

## Ultragarsinio keitiklio pradinio stiprintuvo triukšminis modelis

V. Dumbrava, L. Svilainis

Signalų apdorojimo katedra, Kauno technologijos universitetas,

Studentų g. 50, LT-51368 Kaunas, Lietuva, tel. +370 37 300532, el.p. vytautas.dumbrava@ktu.lt

### Įvadas

Ultragarsinės neardamosios kontrolės sistemos plačiai naudojamos kietųjų kūnų vidiniams defektams vizualizuoti. Tokių kompiuterizuotų sistemų struktūra sudaryta iš elektroakustinio trakto, kuris turi užtikrinti ( $10^3 - 10^4$ ) kartų stiprinimo koeficientą pagal įtampą (0,1 – 10) MHz dažnių juostoje priklausomai nuo jos paskirties, platų dinaminį diapazoną, siekiantį iki 90 dB [1]. Naudojant naujas puslaidininkines medžiagas ir integrinių lustų technologijas, atsirado galimybė sukurti ultragarsinės kontrolės sistemos elektroakustinį traktą naudojant tik operacinius stiprintuvus. Šiuolaikiniai operaciniai stiprintuvai užtikrina iki 1,5 GHz vienetinio stiprinimo dažnių juostą [2]. Dažnai vyrauja klaidinga nuomonė, kad panaudojus mažatriukšmius operacinius stiprintuvus pirmojoje pakopoje jau automatiškai sumažėja triukšmai trakto išėjime, tačiau praktika tai paneigia.

Šio darbo tikslas – įvertinti ir apskaičiuoti ultragarsinės sistemos plačiajuosčio elektroakustinio trakto triukšmus, panaudojant operacinius stiprintuvus ir tinkamai bei tikslingai juos parenkant.

Sustiprintas signalas įprastai patiekiamas į analoginį kodinį keitiklį, kurio išėjime gauti duomenys įvedami į kompiuterį. Žinant viso trakto triukšmus galima tinkamai parinkti analoginio kodinio keitiklio skilčių skaičių, diskretizavimo dažnį ir užtikrinti reikiamą tikslumą ir dinaminį diapazoną.

### Teorinis ultragarsinio keitiklio triukšmų modelis

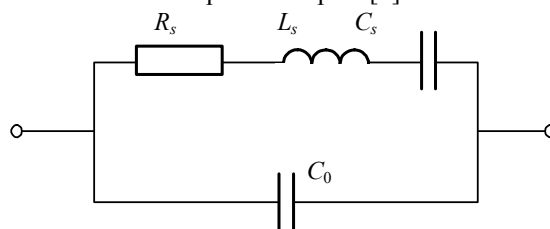
Elektroakustinio trakto stiprinimo koeficientą galima gauti naudojant pakopinį operacinių stiprintuvų jungimą. Jei stiprintuvai yra sujungti pakopomis ir apibūdinami triukšmo koeficientais, tai suminis triukšmo koeficientas apskaičiuojamas pagal Friso (*Friiss*) formulę:

$$F_{\Sigma} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_{p1}} + \frac{F_3 - 1}{K_{p1}K_{p2}} + \dots; \quad (1)$$

čia  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$  – pirmosios ir antrosios pakopų stiprintuvų galios stiprinimo koeficientai;  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  – atitinkamų pakopų triukšmo koeficientai. Matyti, kad trakto triukšmus

daugiausia lemia pirmojo laipsnio triukšmai, todėl toliau nagrinėsime tik juos.

Operacinių stiprintuvų triukšmų įvertinimas teoriškai išnagrinėtas pakankamai gerai ir skaičiavimo metodika plačiai taikoma praktikoje esant žinomai aktyviajai šaltinio varžai  $R_s$  [3]. Ultragarsinės sistemos įėjime jungiamas ultragarsinis keitiklis, kurio BVD (*Butterworth-Van Dyke*) ekvivalentinė schema pateikta 1 pav. [4].



