

INSTITUTUL CENTRAL DE FIZICA
Institutul de Fizica și Tehnologia Aparatelor cu Radiații
București, Măgurele, C.P.MG-6
Romania

*Intreprinderea de Mecanică Fină, București

RO88 00102

ICETI7 - LOP-66-1988

March

MASURARI INTELIGENTE UTILIZIND
LASERUL SI MICROCALCULATORUL

N.Miron, D.Sporea, V.G. Velculescu

M.Petre*

Abstract: Some laser-based measuring equipment controlled by microcomputer developed for industrial and scientific purposes are described. These equipments are intended for dial indicators verification, graduated rules measurement, and for very accurate measurement of the gravitational constant. All of these use a laser interferometer for length measurement purposes, and acquire fringes as input data for length intervals.

The processing of measurement data are specifically processed according to the job of the equipment.

1. INTRODUCERE

Progresele tehnologice din mecanica fină și metrologie necesită echipamente din ce în ce mai complexe. Citeva din cele mai semnificative cerințe ale unui echipament de măsurare modern sînt: precizia ridicată, timp de măsurare redus și posibilități de calcul pentru prelucrarea datelor achiziționate.

Echipamentele de măsurare cu laser controlate de microcalculator sînt deosebit de utile în mecanica fină și în metrologie, datorită stabilității excelente a lungimii de undă a radiației laser și datorită posibilităților de calcul oferite de microcalculator.

În continuare vor fi prezentate trei instalații cu laser controlate de microcalculator.

2. INSTALAȚIE CU LASER PENTRU VERIFICAREA COMPARATOARELOR CU CADRAN

Comparatoarele cu cadran sînt instrumente de măsurări mecanice folosite pe scară foarte largă în prelucrările de precizie pe mașinile unelte.

Verificarea metrologică a unui comparator cu cadran constă din determinarea erorilor de justețe într-un număr determinat de puncte din intervalul de măsurare și din calcularea, pe baza determinărilor făcute, a erorii de justețe pe întreg intervalul, a erorii de histerezis și a erorii de fidelitate. Metodele uzuale de verificare a comparatoarelor folosite în prezent: rigla sinus, aparatul de tip Abbé, aparatele tip Mitutoyo, calele etalon, asigură precizia de măsurare necesară verificării unui comparator cu cadran. Operatorul are însă o contribuție esențială atât la citirea indicațiilor comparatorului de măsurat, cit și a indicațiilor aparatului de verificat comparatoare. După un număr nu prea mare de determinări intervine inerent oboseala operatorului, ceea ce conduce la erori subiective atât la determinarea erorilor de justețe în punctele din intervalul de măsurare, cit și la efectuarea calculelor cu aceste valori determinate, pentru obținerea celorlalți parametri de interes.

Pentru un producător de comparatoare cu cadran prezintă un deosebit interes verificarea rapidă, lipsită de erori subiective și având precizia impusă de standarde, Astfel, a apărut ideea construirii instalației cu laser pentru verificarea comparatoarelor cu cadran. La elaborarea instalației, pe lângă criteriile preciziei de măsurare și de efectuare a calculelor de interpretare a rezultatelor și a timpului necesar efectuării tuturor operațiilor s-a avut în vedere și posibilitatea verificării cât mai multor tipuri de comparatoare: cu scară normală cu valoarea diviziunii de 0,01 mm și 0.002 mm, cu intervalul de măsurare de maximum 30 mm și cu scară bilaterală cu intervalul de măsurare de maximum ± 0.120 mm și cu valoarea diviziunii de 0.002 mm și 0.001 mm. Atât metoda de măsurare folosită cât și instalația realizată pe baza acestei metode sînt de concepție originală, și au fost brevetate atât în țară cât și în străinătate /1,2,3/.

Metoda pentru verificarea comparatoarelor cu cadran care face subiectul brevetelor de invenție menționate, este o metodă dinamică și constă în esență din următoarele : tija de palpate a comparatorului de măsurat este mișcată continuu, dus-întors, pe întreg intervalul de măsurare , de către un mecanism de deplasare special conceput pentru acest scop. Deplasarea liniară a tijei de palpate a comparatorului este măsurată cu un interferometru cu laser He-Ne, avînd precizia de măsurare de 0.1582 μ m. Punctele în care se determină eroarea de justețe a comparatorului cu cadran sînt date de pozițiile acului indicator principal al comparatorului, în raport cu cadranul. Aceste poziții sînt sesizate cu un traductor unghiular optoelectronic, fără contact, special conceput.

Diferența dintre valoarea nominală și valoarea deplasării tijei de palpate măsurată cu interferometrul cu laser și valoarea

nominală reprezintă eroarea de justețe a comparatorului cu cadran pe care instalația o determină în fiecare punct de verificare. Cu ansamblul valorilor pentru erorile de justețe astfel determinate, un microcalculator determină eroarea de justețe pe întreg intervalul de măsurare și eroarea de histerezis și eroarea de fidelitate.

În cele ce urmează va fi descrisă instalația universală cu laser pentru verificarea comparatoarelor cu cadran, implementată pe baza metodei de verificare prezentată mai sus. Schema bloc a acestei instalații este reprezentată în Fig. 1.

Instalația se compune din două subansambluri principale: subansamblul de măsurare (A) și subansamblul de control și prelucrare de date (B).

În suportul (4) al subansamblului de măsurare se montează comparatorul de verificat (5). Tija de palpăre a comparatorului este antrenată într-o mișcare dus-întors de la un capăt la celălalt al intervalului de măsurare, de către un mecanism de antrenare (3) special conceput în acest scop. Unul din capetele tijei de antrenare a mecanismului (3) mișcă tija de palpăre a comparatorului (5), iar celălalt capăt deplasează retroreflectorul mobil al interferometrului Michelson (2). Acest interferometru este traductorul liniar al instalației, care permite măsurarea deplasării liniare a tijei de palpăre a comparatorului, cu o precizie de $\lambda/4$, unde λ este lungimea de undă a radiației monocromatice utilizate. În cazul de față, sursa de lumină este un laser He-Ne în vizibil, cu $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, deci precizia de măsurare a interferometrului este $0,1582 \mu\text{m}$.

Pornirea, oprirea și sensul de deplasare a tijei mecanismului de antrenare (3) sînt comandate de subansamblul de control și

prelucrare de date B.

