

(11) Patent numeris: **4597**

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>: **G01N 3/30**

(21) Paraiškos numeris: **98-024**

(22) Paraiškos padavimo data: **1998 02 26**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **1999 09 27**

(45) Patent paskelbimo data: **1999 12 27**

(72) Išradėjas:

**Vygantas Augutis, LT**  
**Darius Gailius, LT**

(73) Patent savininkas:

**Kauno technologijos universitetas,**  
**K.Donelaičio g. 73, 3006 Kaunas, LT**

(74) Patentinis patikėtinis:

**Aurelija Šidlauskienė, 25, K. Būgos g. 29-1, 3000 Kaunas, LT**

---

(54) Pavadinimas:

**Smūginis struktūros kontrolės būdas ir įrenginys jam įgyvendinti**

(57) Referatas:

Išradimas priskiriamas medžiagų ir gaminių mechaninių charakteristikų kontrolės ir matavimo sričiai. Jis gali būti panaudotas konstrukcijų stiprumo kontrolei, defektų vietos nustatymui, užpildo tankio kontrolei, vidinių nuostolių medžiagoje įvertinimui.

Pagal šį išradimą į kontroliuojamą objektą smūgiuoja daužtuku, veikiamu pastovios jėgos, matuoja smūgio jėgos parametrus, pagal kuriuos sprendžia apie kontroliuojamą struktūrą. Pastovi daužtuką veikianti jėga užtikrina paprastą intervalų tarp daužtuko atšokimų ryšį su struktūros slopinimu. Laikinių matavimų tikslumui padidinti naudojama diferencijavimo operacija, padidinanti matuojamų jėgos impulsų frontų statumą. Iš išmatuotų smūgio jėgos serijos laikinių parametrų apskaičiuojami struktūros standumas, vidinis slopinimas ir tankis.

Išradimo įrenginys, turintis elektromechaninę dalį, susidedančią iš korpuso, jame įmontuoto daužtuko, smūgio jėgos keitiklio, daužtuką judinančios įrangos, susidedančios iš elektromagneto ir ilgos spyruoklės, užtikrinančios pastovią daužtuką veikiančią jėgą, ir apdorojimo ir valdymo dalį, susidedančią iš prie jėgos keitiklio prijungto diferencijuojančio stiprintuvo, formuotuvo, valdymo ir skaičiavimo bloko, užtikrina jėgos impulsų matavimą, jų apdorojimą, rezultatų išvedimą.

Išradimas priskiriamas medžiagų ir gaminių mechaninių charakteristikų kontrolės ir matavimo sričiai. Jis gali būti panaudotas konstrukcijų stiprumo kontrolei, defektų vietos nustatymui, užpildo tankio kontrolei, vidinės trinties nuostolių medžiagoje įvertinimui.

Žinomas būdas [žr. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник. Кн. 2.- М.: Машиностроение, 1996. 352 с. на стр. 295 Импедансный метод.], kuomet matuojamas kontroliuojamo gaminio mechaninis impedansas matavimo keitiklio kontakto su gaminiu zonoje. Šio būdo esminis trūkumas yra tas, kad juo negalima matuoti judančių objektų mechaninio impedanso, kadangi reikalauja stabilaus kontakto tarp keitiklio ir objekto. Be to, esant didesniems vidiniams kontroliuojamo objekto nuostoliams, labai krenta matavimo tikslumas.

Artimiausias sprendimo esmė yra impulsinis struktūros kontrolės būdas, apimantis daužtuko su jutikliu smūgiavimą į objektą, smūgio signalo gavimą ir jo įvertinimą [žr. JAV Patentas Nr. 5048320 Method and Apparatus for Impact- type Inspection of Structures. Sep. 17, 1991. TPK G01N 3/30, G01M 7/00].

Šis būdas turi eilę trūkumų. Visų pirma: jame daužtuką veikiančios jėgos pobūdis. Dėl to nepanaudojama daugkartinio atšokimo teikiamos informacijos apie vidinius struktūros nuostolius gavimo galimybė. Be to, kontroliuojant sudėtingesnes struktūras, o taip pat dėl keitiklio baigtinio greitaieigiškumo, jėgos impulsų forma gerokai skiriasi nuo sinusoidės pusės periodo. Dėl to problematišku tampa betarpiškas jėgos impulso trukmės išmatavimas. Tai veda į matavimo neapibrėžties padidėjimą bei kontrolės informatyvumo sumažėjimą.

Minimas būdas taip pat nenumato užpildo tankio kontrolės galimybes.

Žinomas įrenginys smūginei struktūros kontrolei [žr. JAV patentas Nr. 4542639 Testing of Structures by Impact. Sep. 24 1985. TPK G01M 7/00, G01N 29/04], turintis elektromechaninę dalį, susidedančią iš korpuso, jame įmontuoto daužtuko, smūgio jėgos keitiklio, daužtuką judinančios įrangos, susidedančios iš elektromagneto ir spyruoklės, ir prie smūgio jėgos keitiklio prijungtą apdorojimo dalį, susidedančią iš stiprintuvo, ir

skaičiavimo bloko. Šio įrenginio trūkumas yra tas, kad jame naudojama dažninis smūgio jėgos apdorojimas, kuris yra mažiau informatyvus už laikinius smūgio jėgos parametrus.

