

## Pereinamojo proceso cilindriniam Lembo bangų bangolaidyje tyrimas

V. Sukackas, R. Ramanauskas

Kauno technologijos universitetas

Studentų g. 50, LT – 302 8Kaunas

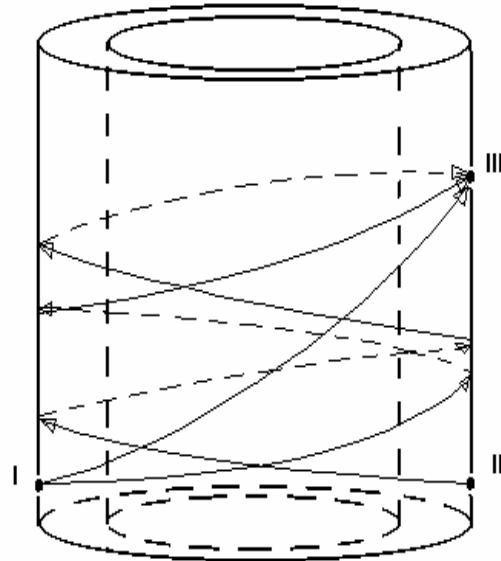
Lembo bangų sklaidimas įvairios konfigūracijos kūnuose tyrinėjamas daugelyje mokslo darbų [1-3]. Tačiau impulsinis režimas nagrinėjamas kur kas rečiau. Tai nesunku paaiškinti – matematinis bangų sklaidimo aprašas yra gana sudėtingas ir ne visuomet įmanoma gauti griežtas analitines išraiškas. Darbe [4] parodyta, kad, sužadinant siuntiklį radijo impulsais, jų frontai priėmimo taške gali įgauti osciliacinį pobūdį, nors išspinduliuotas impulsas turėjo glotnios formos gaubtinę. Tai paaiškinama tuo, kad trumpo žadinimo impulso spektras, būdamas pakankamai platus, gali sukelti ir aukštesnės eilės modas, nors žadinimo geometrija atitinka tik nulines eilės modą. Osciliacijos frontas šiuo atveju yra abiejų modų interferencijos pasekmė. Modų transformaciją ir aukštesnių eilių modas, nors siuntiklis ir ėmiklis joms nesuderinti, gali sukelti plokštelės arba vamzdžio netolygumai, kuriais sklinda banga. Taigi osciliacinis priimto impulso gaubtinės pobūdis čia rodo defektų buvimą [5,6]. Šiuose darbuose priimto signalo analizei panaudota dvimatė Fourier transformacija [4], kas sudaro nepatogumų naudojant metodą gamybos sąlygomis, nes reikia tiksliai pozicionuoti priimamąjį keitiklį.

Kita vertus, impulsinio režimo bei pereinamojo proceso tyrimas gali duoti kur kas daugiau informacijos, negu nepertraukiamas žadinimas sinusiniu signalu. Tai ir suprantama – pereinamojo proceso impulsinę charakteristiką formuoja bangos, atėjusios iš skirtingų siuntiklio vietų, o vamzdyje – ir skirtingais keliais. Pastarasis atvejis iš esmės reiškia, kad yra įmanoma diagnostika erdvėje, tyrinėjant impulsinę charakteristiką kaip laiko funkciją.

Mes žadinome bangas viename ar dviejuose taškuose, teisingiau, ploteliuose, o priiminėdavome viename taške (1 pav.). Abiem atvejais naudoti tūrinių išilginių bangų keitikliai, kurių pjezoaktyvus elementas – tai diskas, virpantis storio virpesiais. Toks beveik taškinis akustinis kontaktas gali būti gana lengvai sukurtas net vamzdyje su nelygiu korozijos pažeistu paviršiumi arba konstrukcijose, prie kurių galima prieiti tik iš vienos pusės. Tai nemažas metodo pranašumas. Darbe [7] buvo identifikuotos bangos ir nustatyta, kad nagrinėjamu atveju tai antisimetrinės nulines eilės bangos  $a_0$ . Dažniai parinkti taip, kad vamzdžio perimetre išsidėstytų sveikas bangų skaičius (žadinant abu keitiklius jis būna nelyginis).

Beveik taškinis keitiklių kontaktas su vamzdžio sienele, atliekant eksperimentą, ir taškiniai keitikliai, parinkti modeliuojant, leido mums taikyti kvazispindulinį metodą. Bangų spinduliai – tai vėduokle į keitiklį įeinančios ir iš jo išeinančios tiesės, jei banga sklinda pakankamai didelėje plokštelėje, ir “geodezinės linijos”, jei banga sklinda vamzdžio sienelėje. Ir šiuo atveju galime

tarti, kad spinduliai sklinda pusiau begalinėje plokštelėje. Mūsų modelis bus pakankamai tikslus, jei spindulių kelyje nebus difrakcijos arba refrakcijos.