După cum s-a arătat și în prezentarea metodei de măsurare, punctele de verificare din întregul interval de măsurare al comparatorului sînt date de traductorul unghiular (5), montat deasupra cadranului comparatorului. Acest traductor unghiular are fante plasate circular, în puncte care corespund punctelor de verificare din domeniul de măsurare al comparatorului. În spatele fiecărei fante este plasat cîte un fotodetector. O sursă de lumină iluminează cadranul numai în dreptul fiecărei fante. La mișcarea continuă dus-întors a tijei de palpăre a comparatorului, acul indicator al acestuia obturează pe rînd cîte o fantă. În acest mod, fotodetectorul plasat în spatele fantei obturate dă un semnal electric care marchează punctul de verificare din intervalul de măsurare la care a ajuns tija de palpăre a comparatorului.

Subansamblul de control și prelucrare de date B asigură dialogul dintre operator și instalație, comandă funcționarea întregii instalații, efectuează calculele necesare pentru determinarea erorii de justețe pe întreg intervalul de măsurare și controlează funcționarea perifericelor de afișare și stocare a datelor pe termen lung. Acest subansamblu este compus din unitatea centrală (7), display-ul pe tub catodic (8), tipăritorul (9), unitatea de casetă magnetică (10) și claviatura (11).

Prin intermediul claviaturii (11), operatorul dă comenzi instalației. Imediat după conectarea la rețea sau ori de cîte ori este nevoie, se comandă inițializarea instalației, care semnifică pentru subansamblul de măsurare A, aducerea și menținerea tijei mecanismului de antrenare (3) în poziția extremă inferioară, precum și verificarea dacă comparatorul de măsurat este montat

și dacă este conectat traductorul unghiular care corespunde tipului de comparator ce urmează a fi măsurat. Pentru subansamblul de control și prelucrare de date, inițializarea efectuează încărcarea numărătorului de acumulare a frânelor cu un număr prestabilit precum și inițializarea perifericelor (tipăritor, display, TV, etc.

Operatorul introduce, prin intermediul claviaturii (11), scria și anul de fabricație a comparatorului, după care dă comanda START. La primirea acestei comenzi, unitatea centrală (7) emite o comandă de pornire pentru mecanismul de antrenare (3) care deplasează tija de palpate a comparatorului (6) de la origine către extremitatea superioară a intervalului de măsurare. Franjele provenite acum de la interferometrul Michelson (2) sînt acumulate într-un numărător special pentru franje. Conținutul acestui numărător este citit în momentul apariției fiecărui impuls provenit de la traductorul unghiular (5) și reprezintă deplasarea măsurată a tijei de palpate a comparatorului, între origine și punctul de verificare corespunzător fotodetectorului care a dat semnalul de obturare. Acest număr este scăzut dintr-un număr care reprezintă valoarea nominală a deplasării tijei de palpate în punctul considerat (afi. ă cu memoria nevolatilă a microcalculatorului).

Diferența rezultată, în mărime și semn, reprezintă eroarea de justețe a comparatorului în punctul considerat. Acest mod de lucru se repetă pentru fiecare punct de verificare din intervalul de măsurare al comparatorului, atât pentru cursa de ducere, cît și pe cursa de întoarcere. Pentru o deplasare dus-întors a tijei de palpate pe întreg domeniul de măsurare se obține un set de valori ale erorilor de justețe. În scopul obținerii unei erori de justețe medii în fiecare punct de verificare se repetă măsurarea pe întreg intervalul dus-întors de încă 4 ori. Din valorile medii

ale erorilor de justețe în fiecare punct determinate în acest mod se calculează eroarea de justețe pe cursa de ducere, eroarea de justețe pe întreg domeniul, eroarea de histerezis și eroarea de fidelitate a comparatorului.

Atât rezultatele măsurării (cele patru tipuri de erori) cât și încadrarea în clasele de precizie sunt afișate pe monitorul calculatorului. Pentru tipărirea a acestor erori, operatorul va da o comandă de tipărire.

Modul de lucru descris mai sus corespunde situației unui comparator bun din punct de vedere mecanic. Instalația de verificat comparatoare cu cadran a fost concepută pentru a recunoaște și comparatoarele al căror mecanism se blochează fie pe cursa de ducere a tijei de palpăre, fie pe cursa de întoarcere. În aceste situații, este semnalizată defecțiunea comparatorului iar tija de antrenare (3) este adusă în poziție inițială. Este adusă în poziția inițială și logica de achiziție a datelor din subansamblul de control și prelucrare a datelor.

O atenție deosebită a fost acordată erorilor instalației universale de verificare a comparatoarelor cu cadran. A fost efectuat un studiu amănunțit al surselor de erori introduse de părțile componente ale subansamblurilor de măsurare și de prelucrarea datelor. S-a analizat influența erorilor de poziționare relativă a tijei mecanismului de antrenare și a tijei de palpăre a comparatorului, influența presiunii, temperaturii și umidității aerului asupra semnalelor obținute de la interferometrul Michelson, influența construcției și montării pe comparator a traductorului urghiular și influența erorii introduse de algoritmi de calcul asupra rezultatului final.

În urma acestui studiu și a măsurărilor efectuate pe instalație s-a constatat că eroarea dominantă (70%) este introdusă

de traductorul unghiular. Din acest motiv, o atenție deosebită a fost acordată construcției acestei piese în scopul obținerii unei erori maxime acceptabile impuse, ținând cont de tehnologia disponibilă. Soluția constructivă la care s-a ajuns face posibilă utilizarea acestui traductor unghiular și în alte aplicații de citire fără contact a poziției unghiulare a unui ac indicator.

Valoarea absolută a erorii globale a instalației universale pentru verificarea comparatoarelor cu cadran este dependentă de tipul de comparator care se verifică. Pentru comparatoare cu valoarea diviziunii de 0,01 mm, această eroare este de 2,4 μm.

Timpul de verificare pentru un comparator cu cadran cu scară normală având valoarea diviziunii de 0,01 mm și intervalul de măsurare de 10 mm este de maximum 2,5 minute. În acest timp se fac cele cinci seturi de determinări corespunzător celor cinci curse dus-întors ale tijei de palpăre a comparatorului pe întreg intervalul de măsurare, se efectuează calculele menționate mai sus și se tipăresc rezultatele.

