cântărire*. Aceste tipuri de mijloace de măsurare pot fi utilizate atât la măsurarea masei (prin efectul greutății) cât și la măsurarea forței propriu-zise.



Există, totuși, diferențe esențiale sub aspect constructiv și al performanțelor tehnice și metrologice care separă mijloacele de măsurare a forței de cele care măsoară masa, chiar dacă principiul de măsurare este același.

Celulele de încărcare și celulele de cântărire sunt traductoare de forță care funcționează prin convertirea mărimii de intrare (masă sau forță) într-o altă mărime măsurabilă de ieșire. Senzorul de măsurare poate să fie mecanic, hidraulic, electric (tensometric, inductiv, capacitiv) etc. Instrumentul de măsurare cu care este conectat traductorul și care convertește mărimea de ieșire într-o indicație este corespunzător tipului de semnal de ieșire (electric, mecanic etc).

Pentru etalonarea traductoarelor de forță, indiferent de destinație, poate fi utilizat același tip de etalon. În cadrul unei aplicații în care este utilizat un traductor de forță, pentru o definiție clară a măsurandului, trebuie să se specifice dacă aceasta se folosește pentru măsurarea masei (celulă de cântărire) sau pentru măsurarea forței (celulă de sarcină).

Un caz tipic de utilizare a celulelor de cântărire este folosirea acestora la construirea aparatelor de cântărit. Acest domeniu este acoperit prin reglementări de metrologie legală, utilizarea trebuind să asigure garanție publică de securitate și o exactitate corespunzătoare. Acesta este, evident, un caz de utilizare a traductoarelor de forță la determinarea masei.

Uneori, poate fi necesar să se specifice și să se demonstreze anumite caracteristici tehnice și metrologice ale traductoarelor de forță, plecând de la principiul de măsurare sau domeniul de utilizare.

Adecvarea traductoarelor de forță la aplicația prevăzută, indiferent dacă acestea sunt utilizate pentru măsurarea masei sau forței, se bazează pe o combinație de caracteristici tehnice și metrologice, cum sunt: exactitatea neliniaritatea, hysterezisul (eroarea de reversibilitate), influența temperaturii, stabilitate, gabarit etc. Caracteristicile tehnice și metrologice sunt definite de producător și verificate prin proceduri de încercare/ etalonare, care întotdeauna țin cont de caracteristicile sistemului de măsurare în care traductorul este utilizat, precum și de tipul aplicației.

Din cele prezentate mai sus rezultă existența unor diferențe importante între traductoarele de forță utilizate la măsurarea masei și cele utilizate la măsurarea forței. Aceste diferențe au condus la diferențierea denumirii mijloacelor de măsurare, astfel: *celule de cântărire* pentru traductoarele de forță utilizate la măsurare masei și *celule de sarcină* pentru măsurarea forței.

În tabelul 5.6 sunt redate câteva diferențe dintre celulele de cântărire și celulele de sarcină, incluzând unele aspecte constructive.

Desigur, tabelul cuprinde doar un exemplu de diferențiere a performanțelor tehnice și metrologice ale traductoarelor de forță, utilizate ca celule de cântărire sau celule de sarcină.

În cazul cântăririi, valorile de măsurat sunt, în general, constante în timp (regim estatic), cu excepția cazului în care obiectul a cărui masă trebuie determinată se deplasează (cântare de bandă, cântare pentru cântărirea vehiculelor din mers etc.). La măsurarea forței, valorile componentelor sunt de cele mai multe ori variabile, prezentând atât aspecte statice cât și dinamice.

**Tabelul 5.6** Celule de cântărire și celule de sarcină

Condiții de utilizare și specificații	Celule de cântărire	Celule de sarcină
Utilizare principală	Cântărire – determinarea valorii masei în comerț, industrie, laboratoare etc.	Măsurări de forță, încercări – determinarea valorii forței în industrie (mașini, unelte, transport, industria automobilistică, aerospațială etc.), cercetare, sănătate etc.
Nr. componente de măsurat Sens și direcție	1 Sensul/ direcția vectorului accelerației gravitaționale	1 ... 6 (forțe și momente ale forței) Sensuri/ direcții diferite: 3 axe
Variația mărimii de intrare Durata aplicării forței	În general, constantă (regim cvasistatic) Variabilă, în funcție de tipul aplicației	În general, variabilă (regim dinamic) Variabilă, în funcție de tipul aplicației
Domeniul de măsurare Frecvența specifică Proprietăți elastice necesare	Poate fi adaptat (prin amplificare/ demultiplicare) Nu sunt cerințe deosebite Foarte bune	Dificil de adaptat Trebuie să fie compatibilă cu măsurandul Cele mai bune, din cauza erorilor de hysterezis și de reproductibilitate, care sunt mai mari la schimbarea sensului forței
Condiții de mediu Temperatură, presiune, umiditate, șocuri, vibrații	Condiții de mediu: variații lente și relativ mici, condiții obișnuite	Variabile într-un domeniu depinzând de aplicație, condiții deosebite
Protecție	Protecția pasivă este de cele mai multe ori suficientă	Este necesară compensarea termică și construcție robustă

Pentru celulele de cântărire, forța de măsurat (greutatea) are doar o singură componentă, o singură direcție și un singur sens, corespunzătoare direcției și sensului accelerației gravitaționale. În cazul celulelor de sarcină, în funcție de tipul aplicației, pot fi evidențiate până la 6 componente (trei forțe și trei momente ale forței, după cele trei axe carteziane), a căror variații pot influența indicațiile traductorului. Structura traductorului este, din această cauză, relativ simplă în cazul măsurării masei și mai complexă în cazul măsurării forței.

Durata măsurării este, de asemenea, diferită de la un caz la altul. La determinarea masei, măsurarea poate dura atât cât este necesar, cu excepția cazurilor particulare în care durata este limitată de raționamente economice. Spre deosebire de aceasta, durata măsurării forței este foarte diferită în funcție de tipurile de aplicații. Poate să fie foarte scurtă (de exemplu, determinarea unor parametri de zbor ai avioanelor), sau lungă (de exemplu, determinarea forțelor care provoacă deformații plastice). Aceste diferențe de condiții de utilizare: static/dinamic sau variații de durată scurtă/lungă a mărimii de măsurat impun cerințe diferite pentru proprietățile tehnice și metrologice ale traductoarelor.

Frecvența specifică a traductorului de forță trebuie să fie compatibilă cu măsurandul. Pentru încercările dinamice și în impuls (de exemplu, pentru motoare), structura traductorului trebuie să fie foarte rigidă, aceasta putând crea unele probleme din punct de vedere al frecvenței specifice. Este, uneori, necesar să se echipeze aceste tipuri de traductoare cu elemente sensibile având un raport mare al mărimii de ieșire/ mărime de intrare (cum ar fi tensorezistoare cu semiconductoare) pentru a avea un semnal de ieșire suficient de mare care să compenseze dezavantajele constructive impuse. Aceste tipuri de probleme nu sunt caracteristice pentru celulele de cântărit.

Pentru a minimaliza influența erorilor de reversibilitate și de reproductibilitate, calitățile elastice ale elementelor utilizate la construcția celulelor de cântărire trebuie să fie foarte bune. Aceste calități trebuie să fie însă și mai bune pentru unele aplicații în măsurarea forțelor, atunci când direcția forței de măsurat trece în decursul măsurării succesiv de la valori pozitive la valori negative. De exemplu, efectul hysterezisului devine mai mare atunci când se inversează sensul de aplicare a forței. Acest fenomen se poate întâlni frecvent în măsurările de forță și, practic, niciodată în măsurarea masei.

Domeniul de măsurare al celulelor de cântărire poate fi ușor determinat deoarece, în general, valoarea de măsurat este constantă. În cazul traductoarelor de forță este mai dificil de adaptat aplicației specifice, deoarece domeniul de forțe este variabil în funcție de tipul sau aplicației specifice.

Condițiile de mediu (temperatură, presiune, umiditate) la care sunt supuse celulele de cântărire variază destul de lent și cu diferență de amplitudine scăzută. În cazul traductoarelor de forță, condițiile de mediu pot fi variabile în limite mult mai largi, în funcție de aplicație, iar protecția și compensarea trebuie să fie mult mai bune în acest caz.

Interacțiunile mecanice între măsurand și mijlocul de măsurare sunt, în cazul celulelor de cântărire, mult mai mici decât în cazul celulelor de sarcină.

În tabelul 5.8 sunt redate unele posibile influențe ale modului de aplicare a forței asupra rezultatelor de măsurare la utilizarea celulelor de sarcină.

**Tabelul 5.8** Influența modului de aplicare a forței asupra măsurării cu traductoare de forță

<b>Aplicarea forței</b>	<b>Efecte de măsurare</b>	<b>Caracteristici necesare ale traductoarelor</b>
Forțe dinamice Forțe în impuls	Efecte inerțiale Efecte de supraîncărcare Efecte de oboseală Eroare de zero Modificarea sensibilității	Rigiditate Frecvență specifică adaptată
Forțe cu mai multe componente	Interacțiuni între componente Răspuns neliniar	Structură complexă pentru a asigura măsurarea componentei necesare Etalonare specială

#### 5.4.2 Sisteme de măsurare a forței

Sistemele de măsurare a forței sunt constituite aparate de măsurat forța (de cele mai multe ori traductoare de forță) în combinație cu alte dispozitive, adaptate pentru măsurarea forței în intervalul specificat de valori ale acesteia.

O mare parte din mijloacele de lucru de măsurare a forței sunt sisteme de măsurare. Acestea pot avea o structură diversă, întotdeauna subordonată scopului măsurării: realizarea domeniului de măsurare, a exactității impuse, realizarea altor caracteristici tehnice și metrologice necesare procesului de măsurare.

Garanția unei măsurări corecte și de încredere este dată de asigurarea trasabilității la SI, demonstrată prin efectuarea etalonării sistemului de măsurare a forței.

Pentru exemplificarea modului unitar de abordare pe plan internațional al practicilor privind asigurarea trasabilității mijloacelor de măsurare de lucru din domeniul forță, prezentăm, în continuare, unele din prevederile standardului european EN ISO 7500, care se referă la verificarea și etalonarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor uniaxiale de încercat materiale.

Standardul recomandă o serie de precauții preliminare pentru a se asigura că încercările vor elimina surse de erori datorate unor mărimi de influență parazite (mod de montare, temperatură, mod de aplicare a forței etc.). Desigur, procedura de verificare/etalonare este redată corespunzător, fiind menționat modul de determinare a caracteristicilor tehnice și metrologice ale mașinilor de încercat materiale. Astfel, sunt descrise procedurile de verificare ale accesoriilor mașinilor, verificarea efectului pozițiilor diferite ale sistemului de realizare a forței, determinarea erorii relative de reversibilitate, erorii de fidelitate, de repetabilitate etc.

Este important că, în urma încercărilor efectuate, se stabilește o clasă a mașinilor de încercat materiale care determină o poziție anume în lanțul de trasabilitate. În tabelul 5.9 sunt redată valorile caracteristice ale sistemelor de măsurare a forței cu care sunt echipate mașinile de încercat materiale, în funcție de care acestea sunt clasificate în clase de exactitate.

**Tabelul 5.9** Condiții prevăzute de standardul ISO 7500 pentru mașini de încercat materiale

Clasa mașinii	Eroare maximă admisă				
	exactitate <i>q</i>	repetabilitate <i>b</i>	reversibilitate <i>v</i>	zero <i>f<sub>0</sub></i>	rezoluție <i>a</i>
0,5	± 0,5	0,5	± 0,75	± 0,05	0,25
1	± 1,0	1,0	± 1,5	± 0,1	0,5
2	± 2,0	2,0	± 3,0	± 0,2	1,0
3	± 3,0	3,0	± 4,5	± 0,3	1,5

Standardul ISO 7500 precizează că sistemele de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale trebuie verificate în tot domeniul de măsurare corespunzător valorilor de forță la care acestea sunt utilizate. Etalonarea trebuie efectuată cu traductoare de forță etalon de lucru. Etaloanele utilizate pentru etalonarea mașinilor de încercat materiale trebuie să dețină certificate de etalonare care să ateste trasabilitatea la SI. Clasa de exactitate a etaloanelor utilizate, exprimată conform standardului conex ISO 376, trebuie să fie cel puțin egală cu clasa declarată a mașinii de încercat materiale.

## 5.5 Concluzii

Evaluarea prezentată în prezentul capitol este bazată pe informațiile existente la începutul anului 2006. Din analiza datelor prezentate, rezultă unele concluzii privind situația generală a sistemelor de măsurare a forței, etaloane naționale și de referință și tendințele de dezvoltare a acestora, pentru diferite niveluri de utilizare, astfel:

- Institutele naționale de metrologie au dezvoltat etaloane primare și secundare de forță având performanțe tehnice și metrologice în conformitate cu nevoile economice ale țării. De exemplu, SUA, Germania, Anglia, Franța au o bază puternică de etaloane, de exactitate ridicată, acoperind un domeniu larg de utilizare. Elveția are, în special, etaloane performante în domeniul forțelor mici.
- Etaloanele de forță utilizate sunt, în ordinea exactității: mașini etalon de forță cu încărcare directă (reproducerea forței prin intermediul greutăților etalon), mașini cu încărcare directă și amplificare hidraulică sau cu pârghie, mașini cu comparație, care utilizează traductoare de forță de referință având performanțe metrologice ridicate.
- Incertitudinea de reproducere a forței variază, în funcție de tipul etalonului și domeniul de forță, între  $1 \times 10^{-5}$  și  $1,5 \times 10^{-3}$ . Domeniul de incertitudine a reproducerii forței realizat în Institutele naționale de metrologie este redat în tabelul 5.10, în funcție de tipul etalonului.

**Tabelul 5.10** Domeniul de incertitudine al etaloanelor naționale și de referință de forță

Metoda/tipul etalonului de forță	Domeniul de incertitudine
Încărcare directă	$1 \times 10^{-5}$ până la $8 \times 10^{-5}$
Amplificare hidraulică sau cu pârghie	$1 \times 10^{-4}$ până la $6 \times 10^{-4}$
Comparare cu traductoare de referință	$2 \times 10^{-4}$ până la $1,5 \times 10^{-3}$

- Pentru a putea asigura recunoașterea măsurărilor și etalonărilor în domeniul forță, România trebuie să dezvolte și să mențină etaloane compatibile din punct de vedere al performanțelor tehnice și metrologice cu cele acceptate pe plan mondial.



## 6. Contribuții la optimizarea SMF- factori și activități

Criteriile și soluțiile adoptate pentru optimizarea sistemelor de măsurare a forței sunt diferite, în funcție de locul și rolul ocupat în schema de trasabilitate.

### 6.1 Contribuții la optimizarea etaloanelor naționale de forță

Etaloanele naționale de forță sunt constituite din mașini etalon (FCM), realizate astfel încât să reproducă forța prin intermediul unor greutateți, prin efectul forței gravitaționale terestre (mașini etalon de forță cu încărcare directă).

Forța reprodusă de mașina etalon se bazează pe legea newtoniană a forței (ecuația dimensională):

$$F = ma \quad (6.1)$$

Dimensiunea mărimii *forță*  $F$  este reprezentată, deci, prin produsul puterilor factorilor ce reprezintă mărimile fundamentale ale SI implicate ( $M$  – masă,  $L$  – lungime,  $T$  – timp), astfel:  $F = MLT^{-2}$ .

În câmp gravitațional terestru, pentru un corp de masă  $m$ , ecuația (6.1) devine:

$$F_G = mg_P \quad (6.2)$$

unde:

$F_G$  : forța care acționează asupra corpului;

$g_P$  : accelerația căderii libere (sau accelerația gravitațională) pentru Pământ.

În diferite aplicații practice, accelerația căderii libere poate fi considerată egală cu *accelerația normală a căderii libere*  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$  (45° latitudine nordică, la nivelul mării), sau chiar cu valoarea rotunjită  $g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Desigur, valoarea accelerației gravitaționale variază în funcție de locul unde aceasta se manifestă. Exactitatea solicitată în cazul etaloanelor naționale de forță impune, pentru determinarea forței reproduse de greutatețile mașinilor etalon, utilizarea valorii accelerației gravitaționale măsurată la locul unde sunt amplasate greutatețile. Aproximarea accelerației gravitaționale locale prin valoarea accelerației normale nu este satisfăcătoare.

Determinarea masei  $m$  a greutateții etalon care reproduce o forță prestabilită generată de mașina etalon se face în aer, deci trebuie să țină cont și de forța ascensională datorată aerului. De asemenea, utilizarea mașinilor de forță se face în aer, forța reprodusă fiind, la rândul ei afectată de forța ascensională a aerului.

Trasabilitatea mașinilor etalon național de forță se realizează, conform practicii internaționale, astfel:

- asigurarea trasabilității treptelor de forță realizate de mașinile etalon la etaloanele naționale, luându-se în considerare mărimile de intrare (masă, lungime, timp);
- asigurarea trasabilității internaționale prin compararea cu etaloanele similare recunoscute ale altor țări. Compararea se execută prin intermediul etaloanelor de transfer, etaloane având caracteristici metrologice adecvate scopului (exactitate, stabilitate, rezoluție etc.).

Măsurandul  $F_{FCM}$  (forța reprodusă de mașina etalon) este determinat pe baza mărimilor de intrare  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , prin mijlocirea unei relații funcționale  $f$ :



$$F_{FCM} = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6.3)$$

Modelul matematic, mărimile de intrare, mărimea de ieșire precum și factorii perturbatori ai procesului sunt stabiliți pe baza considerațiilor de mai sus. Astfel, modelul matematic este reprezentat de ecuația:

$$F_{FCM} = mg_{loc} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) (1 - \Delta_{Tras}) \quad (6.4)$$

Mărimile de intrare corespunzătoare sunt:

- $m$ : masa greutăților care realizează treptele de forță ale mașinii etalon;
- $g_{loc}$ : accelerația gravitațională în locul unde sunt amplasate greutățile mașinii etalon;
- $\rho_a$ : densitatea aerului, valoare medie pentru locul de amplasare a mașinii etalon;
- $\rho_m$ : densitatea greutăților care realizează treptele de forță ale mașinii etalon.
- $\Delta_{Tras}$ : corecția valorilor forței reproduse de mașina etalon în funcție de rezultatul comparației cu alte etaloane similare ale altor țări.

Corecția  $\Delta_{Tras}$  se stabilește în cadrul procesului de comparare a mașinii etalon de forță care realizează etalonul național (FCM) cu o mașină etalon de forță recunoscută internațional (FSM), și se evaluează astfel:

$$\Delta_{Tras} = \frac{\overline{F}_{FCM} \cdot (1 - \Delta_{RelDev}) \cdot (1 - \Delta_{HysFCM}) - \overline{F}_{FSM} \cdot (1 - \Delta_{DriftTra}) \cdot (1 - \Delta_{IncFSM})}{\overline{F}_{FSM} \cdot (1 - \Delta_{DriftTra}) \cdot (1 - \Delta_{IncFSM})} \quad (6.5)$$

$$\cong \frac{\overline{F}_{FCM} \cdot (1 - \Delta_{RelDev}) \cdot (1 - \Delta_{HysFCM})}{\overline{F}_{FSM}} - 1 + \Delta_{DriftTra} + \Delta_{IncFSM}$$

unde:

- $\overline{F}_{FCM}$ : valoarea medie a forțelor indicate de etalonul de transfer la etalonarea cu mașina de forță (FCM);
- $\overline{F}_{FSM}$ : valoarea medie a forțelor indicate de etalonul de transfer la etalonarea cu mașina etalon de forță (FSM);
- $\Delta_{DriftTra}$ : deriva relativă a traductorului de forță de transfer (se ia în calcul intervalul de timp între momentul etalonării cu FSM în laboratorul de referință și momentul etalonării cu FCM);
- $\Delta_{IncFSM}$ : abaterea relativă de realizare a forței caracteristică mașinii etalon de forță – FSM;
- $\Delta_{HysFCM}$ : hysterezisul relativ al FCM, determinat luând în considerare și hysterezisul etalonului de transfer, determinat cu FSM;
- $\Delta_{RelDev}$ : abaterea relativă a mediei valorilor de forță indicate de etalonul de transfer la etalonarea cu FCM față de FSM;

Studiul influenței factorilor perturbatori asupra reproducerii forțelor în cadrul mașinilor etalon cu încărcare directă are o importanță deosebită în optimizarea etaloanelor naționale de forță. Acești factori determină performanțe ale sistemelor considerate - etaloanele naționale de forță - care intervin în criteriile de optimizare, cum sunt: exactitatea de măsurare și incertitudinea de realizare a forței.

Generic, factorii perturbatori pot fi grupați astfel:

- factori care determină incertitudinea estimării valorii  $m$  a masei greutăților;
- incertitudinea estimării valorii  $g_{loc}$  a accelerației gravitaționale locale;
- factori care determină incertitudinea estimării valorii densității aerului  $\rho_a$ ;
- incertitudinea estimării valorii densității greutăților  $\rho_m$ ;
- factori care determină incertitudinea corecției  $\Delta_{Tras}$  a valorilor forței reproduse de mașina etalon în funcție de rezultatul comparației cu alte etaloane similare.

Factorii perturbatori sunt identificați și estimați odată cu analiza mărimilor de intrare, în general sub forma contribuțiilor acestora la incertitudinea de măsurare.

Uneori, deși există posibilitatea efectuării unor corecții de măsurare în funcție de valoarea determinată a anumitor mărimi de influență, este preferabil, pentru simplificarea procesului, să nu se execute corecții, iar valoarea respectivă să fie considerată ca factor perturbator și tratată ca atare. Este, de exemplu, cazul influenței forței ascensionale a aerului asupra greutăților mașinii etalon, datorată variației densității aerului cu temperatura, presiunea și umiditatea. Se preferă ca, în loc să se execute corecții laborioase ale rezultatelor de măsurare a forței bazate pe monitorizarea factorilor respectivi, să se stabilească domenii de variație ale acestora în cadrul cărora influența variației lor asupra măsurării să fie acceptabilă.

Evaluarea incertitudinii de măsurare a mașinilor etalon de forță cu încărcare directă se efectuează pe baza estimării factorilor perturbatori, pornind de la ecuațiile (6.4), (6.5) și ținând cont de relația (4.3).

Presupunând că mărimile de intrare precizate la capitolul anterior nu sunt corelate, varianța relativă combinată se obține conform legii propagării erorilor aleatorii.

Modelul funcției  $f$ , conform relației (6.4) și (6.5) este de forma:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (6.6)$$

unde  $X_i$  sunt mărimile de intrare. Estimația  $y$  mărimii de ieșire  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  va fi produsul puterilor estimațiilor mărimilor de intrare  $x_i$ .

$$y = c \prod_{i=1}^N x_i^{p_i} \quad (6.7)$$

Dacă se utilizează incertitudinile standard relative:  $w(y) = u(y)/|y|$  pentru estimația mărimii de ieșire și  $w(x_i) = u(x_i)/|x_i|$  pentru estimațiile mărimilor de intrare, atunci incertitudinea standard relativă asociată cu estimația mărimii de ieșire va fi:

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i) \quad (6.8)$$

Evaluarea incertitudinii de măsurare (standard), pentru mașinile etalon de forță cu încărcare directă se efectuează astfel:

$$w(F_{FCM}) = \sqrt{w^2(m) + w^2(g_{loc}) + \left(\frac{\rho_a}{\rho_m}\right)^2 \cdot w^2(\rho_a) + \left(\frac{\rho_a}{\rho_m}\right)^2 \cdot w^2(\rho_m) + w^2(\Delta_{Tras})} \quad (6.9)$$

cu:

$$w^2(\Delta_{Tras}) = w^2(\overline{F}_{FCM}) + w^2(\Delta_{HysFCM}) + w^2(\Delta_{DriftTra}) + w^2(\overline{F}_{FSM}) + w^2(\Delta_{RelDev}) + w^2(\Delta_{IncFSM}) \quad (6.10)$$

unde:

- $w(F_{FCM})$ : incertitudinea standard compusă relativă, asociată rezultatelor de măsurare cu mașina etalon de forță – etalon național (incertitudinea mărimii de ieșire);
- $w(m)$ : incertitudinea standard compusă relativă asociată rezultatului de etalonare a greutăților;
- $w(g_{loc})$ : incertitudinea standard relativă, asociată rezultatului de determinare a accelerației gravitaționale locale (în locul de utilizare al greutăților);
- $w(\rho_a)$ : incertitudinea standard compusă relativă, asociată rezultatului de determinare a densității aerului, luând în considerare și diferența între densitatea aerului la etalonarea greutăților și cea realizată în mod uzual;
- $w(\rho_m)$ : incertitudinea standard relativă, asociată rezultatului de determinare a densității greutăților;
- $w(\Delta_{Tras})$ : incertitudinea standard compusă relativă asociată rezultatului de comparare a mașinii etalon de forță etalon național (FCM) cu o mașină etalon de forță similară (FSM) aparținând altei țări;
- $w(\overline{F}_{FCM})$ : incertitudinea standard compusă relativă asociată rezultatului de etalonare a traductoarelor de forță de transfer realizată cu FCM;
- $w(\Delta_{HysFCM})$ : incertitudinea standard asociată determinării hysterezisul relativ al FCM, la utilizarea traductoarelor de transfer;
- $w(\Delta_{DriftTra})$ : incertitudinea standard relativă asociată derivatei în timp a traductorului de forță de transfer;
- $w(\Delta_{RelDev})$ : incertitudinea standard relativă estimată pe baza abaterii mediei valorilor de forță indicate de etalonul de transfer la etalonarea cu FCM față de FSM (factor posibil de corecție, considerat din motive practice factor aleatoriu);
- $w(\Delta_{IncFSM})$ : incertitudinea de realizare a forței, caracteristică mașinii etalon de forță (FSM).

### 6.1.1 Etalonarea greutăților

În cazul mașinilor etalon de forță cu încărcare directă, reproducerea unei forțe prestabilite se realizează prin intermediul unei greutăți având masa nominală  $m_N$ .

Masa nominală se calculează astfel :

$$m_N = \frac{F}{g_{loc} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)} \quad (6.11)$$

unde :

$F$  : forța produsă de una din greutățile mașinii etalon;

$g_{loc}$  : accelerația gravitațională determinată în locul de amplasare a greutății;

- $\rho_a$  : densitatea aerului, calculată pentru valorile medii multianuale ale mărimilor de influență : temperatură, presiune atmosferică, umiditate etc.;
- $\rho_m$  : densitatea materialului din care este confecționată greutatea.

Etalonarea greutății având masa nominală  $m_N$  se efectuează prin comparare cu ajutorul unui comparator de masă, utilizând ca referință un etalon de masă  $m_s$  de aceeași valoare cu masa de etalonat  $m_N$ . Deoarece, în majoritatea cazurilor, valoarea etalonului de referință  $m_s$  nu se poate realiza prin utilizarea unei singure mase etalon, masa etalon de referință se realizează prin cumularea a  $n$  mase etalon  $m_{s1}$ ,  $m_{s2}$  ...  $m_{sn}$ , potrivit alese, astfel încât:

$$m_s = \sum_{i=1}^n m_{si} \quad (6.12)$$

O operație necesară premergătoare etalonării este *tararea greutății*. Prin această operație, valoarea masei greutății este adusă cât mai aproape posibil de valoarea nominală calculată, prin adaus sau înlăturare de material. Desigur, această operație este de foarte mare finețe și presupune numeroase măsurări succesive. În cadrul procesului de tarare se urmărește minimizarea diferenței  $\Delta m$  dintre masa nominală calculată  $m_N$  a greutății de etalonat, determinată conform ecuației (6.11) și masa efectivă a greutății.

Se poate considera că, pentru o valoare  $\Delta m \leq 10^{-7} m_N$  obținută în cadrul procesului de tarare, influența diferenței dintre masa nominală și masa greutății de etalonat este neglijabilă (nu mai sunt necesare corecții).

După tarare, greutatea se supune operațiunii de etalonare, care are menirea de a stabili valoarea atribuită mărimii de intrare  $m$  din ecuația (6.4).

Modelul matematic stabilit pentru determinarea masei  $m$  a greutății de etalonat, utilizând metoda de comparare directă prin intermediul comparatorului de masă este:

$$m = m_s + \delta m_D + \delta m + \delta m_{REP} + \delta m_B + \delta m_{REZ} \quad (6.13)$$

unde:

- $m_s$  : masa convențional adevărată a etalonului utilizat;
- $\delta m_D$  : deriva etalonului utilizat, determinat de la data ultimei etalonări;
- $\delta m$  : diferența observată la comparator dintre masa greutății de etalonat și masa etalonului utilizat;
- $\delta m_{REP}$  : corecția erorilor de reproductibilitate;
- $\delta m_B$  : corecția pentru forța ascensională a aerului;
- $\delta m_{REZ}$  : corecția pentru rezoluția comparatorului utilizat.

Modelul matematic prezentat în ecuația (6.13) include atât mărimi de intrare (masa etalonului  $m_s$ , diferența observată la comparator  $\delta m$ ) cât și evidențierea unor factori perturbatori. Analiza simultană a mărimilor de intrare și a factorilor perturbatori este caracteristică pentru modul de abordare a optimizării sistemelor de măsurare a forței.

În continuare, se explicitează contribuția fiecărei mărimi implicate în determinarea masei greutăților etalon ale mașinilor de forță.

- Masa convențional adevărată a etalonului utilizat,  $m_s$ .

Masa convențional adevărată  $m_s$ , se calculează prin însumarea valorilor maselor convențional adevărate ale etaloanelor utilizate  $m_{s1}, m_{s2}, \dots, m_{sn}$ , specificate în certificatele de etalonare emise pentru fiecare din masele respective în parte.

- Deriva etalonului (etaloanelor), calculată de la data ultimei etalonări,  $\delta m_D$ .  
Deriva etaloanelor este o mărime aleatoare, luată în considerare ca factor perturbator.

Valoarea de corecție pentru deriva etalonului este zero (nu se fac corecții pentru deriva etaloanelor utilizate). Se va lua în considerare la estimarea influenței derivatei etalonului asupra determinării masei numai valoarea incertitudinii estimate.

- Diferența dintre masa greutății de etalonat și masa etalonului utilizat,  $\delta m$ .  
Pentru determinarea prin măsurare a diferenței  $\delta m$  dintre masa greutății de etalonat și masa etalonului utilizat se utilizează un comparator de masă, ale cărui performanțe metrologice trebuie stabilite anterior.

Se execută  $N$  șiruri de măsurări ale diferenței dintre masa greutății de etalonat și masa etalon, utilizând metoda substituției, după schema ABBA ABBA ... ABBA, unde A reprezintă operația de încărcare a comparatorului cu masa etalon, iar B reprezintă operația de încărcare a comparatorului cu masa de etalonat. Pentru scopul etalonării unei mase utilizată la o mașină cu încărcare directă se consideră suficient dacă  $N = 3$ . Valoarea diferenței  $\delta m$  este media aritmetică a rezultatelor celor  $N$  șiruri de măsurări. Desigur, un număr mai mare de cântăriri are un efect pozitiv asupra stabilirii unei valori cât mai exacte a masei.

Teoretic, valoarea diferenței  $\delta m$  ar trebui să constituie un factor de corecție pentru realizarea treptelor de forță ale mașinilor etalon. Practic, în timpul operației de tarare (explicată anterior), se minimizează diferențele între valoarea calculată a forței pentru realizarea unei trepte de încărcare a mașinii de forță și cea experimentală. În acest mod, valoarea diferenței  $\delta m$  poate să fie considerat un factor perturbator, fiind tratat sub aspectul unei incertitudini introduse în procesul de măsurare.

- Corecția erorilor de reproductibilitate,  $\delta m_{REP}$ .  
Corecția privind eroarea de reproductibilitate se consideră zero. Incertitudinea asociată acestei valori este însă diferită de zero și poate fi estimată pe baza diferențelor obținute la determinarea aceleiași mase în condiții modificate (excentricitate, influența câmpurilor magnetice etc.).
- Corecția pentru forța ascensională a aerului,  $\delta m_B$ .  
Corecția pentru forța ascensională a aerului  $\rho_a$  se aplică dacă desitatea maselor etalon utilizate la etalonare diferă semnificativ de densitatea greutăților de etalonat. Astfel, dacă densitatea masei etalon utilizate este  $\rho_e$  iar densitatea greutăților de etalonat este  $\rho_m$ , valoarea corecției este:

$$\delta m_B = m \left( \frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_e} \right) \rho_a \quad (6.14)$$

În cazul în care valoarea  $\rho_e$  este apropiată de valoarea  $\rho_m$ , valoarea corecției pentru forța ascensională a aerului  $\delta m_B$  este considerată zero. În acest caz, corecția pentru forța ascensională se include în componenta respectivă a incertitudinii.

- Corecția pentru rezoluția comparatorului utilizat,  $\delta m_{REZ}$ .

Corecției pentru rezoluția comparatorului  $i$  se atribuie valoarea zero. Incertitudinea asociată acestei valori este însă diferită de zero și poate fi estimată pe baza informațiilor deținute despre comparatorul de masă.

Pentru evaluarea incertitudinii de etalonare a masei  $m$ , respectiv pentru evaluarea influenței factorilor perturbatori evidențiați pentru această determinare, vor fi luate în considerare următoarele incertitudini standard contributive:

- $u(m_s)$ : incertitudinea datorată determinării masei etalonului utilizat;
- $u(\delta m_D)$ : incertitudinea asociată derivei etalonului utilizat;
- $u(\delta m)$ : incertitudinea de determinare a diferenței dintre masa greutății de etalonat și masa etalonului utilizat;
- $u(\delta m_{REP})$ : incertitudinea asociată corecției erorilor de reproductibilitate;
- $u(\delta m_B)$ : incertitudinea asociată corecției pentru forța ascensională a aerului;
- $u(\delta m_{REZ})$ : incertitudinea asociată corecției pentru rezoluția comparatorului utilizat.

- Incertitudinea datorată determinării masei etalonului utilizat,  $u(m_s)$ .  
Incertitudinea este estimată printr-o evaluare de tip B, ca valoare preluată (din certificate de etalonare), obținută ca rezultat al unei evaluări anterioare, independente. Incertitudinea standard  $u(m_s)$  asociată valorii  $m_s$  se calculează pornind de la incertitudinile extinse  $U_{s1}, U_{s2}, \dots, U_{sn}$  și factorii de extindere  $k_{s1}, k_{s2}, \dots, k_{sn}$ , specificați în certificatele de etalonare și considerând valorile incertitudinilor necorelate. Astfel:

$$u_{ms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{U_{si}}{k_{si}} \right)^2} \quad (6.15)$$

Distribuția de probabilitate asumată este o distribuție *normală*.

- Incertitudinea asociată derivei etalonului utilizat,  $u(\delta m_D)$ .  
Estimația incertitudinii se obține în urma unei evaluări de tip B și are la bază informațiile obținute prin prelucrarea comparativă a datelor din certificatele de etalonare anterioare (stabilirea evoluției în timp a rezultatelor de etalonare), din datele furnizate de producătorul etaloanelor de masă utilizate sau din alte surse. Se apreciază, pe baza informațiilor existente și a timpului scurs de la ultima etalonare, intervalul în care, în mod rezonabil, se poate afla valoarea derivei  $\delta m_D$ . Fie  $a(\delta m_D)$  semilărgimea acestui interval.  
Distribuția de probabilitate presupusă pentru acest factor se consideră a fi de tip *rectangular*.  
În aceste condiții, incertitudinea standard asociată derivei etalonului se etimează:

$$u(\delta m_D) = \frac{a(\delta m_D)}{\sqrt{3}} \quad (6.16)$$

În cazul în care se utilizează  $n$  etaloane de masă, valoarea estimației incertitudinii standard asociate derivei va fi:



$$u(\delta m_D) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(\delta m_{Di})^2} \quad (6.17)$$

unde  $u(\delta m_{Di})$  este incertitudinea asociată derivatei etalonului  $i$  din cele  $n$  etaloane utilizate, estimată conform ecuației (6.16).

- Incertitudinea de determinare a diferenței dintre masa greutății de etalonat și masa etalonului utilizat  $u(\delta m)$ .

Incertitudinea standard  $u(\delta m)$  se obține în urma unei evaluări de tip A, bazată pe rezultatele experimentale de etalonare, prelucrate statistic. Deoarece, în general, măsurarea valorii mărimii  $m$  este bine caracterizată și aflată sub control statistic, se utilizează pentru estimarea incertitudinii standard abaterea standard experimentală globală  $s_g$ , obținută în urma unor observații repetate. În acest caz, dacă valoarea  $\delta m$  este determinată prin  $N$  observații independente, incertitudinea standard a mediei aritmetice obținută pentru valoarea abaterii se estimează estimată prin:

$$u(\delta m) = \frac{s_g}{\sqrt{N}} \quad (6.18)$$

- Incertitudinea asociată corecției erorilor de reproductibilitate,  $u(\delta m_{REP})$ .  
Evaluarea incertitudinii standard poate fi de tip A sau B. Totuși, având în vedere că o evaluare acceptabilă de tip A a incertitudinii presupune un număr mare de operații de cântărire în condiții de reproductibilitate (cel puțin 10), se preferă o evaluare de tip B, care ține seama de un număr mare de determinări anterioare și experiența operatorului.
- Incertitudinea asociată corecției pentru forța ascensională a aerului,  $u(\delta m_B)$ .  
Estimația incertitudinii asociate corecției pentru forța ascensională a aerului se obține în urma unei evaluări de tip B. Incertitudinea standard  $u(\delta m_B)$  se poate estima, pe baza studiilor de influență a variației condițiilor de mediu (temperatură, presiune atmosferică, umiditate, conținut de CO<sub>2</sub> în atmosferă etc.), ca având valoarea maximă de  $1 \times 10^{-6}$  din valoarea nominală a masei greutății de etalonat.
- Incertitudinea asociată corecției pentru rezoluția comparatorului utilizat,  $u(\delta m_{REZ})$ .  
Incertitudinea standard datorată rezoluției limitate a comparatorului este egală cu:
  - valoarea unui digit (cel mai puțin semnificativ) dacă pe timpul etalonării, atunci când este aplicată masa de etalonat sau masa etalon, variația indicației comparatorului nu depășește  $\pm 1$  digit, sau
  - jumătate din intervalul de variație al indicației comparatorului pe timpul etalonării, în caz contrar.

Plecând de la considerațiile prezentate, se poate stabili un buget al incertitudinilor, pe care să se bazeze, atât atribuirea unei valori pentru valoarea masei  $m$  cât și estimarea influenței valorilor factorilor perturbatori asupra rezultatului de etalonare.

Modelul bugetului incertitudinii asociate rezultatelor de etalonare a greutăților mașinilor de forță este prezentat în tabelul 6.1.

**Tabelul 6.1** Bugetul incertitudinii asociate etalonării greutăților mașinilor de forță

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard $u(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $u_i(y)$
$m_s$	$\sum_{i=1}^n m_{s_i}$	normală	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{s_i}}{k_{s_i}}\right)^2}$	1	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{s_i}}{k_{s_i}}\right)^2}$
$\delta m_D$	0	rectangulată	$\frac{a(\delta m_D)}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a(\delta m_D)}{\sqrt{3}}$
$\delta m$	$\overline{\delta m}$	normală	$\frac{s_g}{\sqrt{N}}$	1	$\frac{s_g}{\sqrt{N}}$
$\delta m_{REP}$	0	rectangulată	$\frac{a(\delta m_{REP})}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a(\delta m_{REP})}{\sqrt{3}}$
$\delta m_B$	$m \cdot \left(\frac{1}{\rho_n} - \frac{1}{\rho_c}\right) \rho_c$	rectangulată	$\frac{a(\delta m_B)}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a(\delta m_B)}{\sqrt{3}}$
$\delta m_{REZ}$	0	rectangulată	$\frac{a(\delta m_{REZ})}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a(\delta m_{REZ})}{\sqrt{3}}$
$m$	$\sum x_i$	normală			$\sqrt{\sum u_i^2(y)}$

Se fac următoarele mențiuni referitoare la cuprinsul tabelului 6.1, importante pentru măsurarea efectivă și calculul practic:

- estimațiile mărimilor de intrare a factorilor perturbatori sunt egale cu zero. Cu toate acestea, influența lor asupra incertitudinii de etalonare a masei nu este neglijabilă, estimația acesteia fiind estimabilă;
- distribuțiile de probabilitate ale factorilor perturbatori au fost apreciate ca fiind de tip normal sau rectangulată, după caz. Distribuția de probabilitate generală, atribuită incertitudinii evaluării valorii masei  $m$  este stabilită ca fiind normală (de fapt, aproape normală) deoarece influența determinării masei prin metoda comparatorului de masă, respectiv determinarea valorii  $\delta m$ , este determinantă.
- după cum a fost enunțat anterior, valoarea de corecție  $\overline{\delta m}$  nu poate fi, practic, utilizată. Este de preferat, dacă rezultatele de măsurare nu contrazic ipoteza unor valori foarte apropiate între masa calculată și cea efectiv măsurată, să se estimeze valoarea corecției  $\overline{\delta m}$  ca fiind egală cu zero. Astfel, valoarea de intrare a corecției se transformă în factor perturbator și poate fi luată în calcul ca incertitudine, utilizând ecuația:

$$u(\delta m) = \sqrt{\overline{\delta m}^2 + \frac{s_g^2}{N}} \quad (6.19)$$

În cazuri practice, care sunt aplicabile măsurărilor masei pentru un nivel de exactitate suficient pentru o aproximație rezonabilă pentru mașinile etalon de forță cu încărcare directă, în condițiile utilizării unor echipamente performante (de exemplu, etaloane de masă clasa OIML F1 și comparatoare electronice de masă având rezoluția relativă mai mare de  $2 \times 10^{-7}$ ) pot fi neglijate următoarele componente ale incertitudinii:

- incertitudinea asociată derivei etalonului utilizat  $u(\delta m_D)$ ;
- incertitudinea asociată corecției erorilor de reproductibilitate  $u(\delta m_{REP})$ ;
- incertitudinea asociată corecției pentru rezoluția comparatorului utilizat  $u(\delta m_{REZ})$ .

În aceste condiții, pentru o evaluare simplificată a influenței factorilor perturbatori asupra etalonării masei, poate fi utilizat bugetul de incertitudine redat în tabelul 6.2.

**Tabelul 6.2** Bugetul simplificat al incertitudinii asociate etalonării greutăților mașinilor de forță

Mărimea	Estimația	Distribuția de probabilitate	Incetitudinea standard $u(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $u_i(y)$
$X_i$	$x_i$				
$m_s$	$\sum_{i=1}^n m_{s_i}$	normală	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{s_i}}{k_{s_i}}\right)^2}$	1	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{s_i}}{k_{s_i}}\right)^2}$
$\delta m$	0	normală	$\sqrt{\delta m^2 + \frac{s_k^2}{N}}$	1	$\sqrt{\delta m^2 + \frac{s_k^2}{N}}$
$\delta m_B$	0	rectangulară	$\frac{a(\delta m_B)}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{a(\delta m_B)}{\sqrt{3}}$
$m$	$\sum_{i=1}^n m_{s_i}$	normală			$\sqrt{\sum u_i^2(y)}$

Estimarea incertitudinii standard compuse relative  $w(m)$  asociată rezultatului de etalonare a masei  $m$  se determină cu relația:

$$w(m) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^6 u_i^2(y)}}{m} \quad (6.20)$$

### 6.1.2 Influența accelerației gravitaționale

Accelerația gravitațională locală se determină de către instituții specializate de cercetare în domeniul fizicii Pământului. Având în vedere variația accelerației gravitaționale, chiar în areale relativ reduse (datorate, de exemplu, unor aglomerații de mase mari, anomalii gravitaționale etc.) și exactitatea necesară aplicației, accelerația gravitațională trebuie determinată la locul de amplasare al greutăților mașinii etalon de forță. Incertitudinea standard relativă  $w(g_{loc})$  asociată valorii  $g_{loc}$  determinate pentru accelerațională gravitaționale locale trebuie indicată în raportul de măsurare respectiv.

Pentru determinarea accelerației căderii libere  $g_{loc}$  în locurile în care sunt amplasate mașinile de forță care sunt componente ale etalonului național, au fost executate măsurări gravimetrice de către Institutul de Geofizică și Geologie București.

Având în vedere că mașinile de forță sunt amplasate pe fundații aflate sub nivelul solului, au fost necesare determinări ale valorilor accelerației căderii libere atât la nivelul solului cât și la nivelul fundației. Au fost obținute valorile indicate în tabelul 6.3.

**Tabelul 6.3: Valorile locale ale accelerației gravitaționale**

Locul măsurării	Etalon național de forță (domeniul nominal)	Valoarea accelerației gravitaționale
Sala etaloanelor naționale de 10 kN și 100 kN, la nivelul fundației	Mașinile etalon de 10 kN și 100 kN	9,8067641 m/s <sup>2</sup>
Sala etaloanelor naționale de 10 kN și 100 kN, la nivelul solului	Mașinile etalon de 10 kN și 100 kN	9,8067607 m/s <sup>2</sup>
Sala etalonului național de 50 kN, la nivelul fundației	Mașina etalon de 50 kN	9,8067658 m/s <sup>2</sup>
Sala etalonului național de 50 kN, la nivelul fundației	Mașina etalon de 50 kN	9,8067601 m/s <sup>2</sup>

Valorile accelerației gravitaționale au fost obținute prin măsurări relative, în sensul că reprezintă rezultatul însumării unei succesiuni de diferențe ale accelerației căderii libere, având ca origine punctul fundamental Potsdam, căruia i-a fost atribuită valoarea în acord cu „Sistemul geodezic de referință 1980” promovat de IUGG (Uniunea Internațională de Geologie și Geofizică) la Consfătuirea de la Canberra din anul 1979. Valoarea Potsdam de referință a accelerației căderii libere este de 9,8126000 m/s<sup>2</sup>, atribuită locului în care este situat pilonul din sala pendulului Institutului central de fizică a Pământului din Potsdam.

Valorile accelerației căderii libere determinate au fost afectate de următoarele incertitudini standard de măsurare:

- $u_p$ :  $10 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup>, determinarea valorii fundamentale Potsdam;
- $u_{PB}$ :  $7 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup>, pentru diferența de gravitate Potsdam- București;
- $u_{BA}$ :  $5 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup>, pentru diferența de gravitate București- Arad;
- $u_{AT}$ :  $2 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup>, pentru diferența de gravitate Arad- Laborator forțe Timișoara.

Considerând că valorile incertitudinilor standard de mai sus nu sunt corelate, incertitudinea standard asociată determinării accelerației gravitaționale  $u(g_{loc})$  se poate calcula astfel:

$$u(g_{loc}) = \sqrt{u_p^2 + u_{PB}^2 + u_{BA}^2 + u_{AT}^2} \quad (6.21)$$

Pentru valorile determinate ale incertitudinilor standard prezentate mai sus, valoarea incertitudinii standard asociată determinării accelerației gravitaționale este:  $u(g_{loc}) = 14 \times 10^{-7}$  m/s<sup>2</sup>.

Incetitudinea standard relativă  $w(g_{loc})$  va fi:  $w(g_{loc}) = u(g_{loc})/g_{loc} = 1,43 \times 10^{-7}$ .

### 6.1.3 Influența densității aerului

Etalonarea greutăților mașinilor etalon de forță cu încărcare directă, precum și utilizarea acestora are loc în aer. Efectul forței ascensionale (arhimedice) datorate aerului, dacă nu se compensează adecvat, constituie o sursă importantă și inacceptabilă de erori în determinarea masei. De asemenea, variația densității aerului pe parcursul utilizării mașinilor etalon de forță trebuie luată în considerare atunci când se stabilește incertitudinea reproducerii forței.

Densitatea aerului depinde de o serie de factori, din care amintim: presiunea atmosferică, temperatura aerului, umiditatea, compoziția aerului (gaze componente).

Vom considera în cele ce urmează, pe baza experienței și practicilor internaționale, ca variabile care influențează densitatea aerului următorii factori: presiunea atmosferică, temperatura și umiditatea aerului (se neglijează variația compoziției aerului). Aceste mărimi pot fi monitorizate atât pe parcursul etalonării greutăților etalon cât și pe parcursul funcționării mașinilor etalon de forță.

Unii din factorii perturbatori ai măsurării, amintiți mai sus, pot fi controlați (de exemplu, temperatura, prin termostatarea spațiilor în care se desfășoară etalonările). Alți factori (de exemplu, presiunea atmosferică) nu pot, în mod practic, controlați în laboratoarele în care de desfășoară etalonări ale mijloacelor de măsurare de forță. Evaluarea influenței factorilor care nu pot fi controlați (factori perturbatori aleatorii) trebuie să se bazeze pe analiza statistică a evoluției valorilor acestora în timp.

Densitatea aerului și influența variației acesteia asupra reproducerii unităților de forță prin intermediul etaloanelor naționale de forță trebuie luată în considerare în următoarele cazuri:

- efectuarea de corecții la etalonarea greutăților mașinilor etalon de forță;
- evaluarea incertitudinii de reproducere a forței, la utilizarea mașinilor de forță cu încărcare directă;
- stabilirea condițiilor de referință (presiune, temperatură, umiditate) pentru funcționarea etaloanelor naționale de forță- mașini cu încărcare directă.

Densitatea aerului umed poate fi determinată utilizând formula recomandată de CIPM (Conferința Internațională de Greutăți și Măsuri) în anul 1981, modificată în anul 1991, plecând de la ecuația de stare a gazului neideal și pe baza condițiilor experimentale, astfel:

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[ 1 - x_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (6.22)$$

unde, cantitățile și unitățile sunt:

$p$ :	presiunea atmosferică	[Pa]
$T$ :	temperatura termodinamică = 273,15+t/°C	[K]
$t$ :	temperatura aerului	[°C]
$x_v$ :	fracția molară a vaporilor de apă	-
$M_a$ :	masa molară a aerului uscat	[10 <sup>-3</sup> kg mol <sup>-1</sup> ]
$M_v$ :	masa molară a apei = 18,015	[10 <sup>-3</sup> kg mol <sup>-1</sup> ]
$Z$ :	factorul de compresibilitate	-
$R$ :	constanta molară a gazelor = 8,314510	[j mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]

Asumând unele aproximații acceptabile pentru măsurările în domeniul forțelor, se poate utiliza, pentru determinarea densității aerului, formula simplificată recomandată de NIST (American Institute for Standards and Technology):

$$\rho_a = \frac{[(34,8444 \times p) - h(0,00252t - 0,020582)]}{273,15 + t} \quad (6.23)$$

unde:

$p$ :	presiunea atmosferică	[Pa]
$h$ :	umiditatea relativă a aerului	[%]
$t$ :	temperatura aerului	[°C]



Incertitudinea de măsurare datorată aplicării formulei (6.23) pentru determinarea densității aerului este estimată la  $6,5 \times 10^{-5}$ , incertitudine standard relativă. Această incertitudine ia în calcul inclusiv incertitudinea datorată compoziției aerului precum și incertitudinea datorată estimării factorului de compresibilitate  $Z$ .

Importanța corecției privind influența densității aerului asupra măsurării masei depinde de exactitatea cerută pentru măsurare și de cât de mare este această corecție în comparație cu celelalte surse de erori din procesul de măsurare. Corecția cu densitatea aerului trebuie să se facă în toate măsurările de masă care implică o exactitate ridicată, deci și în cazul determinării masei pentru greutățile care compun mașinile etalon de forță cu încărcare directă.

În procesul de etalonare a greutăților pentru reproducerea treptelor de forță ale mașinilor cu încărcare directă trebuie luată în considerare forța ascensională datorată aerului. Valorile acestei forțe sunt importante, având în vedere exactitatea necesară pentru reproducerea forței, caracteristică etaloanelor naționale și, deci, acestea nu pot fi neglijate. Pentru determinarea corectă a masei greutăților etalon care reproduc unitatea de forță, precum și pentru evaluarea completă a incertitudinii asociate etaloanelor de forță este necesar să se cunoască densitatea aerului și variația acesteia pe parcursul măsurărilor efectuate.