1 pav. Ultragarsinio keitiklio ekvivalentinė schema

Ultragarsinio keitiklio pilnutinė varža  $Z_s$  yra kompleksinė ir keičiasi kintant dažniui. Bendruoju atveju pilnutinė varža išreiškiama lygtimi:

$$Z_s = \frac{\left( R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \right) \cdot \frac{1}{j\omega C_0}}{R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + \frac{1}{j\omega C_0}}. \quad (2)$$

Keitiklyje pasireiškia nuoseklūs ir lygiagretūs rezonansai, kurių dažniai apskaičiuojami taip:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}, \quad \omega_l = \frac{1}{\sqrt{L_s \frac{C_s C_0}{C_s + C_0}}}. \quad (3)$$

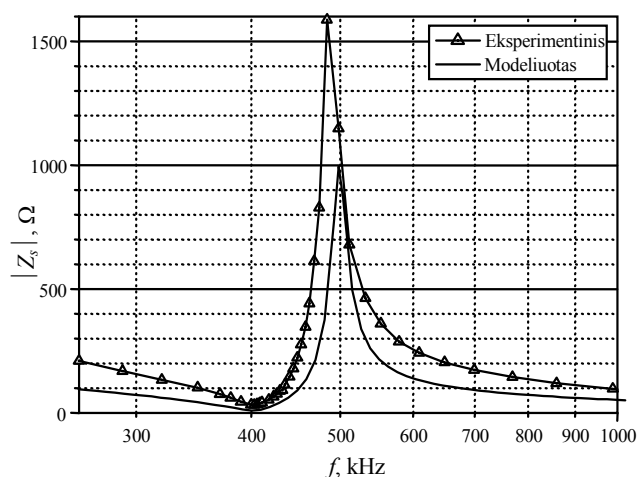
Ultragarsinio keitiklio triukšmai įvertinami pilnutinės varžos  $Z_s$  realiąja dalimi, t. y.  $\text{Re}(Z_s)$ . Taigi triukšminėms trakto charakteristikoms įtakos turi aktyvioji keitiklio nuostolių varža, kuri paprastai siekia (190 – 300)  $\Omega$ , esant (1,5 – 2,5) MHz darbo dažniui, o 5,0 MHz dažnių ruože mažėja iki (50 – 100)  $\Omega$  [5 – 7]. Tyrimui buvo pasirinktas keitiklis, pagamintas iš kompozicinės medžiagos, skirtas darbu ore. Eksperimentiškai išmatuoti parametrai pateikti 1 lentelėje. Ultragarsinių keitiklių parametų matavimo ir skaičiavimo metodika išdėstyta [5] straipsnyje.

Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir modeliavimo rezultatai pateikti 2 pav.

1 lentelė. Ultragarsinio keitiklio elektriniai parametrai

Parametras	Skaitinė vertė
$C_0, \text{pF}$	3333
$C_s, \text{pF}$	1753
$L_{s1}, \mu\text{H}$	88,7
$R_s, \Omega$	9,3

Ultragarsiniam keitikliui modeliuoti, keitiklio pilnutinė varža buvo skaičiuojamas pagal (2) formulę. Matome, kad keitiklio darbo dažnio diapazone eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai sutampa ganai gerai.



2 pav. Ultragarsinio keitiklio kompleksinės varžos priklausomybė nuo dažnio

Paprastai stiprintuvo įėjimo pakopoje jungiamos papildomos grandinės, būdingos tik ultragarsinėms sistemoms, t.y. žadinimo generatorius, žadinimo generatoriaus įtampos ribotuvas, todėl skaičiuojant tokio trakto triukšmus reikia atsižvelgti į ultragarsinės sistemos trakto ypatumus.

### Elektroakustinio trakto triukšminis modelis

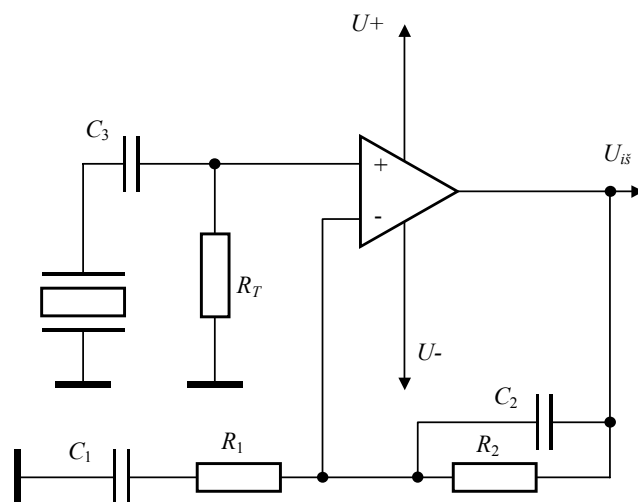
2 lentelėje yra pateikti operacinių stiprintuvų triukšminiai parametrai. Remdamiesi šiais duomenimis, apskaičiuosime suminius operacinio stiprintuvo triukšmus. Operacinio stiprintuvo triukšmai techninėje dokumentacijoje apibūdinami įtampos triukšmų šaltinio spektriniu tankiu  $e_n [nV/\sqrt{\text{Hz}}]$  ir srovės triukšmų šaltinio spektriniu tankiu  $i_n [pA/\sqrt{\text{Hz}}]$ . Analizei naudotų mažatriukšmių operacinių stiprintuvų triukšminiai parametrai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Mažatriukšmiai operacinių stiprintuvų parametrai

