

Neinvazinio ultragarsinio srauto matuoklio elektroakustinio kanalo banginio proceso analizė

A. Vladišauskas

Kauno technologijos universitetas

Neinvazinio ultragarsinio srauto matuoklio elektroakustinis kanalas gali turėti daug techninių sprendimų ir tai priklauso nuo matavimo metodo, vamzdžio sienelės medžiagos ir kampinio pjezokeitiklio charakteristikų. Todėl šis kanalas apibūdinamas kaip sudėtinga ultragarsinė bangolaidinė sistema, kurioje galimos ultragarso bangų transformacijos, interferencijos, bangų slopinimas, ultragarso spindulio difrakcija, daugkartiniai atspindžiai ir t.t. Be to, tokios bangolaidinės sistemos sudėtingumas taip pat priklauso nuo ultragarso spindulio kritimo kampo. Èia galimi du atvejai: o kai kritimo kampas mažesnis už pirmąją kritinį kampą ir kai kritimo kampas yra tarp pirmojo ir antrojo kritinio kampo. Panagrinėsime pirmąją atveją, atsižvelgiant á tai, kad vamzdžio vidus yra pripildytas skysčiu, o vamzdžio sienelė metalinė. Èiuo atveju galimi keli matavimo būdai. Pirmas, kai ultragarso signalas padinamas kampinio pjezokeitiklio P1 vienoje vamzdžio pusėje (pr. 1 pav.), o priimamas kampinio pjezokeitiklio P2 kitoje vamzdžio pusėje. Tai perėjimo būdas.

Antras, kai nuo vidinės vamzdžio sienelės atsispindėjęs ultragarso signalas priimamas toje pačioje vamzdžio pusėje kampinio pjezokeitiklio P3. Tai vieno atspindžio būdas. Iš bendros srauto matuoklio schemas išplaukia, kad galima panaudoti ir kitus vamzdžio viduje atsispindėjusius ultragarso signalus, paeiliui išdėstant pjezokeitikius toje pačioje ir priešingoje vamzdžio pusėje. Kitas matavimo signalas būtų priimamas po

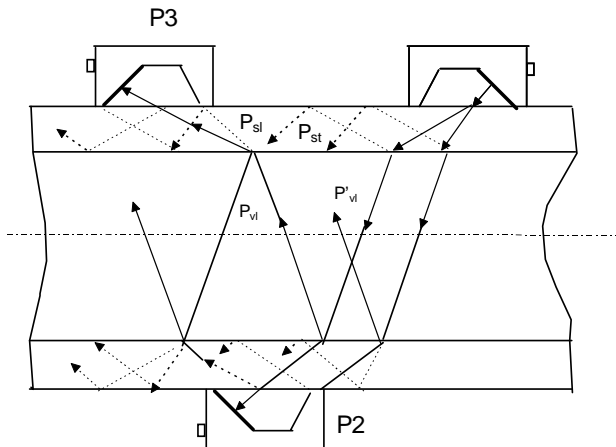
dvigubo vidinio atspindžio, dar kitas po trigubo ir t.t. Aišku, kad po kiekvieno atspindžio ultragarso signalo amplitudė mažės dėl ultragarso spindulio difrakcijos, ultragarso bangų slopinimo matuojamame skystyje ir atspindžio nuo skysčio-metalo ribos koeficiento. Tačiau kuo daugiau yra atspindžių, tuo didesnis pasiekiamas tikslumas. Praktikoje ultragarso signalo atspindžio būdai yra taikomi mažesniu nei 90 mm skersmens vamzdžiuose, kad labiau skirtųsi ultragarso bangos sklaidimo prieš srautą ir srauto kryptimi trukmės.

Ultragarso spinduliui pereinant iš kampinio pjezokeitiklio á metalinę vamzdžio sienelę mažesniu kampu negu pirmas kritinis kampas, vamzdžio sienelėje supadinamos dvi ultragarso bangos: išilginė ir skersinė, kurios priešingoje vamzdžio pusėje išdalies atsispindi nuo metalo ir vandens paviršiaus (parodyta punktyru 1 pav.) ir išdalies pereina á vamzdžio viduje esantį skystą. Èiuo atveju skersinė banga iš vamzdžio sienelės transformuojasi á išilginę bangą skystyje.