Artimiausias siūlomam įrenginiui yra įtaisas smūginei struktūros kontrolei [žr. JAV Patentas Nr. 5048320 Method and Apparatus for Impact- type Inspection of Structures. Sep. 17, 1991. TPK G01N 3/30, G01M 7/00], turintis elektromechaninę dalį, susidedančią iš korpuso, jame įmontuoto daužtuko, smūgio jėgos keitiklio, daužtuką judinančios įrangos, susidedančios iš elektromagneto ir spyruoklės, ir prie smūgio jėgos keitiklio prijungtą apdorojimo dalį, susidedančią iš stiprintuvo, formuotuvo, elektromagneto valdymo ir skaičiavimo blokų. Šis įtaisas kaip informatyvius parametrus naudoja smūgio į tiriamą struktūrą trukmę, smūgio jėgos impulso formą ir jos parametrus: impulso kilimo ir leidimosi kampus. Tačiau jame nerandami fizikiniai kontroliuojamos struktūros parametrai: standumas, slopinimas, tankis.

Išradimo tikslas yra padidinti matavimo tikslumą ir kontrolės informatyvumą.

Tikslas pasiekiamas tuo, kad į kontroliuojamą objektą smūgiuoja masės  $m$  daužtuku, matuoja smūgio jėgos parametrus, pagal kuriuos sprendžia apie kontroliuojamą struktūrą. Daužtuką veikia pastovia jėga kol jis pasiekia tiriamą objektą, daužtukas atšoka nuo objekto ir vėl šios jėgos veikiamas smogia eilę kartų, toliau išmatuoja vieno smūgio metu gautų jėgos impulsų seriją, randa jų išvestinę, iš kurios nustato pirmo impulso trukmę  $\tau_1$  bei laiko intervalus tarp pirmojo impulso pabaigos ir antrojo pradžios  $T_{12}$  ir antrojo impulso pabaigos ir trečiojo pradžios  $T_{23}$ , apskaičiuoja santykį

$$c = \frac{k}{\tau_1^2}, \quad (1)$$

kur  $k$  - pastovus koeficientas,

$\tau_1$  - pirmojo smūgio trukmė,

ir pagal jį sprendžia apie struktūros standumą, apskaičiuoja dydį

$$\eta = \frac{2m}{\tau_1} \ln \frac{T_{12}}{T_{23}}, \quad (2)$$

kur  $m$  - daužtuko masė,

$\tau_1$  - pirmojo smūgio trukmė,

$T_{12}$  - laikas tarp pirmojo smūgio pabaigos ir antrojo pradžios,

$T_{23}$  - laikas tarp antrojo smūgio pabaigos ir trečiojo pradžios,

ir pagal jį sprendžia apie struktūros vidinius nuostolius; remiantis porėtos struktūros tankio  $\rho$  ir daužtuko pirmo impulso trukmės  $\tau_l$  priklausomybe

$$\rho = f(\tau_l), \quad (3)$$

apskaičiuoja porėtos struktūros tankį.

Pastovi daužtuką veikianti jėga užtikrina paprastą intervalų tarp daužtuko atšokimų ryšį su vidiniu tiriamos struktūros slopinimu. Išvestinės panaudojimas padidina impulsų frontų statumą, tuo pačiu matavimo tikslumą ir informatyvumą, kadangi padidėja netiesiogiai matuojamų standumo ir vidinių nuostolių tikslumas. Kontrolės informatyvumą taip pat padidina remiantis pirmo impulso trukmės priklausomybe nuo tankio apskaičiuojamas porėtos medžiagos tankis.

Tokiu būdu, smūgiuodami pastovios jėgos veikiamu daužtuku, tiksliau matuodami daužtuko impulsų trukmes, intervalus tarp jų, tiksliau nustatome struktūros standumą, tankį ir vidinius nuostolius, padidiname smūginio struktūros kontrolės būdo informatyvumą.

Išradimo tikslas pasiekiamas smūginiame struktūros tyrimo įrenginyje, turinčiame elektromechaninę dalį, susidedančią iš korpuso, jame įmontuoto daužtuko, smūgio jėgos keitiklio, daužtuką judinančios įrangos, susidedančios iš elektromagneto ir spyruoklės, ir apdorojimo-valdymo dalį, susidedančią iš diferencijuojančio stiprintuvo, formuotuvo, valdymo- skaičiavimo bloko, indikatoriaus, elektromagneto valdymo stiprintuvo. Diferencijuojančio stiprintuvo įėjimas prijungtas prie jėgos keitiklio išėjimo, o išėjimas sujungtas su formuotuvo įėjimu. Formuotuvo išėjimas sujungtas su valdymo- skaičiavimo bloku. Prie pastarojo taip pat prijungti indikatorius ir elektromagnetą valdantis stiprintuvas, kurio išėjimas prijungtas prie elektromagneto apvijos. Esminis siūlomo įrenginio požymiai yra tie, kad šis įrenginys turi diferencijuojantį stiprintuvą, o elektromechaninės dalies korpuse įmontuota tokio ilgio spyruoklė, kuri užtikrintų pastovią daužtuką veikiančią jėgą.

Išradimą iliustruoja 7 brėžiniai:

Fig. 1 - schema, paaiškinanti smūginį būdą.