Influența densității aerului asupra rezultatelor obținute la etalonarea greutăților mașinilor cu încărcare directă depinde de unele condiții specifice caracteristice metodei de etalonare. În cazul utilizării metodei substituției (metoda Borda), densitatea aerului are o influență semnificativă numai dacă densitatea maselor etalon diferă semnificativ (cu mai mult de 1%) de cea a masei de etalonat. Modul de efectuare a eventualelor corecții și estimarea influenței variației densității aerului asupra incertitudinii de măsurare la etalonarea greutăților etalon ale mașinilor cu încărcare directă a fost tratată la paragraful 6.1.1.

Densitatea aerului este, de asemenea, un factor de influență (perturbator, prin variația aleatorie a valorilor acesteia) în cadrul procesului efectiv de reproducere a forței al mașinilor cu încărcare directă. În acest caz, se pot identifica două surse importante de incertitudine:

- incertitudinea datorată mijloacelor de măsurare a parametrilor implicați în determinarea densității (temperatura aerului, presiunea atmosferică și umiditatea relativă);
- incertitudinea datorată aplicării corecției pentru abaterea densității aerului în timpul funcționării etalonului național față de valoarea nominală luată în considerare la etalonarea greutăților etalon.

Barometrul, termometrul și higrometrul se utilizează, în mod curent, pentru determinarea parametrilor necesari calculării densității aerului în timpul măsurării masei. Densitatea aerului, determinată pe baza indicațiilor acestor mijloace de măsurare este utilizată pentru efectuarea de corecții privind forța ascensională datorată aerului. Exactitatea recomandată a mijloacelor de măsurare utilizate pentru determinarea densității aerului, pentru măsurări de masă de exactitate ridicată este:

- barometrul: eroare tolerată pentru determinarea presiunii aerului, până la  $\pm 66,5$  Pa ( $\pm 0,5$  mm Hg);
- termometrul: eroare tolerată pentru determinarea temperaturii aerului, până la  $\pm 0,2$  °C;
- higrometrul (umidimetrul): eroare tolerată pentru determinarea umidității relative a aerului, până la  $\pm 10$  %.



În numeroase cazuri, componenta incertitudinii de determinare a forței ascensionale a aerului datorată aparatelor de măsurare a parametrilor care contribuie la determinarea densității aerului poate fi considerată ca având valoarea de  $0,0012 \text{ mg/cm}^3$  (respectiv 0.1 % din valoarea densității normale a aerului). În tabelul 6.4 sunt redată valorile maxime ale erorilor tolerate pentru mijloacele de măsurare utilizate la determinarea densității aerului, pentru o anumită incertitudine acceptată asociată rezultatului măsurării.

**Tabelul 6.4** Influența erorilor tolerate ale aparateelor pentru determinarea densității aerului

Parametri	Incertitudinea determinării valorilor densității aerului		
	$\pm 0,1 \%$	$\pm 1,0 \%$	Valori recomandate
Presiunea aerului (Pa)	$\pm 101$	$\pm 1010$	$\pm 66,5$
Presiunea aerului (mm Hg)	$\pm 0,76$	$\pm 7,6$	$\pm 0,5$
Temperatura aerului ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\pm 0,29$	$\pm 2,9$	$\pm 0,2$
Umiditate relativă (%)	$\pm 11,3$	-----	$\pm 10$

Diferențele dintre valorile de referință ale densității aerului (luate în considerare la calculul masei greutăților care reproduc treptele de forță ale mașinii cu încărcare directă) și cele constatate prin măsurare în condițiile specifice de utilizare a mașinii de forță, conduc la diferențe ale forței reproduse față de cele nominale. Desigur, teoretic, diferențele dintre forța nominală și cea efectiv reprodusă de mașina de forță, în condiții de variație cunoscută a densității aerului pot fi corectate. Această corecție implică, însă, calcule relativ laborioase care nu sunt practice în cazul utilizării mașinilor de forță cu încărcare directă. Din această cauză, este preferabil ca aceste corecții să fie incluse, ca o contribuție aleatoare, în incertitudinea globală de reproducere a forței. Totuși, pentru a limita influența acestei componente asupra incertitudinii globale la valori convenabile, este necesar să se stabilească limite pentru variația factorilor perturbatori (temperatură, presiune atmosferică și umiditate relativă a aerului). Aceste limite, numite condiții de referință, sunt astfel determinate încât, în interiorul lor, influența factorilor perturbatori să contribuie la incertitudinea globală a măsurării cu un quantum acceptabil (și estimabil) în raport cu exactitatea propusă a măsurării.

Pentru stabilirea condițiilor de referință la utilizarea mașinilor de forță cu încărcare directă sunt luate în considerare următoarele mărimi perturbatoare: temperatura aerului, presiunea atmosferică și umiditatea relativă. Pentru a caracteriza condițiile de referință trebuie individualizate valorile nominale ale mărimilor perturbatoare precum și domeniile de variație admisibile pentru acestea. Valorile nominale sunt stabilite în funcție de criterii bazate pe experiență sau pe valori statistice.

Temperatura. Temperatura de referință asigurată în locul unde funcționează etaloanele naționale de forță (mașini de forță cu încărcare directă) trebuie să fie aleasă astfel încât să fie compatibilă cu cea asigurată în locurile unde funcționează etaloanele similare, recunoscute internațional, ale altor țări. Practica internațională a impus, ca valoare nominală de referință pentru funcționarea etaloanelor naționale de forță valoarea de  $23^{\circ}\text{C}$ . Stabilirea domeniului de variație a valorilor temperaturii trebuie să țină cont de:

- posibilitatea de asigurare, prin termostatare, a unor limite controlabile de variație a temperaturii;
- incertitudinea contributivă maximă acceptabilă la reproducerea forței, asociată variației temperaturii.

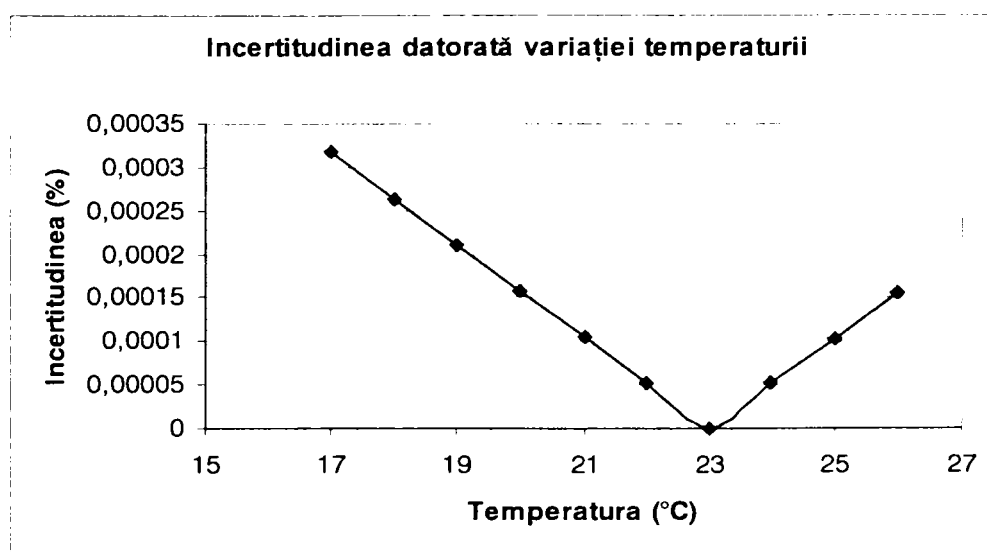
Presiunea atmosferică. În general, presiunea atmosferică în locurile unde se utilizează mașini etalon de forță, etaloane naționale, nu poate fi controlată (este nejustificat, din punct de vedere tehnic și economic, să se asigure o atmosferă controlată prin presurizare pentru încăperile unde funcționează etaloanele naționale de forță). Din acest motiv, presiunea nominală se consideră valoarea medie a presiunii atmosferice naturale, calculată pe baza unor observații statistice multianuale. La stabilirea domeniului de variație a valorilor presiunii atmosferice trebuie să se țină cont de incertitudinea contributivă maximă acceptabilă la reproducerea forței a acestui factor de influență. Pe baza observațiilor repetate și a informațiilor existente despre presiunea atmosferică la nivelul locului unde funcționează etaloanele naționale de forță (Timișoara), valoarea nominală de referință a presiunii a fost stabilită la 1013 hPa.

Umiditatea relativă. Pe baza experienței și a valorilor de referință declarate de alte laboratoare de metrologie în care funcționează etaloanele naționale ale altor țări, valoarea nominală de referință a umidității relative se consideră 50 %. Stabilirea domeniului de variație a valorilor umidității relative trebuie să țină cont de incertitudinea contributivă maximă acceptabilă la reproducerea forței.

Contribuția fiecărui factor (temperatură, presiune atmosferică și umiditate) la incertitudinea compusă de reproducere a forței, asociată mașinilor cu încărcare directă se estimează pornind de la ecuația (6.23) prin simularea mărimilor de intrare.

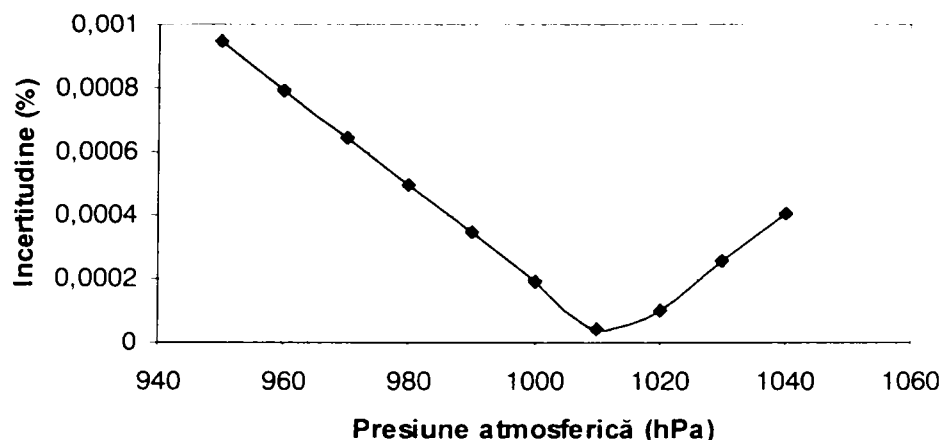
În figurile 6.1 a, b și c este redată variația incertitudinii de reproducere a unității de forță în funcție de variația, în limite acceptabile, a temperaturii, presiunii atmosferice și umidității relative.

În general, încăperile unde funcționează etaloanele naționale de forță sunt termostatare. Instalațiile de termostatare, în cadrul unor performanțe medii, pot asigura o stabilitate a temperaturii într-un domeniu de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Din figura 6.1 a) rezultă o contribuție a variației temperaturii față de valoarea de referință pentru incertitudinea generală de realizare a forței de aproximativ  $0,00005\%$  sau  $5 \times 10^{-7}$ .



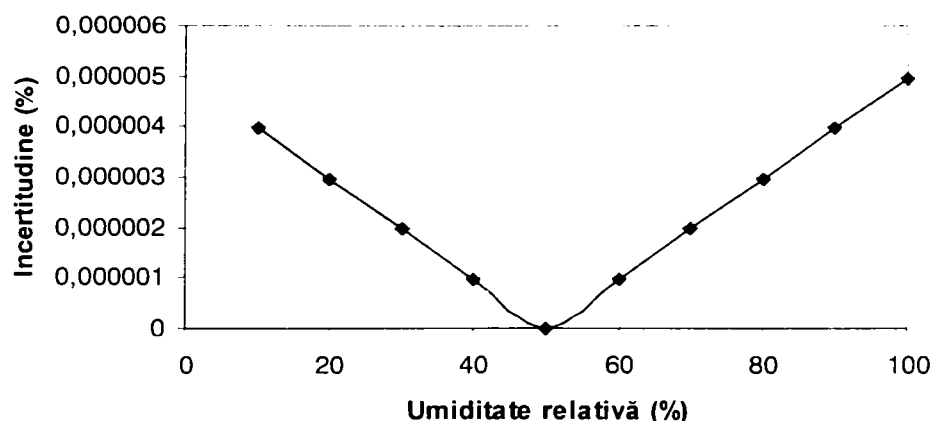
a)

Incertitudinea datorată variației presiunii atmosferice



b)

Incertitudinea datorată variației umidității



c)

Figura 6.1 Contribuția factorilor de mediu la incertitudinea compusă

După cum a fost arătat anterior, valoarea presiunii atmosferice nu poate fi, practic, controlată în locurile unde funcționează etaloanele naționale de forță. Cu toate acestea, se pot stabili limite rezonabile pentru variația presiunii atmosferice, în interiorul cărora contribuția acesteia la incertitudinea de reproducere a forței să nu influențeze inacceptabil incertitudinea generală. Astfel, din figura 6.1 b) se poate stabili un domeniu acceptabil de variație a presiunii atmosferice de la 980 hPa la 1040 hPa. În limitele acestui domeniu, variația presiunii atmosferice contribuie la incertitudinea generală de realizare a forței cu aproximativ 0,0005% sau  $5 \times 10^{-6}$ .

După cum se poate observa din figura 6.1 c), contribuția variației umidității relative a aerului asupra incertitudinii generale este relativ mică. Totuși, ținând cont de condițiile unui laborator de metrologie care păstrează și utilizează etaloane naționale, precum și de alte influențe ale umidității asupra etaloanelor și a mijloacelor de măsurare de etalonat, se stabilește un domeniu acceptabil de variație a umidității aerului de la 30 % la 80 %.

În acest domeniu, variația umidității relative contribuie la incertitudinea compusă de realizare a forței cu aproximativ 0,000003 % sau  $3 \times 10^{-8}$ .

Considerând contribuțiile variației temperaturii, presiunii atmosferice și a umidității relative asupra incertitudinii generale de realizare a forței ca fiind independente (necorelate), incertitudinea standard asociată realizării condițiilor de mediu pentru funcționarea etaloanelor naționale de forță, mașini cu încărcare directă, poate fi evaluată ca fiind radical din suma pătratelor contribuțiilor individuale. Contribuția incertitudinii asociate variației realizării condițiilor de mediu asupra incertitudinii generale de realizare a forței este estimată astfel:  $\sqrt{(5 \times 10^{-7})^2 + (5 \times 10^{-6})^2 + (3 \times 10^{-8})^2} \approx 5,03 \times 10^{-6}$ . Această contribuție la incertitudinea generală de realizare a forței poate fi considerată ca acceptabilă, fiind de peste 10 ori mai mică decât incertitudinea general acceptată pentru realizarea forței asociată etaloanelor naționale, mașini cu încărcare directă (domeniul de incertitudine acceptat de la  $1 \times 10^{-5}$  la  $5 \times 10^{-5}$ ).

Având în vedere cele prezentate mai sus, se stabilesc condițiile de referință și domeniile de variație asociate acestora pentru utilizarea etaloanelor naționale de forță, mașini cu încărcare directă, conform tabelului 6.5.

**Tabelul 6.5:** Condiții de referință pentru etaloanele naționale de forță

Mărime de influență	Valoare de referință	Domeniul de variație
Temperatură	23°C	$\pm 1^\circ\text{C}$
Presiune atmosferică	1013 hPa	de la 980 la 1040 hPa
Umiditate relativă	50 %	de la 30 % la 80 %

În concluzie, menținerea valorilor mărimilor de influență (temperatură, presiune atmosferică, umiditate relativă) în limitele de variație acceptate, prezentate în tabelul 6.5, conduc la o valoare acceptată a incertitudinii asociate determinării densității aerului de  $5,03 \times 10^{-6}$ . În condițiile în care valorile determinate pentru mărimile de influență, din diferite motive, sunt în afara domeniului de variație acceptat se pot lua următoarele decizii:

- întreruperea utilizării etalonului național de forță, mașină cu încărcare directă;
- efectuarea de corecții (nerecomandat) cu estimarea incertitudinii de realizare a forței, în condițiile date.

#### 6.1.4 Influența densității greutăților etalon

Densitatea greutăților etalon  $\rho_m$  este un termen important care trebuie luat în considerare la evaluarea incertitudinii mașinii de forță cu încărcare directă. Cunoașterea densității greutăților etalon cu o exactitate corespunzătoare, conduce la reproducerea corectă a treptelor de forță, în interiorul intervalului de incertitudine așteptat.

În mod obișnuit, determinarea densității materialului din care sunt confecționate greutățile etalon se execută prin cântărirea succesivă și repetată, în aer și în apă, a unei mostre de material. Desigur, pot fi luate în considerare și alte metode, cum ar fi determinarea geometrică a volumului mostrei de material și determinarea masei prin cântărire etc.

Cunoașterea densității materialului din care sunt confecționate greutățile etalon constituie, de asemenea, punctul de plecare pentru determinarea variației maxime acceptabile a condițiilor de mediu (temperatură, umiditate, presiune atmosferică), pentru care incertitudinea reproducerii unității de forță se află în limitele preconizate.

În cele ce urmează vom considera metoda de determinare a densității greutăților etalon prin cântărirea succesivă în aer și în apă a unei mostre de material.

Fie:

$\rho_m$ : densitatea materialului greutăților etalon

$\rho_{apa}$ : densitatea apei în care se efectuează cântărirea pentru determinarea densității materialului

$m_1$ : masa mostrei de material determinată prin cântărire în aer

$m_2$ : masa mostrei de material determinată prin cântărire în apă

și

$$\Delta m = m_1 - m_2$$

Densitatea determinată a materialului din care sunt confecționate greutățile etalon este dată de relația:

$$\rho_m = (m_1 / \Delta m) \rho_{apa} \quad (6.24)$$

Pentru estimarea incertitudinii asociate determinării densității  $\rho_m$  sunt luați în considerare următorii factori contributivi:

$w(m_1)$ : incertitudinea standard relativă asociată determinării masei  $m_1$

$w(\Delta m)$ : incertitudinea standard relativă asociată determinării diferenței  $\Delta m = m_1 - m_2$

$w(\rho_{apa})$ : incertitudinea standard relativă asociată determinării densității apei

Pentru scopul determinării densității greutăților etalon prin metoda considerată, pot fi neglijate alte contribuții la incertitudine, cum sunt: influența densității aerului, variația temperaturii pe parcursul măsurării, variația densității apei cu temperatura, influența aerului dizolvat în apă etc.

După cum rezultă din tabelul 6.6, incertitudinile relative  $w(\bar{F}_{FCM})$ ,  $w(\bar{F}_{FSM})$  sunt evaluate pornind de la analiza statistică a rezultatelor obținute la compararea FCM cu FSM, conform procedurii acceptate. Fie valorile  $c_1, c_2, \dots, c_n$  rezultatele obținute utilizând FCM la etalonarea repetată de  $n$  ori a etalonului de referință la treapta de forță  $p$  și  $\bar{c}$  media aritmetică a acestora. Fie valorile  $s_1, s_2, \dots, s_n$  rezultatele obținute utilizând FSM la etalonarea repetată de  $n$  ori a etalonului de referință la treapta de forță  $p$  și  $\bar{s}$  media aritmetică a acestora.

Mărimile de intrare  $m_1$  și  $\Delta m$  sunt corelate (în exprimarea mărimii  $\Delta m$  intervine și mărimea  $m_1$ ). Din acest motiv, în exprimarea incertitudinii asociate determinării densității  $\rho_m$  intervine covarianța  $w(m_1, \Delta m)$  asociată corelației între  $m_1$  și  $\Delta m$ , astfel:

$$w(m_1, \Delta m) = w(m_1) w(\Delta m) r(m_1, \Delta m) \quad (6.25)$$

unde  $r(m_1, \Delta m)$  este factorul de corelație între estimațiile valorilor măsurate  $m_1$  și  $\Delta m$ . Acest factor poate fi considerat egal cu 0,5 (rezultat din corelarea a două mărimi,  $m_1$  și  $\Delta m = m_1 - m_2$ , dependente funcțional prin mărimea  $m_1$ ).

În aceste condiții, incertitudinea relativă asociată determinării densității materialului din care sunt construite greutățile etalon ale mașinii cu încărcare directă  $w(\rho_m)$  poate fi exprimată prin ecuația:

$$w(\rho_m) = \sqrt{w^2(m_1) + w^2(\Delta m) + w^2(\rho_{aer}) + 2w(m_1)w(\Delta m)r(m_1, \Delta m)} \quad (6.26)$$



sau, pentru cazul particular  $r(m_1, \Delta m) = 0,5$ :

$$w(\rho_m) = \sqrt{w^2(m_1) + w^2(\Delta m) + w^2(\rho_{acr}) + w(m_1)w(\Delta m)} \quad (6.27)$$

### 6.1.5 Influența erorilor determinate la compararea cu etaloane similare

Etalonarea greutăților mașinilor etalon, astfel încât acestea să reproducă treptele de forță predeterminate și supravegherea condițiilor de lucru, nu este suficientă pentru asigurarea funcționării mașinilor etalon național de forță în limitele de exactitate prevăzute. Pot fi identificate o serie de mărimi perturbatoare care influențează rezultatul reproducerii forței (mărimea de ieșire), care nu sunt determinate de etalonarea sau starea greutăților etalon: nealinieri ale greutăților etalon în mașina de forță, frecări, momente de încovoiere, deformații elastice ale structurii de rezistență, oscilații amortizate etc. Influența acestor mărimi perturbatoare asupra exactității de reproducere a forței poate fi pusă în evidență prin compararea etaloanelor naționale de forță (mașini cu încărcare directă) cu etaloanele similare ale altor țări. În acest mod, la scară internațională, prin comparații succesive și consecvente ale etaloanelor naționale de forță, se instituie, de fapt, un etalon internațional de grup.

Pentru punerea în evidență a gradului de compatibilitate a etalonului național de forță, reprezentat de o mașină cu încărcare directă, cu un etalon similar al altei țări, sunt necesare următoarele activități:

- alegerea convenabilă a unei referințe, un etalon de forță recunoscut internațional;
- efectuarea unor comparații relevante, care să pună în evidență diferențele dintre valorile forței reproduse de etalonul național față de etalonul de referință;
- reevaluarea performanțelor etalonului național, pe baza rezultatelor comparațiilor cu etalonul de referință.

Rezultatul acestor activități contribuie la incertitudinea estimată a reproducerii unității de forță cu factorul  $(1 - \Delta_{Tras})$ , conform ecuației (6.4). Factorul contributiv  $\Delta_{Tras}$  este estimat plecând de la ecuația (6.5).

Practic, este necesar ca mașina etalon național cu încărcare directă (FCM) să fie comparată cu o mașină similară, compatibilă cu aceasta, recunoscută pe plan internațional (FSM). Pentru comparare sunt utilizate traductoare de forță, etaloane de transfer, având caracteristici metrologice foarte bune (exactitate, fidelitate, reproductibilitate, stabilitate). Gama de etaloane de transfer utilizabilă pentru comparare trebuie aleasă în așa fel încât domeniul de utilizare să fie cuprins între 40% și 100% din domeniul nominal al acestora. Compararea are loc după o procedură bine stabilită și acceptată de ambele părți implicate în activitățile specifice. Etaloanele de transfer utilizate și procedura de comparare vor fi detaliate la capitolul 7.

Compararea internațională nu generează corecții pentru reproducerea treptelor de forță ale mașinilor cu încărcare directă. Rezultatele obținute influențează doar incertitudinea asociată rezultatelor de măsurare a forței, realizate cu mașina etalon.

Evaluarea contribuției incertitudinii asociate fiecărui termen din ecuația (6.5) la incertitudinea datorată trasabilității internaționale a etaloanelor naționale de forță, conform ecuației (6.10), este prezentată în tabelul 6.6.

După cum rezultă din tabelul 6.6, incertitudinile relative  $w(\bar{F}_{FCM})$ ,  $w(\bar{F}_{FSM})$  sunt evaluate pornind de la analiza statistică a rezultatelor obținute la compararea FCM cu FSM, conform procedurii acceptate.



Fie valorile  $c_1, c_2, \dots, c_n$  rezultatele obținute utilizând FCM la etalonarea repetată de  $n$  ori a etalonului de referință la treapta de forță  $p$  și  $\bar{c}$  media aritmetică a acestora. Fie valorile  $s_1, s_2, \dots, s_n$  rezultatele obținute utilizând FSM la etalonarea repetată de  $n$  ori a etalonului de referință la treapta de forță  $p$  și  $\bar{s}$  media aritmetică a acestora.

**Tabelul 6.6:** Evaluarea incertitudinii datorată asigurării trasabilității internaționale

$w(\bar{F}_{FCM})$	Incertitudinea relativă asociată valorii atribuite etalonului de transfer la etalonarea cu FCM se obține din rezultatele experimentale pe baza analizei reproductibilității. Evaluarea este de tip A.
$w(\Delta_{HysFCM})$	Incertitudinea relativă asociată hysterezisului etalonului de transfer determinat la etalonarea cu FCM se obține pe baza analizei diferențelor dintre valorile crescătoare și cele descrescătoare rezultate la etalonarea etalonului de transfer cu FCM. Evaluarea este de tip B.
$w(\Delta_{DriftTra})$	Incertitudinea relativă asociată variației în timp a caracteristicilor metrologice esențiale (exactitate, stabilitate) ale etaloanelor de transfer utilizate se obține din analiza rezultatelor etalonărilor succesive ale etaloanelor de transfer. Evaluarea este de tip B.
$w(\bar{F}_{FSM})$	Incertitudinea relativă asociată valorii atribuite etalonului de transfer la etalonarea cu FSM se obținute din rezultatele experimentale pe baza analizei reproductibilității. Evaluarea este de tip A.
$w(\Delta_{RelDev})$	Incertitudinea relativă asociată diferenței dintre valorile atribuite etalonului de transfer la etalonarea cu FCM și cele atribuite la etalonarea cu FSM se include în incertitudinea atribuită comparației, deoarece diferențele nu sunt preluate ca și corecții. Evaluarea este de tip B.
$w(\Delta_{InclFSM})$	Incertitudinea relativă asociată valorilor forței reproduse de FSM este preluată din declarația deținătorului mașinii de forță de referință FSM. evaluarea este de tip B.

Incertitudinea relativă  $w(\Delta_{HysFCM})$  se evaluează pe baza diferențelor obținute dintre indicațiile traductoarelor de transfer etalonate cu FCM la forțe crescătoare, față de indicațiile obținute la forțe descrescătoare. Deoarece, de regulă, pentru o treaptă de forță, se efectuează câte o singură măsurare la forțe crescătoare și descrescătoare, evaluarea este de tip B și se bazează pe asumarea unei distribuții rectangulare. Fie  $\Delta_c$  valoarea diferenței dintre indicația etalonului de transfer la forțe crescătoare și cea obținută la forțe descrescătoare, pentru treapta de forță  $p$ .

Incertitudinea relativă  $w(\Delta_{DriftTra})$  se evaluează pornind de la asumarea unei distribuții rectangulare a variației în timp a caracteristicilor metrologice ale traductoarelor de transfer. Principalele surse de informații utilizate la evaluarea incertitudinii  $w(\Delta_{DriftTra})$  sunt specificațiile producătorului etaloanelor de transfer și rezultatele urmăririi în timp a variației caracteristicilor metrologice ale acestora, utilizând rezultatele etalonărilor succesive.

Incertitudinea relativă  $w(\Delta_{RelDev})$  se evaluează pornind de la diferențele rezultate în urma comparării FCM cu FSM, cu preluarea diferențelor în incertitudine (nu se fac corecții), asumându-se o distribuție de probabilitate rectangulară. Diferența este evaluată ca  $\bar{c} - \bar{s}$ .

Incertitudinea relativă  $w(\Delta_{InclFSM})$  se evaluează pornind de la incertitudinea declarată pentru FSM. De regulă, incertitudinea declarată este incertitudinea extinsă relativă  $W_{FSM}$ . Incertitudinea standard relativă este obținută prin divizarea incertitudinii extinse cu factorul de extindere  $k$ .

Având în vedere cele de mai sus, evaluarea influenței erorilor determinate la compararea etaloanelor naționale cu etaloane similare ale altor țări  $\Delta_{Tras}$  se efectuează conform tabelului 6.7.

**Tabelul 6.7** Bugetul incertitudinii asociată trasabilității internaționale

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard $w(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $w_i(y)$
$\bar{F}_{FCM}$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i = \bar{c}$	normală	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n(n-1)\bar{c}}}$	1	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n(n-1)\bar{c}}}$
$\Delta_{HystFCM}$	0	rectangulară	$\frac{\Delta_{HystFCM}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{\Delta_{HystFCM}}{\sqrt{3}}$
$\Delta_{DriftTra}$	0	rectangulară	$\frac{\Delta_{Drifttra}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{\Delta_{Drifttra}}{\sqrt{3}}$
$\bar{F}_{FSM}$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i = \bar{s}$	normală	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)\bar{s}}}$	1	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)\bar{s}}}$
$\Delta_{ReIDev}$	$\bar{c} - \bar{s}$	rectangulară	$\frac{\bar{c} - \bar{s}}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{\bar{c} - \bar{s}}{\sqrt{3}}$
$\Delta_{InclSM}$	0	normală	$\frac{W_{FSM}}{k}$	1	$W_{FSM}$

Incertitudinea asociată trasabilității internaționale  $w(\Delta_{Tras})$  se estimează conform ecuației 6.10.

## 6.2 Contribuții la optimizarea etaloanelor secundare, de referință și de lucru

Legislația metrologică din România precizează că etaloanele naționale se utilizează exclusiv pentru reproducerea unităților de măsură SI și diseminarea acestora la etaloanele de ordin imediat inferior. Această prevedere este o restricție importantă în utilizarea etaloanelor naționale în întreg lanțul de trasabilitate a măsurărilor de forță. Această stare de fapt conduce, practic, la necesitatea asigurării unei baze de etaloane care să asigure racordarea mijloacelor de măsurare a forței la etaloanele naționale. Aceste etaloane, de rang inferior etaloanelor naționale, sunt etaloane secundare, de referință și/sau de lucru. Valorile etaloanelor secundare sunt atribuite, urmând proceduri specifice, plecând de la valorile etaloanelor naționale.

Etaloanele secundare de forță, utilizate ca etaloane de referință, pot fi:

- mașini de forță cu încărcare directă;
- mașini de forță cu încărcare directă și amplificare hidraulică;
- mașini de forță cu încărcare directă și amplificare cu pârghie;
- mașini de forță cu comparare cu traductoare de referință;
- dinamometre.

Etaloanele de forță de lucru sunt, de regulă, dinamometre.

### 6.2.1 Contribuții la optimizarea etaloanelor secundare, de referință

Mașinile de forță cu încărcare directă, utilizate ca etaloane secundare de referință, sunt asimilabile, ca mod de abordare în privința optimizării, etaloanelor naționale de același tip. În prezent, în România, nu există, în afara etaloanelor naționale de forță, mașini etalon de forță cu încărcare directă utilizate ca etaloane de referință.

Modelul matematic pentru realizarea forței prin intermediul mașinilor de forță cu încărcare directă și amplificare hidraulică sau amplificare cu pârghie poate fi descris de ecuația:

$$F_{FCM} = mg_{loc} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) Q (1 - \Delta_{Tras}) \quad (6.28)$$

unde:

Q: factorul de amplificare rezultat din raportul suprafețelor cilindrilor hidraulici (pentru amplificarea hidraulică) sau din raportul brațelor pârghiei (pentru amplificarea cu pârghie).

În acest caz, influența mărimilor perturbatoare poate fi estimată prin ecuația:

$$w(F_{FCM}) = \sqrt{w^2(m) + w^2(g_{loc}) + \left( \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)^2 \cdot w^2(\rho_a) + \left( \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)^2 \cdot w^2(\rho_m) + w^2(Q) + w^2(\Delta_{Tras})} \quad (6.29)$$

unde:

$w(Q)$ : incertitudinea standard relativă asociată factorului de amplificare Q.

Modelul matematic pentru realizarea forței prin intermediul mașinilor de forță cu comparare cu traductoare de referință poate fi descris de ecuația:

$$F_{FCM} = F_{RefTra} \cdot (1 - \Delta_{DriftRef}) \cdot (1 - c_\theta) \cdot (1 - \Delta_{Stab}) \cdot (1 - \Delta_{Tras}) \quad (6.30)$$

unde:

$F_{RefTra}$ : rezultatul etalonării traductorului de referință al mașinii (valoare atribuită)  
 $\Delta_{DriftRef}$ : deriva relativă în timp a traductorului de referință al mașinii  
 $c_\theta$ : abaterea relativă a rezultatelor de etalonare datorată aplicării corecției de temperatură  
 $\Delta_{Stab}$ : diferența relativă datorată modificării forței aplicate de mașină pe durata unei măsurări de comparare (stabilitatea forței aplicate)  
 $\Delta_{Tras}$ : abaterea relativă a mediei valorilor de forță indicate de etalonul de transfer la etalonarea succesivă cu mașina etalon de forță cu comparare și cu o mașină etalon de forță de referință

În acest caz, influența mărimilor perturbatoare poate fi estimată prin ecuația:

$$w(F_{FCM}) = \sqrt{w^2(F_{RefTra}) + w^2(\Delta_{DriftRef}) + w^2(c_\theta) + w^2(\Delta_{Stab}) + w^2(\Delta_{Tras})} \quad (6.31)$$

unde:

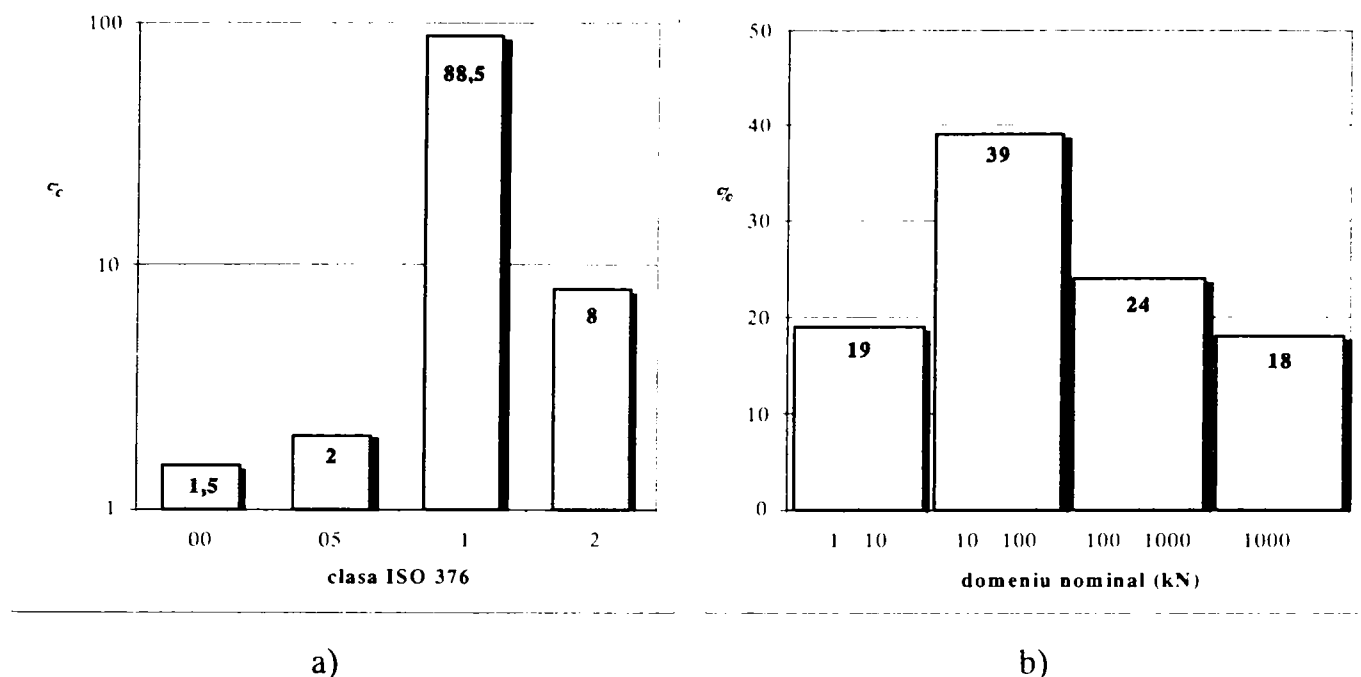
- $w(F_{RefTra})$ : incertitudinea standard relativă asociată rezultatului de etalonare a traductorului de forță al mașinii;
- $w(\Delta_{DriftRef})$ : incertitudinea standard relativă asociată derivei traductorului de referință al mașinii;
- $w(c_\theta)$ : incertitudinea standard relativă asociată modificării rezultatelor de etalonare la aplicarea corecției de temperatură;
- $w(\Delta_{Stab})$ : incertitudinea standard relativă asociată modificării forței aplicate pe durata unei măsurări de comparare.

Stabilirea soluției optime pentru dezvoltarea unui sistem de etaloane de referință ca bază pentru asigurarea trasabilității măsurărilor de forță la SI impune utilizarea unor alternative care să fie în același timp corecte din punct de vedere al performanțelor tehnice și metrologice impuse cât și rezonabile ca și costuri. În prezent, cele mai utilizate etaloane secundare de referință de forță, sunt mașini cu încărcare directă și amplificare cu pârghie, mașini cu încărcare directă și amplificare hidraulică și mașini cu comparare (cu un traductor etalon de referință sau cu trei traductoare etalon de referință, în sistem „build-up”).

Pentru realizarea unei soluții optimime în funcție de performanțele metrologice și costuri, mașinile etalon de forță cu comparare constituie o soluție acceptabilă. Realizarea performanțelor tehnice și metrologice conforme cu cerințele normativelor aplicabile (de exemplu, ISO 376) pentru aceste mașini de forță se bazează pe caracteristicile elementelor componente (de exemplu, traductoare de forță de referință, sistemul mecanic de producere a forței etc.). Caracteristicile metrologice importante ale traductoarelor de forță care pot determina utilizarea acestora ca etaloane de referință în cadrul mașinilor cu comparare sunt: repetabilitatea, reproductibilitatea și stabilitatea.

Baza optimă de etaloane necesară asigurării trasabilității măsurărilor de forță la SI se poate stabili pornind de la cerințele clienților. În acest scop, este prezentată, în continuare, o analiză statistică multianuală (statistica pe cinci ani) a solicitărilor clienților adresate laboratorului forțe Timișoara (laborator național de referință) pentru etaloanarea dinamometrelor utilizate la verificarea sistemelor de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale. Astfel, în fig. 6.2 a) sunt redate ponderile claselor de exactitate (conform standardului ISO 376) iar în fig. 6.2 b) ponderile domeniilor nominale ale dinamometrelor prezentate la verificare, exprimate în funcție de numărul de solicitări adresate către Laboratorul forțe Timișoara.

Din analiza datelor prezentate, rezultă o pondere foarte mare deținută de dinamometrele având clasele de exactitate 1 și 2 (conform ISO 376), pentru care se solicită etalonări, având domeniul nominal de până la 1000 kN. Din acest motiv, eforturile Laboratorului forțe Timișoara au fost îndreptate către dezvoltarea unei baze de etaloane de forță care să vină în întâmpinarea acestor cerințe exprimate ale clienților.



**Figura 6.2:** Ponderea claselor de exactitate și a domeniilor nominale

În tabelul 6.8 este redată corespondența dintre incertitudinea etaloanelor de referință, în funcție de clasa de exactitate ISO 376 și caracteristicile metrologice ale dinamometrelor supuse etalonării.

**Tabelul 6.8:** Incertitudinea etaloanelor de referință conform ISO 376

Clasa ISO	Eroarea relativă a dinamometrului %					Incertitudinea etalonului de referință %
	reproductibilitate	repetabilitate	interpolare	de zero	reversibilitate	
00	0,05	0,025	0,025	0,012	0,07	0,01
0,5	0,10	0,05	0,05	0,025	0,15	0,02
1	0,20	0,10	0,10	0,050	0,30	0,05
2	0,40	0,20	0,20	0,10	0,50	0,10

Incertitudinea de aplicare a forței (sau de realizare a forței aplicate) prevăzută de standardul ISO 376 pentru asigurarea condițiilor necesare etalonărilor pentru dinamometre având clasa 1 sau o clasă inferioară este relativ ușor de realizat prin intermediul mașinilor de forță cu încărcare directă (care ating o incertitudine extinsă relativă în domeniul de la  $5 \times 10^{-5}$  la  $1 \times 10^{-4}$ ) sau chiar prin intermediul mașinilor cu încărcare directă și amplificare cu pârghie sau cu amplificatoare hidraulică, care pot realiza incertitudini în domeniul de la  $1 \times 10^{-4}$  la  $5 \times 10^{-4}$ . Aceste mașini sunt, totuși, dificil de realizat, implicând și costuri foarte mari, mai ales atunci când reproduc forțe de peste 100 kN.

Plecând de la facilitățile deja existente și ținând cont restricțiile economice, direcția de optimizare a etaloanelor de referință de forță aleasă de Laboratorul forțe Timișoara a fost următoarea:

- dezvoltarea unor etaloane de referință, altele decât etaloanele naționale, care să poată asigura etalonarea dinamometrelor cu domeniul nominal de până la 1000 kN (compresiune și tracțiune) și 3000 kN (compresiune);
- asigurarea trasabilității la SI a etaloanelor de referință utilizate prin intermediul etaloanelor naționale de forță sau, după caz, prin intermediul etaloanelor recunoscute ale altor țări.

Problema de rezolvat este de a aduce etaloanele de referință de forță existente la performanțele metrologice corespunzătoare scopului propus, respectiv posibilitatea etalonării traductoarelor de forță având clasa 1 conform standardului ISO 376, cu respectarea cerințelor impuse. Pentru aceasta, mașina etalon de forță utilizată trebuie să asigure o incertitudine relativă de aplicare a forței de maximum  $5 \times 10^{-4}$ .

La evaluarea incertitudinii trebuie să se facă diferența între incertitudinea de aplicare a forței de etalonare și incertitudinea măsurărilor de etalonare. Această diferență este constituită, în principal, din faptul că incertitudinea măsurărilor de etalonare, spre deosebire de incertitudinea de aplicare a forței, cuprinde și influența etalonului supus etalonării (factorul de transparentă al acestuia). Din acest motiv, incertitudinea de aplicare a forței se apropie foarte mult, și poate fi echivalată, cu *bmc* – cea mai bună capabilitate de măsurare a laboratorului de metrologie.

### 6.2.2 Contribuții la optimizarea etaloanelor de lucru

Pentru determinarea caracteristicilor metrologice, etaloanele de lucru se supun unui proces de etalonare. Din analiza datelor obținute în urma etalonării se pot estima contribuțiile factorilor de influență în procesul de măsurare, sub forma aportului incertitudinilor standard ale mărimilor de influență asupra incertitudinii compuse.

Metodele de etalonare pentru etaloanele de lucru sunt, în general, procedurate, cel mai adesea fiind utilizat standardul ISO 376. În conformitate cu acest standard, etalonarea se efectuează în 10 puncte distribuite uniform în interiorul intervalului de etalonare. Etalonarea trebuie să se efectueze prin aplicarea asupra dinamometrului etalon de lucru a următoarelor serii de forțe:

- două serii de forțe de etalonare, în sens crescător, fără să se intervină asupra dinamometrului. Se obțin seriile de valori indicate de dinamometru notate cu  $X_1$  și  $X_2$ ;
- două serii de forțe de etalonare, în sens crescător și descrescător. Fiecare serie de forțe se aplică cu rotirea dinamometrului în jurul axei sale cu câte  $120^\circ$ , astfel încât să se obțină poziții uniform distribuite ( $120^\circ$  și  $240^\circ$  față de poziția inițială). Se obțin seriile de valori indicate de dinamometru notate cu  $X_3$  și  $X_4$ , respectiv  $X_5$  și  $X_6$ .

Se înregistrează, în timpul efectuării încercărilor, valorile  $i_0$  ale indicației dinamometrului înaintea aplicării forțelor de etalonare și  $i_f$  ale indicației după ce forța de etalonare a fost înlăturată.

Pe baza observațiilor experimentale se pot determina valorile mărimilor de influență, după cum urmează:

Eroarea relativă de reproductibilitate,  $b$

Pentru calculul erorii de reproductibilitate se utilizează ecuația:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_r} \right| \times 100 \quad (6.32)$$



unde:

$$X_{max} = \max(X_1, X_3, X_5)$$

$$X_{min} = \min(X_1, X_3, X_5)$$

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

Eroarea relativă de repetabilitate,  $b'$

Pentru calculul erorii de repetabilitate se utilizează ecuația:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \times 100 \quad (6.33)$$

unde:

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Eroarea relativă de interpolare  $f_c$

În cursul unui proces de etalonare a unui dinamometru, utilizat ca etalon de lucru, se obține o succesiune de perechi valori  $(x_i, s_i)$ ,  $x_i$  reprezentând valorile forței aplicate dinamometrului (valori convențional adevărate), iar  $s_i$  reprezentând valorile forței indicate de dinamometru la aplicarea forței  $x_i$  (răspunsul dinamometrului- valori experimentale).

Atât valorile  $x_i$  cât și  $s_i$  sunt supuse influențelor mărimilor perturbatoare și, deci, sunt afectate de incertitudinile aferente rezultate din procesul de determinare a acestor valori. Acest lucru face ca perechile de puncte  $(x_i, s_i)$  să se afle în apropierea caracteristicii funcționale teoretice  $y = f(x)$  a traductorului, dar nu neapărat pe această caracteristică.

Problema este de a determina o caracteristică funcțională a dinamometrului care exprimă cel mai bine comportarea acestuia, plecând de la valorile experimentale obținute în cursul procesului de etalonare.

Caracteristica unui dinamometru poate fi exprimată, prin aproximare, ca o funcție polinomială, de obicei de gradul 1 până la gradul 5. În general, pentru un dinamometru utilizat ca etalon de lucru, gradul polinomului care aproximează suficient de exact caracteristica acestuia este cuprins între 1 și 3. Polinoamele de grad superior (4 sau 5) sunt rareori utilizate pentru caracterizarea funcțiilor de transfer ale dinamometrelor, și atunci numai pentru dinamometre utilizate ca etaloane de referință.

Dacă a fost stabilit faptul că o caracteristică de transfer a unui dinamometru poate fi descrisă de o funcție polinomială, expresia analitică a acestei funcții  $y = f(x)$  se poate determina astfel încât suma pătratelor diferențelor între valorile experimentale și cele obținute pornind de la expresia analitică a caracteristicii de transfer să fie minimă. Deci, dacă la intrarea dinamometrului au fost aplicate  $n$  trepte de forță  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), fiind determinate experimental  $n$  valori de ieșire  $s_i$ , se poate determina o funcție de transfer de tip polinomial  $y = f(x)$ , astfel încât:

$$S = (s_1 - y_1)^2 + (s_2 - y_2)^2 + \dots + (s_n - y_n)^2 \rightarrow \min \quad (6.34)$$

sau,

$$S = \sum_{i=1}^n (s_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (6.35)$$

sau,

$$S = \sum_{i=1}^n [s_i - f(x_i)]^2 \rightarrow \min \quad (6.36)$$

Dacă funcția de transfer a dinamometrului este de tipul:

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m \quad (6.37)$$

se poate determina această funcție plecând de la condiția:

$$S = \sum_{i=1}^n (s_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - \dots - a_m x_i^m)^2 \rightarrow \min \quad (6.38)$$

unde:

- $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ : sunt valorile convențional adevărate ale treptelor de forță aplicate la intrarea dinamometrului;  
 $s_i (i = 1, 2, \dots, n)$ : sunt valorile experimentale de ieșire ale dinamometrului, la aplicarea treptelor de forță  $x_i$  la intrare.

Pentru aproximarea caracteristicii de transfer a unui traductor de forță, se poate considera o funcție polinomială de gradul 3, de tipul:

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 \quad (6.39)$$

Având  $n$  rezultate experimentale  $s_i (i = 1, 2, \dots, n)$  ale valorilor de ieșire ale dinamometrului pentru  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$  valori ale mărimii de intrare (trepte de forță aplicate dinamometrului în procesul de etalonare), caracteristica de transfer se poate determina, conform expresiei (6.38), plecând de la condiția:

$$S = \sum_{i=1}^n (s_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - a_3 x_i^3)^2 \rightarrow \min \quad (6.40)$$

Dacă se consideră că  $a_0 = 0$  (în lipsa forței aplicate indicația dinamometrului este zero; acest lucru se obține prin aducerea la zero a indicațiilor dinamometrului la începerea etalonării), atunci expresia (6.40) devine:

$$S = \sum_{i=1}^n (s_i - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - a_3 x_i^3)^2 \rightarrow \min \quad (6.41)$$

Pentru determinarea minimumului conform expresiei (6.39), se calculează:

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = \sum [-2x_i (s_i - a_1 x_i - a_2 x_i^2 - a_3 x_i^3)] = -2 \sum (s_i x_i - a_1 x_i^2 - a_2 x_i^3 - a_3 x_i^4) \quad (6.42)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_2} = -2 \sum (s_i x_i^2 - a_1 x_i^3 - a_2 x_i^4 - a_3 x_i^5) \quad (6.43)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_3} = -2 \sum (s_i x_i^3 - a_1 x_i^4 - a_2 x_i^5 - a_3 x_i^6) \quad (6.44)$$

Minimumul se obține atunci când:

$$\sum (s_i x_i - a_1 x_i^2 - a_2 x_i^3 - a_3 x_i^4) = 0 \quad (6.45)$$

$$\sum (s_i x_i^2 - a_1 x_i^3 - a_2 x_i^4 - a_3 x_i^5) = 0 \quad (6.46)$$

$$\sum (s_i x_i^3 - a_1 x_i^4 - a_2 x_i^5 - a_3 x_i^6) = 0 \quad (6.47)$$

sau:

$$\sum s_i x_i = a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + a_3 \sum x_i^4 \quad (6.48)$$

$$\sum s_i x_i^2 = a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + a_3 \sum x_i^5 \quad (6.49)$$

$$\sum s_i x_i^3 = a_1 \sum x_i^4 + a_2 \sum x_i^5 + a_3 \sum x_i^6 \quad (6.50)$$

Dacă notăm cu:

$$\begin{array}{cccc} \sum s_i x_i = A & \sum s_i x_i^2 = B & \sum s_i x_i^3 = C & \sum x_i^2 = K \\ \sum x_i^3 = L & \sum x_i^4 = M & \sum x_i^5 = N & \sum x_i^6 = P \end{array}$$

atunci se poate scrie sistemul:

$$\begin{array}{l} a_1 K + a_2 L + a_3 M = A \\ a_1 L + a_2 M + a_3 N = B \\ a_1 M + a_2 N + a_3 P = C \end{array}$$

Notăm cu:

$$D_K = \begin{vmatrix} K & L & M \\ L & M & N \\ M & N & P \end{vmatrix} = KMP + 2LMN - M^3 - PL^2 - KN^2 \quad (6.51)$$

$$D_{a_1} = \begin{vmatrix} A & L & M \\ B & M & N \\ C & N & P \end{vmatrix} = AMP + BMN + CLN - CM^2 - AN^2 - BLP \quad (6.52)$$

$$D_{a_2} = \begin{vmatrix} K & A & M \\ L & B & N \\ M & C & P \end{vmatrix} = BKP + CLM + AMN - BM^2 - CKN - ALP \quad (6.53)$$

$$D_{a_3} = \begin{vmatrix} K & L & A \\ L & M & B \\ M & N & C \end{vmatrix} = CKM + ALN + BLM - AM^2 - CL^2 - BKN \quad (6.54)$$

Coeficienții polinomului de gradul 3 care aproximează caracteristica de transfer a dinamometrului se calculează astfel:

$$a_1 = \frac{D_{a1}}{D_k} \qquad a_2 = \frac{D_{a2}}{D_k} \qquad a_3 = \frac{D_{a3}}{D_k}$$

Pentru constatarea gradului de concordanță între rezultatul aproximării caracteristicii de transfer a unui dinamometru utilizând ecuațiile de mai sus și ecuația obținută de laboratoare recunoscute internațional s-a procedat la validarea procedurii de aproximare. Acțiunea de validare a cuprins următoarele activități:

- alegerea unor traductoare de forță, etaloane de transfer, având diferite domenii nominale, care au fost etalonate într-un laborator de referință (PTB Germania);
- pornind de la rezultatele obținute în laboratorul de referință, utilizând metoda de aproximare a caracteristicii de transfer redată mai sus, au fost stabilite caracteristicile analitice de transfer ale traductoarelor (polinoame de gradul 3);
- rezultatele obținute au fost comparate cu caracteristicile analitice de transfer ale traductoarelor determinate în laboratorul de referință.

