

Signalų technologijos T 121

TRIUKŠMŲ ELEKTRONINĖSE ULTRAGARSINĖSE SISTEMOSE TYRIMAS

Paulius Adomavičius

Kauno Technologijos Universitetas  
El. paštas: p.adomavicius@gmail.com

**Santrauka.** Pateikta ultragarsinio trakto struktūra, kuri sudaryta iš ultragarsinio keitiklio žadinamo aukštos įtampos impulsiniu generatoriumi, įtampos ribotuvo, operacinių stiprintuvų, žemojo dažnio filtro ir analoginio-skaitmeninio keitiklio. Ištirti elektroninės ultragarsinės sistemos elektroakustinio trakto triukšminiai modeliai. Pateiktos formulės ultragarsinės sistemos mazgų įnešamiems triukšmams įvertinti. Atlikta ultragarsinės sistemos trakto triukšminių modelių analizė. Gautos matematinės išraiškos triukšmų galios spektriniam tankiui ir triukšmų koeficientui įvertinti.

**Reikšminiai žodžiai:** ultragarsinės skaitmeninės sistemos, trakto triukšmai, triukšmų įvertinimas.

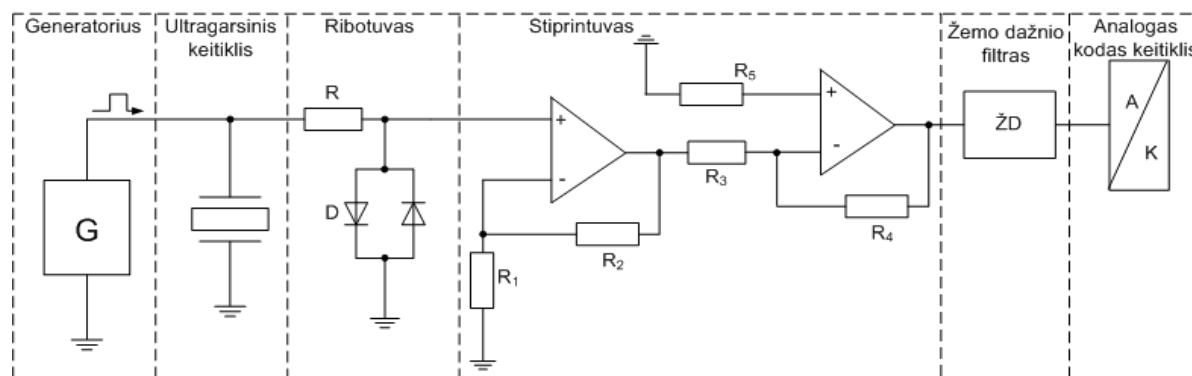
Įvadas

Ultragarsinės sistemos yra naudojamos kietųjų kūnų vidiniams defektams vizualizuoti. Praktikoje jos plačiai naudojamos medicinoje: nėštumo patologijai tirti, akmenims kepenyse skaldyti, bei įvairioms ligoms diagnozuoti ir uždegimams gydyti. Tobulėjant elektronikos įrenginiams plinta ultragarsinių sistemų panaudojimo sritys ir reikalaujama apdoroti vis silpnesnius signalus. Mažos galios signalų priėmimo bei apdorojimo metu ypač svarbus tikslumas ir triukšmų neįnešimas. Šio darbo tikslas – apžvelgti ultragarsinės sistemos elektroakustinio trakto mazgus ir įvertinti jų įnešamus triukšmus bei nustatyti suminį išėjimo triukšmą. Apskaičiavus suminius ultragarsinės sistemos trakto triukšmus, parinkti analoginio-skaitmeninio keitiklio skilčių skaičių ir diskretizacijos dažnį.

Apibendrintoji ultragarsinės sistemos struktūra

Apibendrintoji ultragarsinio trakto struktūra pateikta 1 pav. Iš impulsinio aukštos įtampos generatoriaus siun-