Fig. 2 - būdo modelis.

Fig. 3 - schema įrenginio, skirto būdo įgyvendinimui.

Fig. 4 - laikinės diagramos, paaiškinančios būdo esmę.

Fig. 5 - jėgos impulsai ir jų išvestinės smūgiuojant į įvairias struktūras.

Fig. 6 - putų polistirolo standumo ir tankio eksperimentinė priklausomybė.

Fig. 7 - užpildo tankio kitimas išilgai vamzdžio.

Schema, paaiškinanti būdo veikimą, pateikta fig.1. Tiriamą struktūrą 1 su defektu def veikia daužtuku 2, kuris yra veikiamas spyruoklės 3 ir pastovios jėgos  $F$ . Daužtukas 2 pasiekia struktūrą 1, į ją smūgiuoja, atšoka, vėl smūgiuoja ir t.t. Toliau matuoja smūgio jėgos parametrus, iš kurių randa struktūros standumą, vidinį slopinimą ir tankį. Šio proceso aprašymui fig. 2 pateiktas būdo modelis.

Modelį aprašo diferencialinių lygčių sistema

$$\begin{cases} m_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + c_0 (x - d_1) = F & , \text{ kai } x < d_2 \\ (m_0 + m_1) \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta_1 \frac{dx}{dt} + c_0 (x - d_1) + c_1 (x - d_2) = F & , \text{ kai } x > d_2 \end{cases} ; \quad (4)$$

čia  $x$  - daužtuko koordinatė,

$m_0$  - daužtuko masė,

$m_1$  - tiriamos medžiagos ekvivalentinė masė,

$\eta_1$  - tiriamos medžiagos ekvivalentinis slopinimo koeficientas,

$c_0$  - daužtuko spyruoklės standumas,

$c_1$  - tiriamos medžiagos ekvivalentinis standumas,

$d_1$  - daužtuko spyruoklės neutralė,

$d_2$  - tiriamo objekto paviršiaus koordinatė,

$F$  - pastovi jėga.

Smūgio metu lygčių sistemą galima supaprastinti iki vienos lygties, kurioje veikia apibendrintos masės, slopinimai, standumai ir jėgos.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + c \cdot x = F , \quad (5)$$

kur  $m = m_0 + m_1$  ,  $\eta = \eta_1$  ,  $c = c_0 + c_1$  ir  $x = x_0$  ,  $\frac{dx}{dt} = v_0$  , kai  $t = 0$  .

Tokios lygties sprendinys, įvertinant pradines sąlygas, yra:

$$x = e^{\omega} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t) + F / c. \quad (6)$$

Iš pastarojo galime surasti daužtuko greitį

$$\frac{dx}{dt} = e^{\omega} [(C_1 \cdot \alpha + C_2 \cdot \beta) \cos \beta t + (C_2 \cdot \alpha - C_1 \cdot \beta) \sin \beta t] \quad (7)$$

bei pagreitį

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = e^{\omega} [(C_1 \cdot \alpha^2 + 2 \cdot C_2 \cdot \alpha \cdot \beta - C_1 \cdot \beta^2) \cos \beta t + (C_2 \cdot \alpha^2 - 2 \cdot C_1 \cdot \alpha \cdot \beta - C_2 \cdot \beta^2) \sin \beta t], \quad (8)$$

kur

$$\alpha = -\frac{\eta}{2m}, \quad \beta = \sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{\eta}{2m}\right)^2}, \quad C_1 = x_0 - F / c, \quad C_2 = \frac{v_0 - (x_0 - F / c)\alpha}{\beta}; \quad (9)$$

$$\beta^2 > 0.$$

Slopavimo  $\eta$  poveikis smūgio jėgos impulso formai yra nežymus. Tą patvirtina ir eksperimentiniai tyrimai. Tuomet iš (8) ir (9) galime gauti, kad impulso trukmė, atitinkanti pusę sinusoidės periodo, yra

$$\tau = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{\eta}{2m}\right)^2}}. \quad (10)$$

o daužtuko greitis  $v_1$  atšokant nuo tiriamos struktūros, kuomet jį veikia tik pastovi jėga  $F$ ,

$$v_1 = v_0 e^{\pi \alpha / \beta}. \quad (11)$$

Iš pastarosios išraiškos, įvertinus (9) ir (10), gauname struktūros slopinimo išraišką (2).

Jeigu slopinimas  $\eta$  nedidelis, tuomet iš (10) gauname, kad

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{m}{c}}. \quad (12)$$

Daugumos porėtų medžiagų standumas  $c$  proporcingas jų tankiui  $\rho$ , t.y.  $c = k \cdot \rho$ . Tuomet iš (12) galime gauti, kad

$$\rho = \frac{K^*}{\tau_1^2}, \quad (13)$$

kur  $K^*$  - koeficientas.

Remiantis pastarąja formule, surandamas struktūros tankis. Koeficientas  $K^*$  gali būti randamas eksperimentiškai.

Esant sudėtingesnei standumo ir tankio priklausomybei, tankis gali būti apskaičiuojamas remiantis eksperimentiškai surasta priklausomybe (3).