Sunt prezentate în continuare rezultatele obținute la validarea procedurii de aproximare a caracteristicilor analitice de transfer ale dinamometrelor, plecând de la rezultatele de etalonare. A fost ales un traductor electric de forță, etalon de transfer, având domeniul nominal  $F_N = 500$  kN, cu valoarea mărimii de ieșire de 2 mV/V la forța nominală. Acest etalon a fost etalonat în laboratorul de forță al PTB Germania.

Pentru etalonare au fost aplicate zece trepte de forță ca mărimi de intrare ale traductorului. Valoarea mărimii de intrare  $x_i$  a fost normalizată (s-a considerat ca mărime de intrare  $x_i = F' = F/F_N$ ), unde  $F_N$  este limita superioară a domeniului de măsurare a traductorului (500 kN). Au fost constatate, la aplicarea treptelor de etalonare  $x_i$ , valorile de răspuns ale traductorului  $s_i$  (valori experimentale), exprimate în  $\mu\text{V/V}$ .

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.9.

**Tabelul 6.9:** Stabilirea caracteristicii analitice de transfer a unui traductor de forță

$x_i$	$s_i$	$A=s_i x_i$	$B=s_i x_i^2$	$C=s_i x_i^3$	$K=x_i^2$	$L=x_i^3$	$M=x_i^4$	$N=x_i^5$	$P=x_i^6$
0,1	199,759	19,97593	1,9975933	0,1997593	0,01	0,001	0,0001	0,00001	0,000001
0,2	399,491	79,89826	15,979653	3,1959307	0,04	0,008	0,0016	0,00032	0,000064
0,3	599,227	179,76820	53,930460	16,179138	0,09	0,027	0,0081	0,00243	0,000729
0,4	798,970	319,58787	127,83515	51,134059	0,16	0,064	0,0256	0,01024	0,004096
0,5	998,725	499,36267	249,68133	124,840667	0,25	0,125	0,0625	0,03125	0,015625
0,6	1198,494	719,09620	431,45772	258,874632	0,36	0,216	0,1296	0,07776	0,046656
0,7	1398,283	978,79787	685,15851	479,610955	0,49	0,343	0,2401	0,16807	0,117649
0,8	1598,072	1278,4579	1022,7663	818,213035	0,64	0,512	0,4096	0,32768	0,262144
0,9	1797,875	1618,0875	1456,2788	1310,65088	0,81	0,729	0,6561	0,59049	0,531441
1	1997,697	1997,6897	1997,9897	1997,68967	1,00	1,000	1,0000	1,00000	1,000000
$\Sigma$		7690,72203	6042,7751	5060,58872	3,85	3,025	2,5333	2,20825	1,978405

Plecând de la rezultatele experimentale, din ecuațiile (6.51) până la (6.54), se obține:

$$D_k = 0,005067979488$$

$$D_{a1} = 10,122940738710$$

$$D_{a2} = - 0,000605386425$$

$$D_{a3} = 0,001946458272$$

Se obțin coeficienții normați:

$$a_1 = 1997,43127664$$

$$a_2 = -0,11945321$$

$$a_3 = 0,38406988$$

Se obține caracteristica de transfer a traductorului de forță:

$$Y = 1997,43127664 F' - 0,11945321 F'^2 + 0,38406988 F'^3$$

Sau, trecând de la forța normalizată la forța aplicată (cu  $F_N = 500$  kN și  $F' = F/F_N$ ):

$$Y = 3,99486255 F - 0,00000047781285 F^2 + 0,00000000307256 F^3$$

Această caracteristică analitică trebuie comparată cu caracteristica determinată la PTB, pentru aceleași valori ale mărimii de intrare. Această ecuație este (din certificatul de etalonare al PTB):

$$Y' = 3,99486255 F - 0,00000047781675 F^2 + 0,00000000307256 F^3$$

Eroarea relativă de aproximare a caracteristicii de transfer  $[(Y-Y')/Y']$  este mai mică decât  $1 \times 10^{-10}$ , deci este neglijabilă.

Rezultă, din acest experiment, că procedura de aproximare a caracteristicii analitice de transfer a dinamometrelor poate fi validată, fiind compatibilă cu metodele de aproximare practicate de laboratoare recunoscute internațional.

Abaterile valorilor individuale de la caracteristica analitică de transfer constituie eroarea de interpolare, valoarea acesteia fiind o componentă a erorii compuse.

În unele cazuri, standardele în conformitate cu care se efectuează etalonarea dinamometrelor (de exemplu, ISO 376) prevăd anumite limite acceptabile pentru eroarea de interpolare, în funcție de clasa de exactitate a dinamometrelor respective. În același timp, este de dorit ca gradul polinomului care aproximează caracteristica dinamometrului să fie cât mai mic, astfel încât operarea cu funcția de aproximare să fie cât mai ușoară. Destul de frecvent, nici chiar polinoamele de gradul trei nu aproximează suficient de exact caracteristica dinamometrului, erorile de interpolare depășind valorile admise. S-a arătat că, pentru dinamometrele etalon de lucru uzuale, creșterea gradului polinomului de aproximare a caracteristicii de transfer la o valoare mai mare decât trei nu este de dorit. Pentru etaloanele de lucru a căror caracteristică de transfer nu poate fi exprimată printr-un polinom de cel mult gradul trei se vor putea utiliza doar rezultatele punctuale obținute în procesul de etalonare, orice interpolare fiind neavenită. Desigur, această restricție afectează domeniul de utilizare a dinamometrelor respective.

Având în vedere cele de mai sus, se poate stabili următoarea succesiune iterativă de operații, în vederea determinării caracteristicii analitice de transfer a unui dinamometru:

- se efectuează etalonarea dinamometrului în cel puțin 10 puncte, cât se poate de uniform distribuite în întreg domeniul de funcționare;
- se consideră aproximarea caracteristicii de transfer printr-un polinom de gradul 1. Se calculează coeficienții polinomului;

- se calculează eroarea de interpolare și se compară cu eroarea maximă admisă pentru clasa de exactitate a dinamometrului, conform normativului aplicabil (de exemplu standardul ISO 376);
- dacă eroarea de interpolare depășește limitele maxime admise, se crește cu un increment gradul polinomului (dar nu mai mult de două ori);
- dacă eroarea de interpolare se încadrează în limitele admise, se atribuie caracteristica de transfer reprezentată printr-un polinom având gradul și coeficienții stabiliți;
- dacă eroarea de interpolare nu se încadrează în limitele admise, nici pentru o aproximare printr-un polinom de gradul 3, atunci se poate admite utilizarea dinamometrului ca etalon pentru măsurări doar în punctele determinate la etalonare (se aplică o restricție de utilizare).

Eroarea relativă de interpolare se calculează cu ecuația:

$$f_c = \frac{\overline{X}_r - X_a}{X_a} \times 100 \quad (6.55)$$

unde:

- $\overline{X}_r$ : valoarea experimentală a mărimii de ieșire a traductorului, calculată ca medie a valorilor de etalonare pentru o mărime de intrare dată, în condiții de repetabilitate
- $X_a$ : valoarea mărimii de ieșire a traductorului pentru mărimea de intrare considerată, aproximată pe baza caracteristicii de transfer, determinată conform procedurii specificate anterior

#### Eroarea relativă de zero, $f_0$

În procesul de etalonare, indicația dinamometrului în absența forței trebuie adusă la zero înainte de aplicarea treptelor de forță și înregistrată după fiecare serie de încărcări. Citirea indicației de zero trebuie să fie efectuată la aproximativ 30 s după ce forța a fost înlăturată.

Eroarea relativă de zero  $f_0$  se calculează cu ecuația:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad (6.56)$$

unde:

- $i_f$ : valoarea indicației dinamometrului după înlăturarea forței aplicate la intrare
- $i_0$ : valoarea indicației dinamometrului înainte de aplicarea treptelor de forță (adusă la zero înainte de aplicarea treptelor de forță, deci, în mod normal  $i_0 = 0$ )
- $X_N$ : valoarea forței maxime aplicată dinamometrului în cursul unei serii de încercări pentru determinarea erorii de zero (valoarea maximă a mărimii de intrare)

#### Eroarea relativă de reversibilitate, $\nu$

Eroarea relativă de reversibilitate se determină în procesul de etalonare aplicând dinamometrului serii de forțe crescătoare și descrescătoare.



Valorile obținute în urma aplicării seriilor de etalonări se utilizează pentru calcularea erorii relative de reversibilitate, utilizând ecuațiile:

$$v_1 = \left| \frac{X_4 - X_3}{X_3} \right| \times 100 \quad (6.57)$$

$$v_2 = \left| \frac{X_6 - X_5}{X_5} \right| \times 100 \quad (6.58)$$

Eroarea relativă de reversibilitate se calculează ca medie aritmetică a valorilor  $v_1$  și  $v_2$ :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (6.59)$$

Desigur, printr-un proces de etalonare, pot fi determinate, cu o anumită exactitate, mărimile factorilor de influență prezentați anterior. Totuși, utilizarea acestor valori pentru caracterizarea dinamometrelor etalon de lucru nu este practică. Este de preferat ca valorile erorilor determinate să fie preluate ca factori ai incertitudinii de măsurare, atribuindu-se estimațiilor acestora valoarea zero. Incertitudinea standard relativă asociată procesului de etalonare a unui dinamometru etalon se poate exprima, pe baza rezultatelor experimentale obținute în cadrul procesului de etalonare, prin ecuația :

$$w = \sqrt{w_{ira}^2 + w_{bmc}^2} \quad (6.60)$$

unde :

$w_{ira}$  : incertitudinea standard relativă datorată traductorului de forță etalonat

$w_{bmc}$  : incertitudinea standard relativă datorată etalonului de referință

Incetitudinea standard relativă  $w_{ira}$  se calculează astfel:

$$w_{ira} = \sqrt{w_{rot}^2 + w_{rep}^2 + w_{imp}^2 + w_{zer}^2 + w_{rev}^2 + w_{res}^2} \quad (6.61)$$

unde :

$w_{rot}$  : incertitudinea asociată erorii relative de reproductibilitate,  $b$

$w_{rep}$  : incertitudinea asociată erorii relative de repetabilitate,  $b'$

$w_{imp}$  : incertitudinea asociată erorii relative de interpolare,  $f_c$

$w_{zer}$  : incertitudinea asociată erorii relative de zero,  $f_0$

$w_{rev}$  : incertitudinea asociată erorii relative de reversibilitate,  $v$

$w_{res}$  : incertitudinea asociată rezoluției (valoare relativă)

În tabelul 6.10 sunt redate distribuțiile de probabilitate și varianțele relative estimate pentru mărimile de influență precizate în ecuația (6.61).

**Tabelul 6.10:** Mărimi de intrare și distribuții de probabilitate

Mărimi de intrare	Distribuția de probabilitate	Varianța relativă estimată
Eroare relativă de reproductibilitate	tip U	$w_{rol}^2 = b^2 / 2$
Eroare relativă de repetabilitate	rectangulară	$w_{rep}^2 = b'^2 / 3$
Eroare relativă de interpolare	triunghiulară	$w_{inp}^2 = f_c^2 / 6$
Eroare relativă de zero	rectangulară	$w_{zer}^2 = f_0^2 / 3$
Eroare relativă de reversibilitate	rectangulară	$w_{rev}^2 = v^2 / 3$
Eroare relativă de rezoluție	rectangulară	$w_{res}^2 = r^2 / 3$

Incertitudinea standard a etalonului de referință  $w_{bmc}$  se evaluează pornind de la datele exprimate în certificatul de etalonare, prin împărțirea incertitudinii extinse declarate  $W_{bmc}$  la factorul de extindere  $k$ .

În tabelul 6.11 sunt redate valorile maxime și minime ale incertitudinii extinse relative asociate măsurărilor efectuate cu dinamometrele etalon de lucru, în funcție de clasele de exactitate exprimate conform standardului ISO 376.

**Tabelul 6.11:** Incertitudinea dinamometrelor etalon de lucru

Clasa de exactitate ISO 376	Incertitudine minimă	Incertitudine maximă
00	$W_{bmc}$	0,06 %
0,5	0,06 %	0,12 %
1	0,12 %	0,24 %
2	0,24 %	0,45 %

După evaluarea incertitudinii relative extinse asociată rezultatelor de etalonare ale dinamometrelor etalon de lucru, valoarea determinată trebuie să se încadreze în limitele din tabelul 6.11, corespunzătoare clasei de exactitate a dinamometrului etalonat. În cazul în care incertitudinea extinsă relativă determinată este mai mică decât valoarea minimă din tabelul 6.11 corespunzătoare clasei de exactitate a dinamometrului etalonat, se atribuie ca incertitudine valoarea minimă din tabelul 6.11.

O altă restricție, evidentă, este că incertitudinea extinsă relativă asociată etalonării dinamometrelor etalon de lucru nu poate fi mai mică decât valoarea rezoluției relative. În cazul în care, din aplicarea ecuațiilor de calcul, valoarea incertitudinii extinse relative rezultantă este mai mică decât valoarea rezoluției relative, se consideră ca incertitudine de etalonare valoarea rezoluției relative.

În continuare, este prezentat un exemplu de calcul a incertitudinii asociate măsurărilor de etalonare a unui traductor de forță, etalon de lucru. Astfel, la etalonarea unui traductor de forță efectuată cu mașina etalon cu comparație de 1 MN, au fost obținute, în urma prelucrării rezultatelor, valorile maxime ale erorilor conform tabelului 6.12.

**Tabelul 6.12 :** Estimarea incertitudinii. Valori experimentale

Mărimi de intrare	Simbol	Valori maxime	Varianța relativă
Eroare relativă de reproductibilitate	$b$	0,05 %	$w_{rol}^2 = 3,1 \times 10^{-8}$
Eroare relativă de repetabilitate	$b'$	0,025 %	$w_{rep}^2 = 5,2 \times 10^{-9}$
Eroare relativă de interpolare	$f_c$	0,025 %	$w_{inp}^2 = 2,6 \times 10^{-9}$
Eroare relativă de zero	$f_0$	0,012 %	$w_{zer}^2 = 1,2 \times 10^{-9}$
Eroare relativă de reversibilitate	$v$	0,07 %	$w_{rev}^2 = 4,1 \times 10^{-8}$
Rezoluție relativă	$r$	0,025 %	$w_{res}^2 = 5,2 \times 10^{-9}$

Pe baza datelor prezentate în tabelul 6.12, se determină, conform ecuației (6.61) valoarea:  $w_{tra} = 0,029 \%$

Conform datelor inițiale privitoare la etalonare, incertitudinea relativă a etalonului de referință utilizat este:  $w_{bmc} = 0,005 \%$

Incertitudinea standard relativă maximă se determină conform ecuației (6.60), rezultând valoarea  $w = 0,03 \%$ , sau, pentru incertitudinea relativă extinsă, pentru factorul de extindere  $k = 2$ , corespunzător unui nivel de încredere de aproximativ 95%,  $W = 0,06\%$ . Această valoare se încadrează în limitele prevăzute în tabelul 6.11 pentru traductoare de clasa 00, în conformitate cu standardul ISO 376. În consecință, această incertitudine poate fi raportată ca incertitudine relativă extinsă asociată rezultatelor de etalonare a dinamometrului etalon de lucru.

### **6.3 Contribuții la optimizarea mijloacelor de măsurare de lucru**

Termenul de *mijloacele de măsurare de lucru* este un termen generic care desemnează un mijloc tehnic pentru obținerea, prelucrarea, transmiterea și stocarea unor informații de măsurare obținute din măsurări uzuale (altele decât cele utilizate pentru etalonări).

Mijloacele de măsurare de lucru a forței prezintă o mare diversitate. Pot fi identificate două mari categorii de mijloace de măsurare a forței având o mare răspândire a utilizării: sisteme de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale și dinamometre de uz general.

#### **6.3.1 Mașini de încercat materiale**

Dintre mijloacele de măsurare a forței utilizate în măsurări uzuale, sistemele de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale constituie un segment cu pondre importantă. Măsurarea și reglarea corespunzătoare a forței aplicate în diferite procese de încercare a materialelor în laboratoare de încercări finale ale produselor constituie un factor important în atingerea unui grad înalt de calitate.

În general, rezultatele de măsurare furnizate de sistemele de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale nu sunt concludente în absența specificării incertitudinii de măsurare. Evaluarea incertitudinii de măsurare are o importanță deosebită în aprecierea adecvării metodei de măsurare și a echipamentului utilizat pentru încercări.

Pentru a răspunde cerințelor naționale și internaționale privind recunoașterea rezultatelor de măsurare, utilizatorii mașinilor de încercat materiale trebuie să stabilească metode corespunzătoare pentru evaluarea incertitudinii măsurărilor efectuate, plecând de la influența factorilor perturbatori asupra rezultatului măsurării.

Rezultatul unei încercări de material nu se poate considera ca fiind fără eroare sau, altfel spus, neafectat de o incertitudine de măsurare. Din acest motiv, problema este de a identifica sursele posibile de erori și de a lua măsuri pentru a reduce sau, cel puțin, de a cuantifica incertitudinea asociată rezultatului măsurărilor efectuate cu mașinile de încercat materiale.

Pentru evaluarea incertitudinii de măsurare a mașinilor de încercat materiale trebuie luați în considerare factorii care afectează procesul de încercare.

În continuare, vor fi examinate contribuțiile principalilor factori de influență la incertitudinea de măsurare a mașinilor de încercat materiale.

Problema care trebuie rezolvată este de a minimiza influența anumitor surse de incertitudine, astfel încât mașina de încercat să corespundă cerințelor normativelor aplicabile.

În cadrul acestui proces este important să se ia în considerare influența incertitudinii de etalonare a sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale asupra rezultatelor de încercare obținute cu acestea. În plus, trebuie să fie luate în calcul contribuțiile la incertitudinea rezultatelor de măsurare datorate operatorului, materialului de încercat, metodei de încercare și a mașinii de încercat.

Depășirea limitelor incertitudinii acceptabile poate conduce la situații nedorite. Astfel, estimarea parametrilor de testare la valori mai mici decât cele prescrise poate afecta siguranța produselor, garanția acordată, rata căderilor premature. Aceste fenomene se pot produce atunci când mașinile de încercat materiale reproduc anumiți parametri de încercare la valori mai mici decât cei prescriși. Pe de altă parte, testarea materialelor la valori de încercare mai mari decât cele prescrise poate conduce la pierderi de material, timp și costuri suplimentare, inclusiv pierderea competitivității produselor. Aceste situații limită conduc la necesitatea de a examina și optimiza incertitudinea asociată valorilor de măsurare ale sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale.

Procedurile utilizate în mod curent pentru etalonarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale prevăd etalonarea în puncte fixe, în mod cvasistatic. În zona forțelor mici, etalonarea poate să se efectueze cu greutate etalon (încărcare directă). În acest caz dispozitivul de generare a forței al mașinii de încercat materiale nu trebuie să fie pornit sau să funcționeze atât timp cât se efectuează etalonarea. Modul de funcționare a mașinii în procesul de etalonare va putea furniza o comportare stabilă și repetabilă, dar nu va defini complet comportarea reală a mașinii. Problema este că foarte puține încercări de materiale sunt de natură pur statică. Cea mai mare parte a încercărilor la care se utilizează mașini de încercare moderne sunt de tip dinamic, cel puțin într-un anumit grad. Încercările care utilizează greutate pentru generarea forței constituie o excepție.

Mașinile moderne de încercat materiale sunt, în general, controlate din punctul de vedere al aplicării forței. Aceasta înseamnă că semnalul de la un traductor de forță al mașinii de încercat materiale furnizează un semnal de feed-back pentru sistemul de reglare automată al mașinii care aduce forța aplicată sau deplasarea la valorile prescrise. Performanțele sistemului de reglare automată sunt influențate de numeroși factori implicați în procesul de reglare. Acest proces se derulează în mod continuu pe timpul încercării, conform programului prestabilit. Schimbarea parametrilor fizici de încercare conduce la modificarea forței aplicate pe parcursul încercării, ceea ce produce un răspuns dinamic al sistemului automat.

Această comportare ar putea conduce la necesitatea de a evalua sistemele de măsurare a forței prin etalonări în regim dinamic. În orice caz, este necesară o investigație suplimentară a factorilor de influență specifici regimului dinamic asupra incertitudinii generale asociată rezultatelor de măsurare la utilizarea unei mașini de încercat materiale.

Una din greșelile frecvente care se fac de către utilizatorii mașinilor de încercat materiale este de a considera că producătorii acestora pot defini incertitudinea de măsurare. Acest lucru, de fapt, nu este posibil deoarece producătorii mașinilor iau în considerare la proiectarea sistemelor și software-ului încercări în condiții specifice care, adesea, în condițiile de lucru nu pot fi reproduse.

Specificațiile tehnice ale mașinilor de încercat materiale fac referire la condiții de operare optime. Aceste condiții nu pot fi, de fapt, reproduse în practică. Sursele incertitudinii de măsurare trebuie evaluate, deci, pornind de la condițiile experimentale, pentru fiecare tip de material, configurație a sistemului și metodă sau procedură de încercare. Din acest motiv, pentru determinarea performanțelor mașinilor de încercat materiale în vederea evaluării incertitudinii de măsurare trebuie evaluați toți parametrii semnificativi, cum sunt: deplasări liniare, forțe de torsiune, deplasări unghiulare, presiuni, încovoieri etc. De asemenea, trebuie să se efectueze o evaluare a incertitudinii în funcție de parametrii metrologici semnificativi care intervin pe parcursul măsurării la utilizarea unei mașini de încercat materiale. Sursele majore de incertitudine ale rezultatelor de măsurare pot fi grupate în următoarele categorii:

- incertitudinea asociată etaloanelor utilizate pentru etalonarea sistemului de măsurare a forțelor, sau incertitudinea valorii de referință;
- incertitudinea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale;
- incertitudinea sistemului de măsurare a forței a mașinilor de încercat aflate în uz;
- incertitudinea asociată procesului de încercare.

Valorile incertitudinii și contribuțiile statistice ale acestora pot fi diferite în funcție de metodele de încercare utilizate.

În continuare, vor fi analizate principalele surse de incertitudine asociate rezultatelor de măsurare ale mașinilor de încercat materiale.

#### Incetitudinea valorii de referință, $w_{ref}$

Sistemele de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale se etalonează, de regulă, cu ajutorul traductoarelor etalon de forță, etaloane de lucru. Unele aspecte legate de optimizarea etaloanelor de lucru au fost tratate la capitolul 6.2.2. Totuși, pentru cazul particular al sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale se fac precizări suplimentare. Astfel:

- etalonarea traductoarelor etalon este un proces care se desfășoară anterior operației de etalonare a sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale. Se pot alege traductoare de forță care au fost etalonate cu mașini etalon prezentând un bun control al incertitudinii de etalonare, respectiv o capacitate de măsurare și etalonare corespunzătoare unor etaloane primare sau secundare, de referință stabile și certificate. Influența acestui factor al incertitudinii compuse este greu de controlat de către utilizator. În general, este de dorit să se utilizeze pentru etalonarea sistemelor de măsurare a forței numai traductoare etalon de forță etalonate în laboratoare recunoscute;
- incertitudinea asociată etaloanelor de forță utilizate pentru etalonarea sistemelor de măsurare a forței este un factor important care contribuie la incertitudinea compusă asociată etalonării. Acest factor poate fi minimizat prin utilizarea unor traductoare având o clasă superioară de exactitate (exprimată, de exemplu, conform standardului ISO 376). Cu toate acestea, utilizarea unor etaloane de forță având o exactitate foarte mare la etalonarea unor sisteme de măsurare a forței de exactitate medie sau inferioară conduce la costuri ridicate, uneori nejustificate. Pentru evitarea acestor neajunsuri se pot aplica precizările standardului ISO 7500-1 în ceea ce privește corespondența optimă dintre clasele de exactitate ale sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale și cele ale traductoarelor de forță utilizate la etalonarea acestora. Această corespondență este prezentată în tabelul 6.13.



**Tabelul 6.13:** Corespondența dintre clasele de exactitate ISO 7500-1 și ISO 376

Clasa de exactitate a sistemelor de indicare a forței conform ISO 7500-1	Clasa de exactitate a traductoarelor etalon conform ISO 376
0,5	00 ; 0,5
1	1
2	2
3	2

- Influența factorilor de mediu asupra incertitudinii de etalonare poate fi redusă prin monitorizarea și controlul acestora. În orice caz, monitorizarea factorilor de mediu este obligatorie, în vederea estimării corecte a influenței acestora asupra rezultatului etalonării.
- Variația în timp a performanțelor metrologice ale traductoarelor etalon (*deriva*) este o caracteristică importantă care trebuie luată în considerare în cadrul procesului de etalonare. *Deriva* poate fi estimată pe baza informațiilor obținute pe parcursul etalonărilor succesive ale etaloanelor de forță sau pornind de la informațiile furnizate de producător. Stabilitatea în timp a indicațiilor etaloanelor utilizate poate fi îmbunătățită prin utilizarea unor traductoare de forță având calități tehnice și metrologice superioare. Este necesară o analiză a performanțelor etaloanelor utilizate, atât la achiziționarea acestora cât și pe parcursul utilizării.
- Influența repetabilității procesului a fost tratată anterior. Minimizarea influenței asupra incertitudinii asociate procesului de etalonare cuprinde o serie de activități legate de instruirea operatorilor, respectarea procedurilor de etalonare etc.

În consecință, pentru evaluarea incertitudinii valorii de referință se vor lua în considerare următoarele mărimi de influență:

a) *Incertitudinea standard relativă a traductorului de forță de referință,  $w_{tra-cal}$*

Incertitudinea standard relativă a traductorului de forță de referință rezultă din informațiile din certificatul de etalonare al acestuia, respectiv din incertitudinea extinsă  $W_{tra-cal}$  și factorul de extindere  $k$ , astfel:

$$w_{tra-cal} = W_{tra-cal}/k \quad (6.62)$$

b) *Incertitudinea standard relativă datorată fluctuației de temperatură,  $w_{tra-imp}$*

Temperatura mediului ambiant este un factor de influență important care trebuie avut în vedere la evaluarea incertitudinii sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale, atât la etalonarea acestora cât și la utilizare. Standardele în conformitate cu care se efectuează etalonări sau încercări prevăd, în general, limitele temperaturii ambientale. De exemplu, standardul ISO 376 prevede ca temperatura pe parcursul etalonării unui dinamometru etalon să fie în domeniul  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , iar aceasta să nu varieze cu mai mult de  $\pm 1 ^\circ\text{C}$ . Dinamometrele utilizate la etalonarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale se etalonează în laboratoare de metrologie în care, de regulă, este asigurat controlul temperaturii.

Utilizarea dinamometrelor etalon la etalonarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale se face, de cele mai multe ori, în condiții ambientale industriale.



De exemplu, standardul ISO 7500-1 prevede ca etalonarea sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale să se desfășoare la o temperatură care să fie cuprinsă în domeniul de la 10 °C la 35 °C iar temperatura pe parcursul etalonării să nu varieze cu mai mult de  $\pm 2$  °C.

Pentru minimizarea influențelor date de diferențele de temperatură este necesar ca înaintea efectuării etalonării să se păstreze dinamometrul etalon în locul unde este amplasată mașina de încercat materiale un timp suficient de îndelungat pentru ca acesta să ajungă la o temperatură stabilă, cât mai apropiată de temperatura mașinii de încercat. Stabilitatea temperaturii se poate urmări cu ajutorul termometrelor de contact sau, pentru traductoare etalon de forță electrice, urmărind variația în timp a indicației punctului de zero.

Multe traductoare electrice de forță utilizate ca etaloane de lucru au dispozitive de compensare a temperaturii, deci și a diferenței dintre temperatura la care traductorul a fost etalonat și temperatura de utilizare. Pentru cazul în care dinamometrele etalon nu au asemenea dispozitive, standardele în conformitate cu care se execută etalonarea acestora (de exemplu, standardul ISO 376) prevăd metode de calcul pentru corectarea indicațiilor în funcție de diferența dintre temperatura de utilizare și temperatura de referință. Desigur, aceste corecții introduc, la rândul lor, incertitudini în măsurarea forței, care trebuie evaluate ca factori contributivi la incertitudinea compusă.

În concluzie, la etalonarea sistemelor de măsurare a forței, dacă este posibil și necesar, se efectuează o corecție a rezultatelor de etalonare în funcție de diferența dintre temperatura la care are loc etalonarea și temperatura de referință menționată în certificatul de etalonare al traductorului etalon. După efectuarea corecției, se va lua în considerare la calculul incertitudinii doar variația de temperatură pe timpul efectuării etalonării sistemului de indicare a forței a mașinii de încercat materiale,  $\Delta t_{cal}$ .

Incetitudinea standard relativă, bazată pe o distribuție de probabilitate rectangulară va fi:

$$w_{tra-imp} = \alpha |\Delta t_{cal}| / 2\sqrt{3} \quad (6.63)$$

unde  $\alpha$  este coeficientul de temperatură al traductorului etalon, exprimat în %/°C.

*c) Incertitudinea standard relativă datorată instabilității pe termen lung a traductorului etalon,  $w_{tra-stb}$*

Incetitudinea standard datorată instabilității pe termen lung a traductorului etalon poate fi evaluată ca o incertitudine de tip A sau de tip B.

O evaluare de tip A poate fi aplicată atunci când au fost efectuate mai multe etalonări periodice ale traductorului etalon (de exemplu,  $n > 3$ ). În acest caz, abaterea standard experimentală a mediei va fi:

$$w_{tra-stb} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right)^2} \quad (6.64)$$

unde:

$\bar{x}$ : media a  $x_i$  valori obținute în  $n$  etalonări periodice diferite

Dacă traductorul etalon a fost etalonat de mai puțin de trei ori, atunci se va efectua o evaluare de tip B a incertitudinii, luându-se în considerare valoarea stabilității furnizată de producător prin specificația tehnică a traductorului de forță (valoare relativă) sau o valoare tipică (de exemplu,  $1 \times 10^{-4}$ ).

Incertitudinea standard compusă relativă a valorii de referință este:

$$w_{ref} = \sqrt{w_{tra-cal}^2 + w_{tra-imp}^2 + w_{tra-sib}^2} \quad (6.65)$$

Incertitudinea standard relativă a sistemului de măsurare a forței,  $w_{fms}$

Pentru estimarea incertitudinii standard relative a sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale se vor lua în considerare următoarele mărimi de influență:

a) Incertitudinea standard relativă de repetabilitate/reproductibilitate,  $w_{rep}$

Incertitudinea standard relativă de repetabilitate/ reproductibilitate a sistemului de măsurare a forței este evaluată în cadrul procesului de etalonare ca o incertitudine de tip A astfel:

$$w_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n_s(n_s - 1)} \sum_{i=1}^{n_s} \left( \frac{x_{s,i} - \bar{x}_s}{\bar{x}_s} \right)^2} \quad (6.66)$$

unde:

$\bar{x}_s$ : media valorilor  $x_{s,i}$  obținute în  $n_s$  măsurări efectuate pentru etalonarea sistemului de măsurare a forței

Această evaluare poate să nu cuprindă, totuși, integral reproductibilitatea procesului de etalonare. Pentru a evalua corect acest factor de influență trebuie făcute unele precizări suplimentare.

Reproductibilitatea procesului de etalonare este un factor important care influențează exactitatea măsurării și incertitudinea asociată valorilor obținute la etalonarea sistemelor de indicare a forței. Reproductibilitatea procesului poate fi evaluată experimental prin repetarea etalonării de către un număr de tehnicieni care utilizează același echipament de etalonare, în aproximativ aceleași condiții, utilizând aceleași proceduri de etalonare. Acest lucru poate fi efectuat în două moduri:

- se utilizează echipamentul de etalonare pentru etalonarea unui artefact, care simulează sistemul de indicare a forței, sau
- se procedează la etalonarea repetată a aceluiași sistem de indicare a forței al unei mașini de încercat materiale. În acest din urmă caz, unele componente ale incertitudinii de etalonare se vor datora comportării neideale a mașinii de încercat materiale. Contribuția la incertitudinea generală a acestei comportări neideale este dificil de evaluat. Utilizarea sistemelor de reglare automată a forței aplicate poate reduce incertitudinea datorată comportării mașinii de încercat materiale.

Contribuția alinierii traductoarelor etalon în procesul de etalonare asupra incertitudinii compuse poate, în general, să fie neglijată. Acest lucru se întâmplă atunci când personalul care efectuează etalonarea este instruit corespunzător pentru asigurarea alinierii corecte a etaloanelor utilizate.

Cea mai mare parte a sistemelor de indicare a forței vor prezenta rezultate de etalonare în afara limitelor admise în cazul în care alinierea a fost astfel efectuată necorespunzător. Pentru reducerea efectului alinierii asupra incertitudinii, traductorul etalon trebuie rotit după efectuarea fiecărei serii de măsurări efectuate pentru etalonarea sistemului de indicare a forței. Incertitudinea datorată alinierii necorespunzătoare cauzată de lipsa de experiență a personalului va fi inclusă în incertitudinea compusă a sistemelor de indicare a forței. De asemenea, pentru minimizarea influenței pieselor de aplicare a forței asupra incertitudinii compuse este necesar ca etalonarea traductoarelor etalon să se efectueze utilizând aceleași piese de aplicare a forței (compresiune sau tracțiune, după caz) care sunt utilizate pentru etalonarea sistemelor de indicare a forței.

Există situații în care traductoarele de forță sau sistemele mecanice ale mașinilor de încercat materiale se deplasează atunci când se modifică modul de aplicare a forței din tracțiune în compresiune (sau invers) sau când se efectuează probele de reversibilitate. Neliniaritățile cauzate de deplasarea necontrolată a părților mecanice de fixare a traductoarelor etalon de forță la etalonarea sistemelor de indicare a forței afectează exactitatea acestora, putând conduce la declasare sau neîncadrare în limitele admise ale erorilor. Din acest motiv este necesar ca, înainte de efectuarea etalonării, să se inspecteze sistemul mecanic de aplicare a forței ale mașinilor de încercat materiale, pentru a constata funcționarea corectă a acestuia.

*b) Incertitudinea standard relativă datorată rezoluției,  $w_{res}$*

Incertitudinea standard datorată rezoluției limitate a indicatorului sistemului de măsurare a forței se evaluează presupunând o distribuție rectangulară, având lățimea intervalului  $a_{res}$ . Rezoluția relativă se determină astfel:

- pentru scări digitale, valoarea unui increment al digitului cel mai puțin semnificativ al indicatorului, împărțit la forța luată în considerare;
- pentru scări analogice, raportul dintre lățimea indicatorului și distanța dintre două repere adiacente, împărțit la forța luată în considerare.

Incertitudinea standard relativă datorată rezoluției indicatorului sistemului de măsurare a forței se determină astfel :

$$w_{res} = \frac{a_{res}}{2\sqrt{3}} \quad (6.67)$$

*c) Incertitudinea standard relativă datorată derivei punctului de zero,  $w_{zer}$*

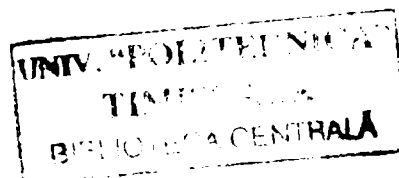
Incertitudinea standard datorată derivei punctului de zero a sistemului de indicare a forței se evaluează presupunând o distribuție rectangulară, având lățimea intervalului  $f_0$ , calculat astfel :

$$f_0 = \max |f_{0,i}| \quad (6.68)$$

unde :

$f_{0,i}$ : abaterile de la valoarea zero ale indicațiilor sistemului de măsurare în absența forței, determinate în  $i$  cicluri de etalonare, împărțite la limita maximă a domeniului de forță al sistemului de indicare a forței de etalonat (deviația relativă a punctului de zero)

Incertitudinea standard relativă datorată derivei punctului de zero se calculează astfel :



$$w_{zer} = \frac{f_0}{2\sqrt{3}} \quad (6.69)$$

d) *Incertitudinea standard relativă datorată hysterezisului (reversibilității),  $w_{hys}$*

Influența hysterezisului asupra incertitudinii de etalonare se va lua în considerare numai la etalonarea sistemelor de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale care sunt utilizate atât pentru forțe crescătoare cât și pentru forțe descrescătoare (tracțiune și compresiune). Pentru sistemele de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale care se utilizează într-un singur sens de solicitare (numai forțe crescătoare sau numai forțe descrescătoare), influenței mărimii perturbatoare asociată hysterezisului i se atribuie valoarea:  $w_{hys} = 0$ .

Incertitudinea standard relativă datorată hysterezisului se evaluează presupunând o distribuție rectangulară, având lărgimea intervalului  $v_0$ , calculat astfel:

$$v_0 = \max |v_{0,i}| \quad (6.70)$$

unde:

$v_{0,i}$ : diferențele dintre valorile crescătoare ale forței și cele descrescătoare, obținute în  $i$  cicluri de etalonare, împărțite la forța luată în considerare

Incertitudinea standard relativă datorată hysterezisului se calculează astfel:

$$w_{hys} = \frac{v_0}{2\sqrt{3}} \quad (6.71)$$

În final, incertitudinea standard compusă relativă datorată sistemului de indicare a forței este:

$$w_{fms} = \sqrt{w_{rep}^2 + w_{res}^2 + w_{zer}^2 + w_{hys}^2} \quad (6.72)$$

Incertitudinea asociată procesului de etalonare a sistemului de indicare a forței al mașinilor de încercat materiale,  $w_{cal}$  se calculează din incertitudinea standard compusă relativă a valorii de referință  $w_{ref}$ , calculată conform ecuației (6.65) și incertitudinea standard compusă relativă datorată sistemului de indicare a forței  $w_{fms}$ , calculată conform ecuației (6.72), astfel:

$$w_{cal} = \sqrt{w_{ref}^2 + w_{fms}^2} \quad (6.73)$$

Incertitudinea extinsă relativă asociată rezultatelor de etalonare se calculează astfel:

$$W_{cal} = k w_{cal} \quad (6.74)$$

unde:

$k$ : factorul de extindere, determinat pentru un nivel de încredere de aproximativ 95%

Incertitudinea de măsurare datorată procesului de încercare este un factor contributiv la incertitudinea compusă cu pondere mult mai mare decât celelalte surse de incertitudine. În general, sursele de incertitudine contributive sunt considerate necorelate semnificativ și varianța compusă este calculată ca sumă a varianțelor componente. O mașină de încercat materiale utilizată pentru o încercare particulară va contribui prin erorile de măsurare constatate în uz la incertitudinea estimată pe baza rezultatelor statice obținute în cursul procesului de etalonare a sistemului de indicare a forței.

În continuare, sunt analizate unele componente ale incertitudinii asociate măsurărilor efectuate cu mașini de încercat materiale. Unele din componentele incertitudinii nu pot fi în mod teoretic evaluate, ele putând fi estimate în cazuri particulare, dacă sunt constatate influențele acestora asupra măsurării.

Pentru estimarea incertitudinii standard relative a măsurărilor efectuate utilizând sisteme de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale aflate în uz se vor lua în considerare următoarele mărimi de influență:

a) *Incertitudinea standard relativă asociată rezultatelor de etalonare a sistemului de măsurare a forței,  $w_{cal}$*

Incertitudinea standard relativă asociată rezultatelor de etalonare a sistemului de măsurare a forței este preluată din certificatul de etalonare respectiv, prin împărțirea incertitudinii extinse relative  $W_{cal}$  la factorul de extindere declarat  $k$ , astfel:

$$w_{cal} = k W_{cal} \quad (6.75)$$

b) *Incertitudinea standard relativă asociată erorii de justețe (exactitate),  $w_{dev-use}$*

Eroarea relativă tolerată de justețe,  $q$  este una din caracteristicile metrologice ale sistemelor de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale. Demonstrarea încadrării indicațiilor sistemelor de măsurare a forței în limitele erorilor tolerate prescrise face obiectul unor încercări specifice. Deoarece la nivelul încercărilor uzuale nu este oportun să se efectueze corecții ale rezultatelor de măsurare după valorile specificate în certificatele de etalonare, eroarea relativă de justețe poate fi considerată ca o componentă a incertitudinii compuse relative de măsurare a forței. Astfel:

$$w_{dev-use} = |q| \quad (6.76)$$

c) *Incertitudinea standard relativă asociată variației temperaturii,  $w_{tmp-use}$*

Influența temperaturii mediului ambiant trebuie avută în vedere la evaluarea incertitudinii rezultatelor de măsurare realizate cu mașinile de încercat materiale.

Temperatura măsurată pe parcursul încercării poate fi sensibil diferită de cea la care a avut loc etalonarea sistemului de măsurare a forței al mașinii de încercat materiale. În acest caz este necesar să se efectueze o evaluare a efectului diferenței dintre temperatura de utilizare a mașinii și temperatura de referință (la care a avut loc etalonarea). Atunci când este necesar și posibil, rezultatele încercării trebuie să fie corectate în funcție de diferența de temperatură. Variația temperaturii pe parcursul efectuării încercărilor poate afecta, de asemenea, indicația sistemului de măsurare a forței.



Pentru evaluarea incertitudinii relative asociată variației temperaturii este necesar să se cunoască gradientul de modificare a temperaturii pe parcursul desfășurării încercărilor, precum și influența acestuia asupra indicației sistemului de măsurare a forței. Pentru sistemele de măsurare a forței care utilizează un traductor de forță obișnuit, pe baza analizei specificațiilor diferiților producători, efectul temperaturii poate fi considerat astfel:

- influența asupra caracteristicii de transfer: maximum  $\pm 0,0015 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ ;
- influența asupra variației punctului de zero: maximum  $\pm 0,002 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ .

În cazul în care temperatura traductorului utilizat la măsurarea forței aplicate rămâne relativ constantă pe parcursul încercării, incertitudinea standard este dată de eroarea datorată diferenței de temperatură dintre momentul etalonării și cel al utilizării sistemului de măsurare a forței.

Deoarece sistemul de măsurare a forței al mașinii de încercat (bazat pe traductoare electrice de forță) este, în mod normal, adus la zero înainte de începerea încercării, modificarea temperaturii pe parcursul încercării va conduce doar la erori suplimentare de indicare datorate modificării cu temperatura a caracteristicii de transfer a traductorului. Poate fi considerată ca fiind acceptabilă o variație a temperaturii pe parcursul desfășurării încercării de cel mult  $\pm 5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ .

*d) Alți factori contributivi la incertitudinea  $w_{\text{sys-use}}$*

*Deriva* în utilizare, reprezintă variația indicațiilor sistemului de măsurare a forței pe parcursul efectuării încercărilor. Acesta se poate datora instabilității sistemului, inclusiv efectului regimurilor tranzitorii ale sistemelor cu reglare automată. Stabilitatea sistemului poate fi afectată de numărul sistemelor servo-hidraulice de acționare, alimentate de la o singură sursă hidraulică. Este destul de ușor să se cunoască dacă o pompă nu poate să asigure suficient debit sau suficientă presiune pentru a produce treapta de forță necesară încercării. Este mai greu să se evalueze comportarea sistemului atunci când se desfășoară încercări de durată, porniri și opriri ale mașinilor alimentate din aceeași sursă hidraulică. Singurul mod de a cunoaște acest efect este de a proceda la analize experimentale. Incertitudinea datorată acestui efect nu este cuantificată ca și contribuție la incertitudinea globală deoarece depinde foarte mult de tipul mașinii de încercat precum și de tipul încercării. În mod ideal se consideră că fiecare mașină de încercat materiale este alimentată dintr-o singură sursă hidraulică sau, în cazul alimentării mai multor mașini din aceeași sursă, se consideră că o singură mașină funcționează pe parcursul unei încercări. În practică, această situație este mai rar întâlnită. În mod normal, influența alimentării hidraulice asupra incertitudinii de aplicare a forței trebuie evaluată și inclusă în incertitudinea globală. În funcție de acordarea sistemelor de reglare automată, se poate constata o variație corespunzătoare a forței aplicate pe timpul testării. *Deriva* poate fi datorată, de asemenea, modificării temperaturii pe parcursul încercării.

Modificarea caracteristicilor traductoarelor de forță cu care sunt dotate mașinile de încercat materiale pe durata efectuării încercărilor trebuie luată în calcul la estimarea derivatei sistemului de măsurare a forței aflat în utilizare. Componenta incertitudinii asociată derivatei se estimează ca având valoarea  $w_{\text{stb-use}}$ .

*Alinierea probei de încercat* trebuie să fie executată corect. Alinierea corespunzătoare poate fi critică pentru comportarea probei de încercat și pentru caracterizarea unei anumite proprietăți particulare a materialului.



Mașinile de încercat materiale și piesele de prindere și aplicare a forței sunt astfel produse încât să asigure o bună aliniere.

Menționăm că este dificil să se aprecieze o valoare a incertitudinii pentru această sursă contributivă deoarece fiecare încercare poate fi afectată de valori diferite ale erorilor datorate alinierii. Unii producători de mașini de încercat materiale pun la dispoziție dispozitive care pot asigura o aliniere corespunzătoare a probei și reducerea componentei incertitudinii datorate acestui factor. Componenta incertitudinii asociată alinierii probei de încercat se estimează ca având valoarea  $w_{ali-use}$ .

*Zgomotul* poate interveni ca zgomot electric și/sau zgomot mecanic. Într-un anumit quantum, zgomotul este întotdeauna prezent pe parcursul unei încercări de material. O evaluare a zgomotului efectuată asupra mașinilor moderne de încercat materiale dotate cu sisteme de reglare automată a forței aplicate, funcționând în domenii normale de operare, conduce la o valoare totală a influenței zgomotului mecanic și electric asupra incertitudinii de măsurare care poate fi estimată la 0,1% (incertitudine standard relativă).

*Rezoluția* dispozitivului de indicare a forței poate introduce o eroare semnificativă. Eroarea de rezoluție poate fi determinată de zgomot, de sistemul de achiziție a datelor (convertor analog-numeric), de viteza de încercare (întârzieri de răspuns ale sistemului). În cazul în care rezoluția este evaluată ca un factor de zgomot pe parcursul încercării, componenta incertitudinii datorată rezoluției determinată la analiza efectuată la etalonarea statică nu trebuie adăugată la evaluarea incertitudinii compuse.

*Întoarcerea caracteristicii* este prezentă în majoritatea cazurilor când se utilizează sisteme electro-mecanice de producere a forței pentru încercarea materialelor. Întoarcerea caracteristicii se concretizează prin scăderea în timp a forței aplicate atunci când o încercare se efectuează la o forță relativ constantă obținută prin creșterea forței sau prin creșterea în timp a forței atunci când încercarea se efectuează la un palier realizat prin descreșterea forței aplicate. Întoarcerea caracteristicii poate influența rezultatul încercării. Quantumul influenței întoarcerii caracteristicii poate fi evaluat pe parcursul desfășurării încercării. Influența întoarcerii caracteristicii poate fi minimizată printr-o acționare adecvată a dispozitivului de forță al mașinii. Sunt importante vitezele de apropiere de valoarea forței de realizat, reglarea automată a valorii forței de încercare, valoarea punctului de start față de valoarea forței de încercare. Această procedură este eficientă în cazul mașinilor unidireționale de încercat materiale. Pentru mașinile bidireționale sau pentru încercări ciclice componenta incertitudinii datorată întoarcerii caracteristicii trebuie evaluată și luată în calcul pentru stabilirea incertitudinii globale.

*Fluctuațiile de alimentare cu energie* pot, teoretic, să afecteze operațiile de încercare și corectitudinea rezultatelor încercării. Dacă sursa de alimentare cu energie îndeplinește condițiile specificate de producător nu este necesar să se includă în evaluarea incertitudinii compuse o componentă datorată acestui factor.

*Defectarea mașinii de încercat* poate să apară intempestiv. Inspecția periodică a mașinii este necesară pentru a se asigura de menținerea performanțelor de operare. O defecțiune a mașinii poate să conducă la o aliniere necorespunzătoare.

Întreținerea necorespunzătoare a mașinii de încercat poate să conducă la frecări, pierderi de lichid din sistemele hidraulice, pierderi de presiune pe parcursul ciclului de testare. Sistemele hidraulice reclamă o alimentare permanentă cu ulei curat pentru a funcționa corespunzător. Mașinile de încercat materiale care nu sunt corespunzător întreținute pot avea angrenaje sau curele de transmisie uzate. Acestea pot conduce la întoarcerea caracteristicii de forță, mărirea timpului de start, parametri de reglare inferiori celor necesari.

Evaluarea unei componente a incertitudinii compuse asociată rezultatelor de măsurare cu mașini de încercat materiale datorată defectelor mașinii este dificil de evaluat. Luând în considerare posibilitatea apariției unor surse de incertitudine datorate defectelor mașinii de încercat, se pot întreprinde acțiuni care să minimizeze influența acestora asupra rezultatelor încercării. Astfel de acțiuni pot fi:

- repetarea încercărilor utilizând alte mașini de încercat materiale, în condiții similare;
- comparări interlaboratoare privind rezultate de încercare.

În toate cazurile se vor utiliza etaloane de refrință adecvate care pot scoate în evidență orice componentă a incertitudinii care se datorează factorilor urmăriți. De asemenea, prin aceste proceduri se poate constata dacă incertitudinea datorată componentelor urmărite a fost minimizată și se află în limitele prevăzute.

*Eroarea datorată resetării condițiilor inițiale* poate să apară atunci când operatorul aduce, în mod arbitrar, indicația dispozitivului de indicare a forței la zero la startul încercărilor. Este necesară o atenție deosebită în manevrarea mașinii și o cunoaștere bună a condițiilor de încercare și a configurării sistemului de încercare, astfel încât să nu fie confundate offseturile sistemului (care pot fi resetate la începutul încercărilor) cu comportarea dinamică a sistemului de aplicare a forței la începutul încercării, care trebuie luată în calcul la evaluarea incertitudinii. Această sursă de incertitudine este specifică procesului de încercare și se poate situa într-un domeniu mare de valori. Modul de fixare a probei, preîncărcarea, întoarcerea caracteristicii pot avea un efect asupra acestei componente. În evaluarea incertitudinii compuse se poate estima contribuția acestui factor ca fiind egal cu valoarea experimentală determinată atunci când sistemul nu este adus la zero după ce s-a efectuat o testare ciclică de reversibilitate.

*Pregătirea probei de încercat* este foarte importantă pentru obținerea unor rezultate repetabile și de încredere la încercarea efectuată. Pregătirea probei de încercat este, de cele mai multe ori, stabilită prin standarde. În cazul probelor de dimensiuni relativ mici pot apare surse de eroare importante, generate de măsurările dimensionale. Multe din evaluările incertitudinii asociate măsurărilor efectuate pentru încercarea materialelor nu acoperă această componentă. Această sursă de eroare este, totuși, dificil de estimat.

*Erorile datorate citirilor indicatoarelor* sunt o sursă de incertitudine având o amplitudine mică, datorită controlului automat al mașinilor de încercat materiale, asistate de calculator. Cu toate acestea, există situații în care se încearcă determinări ale forței la limita minimă a domeniului de forțe, citirea forței aplicate fiind afectată de zgomot sau rezoluție. De asemenea, trebuie luate în considerare dispozitivele de indicare analogice. Incertitudinea asociată rezultatului de măsurare trebuie, în aceste cazuri, luată în considerare.

Ca valoare medie experimentală se poate estima o valoare a contribuției acestui factor asupra incertitudinii compuse de 0,5 %.