čiamas ultragarsinį keitiklį žadinantis impulsas. Atėjus impulsui sužadinas ultragarsinis keitiklis. Keitiklyje generuojama tiesioginė ultragarsinė banga, kuri patenka į tiriamąjį objektą. Atsispindėjusi nuo tiriamojo objekto defektų banga grįžta į veikiančią priėmimo režimu ultragarsinį keitiklį. Keitiklio išėjime gaunamas mažos amplitudės elektrinis signalas. Toliau šis signalas patenka į rezistoriaus  $R$  ir prieš priešai sujungtų diodų amplitudės ribotuvą. Ribotuvus neleidžia didelės amplitudės žadinimo impulsui patekti į tolimesnius elektroninės grandinės mazgus ir sutrikdyti jų darbo. Mažesnės už  $0,7\text{ V}$  amplitudės informaciniam signalui amplitudės ribotuvus įtakos nedaro ir toks signalas yra stiprinamas pagrindiniame trakto stiprintuve. Tolimesniuose skaičiavimuose priimta, kad suminis elektroakustinio trakto stiprinimo koeficientas  $K = 500$ . Žemojo dažnio filtras skirtas diskretizavimo paklaidoms sumažinti. Sustiprintas signalas patenka į analoginį-skaitmeninį keitiklį ir išėjime gautas skaitmeninis signalas naudojamas tolimesniam signalų apdorojimui bei rezultatų vizualizacijai.



1 pav. Ultragarsinio trakto struktūra

Fig. 1. Structure of ultrasound channel

## Ultragarsinio keitiklio ir ribotuvo įnešami triukšmai

Darbe (Adomavičius 2009) analizuota pjezoelektrinių keitiklių elektriniai modeliai bei jų techninės charakteristikos. Ultragarsinio keitiklio analizei buvo pritaikyti impedanso grandinės modeliai, kaip siūlė Butterworth ir Cady (Dumbrava *et al.* 2006).

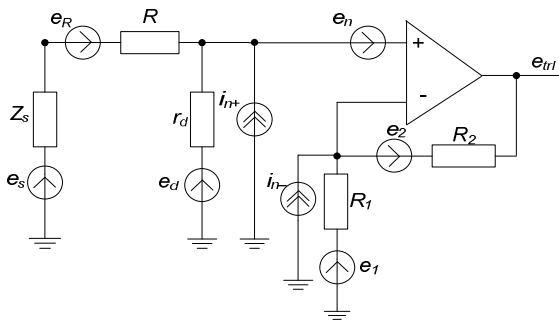
Tyrimui buvo parinkti trys ultragarsinio keitiklio modeliai: Van Dyke, Von Hippel ir patobulintas Van Dyke ultragarsinio keitiklio modelis (Coutard *et al.* 2008). Van Hippel grandinės modelis triukšmų įvertinimui nėra tinkamas, nes jis nevertina ultragarsinio keitiklio nuostolių varžos  $R_1$  varžos. Van Dyke pjezoelektrinio keitiklio modelis dažnai naudojamas, kaip pjezoelektrinio vibratoriaus ekvivalentiška grandinė ir rekomenduojama IEEE standartu (Sherrity *et al.* 1997).

Ultragarsinių keitiklių ir ribotuvų sukeliams triukšmams skaičiuoti buvo sudarytas matematinis modelis. Modeliuojant nustatyta, kad patobulintas Van Dyke modelio keitiklis sukels mažesnius triukšmus, kai dažnis  $f < 3$  MHz, o Van Dyke modelio keitiklis – kai  $f > 3$  MHz. Van Dyke modelio keitiklio sukeliamų triukšmų spektrinis tankis  $e_s / \sqrt{B}$  didėjant dažniui mažėja ir artėja prie  $10^{-13} \text{ V} / \sqrt{\text{Hz}}$  (Adomavičius 2009).

## Pirmosios pakopos operacinio stiprintuvo triukšmai

Trakto stiprinimas yra išskirstytas tarp dviejų pakopų: pradinio stiprintuvo ir antrojo stiprintuvo. Bendrojo trakto stiprinimo koeficiento paskirstymo kriterijai buvo nagrinėti autoriaus straipsnyje (Adomavičius 2009).

Ultragarsinio keitiklio, amplitudės ribotuvo ir pirmosios pakopos (pradinio stiprintuvo) triukšminis modelis pavaizduotas 2 pav.



2 pav. Elektroakustinio trakto triukšminis modelis

Fig. 2. Electroacoustic channel noise model

Ultragarsinio keitiklio šiluminiai triukšmai aprašyti  $e_s$  įtampos šaltiniu turinčiu  $Z_s$  vidaus kompleksinę varžą. Ribotuvo diodų šiluminis triukšmas aprašytas įtampos šaltiniu  $e_d$  turinčiu  $r_d$  vidaus varžą, o varžos  $R$  sukeliama

šiluminiai triukšmai aprašyti įtampos šaltiniu  $e_R$ . Operacinio stiprintuvo triukšmai yra aprašyti srovės  $i_{n+}$  ir  $i_{n-}$  srovės šaltiniais ir įtampos  $e_n$  šaltinių modeliais. Iš 2 pav. matyti, kad gavome sudėtingą ekvivalentinę schemą.