Toliau remdamesi akustinio banginio proceso teorija [1-2], panagrinėsime èiuos procesus srauto matuoklio elektroakustiniame kanale. Pjezoelemento sukuriamas slėgis prizmėje

$$P_{p0}(x, z, \eta_p) = e^{i\omega/c_{pe}(x \sin \alpha_e + z \cos \alpha_e)} e^{-\eta_p \omega |pl|/c_l}, \quad (1)$$

èia: $K(j\omega)$ - pjezoelemento perdavimo koeficientas [3], ω - kampinis dažnis, c_{pl} - išilginio bangų greitis prizmėje, α_e - kampas tarp ultragarso spindulio ir vamzdžio paviršiaus normalės, x, z - koordinatės, η_p - slopinimo prizmėje koeficientas, l_p - ultragarso spindulio kelias prizmėje.



1 pav. Neinvazinio srauto matuoklio bendra schema

Ėiame modelyje pjezoelementas supadina prizmėje tik iðilginės ultragarso bangas. Ėios bangos iðdalies atspindi nuo prizmės it metalo ribos ir iðdalies praeina á vamzdþio sienelæ. Kai kampas $\alpha_1 < \alpha_{kr1}$, tai yra maþesnis up pirmajá kritiná kampá, prizmėje atsispindi dviejø tipø bangos. Iðilginės bangos sukuriama slėgis

$$P_{pl}(x, z, \alpha_p, \eta_p) = P_{p0}(x, y, \eta_p) R_l^p(\alpha_e) e^{-i\pi/c_{pl}(z \cos \alpha_p - x \sin \alpha_p)} \times e^{-\eta_p \omega l_{pl}/c_{pl}}; \quad (2)$$

ėia: $R_l^p(\alpha_e)$ - atspindþio nuo prizmės ir vamzdþio sienelės ribos koeficientas, l_{pl} - iðilginės bangos kelias prizmėje po atspindþio.

Analogiðkai skersinės bangos prizmėje sukuriama slėgis

$$P_{pt}(x, z, \alpha_p, \eta_{pt}) = P_{p0}(x, y, \eta_p) R_t^p(\alpha_e) \times e^{-i\pi/C_{pt}(z \cos \alpha_p - x \sin \alpha_p)} \times e^{-\eta_{pt} \omega l_{st}/c_{st}}; \quad (3)$$

ėia: C_{pt} - skersiniø bangø greitis prizmėje; R_t^p - skersiniø bangø atspindþio nuo prizmės ir vamzdþio sienelės ribos koeficientas; η_{pt} - skersiniø bangø slopinimo prizmėje koeficientas, α_e - skersiniø bangø atspindþio kampas.

Abiejø tipø atsispindėjusios bangos sukelia kampinio pjezokeitiklio reverberacinius triukðmus, todėl svarbu, kad ðios bangø svyravimo amplitudės greitai maþėtø. To dþpniausiai yra siekiama dviem būdais. Pirmá, darant prizmės pavirðius rifliuotus, kas uþtikrina ultragarso bangø sklaidá. Antra, didinant slopinimo koeficientá prizmės medþiagoje, ypaė toje dalyje, kur nėra

tiesioginio ultragarso spindulio á vamzdþio sienelæ. Reikia paþymėti, kad skersiniø bangø slopinimo koeficientas gerokai didesnis negu iðilginio bangø. Be to, ávertinus tai, kad skersinės bangos ilgis beveik dvigubai maþesnis negu iðilginės, aiðku, kad pagrindinis reverberaciniø triukðmø ðaltinis kampiniame pjezokeitiklyje yra iðilginės bangos.