1 pav. Modeliavimo schema

Pereinamojo proceso charakteristiką, t.y. priimtą signalą, kai vienas ar abu keitikliai prijungiami prie žadinimo įtampos generatoriaus, sudarys trumpiausiu keliu atėjusios bangos ir kitų, vis po vieną kartą daugiau vamzdį apėjusių bangų superpozicija. Tariame, kad keitikliai yra idealizuoti ir išspinduliuoja bangas, moduluotas laipto funkcija, neiškraipydami amplitudės ir fazės. Jei žadinami abu keitikliai, į juos paduodami priešingos fazės signalai; tada nebus nagrinėjama bangolaidinė moda, atitinkanti nulį bangų vamzdžio perimetre [6]. Tada priimtas signalas  $U$ :

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{a_2}{\sqrt{r_i}} \cos(\omega t - k_w r_i) \exp(-\alpha r_i) + \sum_{j=1}^N \frac{a_2}{\sqrt{r_j}} \cos(\omega t - k_w r_j + \pi) \exp(-\alpha r_j) ; \quad (1)$$

čia  $a$  – siuntiklių išspinduliuotos bangos amplitudė,  $k$  – bangos skaičius,  $\omega$  – kampinis dažnis,  $r$  – bangos nueitas kelias,  $\alpha$  – slopinimo koeficientas.

Sumos atitinka vienoje ir kitoje vamzdžio pusėse esančių siuntiklių išspinduliuotas bangas.

Kiekvienos sudedamosios bangos amplitudė mažėja atvirkščiai proporcingai kvadratinei šakniai iš jos nueito kelio, neskaitant slopinimo. Iš fizinio interpretavimo išplaukia, kad šis dėsnis negalios suminei bangai vamzdžio formos bangolaidyje.

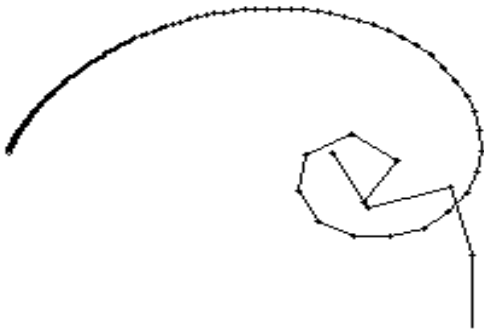
Modeliuojant pereinamąjį procesą, reikia pagal (1) sumuoti vis daugiau sinusinių funkcijų. Tai neproduktyviai apkrauna kompiuterį ar mikroprocesorių (PC).

Kiekvienas sumos (1) narys atsiranda pavėlavęs tam tikrą laiką tarpą, reikalingą bangai dar kartą apibėgti perimetrą. Laikotarpiu tarp šių dviejų laiko momentų ėmiklis priims harmoningą nekintamą parametru signalą. Todėl modeliuojant tikslinga kiekvieną kartą, atėjus bangai, apskaičiuoti suminio signalo amplitudę ir pradinę fazę, t.y. kompleksinę amplitudę. Modeliavimo rezultatas iki kitos bangos atėjimo ir bus šis harmoningas signalas. Atėjus dar vienai bangai kompleksinė amplitudė perskaičiuojama ir t.t. Šitaip visas pereinamojo proceso signalas bus "suduriamas" iš atskirų sinusoidžių fragmentų, o bet kuriuo laiko momentu PC skaičiuos tik vieną trigonometrines funkcijas. Toks modeliavimas, palyginti su (1) formule duos nemažą laiko ekonomiją. Modeliuojama pagal šią formulę:

$$\vec{u} = \vec{u}_0 + \sum_{i=1}^n \vec{u}_i ; \quad (2)$$

čia  $\vec{u}$ ,  $\vec{u}_0$ ,  $\vec{u}_i$  - atitinkamai suminės bangos, pirmą ir kitus kartus atėjusių bangų kompleksinės amplitudės. Bangų amplitudės mažėja kaip ir (1) formulės atveju. Pradinės fazės gaunamos iš atitinkamo ilgio spindulio.

Darbe [8] palyginti modeliavimo pagal abi (1 ir 2) formules rezultatai. Jie beveik sutampa.