Tipas	AD8009 Analog devices	LMH6624 National semiconductor	OPA 657 Texas Instruments	AD8055 Analog devices
$e_n, nV/\sqrt{\text{Hz}}$	1,9	0,92	4,8	6
$i_n, pA/\sqrt{\text{Hz}}$	46	2,3	0,0013	1

Elektroakustinio trakto pirmosios pakopos principinė elektrinė schema pateikta 3 pav. Pirmojoje pakopoje panaudotas operacinis stiprintuvas LMH6624MA, įjungtas neinvertuojančiojo stiprintuvo režimu. Schemoje rezistorius  $R_T$  šuntuoja ultragarsinį keitiklį ir yra naudojamas operacinio stiprintuvo darbo režimui nustatyti pagal nuolatinę dedamąją [8]. Įprasta, kad rezistoriaus  $R_T$  nominalas yra parenkamas iš sąlygos, kad invertuojančiojo ir neinvertuojančiojo įėjimų varžos nuolatinei srovei būtų vienodos norint išvengti operacinio stiprintuvo slinkties srovių:

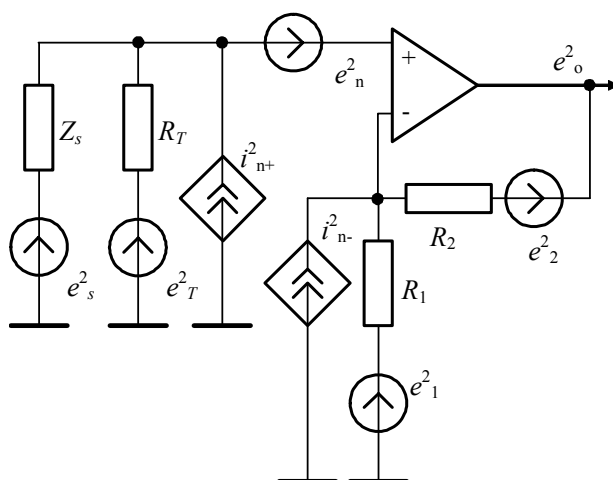
$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$



3 pav. Elektroakustinio trakto pirmosios pakopos principinė elektrinė schema

Turėdami visą triukšminį modelį, galėsime panagrinėti, kokią įtaką triukšmams turi šis reikalavimas. Stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę

$$K = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (5)$$



4 pav. Elektroakustinio trakto triukšminis modelis

Nagrinėjama ultragarsinė sistema veikia priėmimo režimu, kai  $R_1=10 \Omega$ ,  $R_2=1000 \Omega$ . Tuomet stiprinimo koeficientas, apskaičiuotas pagal (5) formulę,  $K=100$ . Stiprintuvo apatinė dažnių juosta apribota kondensatoriaus

$C_3$  ir rezistoriaus  $R_T$  ir siekia 260 kHz  $-3$  dB lygyje. Kondensatorius  $C_2$  kartu su rezistoriumi  $R_2$  sudaro žemųjų dažnių filtrą ir apriboja stiprintuvo viršutinę dažnių juostą iki 1 MHz. 4 pav. yra pateiktas šio pradinio stiprintuvo triukšminis modelis.