Formulė (2) teisinga, jeigu daužtuką tarp smūgių veikia pastovi jėga  $F$ . Nesunku įrodyti, kad, veikiant tik standumui  $c_0$ , intervalas tarp smūgių nepriklausytų nuo slopinimo. Taigi tokiu būdu jo išmatuoti nepavyktų.

Tiriamos struktūros 1 kontrolei gali būti naudojamas fig. 3 pavaizduotas įrenginys. Elektromechaninę įrenginio dalį sudaro daužtukas 2, jį stumianti ilga spyruoklė 3, daužtuką 2 pakeliantis elektromagnetas 4 ir jėgos keitiklis 5, įdėti į korpusą 6. Jėgos keitiklio 5 išėjimas ir elektromagnetas 4 sujungti su įrenginio apdorojimo- valdymo dalimi. Ją sudaro diferencijuojantis stiprintuvas 7, kurio įėjimas prijungtas prie jėgos keitiklio 3 išėjimo, o išėjimas sujungtas su formuotuvo 8 įėjimu. Formuotuvo 8 išėjimas sujungtas su valdymo- skaičiavimo bloku 9. Prie pastarojo taip pat prijungti indikatoriai 10 ir elektromagnetą 4 valdantis stiprintuvas 11.

Įrenginys veikia taip. Prie kontroliuojamos struktūros 1 prideda daužtuką 2, ant kurio pritvirtintas pjezoelektrinis akselerometras- jėgos keitiklis 5. Į elektromagneto apviją 4 paduoda srovės impulsą, daužtuką 2 pakelia nuo struktūros 1. Pasibaigus srovės impulsui, daužtuką 2 veikia ilga spyruoklė 3, daužtukas 2 smogia į struktūrą 1, atšoka ir vėl smogia ir t.t. Ilga spyruoklė 3 užtikrina praktiškai pastovią jėgą, veikiančią į šokinėjantį daužtuką 2. Daužtuko išėjimo signalą- impulsų seriją- paduoda į

diferencijuojančio stiprintuvo 7 įėjimą. Šių impulsų forma yra artima sinusoidės formai kampo nuo nulio iki  $180^\circ$  ribose. Diferencijavimo operacijos dėka gaunami žymiai statesni daužtuko 2 smūgio pradžią ir pabaigą fiksuojantys impulso frontai. Todėl šie impulsai, patekę į formavimo įrenginį 8, suformuoja jo išėjime stačiakampio formos impulsus, kurių trukmė lygi daužtuko 2 smūgio trukmei, nepriklausomai nuo pradinio daužtuko 2 greičio prieš smūgį, tuo pačiu nuo jėgos impulso amplitudės.

Suformuota impulsų seka iš formuotuvo 8 patenka į valdymo- skaičiavimo bloką 9. Valdymo-skačiavimo blokas 9 išmatuoja pirmo impulso trukmę  $\tau_1$ , laiko intervalą tarp pirmojo impulso pabaigos ir antrojo pradžios  $T_{12}$ , laiko intervalą tarp antrojo impulso pabaigos ir trečiojo pradžios  $T_{23}$ . Į valdymo-skačiavimo bloką 9 įvedamas eksperimentiškai surastas koeficientas  $K^*$  iš formulės (13) arba eksperimentinė priklausomybė (3). Toliau pagal formules (1), (2) ir (13) arba (3) apskaičiuojamos atitinkamai standumas  $c$ , slopinimas  $\eta$ , bei porėtos struktūros tankio  $\rho$  reikšmės ir išvedamos į indikatorių 10.

Matavimų rezultatai gali būti kaupiami valdymo- skaičiavimo bloke 9 ir per sąsają perduodami ryšio kanalu.

Matavimo- skaičiavimo blokas 9 formuoja paleidžiantį impulsą stiprintuvui 11, kuris valdo elektromagnetą 4. Paleidžiantys impulsai formuojami automatiškai arba rankiniu būdu.

Laikinės diagramos, paaiškinančios būdo esmę, pateiktos fig. 4. Čia a - daužtuko 2 jėgos impulsų seka keitiklio 3 išėjime po elektromagneto 4 vieno iš suveikimų; b - jėgos impulsų išvestinės diferencijuojančio stiprintuvo 7 išėjime; c - impulsai formavimo bloko 8 išėjime.

Kitose figūrose pateikti eksperimentiniai būdo taikymo rezultatai.

Fig. 5 pateikti jėgos impulsai (ištininė linijos) ir jų išvestinės (brūkšninė linija) smūgiuojant į struktūrą be defektų (a) ir į struktūrą su užpildo praretėjimu (b) bei išorinio sluoksnio atsiklijavimu (c). Matome, kad diferencijavimo operacija šiais atvejais leidžia tiksliau fiksuoti laikinius parametrus, nes ši operacija padidina matuojamų jėgos impulsų frontų statumą. Tai padidina matavimų tikslumą.

Fig. 6 pateikta eksperimentinė tankio ir pirmo impulso trukmės priklausomybė putų polistirolui. Abscisių ašyje, remiantis formule (13), atidėta  $\frac{K^*}{\tau_1^2} = \frac{100}{\tau_1^2}$ , kur  $\tau_1$  -

milisekundėmis. Įvairių polistirolo bandinių tankis išmatuotas su 2% paklaida. Impulsų trukmės paklaidą galima paneigti. Matome, kad eksperimentinė priklausomybė (taškai x) su pakankamu praktiniams tikslams tikslumu atitinka teorinę (ištiesinę liniją).