3. INSTALAȚIE CU LASER PENTRU VERIFICAREA RIGLELOR MILIMETRICE DE PRECIZIE

Riglele milimetrice metalice și de sticlă pentru cititorii optici conțin unitatea de lungime a cititorului optic. Eroarea de divizare a acestor rigle este esențială în asigurarea erorii de măsurare a cititorului optic. Din acest motiv, determinarea erorii de divizare a riglei este esențială în caracterizarea riglei milimetrice.

Riglele milimetrice pentru cititorii optici au lungimile cuprinse între 160 mm și 2000 mm. Lungimi mai mari de 2000 mm se obțin prin alăturarea cap la cap a riglelor cu lungimi mai mici. Una din condițiile de verificare a riglelor milimetrice este

determinarea erorii de divizare din milimetru în milimetru fie pe toată lungimea riglei, fie numai pe o porțiune definită arbitrar. Aceste măsurări trebuie efectuate pe fiecare exemplar de riglă. În final, în urma măsurărilor, trebuie emis un buletin de verificare care trebuie să conțină și diagrama erorilor pe intervalele în care eroarea de divizare depășește o anumită valoare.

Deoarece determinarea erorii de divizare trebuie făcută pe lungimi de până la 3000 mm, prin mediere efectuată pe trei măsurări, iar eroarea de divizare impusă fabricantului este $\epsilon_d = \pm(5 \pm 0,005 L) \mu\text{m}$, unde L este lungimea riglei exprimată în mm, apare necesitatea măsurării lungimilor cuprinse între 0 și 3000 mm, cu efectuarea corecțiilor de dilatare a riglei.

Eroarea de măsurare impusă instalației pentru verificarea riglelor milimetrice și numărul mare de puncte în care trebuie efectuate măsurările au condus la necesitatea construirii unei instalații cu laser controlată de calculator.

Instalația cu laser pentru măsurarea riglelor milimetrice de precizie VRM-1 este destinată determinării erorii de divizare a riglelor milimetrice metalice și de sticlă, având lungimea cuprinsă între 1 mm și 3000 mm. Instalația trebuie să determine erorile de divizare ale riglei milimetrice. Eroarea de divizare a unei gradații reprezintă diferența dintre distanța măsurată între reperul curent și originea reperelor, și distanța nominală între aceste două repere. Originea reperelor poate fi definită arbitrar de către operator și este menținută aceeași tot timpul măsurărilor aceleiași rigle.

Pentru a fi verificată, rigla trebuie așezată pe o suprafață perfect plană. Vizarea gradațiilor trebuie făcută fără a avea contact cu rigla, iar măsurarea distanței dintre reperul curent și

origine trebuie făcută după o direcție riguros paralelă cu direcția după care este făcută măsurarea. În scopul satisfacerii acestor condiții, a fost aleasă mașina universală de măsurat lungimi ULMM Carl Zeiss Jena (Fig. 2).

Rigla de măsurat (1) se așează pe bancul mașinii universale de măsurat lungimi ULMM (2). Pe căruciorul (3) al acestei mașini este montat dispozitivul optoelectronic de vizare a reperelor riglei (4) și retroreflectorul mobil (5) al interferometrului (6). Interferometrul (6) conține un laser He-Ne stabilizat în frecvență, un divizor de fascicul, un retroreflector fix și fotodetectori pentru cele două sisteme de franje. Subansamblul (6) este fixat pe ghidajele bancului optic (2) al mașinii ULMM.

Căruciorul (3) al acestei mașini este mișcat de-a lungul ghidajelor de către un mecanism de antrenare (7).

Pentru așezarea riglei milimetrice (1) și pentru deplasarea dispozitivului optoelectronic de citire a reperelor riglei (4) a fost aleasă mașina universală de măsurat lungimi ULMM din următoarele considerente :

- Construirea cu forțe proprii a unui banc similar, având lungimea de peste 3 metri și cu o precizie de ghidare mai bună de 3 μ m, este foarte dificilă, necesită timp îndelungat și este foarte scumpă.

- Prin utilizarea mașinii universale Zeiss ca subansamblu de susținere a riglei și de deplasare a vizorului (4) se poate face o verificare alternativă a riglei de măsurat (1) atât cu sistemul de măsurare propriu al acestei mașini, cât și cu interferometrul laser. În felul acesta există posibilitatea verificării rezultatelor

obținute prin măsurarea cu două instalații.

Controlul instalației cu laser pentru verificarea riglelor milimetrice se face de către terminalul de pregătire de date TPD (8), produs de Intreprinderea de Echipamente Periferice București.

Considerentele care au condus la alegerea acestui terminal pentru controlul acestei instalații au fost: posibilitatea de adaptare la necesitățile instalației VRM-1, facilități de programare. Schema-bloc a TPD este reprezentată în Figura 3.

În configurația necesară instalației VRM-1 TPD conține următoarele module funcționale:

- unitatea centrală
- memoria
- controlorul grafic pentru tub catodic
- controlorul de disc flexibil
- interfața de comunicație serială

La aceste module funcționale proprii TPD se mai adaugă următoarele module funcționale specifice instalației cu laser de verificare a riglelor milimetrice:

- modulul de achiziție analogică
- modulul de achiziție a franjelor
- modulul de comandă a motorului pas cu pas

Modulul de achiziție analogică prelucrează semnalele analogice de la interferometrul cu laser, de la fotodetectorul pentru repere și de la senzorii de temperatură, presiune atmosferică și umiditate.

Scăderea puterii fasciculului emis de laser sub o anumită valoare sau obturarea accidentală a fasciculului conduce la apariția unui flag citit de microcalculator, TPD, printr-un port de intrare.

Imaginea reală și mărită a reperelor riglei milimetrice este sesizată de un fotodetector. După discriminarea și diferențierea semnalului dat de acest fotodetector, se obțin impulsurile pentru citirea conținutului numărătorului de franje.

Temperatura aerului T_a este măsurată cu trei traductori (10), iar temperatura riglei T_p este măsurată cu alți trei traductori (13). Eroarea de măsurare a acestora este de $0,05^{\circ}\text{C}$ în intervalul 15°C - 25°C . Semnalele date de acești traductori sînt mărimi continue în intervalul $0 \div +10\text{V}$, care se aplică la intrările corespunzătoare ale unui multiplexor analogic.

Presiunea atmosferică în domeniul 840-1100 mbar este măsurată cu un traductor de presiune absolută cu ieșire în curent în intervalul 4-20 mA. Prin intermediul unui convertor curent/tensiune se obține un semnal în domeniul $0 \div +10\text{V}$.