2 pav Kompleksinės amplitudės evoliucija, kai bangas žadina abu keitiklius vienodomis amplitudėmis, o atstumas išilgai vamzdžio II-III yra 6.5 bangos ilgio, slopinimo koeficientas  $\alpha=0.05$

Kompleksinės amplitudės evoliucija parodyta 2 pav. Čia kiekvienos atėjusios bangos amplitudė - tai tiesės atkarpa ir, kadangi atskaitos sistema susijusi su besisukančiu vektoriumi, atvaizduojančiu trumpiausiu keliu atėjusią bangą, atkarpų kampai parodo šių bangų pradines fazes priėmimo taške.

Modeliuojant ir atliekant eksperimentą, metu mūsų aptiktas reiškinys (literatūroje apie jį nekalbama) – tai pereinamojo proceso metu atsirandančios osciliacijos, kurių priežastys yra ne tokios, kaip nurodyta [4-7]. Osciliacijų atsiradimą galima nesunkiai paaiškinti. Kai priėmimo taškas yra ne prieš siuntiklį, kiekviena tolesnė banga išilgai spindulio (geodezinės linijos) nueina kelią, nelygų sveikam bangų skaičiui, taigi ir jos fazės prieaugio pagrindinė reikšmė nebus lygi  $2\pi$  arba  $\pi$ . Šis skirtumas ir

sukels interferencinius maksimumus ir minimumus. Vadinas, osciliacijų neatsiras, kai priėmimo taškas bus begalybėje (visų spindulių ilgiai vienodi) bei tiksliai prieš siuntiklį (šiuo atveju bangų kelių skirtumas kartotinis pusei bangos). Kitais atvejais osciliacijų pobūdis priklauso nuo žadinimo ir priėmimo geometrijos, t.y. kuris iš siuntiklių žadinamas ir kokia amplitudė ir kaip toli yra priėmimo taškas.

Modeliavimo rezultatai pateikiami 3a ir 4a pav., o eksperimentiškai gautos pereinamojo proceso gaubiamosios - 3b ir 4b pav. Reikia pažymėti, kad modeliuojant gautose kreivėse atidėtos suminės signalo amplitudžių vertės atėjus bangai. Jei kita banga ateis greičiau negu po pusės periodo, tai priklausomai nuo pradinės fazės signalė gali ir nebūti taško su ordinate, lygia šiai amplitudei. Eksperimentinėse kreivėse atvaizduota gaubiamoji, jungianti ekstremalias signalo vertes, nepriklausomai nuo to, ar jos lygios kuriai nors iš amplitudžių ar ne.

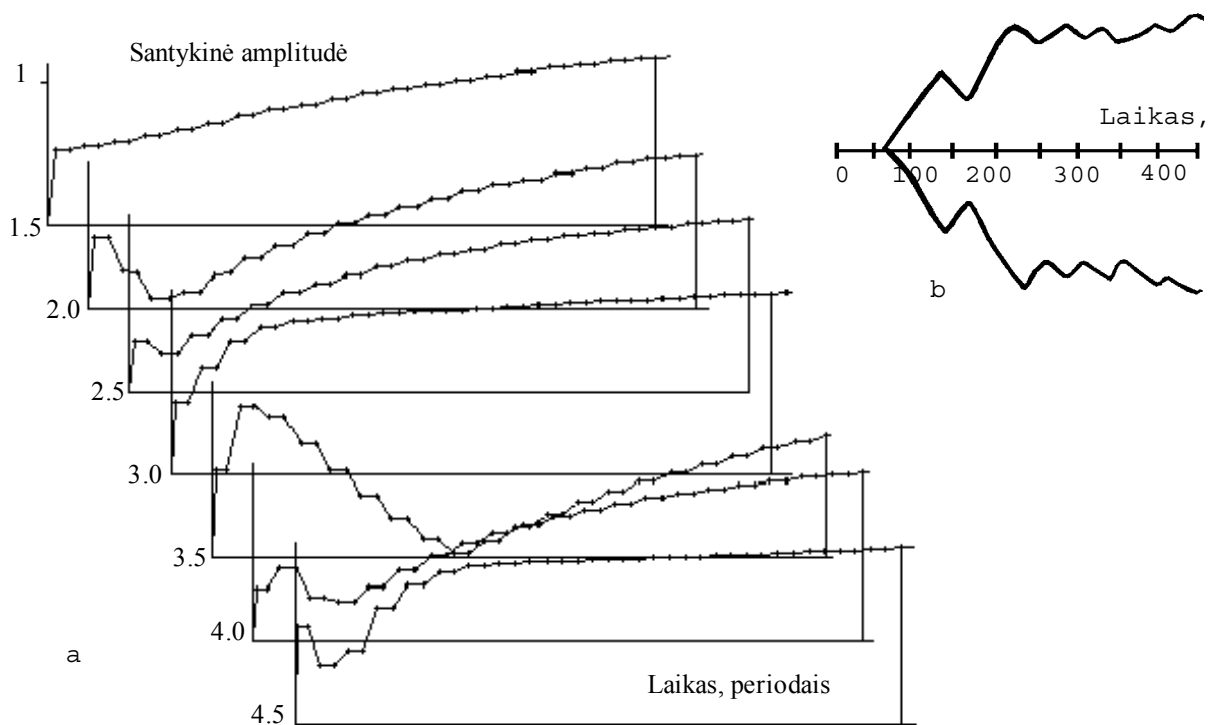
Dėl techninių sunkumų sufazuojant siuntiklius bei reguliuojant jų amplitudes eksperimente buvo sužadintas tik vienas iš keitiklių.