Šiame modelyje operacinio stiprintuvo vidiniai triukšmai atvaizduoti įtampos  $e_n$  ir srovės  $i_{n+}$ ,  $i_{n-}$  triukšmų šaltiniais. Daugumai operacinių stiprintuvų  $i_{n+}=i_{n-}$  [3]. Išoriniai rezistoriai atvaizduoti šiluminio triukšmo įtampos šaltiniais su atitinkamais indeksais ir jų triukšmo galios spektrinio tankio vertės apskaičiuojamos taip:

$$\frac{e_{tr}^2}{\Delta F} = 4kTR; \quad (6)$$

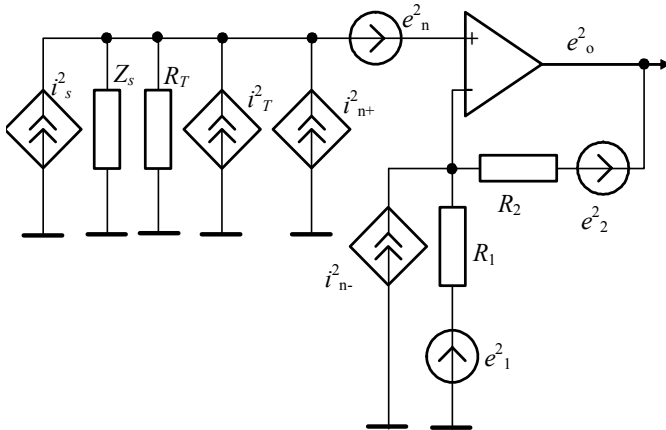
čia  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/C] – Bolcmano konstanta,  $T$  – absoliutinė temperatūra [K],  $\Delta F$  – dažnių juostos plotis.

Ultragarsinis keitiklis schemoje atvaizduotas įtampos šaltiniu  $e_s$  su pilnutine varža  $Z_s$ , kurio triukšminės savybės lemia pilnutinės varžos realioji dalis. Iš pateikto triukšminio trakto modelio matome, kad gavome gana sudėtingą schemą. Triukšmų įtampos šaltiniai  $e_s$ ,  $e_T$ , taip pat  $i_{n-}$  ir  $e_1$  yra sujungti lygiagrečiai, todėl modeliui supaprastinti juos pakeičiame ekvivalentiniais srovės šaltiniais. Įtampos triukšmo šaltiniai paverčiami ekvivalentiniais srovės šaltiniais, naudojantis tokia priklausomybe:

$$i_n^2 = \frac{4kT}{R_r}; \quad (7)$$

čia  $R_r$  – triukšmų šaltinio varža.

Transformuotas triukšminis modelis pateiktas 5 pav.



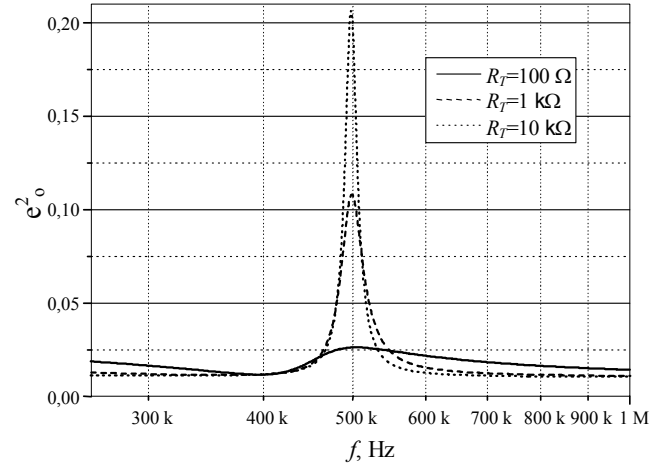
5 pav. Transformuotas elektroakustinio trakto triukšminis modelis

Įvertinę lygiagrečiai sujungtų srovės triukšmo šaltinius transformuotame modelyje, galime parašyti operacinio stiprintuvo išėjime triukšmo galios spektrinio tankio išraišką:

$$e_o^2 = K^2 \left| \frac{R_T}{R_T + Z_s} \right|^2 e_s^2 + K^2 \left| \frac{Z_s}{R_T + Z_s} \right|^2 e_T^2 + K^2 \left| \frac{R_T Z_s}{R_T + Z_s} \right|^2 i_{n+}^2 + K^2 e_n^2 + (K-1)^2 e_1^2 + e_2^2 + R_2^2 i_{n-}^2. \quad (8)$$

Iš gautos išraiškos matome, kad skaičiuojant triukšmų spektrinį tankį operacinio stiprintuvo išėjime, reikia žinoti ultragarsinio keitiklio pilnutinės varžos  $Z_s$  dažninę charakteristiką diapazone. Jos grafikas pateiktas 2 pav.

Pagal (8) lygtį skaičiuotas stiprintuvo LMH6624 išėjimo triukšmo galios spektrinis tankis diapazone nuo 260 kHz iki 1 MHz, keičiantis stiprintuvo įėjime įjungtai šuntuojančiajai varžai  $R_T$  ir modeliavimo rezultatai pateikti 6 pav.



