

## Ultragarsinio artimojo lauko charakteristikø slopinanèioje aplinkoje apskaièiavimo metodas

A.Lukoðevièius, R.Jurkonis

Kauno technologijos universitetas

### Åvadas

Ultragarsiniø keitikliø spinduliuojami laukai laisvoje erdvėje modeliuojami jau seniai. Sukurti åvairūs ir åvairaus adekvatumo laipsnio ultragarsiniø laukø teoriniai modeliai [1, 2]. Bet dauguma modeliø yra supaprastinti, laikant, kad ultragarsinè energija spinduliuojama å neslopinanèià aplinkà, kurioje ultragarsinès bangos nepatiria energijos nuostoliø. Be to, modeliai, apytikriai åvertinantys slopinimà, netinka ultragarsiniam artimajam laukui apskaièiuoti. Ultragarsinès bangos slopinimo modeliai dažniausiai netenkina priepastingumo principo. Neatsipvelgiama tai, kad å artimojo lauko taðkà elementariosios ultragarsinès bangos ateina ið skirtingai nutolusio apertūros vietø ir yra skirtingai nuslopinotos. Kaip þinoma, aukðtesniøjø ultragarsiniø dažniø diapazone ultragarsinès bangos patiria dideliø nuostoliø: kuo dažnis aukðtesnis, tuo nuostoliai didesni. Tiek techninèje kontrolèje, tiek medicininèje diagnostikoje naudojami ultragarsiniai metodai, pagrãsti spinduliuojamø ultragarsiniø laukø sàveika su tyrinèjama aplinka. Pats ultragarsinis laukas ir jo pokyèiai tyrinèjamoje aplinkoje yra pirminès informacijos åaltinis. Taigi ultragarsiniø artimøjø laukø slopinanèioje aplinkoje modeliavimas yra aktuali ir dar neiðspræsta problema.

### Teorinis modelis

Þinomi keli ultragarsiniø laukø slopinanèioje aplinkose teorinio modeliavimo artiniai. Tai - banginiø lygèiø sprendimo [2] bei apertūros impulsinès charakteristikos (AICH) [4] metodai.

Antrasis - AICH metodas naudojamas tiek stacionariojo, tiek pereinamojo darbo reþimø ultragarsiniam laukams modeliuoti [5]. Akustinio slègio pasiskirstymas erdvėje upraðomas virpamojo greièio potencialo iðvestine:

$$p(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \varphi(x, y, z, t)}{\partial t}; \quad (1)$$

èia  $\rho$  - homogeninès aplinkos tankis;  $\varphi(x, y, z, t)$  - virpamojo greièio potencialo pasiskirstymas erdvėje:

$$\varphi(x, y, z, t) = \iint_{\tau S} A(x, y, t) \cdot \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{2\pi R} dS d\tau; \quad (2)$$

èia  $A(x, y, t)$  - spinduliuojanèios apertūros apertūrinè funkcija, kuri iðskaidoma å laikinà ir erdvinà komponentes:  $A(x, y, t) = v(t)A'(x, y)$ ;  $v(t)$  - virpamojo greièio signalas apertūroje;  $A'(x, y)$  - virpamojo greièio signalo amplitudès pasiskirstymas apertūroje;  $\delta(t - \tau - \frac{R}{c})$  - Dirako delta funkcija;  $S$  - integravimo pagal apertūros plotà kintamasis;  $\tau$  - integravimo pagal laikà kintamasis;  $R$  - atstumas nuo apertūros elemento  $dS$  iki erdvès taðko  $M(x, y, z)$ ;  $c$  - ultragarso greitis homogeninèje aplinkoje.

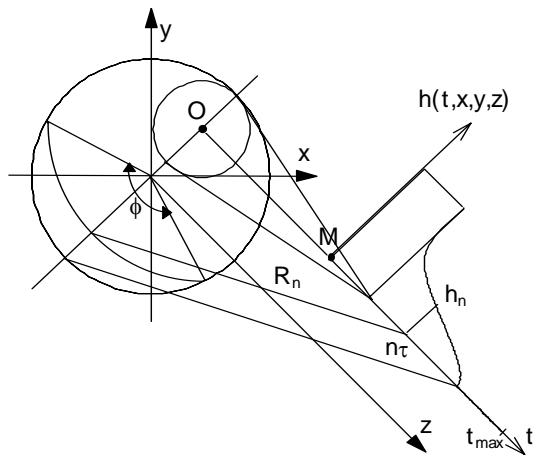
Dirako delta funkcijos integralas pagal apertūros plotà ir yra AICH:

$$h(x, y, z, t) = \int_S \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{2\pi R} dS. \quad (3)$$