Kai kritimo kampas iðilginės bangos prizmėje maþesnis up pirmajá kritiná kampá, vamzdþio sienelėje taip pat supadinamos dvi ultragarso bangos. Iðilginės ultragarso bangos vamzdþio sienelėje sukuriama slėgis

$$P_{sl}(x, y, \beta_e, \eta_{sl}) = P_{p0}(x, y, \eta_p) D_l^{ps}(\beta_l) e^{i\pi/c_{sl}(x \sin \beta_l + z \cos \beta_l)} \times e^{-\eta_{sl} \omega l_{sl}/c_{sl}}; \quad (4)$$

ėia: $D_l^{ps}(\beta_l)$ - iðilginės bangos perėjimo per prizmės ir vamzdþio sienelės ribá koeficientas, c_{sl} - iðilginės bangos ultragarso greitis vamzdþio sienelėje, l_{sl} - ultragarso iðilginės bangos sklidimo atstumas vamzdþio sienelėje, β_l - ultragarso iðilginės bangos perėjimo á vamzdþio sienelæ kampas.

Skersinės bangos vamzdþio sienelėje sukuriama slėgis

$$P_{st}(x, y, \beta_t, \eta_{st}) = P_{p0}(x, y, \eta_p) D_t^{ps}(\beta_t) e^{i\pi/c_{st}(x \sin \beta_t + z \cos \beta_t)} \times e^{-\eta_{st} \omega l_{st}/c_{st}} \quad (5)$$

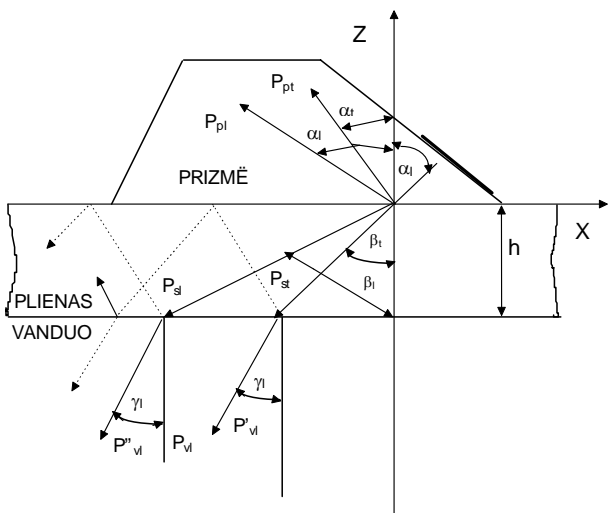
ėia: $D_t^{ps}(\beta_t)$ - skersinės bangos perėjimo per prizmės ir vamzdþio sienelės ribá koeficientas, c_{st} - skersinės bangos ultragarso greitis sienelėje, η_{st} - skersinės bangos slopinimo vamzdþio sienelėje koeficientas, l_{st} - skersinės bangos sklidimo atstumas vamzdþio sienelėje, β_t - skersinės bangos perėjimo á vamzdþio sienelæ kampas.

(4) ir (5) formulėse antros eksponentės laipsnio rodiklis yra supaprastintas:

$$e^{-\eta_{sl} \omega l_{sl}/c_{sl}} = e^{i\pi \eta_{sl}/c_{sl}(x \sin \beta_e + z \cos \beta_e)}, \quad (6)$$

$$e^{-\eta_{st} \omega l_{st}/c_{st}} = e^{i\pi \eta_{st}/c_{st}(x \sin \beta_t + z \cos \beta_t)}. \quad (7)$$

Taigi vamzdþio sienelėje supadinamos dviejø tipø ultragarso bangos, kurios vamzdþio viduje sklinda skirtingais greiėiais, turi skirtingus slopinimo koeficientus ir atspindþio kampus. Greiėiau nuslopsta skersinė banga, nes yra daugiau slopinama ir turi maþesnes atspindþio koeficiento reikðmes. Iðilginė banga gali sklisti toli, priklausomai nuo ultragarso signalo dþpnio, vidiniø atspindþiø skaiėiaus, vamzdþio sienelės akustinio apkrovimo ir t.t. Á tai būtina atsipvelgti, nes srauto matavimuose taikant atspindþio metodus, vamzdþio sienelėje sklindanti banga pirmoji pasiekia kampiná pjezokeitiklá, esantá toje paėioje



2 pav.. Banginiai procesai pjezokeitiklio prizmėje, vamzdþio sienelėje ir skystyje

pusėje kaip ir siuntimo rešimo veikiantis pjezokeitiklis.