6 pav. Triukšmo galios spektrinio tankio priklausomybė nuo varžos  $R_T$

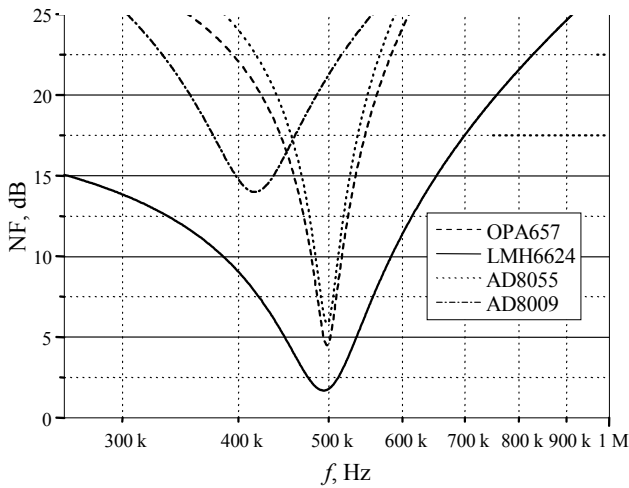
Iš grafiko matome, kad, didėjant varžai  $R_T$ , didėja išėjimo triukšmo galios spektrinis tankis, kai dažnis  $f=500$  kHz. Toliau panagrinėsime, kaip nuo ultragarsinio keitiklio šuntuojančiojo rezistoriaus  $R_T$  skaitinės vertės keisis triukšmo koeficientas. Šio tipo analizėje pašalinami triukšmai, susiję su ultragarsinio keitiklio šiluminiais triukšmais. Iš (8) formulės gautą  $e_o^2$  padaliję iš ultragarsinio keitiklio šiluminių triukšmų dedamosios

$$e_{nkeit}^2 = K^2 \left| \frac{R_T}{R_T + Z_s} \right|^2 e_s^2, \quad (9)$$

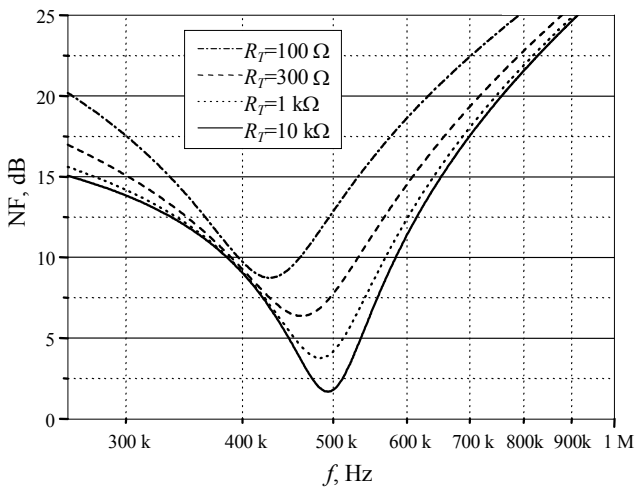
gausime triukšmo koeficiento matematinę išraišką:

$$NF = 10 \lg \left\{ 1 + \left| \frac{Z_s}{R_T} \right|^2 \frac{e_T^2}{e_s^2} + K^2 \left| \frac{R_T Z_s}{R_T} \right|^2 i_{n+}^2 + \frac{e_n^2 |R_T + Z_T|^2}{e_s^2 R_T^2} + (K-1)^2 \frac{e_1^2 |R_T + Z_s|^2}{e_s^2 R_T^2 K^2} + e_2^2 \frac{|R_T + Z_s|^2}{e_s^2 R_T^2 K^2} + R_2^2 i_{n-}^2 \frac{|R_T + Z_s|^2}{e_s^2 R_T^2 K^2} \right\}. \quad (10)$$

Skirtingo tipo operaciniams stiprintuvams, triukšmo koeficiento dažninė priklausomybė pateikta 7 pav. Matome, kad mažiausiu triukšmo koeficientu pasižymi operacinis stiprintuvas LMH6624. Jo triukšmo koeficientas, kai  $f=500$  kHz, siekia 1,9 dB. Iširsime šio operacinio stiprintuvo šuntuojančiosios varžos  $R_T$  įtaką triukšmų faktoriui. 8 pav. pateikti modeliavimo rezultatai skirtingoms  $R_T$  varžos skaitinėms vertėms.