*Viteza de încercare.* Una din sursele de incertitudine asociate rezultatului de încercare este generată de incorecta utilizare a mașinii de încercat. Mașinile de încercat materiale sunt foarte scumpe și este de așteptat ca utilizatorii să dorească să efectueze cât mai multe încercări posibil în intervale de timp mici, precum și să utilizeze la maximum mașinile de încercat materiale pentru diferite tipuri de încercări. În același timp, nu sunt luate în considerare limitările datorate mașinii de încercat sau procedurilor aplicabile. În unele cazuri, sistemul de indicare a forței are o rezoluție, determinată static, suficientă pentru a realiza încercarea dar, din punct de vedere dinamic, sistemul nu poate achiziționa și prelucra datele suficient de rapid pentru a urmări procesul de încercare. Dacă este posibil din punct de vedere al procedurii utilizate, este necesar să se încetinească viteza de încercare, astfel încât achiziția datelor și prelucrarea acestora să poată fi efectuată cu respectarea protocolului de încercare prestabilit. Dacă viteza de încercare este critică, trebuie utilizate sisteme de achiziție de date de mare viteză, certificate prin etalonare, care permit efectuarea unui număr mare de măsurări pe secundă cu o rezoluție suficient de mare. În mod curent, pentru efectuarea unor încercări uzuale nu este necesar ca numărul de măsurări ale sistemului de achiziție de date să fie mai mare de 200 măsurări pe secundă. În orice caz, este necesar de a corela viteza necesară de încercare, conform specificației de produs, cu viteza de achiziție de date realizată de sistemul mașinii de încercat.

În tabelul 6.14 sunt redată contribuțiile la incertitudinea compusă a fiecărui factor considerat, pentru un caz experimental.

**Tabelul 6.14:** Incertitudinea unei mașini de încercat materiale aflată în uz

<b>Efectul sistemului de aplicare a forței</b>		
<b>Sursa</b>	<b>Incertitudine standard</b>	<b>Distribuție</b>
Etalonare	0,2 %	normală
Justețe	1 %	tip U
Derivă	0,04 %	rectangulară
Zgomot	0,1 %	rectangulară
Rezoluție	0,5 %	rectangulară
Stabilitate	N/A	
Întoarcerea caracteristicii	0,1 %	rectangulară
<b>Influența mediului ambiant</b>		
<b>Sursa</b>	<b>Incertitudine standard</b>	<b>Distribuție</b>
Temperatură	0,01 %	rectangulară
Fluctuații de energie	N/A	
<b>Alinierea probei</b>		
<b>Sursa</b>	<b>Incertitudine standard</b>	<b>Distribuție</b>
Mașina și piese de prindere	N/A	
Defectarea mașinii de încercat	N/A	
<b>Utilizare și erori de procedură</b>		
<b>Sursa</b>	<b>Incertitudine standard</b>	<b>Distribuție</b>
Eroarea datorată resetării	0,1 %	rectangulară
Pregătirea probei	N/A	
Eroare de citire	0,5 %	normală
Viteza de încercare	0,2 %	rectangulară

Incertitudinea factorilor de influență care nu au putut fi apreciați din rezultatele experimentale a fost notată în tabelul 6.14 cu N/A. Evaluarea acestor termeni este direct legată de extinderea procesului experimental.

Conform celor prezentate, incertitudinea măsurărilor efectuate cu mașini de încercat materiale aflate în uz poate fi exprimată astfel:

$$w_{sys-use} = \sqrt{w_{cal}^2 + w_{dev-use}^2 + w_{tmp-use}^2 + w_{stb-use}^2 + w_{ali-use}^2 + \dots} \quad (6.77)$$

Pe baza valorilor din tabelul 6.11 și a ecuației (6.77) se poate estima incertitudinea standard relativă a mașinii de încercat materiale aflată în uz:

$$w_{sys-use} = \sqrt{0,2^2 + 1^2 + 0,04^2 + 0,1^2 + 0,5^2 + 0,1^2 + 0,01^2 + 0,1^2 + 0,5^2 + 0,2^2} = 1,27 \%$$

### 6.3.2 Dinamometre

Sub denumirea generică de „dinamometre” sunt reunite mijloace de măsurare a forței, având diferite principii de funcționare, caracteristici tehnice și metrologice. O analiză exhaustivă a optimizării dinamometrelor, mijloace de măsurare de lucru, nu face obiectul prezentei teze de doctorat. Cu toate acestea, vor fi prezentate unele aspecte generale legate de adecvarea caracteristicilor metrologice ale dinamometrelor la procesul de măsurare, precum și influența factorilor perturbatori asupra exactității de măsurare.

În funcție de erorile maxime tolerate, dinamometrelor li se atribuie clase de exactitate. În condiții nominale de funcționare și în absența oricărei perturbații, eroarea de măsurare a dinamometrelor trebuie să nu depășească erorile maxime tolerate, pozitive sau negative, prevăzute în tabelul 6.15.

**Tabelul 6.15 :** Erori maxime tolerate ale dinamometrelor

Clasa de exactitate	Erori maxime tolerate %			
	Eroare de justețe <i>q</i>	Eroare de repetabilitate <i>b</i>	Eroare de zero <i>f<sub>0</sub></i>	Eroare de reversibilitate <i>u</i>
0,5	0,5	0,5	0,25	1,0
1	1,0	1,0	0,5	1,5
1,5	1,5	1,5	0,75	2,5
2	2,0	2,0	1,0	3,0
2,5	2,5	2,5	1,25	3,5
3	3,0	3,0	1,5	4,5

unde:

*q*: raportul între media aritmetică a diferențelor între indicațiile dinamometrului și valoarea convențional adevărată, obținute într-un număr adecvat de măsurări și limita superioară a domeniului nominal de măsurare

- $b$ : raportul între diferența între indicația maximă și indicația minimă a dinamometrului obținute la măsurarea repetată în aceleași condiții de măsurare și limita superioară a domeniului nominal de măsurare
- $u$ : raportul între diferența între mediile indicațiilor dinamometrului când aceeași forță este atinsă prin valori descrescătoare și crescătoare (cu excepția valorilor corespunzătoare limitei superioare și inferioare ale domeniului de măsurare), obținute într-un număr adecvat de măsurări și limita superioară a domeniului nominal de măsurare
- $f_0$ : raportul între indicația dinamometrului pentru valoarea zero a forței aplicate și limita superioară a domeniului nominal de măsurare

O caracteristică metrologică importantă a dinamometrelor este *pragul de discriminare*  $p$ , definit ca raport între cea mai mare modificare a forței care nu produce o modificare detectabilă a indicației dinamometrului, variația forței fiind lentă și monotonă, și limita superioară a domeniului nominal de măsurare.

Numărul de diviziuni al unui dinamometru este important în atribuirea unei valori a măsurandului cât mai apropiată de valoarea indicată.

În tabelul 6.16 sunt redate valorile minime admise pentru pragul de discriminare și numărul de diviziuni, în funcție de clasa de exactitate a dinamometrelor.

**Tabelul 6.16:** Pragul de discriminare și numărul de diviziuni pentru dinamometre

Clasa de exactitate	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Prag de discriminare	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5
Număr de diviziuni	200	150	100	100	50	50

Pentru evaluarea posibilităților de optimizare a dinamometrelor precum și a incertitudinii de măsurare a acestora se stabilește următorul model matematic de obținere a valorii mărimii de ieșire  $d$ , corespunzătoare indicației dinamometrului:

$$d = d_s + \delta d_s + \delta d_{drift} + \delta d_{rez} + \delta d_{rep} + \delta d_{zer} + \delta d_{hys} \quad (6.78)$$

unde:

$d_s$ : valoarea indicată de dinamometrul etalon în procesul de etalonare

$\delta d_s$ : incertitudinea atribuită etalonului utilizat

$\delta d_{drift}$ : deriva etalonului utilizat considerată de la data ultimei etalonari

$\delta d_{rez}$ : corecția pentru rezoluția dinamometrului

$\delta d_{rep}$ : corecția erorilor de repetabilitate ale dinamometrului

$\delta d_{zer}$ : corecția erorilor de zero ale dinamometrului

$\delta d_{hys}$ : corecția erorilor de reproductibilitate ale dinamometrului

Incertitudinea standard asociată rezultatului etalonării dinamometrului  $u(d)$ , se poate estima, considerându-se mărimile de intrare necorelate, conform ecuației:

$$u(d) = \sqrt{u^2(d_s) + u^2(\delta d_s) + u^2(\delta d_{drift}) + u^2(\delta d_{rez}) + u^2(\delta d_{rep}) + u^2(\delta d_{zer}) + u^2(\delta d_{hys})}$$

Influența factorilor perturbatori asupra măsurării efectuate cu un dinamometru poate fi estimată pornind de la evaluarea incertitudinilor standard, conform bugetului de incertitudine redat în tabelul 6.17.



În funcție de contribuția la incertitudinea compusă a fiecărui factor de influență precizat în tabelul 6.17 se pot lua decizii de optimizare a dinamometrelor, pentru adecvarea acestora la cerințele de măsurare.

**Tabelul 6.17:** Bugetul de incertitudine asociată etalonării dinamometrelor

Mărimea	Estimația	Distribuția de probabilitate	Incetitudinea standard	Coefficient de sensibilitate	Contribuția la incertitudine
$X_i$	$x_i$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$
$d_s$	$d_s$	tip U	$q/\sqrt{2}$	$D_N$	$(q/\sqrt{2})D_N$
$\delta d_s$	0	normală	$U(d_s)/k$	$D$	$(U(d_s)/k)D$
$\delta d_{drift}$	0	rectangulară	$d_{drift}/\sqrt{3}$	$D$	$(d_{drift}/\sqrt{3})D$
$\delta d_{rez}$	0	rectangulară	$d_{rez}/\sqrt{3}$	1	$d_{rez}/\sqrt{3}$
$\hat{c}d_{rep}$	0	rectangulară	$b/\sqrt{3}$	$D_N$	$(b/\sqrt{3})D_N$
$\delta d_{zer}$	0	rectangulară	$f_0/\sqrt{3}$	$D_N$	$(f_0/\sqrt{3})D_N$
$\delta d_{hys}$	0	rectangulară	$u/\sqrt{3}$	$D_N$	$(u/\sqrt{3})D_N$
$d$	$\sum x_i = d_s$	<b>normală</b>			$\sum \sqrt{u_i^2(y)}$

unde:

- $d_s$ : valoarea indicată de dinamometrul etalon
- $U(d_s)$ : incertitudinea extinsă relativă a valorilor de etalonare ale dinamometrului
- $k$ : factorul de extindere al incertitudinii extinse a valorilor de etalonare
- $d_{drift}$ : valoarea derivei în timp a dinamometrului etalon
- $d_{rez}$ : valoarea rezoluției dinamometrului de etalonat
- $D_N$ : domeniul nominal al dinamometrului de etalonat
- $D$ : valoarea forței în punctul de etalonare

## 7. Comparări interlaboratoare, internaționale și naționale

Rezultatul optimizării sistemelor de măsurare a forței se concretizează în utilizarea de mijloace de măsurare având caracteristici tehnice și metrologice optime sau în proceduri de utilizare care să conducă la rezultatul dorit. Confirmarea obținerii unor performanțe optime față de criteriile stabilite poate fi stabilită prin încercări, analize, urmărire în exploatare etc. În cazul etaloanelor naționale de forță și al etaloanelor secundare, de referință, o modalitate practică de evaluare a performanțelor optime este constituită din efectuarea de comparări cu etaloane similare, din țară sau din alte țări, în vederea stabilirii gradului de compatibilitate.

Laboratoarele de metrologie care dețin etaloane naționale de forță și cele care dețin etaloane secundare, de referință, vor estima, pe baza unor proceduri specifice, cea mai bună capabilitate de măsurare ( $bmc$ ) și, în condiții care vor fi prezentate în continuare, capabilitatea de măsurare și etalonare (CMC). Confirmarea, prin comparări naționale și/sau internaționale, a capabilităților declarate constituie o bună premiză pentru confirmarea rezultatelor obținute prin optimizarea etaloanelor respective.



## 7.1 Cea mai bună capabilitate de măsurare, *bmc*

Pentru caracterizarea etaloanelor naționale și secundare, de referință, în vederea furnizării informațiilor privind incertitudinea minimă de etalonare realizată de acestea se utilizează exprimarea *cele mai bune capabilități de măsurare (bmc)*. Cea mai bună capabilitate de măsurare (care întotdeauna se referă la mărimea particulară supusă măsurării – măsurandul) este definită ca cea mai mică incertitudine de măsurare care poate fi realizată în laboratorul de metrologie, când se efectuează etalonări mai mult sau mai puțin uzuale ale unui etalon aproape ideal, sau când se efectuează etalonări mai mult sau mai puțin uzuale ale unui instrument de măsurare aproape ideal. Declararea celei mai bune capabilități de măsurare a laboratoarelor de metrologie trebuie să fie bazată pe metode descrise și trebuie să fie susținută și/sau confirmată de dovezi experimentale.

Cea mai bună capabilitate de măsurare este unul din parametrii care se utilizează pentru definirea posibilităților de etalonare ale laboratorului de metrologie, alți parametri asociați fiind: mărimea fizică, metoda de etalonare, tipul instrumentului care urmează să fie etalonat și domeniul de măsurare.

Cea mai bună capabilitate de măsurare este una din informațiile esențiale utilizate de potențialii clienți ai laboratorului de metrologie pentru a stabili dacă acesta poate efectua anumite etalonări conform cerințelor.

Pentru a putea compara diferitele capabilități ale laboratoarelor de metrologie, declararea celei mai bune capabilități de măsurare trebuie să se facă plecând de la metode armonizate.

Laboratorul de metrologie trebuie să fie în stare să realizeze cea mai bună capabilitate de măsurare declarată pentru etalonările mai mult sau mai puțin obișnuite (activitate curentă). Desigur, există cazuri în care laboratorul de metrologie va fi capabil să furnizeze rezultate de măsurare pe baza unor investigații mai ample și luându-și precauțiuni sporite, aceste cazuri nefiind, însă, acoperite de definiția celei mai bune capabilități de măsurare, decât dacă politica laboratorului este de a desfășura activități științifice (în acest caz această activitate devine „mai puțin obișnuită”).

Termenul calitativ de „aproape ideal” în definirea celei mai bune capabilități de măsurare, are semnificația că aceasta nu trebuie să depindă de caracteristicile obiectului etalonat. Calificativul „aproape ideal” este calitatea obiectului de a nu contribui, prin efectele fizice datorate imperfecțiunilor lui, la incertitudinea măsurării (transparentă). Totuși, este posibil ca un astfel de obiect să nu poată fi disponibil. Dacă se stabilește că, în anumite cazuri, obiectul supus etalonării contribuie la incertitudinea rezultatelor de măsurare, această contribuție trebuie să fie inclusă în determinarea celei mai bune capabilități de măsurare iar declararea acesteia trebuie să se refere la acest tip de obiect.

Definiția celei mai bune capabilități de măsurare implică faptul că nu se poate declara, în certificatele de etalonare, o incertitudine mai mică decât aceasta.

Estimarea incertitudinii de măsurare care definește cea mai bună capabilitate de măsurare trebuie să urmeze procedurile aplicabile recunoscute. Cea mai bună capabilitate de măsurare trebuie să fie declarată în același mod ca incertitudinea din certificatele de etalonare emise de laborator (de exemplu sub formă de incertitudine extinsă, cu factorul de extindere  $k=2$ ).

Atunci când se evaluează cea mai bună capabilitate de măsurare trebuie să fie luate în calcul toate componentele semnificative ale incertitudinii de măsurare.

Evaluarea contribuțiilor la incertitudine despre care se cunoaște că sunt dependente de timp sau de alte mărimi fizice se poate baza pe limitele posibile ale variațiilor mărimilor respective, care pot apărea în mod normal.

De exemplu, dacă se cunoaște că etalonul utilizat prezintă o deviație în timp a caracteristicii de transfer, contribuția acestuia la incertitudinea de etalonare trebuie luată în calcul, deviația fiind determinată pe baza rezultatelor etalonărilor succesive ale etalonului sau pe baza declarațiilor producătorului.

Cea mai bună capabilitate de măsurare trebuie declarată sub formă numerică. Dacă, totuși, cea mai bună capabilitate de măsurare este o funcție de mărimea la care se referă (sau de oricare alt parametru) aceasta trebuie declarată sub formă analitică. În fiecare caz trebuie să rezulte neechivoc și clar dacă cea mai bună capabilitate de măsurare este exprimată în valori absolute sau relative.

Cerința ca declararea celei mai bune capabilități de măsurare să se bazeze sau să fie confirmată de rezultate experimentale are semnificația că nu este suficientă o analiză a incertitudinii de măsurare realizată în laborator. Comparațiile interlaboratoare constituie un element important de susținere a declarației privind cea mai bună capabilitate de măsurare.

## 7.2 Capabilitatea de etalonare și măsurare, CMC

Capabilitatea de etalonare și măsurare declarată (CMC) se deosebește esențial de cea mai bună capabilitate de măsurare (*bmc*) prin aceea că CMC trebuie confirmată, prin diferite proceduri, una din cele mai uzuale fiind compararea interlaboratoare. Desigur, capabilitatea de etalonare și măsurare declarată este inferioară celei mai bune capabilități de măsurare din cel puțin următoarele motive:

- trebuie să se țină cont de comportarea neideală a mijlocului de măsurare supus operațiunii de etalonare/ încercare;
- declararea capabilității de măsurare se face pe baza comparațiilor interlaboratoare, conform unor proceduri acceptate, în conformitate cu care compararea include influența unor etaloane de transfer, ceea ce conduce la creșterea incertitudinii de măsurare.

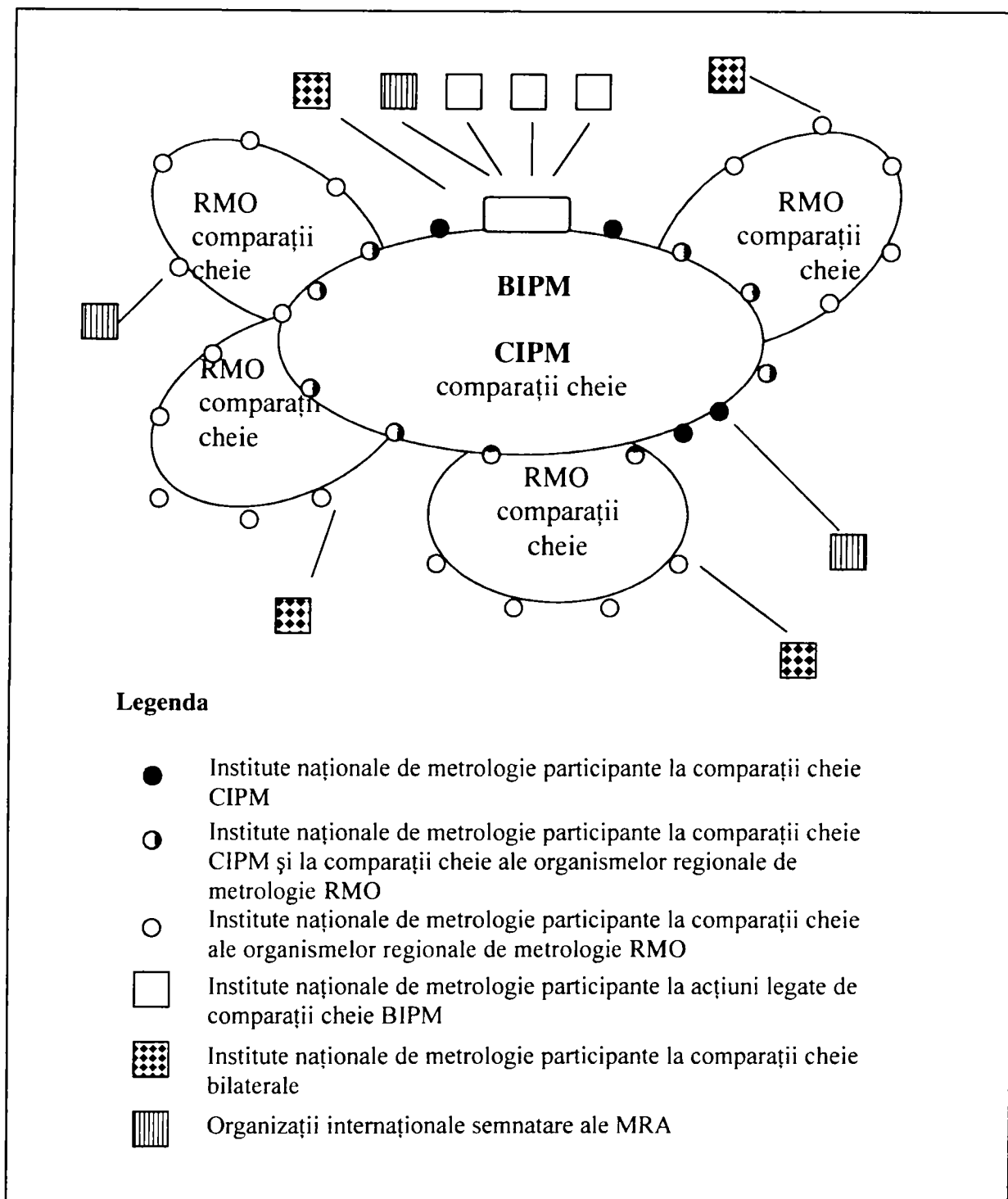
În tabelul 7.1 sunt redate cea mai bună capabilitate de măsurare (*bmc*) și capabilitatea de etalonare și măsurare declarată (CMC) pentru etaloanele naționale de forță ale României.

**Tabelul 7.1:** Capabilități de măsurare ale etaloanelor naționale de forță

Denumire etalon	<i>bmc</i>	CMC
Mașină etalon de forță cu încărcare directă, $F_{max} = 10 \text{ kN}$	$2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
Mașină etalon de forță cu încărcare directă, $F_{max} = 50 \text{ kN}$	$5 \times 10^{-5}$	-
Mașină etalon de forță cu încărcare directă, $F_{max} = 100 \text{ kN}$	$2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$

Notă: Pentru mașina etalon de forță cu încărcare directă de 50 kN nu a fost declarată capabilitatea de măsurare.

Capabilitatea de etalonare și măsurare a etaloanelor naționale este recunoscută pe baza comparațiilor cheie, desfășurate, în mod organizat, sub egida organismelor internaționale. Schema de funcționare comparațiilor cheie pe baza cărora sunt recunoscute etaloanele naționale și a rezultatelor de etalonare și măsurare obținute cu acestea este redată în figura 7.1.



**Fig. 7.1** Schema comparațiilor cheie CIPM

### 7.3 Comparări interlaboratoare

Comparările interlaboratoare reprezintă una dintre cele mai bune metode pentru asigurarea recunoașterii rezultatelor de măsurare ale laboratoarelor de metrologie. Comparările interlaboratoare scot în evidență atât performanțele etaloanelor utilizate cât și adecvarea acestora la scopul măsurării, abilitățile personalului care efectuează măsurările, corectitudinea procedurilor de măsurare etc.

Comparările interlaboratoare se desfășoară în conformitate cu proceduri specifice, care sunt diferite, în funcție de tipul comparării:

- internaționale, pentru susținerea capabilității declarate de etalonare și măsurare (CMC) a etaloanelor naționale și de referință;
- naționale, pentru demonstrarea celei mai bune capabilități ale laboratoarelor de etalonare, în vederea obținerii unei recunoașteri oficiale.

### **7.3.1 Comparări internaționale ale etaloanelor naționale de forță**

Pentru compararea etaloanelor naționale de forță se utilizează traductoare de forță, etaloane de transfer itinerante, așa cum s-a arătat la capitolul 6.1.5. Fluxul activităților pentru comparare a fost, de asemenea tratat anterior.

Pentru o comparare relevantă a etaloanelor naționale, este necesar să se utilizeze, în toate cazurile, proceduri similare.

În practica internațională, în cazul mașinilor etalon de forță, se utilizează proceduri de comparare care se încadrează într-un cadru general, descris în continuare.

Astfel, pentru a minimiza efectul fluajului, trebuie determinat în prealabil timpul necesar fiecărui traductor de forță utilizat în procesul de comparare pentru a furniza un răspuns stabil la aplicarea forțelor în sens crescător și descrescător. În cele mai multe cazuri, s-a stabilit că este suficient un interval de timp de 3 minute între momentul în care traductorul de forță a fost încărcat (sau descărcat) și momentul în care are loc citirea indicației.

În plus, după ce traductorul de forță a fost încărcat (sau descărcat), apare o anumită derivă a mărimii de ieșire datorată efectelor mecanice, termice sau electrice. Aceasta poate fi cauzată, de exemplu, de încălzirea locală a traductorului datorată disipării energiei electrice în puntea de măsură (elementul sensibil). Din experiența dobândită în urma a numeroase măsurări efectuate, rezultă că deriva mărimii de ieșire a traductorului de forță datorată acestor efecte se stabilizează, de asemenea, în aproximativ 3 minute. Din aceste motive, a fost ales un interval de timp de 3 minute între momentul aplicării (sau înlăturării) forței și cel al citirii indicațiilor, pentru fiecare măsurare.

Interacțiunile dintre mașinile etalon de forță comparate și traductoarele de forță utilizate ca etaloane de transfer itinerante pot să influențeze semnificativ exactitatea de măsurare pentru comparare. Imperfecțiunile de aliniere, care pot să apară în mod obișnuit între mașinile etalon de forță care se compară și traductoarele de forță utilizate pentru comparare pot să conducă la descompunerea forței aplicate în componente parazite, de încovoiere, torsiune sau forfecare. Pentru minimizarea erorilor de măsurare cauzate de componentele neaxiale ale deformării, răspunsul fiecărui traductor utilizat la compararea mașinilor etalon de forță trebuie să fie obținut pentru cinci poziții distribuite simetric în raport cu axa mașinii (prin rotație cu  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $360^\circ$ ). Înainte de începerea ciclurilor de măsurare, traductorul de forță utilizat trebuie încărcat până la forța maximă, cu revenire la zero după fiecare aplicare a forței maxime, de trei ori pentru poziția de rotație cu  $0^\circ$  și câte o dată pentru pozițiile de rotație cu  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  și  $360^\circ$ . Se execută două seturi de măsurări la pozițiile de rotație ale traductorului cu  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  și  $270^\circ$ , la forțe crescătoare. Pentru poziția de rotație cu  $360^\circ$  se execută măsurări la forțe atât crescătoare cât și descrescătoare.

Compararea mașinilor etalon de forță se execută, de regulă, în câte patru puncte, trepte de forță, repartizate cât mai uniform posibil în domeniul de forțe al fiecărui traductor de transfer utilizat.

Numărul de traductoare de forță utilizate pentru comparare și domeniile nominale ale acestora se stabilesc, pentru fiecare caz particular, în funcție de caracteristicile tehnice și metrologice ale mașinilor etalon de forță care se compară.

O atenție deosebită trebuie acordată influenței factorilor de mediu. Este de preferat ca, pentru toate mașinile etalon de forță implicate în procesul de comparare, măsurările să fie executate în condiții de mediu (temperatură, presiune atmosferică și umiditate) cât mai apropiate. Dacă, din diferite motive, acest lucru nu este posibil, se vor efectua corecții ale valorilor de măsurare, în funcție de factorii de mediu efectiv realizați.

Înainte de inițierea măsurărilor de comparare, traductoarele de forță, etaloane de transfer, vor fi menținute cel puțin două zile în locul unde sunt amplasate mașinile cu încărcare directă, etaloane naționale de forță.

În figura 7.2 este redată schema de încărcare a etaloanelor de transfer în cursul procesului de comparare.

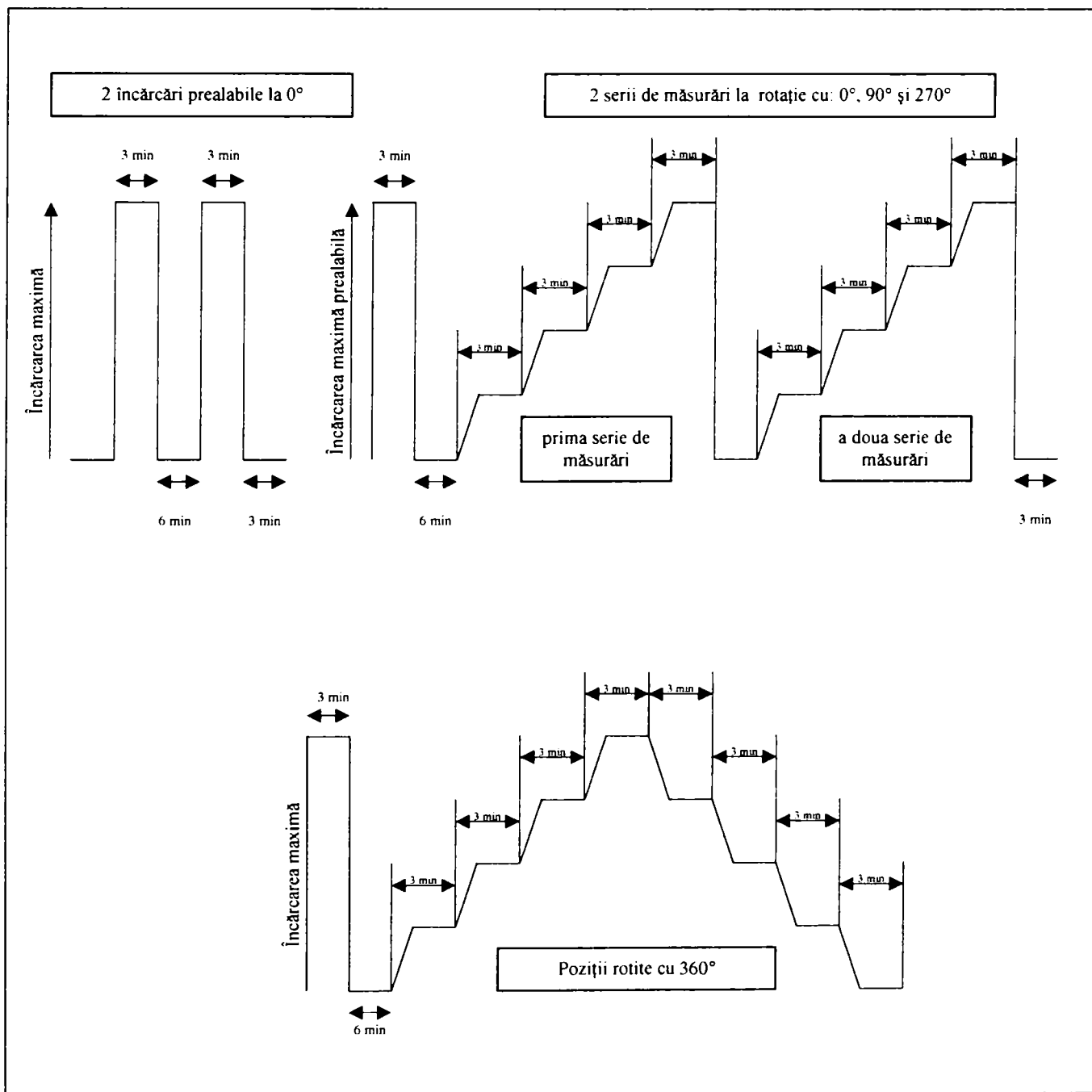


Fig. 7.2 Schema de încărcare a etaloanelor de transfer la compararea internațională



În procesul de comparare se determină deviația relativă dintre valorile forței realizate de mașinile de forță comparate. Valorilor individuale indicate de mașinile etalon de forță li se asociază incertitudini de măsurare, în conformitate cu procedurile acceptate mutual.

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul procesului de comparare internațională, organismele abilitate (de exemplu, CIPM) iau decizia de recunoaștere etaloanelor naționale și de referință și a capabilităților de măsurare și etalonare corespunzătoare acestora.

### 7.3.2 Comparări naționale ale laboratoarelor de metrologie

Capabilitatea de etalonare și măsurare a etaloanelor de referință, secundare și de lucru, realizată în diferite laboratoare de metrologie, poate fi demonstrată pe baza rezultatelor de comparare între laboratoarele de metrologie având aproximativ același nivel de competență. Compararea se efectuează în conformitate cu proceduri acceptate de laboratoarele participante.

Pentru compararea interlaboratoare se stabilește un laborator de referință (laborator pilot), de regulă, laboratorul care păstrează etaloanele naționale. Oricum, este de preferat ca laboratorul de referință să prezinte o valoare a celei mai bune capabilități de măsurare ( $bmc$ ) la un nivel superior laboratoarelor participante la comparare.

Rolul comparărilor naționale este de a demonstra compatibilitatea laboratoarelor de etalonări în domeniul considerat (în cazul de față, forță) cu laboratorul de referință, deci, demonstrarea posibilității de asigurare a uniformității măsurărilor pe teritoriul național.

Pentru desfășurarea comparării interlaboratoare se utilizează unul sau mai multe etaloane itinerante, ale căror caracteristici metrologice se determină, în condiții de confidențialitate, de fiecare din laboratoarele participante. Valorile de referință ale etaloanelor itinerante se determină de către laboratorul pilot. În final, sunt comparate rezultatele de etalonare ale etaloanelor itinerante obținute de laboratoarele participante, cu cele determinate de laboratorul de referință.

În cursul procesului de etalonare ale etalonului (etalonelor) itinerante, laboratoarele participante la comparare stabilesc valori ale măsurandului și estimează incertitudinea de etalonare. Pentru cuantificarea nivelului de compatibilitate între laboratoarele participante la comparare și laboratorul de referință se calculează, pentru fiecare laborator, indici de valoare  $E_i$ , conform ecuației:

$$E_i = \frac{x_i - x_e}{\sqrt{U_i^2 + U_e^2}} \quad (7.1)$$

unde:

- $x_i$ : valorile măsurandului determinate de laboratoarele participante la comparare
- $x_e$ : valorile măsurandului determinate de laboratorul de referință
- $U_i$ : incertitudinile extinse de măsurare declarate de laboratoarele participante la comparare, pentru valorile  $x_i$
- $U_e$ : incertitudinile extinse de măsurare determinate de laboratorul de referință, pentru valorile  $x_e$



În conformitate cu practicile internaționale, pot fi considerate următoarele cazuri:

- indicele de valoare ale unui laborator participant la comparare este:  $-1 \leq E_i \leq 1$ . Laboratorul este, în acest caz, compatibil cu laboratorul de referință. Gradul de compatibilitate este cu atât mai mare, cu cât indicele de valoare este mai apropiat de valoarea zero;
- indicele de valoare ale unui laborator participant la comparare este în afara intervalului precizat anterior. În acest caz, laboratorul nu este compatibil cu laboratorul de referință.

Pentru exemplificare, vom reda, în continuare, rezultatele unei comparări interlaboratoare în domeniul forțe, finalizată la începutul anului 2006, la care au participat:

- Laboratorul de forțe Timișoara (laborator pilot) – laborator cod  $e$ ;
- Laboratorul regional Craiova (participant)- laborator cod 1;
- Laboratorul regional București (participant)- laborator cod 2;
- Laboratorul regional Brașov (participant)- laborator cod 3;
- Laboratorul regional Constanța- prin centrul Galați- (participant)- laborator cod 4.

Domeniul ales pentru compararea interlaboratoare a fost de la 10 kN la 100 kN.

Etalonul itinerant utilizat a fost un traductor de forță mecanic, cu arc oval, cu domeniul nominal de 100 kN.

Compararea a cuprins următoarele activități:

- Determinarea valorilor de referință,  $x_e$ , în laboratorul Timișoara;
- Determinarea valorilor de comparare în laboratoarele participante,  $x_1$ ;  $x_2$ ;  $x_3$  și  $x_4$ , pe ruta Craiova, București, Brașov, Galați;
- Confirmarea valorilor de referință în laboratorul Timișoara;
- Întocmirea raportului privind compararea interlaboratoare.

Toate valorile de etalonare sunt însoțite de incertitudinile de măsurare asociate valorilor respective (incertitudini extinse relative):  $U_e$ ;  $U_1$ ;  $U_2$ ;  $U_3$  și  $U_4$ .

În tabelul 7.1 sunt redată valorile de referință pentru traductorul de forță, obținute în laboratorul Timișoara.

**Tabelul 7.1:** Valori de referință pentru compararea interlaboratoare

Forța nominală kN	Valoare de referință 1 diviziuni	Incertitudine extinsă relativă 1 %	Valoare de referință 2 diviziuni	Incertitudine extinsă relativă 2 %	Valoare de referință medie diviziuni	Incertitudine extinsă relativă a mediei %
0	0	1,00	0	0,72	0	0,87
10	56,6	1,03	56,7	0,72	56,7	0,89
20	113,7	0,82	113,7	0,72	113,7	0,77
30	170,2	0,72	170,4	0,62	170,3	0,67
40	227,7	0,55	227,8	0,56	227,8	0,56
50	284,6	0,51	284,6	0,49	284,6	0,50
60	342,0	0,39	342,2	0,38	342,1	0,39
70	399,2	0,30	399,4	0,28	399,3	0,29
80	457,0	0,20	457,2	0,19	457,1	0,20
90	515,0	0,11	514,9	0,13	515,0	0,12
100	572,2	0,11	572,1	0,13	572,2	0,12

Notă: Valorile notate cu „1” sunt obținute în măsurările efectuate în laboratorul de referință înaintea desfășurării schemei de comparare. Valorile notate cu „2” sunt obținute în laboratorul de referință după desfășurarea schemei de comparare. Pe baza acestor valori sunt calculate valorile medii ale valorilor de referință (medie aritmetică) și incertitudinea mediei,  $U_m$ , calculată astfel:

$$U_m = \sqrt{(U_1^2 + U_2^2)/2} \quad (7.2)$$

unde:

$U_1$ : incertitudinea extinsă asociată măsurărilor efectuate în laboratorul de referință înaintea desfășurării schemei de comparare

$U_2$ : incertitudinea extinsă asociată măsurărilor efectuate în laboratorul de referință după desfășurarea schemei de comparare

Valorile de etalonare ale traductorului itinerant obținute de laboratoarele participante la comparare sunt redate în tabelul 7.2.

**Tabelul 7.2:** Valori de comparare obținute de laboratoarele participante

Forța nominală kN	$x_1$	$U_1$	$x_2$	$U_2$	$x_3$	$U_3$	$x_4$	$U_4$
	diviziuni	%	diviziuni	%	diviziuni	%	diviziuni	%
0	0	0,40	0	0,27	0	0,02	0	3,00
10	56,4	0,40	56,6	0,27	56,7	0,63	56,7	3,00
20	113,7	0,40	113,9	0,27	113,8	0,39	114,0	2,20
30	170,3	0,40	170,4	0,27	170,2	0,31	170,4	1,50
40	227,8	0,40	228,1	0,27	228,0	0,22	228,0	1,10
50	284,8	0,40	284,9	0,27	284,9	0,21	285,1	1,10
60	342,4	0,40	342,4	0,27	342,4	0,16	342,6	0,90
70	400,0	0,40	400,0	0,27	399,7	0,15	400,0	0,80
80	457,8	0,40	457,4	0,27	457,2	0,16	457,6	0,60
90	515,5	0,40	515,5	0,27	515,6	0,16	516,0	0,30
100	571,6	0,40	572,6	0,27	572,5	0,13	573,2	0,30

Pe baza datelor cuprinse în tabelul 7.1 și tabelul 7.2 se calculează erorile relative,  $\varepsilon_r$ , ale rezultatelor de etalonare obținute de laboratoarele participante la comparare (cod 1, 2, 3 și 4) față de valorile de referință obținute de laboratorul pilot (cod  $e$ ), calculate astfel:

$$\varepsilon_r = \frac{x_i - x_e}{x_e} \times 100 \quad (7.3)$$

Erorile relative obținute sunt redate în tabelul 7.3.

Pentru aprecierea diferențelor dintre rezultatele obținute de laboratoarele participante la comparație, în figura 7.3 sunt redate graficele erorilor relative, exprimate în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3: Erori relative obținute la comparare de laboratoarele participante

Forța nominală kN	Laborator Craiova %	Laborator București %	Laborator Brașov %	Laborator Galați %
0	0	0	0	0
10	-0,44	-0,09	0,00	0,09
20	0,00	0,18	0,09	0,26
30	0,00	0,06	-0,06	0,06
40	0,02	0,15	0,11	0,11
50	0,07	0,11	0,11	0,18
60	0,09	0,09	0,09	0,15
70	0,18	0,18	0,10	0,18
80	0,15	0,07	0,02	0,11
90	0,11	0,11	0,13	0,20
100	-0,10	0,08	0,06	0,18

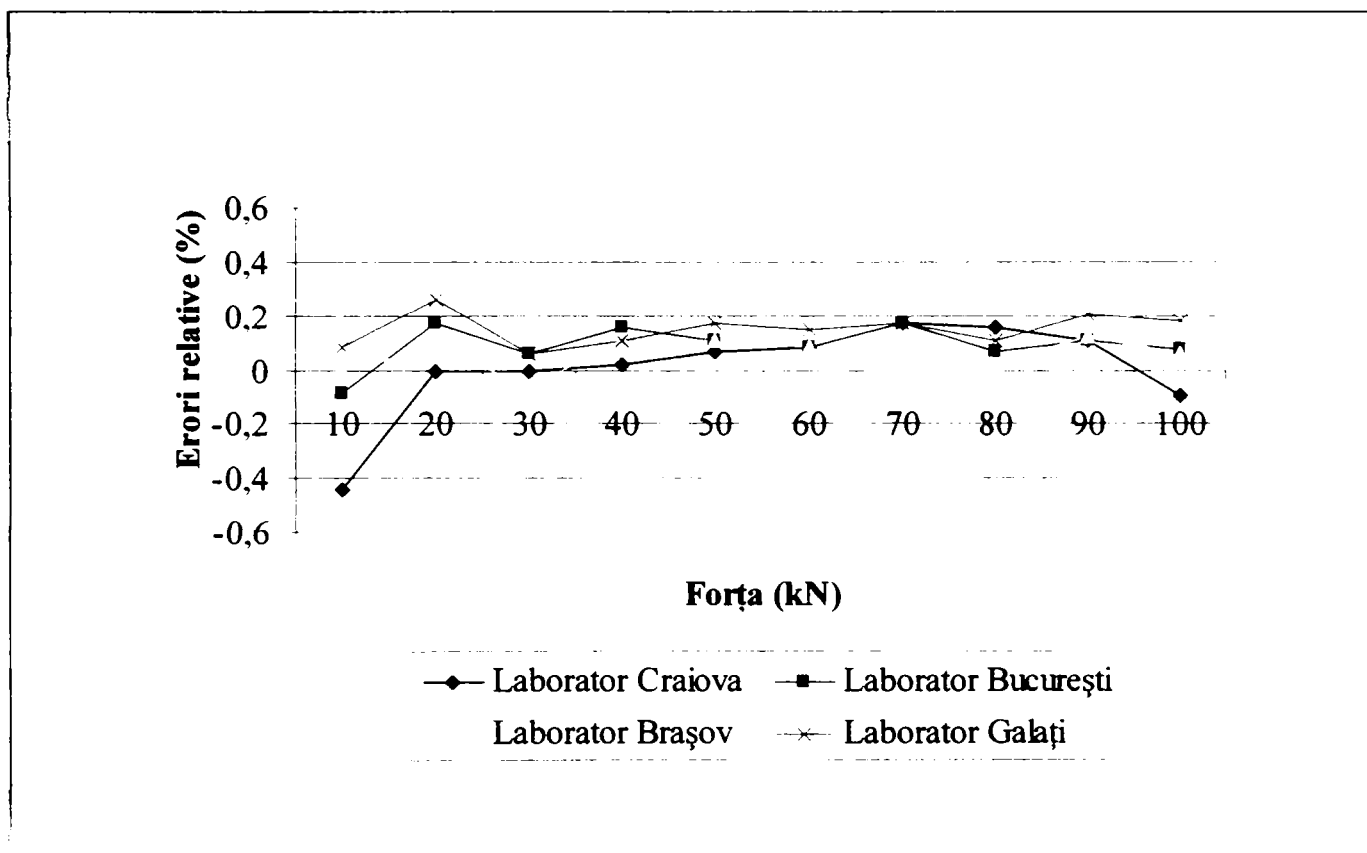


Figura 7.3: Erori relative obținute la comparare

Plecând de la datele din tabelele 7.1 și 7.2 se determină indici de valoare  $E_i$ , conform ecuației (7.1).

Valorile analitice ale indicilor de valoare ai laboratoarelor participante la comparare sunt prezentate în tabelul 7.4.

În figura 7.4 sunt prezentate graficele indicilor de valoare, în funcție de forța măsurată.

Atât din tabelul 7.4, cât și din figura 7.4, rezultă că toate laboratoarele participante la comparare sunt compatibile cu laboratorul de referință, cu grade diferite de compatibilitate.

Tabelul 7.4: Indici de valoare pentru laboratoarele participante la comparare

Forța nominală kN	Laborator Craiova	Laborator București	Laborator Brașov	Laborator Galați
0	0,00	0,00	0,00	0,00
10	-0,45	-0,10	0,00	0,00
20	0,00	0,22	0,10	0,11
30	0,00	0,08	-0,08	0,04
40	0,03	0,25	0,18	0,09
50	0,11	0,19	0,19	0,15
60	0,16	0,19	0,21	0,15
70	0,35	0,44	0,31	0,21
80	0,34	0,20	0,09	0,17
90	0,26	0,36	0,63	0,63
100	-0,23	0,27	0,35	0,57

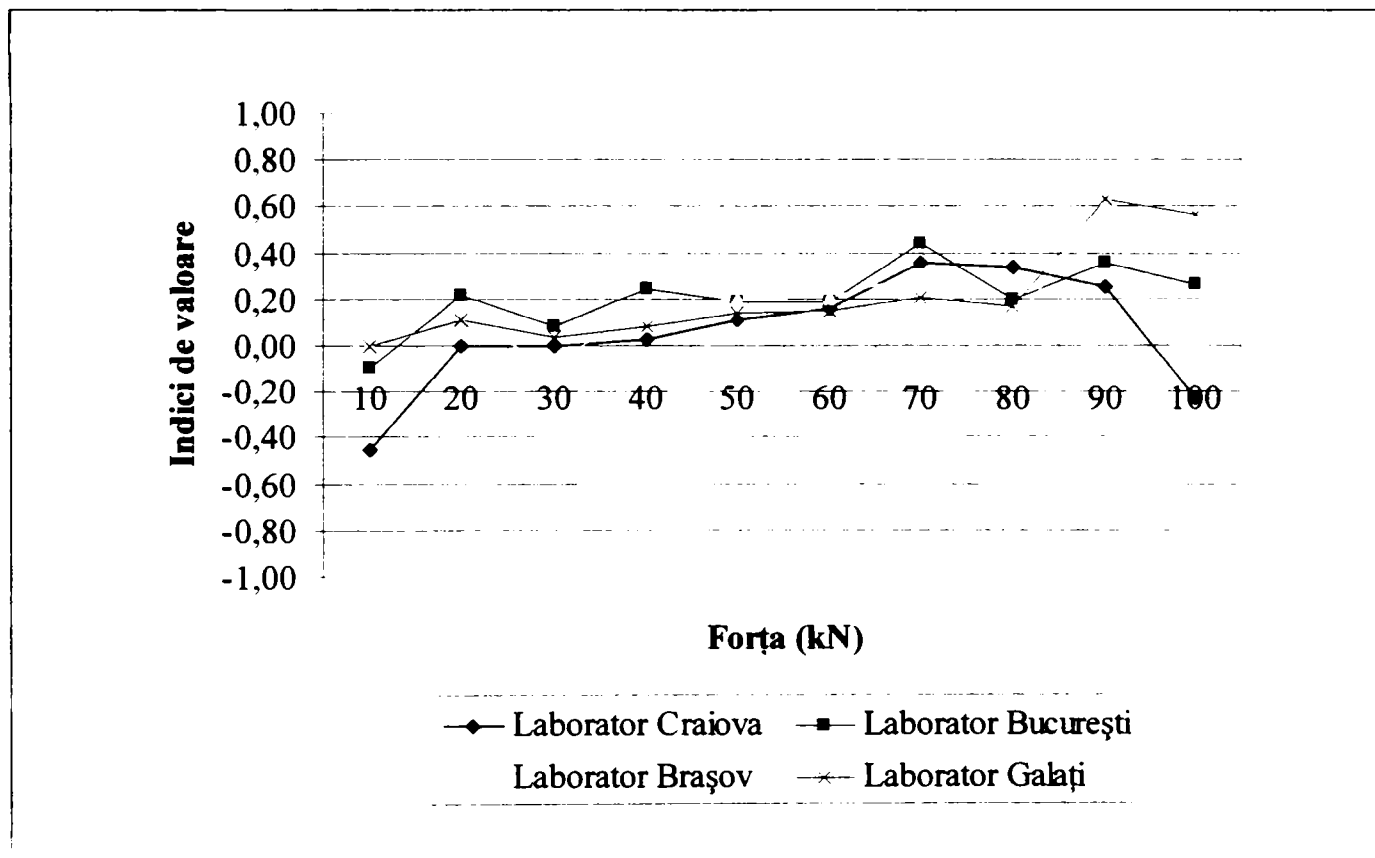


Figura 7.4: Graficul indicilor de valoare pentru laboratoarele participante la comparare

## 8. OPTIMIZAREA EXPERIMENTALĂ

Considerațiile teoretice exprimate anterior au fost utilizate ca bază pentru optimizarea etaloanelor naționale și de referință existente în laboratorul din domeniul forțe din Timișoara, aparținând Institutului Național de Metrologie.

Etaloanele care, pâna la data prezentei teze de doctorat, au fost supuse procesului de optimizare sunt:

- mașina etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN, etalon național;
- mașina etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN, etalon național;
- mașina etalon de forță cu comparație de 1000 kN, etalon de referință.

Criteriul principal care a stat la baza optimizării etaloanelor menționate mai sus a fost aducerea performanțelor tehnice și metrologice ale acestora, în special a incertitudinii de măsurare, la un nivel acceptabil pentru recunoașterea internațională a rezultatelor de etalonare ale laboratorului forțe Timișoara.

Principalele activități întreprinse, în fiecare caz, au fost următoarele:

- identificarea sistemelor de măsurare existente, utilizând proceduri specifice (de exemplu, răspuns la stimul treaptă sau impuls);
- stabilirea acțiunilor necesare pentru atingerea performanțelor tehnice și metrologice stabilite prin criteriile de optimizare adoptate;
- implementarea acțiunilor stabilite;
- efectuarea unor încercări specifice pentru demonstrarea atingerii performanțelor optime proiectate;
- efectuarea de comparații interlaboratoare pentru susținerea declarațiilor privind performanțele etaloanelor de forță, în vederea recunoașterii internaționale.

### 8.1 Realizarea mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN

„Vechea” mașină de forță a fost supusă unor investigații amănunțite pentru determinarea performanțelor tehnice și metrologice existente și compararea acestora cu valorile necesare pentru asigurarea compatibilității internaționale a măsurărilor. Principala acțiune de identificare a sistemului a fost studiul regimurilor tranzitorii la aplicarea treptelor de forță succesive ale mașinii etalon. Pe baza observațiilor din procesul de identificare au fost stabilite și implementate măsuri de optimizare (în special după criteriul asigurării performanțelor metrologice necesare declarării mașinii ca etalon național de forță). Pentru demonstrarea performanțelor sistemului optimizat au fost efectuate încercări ale sistemului constituit din mașina de forță modificată, precum și comparații internaționale. Aceste activități au sta la baza recunoașterii naționale și internaționale ale etalonului de forță.

#### 8.1.1 Identificarea sistemului

Pentru determinarea răspunsului sistemului la semnal treaptă au fost aplicate, asupra unui traductor de forță, etalon de referință, cu domeniul nominal de 10 kN, tip Z30, fabricație HBM, treptele de forță care pot fi realizate de mașina etalon, atât la valori crescătoare ale forței, cât și la valori descrescătoare. principalele caracteristici metrologice ale traductorului de forță utilizat sunt prezentate în tabelul 8.1.