Fig. 7 pateiktas gamybos sąlygomis kontroliuotas šilumos tiekimo vamzdžio izoliacijos užpildo- poliuretano tankio  $\rho$  pasiskirstymas išilgai vamzdžio. Vamzdis judėjo transporteriu, o daužtukas periodiškai smogdavo į jo polietileninį apvaskalą.

## IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Smūginis struktūros kontrolės būdas, apimantis tai, kad į kontroliuojamą objektą smūgiuoja masės  $m$  daužtuku, matuoja smūgio jėgos parametrus, pagal kuriuos sprendžia apie kontroliuojamą struktūrą, besiskiriantis tuo, kad, siekiant padidinti kontrolės informatyvumą, daužtuką veikia pastovia jėga paveikti kontroliuojamam objektui, išmatuoja vieno smūgio metu gautų jėgos impulsų seriją, randa jų išvestinę, iš kurios nustato pirmo impulso trukmę  $\tau_1$  bei laiko intervalus tarp pirmojo impulso pabaigos ir antrojo pradžios  $T_{12}$ , antrojo impulso pabaigos ir trečiojo pradžios  $T_{23}$ , apskaičiuoja santykį  $c$ , pagal kurį sprendžia apie struktūros standumą, apskaičiuoja dydį  $\eta$ , pagal kurį sprendžia apie struktūros vidinius nuostolius, apskaičiuoja struktūros tankį, remiantis tankio  $\rho$  ir daužtuko pirmo impulso trukmės  $\tau_1$  priklausomybe

$$c = \frac{k}{\tau_1^2},$$

kur  $k$  - pastovus koeficientas,

$\tau_1$  - pirmojo smūgio trukmė,

$$\eta = \frac{2m}{\tau_1} \ln \frac{T_{12}}{T_{23}},$$

kur  $m$  - daužtuko masė,

$\tau_1$  - pirmojo smūgio trukmė,

$T_{12}$  - laikas tarp pirmojo smūgio pabaigos ir antrojo pradžios,

$T_{23}$  - laikas tarp antrojo smūgio pabaigos ir trečiojo pradžios,

$$\rho = f(\tau_1).$$

2. Įrenginys smūginiam struktūros kontroliavimui, turintis elektromechaninę dalį, susidedančią iš korpuso, jame įmontuoto daužtuko, smūgio jėgos keitiklio, daužtuką judinančios įrangos, susidedančios iš elektromagneto ir spyruoklės, ir apdorojimo-valdymo dalį, susidedančią iš stiprintuvo, formuotuvo, elektromagneto valdymo ir skaičiavimo bloką, besiskiriantis tuo, kad tarp jėgos keitiklio išėjimo ir formuotuvo įjungtas diferencijuojantis stiprintuvas, o elektromechaninės dalies korpuse įmontuota tokio ilgio spyruoklė, kuri užtikrintų pastovią daužtuką veikiančią jėgą.