Umiditatea aerului este măsurată cu un traductor de tip psihometric, în domeniul 20% - 80%. Semnalul analogic din domeniul 0-500 mV generat de acest traductor este adus tot în domeniul $0 \div +10\text{V}$.

Toate aceste semnale în domeniul $0 \div +10\text{V}$ se aplică la intrările unui convertor analog numeric de 10 biți, printr-un multiplexor analogic. Convertorul analog/numeric și multiplexorul sînt văzuți de TPD ca un periferic de intrare.

Franjele de la interferometru, transformate în semnale compatibile TTL, sînt achiziționate de un alt periferic, de tip frecvențmetru.

În scopul măsurării (Fig.2) rigla (1) se așează pe bancul (2), astfel încît să se asigure o eroarea de sinus minimă. Prin intermediul TPD (8) se deplasează căruciorul (3) pînă cînd dispozitivul de fotodetecție (4) vizează porțiunea fără diviziuni a riglei. Începerea măsurării este dată de calculator care comandă

motorul pas cu pas (7), sub acțiunea căruia se deplasează căruciorul (3). În acest mod, prin fața dispozitivului de fotodetecție (4) va defila imaginea reperelor riglei (5). Distanța dintre reperele de grosime d , măsurată de instalație este de fapt distanța dintre liniile mediane ale acestora : L_1, L_2, \dots, L_n . Extremitățile intervalului de verificare a riglei sînt stabilite prin program. În felul acesta, atât lungimea intervalului de verificare, cît și plasarea sa pe riglă sînt la dispoziția utilizatorului. Pentru caracterizarea riglei se efectuează patru serii de măsurători, rezultatul fiind media acestor măsurători.

Considerînd toate sursele de erori, eroarea globală a instalației cu laser pentru verificarea riglelor milimetrice VRM-1, este:

$$\epsilon = \pm(0.32 \pm 0.00083L) \text{ } \mu\text{m} \quad (3.1)$$

unde L este lungimea măsurată, exprimată în mm.

Afișarea rezultatelor se face sub formă alfanumerică și grafică. Sînt afișate și listate la tipăritor erorile riglei care depășesc o anumită valoare și intervalele pe care are loc această depășire a erorii.

4. SISTEMUL DE ACHIZIȚIE ȘI PRELUCRARE A DATELOR PENTRU GRAVIMETRUL BALISTIC ABSOLUT

Gravimetrul balistic absolut pentru care a fost realizat sistemul de achiziție și prelucrare a datelor descris în continuare determină accelerația gravitațională g din ecuația căderii libere cu condiții inițiale date. Forma acestei ecuații fără corecții de ordin superior este binecunoscută:

$$H = \frac{gt^2}{2} + v_0 t + H_0 \quad (4.1)$$

unde H este spațiul de cădere măsurat, t este intervalul de timp măsurat, iar v_0 și H_0 sînt respectiv viteza inițială și spațiul

inițial la momentul începerii măsurării.

Principiul de funcționare al gravimetrului balistic absolut va fi explicat pe scurt în legătură cu figura 4.

Corpul în cădere este reflectorul mobil al unui interferometru Michelson, care cade în vid între punctele A și C. Din considerente de ordin tehnic, spațiul căderii măsurate H este BC.

Printr-o metodă oarecare, retroreflectorul mobil este lăsat să cadă liber în vid din punctul A. După parcurgerea unui spațiu de stabilizare AB, acesta trece printr-o barieră optică plasată în punctul B al traiectoriei. Începând din acest moment, bariera optică comandă începutul achiziției datelor, care se face în modul descris în continuare. Spațiul căderii măsurate H este împărțit în subintervale h_0 , având lungimea egală cu 2^{14} franje de interferență. Lungimea de undă a laserului He-Ne utilizat în interferometru fiind $\lambda \approx 0.6328 \mu\text{m}$, o franjă corespunde la $\lambda/2 = 0,3164 \mu\text{m}$. Rezultă că un interval elementar are lungimea $h_1 = \frac{\lambda}{2} \cdot 2^{14} \approx 5183,8976 \mu\text{m}$.

Generarea subintervalelor h_1 se face prin divizarea cu 2^{14} a impulsurilor de franje provenite de la interferometru, după amplificarea și formarea TTL a acestora. Divizarea cu 2^{14} este astfel făcută, încît două intervale elementare adiacente h_1 și h_{1+1} să aibă o extremitate comună : sfîrșitul lui h_1 este și începutul lui h_{1+1} .

Timpii de cădere a reflectorului mobil pe multipli de h_1 se măsoară ca duratele unor impulsuri care au același front: crescător (momentul trecerii reflectorului mobil prin punctul B). Fronturile descrescătoare ale acestor impulsuri coincid cu extremitățile intervalelor h_1 (Fig. 5).

Se generează astfel impulsurile cu duratele $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N$, care corespund respectiv la un interval h_1 , la două intervale h_i , la i intervale h_i . Intervalul de timp t_N corespunde astfel căderii reflectorului mobil pe întregul spațiu măsurat H . Pentru un număr $N = 300$ intervale elementare h_1 , rezultă un spațiu de cădere măsurat $H \approx 1,555$ m.

Timpul de cădere t_N pe spațiul H , calculat cu formula (4.1) este de aproximativ 553 ms. Aceasta este durata maximă a intervalelor de timp care trebuie măsurate. Durata minimă a unui interval de timp este 32,1 ms, care corespunde căderii reflectorului mobil al interferometrului pe primul interval $h_1 = 5,1839$ mm.

Pentru determinarea erorii necesare în măsurarea spațiului de cădere liberă și a timpului de cădere, se scoate g din relația (4.1) cu condiții inițiale nule:

$$g = \frac{2H}{t^2} \quad (4.2)$$

Prin logaritmare și diferențierea cu diferențe finite a relației (4.7) se obține:

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta H}{H} - 2 \frac{\Delta t}{t} \quad (4.3)$$

unde Δg , ΔH și Δt sînt respectiv erorile absolute în determinarea lui g , H și t . Pentru o extremitate curentă a unui interval cu h_i ($m = 0, 1, \dots, N$), relația (4.3) se scrie:

$$\frac{\Delta g_i}{g_i} = \frac{\Delta h_i}{h_i} - 2 \frac{\Delta t_i}{t_i} \quad (4.4)$$

Eroarea relativă impusă pentru determinarea lui g este $\epsilon_g = \frac{\Delta g}{g} = 10^{-8}$. Rezultă că eroarea relativă în determinarea spațiului și timpului de cădere trebuie să fie de același ordin de mărime.