**Tabelul 8.1:** Caracteristici tehnice ale traductorului de forță

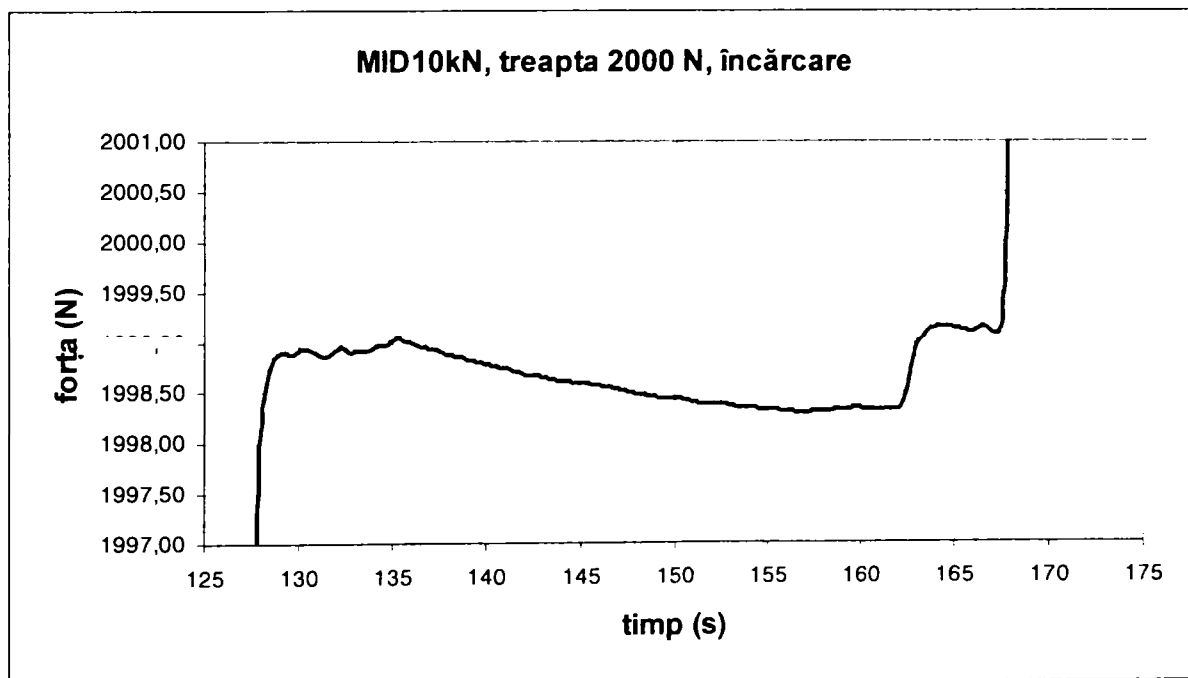
Caracteristici tehnice	Unități de măsură	Valori nominale
Domeniul nominal ( $F_{nom}$ )	kN	10
Clasa de exactitate, conform ISO 376	-	00
Sensibilitate ( $C_n$ )	mV/V	2
Eroarea de repatabilitate	% din $F$	0,02
Eroarea de reversibilitate	% din $F$	0,04
Eroarea de hysterezis	% din $F$	0,06
Eroarea de liniaritate	% din $F$	0,03
Efectul temperaturii asupra sensibilității	% din $C_n/10$ K	0,02
Efectul forțelor transversale (10 % din $F_{nom}$ )	% din $F$	0,1
Rezistență de intrare	$\Omega$	> 690
Rezistență de ieșire	$\Omega$	600 - 800

Răspunsul traductorului a fost înregistrat, utilizând echipamente performante, după cum urmează:

- amplificator tensometric tip DMP 40S HBM, clasa de exactitate 0,0005, rezoluție  $1 \times 10^{-6}$  mV/V, cu interfață pentru calculator;
- program de achiziție de date „Catman”, realizat de HBM Germania, dedicat aplicației de preluare și prelucrare date, în timp real, la utilizarea traductoarelor de forță;
- calculator personal.

Deși au fost înregistrate și studiate toate răspunsurile sistemului la aplicarea treptelor de forță, în continuare sunt prezentate numai unele aspecte relevante, care au condus la soluții de optimizare a sistemului considerat.

Astfel, în figura 8.1 este prezentat răspunsul sistemului constituit din mașina etalon de 10 kN, la aplicarea treptei de forță în încărcare de 2000 N.

**Figura 8.1:** Răspunsul mașinii de 10 kN la treapta de 2000 N

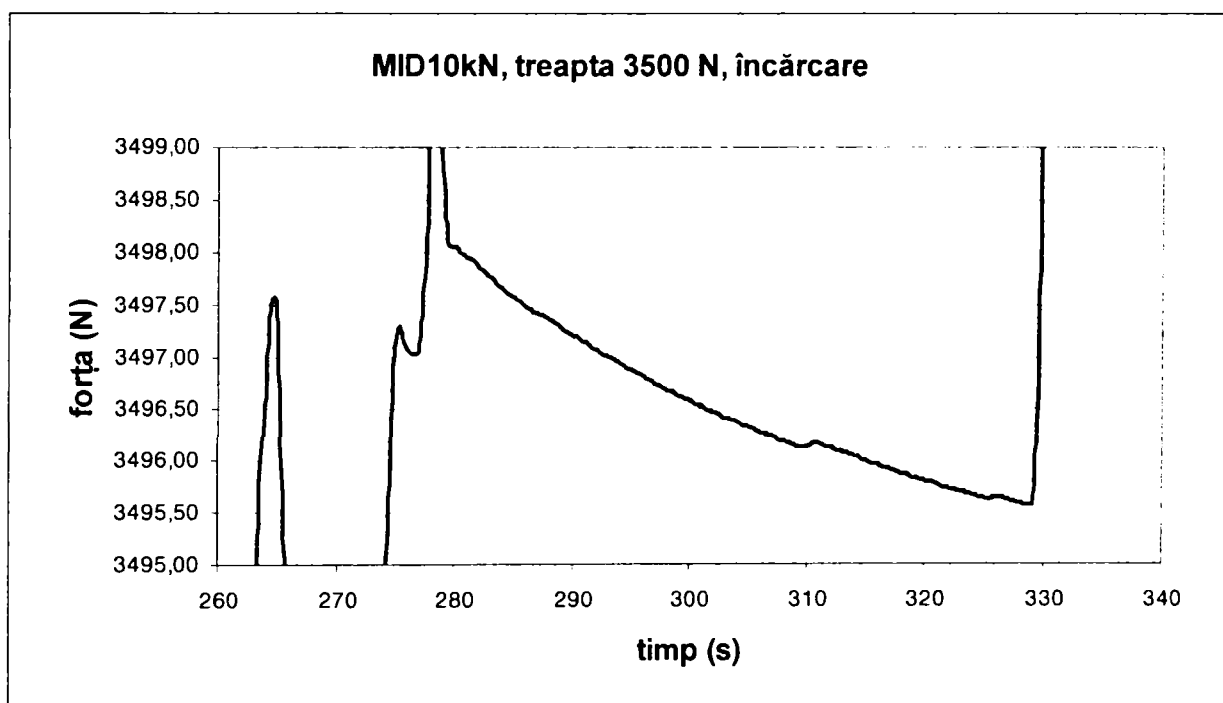
Din figura 8.1 rezultă că, pentru treapta de forță de 2000 N, valoarea forței reproduse este semnificativ diferită de valoarea nominală. Diferența este de aproximativ  $7 \times 10^{-2} \%$ . Această valoare este mult prea mare pentru încadrarea în limitele acceptabile ale erorilor pentru un etalon național de forță.

Diferența este cauzată, în principal, de etalonarea insuficient de exactă (pentru cerințele actuale) a greutăților etalon, care a intervenit, în special, din următoarele cauze:

- cunoașterea insuficient de exactă a mărimilor de influență (densitatea materialului greutăților etalon, condițiile de mediu);
- utilizarea unor etaloane pentru măsurarea masei greutăților etalon, având o exactitate insuficientă;
- utilizarea unor proceduri de etalonare inadecvate pentru atingerea unui nivel de exactitate corespunzător cerințelor;
- lipsa unor algoritmi de prelucrare statistică a datelor obținute în procesul de etalonare.

De asemenea, diferențele dintre valoarea realizată și valoarea nominală a forței sunt cauzate de variația în timp a masei greutăților etalon, datorată, în special, coroziunii.

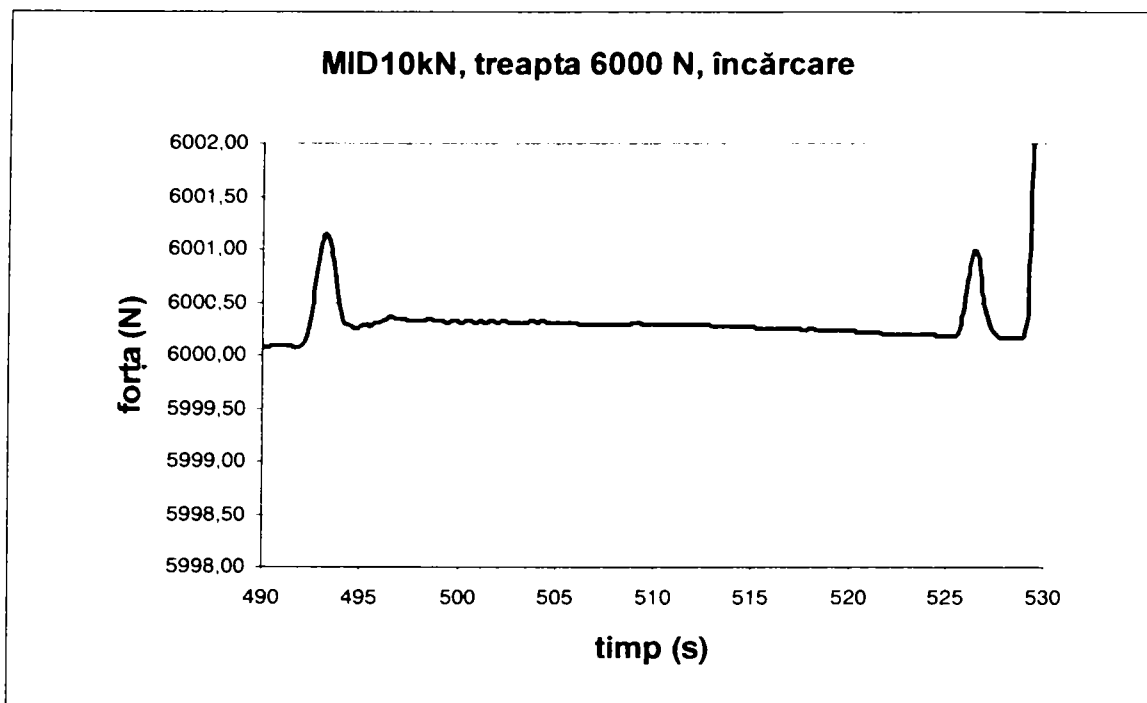
În figura 8.2 este prezentat răspunsul sistemului constituit din mașina etalon, la aplicarea treptei de forță, în încărcare, de 3500 N.



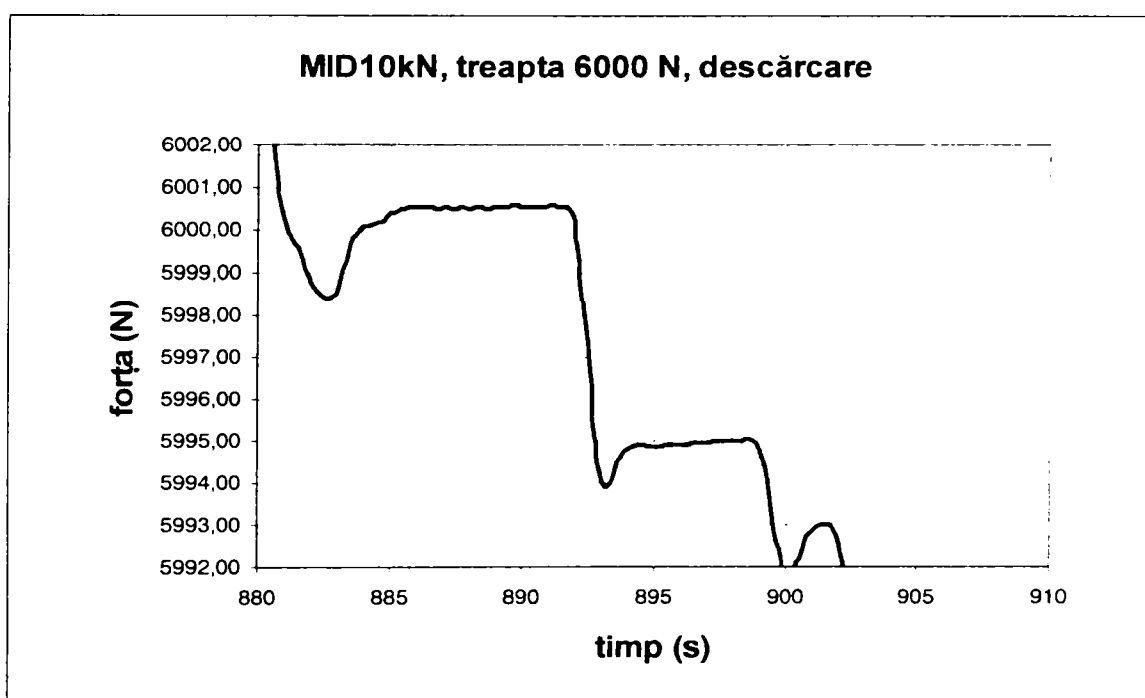
**Figura 8.2:** Răspunsul mașinii de 10 kN la treapta de 3500 N

Răspunsul mașinii de forță la această treaptă de încărcare relevă existența unor forțe de frecare foarte pronunțate. În afară de abaterea de la valoarea nominală de 3500 kN se remarcă o alunecare a greutăților, care conduce la imposibilitatea păstrării valorii de referință.

În figura 8.3 a) și b) este prezentat răspunsul sistemului la aplicarea treptei de forță de 6000 N, la încărcare (forțe crescătoare), respectiv descărcare (forțe descrescătoare).



a)



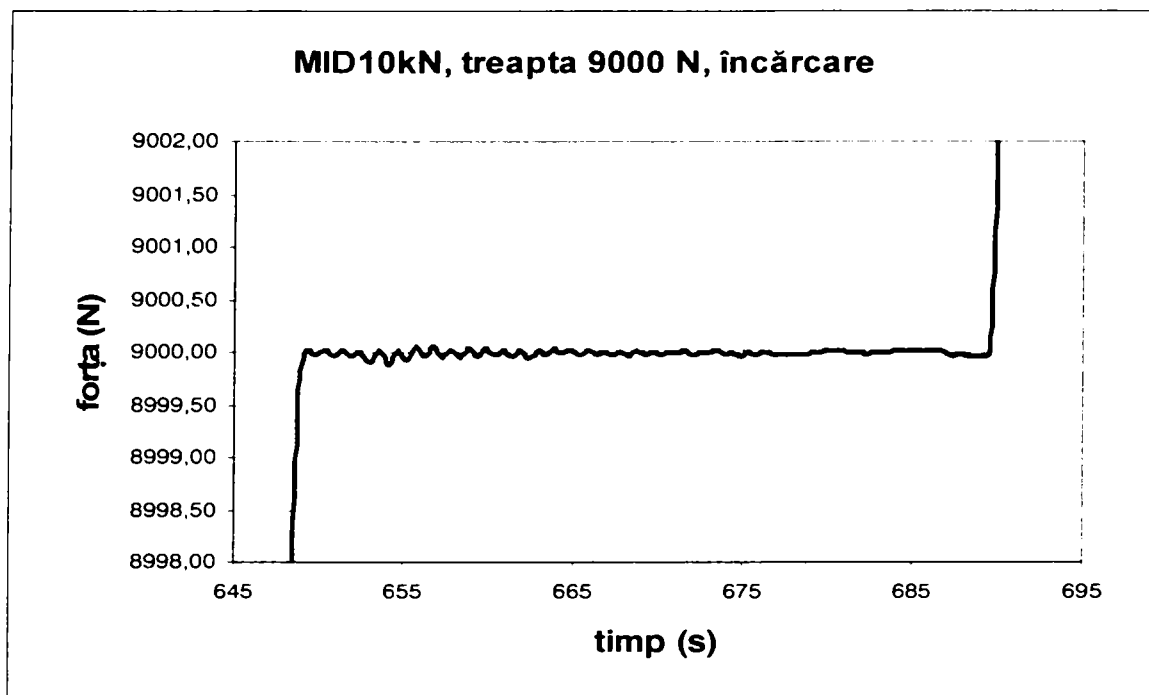
b)

**Figura 8.3:** Răspunsul mașinii de 10 kN la treapta de 6000 N

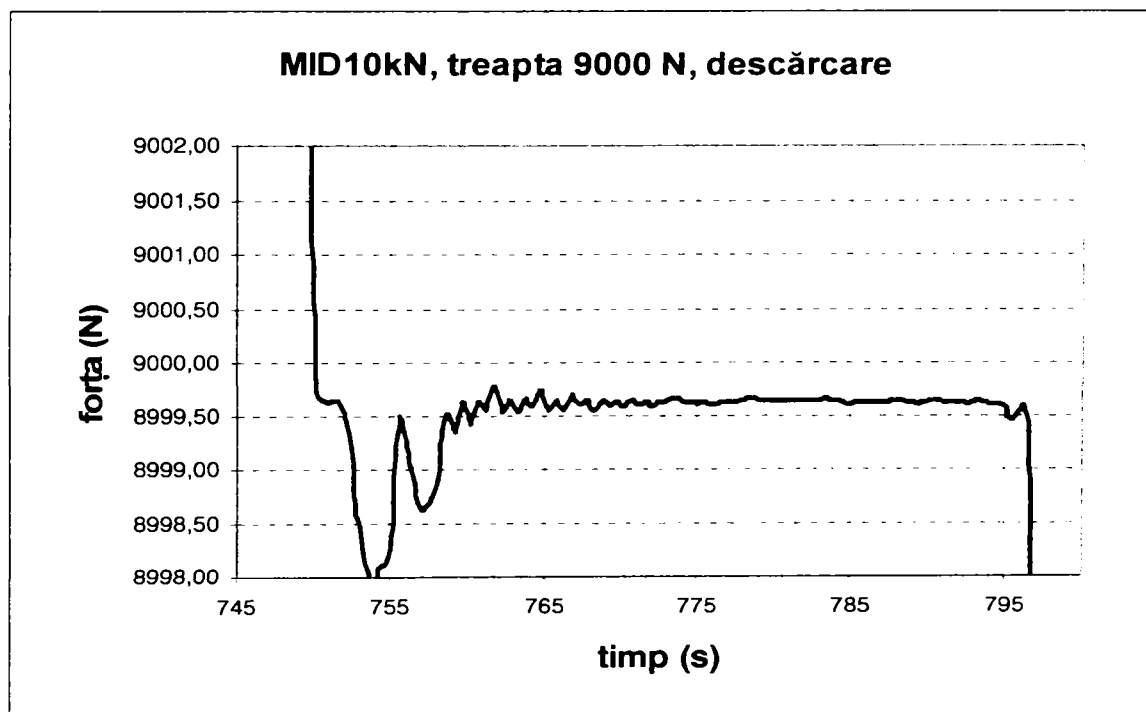
Din figura 8.3 a) rezultă că forța realizată de mașina etalon, în regim de încărcare, deși este relativ constantă, este diferită de forța nominală de 6000 kN cu aproximativ  $4 \times 10^{-3} \%$ . Această valoare este la limita valorilor acceptabile ( $5 \times 10^{-3} \%$ ).

Din rezultatele obținute la aceeași treaptă de forță (6000 N), în regim de descărcare, prezentate grafic în figura 8.3 b), rezultă că mașina de forță prezintă o variație importantă, inacceptabilă, a forței reproduse. Această situație este cauzată de forțele de frecare care au loc între greutatea antrenată și cele în repaus, precum și între greutatea și sistemul de antrenare.

În figura 8.4 a) și b) este prezentat răspunsul sistemului la aplicarea treptei de forță de 9000 N, la încărcare (forțe crescătoare), respectiv descărcare (forțe descrescătoare).



a)



b)

**Figura 8.4:** Răspunsul mașinii de 10 kN la treapta de 9000 N

Din figura 8.4 a) rezultă că realizarea treptei de forță de 9000 N, la încărcare, este foarte apropiată de valoarea nominală. Totuși, în regim de descărcare, din figura 8.4 b) se evidențiază frecări importante, care aduc valoarea forței reproduse la o valoare în afara limitelor acceptabile.

Din rezultatele experimentale obținute în procesul de identificare a sistemului constituit din mașina etalon de forță de 10 kN rezultă următoarele:

- mașina etalon de forță, în varianta constructivă existentă, nu poate realiza în tot domeniul de utilizare exactitatea minimă de  $5 \times 10^{-5}$ , acceptabilă pentru etaloanele naționale de forță;
- au fost evidențiate deficiențe de funcționare, în special frecări între greutatea etalon și frecări între greutatea etalon și sistemul de susținere a acestora, care conduc la diferențe mari între forța reprodusă de mașina etalon și forța nominală;
- cunoașterea insuficient de exactă a condițiilor inițiale de etalonare a greutăților etalon (densitatea materialului din care acestea sunt confecționate, densitatea aerului în momentul etalonării, exactitatea etaloanelor utilizate etc) conduce la creșterea incertitudinii de reproducere a treptelor de forță;
- modul de încărcare a greutăților (prin depunerea pe jugul de încărcare a greutăților una peste alta) conduce la instabilitate în funcționare, în special din cauza faptului că centrul de greutate al pachetului de greutăți format se deplasează, la modificarea forței reproduse, în sens invers față de sensul forței reproduse. Acest lucru provoacă, de cele mai multe ori, deplasarea pachetului de greutăți pe parcursul funcționării mașinii de forță și, implicit, descompunerea forței reproduse după cele trei axe carteziene, deci apariția unor forțe perturbatoare care pot provoca încovoieri, torsiuni etc.
- viteza prea mare de așezare a greutăților pe jugul de încărcare provoacă șocuri și oscilații în plan vertical;

Față de deficiențele constatate, acțiunile întreprinse pentru optimizarea sistemului constituit din mașina etalon de forță de 10 kN au constat din:

- înlocuirea greutăților etalon existente cu altele, din oțel inoxidabil, a căror densitate a fost determinată;
- reproiectarea sistemului de încărcare al mașinii etalon de forță, astfel încât să se asigure, la variația forței reproduse, o deplasare a centrului de greutate al pachetului de greutăți etalon în același sens cu forța reprodusă. Acest lucru se realizează printr-o încărcare de tip „lanț”, în care, pe parcursul încărcării, greutățile se „agață” una de alta, pornind de la prima treaptă către ultima.
- tararea greutăților etalon în condiții de referință cunoscute (temperatură, presiune atmosferică, umiditate relativă) și utilizând etaloane și proceduri adecvate;
- controlul automat al regimului de încărcare al greutăților, asigurarea unei viteze variabile de încărcare, adecvată procesului.

### 8.1.2 Activități de optimizare

#### Determinarea densității materialului greutăților etalon

Pentru minimizarea influenței densității noilor greutăți etalon, confecționate din oțel inoxidabil, asupra incertitudinii de reproducere a forței a mașinii etalon de 10 kN, densitatea materialului trebuie cunoscută cât mai exact posibil.

Pentru determinarea densității materialului a fost prelevată o probă paralelipipedică, de dimensiuni  $33,46 \times 19,76 \times 19,82$  mm.

Densitatea materialului a fost determinată prin două metode independente:

- determinarea volumului probei și cântărire în aer și,
- cântărirea în apă și în aer a probei.

Densitatea medie determinată pentru materialul considerat este  $\rho_m = 7,956 \text{ kg/dm}^3$ .

### Monitorizarea condițiilor de mediu

Pe tot parcursul efectuării măsurărilor de etalonare a greutăților etalon ale mașinii de 10 kN (36 zile) au fost monitorizate condițiile de mediu (temperatură, presiune atmosferică și umiditate relativă). Rezultatele au fost utilizate pentru determinarea densității aerului. Deși nu au fost aplicate corecții, rezultatele obținute au stat la baza urmării păstrării condițiilor de mediu în limitele necesare pentru încadrarea componentei incertitudinii de măsurare aferente variației condițiilor de mediu în limitele prestabilite. În tabelul 8.2 sunt redate valorile medii măsurate ale parametrilor de mediu, pe parcursul determinărilor maselor greutăților etalon.

**Tabelul 8.2:** Condiții de mediu la etalonarea greutăților mașinii de forță de 10 kN

<b>Data</b>	<b>Temperatura aerului °C</b>	<b>Presiunea atmosferică hPa</b>	<b>Umiditate relativă %</b>	<b>Densitatea aerului kg/m<sup>3</sup></b>
20.04.2005	998,8	42	22,6	1,172
21.04.2005	999,7	45	23,1	1,170
22.04.2005	1006,3	43	23,1	1,178
25.04.2005	1005,8	50	22,8	1,178
26.04.2005	1009,3	45	22,4	1,184
27.04.2005	1008,3	44	22,2	1,184
28.04.2005	1010,1	48	21,9	1,187
29.04.2005	1002,9	52	22,6	1,175
02.05.2005	1001,8	54	23,1	1,171
03.05.2005	999,7	55	22,7	1,171
04.05.2005	999,9	58	22,4	1,172
05.05.2005	1000,5	54	23,1	1,170
06.05.2005	1010,2	62	22,7	1,182
09.05.2005	1013,1	52	23,1	1,185
10.05.2005	1011,7	43	22,4	1,188
11.05.2005	1000,2	44	23,1	1,171
12.05.2005	1001,9	53	22,4	1,175
13.05.2005	1012,2	49	23,2	1,184
16.05.2005	1006,4	42	22,3	1,182
17.05.2005	1002,2	41	22,9	1,174
18.05.2005	999,8	65	23,1	1,168
19.05.2005	1008,4	57	22,2	1,183
20.05.2005	1009,9	55	23,3	1,180
23.05.2005	1000,6	54	22,2	1,174
24.05.2005	1005,7	60	22,7	1,177
25.05.2005	1002,9	53	23,3	1,172
26.05.2005	1001,3	52	22,5	1,174
27.05.2005	999,8	60	23,0	1,169
30.05.2005	1004,2	67	22,4	1,176
31.05.2005	1000,8	62	22,1	1,174
01.06.2005	1001,7	56	23,0	1,172
02.06.2005	1006,9	42	22,7	1,181
03.06.2005	1012,0	46	23,2	1,184
06.06.2005	1013,7	67	22,8	1,185
07.06.2005	1000,1	56	22,0	1,174
08.06.2005	1009,2	55	22,8	1,181



### Etalonarea greutăților

Pentru etalonarea greutăților mașinii etalon de forță de 10 kN a fost construit un comparator de masă care să poată realiza exactitatea necesară. Având în vedere că masa unei greutăți etalon, pentru reproducerea unei trepte de forță de 500 N este de aproximativ 51 kg, pentru realizarea comparatorului de masă a fost aleasă o celulă de cântărire tip HBM, tip Z6FC6, având caracteristicile tehnice și metrologice principale conform tabelului 8.3.

**Tabelul 8.3:** Caracteristici tehnice ale celulei de cântărire

Caracteristici tehnice	Unități de măsură	Valori nominale
Clasa de exactitate, conform OIML R60	-	C6
Număr de diviziuni, conform OIML R60	-	6000
Domeniul nominal ( $E_{max}$ )	kg	50
Limita minimă a domeniului de măsurare	% din $E_{max}$	0,0066
Sensibilitate ( $C_n$ )	mV/V	2
Efectul temperaturii asupra valorii de zero	% din $C_n/10$ K	$\leq \pm 0,0093$
Eroarea de hysterezis	% din $C_n$	$\leq \pm 0,0080$
Eroarea de liniaritate	% din $C_n$	$\leq \pm 0,0110$
Fluaj la 30 min	% din $C_n$	$\leq \pm 0,0083$
Rezistență de intrare	$\Omega$	350 - 480
Rezistență de ieșire	$\Omega$	$356 \pm 0,12$

Celula de cântărire a fost cuplată la un amplificator tensometric tip DMP 40 S, de fabricație HBM, clasa de exactitate 0,0005, având o rezoluție de  $10^{-6}$  mV/V pentru domeniul nominal de 2 mV/V. Rezoluția exprimată în unități de masă este, în acest caz, pentru sistemul celulă de cântărire- amplificator tensometric, de 25 mg pentru domeniul nominal de 50 kg.

Comparatorul de masă realizat este asistat de un calculator electronic.

Pentru realizarea condițiilor de repetabilitate a măsurărilor, comparatorul de masă a fost construit astfel încât să realizeze următoarele caracteristici tehnice:

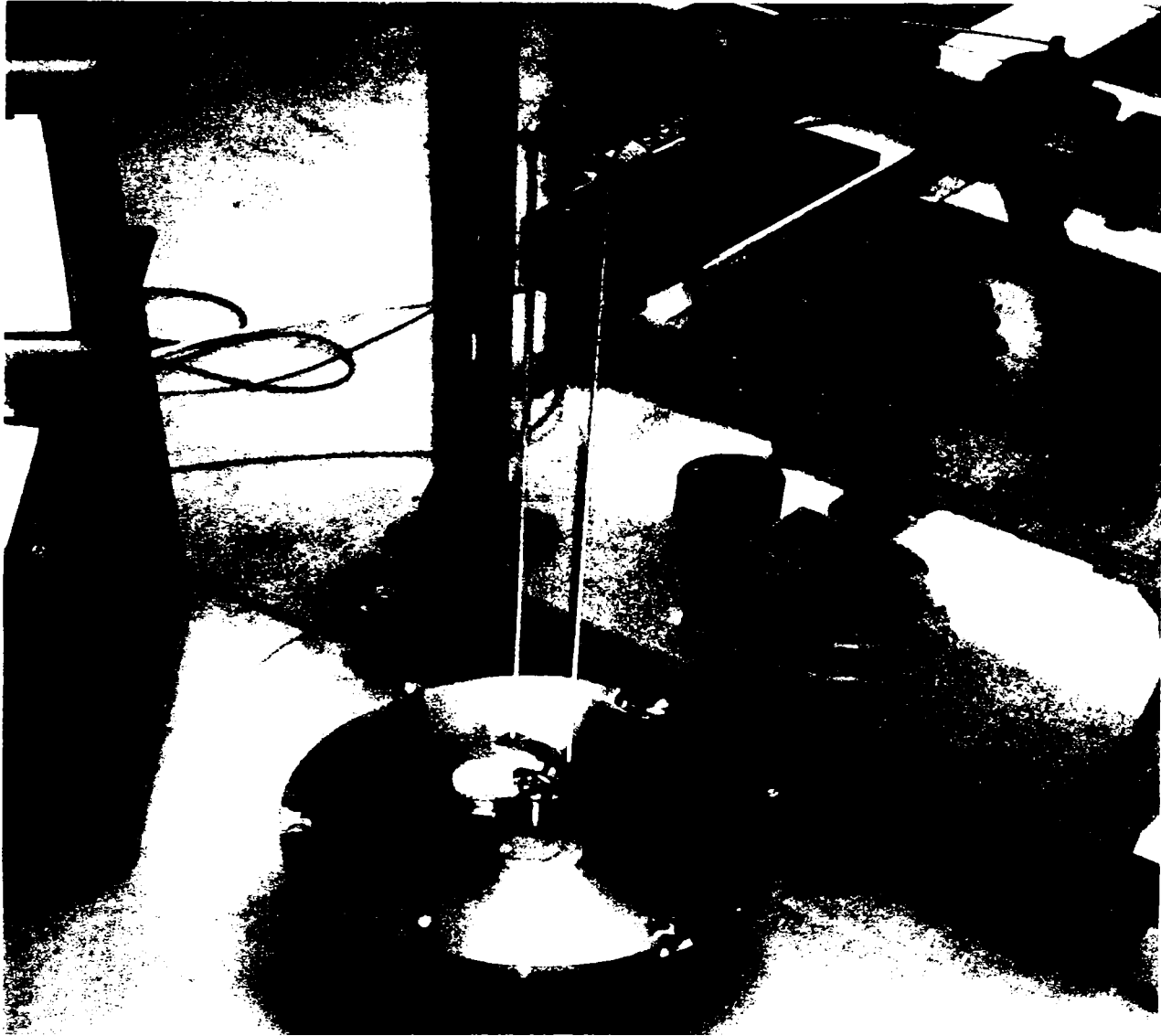
- preluarea maselor etalon și a celor de cântărit de la aceeași înălțime;
- aceeași viteză de încărcare a masei etalon și a maselor de etalonat;
- inițializarea și finalizarea procesului de cântărire după aceleași intervale de timp de la aplicarea sarcinilor corespunzătoare etalonului utilizat, respectiv a masei de etalonat;
- efectuarea automată a unui număr de aproximativ 1000 de măsurări a sarcinii aplicate, pentru fiecare cântărire, filtrarea numerică cu filtru de tip Bessel și rejectarea valorilor anormale;
- interpretarea statistică automată a datelor rezultate din procesul de cântărire, calculul mediei aritmetice și a abaterii medii pătratice.

În figura 8.5 este prezentată imaginea comparatorului de masă de 50 kg, realizat pentru etalonarea greutăților etalon ale mașinii de forță cu încărcare directă de 10 kN.

Valoarea masei greutăților etalon corespunzătoare forței reproduse de 500 N se calculează conform ecuației (6.11). În această ecuație, valorile parametrilor în funcție de care se exprimă masa greutăților etalon sunt:

- valoarea forței reproduse,  $F = 500 \text{ N}$
- valoarea medie a accelerației gravitaționale locale,  $g_{loc} = 9,806\,762\,4 \text{ m/s}^2$
- valoarea normală a densității aerului,  $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$
- valoarea densității materialului greutăților etalon,  $\rho_m = 7,956 \text{ kg/dm}^3$

Valoarea calculată a masei unei greutăți etalon a mașinii de forță cu încărcare directă de 10 kN este, în acest caz,  $m_N = 50,992\,916 \text{ kg}$ .



**Figura 8.5:** Comparatorul de masă de 50 kg

Etaloanele de masă utilizate pentru etalonarea greutăților mașinii etalon de 10 kN sunt redată în tabelul 8.4.

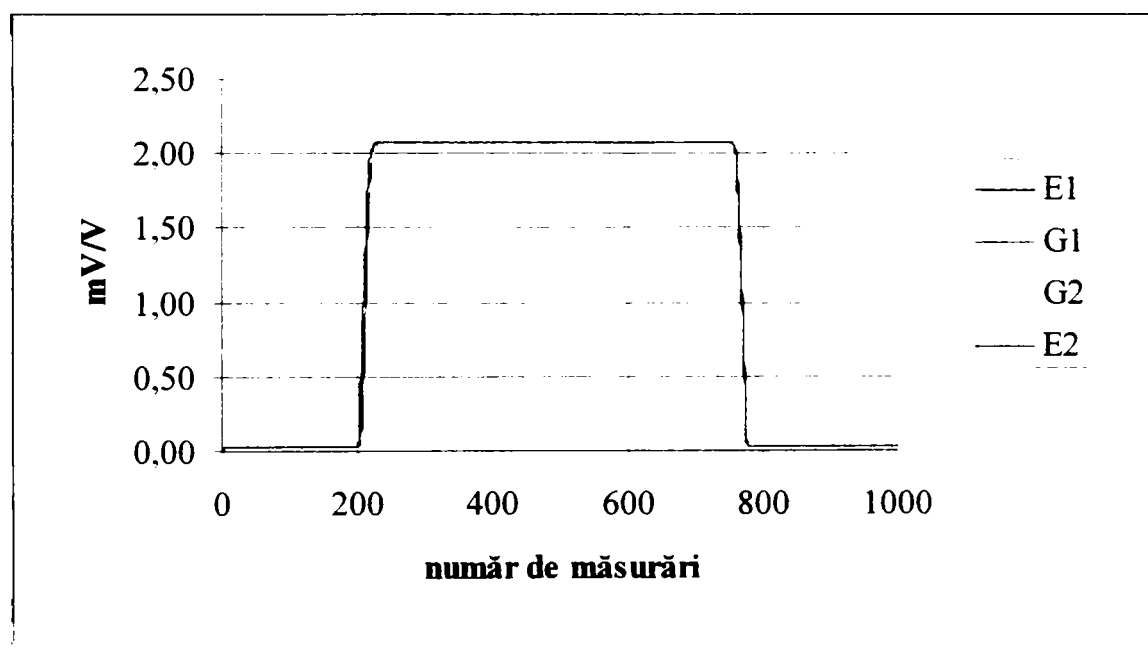
**Tabelul 8.4 :** Etaloanele masă utilizate la etalonarea greutăților de 500 N

<b>Nr. crt.</b>	<b>Identificarea masei etalon</b>	<b>Masa certificată</b>	<b>Incertitudine absolută</b>	<b>Incertitudine relativă</b>
1.	Masa nominală 20 kg, seria 9	20,000 010 kg	16 mg	$0,8 \times 10^{-6}$
2.	Masa nominală 20 kg, seria 26	20,000 006 kg	16 mg	$0,8 \times 10^{-6}$
3.	Masa nominală 10 kg, seria 9	10,000 014 kg	10 mg	$1,0 \times 10^{-6}$
4.	Mase etalon de completare- set mase etalon de la 1 mg la 1 kg	0,992 886 kg	3 mg	$3,0 \times 10^{-6}$
<b>Total</b>		<b>50,992 916 kg</b>	<b>25 mg</b>	<b><math>0,5 \times 10^{-6}</math></b>

Metoda utilizată pentru etalonarea greutăților mașinii etalon cu încărcare directă de 10 kN este metoda substituției, descrisă la capitolul 6.1.1. Prin cumularea maselor etalon specificate la pozițiile 1 până la 4 din tabelul 8.4 a fost constituită masa etalon, denumită în continuare „etalonul E”. Această masă etalon a fost utilizată pentru etalonarea unei greutăți, una din greutățile etalon ale mașinii de forță de 10 kN, denumită în continuare „greutatea G”. Această greutate va fi utilizată ca etalon de forță, având forța nominală de 500 N, pentru etalonarea tuturor greutăților mașinii etalon de 10 kN. Utilizarea acestei greutăți, ca etalon intermediar, a fost preferată utilizării repetate a pachetului de mase etalon, constituit din masele specificate la pozițiile 1 până la 4 din tabelul 8.4, datorită ușurinței manevrării acestora, ceea ce a condus la creșterea gradului de repetabilitate a procesului de etalonare și, în consecință, la scăderea incertitudinii de măsurare.

Utilizând comparatorul de masă prezentat în figura 8.5, au fost cântărite alternativ etalonul E și greutatea de etalonat G, în secvența: E1, G1, G2, E2 ; E3, G3, G4, E4 .... Măsurările au fost efectuate în regim dinamic, în aproximativ 222 secunde pentru o secvență memorându-se 1000 de valori pentru fiecare cântărire a etalonului E, respectiv a greutății G (au fost efectuate aproximativ 4,5 măsurări pe secundă).

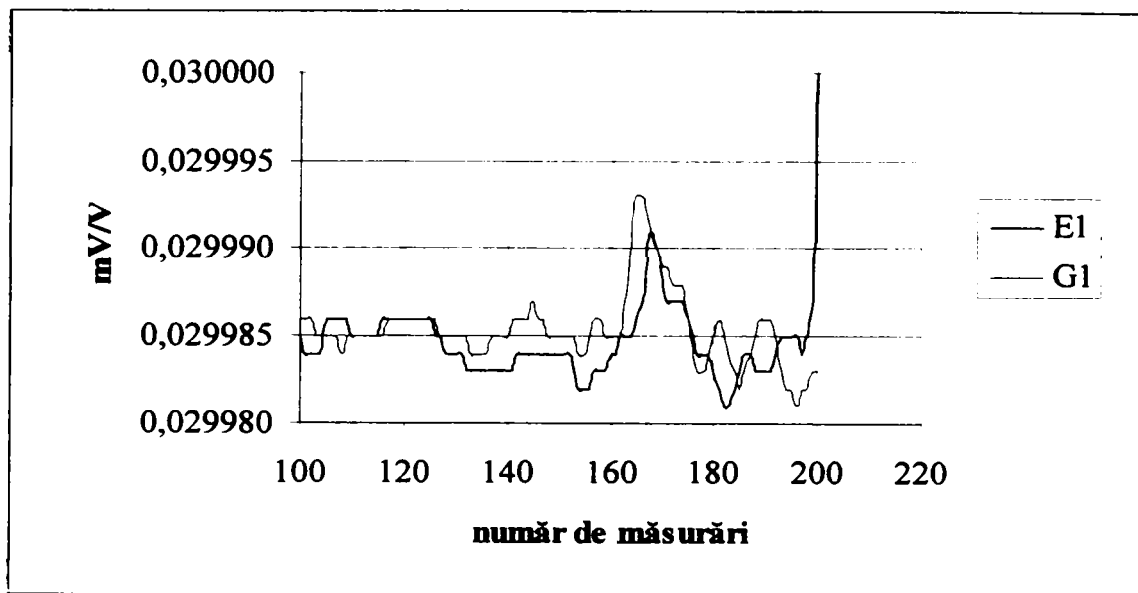
În figura 8.6 este redat, sub formă grafică, rezultatul comparării greutății G cu masa etalon E, pentru prima secvență (E1, G1, G2, E2), conform procedurii prezentate.



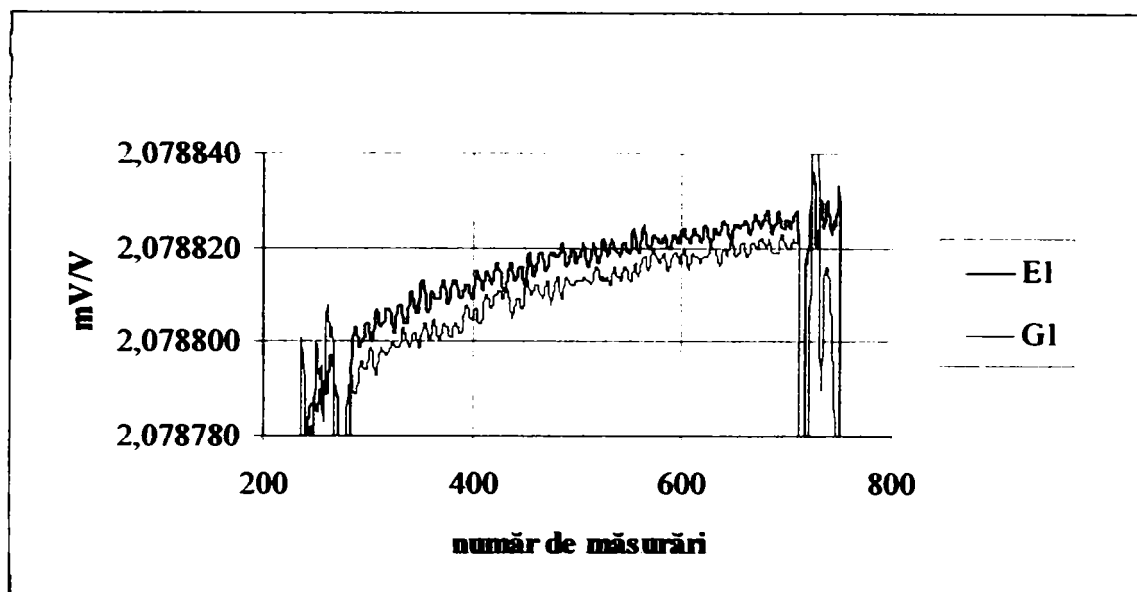
**Figura 8.6:** Rezultatul etalonării greutății G, prima secvență

Din figura 8.6 rezultă că diferențele obținute între valoarea masei etalon E și valoarea masei greutății G sunt suficient de mici pentru a fi compensate printr-o corecție de tarare (adăugare sau extragere de material pentru aducerea valorii masei la valoarea nominală calculată). Incertitudinea asociată acestei corecții poate fi neglijată.

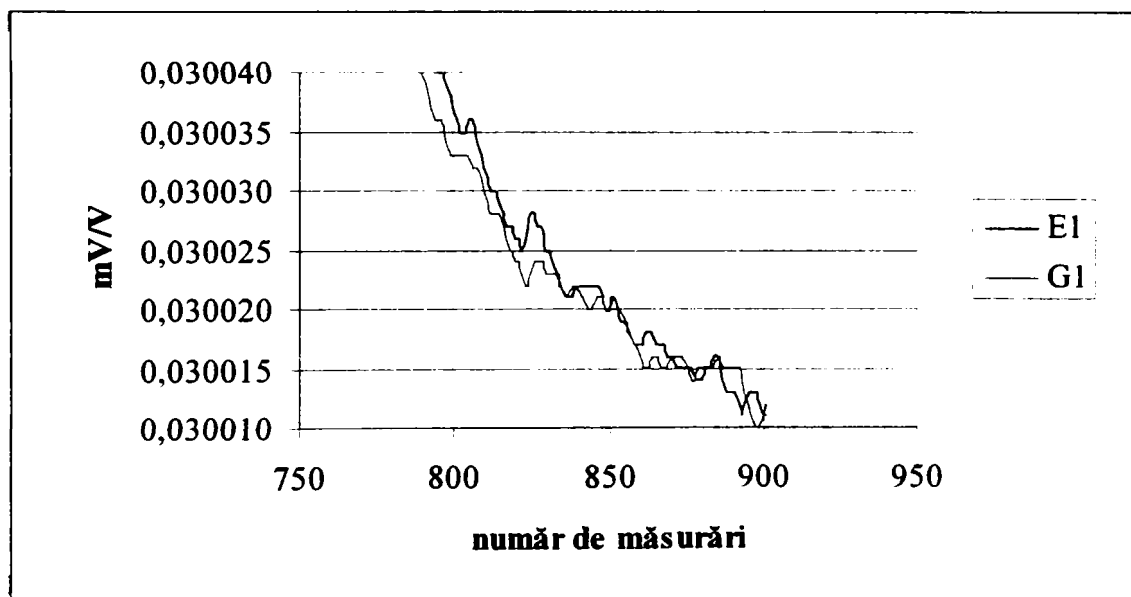
Pentru determinarea valorii corecției, precum și pentru obținerea de informații necesare întocmirii bugetului incertitudinii de etalonare, este necesar să se studieze atent diferențele obținute între rezultatele de cântărire ale greutății G și cele obținute pentru etalonul E. Astfel, în figurile 8.6 a), b) și c) sunt redate reprezentările grafice ale valorilor obținute în procesul de etalonare a greutății G, cu o amplificare de aproximativ 5000 ori a valorilor reprezentate în figura 8.6.



a)



b)



c)

Figura 8.7: Rezultatul etalonării greutății G, prima secvență, reprezentare amplificată

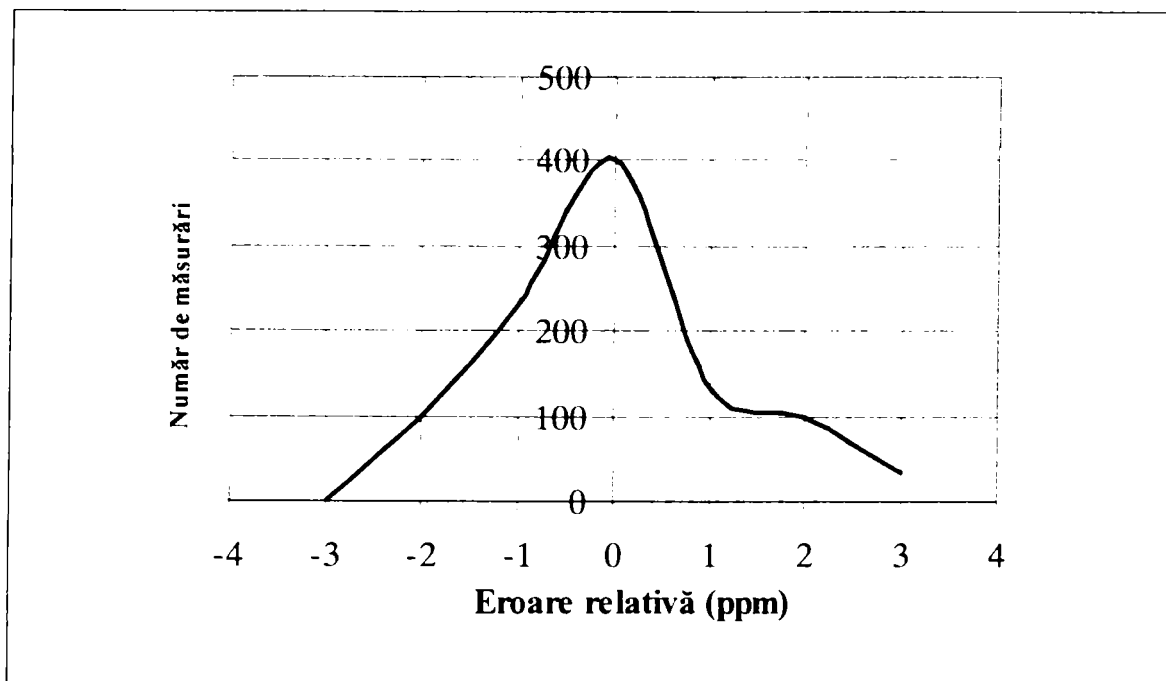
În figura 8.7 sunt reprezentate grafic trei zone importante pentru evaluarea rezultatelor de etalonare a greutății  $G$ , prin comparare cu etalonul  $E$ .

- În figura 8.7 a) este reprezentat semnalul de ieșire al comparatorului de masă în absența semnalului de intrare (fără sarcină). Se constată o variație a indicației în valoare apreciată de  $\pm 2$  digiți (mV/V), respectiv o rezoluție relativă de  $1 \times 10^{-6}$ , calculată pentru valoarea de 2 000 000 digiți (mV/V) corespunzătoare domeniului maxim de forță de 500 N.
- În figura 8.7 b) este reprezentat semnalul de ieșire al comparatorului de masă la aplicarea masei etalon, respectiv a greutății de etalonat. Răspunsul celulei de cântărire a comparatorului de masă la semnalul treaptă reprezentat de aplicarea forței realizată de etalonul  $E$  sau de greutatea  $G$  este, evident, afectat de fluajul aferent celulei și al comparatorului în ansamblu. Este, totuși, important de observat că diferența dintre indicația comparatorului de masă la aplicarea etalonului  $E$  și cea obținută la aplicarea greutății  $G$  se păstrează constantă. Acest lucru face posibilă, prin interpretarea statistică a rezultatelor de măsurare, determinarea cu o incertitudine suficient de mică a diferenței dintre masa etalon și cea de etalonat, diferență care urmează să fie compensată prin corectarea tarării. Din aceeași figură se poate determina intervalul numărului de măsurări care trebuie luat în considerare la stabilirea corecțiilor. Astfel, în intervalul de timp imediat următor opririi încărcării precum și înaintea descărcării comparatorului de masă se evidențiază variații importante ale mărimii de ieșire. Acest lucru se datorează, în principal, influenței funcționării sistemului de antrenare (electric și mecanic) asupra traductorului de măsură, precum și a prezenței forțelor de inerție. Pentru o mai bună etalonare a greutății  $G$ , din valorile măsurate se exclud valorile aflate în primul și în ultimul interval de aplicare a forței (în cazul considerat, măsurările pentru comparare se situează în intervalul de număr de măsurări de la 540 la 690).
- În figura 8.7 c) este reprezentat semnalul de ieșire al comparatorului de masă în absența semnalului de intrare, după înlăturarea masei etalon  $E$ , respectiv a greutății de etalonat  $G$ . Se constată, în comparație cu datele prezentate în figura 8.7 a), o valoare importantă a influenței fluajului caracteristic traductorului de forță și a comparatorului de masă în ansamblu, asupra măsurării. Diferența dintre indicația comparatorului de masă la aplicarea etalonului  $E$  și cea obținută la aplicarea greutății  $G$  se păstrează, totuși, la valori relativ constante, ceea ce conduce la posibilitatea unei caracterizări bune a procesului de cântărire.

Pentru caracterizarea statistică a procesului de cântărire au fost calculate erorile relative  $\varepsilon_r$ , exprimate în părți pe milion (ppm), ale maselor determinate pentru greutatea  $G$  față de masa etalon  $E$ , utilizând relația  $\varepsilon_r = (G-E)/E$ , (unde  $G$  și  $E$  sunt valorile maselor determinate pentru greutatea  $G$ , respectiv pentru etalonul  $E$ , în cele 1000 de măsurări ale primei secvențe de măsurare).