7 pav. Skirtingų operacinių stiprintuvų triukšmo koeficiento dažninė priklausomybė, kai  $R_T=10\text{ k}\Omega$



8 pav. Operacinio stiprintuvo LMH6624 triukšmo koeficiento dažninė priklausomybė, esant įvairioms varžoms  $R_T$

Mažiausias triukšmo koeficientas gaunamas, kai  $R_T=10\text{ k}\Omega$ . Toliau didinant šuntuojančiosios varžos vertę  $R_T$ , triukšmo koeficiento mažėjimas nėra ryškus. Tai reiškia, kad ultragarsinį keitiklį šuntuojanči varža  $R_T$ , parenkama pagal (4) sąlygą, nėra optimali triukšmo atžvilgiu. Triukšmai stiprintuvo išėjime priklausys nuo naudojamo filtro dažninės amplitudės charakteristikos. Triukšmų vidutinė kvadratinė vertė randama integruojant triukšmo spektrinį tankį  $e_{not}$ , panaudojus filtro perdavimo charakteristiką  $A(f)$  kaip svorio funkcija:

$$E_{vkV} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} |A(f)|^2 e_{not}^2 df} . \quad (11)$$

Skaičiuojant triukšmus pagal (11) formulę, reikia naudoti ekvivalentinę triukšmų juostą, kuri sąlygojama sistemos polių skaičiaus. Didėjant sistemos polių skaičiui (nepriklausomų reaktyviųjų elementų skaičiui), ekvivalentinė triukšmų juosta artėja prie sistemos pralaidos dažnių juostos  $-3\text{ dB}$  lygyje pagal įtampą. Darbe panaudoti pirmos eilės filtrai, todėl ekvivalentinė triukšmų juosta praplatėja  $\pi/2$  kartų. Buvo teoriškai apskaičiuota pirmosios pakopos išėjime triukšmo vidutinė kvadratinė vertė ir

gauta, kad  $E_{vkV}=0,778\text{ mV}$ , esant optimaliai šuntuojančiajai varžai  $R_T=10\text{ k}\Omega$ , dažnių diapazone nuo 165 kHz iki 636 kHz.

## Išvados

1. Darbe pateiktas elektroakustinio trakto pirmosios pakopos triukšminis modelis ir gautos matematinės išraiškos triukšmo galios spektriniam tankiui ir triukšmų faktoriui apskaičiuoti.
2. Parodyta, kad nagrinėjamoju atveju mažiausiu triukšmo koeficientu pasižymi operacinis stiprintuvas LMH6624, kurio triukšmo koeficientas, kai  $f=500\text{ kHz}$ , siekia 1,9 dB.
3. Modeliavimo rezultatai parodė, kad minimalus triukšmo faktoriaus vertė gaunama naudojant operacinį stiprintuvą LMH6624, kai ultragarsinį keitiklį šuntuojanči varža  $R_T=10\text{ k}\Omega$ . Mažėjant  $R_T$  varžos skaitinei vertei, didėja triukšmo koeficientas.
4. Teoriškai apskaičiuota pirmosios pakopos išėjime triukšmo vidutinė kvadratinė vertė sudarė  $E_{vkV}=0,774\text{ mV}$  dažnių diapazone nuo 165 kHz iki 636 kHz. Skaičiavimuose buvo laikoma, kad ultragarsinį keitiklį šuntuojančios varžos skaitinė vertė lygi optimaliai  $R_T=10\text{ k}\Omega$ .