Timpul maxim de cădere fiind $t_N = 553$ ms în scopul asigurării unei erori relative $\epsilon_t = \frac{\Delta t_i}{t_i} = 10^{-8}$, trebuie ca eroarea absolută

maximă în determinarea lui t_i să fie $\Delta t_N = t_N = 10^{-8} = 5,53 \cdot 10^{-9}$ s.

Distanța maximă de cădere fiind $H = 1.555$ m, pentru asigurarea unei erori relative $\epsilon_{H_i} = \frac{\Delta H}{H} = 10^{-8}$, trebuie ca eroarea absolută în determinarea spațiilor mh_i să fie mai bună decât $1.5 \cdot 10^{-8}$, adică $\lambda/42$.

Generarea intervalelor de timp t_i corespunzătoare multiplilor de intervale h_i și măsurarea acestor intervale de timp se face cu un modul special, conceput ca periferic de calculator. Acest periferic este conceput compatibil cu terminalul TPD produs de Intreprinderea de Echipamente Periferice București și prezentat la instalația de verificare a riglelor milimetrice VRM-1.

A fost ales TPD ca unitate de bază pentru sistemul de achiziție și prelucrare a datelor pentru gravimetrul balistic absolut deoarece așa cum rezultă de mai sus, conține tot ceea ce este necesar din punct de vedere hardware unui sistem de acest gen. TPD are acces complet la bus-urile de date, adrese și control.

Pentru a fi utilizat în calitate de controlor în gravimetrul balistic absolut la TPD se mai adaugă un modul de achiziție a franjelor de la interferometrul cu laser și modulul de măsurare a intervalelor de timp (Fig. 4).

Modulul de achiziție a franjelor de la interferometrul cu laser este reprezentat în Fig. 6.

Semnalele FR1 și FR2 provenind de la interferometrul Michelson sînt acumulate în numărătorul sincron reversibil care generează la ieșire impulsurile t_i (Fig.6) corespunzătoare parcurgerii de către reflectorul mobil a intervalelor în h_i . Fiecare front posterior al impulsurilor t_i generează cîte o cerere de transfer DMA către TPD. Prin acest transfer sînt trecute direct în memoria

terminalului conținutul numărătoarelor N_0 , N_1 și N_2 ale sistemului de măsurare a intervalelor de timp prin metoda dublului vernier. A fost utilizată această metodă pentru măsurarea intervalelor de timp t_1 , datorită erorii de măsurare absolute mici (< 6 ns) necesare în gravimetrul balistic absolut.

Principiul de măsurare a intervalului de timp prin metoda dublului vernier va fi explicat pe scurt cu reprezentările din Fig. 7. Precizia ridicată a acestei metode rezultă din utilizarea a două oscilații bază de timp cu perioadele puțin diferite T_0 și T_1 , pentru interpolarea diferenței de fază dintre fronturile impulsului de măsurat t_1 și ale impulsurilor bază de timp RCR. Oscilațiile cu perioada $T_1 > T_0$ sînt generate din oscilațiile de referință cu perioada T_0 , printr-o tehnică PLL, deci cu aceeași stabilitate ca și referința. Generînd astfel oscilațiile cu perioada T_1 , între T_1 și T_0 există relația :

$$T_1 = \frac{m+1}{m} T_0 \quad (4.5)$$

În implementarea de față, $T_0 = 100$ ns, $m = 100$, deci $T_1 = 101$ ns. Eroarea de măsurare este $T_1 - T_0 = 1$ ns. Conform modului de generare a lui T_1 , apare coincidența dintre fronturile anterioare ale RCK și respectiv LCK și TCK, după $100 T_0$ sau $99T_1$. Această situație se păstrează în regim de așteptare, în absența vreunui impuls de măsurare t_1 .

La apariția frontului anterior al impulsului de măsurat t_1 cu o fază arbitrară în raport cu frontul anterior al lui RCK, oscilațiile LCK sînt oprite pentru o durată τ , după care pornesc cu fază inițială zero. Relația de fază existentă între RCK și LCK este acum pierdută și se restabilește la prima coincidență C_1 dintre fronturile anterioare ale lui RCK și LCK, după N_1 perioade T_1 ($1 \leq N_1 < 100$). În felul acesta se interpolează diferența de fază dintre frontul anterior al lui T_2 și frontul anterior al lui RCK.

La apariția frontului posterior al lui t_1 , se opresc oscilațiile TCK tot pe o durată τ , în care se pierde fazarea dintre TCK și RCK. Fazarea dintre aceste două oscilații se reface după N_2 perioade T_1 ($1 \leq N_2 < 100$), când are loc prima coincidență C_2 , similară cu C_1 . Astfel, se interpolează diferența de fază dintre frontul posterior al lui T_1 și frontul anterior al lui RCK.

Cele două durate τ de oprire a oscilatoarelor LCK și TCK trebuie să fie riguros egale. În aceste condiții, intervalul de timp măsurat t_1 este dat de formula :

$$t_1 = (N_1 - N_2)T_1 + N_0T_0 \quad (4.6)$$

unde N_0 este numărul de impulsuri RCK cu perioada T_0 , dintre coincidențele C_1 și C_2 .

Măsurarea intervalului de timp t_1 se termină la apariția coincidenței C_2 . Numerele N_0 , N_1 și N_2 sînt acumulate în trei numărătoare distincte. N_1 și N_2 fiind maximum 99, numărătoarele N_1 și N_2 au 7 biți. Timpul de cădere pe spațiul H fiind de aproximativ 553 ms, iar perioada $T_0 = 100$ ns, numărătorul N_0 trebuie să aibă 23 biți. La terminarea măsurării, conținuturile numărătoarelor N_0 , N_1 și N_2 se transferă în memoria de date a unui sistem de calcul, care efectuează calculele necesare pentru determinarea lui t_1 . Sistemul utilizat atât pentru controlul gravimetrului balistic absolut, cît și pentru calcule, este un terminal pentru pregătire de date (TPD), produs de IEPER București. Acest terminal este construit cu sistemul de microcalculator 8080. Transferul conținutului numărătoarelor N_0 și N_2 în memoria sistemului se face în regim DMA la sfîrșitul fiecărei măsurări. Pentru fiecare măsurare de interval de timp sînt necesare 5 cicluri DMA, corespunzătoare conținutului celor trei numărătoare. Deoarece pe întregul spațiu măsurat sînt efectuate 300 de măsurări, rezultă că pentru acumula-

rea datelor de la perifericul de măsurare a intervalelor de timp este nevoie de 1,2Kbytes RAM.