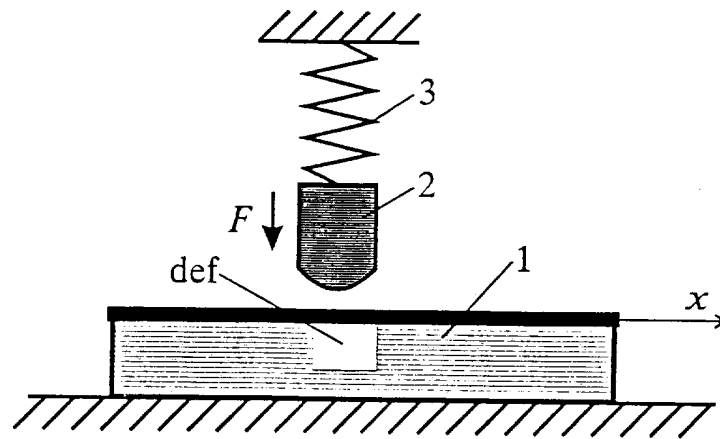


Fig. 1

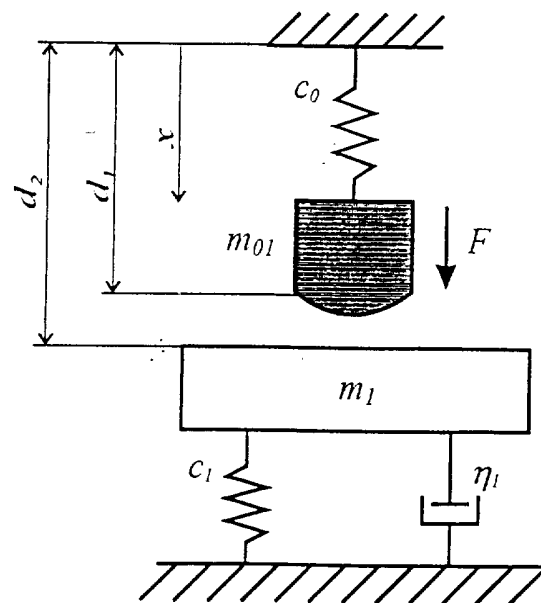


Fig. 2

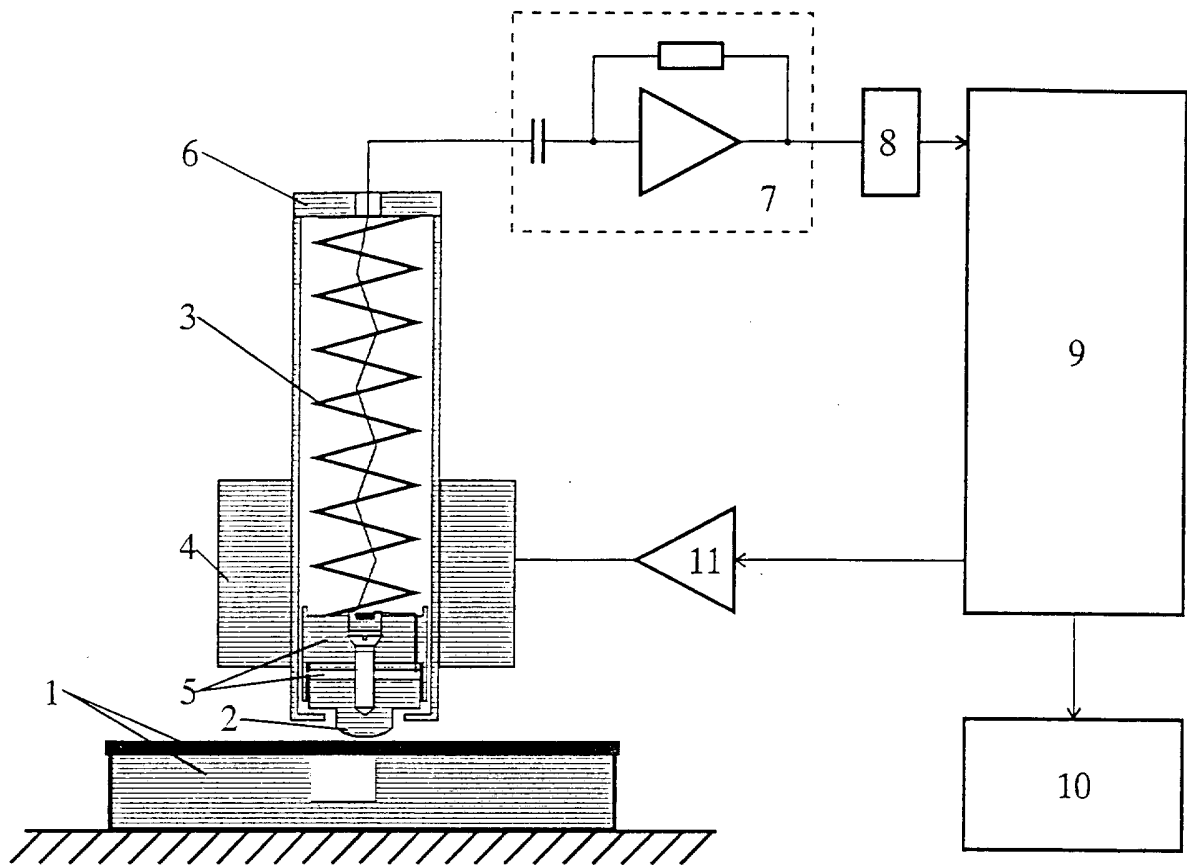


Fig. 3