Rezultatele obținute sunt prezentate, sub formă grafică, în figura 8.8. Erorile relative obținute au fost încadrate în domenii de erori relative, având lărgimea intervalului de valori de 1 ppm.

Din figura 8.8 se observă că distribuția statistică a erorilor relative calculate pe baza diferențelor dintre valorile determinate pentru greutatea de etalonat  $G$  și cele determinate pentru etalonul  $E$  este reprezentată printr-o curbă care se apropie de cea caracteristică unei distribuții normale. Acest lucru îndreptățește asumarea unei repartiții normale pentru rezultatele de măsurare a masei greutății  $G$ .



**Figura 8.8:** Distribuția de probabilitate a erorilor la etalonarea greutății de 500 N, seria 1

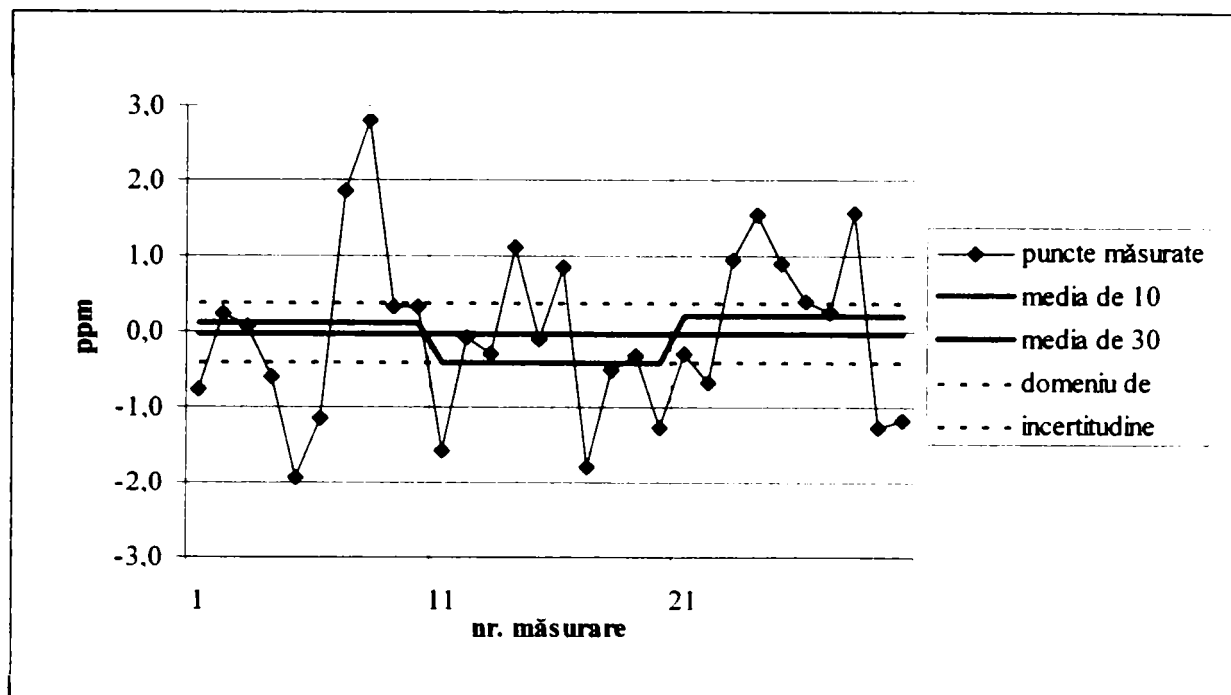
Având în vedere că greutatea G, seria 1, va fi utilizată la rândul ei ca etalon pentru etalonarea celorlalte 19 greutăți ale mașinii etalon de forță, tararea și etalonarea acestora a fost efectuată luându-se măsuri deosebite în vederea minimizării incertitudinii de etalonare. Astfel :

- au fost efectuate 30 de cicluri de măsurare urmând secvența E,G.G.E (un număr suficient de mare de măsurări pentru caracterizarea statistică a mediei valorilor obținute);
- măsurările au fost efectuate în aproximativ aceleași condiții de temperatură, presiune atmosferică și umiditate relativă ;
- echipamentele electronice utilizate au fost păstrate alimentate cu energie electrică pe toată durata măsurărilor, pentru minimizarea influenței regimurilor tranzitorii ale acestora asupra măsurării ;
- au fost create, cât mai bine cu putință, condiții de repetabilitate a procesului de măsurare (același operator, timpi egali de încărcare, descărcare și manevrare a masei etalon E și a greutății G, lipsă curenți de aer etc).

Pentru cele 30 de cicluri de măsurare au fost calculate mediile diferențelor relative între valorile maselor obținute în procesul de măsurare pentru greutatea G și masa etalonului E, utilizând relația  $\delta m = (G-E)/E$ , (unde  $G$  și  $E$  sunt valorile maselor determinate pentru greutatea G, respectiv pentru etalonul E, în cele  $30 \times 1000$  de măsurări efectuate în cursul secvențelor de măsurare).

În figura 8.9 sunt reprezentate grafic rezultatele obținute în cele 30 de cicluri de măsurări la etalonarea greutății G, seria 1. Rezultatele sunt prezentate ca diferențe relative dintre valorile determinate pentru greutatea G și valoarea masei etalonului E (care reproduce, în condițiile date, forța de 500 N), exprimate în părți pe milion (ppm). Pentru o mai bună posibilitate de interpretare, cele 30 de rezultatele de etalonare obținute au fost grupate în serii de câte 10 măsurări.





**Figura 8.9 :** Rezultatele etalonării greutății de 500 N, seria 1

Din interpretarea rezultatelor prezentate în figura 8.9 rezultă următoarele :

- valoarea medie a valorii greutății  $G$ , seria 1, este suficient de aproape de valoarea nominală de 500 N, astfel încât abaterea să fie neglijabilă ;
- abaterea standard relativă a mediei pentru cele 30 de măsurări este de 0,276 ppm, corespunzătoare unei abateri standard absolute a mediei de 13,8 mg.

Pe baza rezultatelor experimentale prezentate mai sus, precum și a considerațiilor expuse la capitolul 6.1.1 s-a întocmit bugetul de incertitudine pentru măsurările efectuate la etalonarea greutății de 500 N. Această greutate, particularizată prin atribuirea seriei nr.1, a fost utilizată, la rândul ei, ca etalon pentru etalonarea celorlalte greutăți ale mașinii de forță de 10 kN.

Bugetul de incertitudine rezultat în urma etalonării greutății etalon de 500 N, seria 1, este prezentat în tabelul 8.5. Semnificațiile simbolurilor mărimilor de intrare din tabelul 8.5 sunt cele precizate la capitolul 6.1.1 din prezenta teză de doctorat.

**Tabelul 8.5 :** Bugetul de incertitudini la etalonarea greutății de 500 N, seria 1

Mărimea	Estimația	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard $u(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $u_i(y)$
$X_i$	$x_i$				
$m_s$	50,992 916 kg	normală	25 mg	1	25 mg
$\delta m_D$	0	rectangulară	0,17 mg	1	0,17 mg
$\delta m$	0	normală	13,8 mg	1	13,8 mg
$\delta m_{REP}$	0	rectangulară	0,5 mg	1	0,5 mg
$\delta m_B$	0	rectangulară	1 mg	1	1 mg
$\delta m_{REZ}$	0	rectangulară	14,5 mg	1	14,5 mg
$m$	50,992 916 kg	normală			32 mg

Utilizând greutatea G, seria 1, au fost etalonate celelalte 19 greutăți ale mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN, conform aceleiași proceduri. Diferențele constatate dintre masa noului etalon (greutatea G, seria 1) și masele greutăților de etalonat au fost corectate prin retarare, nu au fost incluse în incertitudine. Incertitudinea asociată măsurărilor de etalonare a celor 19 greutăți etalon a fost estimată în același mod ca cea pentru greutatea G, seria 1, prezentată anterior. Pentru etalonarea celor 19 greutăți au fost efectuate câte șase cicluri de măsurare, în secvența prezentată anterior E,G,G,E. Desigur, în acest caz, componentele incertitudinilor compuse sunt cele determinate în urma rezultatelor obținute în procesul respectiv de măsurare. În tabelul 8.6 este prezentat, ca exemplu, bugetul de incertitudine rezultat la etalonarea greutății etalon de 500 N, seria 10.

**Tabelul 8.6 :** Bugetul de incertitudini la etalonarea greutății de 500 N, seria 10

Mărimea	Estimația	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard	Coefficient de sensibilitate	Contribuția la incertitudine
$X_i$	$x_i$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$
$m_s$	50,992 916 kg	normală	32 mg	1	32 mg
$\delta m_D$	0	rectangulară	0,02 mg	1	0,02 mg
$\delta m$	0	normală	14 mg	1	14 mg
$\delta m_{REP}$	0	rectangulară	0,5 mg	1	0,5 mg
$\delta m_B$	0	rectangulară	0,1 mg	1	0,1 mg
$\delta m_{REZ}$	0	rectangulară	14,5 mg	1	14,5 mg
<b><math>m</math></b>	<b>50,992 916 kg</b>	<b>normală</b>			<b>38 mg</b>

Din tabelul 8.6 rezultă următoarele:

- incertitudinea standard a etalonului utilizat este cea asociată etalonării greutății G, seria 1;
- incertitudinea asociată derivei etalonului este apreciată ca fiind mult mai mică decât cea prezentată în tabelul 8.5, având în vedere că intervalul de timp scurs de la efectuarea măsurărilor de determinare a valorii masei greutății G, seria 1, până la efectuarea măsurărilor de etalonare a celor 19 greutăți etalon este relativ mic (aproximativ 30 de zile);
- incertitudinile asociate rezultatelor de etalonare, prin care au fost stabilite diferențele dintre masa etalon (greutatea G, seria 1) și masele celorlalte 19 greutăți ale mașinii etalon de forță, sunt cele determinate prin analiza statistică a procesului respectiv de etalonare;
- deoarece a fost utilizat același comparator de masă, incertitudinea asociată repetabilității rezultatelor de etalonare, precum și cea asociată rezoluției au fost considerate ca fiind aceleași ca în cazul etalonării greutății G, seria 1;
- prin utilizarea unui etalon având caracteristici de material foarte apropiate (aproape identice) cu cele ale greutăților de etalonat, incertitudinea asociată corecției forței ascensionale a aerului este mult mai mică.

În tabelul 8.7 sunt redată rezultatele etalonării greutăților din componența mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN.

**Tabelul 8.7:** Valorile de etalonare a greutăților mașinii etalon de forță de 10 kN

Identificare greutate	Diferență determinată (corectată) g	Abatere medie pătratică mg	Abatere pătratică a mediei mg	Incertitudine standard absolută mg	Incertitudine standard relativă ppm
Seria 1	0	-	-	32	0,64
Seria 2	0,121	56	25	41	0,81
Seria 3	0,084	69	31	45	0,89
Seria 4	- 0,002	43	19	37	0,74
Seria 5	0,017	70	31	45	0,89
Seria 6	0,548	52	23	39	0,79
Seria 7	0,040	50	22	39	0,78
Seria 8	0,029	18	8	33	0,66
Seria 9	0,049	31	14	35	0,70
Seria 10	0,402	32	14	35	0,70
Seria 11	- 0,320	57	26	41	0,82
Seria 12	0,032	34	15	35	0,71
Seria 13	1,617	36	16	36	0,72
Seria 14	0,052	41	18	37	0,73
Seria 15	- 0,157	48	22	39	0,78
Seria 16	0,390	38	17	36	0,72
Seria 17	- 1,134	54	24	40	0,80
Seria 18	- 0,013	41	18	37	0,73
Seria 19	- 0,069	41	18	37	0,73
Seria 20	0,085	54	24	40	0,80

Valorile incertitudinilor standard asociate rezultatelor de etalonare a greutăților etalon ale mașinii cu încărcare directă de 10 kN, prezentate în tabelul 8.7, sunt considerate corelate foarte puternic, deoarece au fost determinate utilizând aceleași etaloane, același comparator de masă și același operator. Gradul de corelare este, în acest caz,  $r = 1$ .

Incertitudinea standard asociată rezultatului de etalonare a masei care reproduce forța maximă a mașinii etalon de forță (10 kN) este, în acest caz:  $u(m) = 758$  mg, corespunzătoare unei incertitudini standard relative:  $w(m) = 0,76$  ppm.

Incertitudinea de etalonare a greutăților din componența mașinii etalon cu încărcare directă de 10 kN este utilizată, în continuare, ca factor contributiv la estimarea incertitudinii de reproducere a forței asociată mașinii, în întreg ansamblul ei.

#### Realizarea și testarea mașinii etalon de forță de 10 kN

În urma acțiunilor întreprinse pentru optimizare, a rezultat „noua mașină de forță cu încărcare directă de 10 kN”. Principalele modificări, față de „vechea mașină de forță” sunt următoarele:

- utilizarea noilor greutăți etalon de 500 N;
- modificarea sistemului de prindere și antrenare a greutăților;
- modificarea structurii de susținere mecanică a mașinii de forță;
- automatizarea procesului de funcționare (conducerea cu calculatorul).

În noul sistem, greutatea sunt antrenate succesiv la încărcare, începând cu greutatea de deasupra pachetului și terminând cu greutatea cea mai de jos. Astfel, prin încărcarea „tip lanț” centrul de greutate al pachetului de greutăți etalon coboară pe măsură ce forța aplicată crește, ceea ce sporește foarte mult stabilitatea sistemului.

Sistemul de antrenare a pachetului de greutăți, cuprinde un motor electric acționat prin intermediul unui variator de turație, comandat printr-un calculator electronic. Programul de acționare permite viteze diferite de deplasare a greutăților etalon, realizate la încărcare, respectiv descărcare. Deplasarea sistemului între două trepte succesive de încărcare/ descărcare se face cu o viteză relativ mare (aproximativ 5 mm/s), pentru micșorarea, pe cât posibil, a timpului de încercare a dinamometrelor la utilizarea mașinii de forță. Pe de altă parte, în apropierea momentului de încărcare/ descărcare a treptelor de forță, pentru minimizarea influențelor variației forțelor de antrenare asupra incertitudinii mașinii etalon, viteza de încărcare/ descărcare este redusă până la aproximativ 1 mm/s.

În figura 8.10 este prezentată mașina etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN, realizată ca urmare a aplicării studiilor din prezenta teză de doctorat.

Mașina etalon de forță prezentată în figura 8.10 a fost testată, în regim dinamic, pentru demonstrarea capacității de reproducere a treptelor de forță cu o incertitudine satisfăcătoare.

Astfel, au fost efectuate cicluri de încărcare și descărcare a celor 20 de greutăți etalon, urmărindu-se variația forței aplicate prin intermediul unui traductor electric de forță cu domeniul nominal de 10 kN, tip celulă de sarcină, amplificatorul tensometric utilizat având o rezoluție de 2 000 000 mV/V corespunzătoare domeniului maxim și o exactitate de 0, 0005 % din valoarea măsurată. Rezultatele de măsurare au fost achiziționate prin intermediul unei interfețe corespunzătoare și prelucrate cu ajutorul calculatorului electronic.

În figurile 8.11 a), b) și c) este prezentat, ca exemplu, răspunsul sistemului constituit din mașina etalon de forță de 10 kN la aplicarea treptelor de forță de 500 N, 4500 N și 9500 N. Se precizează că răspunsul este caracteristic aplicării forței în mod dinamic. Nu s-a efectuat oprirea încărcării în momentul realizării forței, așa cum, în mod normal, se procedează atunci când se etalonează dinamometre. Se poate aprecia, în acest mod, inclusiv perturbațiile introduse de sistemul de antrenare a greutăților.

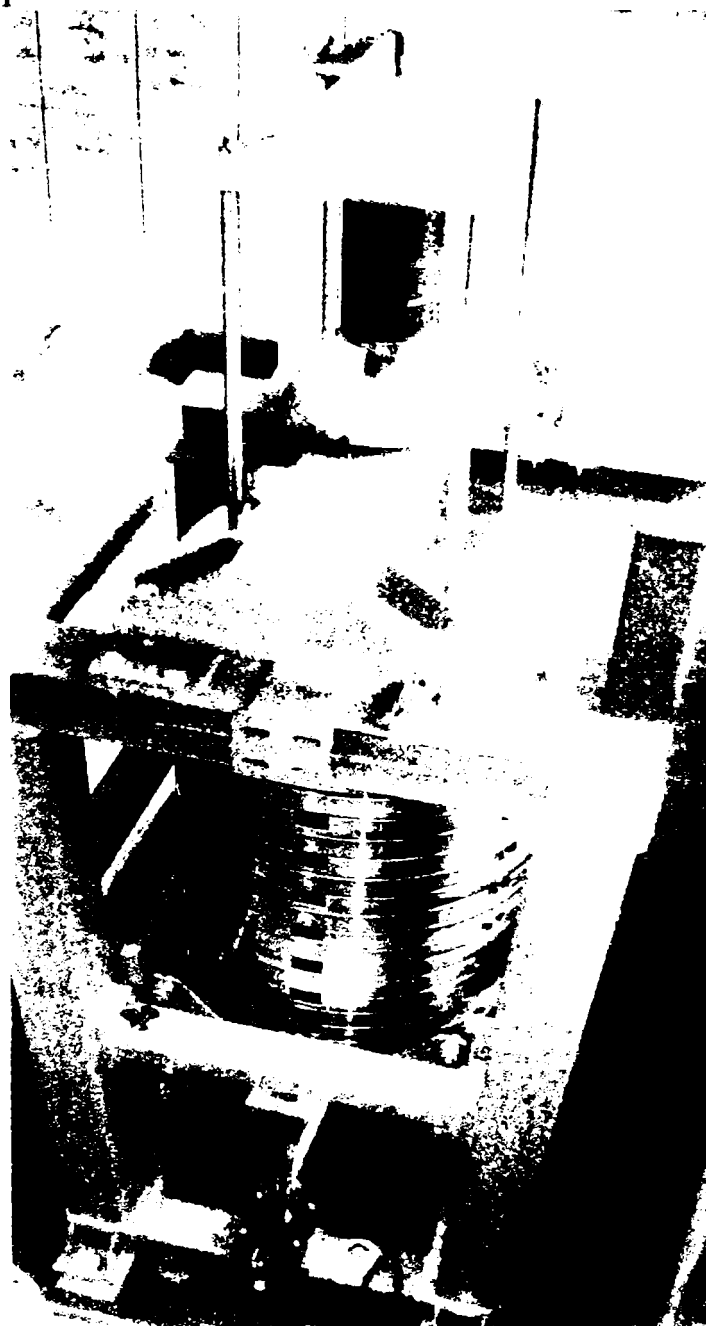
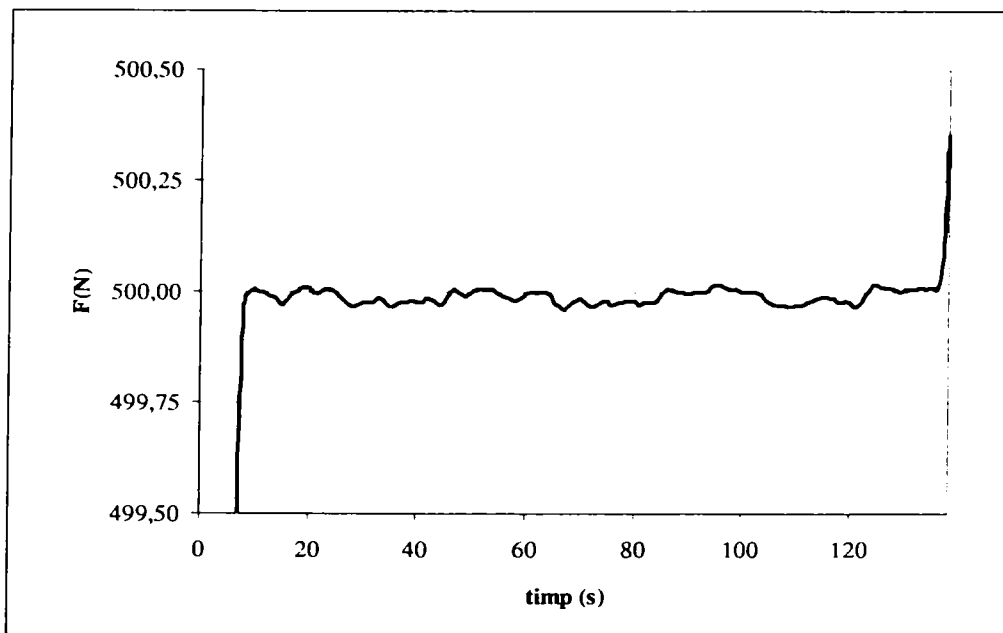
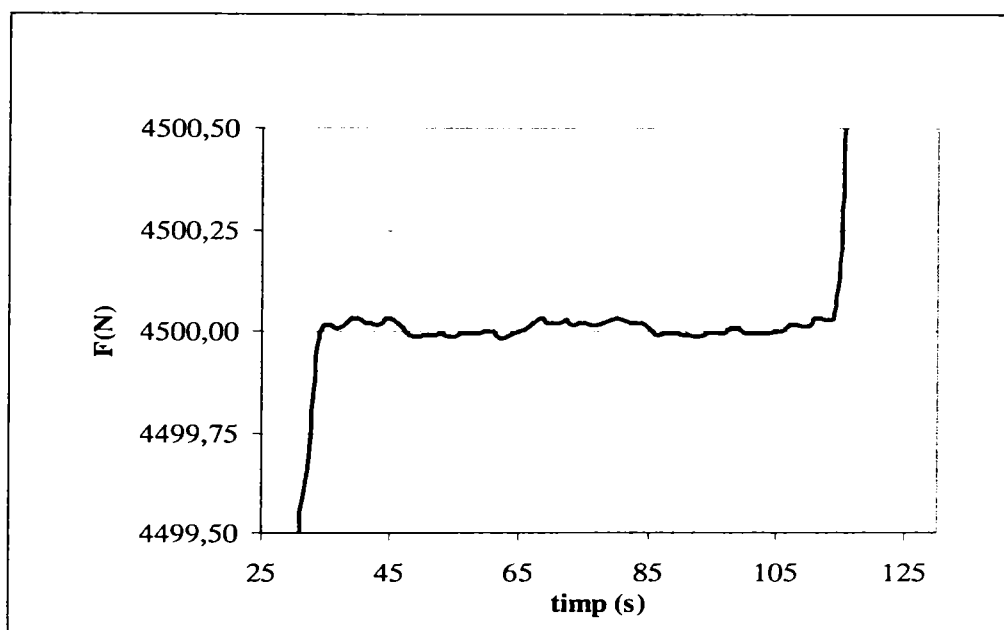


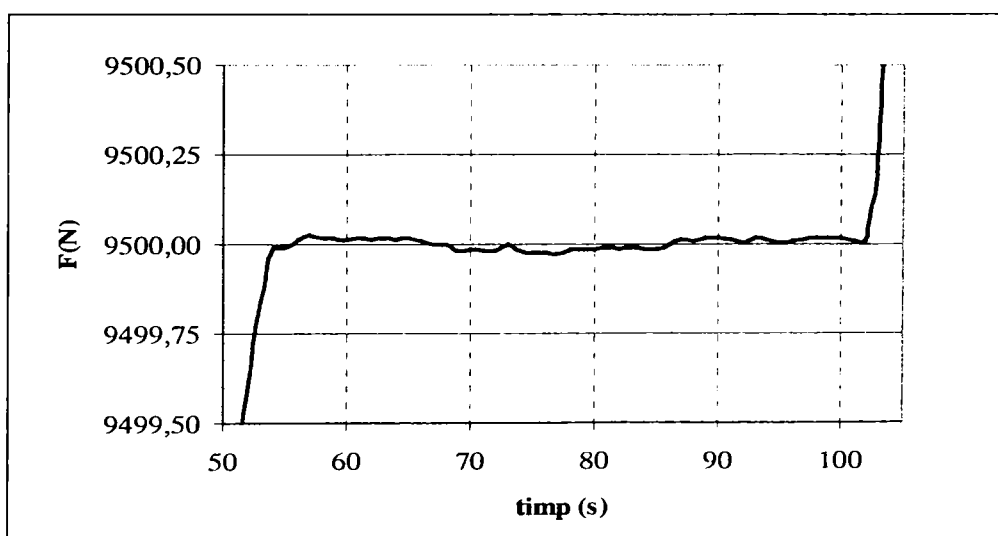
Figura 8.10: Mașina etalon de forță de 10 kN



a)



b)



c)

**Figura 8.11:** Răspunsul dinamic al mașinii etalon de forță de 10 kN.

Din figura 8.11 rezultă că stabilitatea sistemului constituit din mașina etalon de forță de 10 kN la semnal treaptă este foarte bună, practic relevându-se doar răspunsul la vibrațiile datorate funcționării sistemului de antrenare a greutăților, care se situează la un nivel de aproximativ 3 cN.

### 8.1.3 Determinarea performanțelor metrologice

Pentru determinarea performanțelor metrologice ale mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN au fost efectuate comparări internaționale, laboratorul de referință ales fiind cel al Institutului de Fizică Tehnică Braunschweig (PTB) din Germania.

În conformitate cu procedura prezentată la capitolul 7.3.1 din prezenta teză de doctorat, au fost efectuate măsurări succesive, asupra unui etalon de transfer având domeniul nominal de 10 kN, în laboratorul de forțe PTB și în Laboratorul Forțe Timișoara.

În tabelul 8.8 și tabelul 8.9 sunt redate rezultatele obținute la etalonarea traductorului de transfer de 10 kN utilizând mașina etalon de forță de 10 kN a laboratorului de forță al PTB Germania, respectiv mașina etalon de forță de 10 kN a Laboratorului Forțe Timișoara.

Au fost efectuate următoarele serii de măsurări:

- X1, X2: serii de măsurări, la valori crescătoare, fără rotația traductorului de transfer
- X3, X4: serii de măsurări, la valori crescătoare, cu rotația traductorului de transfer la 90° față de poziția inițială
- X5, X6: serii de măsurări, la valori crescătoare, cu rotația traductorului de transfer cu 270° față de poziția inițială
- X7: serie de măsurări, la valori crescătoare, cu rotația traductorului de transfer cu 270° față de poziția inițială
- X8: serie de măsurări, la valori descrescătoare, cu rotația traductorului de transfer cu 270° față de poziția inițială

**Tabelul 8.8:** Etalonarea traductorului de transfer de 10 kN la PTB Germania

Forța kN	Răspunsul traductorului, în mV/V							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000006
2	0,400094	0,400086	0,400081	0,400089	0,400078	0,400100	0,400084	0,400101
4	0,800188	0,800175	0,800171	0,800181	0,800167	0,800195	0,800173	0,800198
8	1,600405	1,600394	1,600380	1,600388	1,600374	1,600382	1,600373	1,600381
10	2,000522	2,000508	2,000489	2,000498	2,000480	2,000480	2,000477	2,000477

**Tabelul 8.9:** Etalonarea traductorului de transfer de 10 kN în laboratorul Timișoara

Forța kN	Răspunsul traductorului, în mV/V							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000008
2	0,400073	0,400075	0,400062	0,400082	0,400074	0,400099	0,400068	0,400083
4	0,800158	0,800154	0,800141	0,800181	0,800159	0,800173	0,800159	0,800169
8	1,600364	1,600337	1,600368	1,600380	1,600375	1,600382	1,600323	1,600331
10	2,000426	2,000435	2,000480	2,000496	2,000523	2,000483	2,000432	2,000432



În tabelul 8.10 sunt redate rezultatele comparative obținute la etalonarea traductorului de transfer la PTB Germania, respectiv în Laboratorul Forțe Timișoara.

**Tabelul 8.10:** Rezultate comparative pentru mașina de forță de 10 kN

Forța N	Valori medii PTB Germania mV/V	Valori medii Laborator Timișoara mV/V	Diferențe relative %	Incertitudine relativă PTB Germania %	Incertitudine relativă Lab. Timișoara %
2	0,4000874	0,4000761	-0,00282	0,0045	0,0040
4	0,8001786	0,8001607	-0,00223	0,0035	0,0045
8	1,6003851	1,6003613	-0,00149	0,0030	0,0040
10	2,0004934	2,0004679	-0,00128	0,0030	0,0035

Pe baza rezultatelor experimentale prezentate mai sus și utilizând considerațiile teoretice prezentate în cadrul capitolul 6.1 se poate estima incertitudinea de reproducere a forței, asociată rezultatelor de etalonare la utilizarea mașinii etalon cu încărcare directă de 10 kN.

Plecând de la ecuația (6.9), a fost stabilit bugetul de incertitudine pentru exprimarea capabilității de măsurare și etalonare (*cmc*) pentru mașina etalon de forță de 10 kN, redat în tabelul 8.11.

**Tabelul 8.10 :** Bugetul de incertitudini pentru mașina etalon de forță de 10 kN

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard relativă $w(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $w_i(y)$
$m$	1019,858320 kg	normală	$0,8 \times 10^{-6}$	1	$0,8 \times 10^{-6}$
$g_{loc}$	9,8067624 m/s <sup>2</sup>	rectangulară	$0,143 \times 10^{-6}$	1	$0,143 \times 10^{-6}$
$\rho_a$	- 1,51 N	normală	$1000 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$0,15 \times 10^{-6}$
$\rho_m$		normală	$500 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$0,08 \times 10^{-6}$
$F_{FCM}$	<b>10 000,00 N</b>	<b>normală</b>			<b><math>0,83 \times 10^{-6}</math></b>

Pe baza rezultatelor prezentate în tabelul 8.10 se poate estima cea mai bună capabilitate de măsurare a mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN.

Astfel, pe baza compunerii incertitudinilor standard parțiale asociate mărimilor de intrare a fost stabilită incertitudinea standard relativă asociată mărimii de ieșire- forța reprodusă de mașina etalon- având valoarea de  $0,83 \times 10^{-6}$ .

Pentru caracterizarea capabilității de măsurare și etalonare (*cmc*) a mașinii etalon de forță se utilizează valoarea incertitudinii extinse. Având în vedere că distribuția de probabilitate dominantă este cea normală, factorul de extindere poate fi considerat, pentru un nivel de încredere de aproximativ 95 %, ca fiind  $k = 2$ . În aceste condiții, incertitudinea extinsă relativă de realizare a forței asociată mașinii etalon de forță de 10 kN ar putea fi evaluată la  $1,7 \times 10^{-6}$ . Totuși, pentru evaluarea corectă a *cmc*, trebuie luate în considerare și rezultatele obținute la comparările internaționale.

În bugetul de incertitudini prezentat în tabelul 8.11 este evaluată incertitudinea relativă asociată asigurării trasabilității internaționale, plecând de la ecuația (6.10).

**Tabelul 8.11 : Bugetul de incertitudini la trasabilitatea internațională a mașinii de 10 kN**

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incetitudinea standard relativă $w(x_i)$	Coeeficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $w_i(y)$
$\bar{F}_{FCM}$	0	normală	$35 \times 10^{-6}$	1	$35 \times 10^{-6}$
$\Delta_{HysFCM}$	0	rectangulară	$6 \times 10^{-6}$	1	$6 \times 10^{-6}$
$\Delta_{DriftTra}$	0	rectangulară	$1 \times 10^{-6}$	1	$1 \times 10^{-6}$
$\bar{F}_{FSM}$	0	normală	$30 \times 10^{-6}$	1	$30 \times 10^{-6}$
$\Delta_{IncFSM}$	0	normală	$10 \times 10^{-6}$	1	$10 \times 10^{-6}$
$\Delta_{Tras}$	<b>0</b>	<b>normală</b>			<b><math>48 \times 10^{-6}</math></b>

Din compunerea incertitudinilor standard relative rezultate din tabelele 8.10 și 8.11, considerate ca asociate unor mărimi necorelate, rezultă incertitudinea standard compusă relativă asociată valorilor de măsurare efectuate cu mașina etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN:  $w(F_{FCM}) \approx 5 \times 10^{-5}$ .

Această incertitudine a fost declarată capabilitate de măsurare și etalonare (*cmc*), pentru domeniul respectiv de forțe, în cadrul acordului MRA, încheiat între institutele naționale de metrologie, sub egida Conferinței Internaționale de Greutăți și Măsuri (CIPM). Capabilitatea de măsurare și etalonare declarată a fost acceptată de către comitetul tehnic de specialitate al CIPM, pe baza activităților întreprinse și a dovezilor prezentate de către Laboratorul Forțe Timișoara. Acceptarea capabilității de măsurare și etalonare este documentată prin publicarea acesteia pe pagina oficială de internet a Biroului Internațional de Greutăți și Măsuri (BIPM).

## 8.2 Realizarea mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN

În același mod cu cel prezentat la capitolul 8.1, mașina de forță de 100 kN existentă înainte de aplicarea procesului de optimizare a fost supusă unor investigații amănunțite pentru determinarea performanțelor tehnice și metrologice. Principala acțiune de identificare a sistemului a fost, asemănător procesului descris pentru mașina etalon de forță de 10 kN, studiul regimurilor tranzitorii la aplicarea treptelor de forță succesive ale mașinii etalon. În plus, au fost aplicate, pentru aceeași treaptă de încărcare, impulsuri de identificare constând în deplasarea greutăților etalon fără a încărca sistemul de forță. Pe baza observațiilor din procesul de identificare au fost stabilite și implementate măsuri de optimizare (în special după criteriul asigurării performanțelor metrologice necesare declarării mașinii ca etalon național de forță). Pentru demonstrarea performanțelor sistemului optimizat au fost efectuate încercări ale sistemului constituit din mașina de forță modificată, precum și comparări internaționale. Aceste activități, prezentate organismelor competente, au stat la baza recunoașterii naționale și internaționale ale etalonului de forță.

## 8.2.1 Identificarea sistemului

Pentru identificarea sistemului constituit din mașina etalon de forță de 100 kN a fost forțat răspunsul sistemului la semnal treaptă și la semnal impuls. Astfel, au fost aplicate asupra unui traductor de forță, etalon de referință, cu domeniul nominal de 100 kN, tip Z4A, fabricație HBM, treptele de forță care pot fi realizate de mașina etalon, atât la valori crescătoare ale forței, cât și la valori descrescătoare. De asemenea, au fost aplicate, în timpul staționării unei trepte de forță, impulsuri de identificare constând în deplasări scurte ale sarcinii de încărcare, fără modificarea (teoretică) a forței aplicate asupra traductorului.

Principalele caracteristici metrologice ale traductorului de forță utilizat sunt prezentate în tabelul 8.12.

**Tabelul 8.12:** Caracteristici tehnice ale traductorului de forță, etalon de referință, de 100 kN

Caracteristici tehnice	Unități de măsură	Valori nominale
Domeniul nominal ( $F_{nom}$ )	kN	100
Clasa de exactitate, conform ISO 376	-	00
Sensibilitate ( $C_n$ )	mV/V	2
Eroarea de repatabilitate	% din $F$	0,02
Eroarea de reversibilitate	% din $F$	0,03
Eroarea de hysterezis	% din $F$	0,06
Eroarea de liniaritate	% din $F$	0,02
Efectul temperaturii asupra sensibilității	% din $C_n/10$ K	0,01
Efectul forțelor transversale (10 % din $F_{nom}$ )	% din $F$	0,03
Rezistență de intrare	$\Omega$	> 345
Rezistență de ieșire	$\Omega$	$356 \pm 0,3$

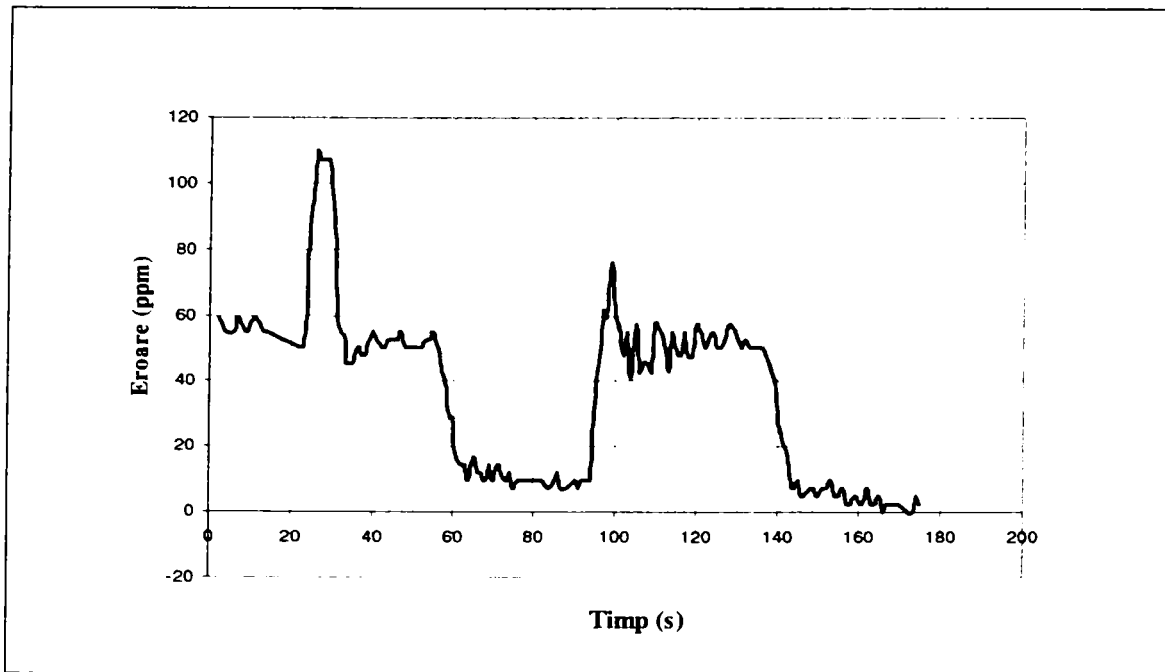
Răspunsul traductorului a fost înregistrat, utilizând echipamente performante, după cum urmează:

- amplificator tensometric tip DMP 40S HBM, clasa de exactitate 0,0005, rezoluție  $1 \times 10^{-6}$  mV/V, cu interfață pentru calculator;
- program de achiziție de date „Catman”, realizat de HBM Germania, dedicat aplicației de preluare și prelucrare date, în timp real, la utilizarea traductoarelor de forță;
- calculator personal.

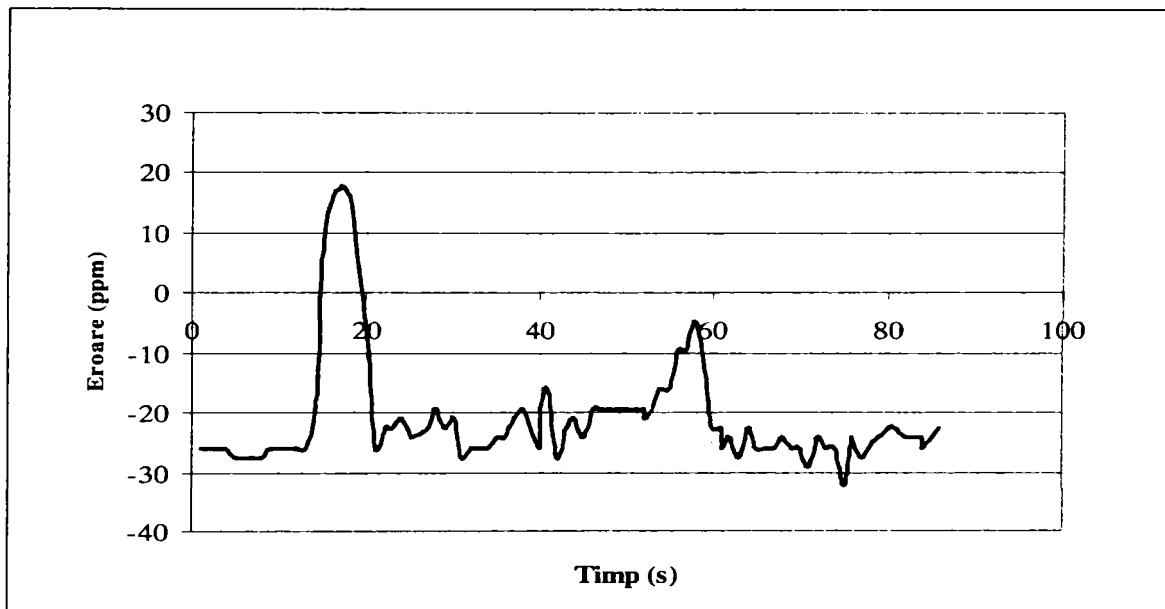
Deși au fost înregistrate și studiate toate răspunsurile sistemului la aplicarea treptelor de forță, în continuare sunt prezentate numai unele dintre aspectele relevante, care au condus la soluții de optimizare a sistemului considerat.

Astfel, în figura 8.12 (a, b, c, d, e, f) este prezentat răspunsul sistemului constituit din mașina etalon de 100 kN, la aplicarea treptelor de forță de încărcare de 20 kN, 30 kN, 50 kN, 60 kN, 70 kN și 90 kN.

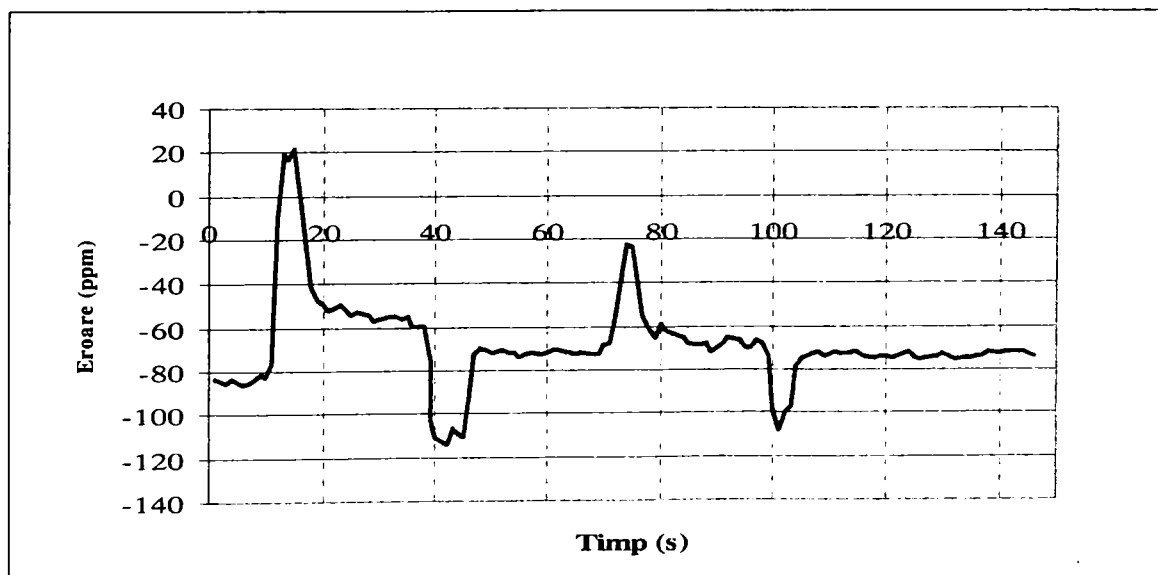
De asemenea, în conformitate cu cele prezentate mai sus, au fost aplicate impulsuri, în cadrul aceleiași trepte de încărcare, constituite din deplasarea sistemului de acționare, fără schimbarea (teoretică) a forței aplicate asupra traductorului de forță. Pot fi, astfel, identificate forțele de frecare existente între sistemul de antrenare și sistemul de realizare a forței, constituit din greutatea mașinii de forță.



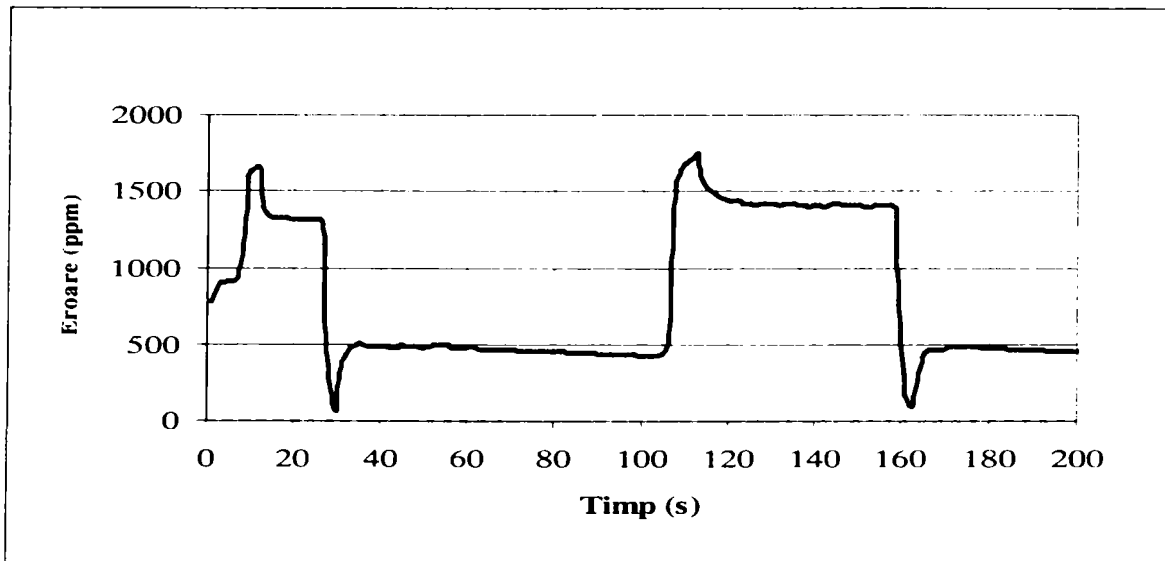
a) Treapta de 20 kN



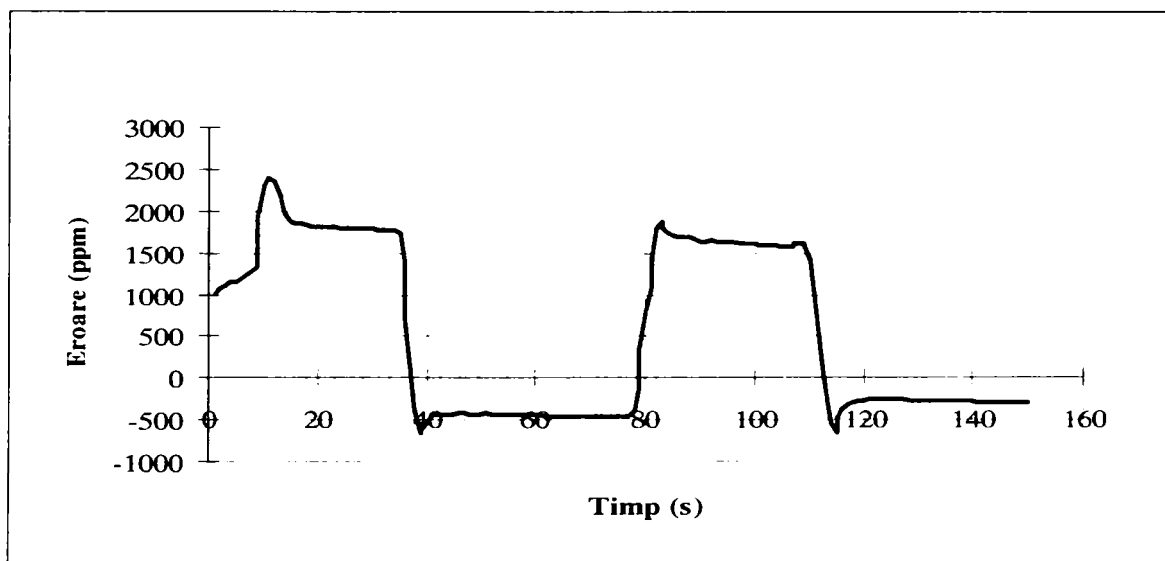
b) Treapta de 30 kN



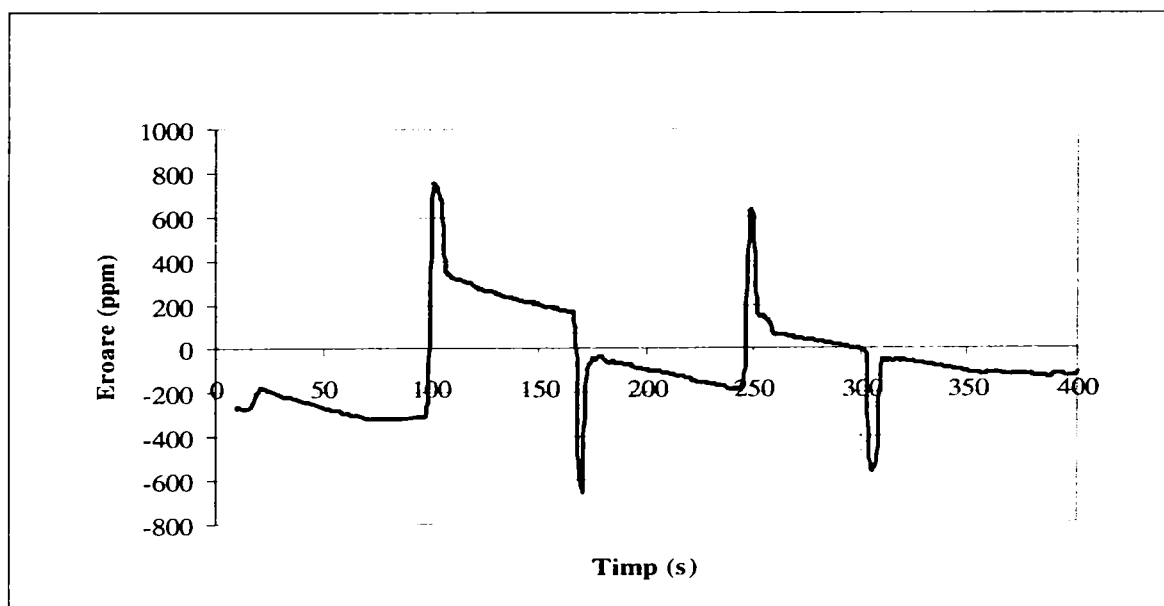
c) Treapta de 50 kN



d) Treapta de 70 kN



e) Treapta de 80 kN



f) Treapta de 90 kN

**Figura 8.12:** Răspunsul mașinii de forță de 100 kN la semnal treaptă și impuls

Studierea răspunsurilor sistemului constituit din mașina etalon de forță de 100 kN, prezentate în figura 8.12 conduce la două concluzii principale:

- sunt identificate diferențe majore între valoarea nominală a treptelor de forță și cea efectiv realizată (de exemplu, treptele de forță de 30 kN, 50 kN și 90 kN);
- la aplicarea unor semnale impuls (în modul explicat mai sus), se constată că sistemul nu revine la starea anterioară aplicării impulsului. Acest fapt este cauzat de prezența forțelor de frecare, într-un quantum inacceptabil din punctul de vedere al performanțelor necesare unui etalon național de forță (de exemplu, treptele de forță de 20 kN, 70 kN și 80 kN).

Au fost constatate, de asemenea, probleme legate de funcționarea mașinii etalon de forță de 100 kN similare cu cele prezentate la capitolul 8.1.1 pentru mașina etalon de forță de 10 kN.

Față de neajunsurile constatate, acțiunile întreprinse pentru optimizarea sistemului constituit din mașina etalon de forță de 100 kN au constat din:

- înlocuirea greutăților etalon existente cu altele, din oțel acoperit galvanic prin cromare dură, a căror densitate a fost determinată;
- reproiectarea sistemului de încărcare al mașinii etalon de forță, astfel încât să se asigure, la variația forței reproduse, o deplasare a centrului de greutate al pachetului de greutăți etalon în același sens cu forța reprodusă. Acest lucru se realizează, similar cu sistemul de încărcare prezentat pentru mașina etalon de forță de 10 kN, printr-o încărcare de tip „lanț”, în care, pe parcursul încărcării, greutățile se „agață” una de alta, pornind de la prima treaptă către ultima.
- tararea greutăților etalon în condiții de referință cunoscute (temperatură, presiune atmosferică, umiditate relativă) și utilizând etaloane și proceduri adecvate;
- controlul automat al regimului de încărcare al greutăților, asigurarea unei viteze variabile de încărcare, adecvată procesului.