În acest scop a fost construită o variantă specială a frecvențimetrului reciproc cu dublu vernier de timp (Fig. 7). Frontul anterior al impulsurilor t_i este același pentru toate impulsurile fiind dat de originea comună a intervalelor t_i . În consecință, conținutul numărătorului N_1 (7 biți) va fi citit o singură dată, la terminarea măsurării. Fronturile posterioare ale impulsurilor t_i sînt generate de sfîrșitul pachetelor de impulsuri de 2^{14} franje. Conținutul numărătoarelor N_0 (24 biți) și N_2 (7 biți) este citit la fiecare sfîrșit de impuls t_i . Intervalul minim de timp între două citiri succesive ale lui N_0 și N_1 este deci între fronturile posterioare ale impulsurilor t_{N-1} și t_N , și are valoarea de aproximativ 94 μ s. Din acest motiv a apărut necesitatea transferului DMA.

În acest mod se generează o imagine memorie a duratei intervalelor t_i , care constituie date primare pentru calculul valorilor g_i . Un program special conceput în limbaj BASIC determină valorile g_i din duratele intervalelor t_i . Deoarece eroarea de măsurare a lui g_i este de ordinul 10^{-8} , mai trebuie făcute și corecții de ordin superior. Acest program ia în considerare toate aceste corecții.

La sfîrșitul unei căderi libere este afișată valoarea lui g_i cu eroarea de 10^{-3} , imediată peste cele 300 de determinări efectuate pe parcursul unei singure căderi libere a colțului de cub mobil.

5. CONCLUZII

Din cele prezentate mai sus se poate deduce că utilizând în instalațiile de măsurare cu laser un minicalculator de 8 biți, având un sistem de operare flexibil, la care se adaugă câteva interfețe specifice, se pot obține performanțe deosebite din punctul de vedere al controlului instalației și a rezultatelor obținute : precizie, mod de prelucrare și de afișare.

BIBLIOGRAFIE

1. Brevet de invenție RSR nr. 71070
2. Brevet de invenție RSR nr. 79422
3. Brevet de invenție SUA nr. 4738160

LEGENDA FIGURILOR

- Figura 1. Schema bloc a instalației cu laser pentru verificarea comparatoarelor cu cadran. A - subansamblul de măsurare; B - subansamblul de control și prelucrare de date; 1 - laser He-Ne; 2 - interferometru Michelson, 3 - mecanism de antrenare; 3.1. - tija mecanismului de antrenare; 4 - suportul comparatorului; 5 - traductor unghiular; 6 - comparator de verificat; 7 - unitatea centrală; 8 - display pe tub catodic; 9 - imprimantă; 10 - unitate de casetă magnetică; 11 - claviatură

- Figura 2. Schema bloc a instalației cu laser pentru verificarea riglelor milimetrice de precizie: 1- riglă milimetrică; 2 - bancul mașinii ULMM; 3 - cărucior 4 - dispozitiv de vizare a reperelor riglei; 5 - retroreflector mobil; 6 - interferometru Michelson 7 - mecanism de antrenare; 8 - TPD; 9 - tipăritor 10 - traductori pentru temperatura aerului (T_a); 11 - traductor de presiune atmosferică (p); 12 - traductor de umiditate atmosferică (h); 13 - traductori pentru temperatura piesei (T_p)
- Figura 3. Schema bloc a TPD, incluzând și perifericele specifice instalației VRM-1.
1 - unitatea centrală; 2 - memorie; 3 - cuplor comunicație serială; 4 - cuplor claviatură; 5 - cuplor display; 6 - cuplor disc flexibil; 7 - cuplor imprimantă; 8 - claviatură; 9 - display 10 - unitate de disc flexibil; 11 - imprimantă 12 - cuplor achiziție franje; 13 - cuplor achiziție analogică.
- Figura 4. Principiul de funcționare a gravimetrului balistic absolut
- Figura 5. Intervalele de timp generate la căderea reflectorului mobil al interferometrului Michelson
- Figura 6. Schema bloc a modului de achiziție a franjelor pentru gravimetrul balistic absolut.
1 - selecția lungimii intervalului; 2 - detector de fază; 3 - numărător de franje; 4 - numărător de intervale de măsurare; 5 - sistem de control pentru transferul DMA; 6 - controlor DMA; 7 - Driver-i de Gus.
- Figura 7. Principiul de măsurare a intervalelor de timp prin metoda dublului vernier.