Funkcija  $h(t, x, y, z)$ , arba AICH, yra sferiniø bangø, spinduliuojamø ið kiekvieno elementaraus åaltinio  $dS$  superpozicijos rezultatas homogeninès aplinkos taðke  $M(x, y, z)$ . Homogeninè slopinanti aplinka modifikuoja AICH priklausomai nuo elementariøjø sferiniø bangø sklidimo kelio ilgio. Todël slopinanèioje aplinkoje AICH  $h_\alpha(t, x, y, z)$  galima apskaièiuoti pagal formulà [6]:

$$h_\alpha(x, y, z, t) = \iint_{\tau S} \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{2\pi R} \cdot g_\alpha(t - \tau, c\tau) dS d\tau; \quad (4)$$

èia  $g_\alpha(t, c\tau)$  yra aplinkos sluoksniu akustinè impulsinè charakteristika, åvertinanti åios aplinkos slopinimà [8, 9].



1 pav. Apertūra ir jos impulsinė charakteristika (AICH) greičio potencialui laisvoje erdvėje nustatyti.

Integravimas (3) formulėje pagal apertūros plotą  $S$  pakeičiamas analitinės - diskretinės funkcijos, vadinamos ekvidistancinės linijos funkcija, skaičiavimā [7]. Dvimatis integravimas pakeičiamas ā kreiviniū integralū sumā. Integravimo kreivė laikomas ekvidistancinio apskritimo lankas, iūbrėpiamas iū taūko  $O$  apertūroje. Ąprastinis AICH formavimasis neslopinanēioje darbinēje erdvēje pailiustruotas 1 paveiksle. Ūiuo atveju AICH erdvės taūke  $M$ , ūymima kaip  $h(t, x, y, z)$ , formuojasi pagal apskritiminiū ekvidistanciniū linijū apertūroje lanko kampū  $\phi$  [7]. Ekvidistancinės linijos yra ūdari apskritimāi arba apskritimū lankāi. Taigi kiekvienu diskretiniu laiko momentu  $n\tau$  funkcija  $h(t, x, y, z)$  āgauna amplitudā  $h_n$ , proporcingā apskritimo lanko kampui  $\phi$ .

Taigi AICH neslopinanēioje aplinkoje formuojasi kaip integralinē elementariū ūaltiniū, esanēiū ant ekvidistanciniū linijū apertūroje, suma. Kiekvienu laiko momentu AICH amplitudē proporcinga ekvidistancinės linijos lanko kampui. Kiekvienos ekvidistancinės linijos indēlā ā AICH galime traktuoti kaip tam tikros amplitudės delta impulsā, pasirodantā laiko momentu  $t=R'/c$  (ēia  $R'$  - atstumas nuo tiriamojo taūko iki ekvidistancinės linijos apertūroje).

Norint āvertinanti slopinimā aplinkoje, reikia modifikuoti AICH apskaiēiavimo algoritmā pagal (4) formulā. Algoritmas modifikuojamas laikantis dekompozicijos principo. (4) formulē iū esmēs reiūkia vadinamāją D transformacijā [4].

Slopinanēiā aplinkā laikysime izotropine, homogenine, o jos daūninā slopinimo funkcijā nulemia tik ultragarso absorbcija medūiagoje.

Nagrinēdami slopinanēiā aplinkā, turime atsipvelgti ā tai, kad kiekvienas, aukūēiau minētas, elementarusis AICH diskretas jau nēra

delta impulsas. Esant slopinimui, kiekvienos ekvidistancinės linijos indēlis ā AICH atitinka  $R$  storio slopinanēio sluoksnio impulsinā charakteristikā. Taigi AICH pradūioje yra artimesniūjū, o pabaigoje - tolimesniūjū ekvidistanciniū linijū sugeneruotū bangū superpozicijā. Grafinē diskretiniū AICH formavimosi laisvoje ir slopinanēioje aplinkose interpretacija, atitinkamai  $h(t, x, y, z)$  ir  $h_a(t, x, y, z)$ , pateikta 2 paveiksle. Neslopinanēioje aplinkoje paelemenēiui sumuojamos delta impulsū sekos, o slopinanēioje - sluoksnio impulsinēs charakteristikos. Abiem atvejais sumuojamū dēmenū amplitudiniai svoriai proporcingi lanko kampui  $\phi$ .