## 8.2.2 Activități de optimizare

### Determinarea densității materialului greutăților etalon

Pentru minimizarea influenței densității noilor greutăți etalon asupra incertitudinii de reproducere a forței a mașinii etalon de 100 kN, densitatea materialului (oțel OLC 50) din care sunt confecționate greutățile a fost determinată cât mai exact posibil.

Pentru determinarea densității materialului a fost prelevată o probă paralelipipedică, de dimensiuni  $99,95 \times 75,08 \times 50,07$  mm.

Densitatea materialului a fost determinată prin două metode independente:

- determinarea volumului probei și cântărire în aer și,
- cântărirea în apă și în aer a probei.

În cazul cântării în aer a probei de volum cunoscut prin măsurarea dimensiunilor acesteia a fost determinată o densitate  $\rho_{m1} = 7830,4 \text{ kg/m}^3$ .

În cazul determinării densității prin cântărirea succesivă a probei în apă și în aer a fost determinată o densitate  $\rho_{m2} = 7836,2 \text{ kg/m}^3$ .

Valoarea densității medii a materialului din care sunt confecționate greutățile mașinii etalon de forță de 100 kN este  $\rho_m = 7833,3 \text{ kg/m}^3$ .

În tabelul 8.13 este redat bugetul de incertitudini simplificat utilizat pentru estimarea incertitudinii asociate determinării densității materialului greutăților etalon.



**Tabelul 8.13:** Estimarea incertitudinii la determinarea densității greutăților etalon

Mărimi de intrare	Incertitudine standard	Incertitudini parțiale	
		kg/m <sup>3</sup>	%
Masa probei	0.02 g	0,05	0,0007
Volumul probei	0,006 cm <sup>3</sup>	0,27	0,0034
Densitatea apei	0,0002 g/cm <sup>3</sup>	1,57	0,0200
Masa probei în aer	0,02 g	0,42	0,0053
Masa probei în apă	0,02 g	0,42	0,0053
Incertitudine compusă		1,70	0,0217

#### Monitorizarea condițiilor de mediu

Pe parcursul efectuării măsurărilor de etalonare a greutăților etalon ale mașinii de 100 kN (42 zile) au fost monitorizate condițiile de mediu (temperatură, presiune atmosferică și umiditate relativă). Rezultatele au fost utilizate pentru determinarea densității aerului. Deși nu au fost aplicate corecții, similar cu considerațiile prezentate la capitolul 8.1.2, rezultatele obținute au stat la baza urmării păstrării condițiilor de mediu în limitele necesare pentru încadrarea componentei incertitudinii de măsurare aferente variației condițiilor de mediu în limitele prestabilite. În tabelul 8.14 sunt redată valorile medii măsurate ale parametrilor de mediu, pe parcursul determinărilor maselor greutăților mașinii etalon de forță de 100 kN.

**Tabelul 8.14:** Condiții de mediu la etalonarea greutăților mașinii de forță de 100 kN

Data	Temperatura aerului °C	Presiunea atmosferică hPa	Umiditate relativă %	Densitatea aerului kg/m <sup>3</sup>
20.09.2005	22,8	1012	56,2	1,191
21.09.2005	22,1	1015	54,8	1,198
22.09.2005	22,6	1013	54,8	1,193
23.09.2005	22,5	1014	53,2	1,195
26.09.2005	22,7	1015	56,7	1,195
27.09.2005	22,8	1011	55,3	1,190
28.09.2005	22,5	1012	55,8	1,192
29.09.2005	22,4	1011	54,4	1,192
30.09.2005	22,8	1009	55,9	1,188
03.10.2005	22,4	1010	54,5	1,190
04.10.2005	22,6	1011	55,0	1,191
05.10.2005	22,5	1009	53,7	1,189
06.10.2005	22,8	1010	52,5	1,189
07.10.2005	22,8	1009	53,0	1,188
10.10.2005	23,0	1011	49,6	1,189
11.10.2005	23,0	1012	48,9	1,190
12.10.2005	23,0	1013	49,2	1,192
13.10.2005	22,9	1012	51,2	1,191
14.10.2005	22,6	1013	55,1	1,193
17.10.2005	22,7	1013	53,8	1,193
18.10.2005	22,7	1012	53,7	1,192
19.10.2005	22,6	1011	53,9	1,191
20.10.2005	22,5	1009	52,8	1,189
21.10.2005	22,4	1008	53,2	1,188

24.10.2005	22,3	1010	54,0	1,191
25.10.2005	22,6	1008	54,7	1,187
26.10.2005	22,7	1009	54,5	1,188
27.10.2005	23,0	1011	54,2	1,189
28.10.2005	23,0	1013	58,3	1,192
31.10.2005	23,1	1010	56,6	1,188
01.11.2005	23,0	1001	50,2	1,177
02.11.2005	23,0	996	48,1	1,172
03.11.2005	23,1	998	45,9	1,174
04.11.2005	22,8	1006	47,1	1,184
07.11.2005	22,7	1007	49,4	1,186
08.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179
09.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179
10.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179
11.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179
14.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179
15.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179
16.11.2005	22,8	1002	50,8	1,179

### Etalonarea greutăților

Pentru etalonarea greutăților mașinii etalon de forță de 100 kN a fost construit un comparator de masă care să poată realiza exactitatea necesară. Având în vedere că masa unei greutăți etalon, pentru reproducerea unei trepte de forță de 5 kN este de aproximativ 510 kg, pentru realizarea comparatorului de masă, ca element sensibil, a fost aleas un traductor de forță HBM, tip Z30, având caracteristicile tehnice și metrologice principale conform tabelului 8.15.

**Tabelul 8.15:** Caracteristici metrologice ale traductorului de forță de 5 kN

Caracteristici tehnice	Unități de măsură	Valori nominale
Clasa de exactitate, conform ISO 376	-	00
Domeniul nominal ( $F_{nom}$ )	kN	5
Sensibilitate nominală ( $C_{nom}$ )	mV/V	2
Eroare de repetabilitate	% din $F$	0,02
Eroare de reproductibilitate	% din $F$	0,04
Eroarea de hysterezis	% din $F$	0,06
Eroarea de liniaritate	% din $F$	0,03
Efectul temperaturii asupra valorii de zero	% /10 K din $C_{nom}$	0,02
Rezistență de intrare	$\Omega$	> 690
Rezistență de ieșire	$\Omega$	600 - 800

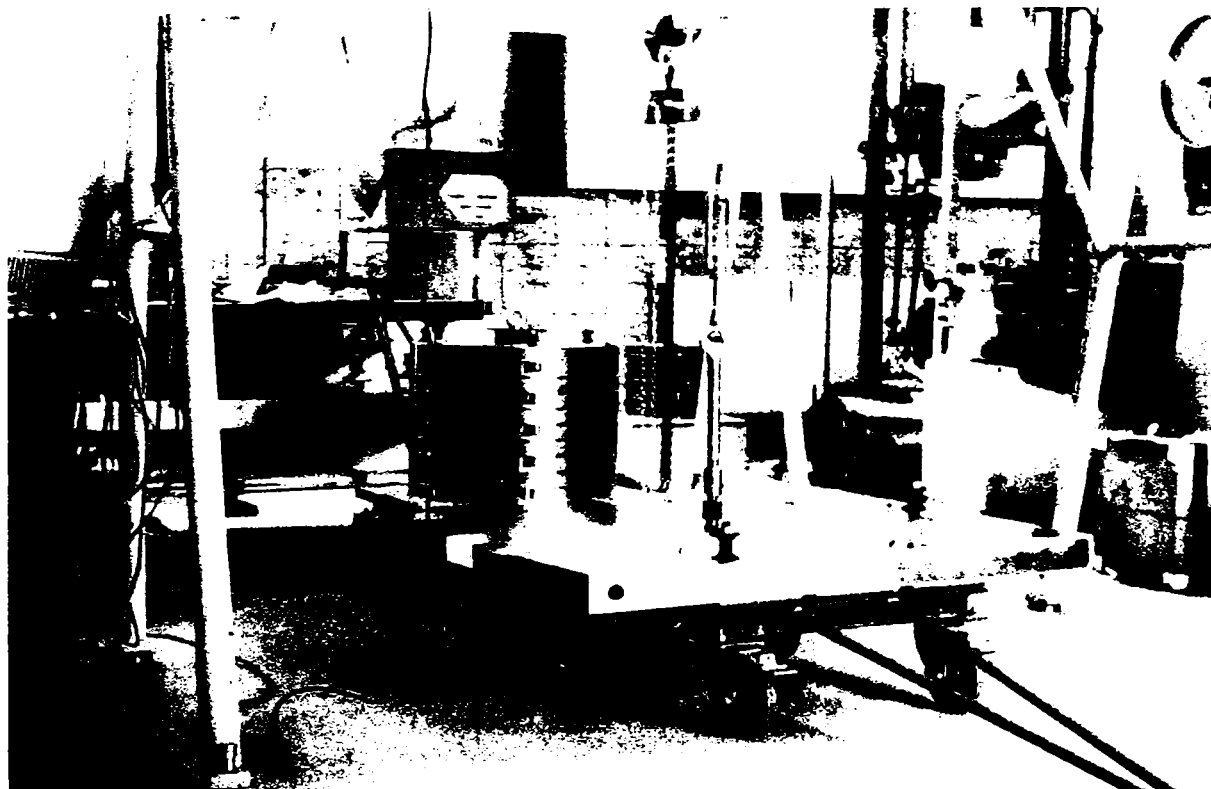
Traductorul de forță a fost cuplat la un amplificator tensometric tip DMP 40 S, de fabricație HBM, clasa de exactitate 0,0005, având o rezoluție de  $10^{-6}$  mV/V pentru domeniul nominal de 2 mV/V. Rezoluția exprimată în unități de masă este, în acest caz, pentru sistemul traductor- amplificator tensometric, de 250 mg pentru domeniul nominal de 500 kg.

Comparatorul de masă realizat este asistat de un calculator electronic.

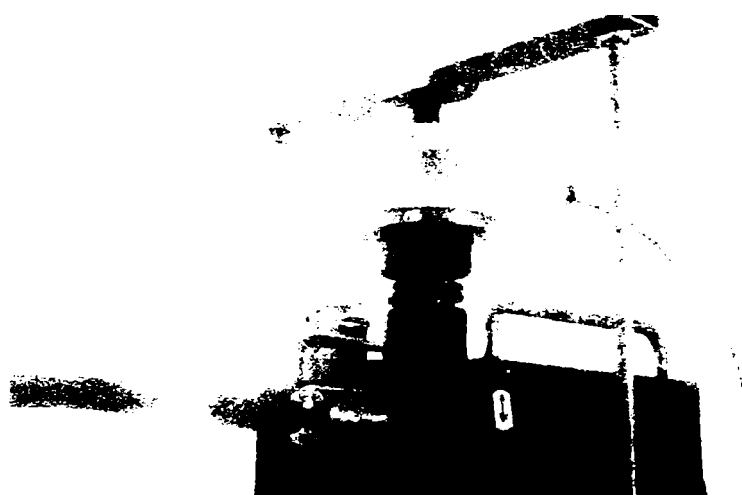
Pentru realizarea condițiilor de repetabilitate a măsurărilor, comparatorul de masă a fost construit astfel încât să realizeze următoarele caracteristici tehnice:

- preluarea maselor etalon și a celor de cântărit de la aceeași înălțime;
- aceeași viteză de încărcare a masei etalon și a maselor de etalonat;
- inițializarea și finalizarea procesului de cântărire după aceleași intervale de timp de la aplicarea sarcinilor corespunzătoare etalonului utilizat, respectiv a masei de etalonat;
- efectuarea automată a unui număr de aproximativ 1000 de măsurări a sarcinii aplicate, pentru fiecare cântărire, filtrarea numerică cu filtru de tip Bessel și rejectarea valorilor anormale;
- interpretarea statistică automată a datelor rezultate din procesul de cântărire, calculul mediei aritmetice și a abaterii medii pătratice.

În figura 8.13, a) și b) sunt prezentate imaginile comparatorului de masă de 500 kg, realizat pentru etalonarea greutăților mașinii de forță cu încărcare directă de 100 kN.



a)



b)

**Figura 8.13:** Comparatorul de masă de 500 kg

Valoarea masei greutăților etalon corespunzătoare forței reproduse de 500 N se calculează conform ecuației (6.11). În această ecuație, valorile parametrilor în funcție de care se exprimă masa greutăților etalon sunt:

- valoarea forței reproduse,  $F = 5 \text{ kN}$
- valoarea medie a accelerației gravitaționale locale,  $g_{loc} = 9,806\,762\,4 \text{ m/s}^2$
- valoarea normală a densității aerului,  $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$
- valoarea densității materialului greutăților etalon,  $\rho_m = 7833,3 \text{ kg/m}^3$

Valoarea calculată a masei unei greutăți etalon de 5 kN a mașinii de forță cu încărcare directă de 100 kN este, în acest caz,  $m_N = 509,930\,332 \text{ kg}$ .

Etalonul utilizat pentru etalonarea greutăților mașinii etalon de 100 kN este constituit dintr-un pachet de 10 greutăți etalon de câte 500 N, aceleași cu cele utilizate la primele 10 trepte de forță ale mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN (greutățile având seriile de la 1 la 10).

Având în vedere că masele celor 10 greutăți de câte 500 N au fost determinate utilizând același comparator de masă și aceleași etaloane, la evaluarea incertitudinii asociate pachetului de 5 kN constituit din cele 10 greutăți, mărimile de intrare sunt considerate corelate cu un factor  $r = 1$ . Astfel, luând în calcul incertitudinile parțiale ale celor 10 greutăți prezentate în tabelul 8.7, incertitudinea standard asociată pachetului de 10 greutăți de câte 500 N utilizat ca etalon pentru etalonarea greutăților de 5 kN ale mașinii de forță de 100 kN este  $u = 381 \text{ mg}$ , sau, exprimată ca incertitudine standard relativă,  $w = 0,76 \times 10^{-6}$ .

În figura 8.14 este prezentat etalonul de 5 kN utilizat pentru etalonarea greutăților mașinii de forță de 100 kN.

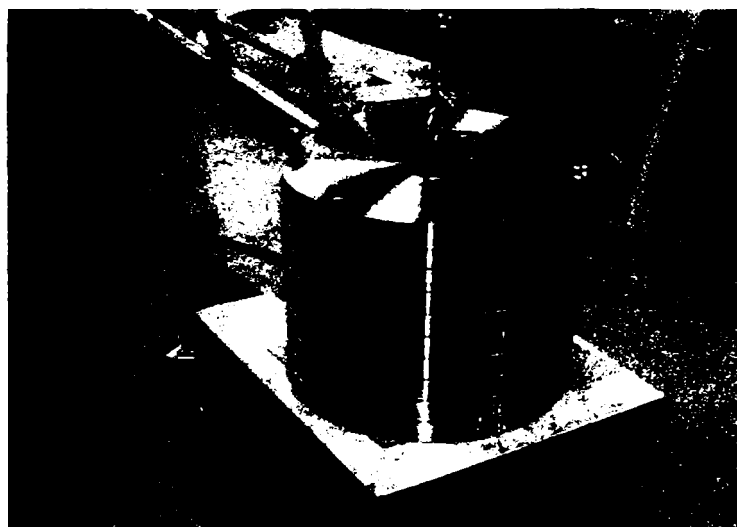


Figura 8.14: Etalonul de 5 kN

Metoda utilizată pentru etalonarea greutăților cu valoarea nominală de 5 kN ale mașinii etalon cu încărcare directă de 100 kN este metoda substituției, descrisă la capitolul 6.1.1. Utilizând comparatorul de masă prezentat în figura 8.13, au fost cântărite alternativ etalonul E, constituit din pachetul de 10 greutăți de câte 500 N și fiecare greutate de etalonat G, în secvența: E1, G1, G2, E2 ; E3, G3, G4, E4 .... Măsurările au fost efectuate în regim dinamic, în aproximativ 222 secunde pentru o secvență, memorându-se 1000 de valori pentru fiecare cântărire a etalonului E, respectiv a greutății G. Această procedură a fost repetată pentru fiecare din cele 20 de greutăți ale mașinii etalon de forță de 100 kN.

Diferențele constatate dintre masa etalonului utilizat și masele greutăților de etalonat au fost corectate prin retarare, nu au fost incluse în incertitudine. Incertitudinea asociată măsurărilor de etalonare a celor 20 greutăți etalon a fost estimată conform metodei precizate la capitolul 6.1.1 din prezenta teză de doctorat. Pentru etalonarea celor 20 greutăți au fost efectuate câte trei cicluri de măsurare, în secvența E,G,G,E.

Evaluarea incertitudinii asociate procesului de etalonare a greutăților mașinii etalon de forță de 100 kN se bazează, în principal, pe următoarele considerații:

- incertitudinea standard a etalonului utilizat este cea asociată etalonării pachetului constituit din 10 greutăți care reproduc fiecare forța de 500 N (seriile de la 1 la 10 ale greutăților mașinii etalon de forță de 10 kN);
- incertitudinea asociată derivei etalonului este apreciată luând în considerare intervalul de timp necesar pentru efectuarea măsurărilor de determinare a valorii maselor celor 20 greutăți etalon ale mașinii de forță de 100 kN (aproximativ 40 de zile);
- incertitudinile asociate rezultatelor de etalonare, prin care au fost stabilite diferențele dintre masa etalon și masele celor 20 greutăți ale mașinii etalon de forță de 100 kN, sunt cele determinate prin analiza statistică a procesului respectiv de etalonare;
- prin utilizarea pachetului de greutăți etalonat în unități de forță, incertitudinea asociată corecției forței ascensionale a aerului este redusă la cea aplicabilă diferenței dintre condițiile de mediu la etalonarea pachetului de greutăți etalon și cele existente la etalonarea greutăților mașinii etalon de forță.

În tabelul 8.16 este prezentat, ca exemplu, bugetul de incertitudini rezultat în urma etalonării greutății de 5 kN, seria 10.

**Tabelul 8.16 :** Bugetul de incertitudini la etalonarea greutății de 5 kN, seria 10

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard $u(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $u_i(y)$
$m_s$	509,930 332 kg	normală	381 mg	1	381 mg
$\delta m_D$	0	rectangulară	20 mg	1	20 mg
$\delta m$	0	normală	318 mg	1	318 mg
$\delta m_{REP}$	0	rectangulară	50 mg	1	50 mg
$\delta m_B$	0	rectangulară	10 mg	1	10 mg
$\delta m_{REZ}$	0	rectangulară	145 mg	1	145 mg
<b><math>m</math></b>	<b>509,930 332 kg</b>	<b>normală</b>			<b>520 mg</b>

În tabelul 8.17 sunt redate rezultatele etalonării greutăților din componența mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN.

**Tabelul 8.17:** Valorile de etalonare a greutăților mașinii etalon de forță de 100 kN

Identificare greutate	Diferență determinată (corectată) mg	Abatere medie pătratică mg	Abatere pătratică a mediei mg	Incertitudine standard absolută mg	Incertitudine standard relativă ppm
Seria 1	-80	1070	618	743	1,49
Seria 2	121	380	220	466	0,93
Seria 3	84	620	358	546	1,09
Seria 4	- 2	1300	751	857	1,71
Seria 5	17	1160	671	787	1,57
Seria 6	548	1350	780	882	1,76
Seria 7	40	1100	636	757	1,51
Seria 8	29	880	509	654	1,31
Seria 9	49	770	445	606	1,21
Seria 10	402	550	318	520	1,04
Seria 11	- 320	940	543	681	1,36
Seria 12	32	680	393	569	1,14
Seria 13	1617	420	243	478	0,96
Seria 14	52	670	387	565	1,13
Seria 15	- 157	580	335	531	1,06
Seria 16	390	450	260	487	0,97
Seria 17	- 1134	1080	624	748	1,50
Seria 18	- 13	710	410	581	1,16
Seria 19	- 69	550	318	520	1,04
Seria 20	85	490	283	499	1,00

Valorile incertitudinilor standard asociate rezultatelor de etalonare a greutăților mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN, prezentate în tabelul 8.17, sunt considerate corelate foarte puternic, deoarece au fost determinate utilizând aceleași etaloane, același comparator de masă și același operator. Gradul de corelare este, în acest caz,  $r = 1$ .

Incertitudinea standard asociată rezultatului de etalonare a masei care reproduce forța maximă a mașinii etalon de forță de 100 kN este, în acest caz:  $u(m) = 12\,476$  mg, corespunzătoare unei incertitudini standard relative:  $w(m) = 1,25$  ppm.

Incertitudinea de etalonare a greutăților din componența mașinii etalon cu încărcare directă de 100 kN este utilizată, în continuare, ca factor contributiv la estimarea incertitudinii de reproducere a forței asociată mașinii, în întreg ansamblul ei, utilizând referințele teoretice prezentate la capitolul 6.1 din prezenta teză de doctorat.

#### Realizarea și testarea mașinii etalon de forță de 100 kN

În urma acțiunilor întreprinse pentru optimizare, a rezultat „noua mașină de forță cu încărcare directă de 100 kN”. Principalele modificări, față de „vechea mașină de forță” sunt următoarele:

- utilizarea noilor greutăți etalon de 5 kN;
- modificarea sistemului de prindere și antrenare a greutăților;
- modificarea structurii de susținere mecanică a mașinii de forță;
- automatizarea procesului de funcționare (conducerea cu calculatorul).



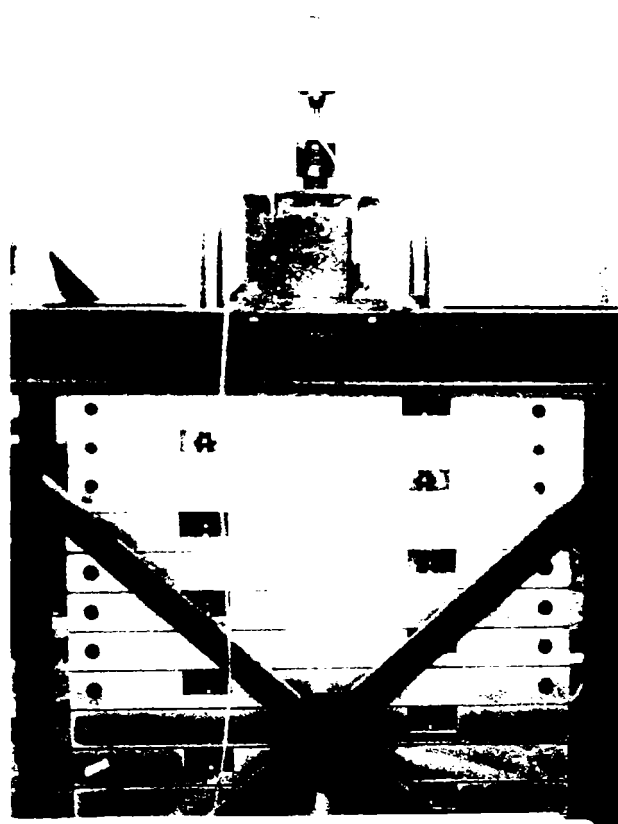
În noul sistem, greutatea sunt antrenate succesiv la încărcare, similar cu cel prezentat pentru mașina de forță cu încărcare directă de 10 kN, începând cu greutatea de deasupra pachetului și terminând cu greutatea cea mai de jos. Astfel, prin încărcarea „tip lanț” centrul de greutate al pachetului de greutăți etalon coboară pe măsură ce forța aplicată crește, ceea ce sporește foarte mult stabilitatea sistemului.

Sistemul de antrenare a pachetului de greutăți, cuprinde un motor electric acționat prin intermediul unui variator de turație, comandat printr-un calculator electronic. Programul de acționare permite viteze diferite de deplasare a greutăților etalon, realizate la încărcare, respectiv descărcare. Deplasarea sistemului între două trepte succesive de încărcare/ descărcare se face cu o viteză relativ mare (aproximativ 10 mm/s), pentru micșorarea, pe cât posibil, a timpului de încercare a dinamometrelor la utilizarea mașinii de forță. Pe de altă parte, în apropierea momentului de încărcare/ descărcare a treptelor de forță, pentru minimizarea influențelor variației forțelor de antrenare asupra incertitudinii mașinii etalon, viteza de încărcare/ descărcare este redusă până la aproximativ 3 mm/s.

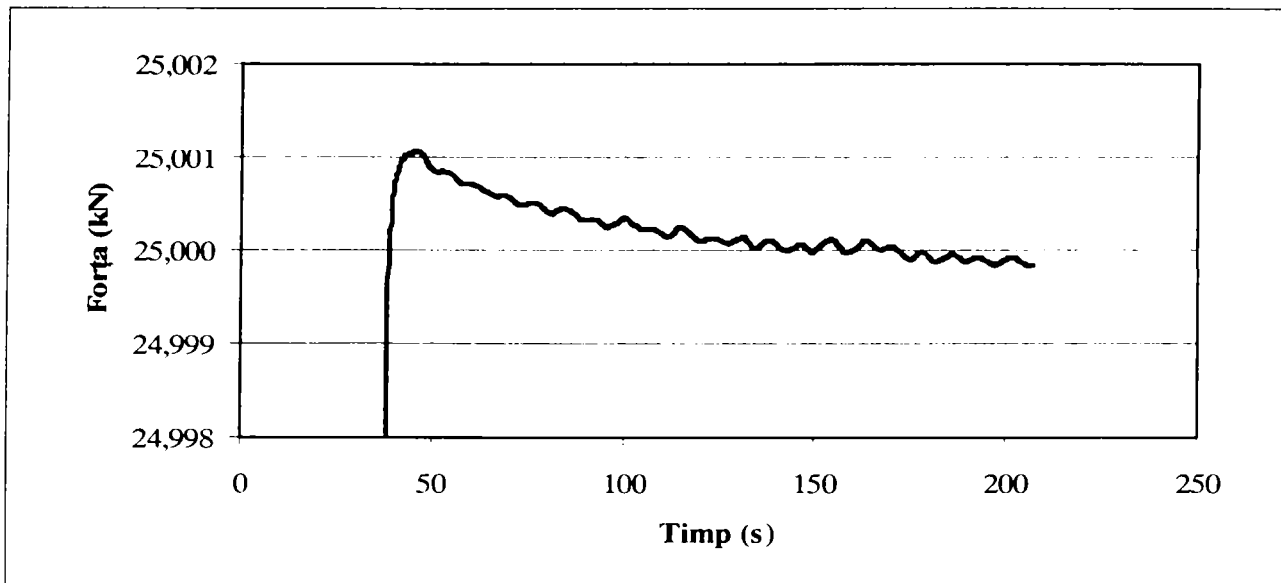
În figura 8.15 este prezentată mașina etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN, realizată ca urmare a aplicării studiilor din prezenta teză de doctorat.

Mașina etalon de forță prezentată în figura 8.15 a fost testată, în regim dinamic, pentru demonstrarea capacității de reproducere a treptelor de forță cu o incertitudine satisfăcătoare.

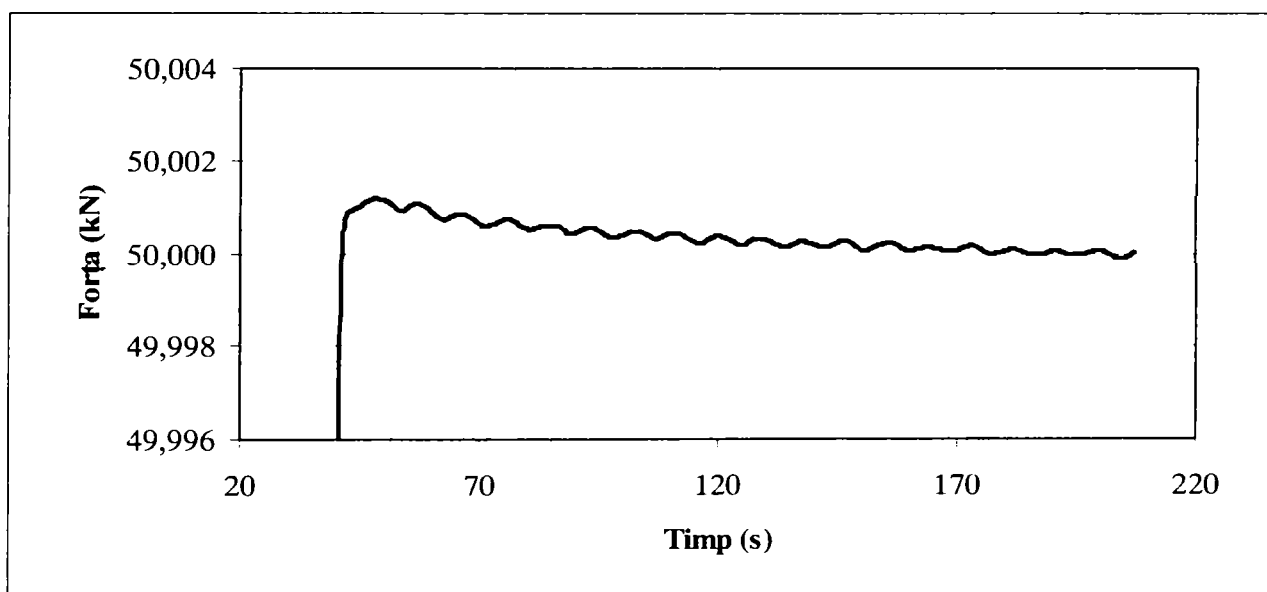
Astfel, au fost efectuate cicluri de încărcare și descărcare a celor 20 de greutăți etalon, urmărindu-se variația forței aplicate prin intermediul a două transductoare de forță unul cu domeniul nominal de 50 kN, pentru primele zece trepte de forță realizate de mașina etalon și altul cu domeniul nominal de 100 kN, pentru următoarele 10 trepte de forță. Amplificatorul tensometric utilizat a fost, ca în cazul mașinii etalon de forță de 10 kN, DMP 40S, având o rezoluție de 2 000 000 mV/V corespunzătoare domeniului maxim de forță și o exactitate de 0,0005 % din valoarea măsurată. Rezultatele de măsurare au fost achiziționate prin intermediul unei interfețe corespunzătoare și prelucrate cu ajutorul calculatorului electronic. În figurile 8.16 a), b) și c) este prezentat, ca exemplu, răspunsul sistemului constituit din mașina etalon de forță de 100 kN la aplicarea treptelor de forță de 25 kN, 50 kN și 70 kN.



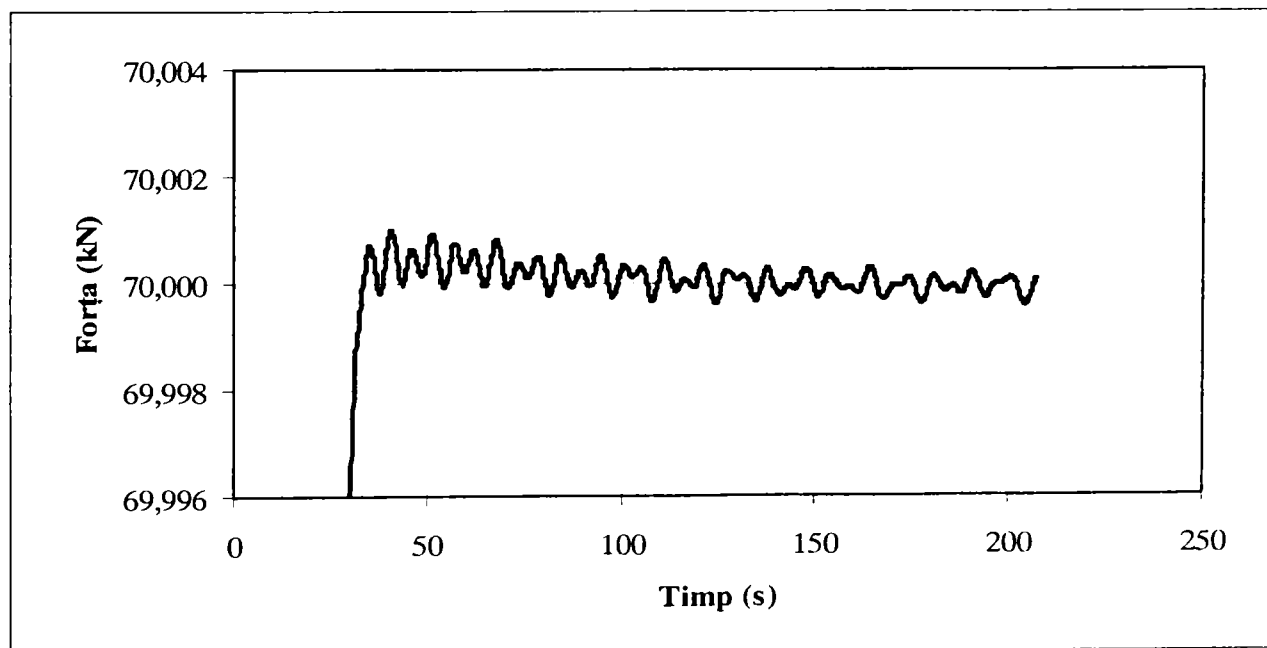
**Figura 8.15:** Mașina etalon de forță de 100 kN



a)



b)



c)

**Figura 8.16:** Răspunsul dinamic al mașinii etalon de forță de 100 kN

Se precizează că răspunsul este caracteristic aplicării forței în mod dinamic, fără oprirea funcționării sistemului de antrenare a greutăților mașinii etalon de forță în momentul realizării forței. Se pot aprecia, în acest mod, și perturbațiile introduse de sistemul de antrenare a greutăților asupra realizării forței.

Din figura 8.16 -în special din figura 8.16 a)- se poate observa fluajul caracteristic traductorului de forță de 50 kN, utilizat pentru caracterizarea mașinii etalon de forță de 100 kN. Pentru minimizarea acestui factor perturbator, în vederea caracterizării performanțelor metrologice ale mașinii etalon de forță, măsurarea valorilor furnizate de traductorul de forță se efectuează după un interval de timp de trei minute de la aplicarea treptelor de forță. Se observă din figura 8.16 că, după acest interval de timp, răspunsul traductorului de forță se stabilizează.

### 8.2.3 Determinarea performanțelor metrologice

Pentru determinarea performanțelor metrologice ale mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN au fost efectuate comparări internaționale, laboratorul de referință ales fiind, ca și în cazul mașinii talon de forță de 10 kN, cel al Institutului de Fizică Tehnică Braunschweig (PTB) din Germania.

În conformitate cu procedura prezentată la capitolul 7.3.1 din prezenta teză de doctorat, au fost efectuate măsurări succesive, utilizând două etaloane de transfer având domeniile nominale de 50 kN și 100 kN, în laboratorul de forțe PTB Germania și, ulterior, în Laboratorul Forțe Timișoara.

Similar cu procedura utilizată în cazul mașinii etalon de forță de 10 kN, au fost efectuate următoarele serii de măsurări:

- X1, X2: serii de măsurări, la valori crescătoare, fără rotația traductorului de transfer
- X3, X4: serii de măsurări, la valori crescătoare, cu rotația traductorului de transfer la 90° față de poziția inițială
- X5, X6: serii de măsurări, la valori crescătoare, cu rotația traductorului de transfer cu 270° față de poziția inițială
- X7: serie de măsurări, la valori crescătoare, cu rotația traductorului de transfer cu 270° față de poziția inițială
- X8: serie de măsurări, la valori descrescătoare, cu rotația traductorului de transfer cu 270° față de poziția inițială

Au fost efectuate serii de măsurări la treptele de 25 kN, 50 kN (cu utilizarea traductorului de transfer de 50 kN) și 80 kN, 100 kN (cu utilizarea traductorului de transfer de 100 kN).

În tabelul 8.18 și tabelul 8.19 sunt redate rezultatele obținute la etalonarea traductoarelor de transfer de 50 kN și 100 kN, utilizând mașina etalon de forță de 100 kN existentă în laboratorul de forță al PTB Germania, respectiv mașina etalon de forță de 100 kN existentă în Laboratorul Forțe Timișoara.

**Tabelul 8.18:** Etalonarea traductoarelor de transfer de 50 kN și 100 kN la PTB Germania

Forța kN	Răspunsul traductorului, în mV/V							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000010
25	0,999085	0,999078	0,999082	0,999082	0,999082	0,999123	0,999079	0,999113
50	1,998318	1,998315	1,998317	1,998316	1,998321	1,998325	1,998309	1,998307
80	1,599138	1,599134	1,599146	1,599135	1,599149	1,599119	1,599149	1,599116
100	1,998933	1,998930	1,998945	1,998949	1,998951	1,998950	1,998952	1,998942

**Tabelul 8.19:** Etalonarea traductoarelor de transfer de 50 kN și 100 kN în laboratorul Timișoara

Forța kN	Răspunsul traductorului, în mV/V							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000011
25	0,999098	0,999103	0,999110	0,999089	0,999100	0,999123	0,999114	0,999067
50	1,998298	1,998300	1,998297	1,998302	1,998343	1,998315	1,998318	1,998330
80	1,599146	1,599152	1,599160	1,599157	1,599166	1,599147	1,599150	1,599165
100	1,998956	1,998949	1,998962	1,998968	1,998955	1,998998	1,998988	1,999001

În tabelul 8.20 sunt redate rezultatele comparative obținute la etalonarea traductoarelor de transfer de 50 kN și 100 kN, utilizând mașini etalon de forță de 100 kN, la PTB Germania, respectiv în Laboratorul Forțe Timișoara.

**Tabelul 8.20:** Rezultate comparative pentru mașina de forță de 100 kN

Forța N	Valori medii PTB Germania mV/V	Valori medii Laborator Timișoara mV/V	Diferențe relative %	Incertitudine relativă PTB Germania %	Incertitudine relativă Lab. Timișoara %
25	0,9990873	0,9991053	0,001802	0,0055	0,0060
50	1,9983173	1,9983104	-0,000340	0,0055	0,0064
80	1,5991386	1,5991540	0,000965	0,0055	0,0042
100	1,9989443	1,9989680	0,001186	0,0055	0,0063

Pe baza rezultatelor experimentale prezentate mai sus și utilizând considerațiile teoretice prezentate la capitolul 6.1 se poate estima incertitudinea de reproducere a forței, asociată rezultatelor de etalonare la utilizarea mașinii etalon cu încărcare directă de 100 kN.

Plecând de la ecuația (6.9), a fost stabilit bugetul de incertitudine pentru exprimarea capabilității de măsurare și etalonare (*cmc*) pentru mașina etalon de forță de 100 kN, redat în tabelul 8.21.

Pe baza rezultatelor prezentate în tabelul 8.21 se poate estima cea mai bună capabilitate de măsurare a mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN.

**Tabelul 8.21 : Bugetul de incertitudini pentru mașina etalon de forță de 100 kN**

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard relativă $w(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $w_i(y)$
$m$	10198,60664 kg	normală	$1,25 \times 10^{-6}$	1	$1,25 \times 10^{-6}$
$g_{loc}$	9,8067624 m/s <sup>2</sup>	rectangulară	$0,143 \times 10^{-6}$	1	$0,143 \times 10^{-6}$
$\rho_a$	- 15,3 N	normală	$1000 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$0,15 \times 10^{-6}$
$\rho_m$		normală	$217 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$0,03 \times 10^{-6}$
$F_{FCM}$	<b>100 000,0 N</b>	<b>normală</b>			<b><math>1,27 \times 10^{-6}</math></b>

Astfel, pe baza compunerii incertitudinilor standard parțiale asociate mărimilor de intrare a fost stabilită incertitudinea standard relativă asociată mărimii de ieșire- forța reprodusă de mașina etalon de forță de 100 kN - având valoarea de  $1,27 \times 10^{-6}$ .

Pentru caracterizarea capabilității de măsurare și etalonare (*cmc*) a mașinii etalon de forță se utilizează valoarea incertitudinii extinse. Având în vedere că distribuția de probabilitate dominantă este cea normală, factorul de extindere poate fi considerat, pentru un nivel de încredere de aproximativ 95 %, ca fiind  $k = 2$ . În aceste condiții, incertitudinea extinsă relativă de realizare a forței asociată mașinii etalon de forță de 100 kN ar putea fi evaluată la  $2,54 \times 10^{-6}$ . Totuși, pentru evaluarea corectă a *cmc*, trebuie luate în considerare și rezultatele obținute la comparările internaționale.

În bugetul de incertitudini prezentat în tabelul 8.22 este evaluată incertitudinea relativă asociată asigurării trasabilității internaționale, plecând de la ecuația (6.10).

**Tabelul 8.22 : Bugetul de incertitudini la trasabilitatea internațională a mașinii de 100 kN**

Mărimea $X_i$	Estimația $x_i$	Distribuția de probabilitate	Incertitudinea standard relativă $w(x_i)$	Coefficient de sensibilitate $c_i$	Contribuția la incertitudine $w_i(y)$
$\bar{F}_{FCM}$	0	normală	$63 \times 10^{-6}$	1	$63 \times 10^{-6}$
$\Delta_{HysFCM}$	0	rectangulară	$4 \times 10^{-6}$	1	$4 \times 10^{-6}$
$\Delta_{DriftTra}$	0	rectangulară	$1 \times 10^{-6}$	1	$1 \times 10^{-6}$
$\bar{F}_{FSM}$	0	normală	$55 \times 10^{-6}$	1	$55 \times 10^{-6}$
$\Delta_{IncFSM}$	0	normală	$10 \times 10^{-6}$	1	$10 \times 10^{-6}$
$\Delta_{Tras}$	<b>0</b>	<b>normală</b>			<b><math>84 \times 10^{-6}</math></b>

Din compunerea incertitudinilor standard relative rezultate din tabelele 8.21 și 8.22, considerate ca asociate unor mărimi necorelate, rezultă incertitudinea standard compusă relativă asociată valorilor de măsurare efectuate cu mașina etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN:  $w(F_{FCM}) \approx 8,5 \times 10^{-5}$ .

Pornind de la valoarea incertitudinii standard relativă determinată pentru mașina etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN, a fost declarată capabilitatea de măsurare și etalonare (*cmc*), pentru domeniul respectiv de forțe, în cadrul acordului MRA, încheiat între institutele naționale de metrologie, sub egida Conferinței Internaționale de Greutăți și Măsură (CIPM). Valoarea declarată a fost de  $5 \times 10^{-5}$  deoarece o contribuție importantă în evaluarea incertitudinii a revenit factorului contributiv constituit din comportarea neideală a traductorului de forță etalon de transfer.

Capabilitatea de măsurare și etalonare declarată a fost acceptată de către comitetul tehnic de specialitate al CIPM, pe baza activităților întreprinse și a dovezilor prezentate de către Laboratorul Forțe Timișoara. Acceptarea capabilității de măsurare și etalonare este documentată prin publicarea acesteia pe pagina oficială de internet a Biroului Internațional de Greutăți și Măsură (BIPM).

### 8.3 Realizarea mașinii etalon de forță cu comparație de 1000 kN

Mașina etalon de forță cu comparație de 1000 kN este constituită dintr-un cadru de încărcare (de aplicare a forței) cu acționare electro-mecanică și o serie de traductoare de forță având performanțe metrologice foarte bune, utilizate ca traductoare de referință. Așa cum a fost prezentat la capitolul 6.2.1 din prezenta teză de doctorat, optimizarea mașinii cu comparație de 1000 kN a avut drept principal criteriu obținerea unei incertitudini de realizare a forței adecvată pentru etalonarea traductoarelor de forță având clasa de exactitate 1 conform standardului ISO 376.

În primul rând, ținând cont de contribuția importantă a incertitudinii traductoarelor de referință asupra incertitudinii de realizare a forței a mașinii cu comparație în ansamblu, au fost alese traductoarele de forță de referință adecvate scopului propus, având cele mai bune performanțe metrologice, în special în ceea ce privește stabilitatea, reproductibilitatea și repetabilitatea măsurărilor.

Traductoarele de forță utilizate ca referință în cadrul mașinii etalon de 1000 kN sunt prezentate în tabelul 8.23.

**Tabelul 8.23:** Traductoare de referință utilizate la mașina etalon cu comparație de 1000 kN

Domeniu nominal	Sens de aplicare a forței	Clasa de exactitate ISO 376	Incertitudinea relativă
100 kN	tracțiune/ compresiune	00	0,016 %
200 kN	tracțiune/ compresiune	00	0,012 %
500 kN	tracțiune/ compresiune	00	0,020 %
1000 kN	tracțiune	00	0,031 %
1000 kN	compresiune	00	0,022 %

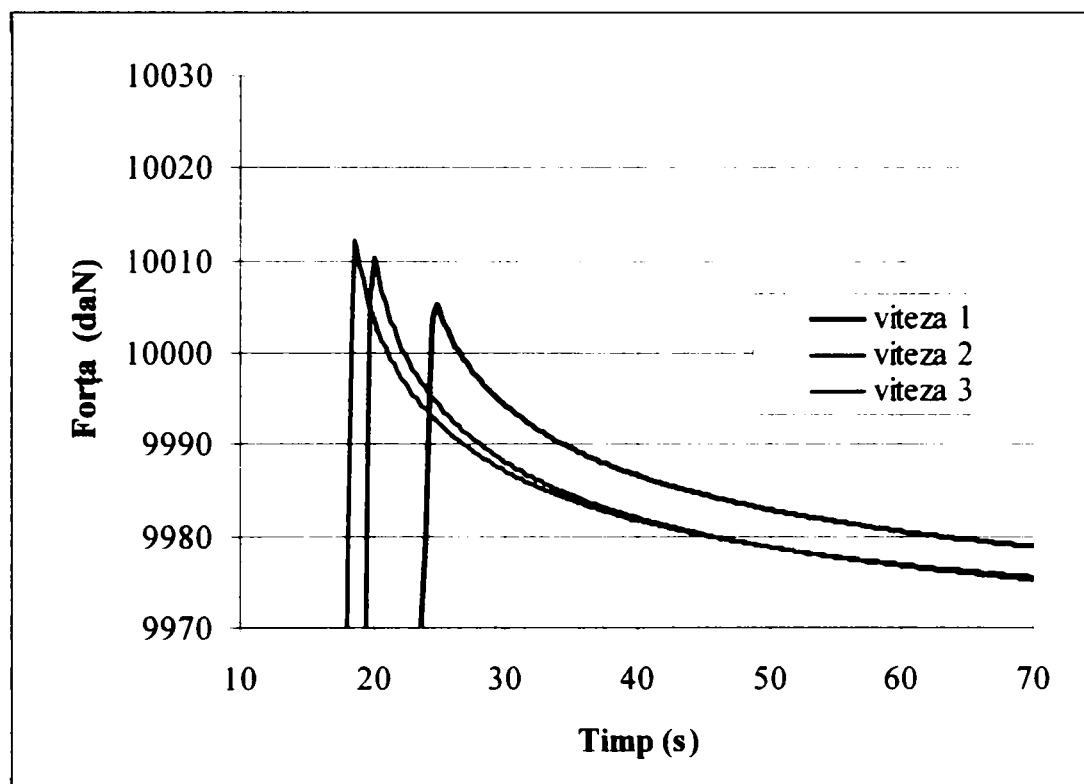
Mașina etalon de forță de 1000 kN a fost supusă unui proces de identificare a caracteristicii de transfer, în vederea obținerii de informații necesare optimizării.

Astfel, au fost aplicate mașinii etalon de forță de 1000 kN trepte de forță constante, urmărindu-se răspunsul sistemului, atât la foțe crescătoare cât și la foțe descrescătoare.

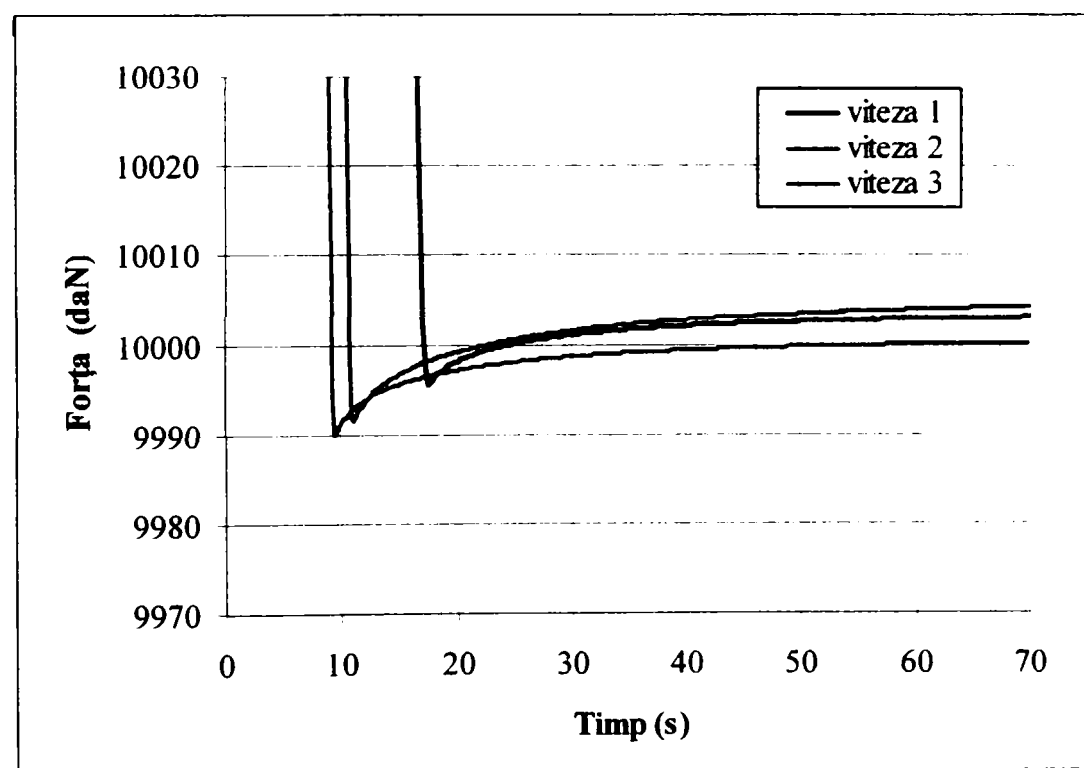
În figura 8.17 a) și b) sunt prezentate răspunsurile sistemului constituit din mașina etalon de forță cu comparație, în regim liber, la aplicarea unei trepte de forță de 100 kN, în sens crescător, respectiv descrescător.



Au fost forțate răspunsurile sistemului pentru trei viteze ( $dF/dt$ ) de aplicare a valorilor treaptă de încărcare ( $v_1$ ,  $v_2$  și  $v_3$ )



a)



b)

**Figura 8.17:** Răspunsul mașinii de 1000 kN la semnal treaptă în sistem liber

Se observă, în ambele cazuri, o întoarcere a caracteristicii, datorată, în principal, deformațiilor elastice ale cadrului mașinii. Această comportare a mașinii etalon de forță de 1000 kN conduce la mărirea incertitudinii asociate măsurărilor de etalonare.

Din figura 8.17 se poate constata, de asemenea, că viteza de modificare a forței la aplicarea treptelor de de forță (viteza de încărcare, respectiv de descărcare) are o influență importantă asupra răspunsului sistemului. O variație în timp a forței mai mică conduce la o întoarcere mai mică a caracteristicii de răspuns a sistemului.

Soluția aleasă pentru optimizarea mașinii etalon de forță cu comparație de 1000 kN a fost realizarea unui sistem de reglare automată (sistem închis), care să asigure menținerea forței aplicate în limite care să permită etalonarea traductoarelor de forță clasa 1, conform standardului ISO 376.

Sistemul de reglare automată, condus de un calculator electronic, asigură:

- măsurarea continuă a forței realizată de mașina etalon, prin intermediul traductoarelor de forță;
- stabilirea valorilor nominale a treptelor de forță realizate de mașină, în funcție de domeniul traductorului de forță care trebuie etalonat;
- reglarea vitezelor de aplicare a forței în funcție de diferența dintre valoarea nominală a forței și cea realizată de mașina etalon în cursul procesului de încărcare/ descărcare;
- compararea valorii forței realizate de mașina etalon de forță cu valorile nominale stabilite (feed-back);
- stabilirea valorilor de corecție și transmiterea către sistemul de acționare al mașinii etalon de forță a comenzilor necesare pentru menținerea constantă a treptelor de forță la valori cât mai apropiate de valorile nominale.