## Literatūra

1. **Hayward G.** Air coupled NDE. Constrain and solution for industrial implementation // Proc. IEEE Ultrason Symp. – 1997. – P. 663 – 673.
2. **Turo A., Salazar J., Chavez J. A., Kichou H. B., Gomez T. E., Montero de Espinoza F., Garcia – Hernandez M. J.** Ultra-low noise front-end electronics for air-coupled ultrasonic non-destructive evaluation // NDT&E International 36. – 2003. – P. 93 – 100.
3. **Mancini R.** OP amps for everyone. Advanced analog products. – Texas Instruments, 2002. – 10 chapter.
4. **Sherrity S., Wiedericky H.D., Mukherjee B.K. and Sayerzan M.** Accurate equivalent circuit for the unloaded piezoelectric vibrator in the thickness mode // J. Phys. D: Appl. Phys. **30** (1997) 2354–2363.
5. **Dumbrava V., Adomaitis K.** Ultragarsinių keitiklių suderinimo modeliavimas // Elektronika ir elektrotechnika. – 2002. – Nr.6(41). – P. 55 – 59.
6. **Dymling S.** Measurement of blood perfusion in tissue using Doppler ultrasound. Dep. of Electrical Measurements, Lund institute of Technology. Report 3/1985. – P. 1 – 115.
7. **Harding D., Sarkady A., Neustadt H., Westa R.** Measurement of driving – point impedance of ultrasonic transducers using a 16 bit microcomputer // Proceedings 14-th Symp. Nondestructive evaluation. – San-Antonio. – 1983. – P. 67 – 75.
8. **Yanez Y., Garcia – Hernandez M. J., Salazar J., Turo A., Chavez J.A.** Designing amplifiers with very low output noise for high impedance piezoelectric transducers // NDT&E International 38. – 2005. – P. 491 – 496.

Parengta spaudai 2005-12-05

**V. Dumbrava, L.Svilainis. Noise Model for Ultrasonics Transducer Preamplifier // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2006 – Nr.2(66). – P. 21 – 25.**

The noise model for first stages of ultrasonic system is developed. The aim is to obtain low noise factor for input stages, particularly for preamplifier. The air-coupled composite ultrasonic transducer is used as the signal source. The transducer impedance is measured experimentally and equivalent Butterworth-Van Dyke dual-circuit model generated. The last have been merged with the preamplifier noise model and equations for noise spectral density and noise factor calculation developed. Analysis has indicated that lowest noise factor (NF=1,9 dB) for transducer used is obtained for operational amplifier LMH6624 at frequency  $f=500$  kHz and input termination resistance  $R_T=10$  k $\Omega$ . Simulation results indicate increase of noise factor if input termination resistance  $R_T$  is reduced. III.8, bibl.8 (in Lithuanian; summaries in English, Russian and Lithuanian).

**В. Думбрава, Л. Свилайнис. Шумовая модель предусилителя ультразвукового преобразователя // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – No 2(66).-С. 21 – 25.**

В работе исследуются вопросы, связаны с шумами ультразвукового электроакустического тракта. Экспериментально измерены и приведены графики импеданса ультразвукового преобразователя из композитного материала, предназначенного для работы в воздухе. В работе приведена шумовая модель электроакустического тракта предусилителя, получены математические формулы для расчета спектральной мощности шума и коэффициента шума. Показано, что для анализируемого ультразвукового преобразователя наименьшим коэффициентом шума обладает операционный усилитель LMH6624, для которого коэффициент шума составляет NF=1,9 dB при частоте  $f=500$  kHz и шунтирующем резисторе ультразвукового преобразователя  $R_T=10$  k $\Omega$ . Показано, что при уменьшении номинала резистора  $R_T$  возрастает коэффициент шума. Ил.8, библи.8. (на литовском языке; рефераты на английском, русском и литовском яз.).

**V. Dumbrava, L. Svilainis. Ultragarsinio keitiklio pradinio stiprintuvo triukšminis modelis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2006 – Nr.2(66). – P. 21 – 25.**

Darbe nagrinėjami ir modeliuojami ultragarsinio elektroakustinio trakto pirmosios pakopos triukšmai. Pateiktos eksperimentiškai išmatuotos ir apskaičiuotos ultragarsinio keitiklio, pagaminto iš kompozicinės medžiagos, skirto darbui ore, vidinės pilnutinės varžos dažninės amplitudės charakteristikos. Sukurtas pirmosios pakopos su operaciniu stiprintuvu triukšminis modelis, gautos matematinės išraiškos triukšmo galios spektriniam tankiui ir triukšmų koeficientui skaičiuoti. Parodyta, kad mažiausiu triukšmo koeficientu pasižymi operacinis stiprintuvas LMH6624, kurio triukšmo koeficientas NF=1,9 dB, kai  $f=500$  kHz. Tuomet ultragarsinį keitiklį šuntuojančiosios optimalios varžos skaitinė vertė  $R_T=10$  k $\Omega$ . Parodyta, kad mažėjant šuntuojančiai varžai  $R_T$ , didėja triukšmo koeficiento skaitinė vertė. II.8, bibl.8. (lietuvių kalba; santraukos anglų, rusų ir lietuvių k.).