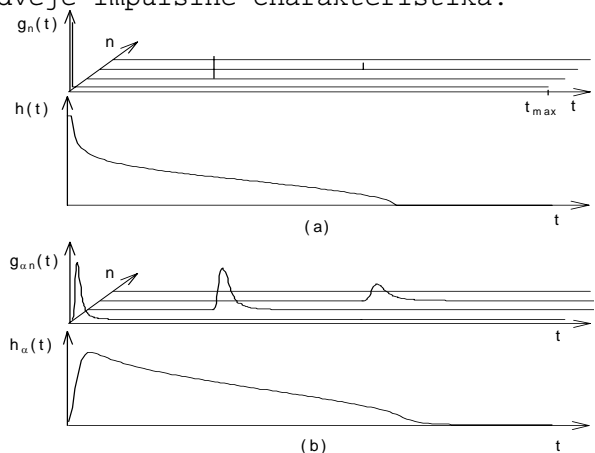
D transformacija, naudojama apskaiēiuojant AICH slopinanēioje aplinkoje pagal (4) formulā, iū esmēs yra Urisono integralinē transformacija. Nagrinējamuū atveju ji gali būti interpretuojama kaip nuosekliai kintanēio branduolio konvoliucija tarp sluoksnio impulsinēs charakteristikos  $g_a(t, R)$  ir AICH neslopinanēioje aplinkoje  $h(t, x, y, z)$ . Sutrumpintai (4) formulā galime ūpraūyti taip [4]:

$$h_a(t, x, y, z) = \frac{c}{\pi} \int_{\tau_1}^{\tau_2} g_a(t - \tau, c\tau) \cdot h(\tau, x, y, z) d\tau. \quad (6)$$

Skaimeninē ūpraūymo forma yra sumos pavidalo:

$$h_a(t, x, y, z) = \sum_{n=0}^{N-1} [g_{a_n}(t - n\tau, c\tau) \cdot h(n\tau, x, y, z)]; \quad (7)$$

ēia  $\sum[*]$  -  $N$  sekū sumavimas paelemenēiui;  $g_{a_n}(t, R)$  - izotropinės homogeninės aplinkos sluoksnio tarp  $n$ -tosios ekvidistancinės linijos ir taūko erdvēje impulsinē charakteristika.



2 pav. Grafinē AICH formavimosi laisvoje (a) ir slopinanēioje (b) aplinkose interpretacija.

Ji apskaiēiuojama remiantis priēpastingumo principu. Taigi jā modeliuoti reikia fiziūkai realizuojama sistema. Laikome, kad slopinanēios aplinkos sluoksnio dispersinē funkcija

yra vienareikšmiškai susijusi su sluoksniu slopinimo funkcija per Hilberto transformaciją. Èia taikoma vienmaèio sluoksniu priepastinės impulsinės charakteristikos apskaièiavimo metodika jau naudota ir aptarta darbuose [8,9]. Impulsinė charakteristika, atitinkanti ultragarsinės bangos nueitąjį kelià  $R_n$ , upraðoma taip:

$$g_{\alpha_n}(t, R_n) = AFT \left[ e^{(-\alpha_n(f, R_n) + j\beta_n(f, R_n))} \right]; \quad (8)$$

èia  $AFT[*]$  - atvirkðtinë Furjè transformacija.