Modeliavimo ir eksperimento rezultatai skiriasi daugiausiai dėl dviejų priežasčių:

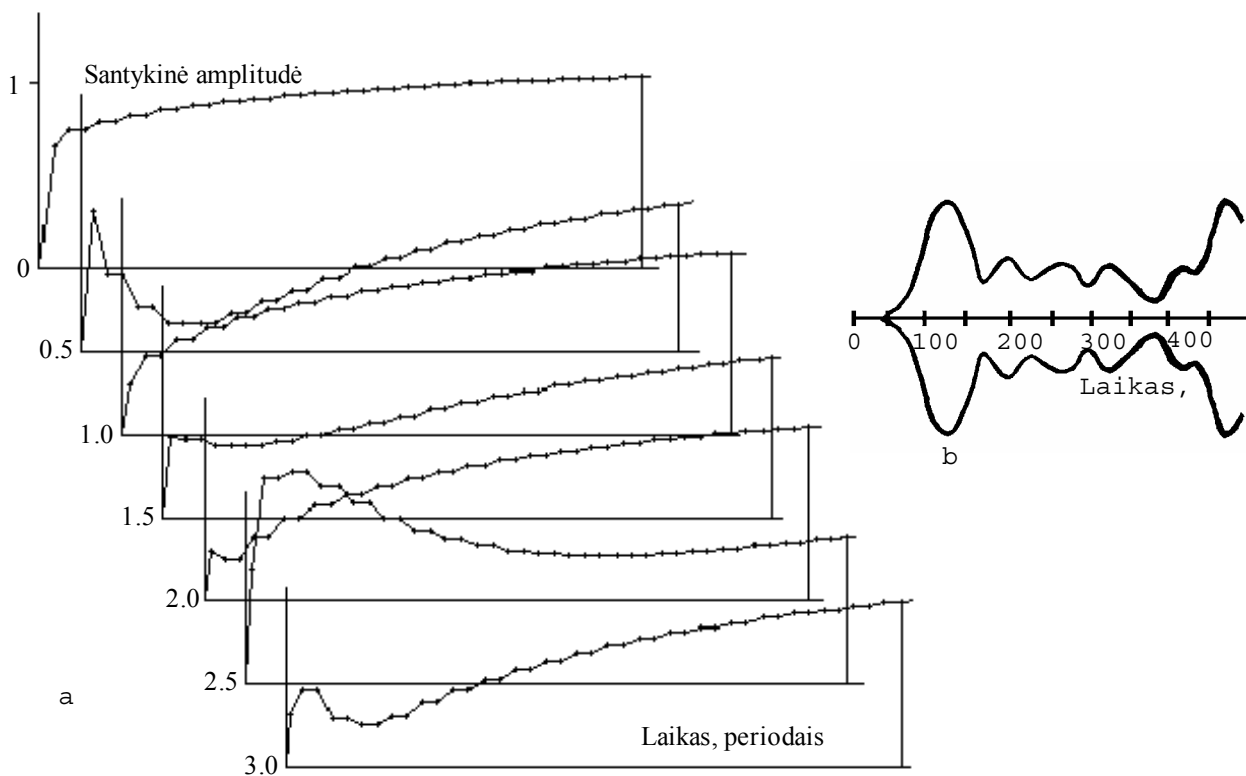
1. kontaktinis keitiklio plotelis iš tikrųjų yra artimesnis juostelei arba tiesei negu taškui,
2. įjungus žadinimą, keitiklio virpesių amplitudė dėl jo savybių didėja tolygiai, bet ne šuoliu, kaip tai būna modeliuojant. Taigi galima išivaizduoti, kad ordinačių ašies mastelis pereinamojo proceso metu didėja taip pat tolygiai, kas ir pastebima.