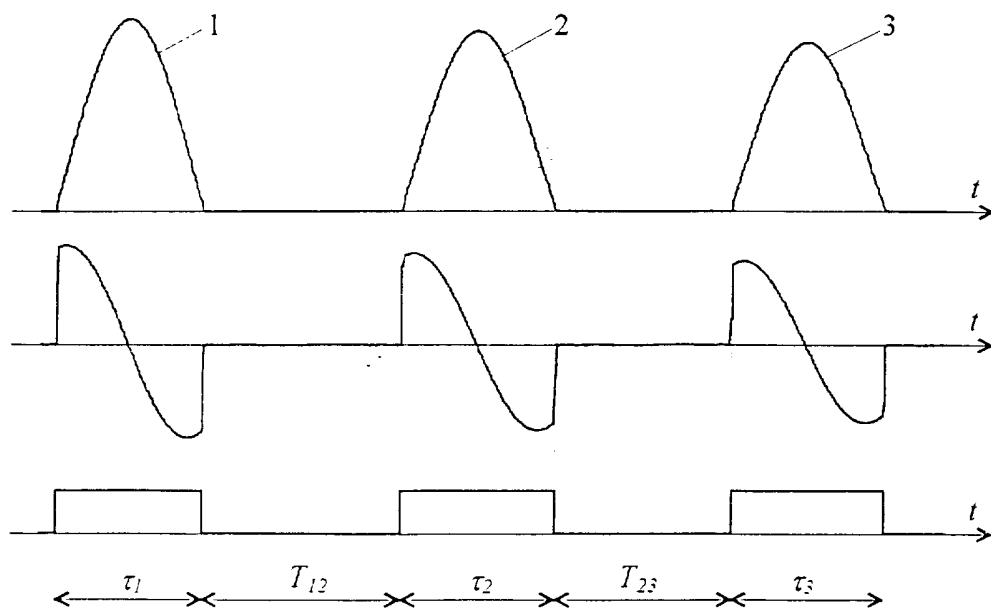


Fig. 4

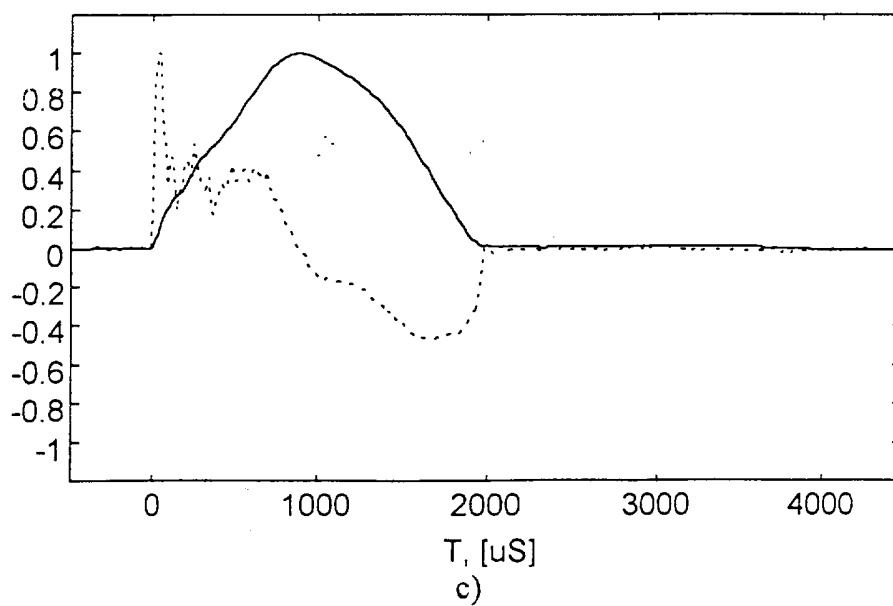
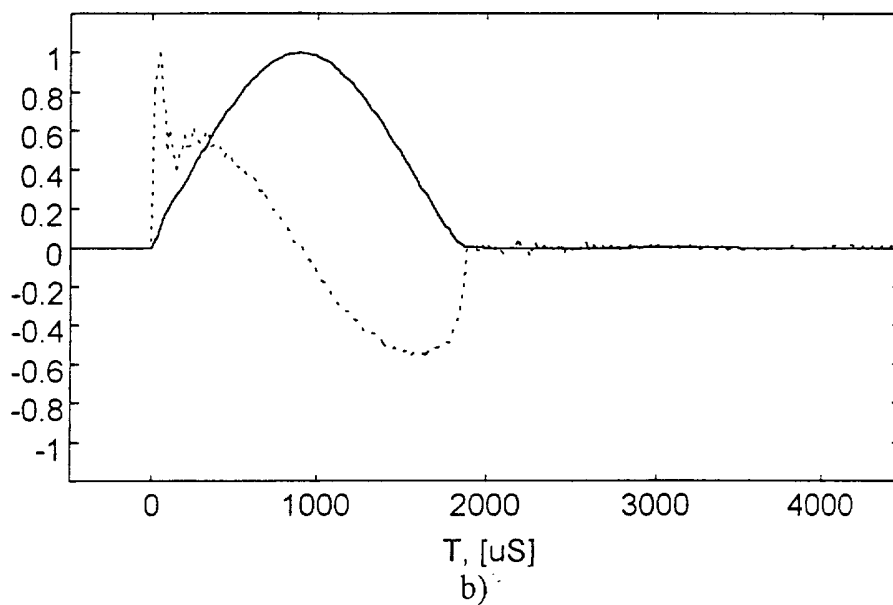
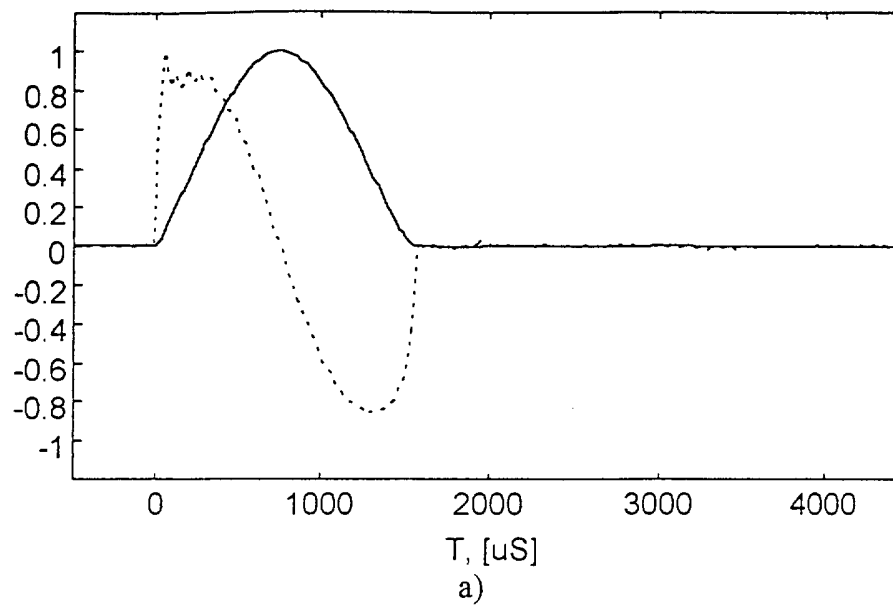