Aplinkos sluoksniu, kurio storis  $R_n$ , kompleksinės perdavimo funkcijos realioji ir menamoji dalys yra tokios:

$$\alpha_n(f, R_n) = \alpha_0 \cdot \left( \frac{f}{f_0} \right)^m \cdot R_n, \quad (9)$$

$$\beta_n(f, R_n) = HT[\alpha_n(f, R)]; \quad (10)$$

èia  $HT[*]$  - Hilberto transformacija.

$$R_n = z + n \cdot c \tau; \quad (11)$$

èia  $z$  - koordinatë;  $c$  - ultragarso greitis aplinkoje (nedispersinë greièio dedamoji);  $\tau$  - laiko diskretizavimo intervalas. Taigi  $R_n$  yra lygus tyrinëjamo taðko atstumui iki apertûros plius diskretiðkai didëjanti dedamoji  $n c \tau$ , t.y. atstumo prieaugis. Algoritmas reikalauja, kad laiko diskretizavimo intervalas  $\tau$  visuose sekose:  $h(t)$ ,  $h_\alpha(t)$  ir  $g_\alpha(t, R)$  bûtø tas pats ir lygus

$$\tau = \frac{t_{\max}}{N}, \quad \text{èia } t_{\max} - \text{skaièiuotinë}$$

realizacijø trukmë;  $N$  - atskaitø tose realizacijose skaièius. Skaièiuojant dâpnines charakteristikas, maksimalusis dâpnis yra  $f_{\max} = \frac{N}{2t_{\max}}$ .

$$f_{\max} = \frac{N}{2t_{\max}}.$$

Kaip matome, skaitmeninis laukø apskaièiavimo algoritmas vienareikšmiškai susieja laiko ir dâpnio diskretizavimà, todël buvo imtasi áprastø priemoniø diskretiniø sekø spektro sanklotai iðvengti.

Naudojantis AICH slopinanèioje aplinkoje galima apskaièiuoti harmoniniu reþimu dirbanèios apertûros spinduliuojamà laukà [5]:

$$P_{har}^*(r, z, t) = -j\omega_0 \rho A e^{j(\omega_0 t + \varphi)} \cdot \theta(r, z, t); \quad (12)$$

$$\text{èia } \theta(r, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_\alpha(r, z, \tau) \cdot e^{-j\omega_0 \tau} d\tau; \quad A \text{ ir } \varphi -$$

harmoninio virpamojo greièio apertûroje amplitudë ir fazë,  $\omega_0$  - harmoninio virpesio kampinis dâpnis;  $\rho$  - homogeninės aplinkos tankis. Dâpnio  $\omega_0$  harmoninio lauko amplitudþiø pasiskirstymas apskaièiuojamas taip:

$$P_{har}(r, z, t) = \left| P_{har}^*(r, z, t) \right|. \quad (13)$$

Kai apertûra spinduliuoja realøjá impulsiná virpamojo greièio signalà  $v(t)$ , spinduliuojamas laukas apskaièiuojamas pagal (2) formulà. Èia reikia pasinaudoti ir (4) formule, kad bûtø pakeistas ploto intergalas á aukðèiaiu aptartu būdu apskaièiuojamà AICH slopinanèioje aplinkoje  $h_\alpha(x, y, z, t)$ . Taip pertvarkius (2) formulà, gaunamas sukinio intergalas:

$$\varphi(x, y, z, t) = \int_{\tau} A(x, y, \tau) \cdot h_\alpha(x, y, z, t - \tau) d\tau, \quad (14)$$

arba, ávedus radialinà koordinatà  $r$  bei apertûrinà funkcijà laikant lygia vienetui  $A'(x, y) = 1$ , - sukiny:

$$\varphi_{sig}(r, z, t) = h_\alpha(r, z, t) \otimes v(t); \quad (14)$$

èia  $v(t)$  - virpamojo greièio apertûroje signalas.

Apertûros spinduliuojamas signalas  $v(t)$  sumodeliuotas keitiklio ekvivalenèiøjø keturpoliø metodu. Gautasis virpamojo greièio apertûroje signalas  $v(t)$  panaudotas visuose signalinio lauko amplitudþiø pasiskirstymo skaièiavimuose. Á virpamojo greièio amplitudæ ir fazës pasiskirstymà apertûroje neatsiþvelgiama. Laikoma, kad  $v(t)$  viroje apertûroje turi toká pavidalà, kaip parodyta 3 paveiksle.