Osciliacijų atsiradimas gali būti panaudotas neardančiajai kontrolei aptinkant slopinimo anomalijas vamzdžio sienelėje, taip pat konstruojant signalų tvarkymo įrangą (vėlinimo linijas, specialios formos elektrinių ir akustinių signalų generatorius) ir kt.

Beje, gautos kreivės – pereinamojo proceso gaubtinės – gali būti panaudojamos kaip reakcijos į savotiškas šuolines funkcijas (analogas - iš signalų teorijos žinomų reakcijų į delta funkcijas). Tuomet žadinimo signalas, kurio amplitudės gaubtinė yra netrūki funkcija, gali būti aproksimuotas kaip keleto šuoliškai įjungiamų sinusoidžių, pasikartojančių kas pusę ar visą periodą, suma, o priimtas signalas – kaip atitinkamų pereinamojo proceso gaubtinių superpozicija. Lygiai taip pat gautas pereinamojo proceso gaubtinės galima panaudoti priimtam signalui apskaičiuoti, kai žadinama tam tikrame plotelyje, bet ne taške. Tada šuoliškai įjungiamas sinusoides reikia sumuoti ne laike, bet erdvėje. Ši metodika gali gerokai palengvinti impulsinės ultragarso aparatūros kūrimo procesą.



3 pav. a - pereinamojo proceso gaubiamosios, gautos modeliuojant, kai atstumas II-III kinta nuo 1.5 iki 4.5 bangos ilgių. Slopinimo koeficientas  $\alpha=0.05$ ; b - eksperimento metu gautas rezultatas. Bangų žadinimo dažnis 99,5 kHz, atstumas išilgai vamzdžio II – III – 12,5 cm, kas modeliuojant atitiktų 4 – 4,5 bangos ilgius. Vamzdžio perimetras 15,5 cm. Abiem atvejais vamzdžio perimetras lygus 5 bangos ilgiams, o bangas spinduliuoja tik keitiklis I



4 pav. a - pereinamojo proceso gaubiamosios, gautos modeliuojant, kai atstumas II-III kinta nuo 0 iki 3.0 bangos ilgių. Slopinimo koeficientas  $\alpha=0.05$ ; b - eksperimento metu gautas rezultatas. Bangų žadinimo dažnis 104 kHz, atstumas išilgai vamzdžio II – III – 10 cm, kas modeliuojant atitiktų 2,5 – 3 bangos ilgius. Vamzdžio perimetras 15,5 cm. Abiem atvejais vamzdžio perimetras lygus 5 bangos ilgiams, o bangas spinduliuoja tik keitiklis II

**Literatūra**

1. **Викторов И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах. - М.: Наука, 1981.
2. **Викторов И.А.** Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике. - М.: Наука, 1966.
3. **Дзенис В. В.** Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля// Рига: Зинатне. 1987. С. 11-65.
4. **Alleyne D. and Cawley P.** A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating signals// J. Acoust. Soc. Am., 1991. Vol. 89(3). P.1159.
5. **Alleyne D. and Cawley P.** The interaction of Lamb waves with defects// IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, 1992. Vol. 39. No. 3. P.381.
6. **Alleyne D. and Cawley P.** The long range detection of corrosion in pipes using Lamb waves// Proc. QNDE 94. 1995. Vol. 14.
7. Elastinių bangų interferencijos žiedinėse nevienalytėse struktūrose fizikinių diagnostinių ir informacinių savybių tyrimas // LVMS Fondo tema. Reg. Nr. 94-160/7F. KTU, Kaunas. 1994. – p. 36.
8. **Sukackas V., Ramanauskas R.** PC - simulation of Lamb waves transient process formation in a cylindrical waveguide// Medžiagotyra, Nr.1, 2000 (priimtas spaudai)

V.Sukackas, R.Ramanauskas

**Investigation of transient process in a cylindrical wave guide for Lamb waves**

Summary

A transient process in a cylindrical wave guide was simulated and experimentally investigated. The antisymmetric Lamb waves zero order were excited by one or two point-form transducers placed on opposite sides of the cylinder. The receiving point is placed on a line, parallel to the cylinder axis, on which one transmitter is located. The wave at the receiving point is the superposition of the system of coherent interfering waves. Some transient covering curves were calculated, registered experimentally, and discussed. The dependence of a transient process on the geometry and amplitude ratio of both partial waves may be used for NDT of pipes, and the calculated transient response - as a reaction to the some kind of the "step function".

Pateikta spaudai 2000 04 18