În figura 8.18 este prezentat răspunsul mașinii etalon de forță cu comparație la realizarea treptei de forță de 100 kN, în sistem automatizat.

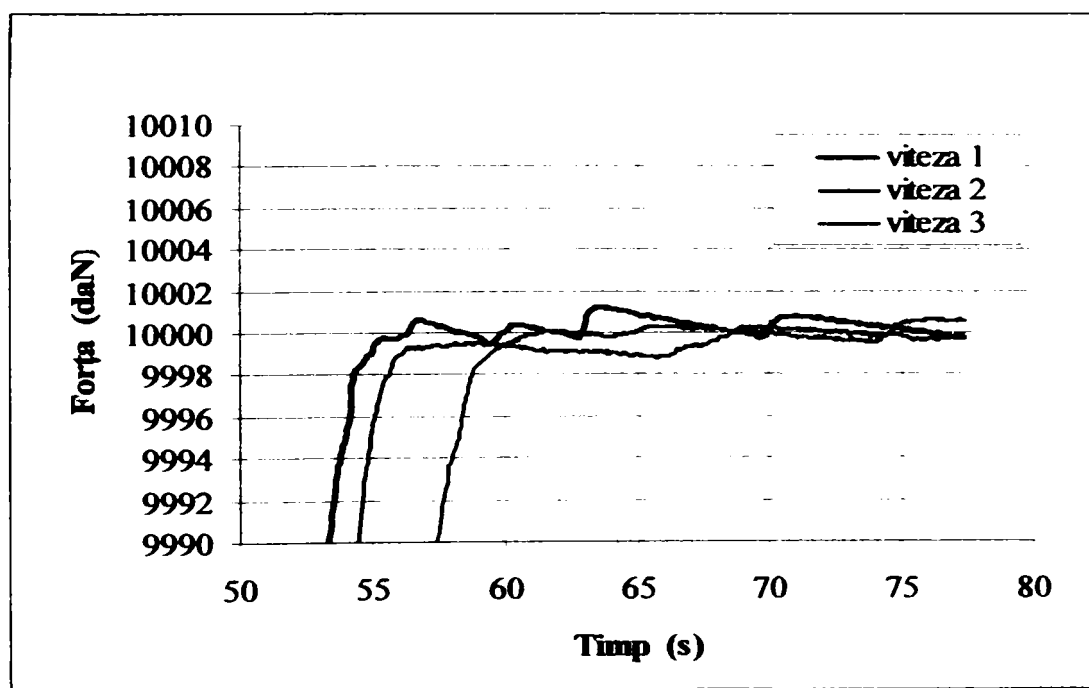
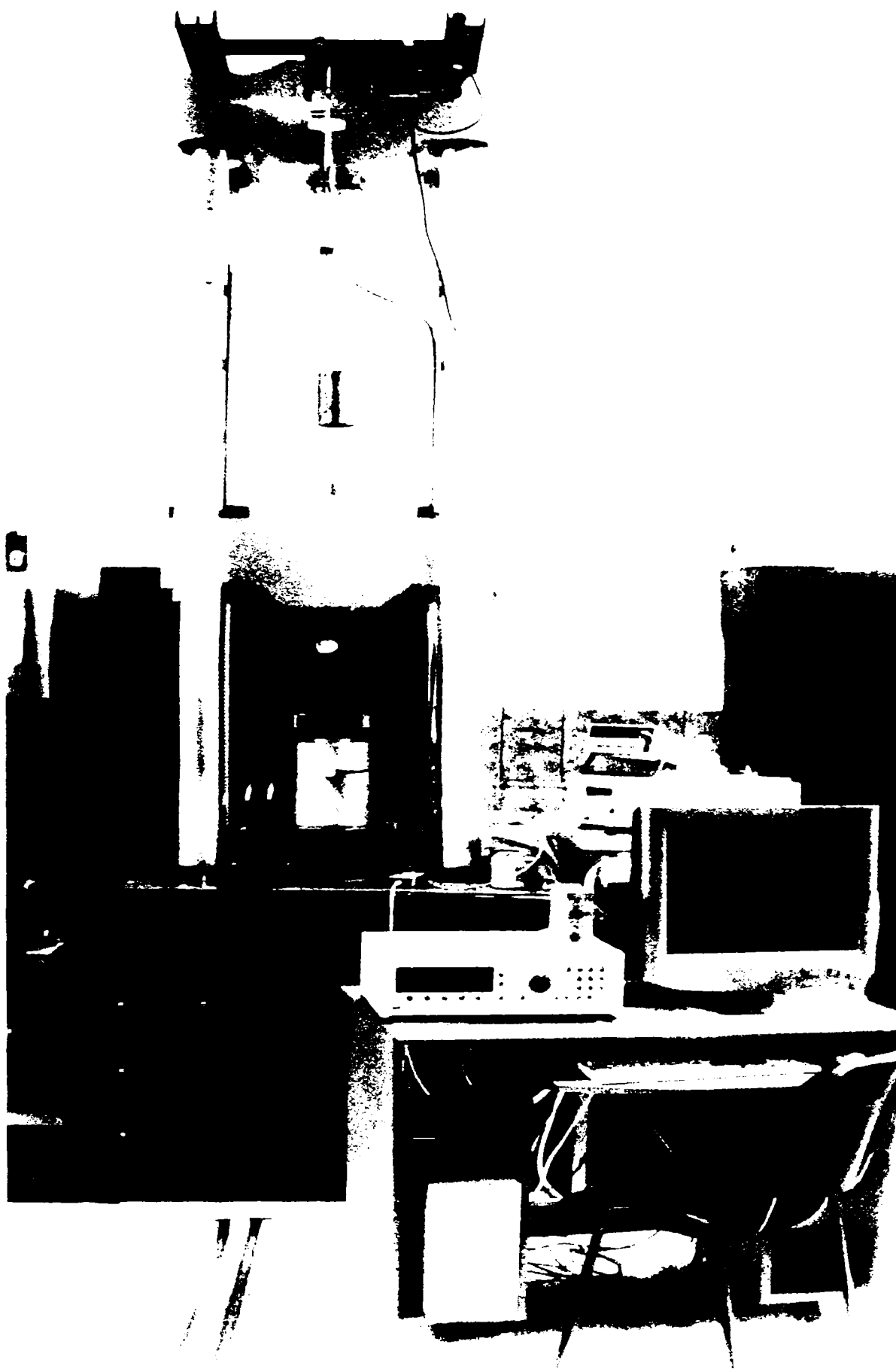


Figura 8.18: Răspunsul mașinii de 1000 kN în sistem automatizat

Se constată o îmbunătățire a răspunsului sistemului, prin reducerea componentei de inertitudine asociată variației forței pe timpul reproducerii treptei de forță. Se poate observa că realizarea unor viteze mici de variație a forței în apropierea valorii treptei de forță conduce la diminuarea incertitudinii.

În figura 8.19 este prezentată mașina etalon de forță cu comparație de 1000 kN.



**Figura 8.19:** Mașina etalon de forță cu comparație de 1000 kN

În conformitate cu considerațiile teoretice prezentate la capitolul 6.2.1 din prezenta teză de doctorat, a fost întocmit bugetul de incertitudini pentru evaluarea incertitudinii compuse asociată măsurărilor efectuate cu mașina etalon de forță cu comparație de 1000 kN.

Bugetul de incertitudini este prezentat în tabelul 8.24.

**Tabelul 8.24:** Bugetul de incertitudini pentru mașina de forță de 1000 kN

Mărime	Estimație	Interval relativ de variație $a$	Distribuție de probabilitate	Incetitudine standard relativă	Coeficient de sensibilitate	Contribuție la incertitudinea relativă
$F_{RefTra}$	100 kN		normală	$5 \times 10^{-5}$	1	$5 \times 10^{-5}$
$\Delta_{DriftRef}$	0 kN	$2,0 \times 10^{-5}$	rectangulară	$1,2 \times 10^{-5}$	1	$1,2 \times 10^{-5}$
$c_{\theta}$	0 kN	$5,0 \times 10^{-5}$	rectangulară	$2,9 \times 10^{-5}$	1	$2,9 \times 10^{-5}$
$\Delta_{Stab}$	0 kN	$1,0 \times 10^{-4}$	triangulară	$4,1 \times 10^{-5}$	1	$4,1 \times 10^{-5}$
$\Delta_{Realization}$	0 kN		normală	$1,0 \times 10^{-5}$	1	$1,0 \times 10^{-5}$
$\bar{F}_{FSM}$	100 kN		normală	$2,5 \times 10^{-5}$	1	$2,5 \times 10^{-5}$
$\bar{F}_{FCM}$	100 kN		normală	$4,5 \times 10^{-5}$	1	$4,5 \times 10^{-5}$
$\Delta_{HysFCM}$	0 kN	$1,2 \times 10^{-5}$	rectangulară	$1,0 \times 10^{-5}$	1	$1,0 \times 10^{-5}$
$\Delta_{DriftTra}$	0 kN	$2,0 \times 10^{-5}$	rectangulară	$1,2 \times 10^{-5}$	1	$1,2 \times 10^{-5}$
$\Delta_{RelDev}$	0 kN	$1,8 \times 10^{-4}$	triangulară	$7,3 \times 10^{-5}$	1	$7,3 \times 10^{-5}$
$F_{FCM}$	100 kN		normală			$1,2 \times 10^{-4}$
Incetitudine extinsă relativă $W = kw (F_{FCM})$ cu $k = 2$						$2,4 \times 10^{-4}$
Incetitudine declarată pentru treapta de forță						$5 \times 10^{-4}$

Pornind de la valoarea incertitudinii extinse relativă determinată pentru mașina etalon de forță cu comparare de 1000 kN, a fost declarată capabilitatea de măsurare și etalonare ( $cmc$ ), pentru domeniul respectiv de forțe, în cadrul acordului MRA, încheiat între institutele naționale de metrologie, sub egida Conferinței Internaționale de Greutăți și Măsuri (CIPM). Valoarea declarată a fost de  $5 \times 10^{-4}$ , luându-se o marjă de siguranță acoperitoare pentru influența factorului contributiv  $\Delta_{Stab}$ .

Capabilitatea de măsurare și etalonare declarată a fost acceptată de către comitetul tehnic de specialitate al CIPM, pe baza activităților întreprinse și a dovezilor prezentate de către Laboratorul Forțe Timișoara. Acceptarea capabilității de măsurare și etalonare este documentată prin publicarea acesteia pe pagina oficială de internet a Biroului Internațional de Greutăți și Măsuri (BIPM).

## 9. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

Ca urmare a celor expuse în prezenta teză de doctorat, se evidențiază următoarele concluzii principale:

Pentru caracterizarea sistemelor de măsurare a forței, în vederea optimizării acestora, precum și pentru evaluarea rezultatelor optimizării, termenul metrologic de „măsurare” a fost reconsiderat față de abordarea clasică. În „noua abordare” noțiunea de „eroare” nu mai joacă un rol esențial, la finalul măsurării rezultând o valoare, căreia îi este asociată o singură incertitudine, care este compusă din mai mulți factori contributivi. Această incertitudine caracterizează gradul în care valoarea necunoscută a măsurandului devine cunoscută după măsurare. Această nouă abordare a fost utilizată pentru evaluarea contribuției factorilor de influență (perturbatori) asupra sistemelor de măsurare a forței.

În vederea unei analize organizate, mijloacele de măsurare a forței au fost structurate pe niveluri, într-un sistem de trasabilitate metrologică pentru definirea și diseminarea unității de forță în România. Astfel, au fost evidențiate într-o schemă de ierarhizare, patru niveluri: nivelul etaloanelor naționale și internaționale, nivelul laboratoarelor de refrință, nivelul laboratoarelor de etalonări și verificări și nivelul utilizatorilor de mijloace de măsurare din domeniul forță. Problematika optimizării a fost, la rândul ei, tratată în funcție de această ierarhizare.

Identificarea sistemelor de măsurare a forței, determinarea caracteristicilor metrologice ale acestora precum și evaluarea performanțelor sistemelor optimizate pot fi efectuate prin încercare și etalonare metrologică. În cazul sistemelor relativ simple, metodele și procedurile de etalonare pot fi cele standardizate. Pentru etalonarea sistemelor complexe de măsurare a forței au fost dezvoltate, în teza de doctorat, metode și proceduri speciale, adecvate scopului propus.

Rezultatul unei măsurări efectuate, inclusiv prin utilizarea sistemelor de măsurare a forței, constituie numai o aproximație (estimație) a valorii măsurandului. Pentru caracterizarea completă a procesului de măsurare este necesară specificarea incertitudinii asociate valorii măsurandului, obținută prin măsurare. Măsurandul trebuie definit suficient de complet în raport cu exactitatea de măsurare necesară. Modelul matematic al măsurării, stabilit pentru sistemele de măsurare a forței, transformă ansamblul observațiilor repetate într-un rezultat al măsurării. Stabilirea adecvată a modelului matematic are o importanță deosebită în optimizarea sistemelor de măsurare a forței, în condițiile în care acesta include influența valorilor diferitelor mărimi perturbatoare asupra rezultatului final al măsurării.

Principalele criterii pentru optimizarea sistemelor de măsurare a forței diferă semnificativ în funcție de locul și rolul ocupat de acestea în schema de ierarhizare stabilită. Pentru fiecare din sistemele de măsurare a forței aparținând unui nivel de ierarhizare au fost identificate și analizate criteriile de optimizare.

Stadiul actual al dezvoltării sistemelor de măsurare a forței constituie una din premisele de bază utilizată pentru studiul optimizării acestora. Teza de doctorat prezintă o analiză amănunțită și documentată a stadiului actual al dezvoltării sistemelor de măsurare a forței, structurată în funcție de locul ocupat de acestea în schema de ierarhizare.

Pentru recunoașterea mutuală a rezultatelor de etalonare între institutele naționale de metrologie, ca bază pentru recunoașterea reciprocă și generală a rezultatelor de măsurare din domeniul forță, etaloanele naționale de forță trebuie să îndeplinească cerințele tehnice și metrologice stabilite pe plan internațional. Pentru aceasta, a fost necesar ca etaloanele naționale de forță ale României să fie aduse la performanțele tehnice și metrologice impuse, pentru a fi recunoscute în conformitate cu acordurile internaționale. Un cadru important pe plan internațional în care se desfășoară recunoașterea reciprocă a rezultatelor de etalonare este oferit de Conferința Internațională de Greutăți și Măsuri (CIPM). În cadrul acestei organizații funcționează acordul mutual de recunoaștere reciprocă a etaloanelor naționale și a rezultatelor de etalonare și măsurare (MRA) încheiat între institutele naționale de metrologie. Eforturile privind optimizarea etaloanelor naționale de forță ale României au fost îndreptate către îndeplinirea cerințelor necesare recunoașterii acestora în cadrul CIPM - MRA.

Fixarea obiectivelor concrete pentru optimizarea performanțelor tehnice și metrologice ale etaloanelor naționale de forță ale României s-a bazat pe studiul situației privind etaloanele naționale de forță ale diverselor state, acceptate în cadrul acordului CIPM – MRA.

Asigurarea trasabilității mașinilor etalon național de forță la Sistemul Internațional de Unități (SI) constituie o cerință esențială pentru recunoașterea internațională. Activitățile necesare sunt:

- asigurarea trasabilității treptelor de forță realizate de mașinile etalon național de forță la etaloanele naționale de masă, lungime și timp;
- compararea mașinilor etalon național de forță cu etaloanele similare recunoscute ale altor țări. Compararea se execută prin intermediul etaloanelor de transfer, având caracteristici metrologice adecvate scopului.

În vederea optimizării etaloanelor naționale, a fost stabilit modelul matematic de reproducere a forței, identificând mărimile de intrare, mărimea de ieșire precum și factorii perturbatori ai sistemului.

Operația premergătoare etalonării greutăților mașinilor de forță cu încărcare directă este *tararea greutăților*. Prin tarare, valoarea masei greutății este adusă cât mai aproape posibil de valoarea nominală calculată, prin adaus sau înlăturare de material. În cadrul procesului de tarare se urmărește minimizarea diferenței dintre masa nominală a greutății de etalonat și masa efectivă. După tarare, fiecare greutate se supune etalonării, prin care se determină valoarea atribuită greutății. Modelul matematic stabilit în teza de doctorat pentru etalonarea greutăților mașinilor cu încărcare directă se bazează pe metoda de comparare directă cu etaloane de masă, prin intermediul comparatorului de masă. Modelul matematic permite analiza influenței asupra măsurandului a mărimilor de intrare (masa greutății, accelerația gravitațională, densitatea aerului și densitatea materialului din care sunt confecționate greutățile) și a factorilor perturbatori.



Având în vedere exactitatea necesară reproducerii forței de către mașinile etalon cu încărcare directă, accelerația gravitațională a fost determinată la locul de amplasare al acestora. Valoarea accelerației gravitaționale și incertitudinea standard relativă asociată acesteia a fost determinată de către un institut de cercetare specializat în domeniul fizicii Pământului.

Etalonarea greutăților mașinilor etalon de forță cu încărcare directă, precum și utilizarea acestora are loc în aer. Efectul forței ascensionale datorate aerului este luat în calcul la stabilirea de corecții și evaluarea incertitudinii de măsurare, atât la etalonarea greutăților cât și pe parcursul utilizării mașinilor etalon de forță. Au fost considerate ca variabile care influențează densitatea aerului: presiunea atmosferică, temperatura și umiditatea aerului (s-a neglijat variația compoziției aerului). Aceste mărimi au fost monitorizate atât pe parcursul etalonării greutăților etalon cât și în timpul funcționării mașinilor etalon de forță, la testarea sau compararea acestora. Contribuția fiecărui factor (temperatură, presiune atmosferică și umiditate) la incertitudinea compusă de reproducere a forței, asociată măsurărilor cu mașinile cu încărcare directă, a fost estimată prin simularea mărimilor de intrare. Au fost stabilite, astfel, valorile nominale și limitele acceptabile ale domeniilor temperaturii, presiunii atmosferice și umidității relative în interiorul cărora incertitudinea de reproducere a unității de forță se poate păstra la valori convenabile.

Densitatea greutăților etalon trebuie determinată pentru evaluarea corectă a incertitudinii mașinii de forță cu încărcare directă. Cunoașterea densității greutăților etalon cu o exactitate corespunzătoare, conduce la posibilitatea reproducerii treptelor de forță, în interiorul intervalului de incertitudine așteptat.

Etalonarea greutăților mașinilor etalon, astfel încât acestea să reproducă cât mai exact treptele de forță predeterminate și supravegherea condițiilor de lucru, nu asigură funcționarea mașinilor etalon național de forță în limitele de exactitate prevăzute. Au fost identificate mărimi perturbatoare care influențează rezultatul reproducerii forței și care nu sunt determinate de etalonarea sau de starea greutăților etalon. Influența acestor mărimi perturbatoare asupra exactității de reproducere a forței poate fi pusă în evidență prin asigurarea trasabilității etaloanelor naționale de forță la etaloanele similare ale altor țări, recunoscute pe plan internațional. Pentru punerea în evidență a gradului de compatibilitate a etalonului național de forță cu un etalon similar al altei țări au fost identificate următoarele activități necesare: alegerea convenabilă a unei referințe (un etalon de forță recunoscut internațional), efectuarea unor comparații relevante, care să pună în evidență diferențele dintre valorile forței reproduse de etalonul național față de referință și reevaluarea performanțelor etalonului național, pe baza rezultatelor comparațiilor cu referința. În teza de doctorat a fost stabilită o procedură pentru efectuarea comparațiilor pentru asigurarea trasabilității internaționale.

Etaloanele naționale de forță trebuie utilizate exclusiv pentru reproducerea unității de măsură SI (N) și diseminarea acesteia către etaloanele de ordin imediat inferior. Etaloanele secundare, de referință și/sau de lucru asigură, în acest caz, racordarea mijloacelor de măsurare de lucru la unitățile de măsură SI de forță.

Valorile etaloanelor secundare, de referință, sunt atribuite urmând proceduri specifice, plecând de la valorile etaloanelor naționale sau, în absența acestora, de la valorile etaloanelor recunoscute ale altor țări. Etaloanele secundare de forță, utilizate ca etaloane de referință, pot fi: mașini de forță cu încărcare directă și amplificare hidraulică; mașini de forță cu încărcare directă și amplificare cu pârghie; mașini de forță cu comparare cu traductoare de referință; dinamometre. În teza de doctorat sunt stabilite criteriile specifice și modelele matematice pentru optimizarea acestor tipuri de etaloane de referință.

La nivelul României, stabilirea unor soluții optime pentru dezvoltarea unui sistem de etaloane de referință ca bază pentru asigurarea trasabilității măsurărilor de forță la SI impune utilizarea unor alternative care să fie în același timp adecvate din punct de vedere al performanțelor tehnice și metrologice necesare, cât și rezonabile ca și costuri. În conformitate cu aceste criterii, mașinile etalon de forță cu comparare constituie o soluție acceptabilă. Caracteristicile metrologice ale traductoarelor de forță utilizate ca referință (repetabilitatea, reproductibilitatea și stabilitatea) determină esențial performanțele mașinilor cu comparare.

Baza optimă de etaloane necesară asigurării trasabilității la SI a măsurărilor de forță din România a fost stabilită pornind de la cerințele utilizatorilor de mijloace de măsurare. Din analizele efectuate, rezultă o pondere foarte mare în solicitările de etalonare deținută de dinamometrele având clasele de exactitate 1 și 2, conform standardului ISO 376, cu domeniul nominal de forță de până la 1000 kN. Din acest motiv, eforturile laboratorului de forțe Timișoara au fost îndreptate către dezvoltarea unor etaloane de referință care să satisfacă aceste cerințe. Plecând de la facilitățile deja existente și ținând cont restricțiile economice, direcția de optimizare a etaloanelor de referință de forță aleasă a fost următoarea:

- dezvoltarea unor etaloane de referință, altele decât etaloanele naționale, cu domeniul nominal de până la 1000 kN (compresiune și tracțiune) și 4000 kN (compresiune);
- asigurarea trasabilității la SI a etaloanelor de referință utilizate, prin intermediul etaloanelor naționale de forță sau, după caz, prin intermediul etaloanelor recunoscute ale altor țări.

Caracteristicile tehnice și metrologice ale etaloanelor de lucru, utilizate pentru etalonarea sau verificarea sistemelor de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru, trebuie să corespundă cerințelor pentru asigurarea trasabilității măsurărilor, exprimate în standarde, proceduri, ghiduri sau practici, acceptate pe scară largă. Minimizarea incertitudinii forței aplicate în procesul de etalonare a sistemelor de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru, constituie criteriul cel mai important luat în considerare la optimizarea sistemelor de măsurare a forței, etaloane de lucru.

Pentru determinarea caracteristicilor metrologice ale etaloanelor de lucru, acestea se supun unui proces de etalonare. Din analiza datelor obținute în urma etalonării se pot estima contribuțiile factorilor de influență în procesul de măsurare, sub forma aportului incertitudinilor standard ale mărimilor de influență asupra incertitudinii compuse.

Principalii factori de influență analizați sunt : contribuția erorii de repetabilitate asupra mărimii de ieșire a etaloanelor de forță de lucru (forța indicată), influența erorii de repetabilitate, influența erorii de interpolare a caracteristicii de transfer, influența derivatei valorii de zero și influența erorii de reversibilitate.

Pentru evaluarea corectă a răspunsului etaloanelor de lucru la aplicarea unor mărimi de intrare, în teza de doctorat a fost stabilită o procedură de aproximare a caracteristicilor analitice de transfer ale dinamometrelor. Această procedură a fost supusă unui proces de validare, prin compararea rezultatelor obținute cu cele furnizate de un laborator de metrologie recunoscut internațional (PTB Germania). Din analiza efectuată a rezultat că procedura stabilită poate fi utilizată, fiind compatibilă cu metodele de aproximare practice internațional.

Sistemele de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru, prezintă o mare diversitate. Au fost analizate în teza de doctorat două mari categorii de mijloace de măsurare a forței având o mare răspândire a utilizării: sisteme de indicare a forței ale mașinilor de încercat materiale și dinamometre de uz general. Atât pentru mașinile de încercat materiale, cât și pentru dinamometrele de uz general au fost stabilite metode specifice pentru evaluarea incertitudinii măsurărilor efectuate, plecând de la influența factorilor perturbatori asupra rezultatului măsurării. Minimizarea influenței factorilor perturbatori asupra rezultatului măsurării a fost tratat ca un criteriu de optimizare a sistemelor de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru. Optimizarea sistemelor de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru, se bazează pe analiza efectuată asupra următoarelor informații: caracteristicile tehnice și metrologice declarate de producător, caracteristicile tehnice și metrologice determinate în procesul de încercare/ etalonare, studiul adecvării caracteristicilor tehnice și metrologice ale sistemelor de măsurare a forței la necesitățile procesului de măsurare.

O parte importantă a mijloacelor de măsurare de lucru, componentă a sistemelor de măsurare a forței, este constituită din traductoare de forță, denumite, în funcție de măsurand, *celule de sarcină* sau *celule de cântărire*. Pentru o analiză corespunzătoare necesității de optimizare, au fost relevante diferențele esențiale sub aspect constructiv și al performanțelor tehnice și metrologice dintre mijloacele de măsurare a forței și cele care măsoară masa.

O altă categorie de mijloace de măsurare de lucru analizată în teza de doctorat este constituită din sistemele de măsurare a forței ale mașinilor de încercat materiale. Criteriile de optimizare stabilite pentru aceste sisteme de măsurare a forței se bazează pe îndeplinirea cerințelor standardelor internaționale aplicabile.

Confirmarea obținerii unor performanțe optime ale sistemelor de măsurare a forței față de criteriile stabilite poate fi obținută prin încercări, analize, urmărire în exploatare sau alte activități specifice. În cazul etaloanelor naționale de forță și al etaloanelor secundare, de referință, evaluarea performanțelor optime a fost efectuată prin compararea cu etaloane similare recunoscute pe plan internațional ale altor țări.

Pentru caracterizarea etaloanelor naționale și secundare, de referință, în vederea furnizării informațiilor privind incertitudinea minimă de etalonare care poate fi realizată cu acestea se utilizează exprimarea *cele mai bune capabilități de măsurare (bmc)*. Declararea celei mai bune capabilități de măsurare a laboratoarelor de metrologie trebuie să fie bazată pe metode descrise și trebuie să fie susținută și confirmată de dovezi experimentale. Atunci când se evaluează cea mai bună capabilitate de măsurare trebuie să fie luate în calcul toate componentele semnificative ale incertitudinii măsurare.

Capabilitatea de etalonare și măsurare (CMC) este o declarație a laboratoarelor de metrologie, de regulă aparținând institutelor naționale de metrologie, referitoare la posibilitățile practice de etalonare, care pot fi recunoscute în cadrul unor acorduri mutuale. Capabilitatea de etalonare și măsurare trebuie confirmată prin proceduri recunoscute, cele mai uzuale fiind: certificarea sistemelor de management al calității ale laboratoarelor de metrologie, evaluări de terță parte și comparările interlaboratoare. Capabilitatea de etalonare și măsurare declarată este inferioară celei mai bune capabilități de măsurare (*bmc*), deoarece include comportarea neideală a mijlocului de măsurare supus operațiunii de etalonare și influența etaloanelor de transfer utilizate la comparările interlaboratoare de validare.

Comparările interlaboratoare reprezintă una dintre cele mai bune metode pentru asigurarea recunoașterii mutuale a rezultatelor de măsurare ale laboratoarelor de metrologie. Comparările interlaboratoare scot în evidență atât performanțele etaloanelor utilizate cât și adecvarea acestora la scopul măsurării, abilitățile personalului care efectuează măsurările, corectitudinea procedurilor de măsurare etc. Comparările interlaboratoare pot fi comparații internaționale, pentru susținerea capabilității de etalonare și măsurare declarate (CMC) sau naționale, pentru demonstrarea celei mai bune capabilități de măsurare (*bmc*) realizată de laboratoarele de etalonare. Capabilitatea de etalonare și măsurare a etaloanelor naționale este recunoscută pe baza comparațiilor internaționale interlaboratoare, denumite comparații cheie, desfășurate în mod organizat, sub egida organismelor internaționale.

Pentru compararea etaloanelor naționale de forță se utilizează traductoare de forță, etaloane de transfer itinerante, având caracteristici metrologice foarte bune (stabilitate, reproductibilitate, repetabilitate). Fluxul activităților pentru comparare a fost stabilit în prezenta teză de doctorat, sub forma unor proceduri operaționale, coerente cu procedurile aplicate pe plan internațional.

Capabilitatea de etalonare și măsurare a etaloanelor secundare, de referință și de lucru, realizată în diferite laboratoare de metrologie, poate fi demonstrată pe baza rezultatelor de comparare între laboratoarele de metrologie având aproximativ același nivel de competență. Compararea se efectuează în conformitate cu proceduri acceptate de laboratoarele participante. În teza de doctorat au fost stabilite metode și proceduri de desfășurare a comparațiilor interlaboratoare în domeniul forță, pentru demonstrarea competenței acestora. Sunt prezentate rezultatele concrete obținute în urma unui proces de intercomparare a unor laboratoare de metrologie care efectuează etalonări în domeniul forță, desfășurat pe baza procedurii descrise în teza de doctorat, laboratorul pilot (organizator) fiind laboratorul din Timișoara.



Plecând de la baza teoretică dezvoltată în teza de doctorat, au fost întreprinse acțiuni de optimizare a etaloanelor naționale și de referință existente în laboratorul din domeniul forțe din Timișoara, aparținând Institutului Național de Metrologie. Criteriul principal care a stat la baza acțiunilor de optimizare a etaloanelor de forță a fost aducerea performanțelor tehnice și metrologice ale acestora, în special a incertitudinii de măsurare, la un nivel necesar pentru recunoașterea internațională. Etaloanele supuse procesului de optimizare sunt:

- mașina etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN, etalon național;
- mașina etalon de forță cu încărcare directă de 100 kN, etalon național;
- mașina etalon de forță cu comparație de 1000 kN, etalon de referință.

În urma acțiunilor de optimizare întreprinse au rezultat mașini de forță de o nouă construcție, principalele modificări, față de „vechile mașini de forță” fiind următoarele:

Pentru mașinile de forță cu încărcare directă, etaloane naționale

- utilizarea noilor noi greutăți etalon, având caracteristici metrologice superioare;
- îmbunătățirea sistemului de prindere și antrenare a greutăților;
- realizarea unei noi structuri de susținere mecanică a mașinilor de forță;
- automatizarea procesului de funcționare (conducerea cu calculatorul).

Pentru mașina de forță cu comparație:

- realizarea unui sistem de reglare automată, care să asigure menținerea forței aplicate în limitele prescrise;
- măsurarea continuă a forței realizată de mașina etalon, prin intermediul traductoarelor de forță, etalon de referință;
- stabilirea automată a valorilor nominale a treptelor de forță realizate de mașină, în funcție de domeniul traductorului de forță care trebuie etalonat;
- reglarea automată a vitezelor de aplicare a forței, în funcție de diferența dintre valoarea nominală a forței și cea realizată de mașina etalon;

După acțiunile de optimizare întreprinse, mașinile etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN și 100 kN, precum și mașina cu comparație de 1000 kN au fost testate, în regim static și dinamic, pentru demonstrarea capacității de reproducere a treptelor de forță în conformitate cu criteriile stabilite. Rezultatele obținute sunt în concordanță cu cerințele necesare pentru încadrarea mașinilor de forță în categoria etaloanelor naționale, respectiv etaloane de referință. Pe baza rezultatelor obținute a fost estimată și declarată cea mai bună capacitate de măsurare (CMC) a mașinilor etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN și 100 kN și a mașinii etalon de forță cu comparare de 1000 kN.

Pentru recunoașterea internațională a performanțelor metrologice ale mașinilor etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN și 100 kN au fost efectuate comparații internaționale în conformitate cu procedurile stabilite în teza de doctorat. Laboratorul de referință ales a fost cel al Institutului de Fizică Tehnică Braunschweig (PTB) din Germania, laborator recunoscut internațional. Pentru comparare au fost efectuate măsurări succesive asupra unor etaloane de transfer având domeniul nominal de 10 kN, 20 kN, 50 kN și 100 kN, inițial în laboratorul de forțe al Institutului de Fizică Tehnică Braunschweig (PTB) din Germania PTB și, ulterior, în Laboratorul Forțe Timișoara.

Rezultatele obținute au confirmat caracteristicile metrologice declarate pentru etaloanele naționale de forță- mașinile etalon cu încărcare directă de 10 kN și 100 kN.

Pornind de la valorile incertitudinilor extinse relative determinate pentru mașinile etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN și 100 kN și pentru mașina etalon de forță cu comparare de 1000 kN, pe baza rezultatelor comparărilor internaționale efectuate, a fost declarată capabilitatea de măsurare și etalonare (CMC) a etaloanelor naționale și de referință de forță ale României, în cadrul acordului MRA, încheiat între institutele naționale de metrologie, sub egida Conferinței Internaționale de Greutăți și Măsuri (CIPM). Valorile declarate, exprimate ca incertitudine compusă relativă, au fost:  $W = 5 \times 10^{-5}$  pentru mașinile etalon de forță cu încărcare directă de 10 kN și 100 kN, respectiv  $W = 5 \times 10^{-4}$  pentru mașina etalon de forță cu comparare de 1000 kN. Pe baza activităților întreprinse și a dovezilor prezentate de către Laboratorul Forțe Timișoara, capabilitățile de măsurare și etalonare declarate (CMC) au fost acceptate de către comitetul tehnic de specialitate al CIPM. Acceptarea capabilităților de măsurare și etalonare este documentată prin publicarea acestora pe pagina oficială de internet a Biroului Internațional de Greutăți și Măsuri (BIPM).

În directă conexiune cu dezvoltarea bazei teoretice prezentată în teza de doctorat și implementarea rezultatelor de cercetare și experimentare prezentate sunt relevate următoarele perspective:

- continuarea dezvoltării bazei de etaloane a laboratorului de forță din Timișoara, aparținând Institutului Național de Metrologie, pentru acoperirea la nivel național și regional a unui domeniu de forță conform nevoilor actuale și de perspectivă. Criteriul principal va fi asigurarea satisfacerii cerințelor impuse pentru recunoașterea internațională a etaloanelor de forță și a rezultatelor măsurărilor efectuate cu acestea;
- optimizarea mașinii etalon de forță cu încărcare directă de 50 kN și amplificare hidraulică până la 1000 kN din dotarea laboratorului forțe Timișoara. Prin acțiunile care vor fi desfășurate se preconizează încadrarea incertitudinii relative a mașinii etalon de forță în domeniul de incertitudine necesar atestării acesteia ca etalon național (valoare maximă admisă  $W = 5 \times 10^{-5}$ ). Se vor întreprinde, de asemenea, activitățile necesare pentru recunoașterea internațională a acestei mașini de forță;
- realizarea, pornind de la unele facilități deja existente, a unei mașini etalon de forță cu comparație având domeniul maxim de 4 MN. Această mașină de forță urmează să fie construită în sistem „built up”, utilizând ca referință un ansamblu format din trei traductoare de forță, având fiecare domeniul nominal de 1 MN (limita superioară a domeniului de lucru al acestora fiind de 1,5 MN). Această mașină etalon de forță urmează să îndeplinească cerințele metrologice pentru a fi utilizată ca etalon de referință pentru etalonări în domeniul considerat. Pe baza unor încercări desfășurate conform procedurilor prezentate în teza de doctorat și a comparațiilor internaționale se va asigura recunoașterea internațională a mașinii etalon de forță de 4 MN;
- diseminarea rezultatelor de cercetare către laboratoarele de metrologie care efectuează etalonări și laboratoarele de încercări din domeniul forță, în vederea constituirii unui sistem unitar de trasabilitate, pe care să se bazeze măsurările de forță din România, asigurând astfel premisele recunoașterii internaționale ale acestor măsurări.



## 10. CONTRIBUȚII PERSONALE

Tema optimizării sistemelor de măsurare a forței este una foarte generoasă, tratarea acesteia făcând obiectul a numeroase studii pe plan național și internațional. Cu toate acestea, în urma activităților de cercetare aplicată întreprinse de autor, teza de doctorat cuprinde o serie de aspecte noi, netratate până în prezent, în special în domeniul optimizării etaloanelor naționale de forță și a celor secundare, de referință. Contribuțiile personale ale autorului tezei de doctorat sunt sintetizate astfel:

Utilizarea în studiul optimizării sistemelor de măsurare a forței a unei noi abordări, bazată pe evaluarea contribuției incertitudinilor mărimilor care influențează procesul de măsurare asupra incertitudinii compuse, asociată rezultatului măsurării.

Stabilirea unei scheme de trasabilitate a măsurărilor de forță din România, plecând de la schema generală de trasabilitate a măsurărilor propusă de Conferința Generală de Greutăți și Măsuri (CGPM). Schema de trasabilitate stabilește ierarhizarea a mijloacelor de măsurare a forței pe niveluri de trasabilitate și cuprinde descrierea generică a metodelor prin care se asigură trasabilitatea.

Efectuarea unui studiu comparativ privind performanțele tehnice și metrologice ale etaloanelor naționale de forță aparținând țărilor participante la acorduri internaționale de recunoaștere reciprocă, având drept scop alinierea etaloanelor naționale de forță ale României la cerințele mondiale, în special la cele ale Uniunii Europene.

Definirea caracteristicilor tehnice și metrologice care diferențiază traductoarele de forță denumite, în funcție de măsurand *celule de sarcină* (forță) sau *celule de cântărire* (masă), în vederea abordării corecte a optimizării sistemelor de măsurare a forței din care aceste traductoare fac parte.

Stabilirea modelelor matematice care descriu relațiile funcționale între mărimile de intrare și mărimile de ieșire ale sistemelor constituite din mașinile de forță cu încărcare directă, cu încărcare directă și amplificare hidraulică sau cu pârghie și a mașinilor de forță cu comparare cu traductoare de referință. Modelele matematice includ influența factorilor perturbatori identificați pentru fiecare tip de mașină etalon. Modelele matematice stabilite au stat la baza studiilor privind optimizarea etaloanelor naționale de forță, precum și a etaloanelor secundare, de referință.

Efectuarea unui studiu privind influența condițiilor de mediu (temperatură, presiune atmosferică și umiditate) asupra performanțelor metrologice ale etaloanelor naționale de forță. Acest studiu a stat la baza stabilirii valorilor de referință și a limitelor domeniilor de variație ale acestora, în interiorul cărora incertitudinea de realizare a forței caracteristică fiecărui etalon național nu este influențată semnificativ.

Întocmirea unei proceduri aplicabilă activităților specifice pentru asigurarea trasabilității internaționale a etaloanelor naționale de forță ale României la unitățile de măsură SI, prin intermediul etaloanelor de forță recunoscute internațional.

Efectuarea unui studiu privind direcțiile de dezvoltare a etaloanelor naționale de forță și a etaloanelor secundare, de referință, pentru satisfacerea cerințelor de asigurare a trasabilității măsurărilor de forță la SI din România și din arealul regional pentru care România asigură trasabilitatea măsurărilor de forță la SI. Au fost stabilite, astfel, criteriile de optimizare a etaloanelor de forță de 10 kN, 100 kN și 1000 kN, pentru aducerea performanțelor metrologice ale acestora la nivelul necesar recunoașterii internaționale.

Întocmirea de proceduri aplicabile pentru asigurarea trasabilității etaloanelor secundare, de referință, de forță și a sistemelor de măsurare a forței, etaloane de lucru la unitățile de măsură SI prin intermediul etaloanelor naționale de forță sau, după caz, a etaloanelor recunoscute internațional.

Stabilirea unei proceduri pentru determinarea caracteristicilor analitice de transfer ale traductoarelor de forță, pe baza rezultatelor discrete obținute la etalonarea acestora. Procedura stabilită a fost validată pe baza rezultatelor pozitive obținute la compararea cu procedurile similare utilizate de laboratoare recunoscute internațional.

Efectuarea unui studiu și stabilirea unei proceduri privind estimarea incertitudinii la etalonarea sistemelor de măsurare a forței, mijloace de măsurare de lucru (mașini de încercat materiale și dinamometre de uz general).

Stabilirea unor principii generale pentru estimarea incertitudinii asociate rezultatelor de măsurare obținute la utilizarea mașinilor de încercat materiale, aplicabile în cadrul laboratoarelor care efectuează încercări de materiale.

Efectuarea unui studiu în baza căruia a fost întocmită o procedură aplicabilă la comparările internaționale a etaloanelor naționale de forță ale României și a etaloanelor secundare, de referință. Pe baza acestei proceduri au fost efectuate comparări ale etaloanelor naționale de forță ale României cu etaloanele similare ale PTB Germania.

Stabilirea unor metode privind conducerea, pe baza metodelor teoretice dezvoltate în teza de doctorat, a unor comparări între laboratoare de metrologie care efectuează etalonări de sisteme de măsurare a forței.

Crearea unei baze teoretice pentru optimizarea etaloanelor naționale de forță și a etaloanelor secundare, de referință: mașinile etalon cu încărcare directă de 10 kN, 100 kN, respectiv a mașinii de forță cu comparare de 1000 kN.

Stabilirea metodelor practice de optimizare a etaloanelor naționale de forță și a etaloanelor secundare, de referință: mașinile etalon cu încărcare directă de 10 kN, 100 kN, respectiv a mașinii de forță cu comparare de 1000 kN. Dezvoltarea, pe baza considerațiilor teoretice, a mijloacelor tehnice utilizate la optimizarea experimentală.

Dezvoltarea unor metode pentru conducerea procesului de optimizare experimentală a mașinilor etalon cu încărcare directă de 10 kN, 100 kN, respectiv a mașinii de forță cu comparare de 1000 kN. Punerea în practică a metodelor și procedurilor stabilite a condus la recunoașterea internațională oficială a etaloanelor naționale și de referință de forță ale României.

## 11. BIBLIOGRAFIE

1. Babeu,T. Teoria elementară a rezistenței materialelor, Editura Mirton Timișoara, 1998
2. Bagiu,L. ș.a. Măsurări tehnice, Editura Printech, Timișoara, 1999.
3. Bagiu,L. Proiectarea preciziei de prelucrare statistică și metrologie în construcția de mașini, Editura Helicon, Timișoara, 1997
4. Călin,S. Regulate automate, Editura didactică și pedagogică, București, 1975.
5. Crișan,S.,Ignea,A. Măsurări și transductoare, curs, Vol.I și II, Universitatea Tehnică Timișoara, 1993
6. Dietrich,C.F. Uncertainty, calibration and probability, Adam-Hilger, Bristol, 1991
7. Doemens,G., ș.a. Microsystem for Capacitive Force and Torque Measurement, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany
8. El-Sayed,A. ș.a. Performance Evaluation and Metrological Characteristics of a Deadweight Force Standard Machine with Substitute Load Control System, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany
9. Fuller, W.A. Measurement error models, John Wiley (New York), 1987
10. Gherasimov,A., Ghita E. The traceability system of force measurements in Romania – 19<sup>th</sup> International Conference IMEKO TC3, Cairo- Egypt, 2005
11. Gherasimov,A. ș.a. Studies about the uncertainty of the reference value in the force measuring calibration from the agri-food technique systems – Proceedings of the International Conference Integrated Systems for Agri-food Production , SIPA 03, Editura Orizonturi Universitare Timisoara, 2003
12. Gherasimov,A. ș.a The uncertainty in calibrated force-measuring systems from agri-food Technique systems -Proceedings of the International Conference Integrated Systems for Agri-food Production, SIPA 03, Editura Orizonturi Universitare Timișoara, 2003
13. Gherasimov,A., Ghita E. The state of the art in the Romanian traceability system of force measurements- 8<sup>th</sup> International Conference on Flexible Technologies mma2003, Novi Sad, Serbia and Montenegro
14. Gherasimov,A, ș.a. Study about traceability in force measurement in Romania – 3<sup>rd</sup> International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI 2003, Herceg Novi Serbia and Montenegro
15. Gherasimov,A. Nanu A. Rolul trasabilității în măsurarea forțelor din sistemul tehnologiilor neconvenționale–Conferința Internațională de Tehnologii Neconvenționale, Sibiu. 2003

16. Gherasimov,A. Incertitudinea de măsurare a mașinilor uniaxiale de încercat materiale metalice, A Patra Conferință Națională “Profesorul Dorin PAVEL- fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2004
17. Gherasimov,A. Trasabilitatea internațională a măsurărilor forței din România, Buletinul AGIR nr. 4, 2004, Impactul Calității asupra Integrării României în Spațiul Economic European, Industrie, Agricultură, Mediu
18. Gherasimov,A. Declararea capabilității de măsurare a etalonului național de forță al României, Proceedings of scientific communications meeting of “Aurel Vlaicu” University, Arad, 2004
19. Gherasimov,A., Ghita E. The Uncertainty of Measurement in Calibration Using a Comparison Force Standard Machine– 19<sup>th</sup> International Conference IMEKO TC3, Cairo- Egypt, 2005
20. Gherasimov,A. Trasabilitatea internațională a măsurărilor de forță din România, Simpozionul științific al inginerilor români de pretutindeni, Ediția a IV-a, București, 2004
21. Gherasimov,A. Pomârlan,M. Ghid pentru estimarea și exprimarea incertitudinii de măsurare la etalonarea mașinilor și dispozitivelor care măsoară momentul forței și încercarea la torsiune, Ediția I, Ghid BRML G03-07-2006
22. Gherasimov,A. Pomârlan,M. Ghid pentru estimarea și exprimarea incertitudinii de măsurare la etalonarea aparatelor pentru încercarea statică la tracțiune, compresiune, forfecare sau încovoiere, Ediția I, Ghid BRML G03-06-2006
23. Gherasimov,A. The dissemination of the force unit in Romania: Interlaboratory comparisons, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference “Research and Development in Mechanical Industry” RaDMI 2006, Budva, Montenegro
24. Grave,H.F. Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice, Editura Tehnică, București, 1985
25. Iacobescu,F. Tehnologii și echipamente de control, Editura CERTI, Craiova, 1994
26. Iacobescu,F. Tehnologii moderne, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 2000
27. Iacobescu,F. Ilioiu,N. Metrologia, etalon al civilizațiilor, Editura Academiei Române, București, 2004
28. Ignea, A. Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice, Editura de Vest, Timișoara, 1996.
29. Jeffreys,H. Theory of probability, Oxford University Press, 1983
30. Jongho,K. ș.a. Design and Fabrication of a Three-Component Force Sensor using Micromachining Technology, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany
31. Kodama,K., ș.a. Force-Measuring Using Gyroscopic Force Measuring System, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany

32. Kumme,R. ș.a. Dynamic Proprieties and Investigations of Piezoelectric Force Measuring Devices, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany
33. Mack,O. Investigation of the Influence of Disturbing Components on a Piezoelectric Force Transducer, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany
34. Mertz,L. Grundkurs der Messtechnik, Partea II, Das elektrische Messen nicht elektrischen Grossen, Ediția 5, Munchen, 1980
35. Millea, A. Măsurări electrice. Principii și metode, Editura Tehnică, București, 1979
36. Millea,A. Cartea metrologului. Metrologie generală, Editura Tehnică, București, 1985
37. Mnerie, D. Traductoare de forță piezoceramice destinate automatizării utilajului tehnologic, Editura Orizonturi Universtitare, Timișoara, 2000
38. Mnerie,D. Contribuții la optimizarea utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, Teză de doctorat, Cond. șt. Prof.dr.doc.șt.ing.dhc. Aurel Nanu, UPT, Timișoara, 1997
39. Nanu,A. Tehnologia materialelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983
40. Nanu,A. ș.a. Tratat de tehnologii neconvenționale, Vol. I, Tehnologiile neconvenționale la început de mileniu, Editura Augusta, Timișoara, 2003
41. Nădășan,Șt., Boleanțu, L. Studii și cercetări de rezistență și încercări de materiale, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1965
42. Park, Y.,Kumme,R. Dynamic Investigation of Multi-Component Force Sensors using Harmonic Excitation, IMEKO World Congress 2002, Topic 3- measurement of Force, Mass and Torque
43. Peters,M., Sawla,A., Peschel,D. Uncertainty in force measurement. Report of CCM Working Group Force, Braunschweig, 1990
44. Peters,M. , Sawla,A. Uncertainty in force measurements, Report of the CCM Working Group Force, Braunschweig, Germany, 1990
45. Peters,M. , Sawla,A. An intercomparison of force standard machines at PTB Report of CCM Working Group Force, Celle,1996
46. Rațiu,M. Cercetări de rezistență și fiabilitate la solicitări oscilante, Editura Mirton Timișoara. 2003
47. Rațiu,M. Metrologia încercărilor mecanice de materiale, Editura Mirton Timișoara, 2004
48. Sawla,A. Uncertainty Scope of the Force Calibration Machines, IMEKO World Congress 2000, TC3, Vienna- Austria
49. Smith,D., ș.a. Compact Force Sensors for Low-Force Mechanical Probe Calibration, IMEKO World Congress 2002, TC3, Celle Germany



50. Țucu,D. Contribuții la optimizarea tehnologiei de fabricație a tuburilor flexibile, Teză de doctorat, Cond. șt. Prof.dr.doc.șt.ing.dhc. Aurel Nanu, UPT, Timișoara, 1995
51. Ueda,K A proposal of an evaluation method of uncertainty in traceability system of force, IMECO 2002, TC3, Celle Germany
52. Weiler,W., Sawla,A. Force standard machines of the National Institutes for Metrology,
53. x x x ASTM E4-03:2003, Standard practices for Force Verification of Testing Machines
54. x x x ASTM E74-04:2004, Standard Practice of Force Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines
55. x x x EA-2/03: 1996, EAL Interlaboratory Comparisons
56. x x x EA-4/02:1999, Expression of the Uncertainty of the measurement in Calibration
57. x x x EAL-G22:1996, Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements
58. x x x EUROMET Guide No 3:2002, EUROMET Guidelines on Conducting Comparisons
59. x x x HBM Germania, Catalog produse 2003
60. x x x ISO 376:1999, Metallic materials- Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines
61. x x x ISO 3534-1:1993, Statistics- Vocabulary and symbols- Part 1: Probability and general statistical terms
62. x x x ISO 6892:1998, Metallic materials- Tensile testing at ambient temperature
63. x x x ISO 7500-1:1999, Metallic materials-Verifications of static uniaxial testing machines, Part 1: Tension/compression testing machines- Verification and calibration of the force-measuring system
64. x x x ISO 7500-2:1996, Metallic materials-Verifications of static uniaxial testing machines, Part 2: Tension creep testing machines- verification of the applied load
65. x x x OIML R 60 :2000, Metrological regulation for load cells
66. x x x OIML R 65:2000, Système de mesure de force des machines uniaxiales d'essai des matériaux
67. x x x NIST, Technical Note 1246 : 1999, A New Statistical Model for the Calibration of Force Sensors
68. x x x Proceedings of measurement of force and mass, PTB 1976
69. x x x SR EN 196-1:1995, Metode de încercări ale cimenturilor. Parte 1: Determinarea rezistențelor mecanice



70. x x x SR CEI 770:1994, Metode de evaluare a caracteristicilor de funcționare a traductoarelor utilizate în sistemele de conducere a proceselor industriale
71. x x x SR ISO 8595 :2000, Interpretarea datelor statistice. Estimarea unei mediane
72. x x x SR 11852/4 :1993, Celule de sarcină cu tensorezistoare pentru măsurat forțe sau mase. Partea 4 : Condiții tehnice de verificare
73. x x x SR EN 12390-4:2002, Încercare pe beton întărit. Partea 4: Rezistența la compresiune- Caracteristicile mașinilor de încercare
74. x x x SR 13251:1996, Vocabular internațional de termeni fundamentali și generali în metrologie
75. x x x SR ENV 13005: 2003, Ghid pentru evaluarea și exprimarea incertitudinii de măsurare