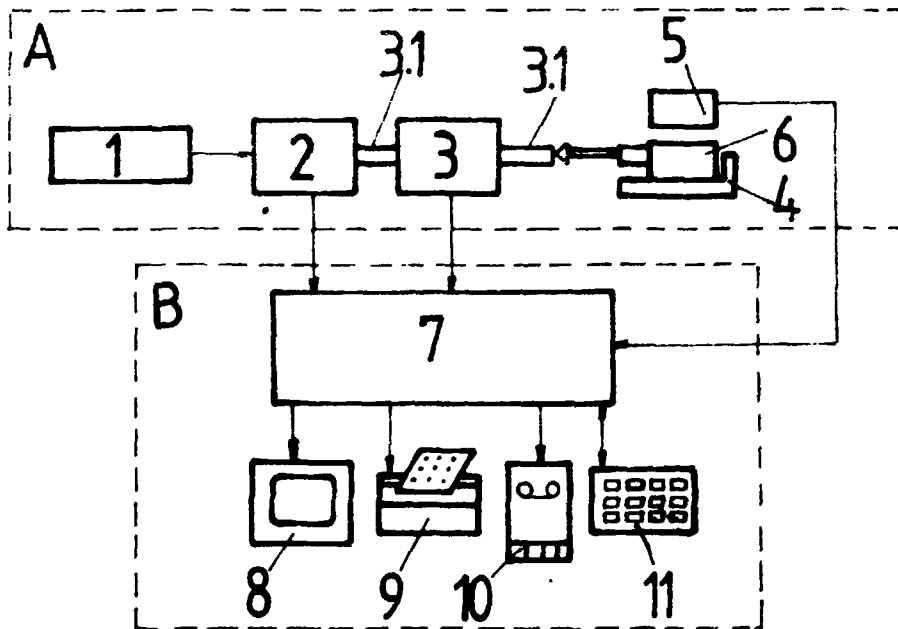


Fig.1

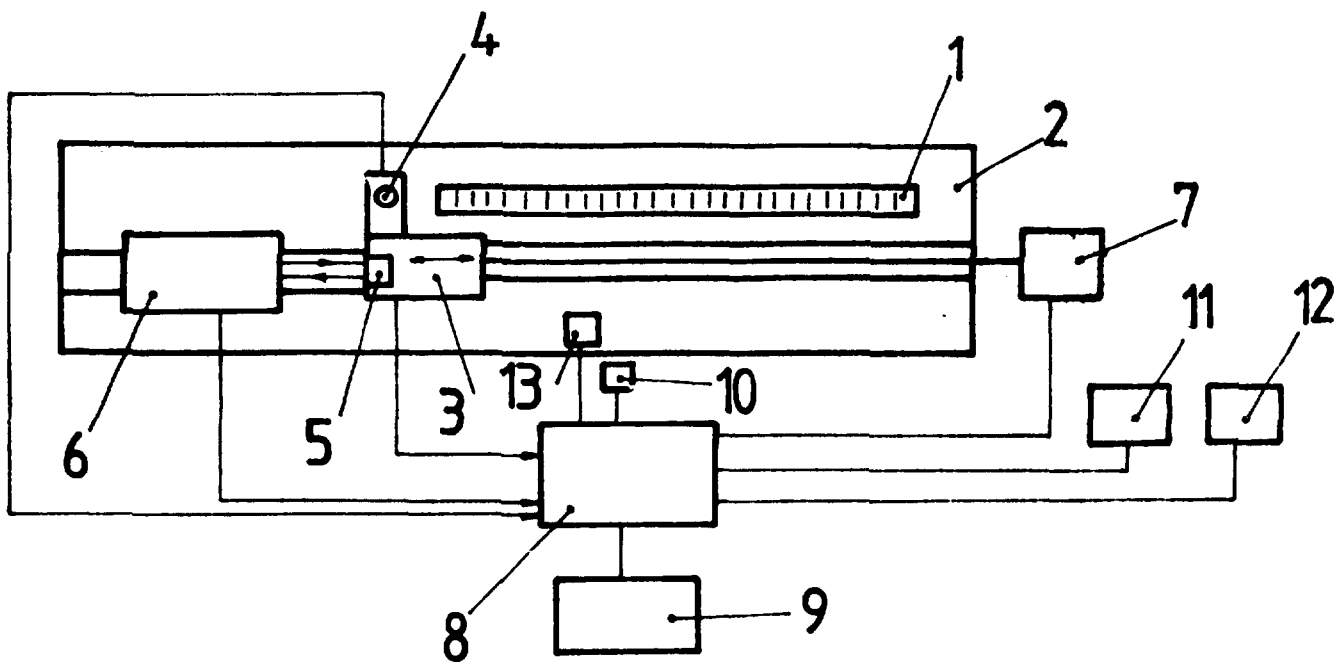


Fig. 2

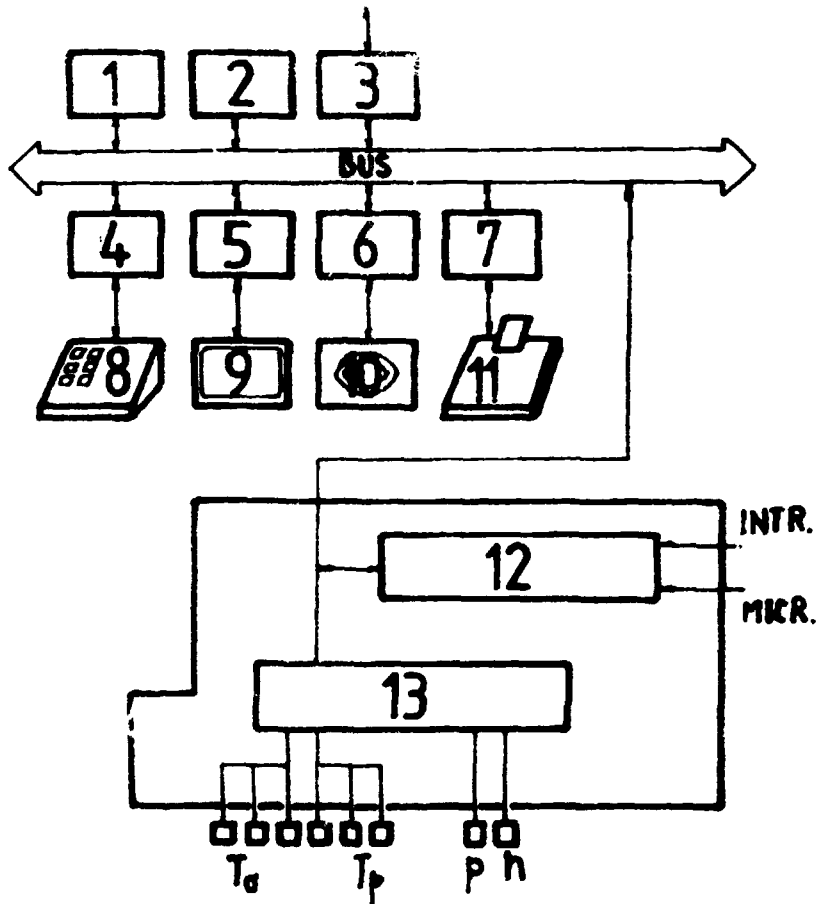


Fig.3

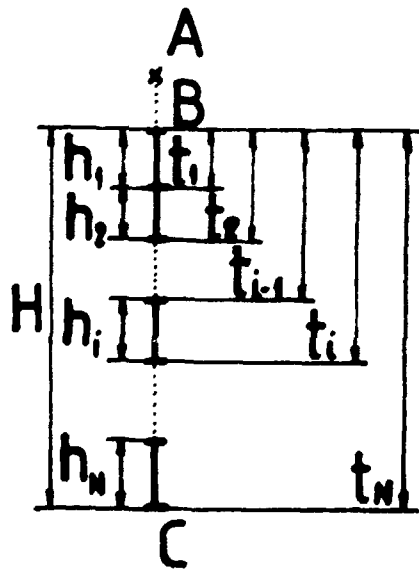