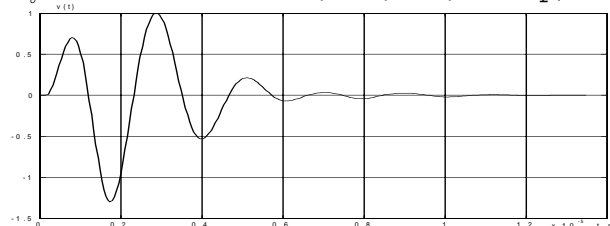
Ðiuo reþimu spinduliuojamà ultragarsiná laukà vadinsime impulsiniu signaliniu lauku, o jo pasiskirstymà erdvėje vizualizuosime kaip maksimaliø akustinio signalo amplitudþiø pasiskirstymà tyrinëjamuose erdvës taðkuose:

$$\varphi_{sig_{\max}}(r, z) = \text{MAX}[\varphi_{sig}(r, z, t)]. \quad (15)$$

## Rezultatai

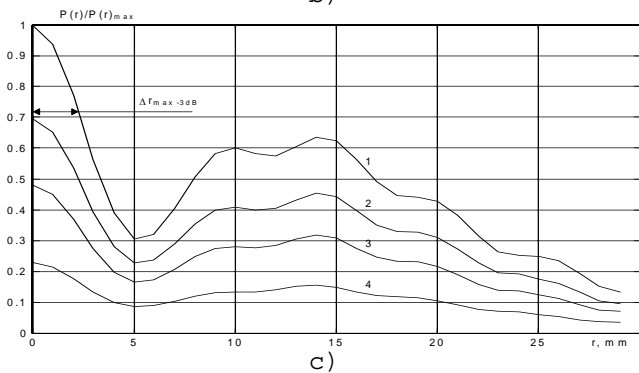
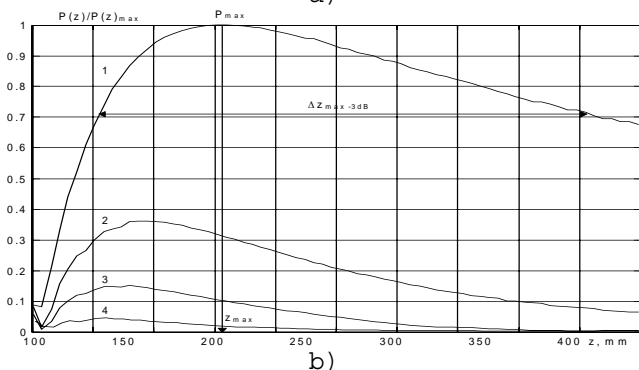
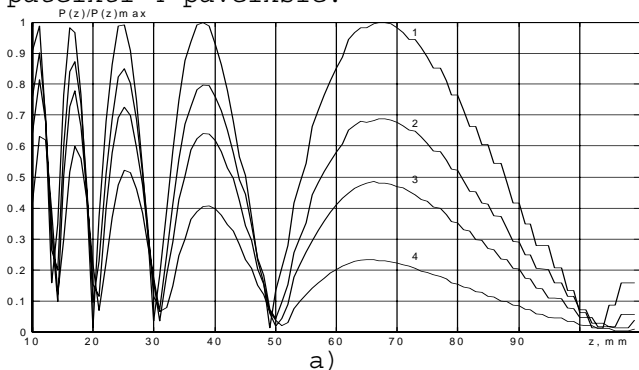
Vaizdumo dëlei teoriniai modeliai panaudoti 50 mm skersmens apskritajai apertûrai, spinduliuojanèiai á slopinanèià aplinkà 0.5 MHz harmoniná signalà.

Aplinkos slopinimo dâpninë funkcija  $\alpha(f, R)$  parinkta artima þmogaus minkðtøjø audiniø slopinimo funkcijai, bûtent: koeficientas  $\alpha_0 = 10 \text{ Np/m}$ , kai  $f_0 = 1 \text{ MHz}$ ; ir laipsnio rodiklis  $m = 1, 2$ . Norint iðryðkinti slopinimo átakà akustinio lauko amplitudþiø pasiskirstymui, slopinimo koeficientas  $\alpha_0$  buvo keièiamas: 0; 10; 20; 40 Np/m.



3 pav. Virpamojo greižio signalas apertūroje. Pjezoelementas iš PZT keramikos; elektromechaninio ryšio koeficientas  $k_t=0,43$ ; darbinis dažnis  $f_0=0,5\text{MHz}$ ; normuotasis dempferio akustinis impedansas  $k_i=0,3$ ; normuotasis akustinio suderinančiojo ketvirčio bangos sluoksnio akustinis impedansas  $k_s=0,14$ ; lygiagretusis koreguojan-tysis induktyvumas  $L_k=22\mu\text{H}$

Ultragarsinio spindulio išilginiai ir skersiniai amplitudiniai profiliai pateikti 4 paveiksle.