Fig. 5

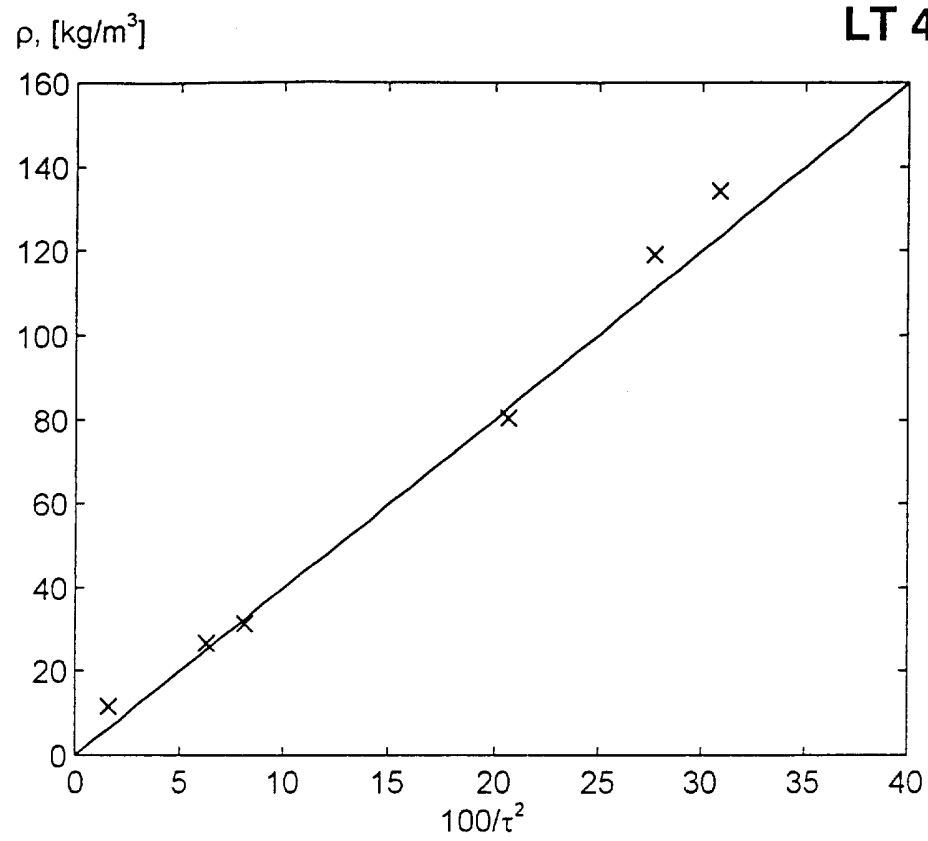


Fig. 6

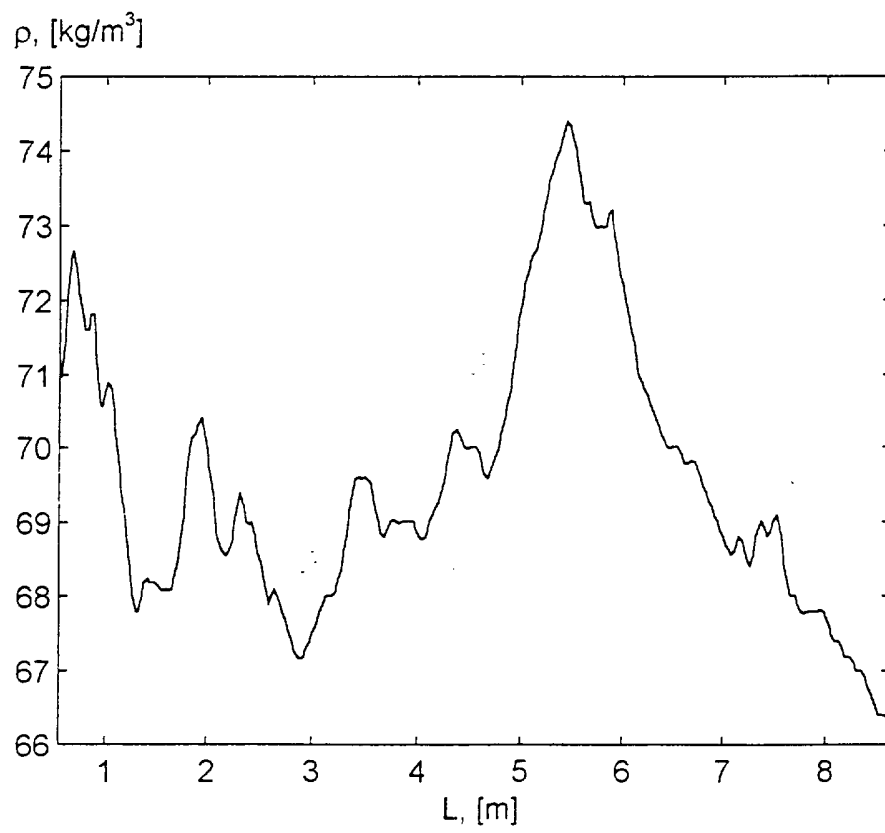


Fig. 7