Fig.4

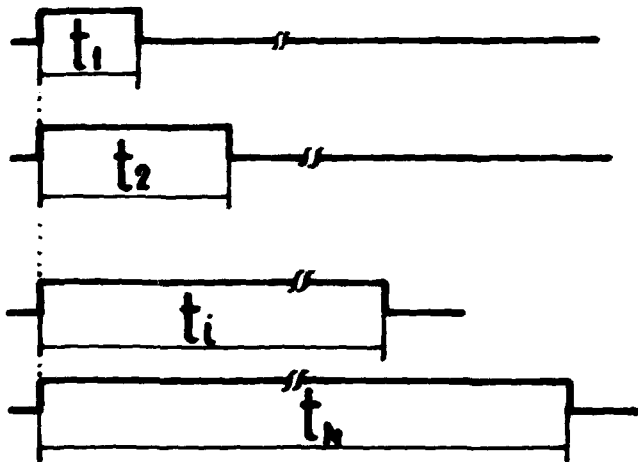


Fig.5

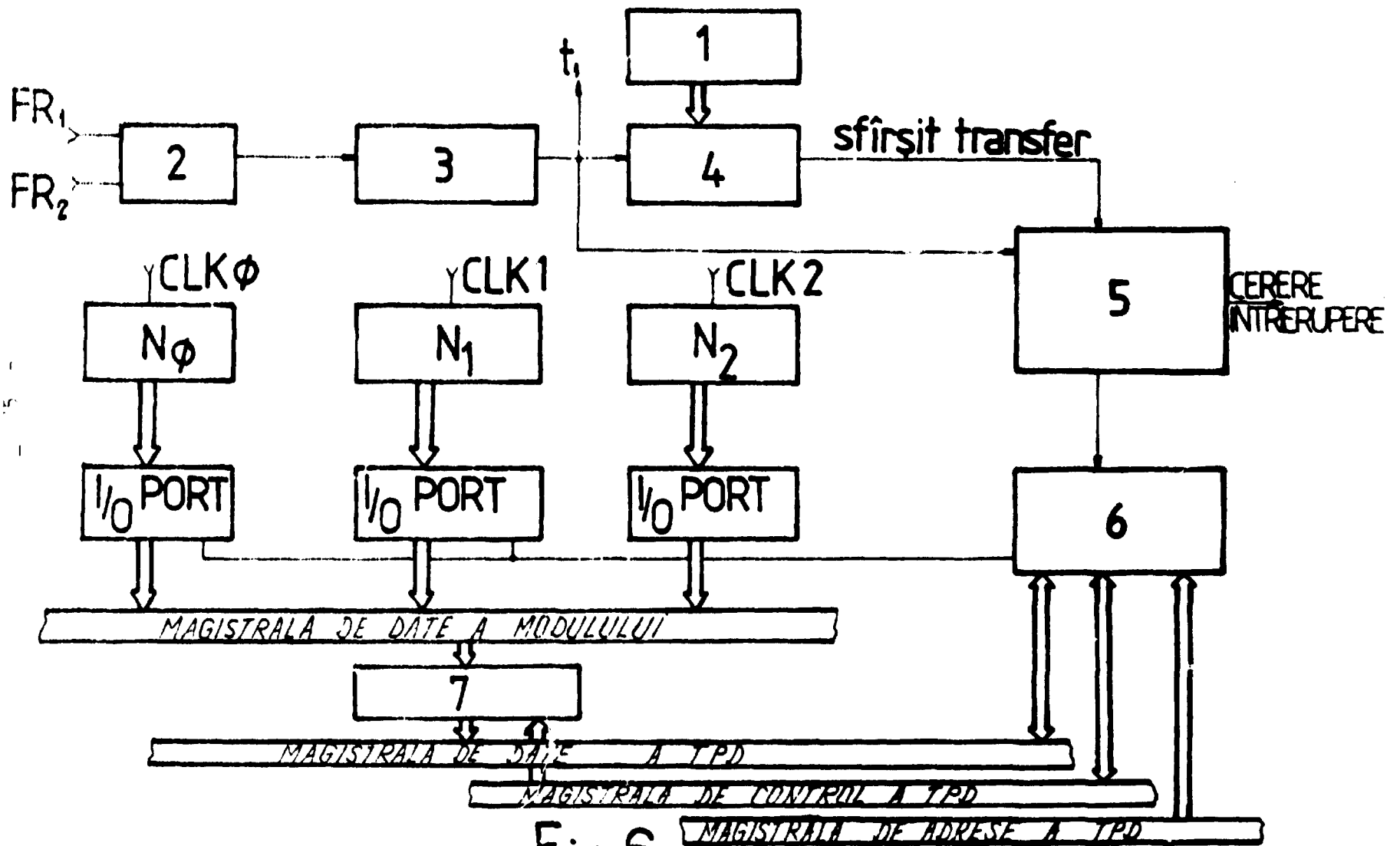


Fig.6

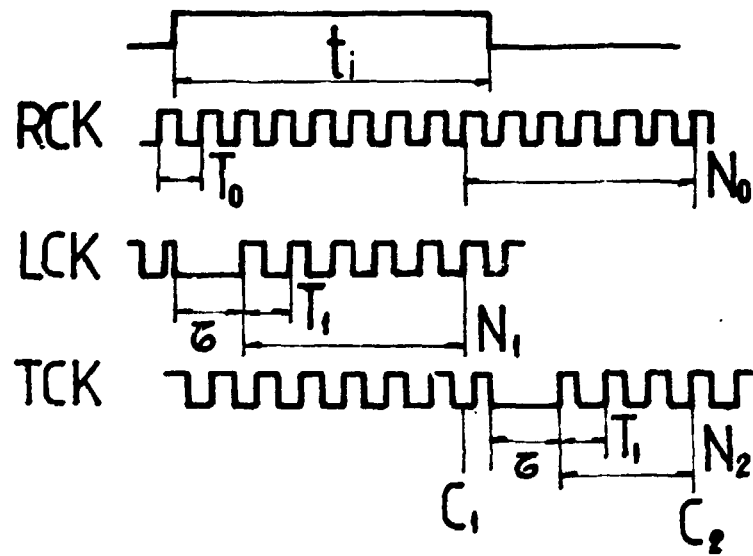


Fig. 7