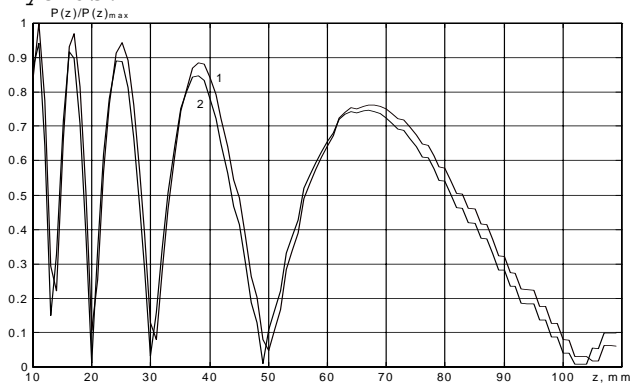
4 pav. Harmoniniu reþimu dirbanþios apskritosios apertūros spindulio amplitudiniai profiliai: a) išilgai spindulio artimajame lauke, b) išilgai spindulio tolilmajame lauke ir c) skerspjūvyje ties  $z=70\text{mm}$ , kai aplinkos slopinimo koeficientas  $\alpha_0$ : 1) - 0; 2) - 10; 3) - 20 ir 4) - 40 Np/m

Rezultatai gauti pasiūlytuoju D transformacijos metodu, palyginti su paprastu vienmaëiu slopinimo ávertinimu, t.y. ávedant daugyklá

$$K(z) = e^{-\alpha_0 \left(\frac{0,5}{1}\right)^{1,2} z}$$

Kai slopinimo koeficientas  $\alpha_0=10$  Np/m, gauname 5 paveiksle parodytà rezultatá. Galime teigti, kad pasiūlytasis trimatis slopinimo ávertinimas duoda ryðkesná efektá tik artimojo lauko zonoje, o

tolimojo lauko zonoje efektas nėra toks ryðkus.

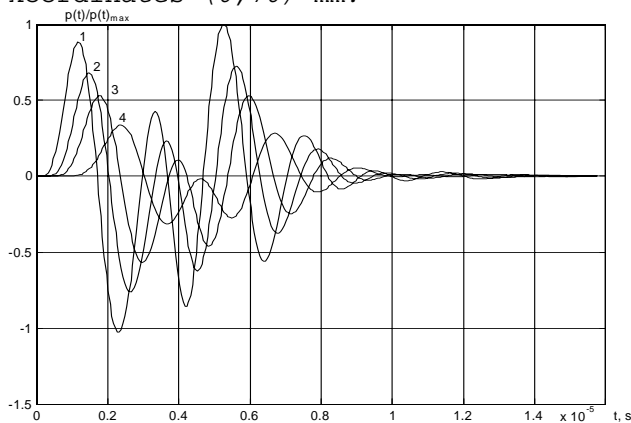


5 pav. Harmoniniu reþimu dirbanþios apskritosios apertūros spindulio amplitudiniai išilginiai profiliai: 1 - apskaiëiuotas pasiūlytuoju D transformacijos metodu, 2 - apskaiëiuotas vienmaëiu slopinimo ávertinimo artëjimu

Lentelë. Harmoniniu reþimu dirbanþios apskritosios apertūros ultragarsinio spindulio parametrai

Parametras	Slopinimas, $\alpha_0$ , Np/m			
	0	10	20	40
$P_{max}$	1	0.36	0.15	0.03
$Z_{max}$	1	0.81	0.77	0.67
$\Delta z_{max -3dB}$	1	0.41	0.29	0.13
$\Delta r_{max -3dB}$	1	0.75	0.75	2

Tai, kad modeliuojamas signalinis laukas atitinka priebastingumo principá, matyti iš 5 paveiksle pateiktø keturiø signalinio lauko realizacijø erdvës taðke, kurio koordinatës (0,70) mm.



6 pav. Akustiniai signalai slopinanþios aplinkos taðke (0,70) mm, kai aplinkos slopinimo koeficientas  $\alpha_0$ : 1 - 0; 2 - 10; 3 - 20 ir 4 - 40 Np/m



DOI: 10.5755/j01.u.27.1.7851