Abi šios bangos išdalies pereina į vamzdžio viduje esantą skystą ir sukuria jame akustiną slėgą:

$$\begin{aligned}
 P_{lv}(x, z, \gamma_v, \eta_v) &= P_{p0}(x, z, \eta_p) P_{sl}(x, z, \beta_l, \eta_{sl}) \times \\
 D_l^{sv}(\gamma_v) e^{i\omega/c_v(x \sin \gamma_l + z \cos \gamma_l)} e^{-\eta_v \omega l/c_v}, & \\
 (8) & \\
 P'_{lv}(x, z, \gamma_v, \eta_v) &= P_{p0}(x, z, \eta_p) P_{st}(x, z, \beta_t, \eta_{st}) \times \\
 D_t^{sv}(\gamma_v) e^{i\omega/c_v(x \sin \gamma_l + z \cos \gamma_l)} e^{-\eta_v \omega l/c_v}, & \\
 (9) &
 \end{aligned}$$

čia: $D_l^{sv}(\gamma_v)$ - išilginės bangos perėjimo per sienelės ir skysčio ribą koeficientas; $D_t^{sv}(\gamma_v)$ - skersinės bangos perėjimo per sienelės ir skysčio ribą koeficientas; c_v - ultragarso greitis skystyje; l_v - ultragarso bangos kelias skystyje; η_v - ultragarso bangos slopinimo koeficientas skystyje.

Iš (8) ir (9) formulio išeina, kad skystyje yra supadinamos dvi ultragarso bangos, turinčios tą patį nuokrypio kampą γ_l , tą patį ultragarso sklidimo greitį c_v , tačiau skirtingas svyravimo amplitudes. Tai lemia šios bangos atsiradimo prieštys. Pirmoji ultragarso banga (P_{lv}) nesitransformuodama pereina vamzdžio sienelė maksimaliu greičiu ir nuokrypio kampu β_l . Antroji ultragarso banga (P'_{lv}) transformuojasi vamzdžio sienelėje į skersinę ultragarso bangą beveik dvigubai mažesniu greičiu ir nuokrypio kampu β_t , todėl išspinduliuojama į skystą jau kaip išilginę vėluojančioji banga. Be to, šios bangos ultragarso spindulio ašis persislinkusi x ašies

atšvilgiu. Kai plieninė vamzdžio sienelė yra 4-5 mm storio, o prizmės kampas $\alpha_1=10^\circ$, šis persislinkimas sudaro 3-3,5 mm. Pjezoelemento skersmuo paprastai būna 12-15 mm, todėl šios bangos ultragarso spinduliai sutampa ir skystyje bangos interferuoja. Tuomet priklausomai nuo vamzdžio sienelės storio, ultragarso signalo dažnio, ultragarso bangos kritimo kampo akustinio slėgio dydis skystyje gali padidėti (kai bangos fazės sutampa) arba sumažėti. Šis banginio proceso reiškinys gali būti panaudotas elektroakustinio kanalo perdavimo koeficientui padidinti.

Literatūra

1. **Адошанеё Е.И.** Аіііу а нёіёнооо нёааао.- лінеаа: Аёааііёу іаоё НННН,1957.-500 н.
2. **Енаііаё І.А.** Іауау аёоноёёа.- лінеаа: Іаоёа, 1973.-494 н.
3. **Аёаёёооёёа А., Аііёіа А.** Еннеааіаіёа іаёііііу оёдіііііііу іуацііаіаіаааёаё/ іао-іуа оёоау аоціа Еёо., Оёуоёаёаё, 1989. No.21. Н.69-79.

A.Vladišauskas

Analysis of the wave propagation in the electroacoustic channel of ultrasonic clamp-on flow meters

Summary

A wave propagation in the electroacoustic channel is investigated when the incident angle of the ultrasonic beam is less than the first critical angle. In this case there are two ultrasonic waves in the metallic pipe wall: longitudinal and shear. These waves transform in to two longitudinal waves in the flow liquid with a time delay. The axis of the ultrasonic beam is shifted along the pipe. In this case the acoustic pressure in the liquid may be increase or decrease. It depends on the wall thickness, the ultrasonic signal frequency and the incident angle.