Triukšmų įtampos ir srovės šaltiniai yra sujungti lygiagrečiai. Įvertinę lygiagrečiai sujungtus triukšmo šaltinius galime parašyti operacinio stiprintuvo pirmosios pakopos išėjime spektrinio tankio triukšmo galios išraišką:

$$e_{rl}^2 = K_1^2 \left| \frac{r_d}{Z_s + R + r_d} \right|^2 (e_s + e_R)^2 + K_1^2 \left| \frac{(Z_s + R)}{Z_s + R + r_d} \right|^2 e_d^2 + K_1^2 \left| \frac{(Z_s + R)r_d}{Z_s + R + r_d} \right|^2 i_{n+}^2 + K_1^2 e_n^2 + (K_1 - 1)^2 e_1^2 + R_2^2 i_{n-}^2 + e_2^2, \quad (1)$$

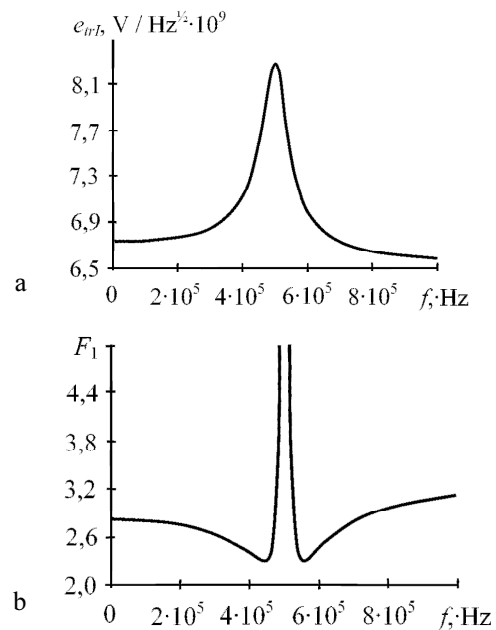
čia  $K_1$  – pirmosios pakopos operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficientas  $K_1 = 5$ .

Pirmojoje pakopoje buvo panaudotas LMH6624 operacinis stiprintuvas apibūdinamas  $e_n = 0,92 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ ,  $i_{n-} = i_{n+} = 2,3 \text{ pA} / \sqrt{\text{Hz}}$ .

Įvertinę savuosius ir išorinius triukšmus, remiantis (1) formule, sumodeliuojame pirmosios pakopos operacinio stiprintuvo triukšmų galios spektrinį tankį, kurio grafikas pateiktas 3 pav. a dalyje.

Triukšmo koeficientas  $F$  išreiškiamas santykiu:

$$F = \frac{\text{triukšmai} \cdot \text{realaus} \cdot \text{irenginio} \cdot \text{išejime}}{\text{triukšmai} \cdot \text{idealaus} \cdot \text{irenginio} \cdot \text{išejime}}$$



3 pav. Pirmosios pakopos triukšmų galios spektrinis tankis (a) ir triukšmo koeficiento dažninė priklausomybė (b)

Fig. 3. Spectral density of noise power (a) and noise coefficient's frequency dependency for the first section

Pirmosios pakopos triukšmo koeficientas  $F_1$  randamas (1) padalijus iš  $K_1^2 |r_d / Z_s + R + r_d|^2 (e_s + e_R)^2$ :

$$F_1 = \left\{ 1 + \left| \frac{Z_s + R}{r_d} \right|^2 \cdot \left( \frac{e_d}{e_s + e_R} \right)^2 + \left| Z_s + R \right|^2 \cdot \left( \frac{i_{n+}}{e_s + e_R} \right)^2 + \left| \frac{Z_s + R + r_d}{r_d} \right|^2 \cdot \left( \frac{e_n}{e_s + e_R} \right)^2 + \left( \frac{K_1 - 1}{K_1} \right)^2 \cdot \left| \frac{Z_s + R + r_d}{r_d} \right|^2 \cdot \left( \frac{e_1}{e_s + e_R} \right)^2 + \left( \frac{1}{K_1} \right)^2 \cdot \left| \frac{R_2 (Z_s + R + r_d)}{r_d} \right|^2 \cdot \left( \frac{i_{n-}}{e_s + e_R} \right)^2 + \frac{1}{K_1^2} \cdot \left| \frac{Z_s + R + r_d}{r_d} \right|^2 \cdot \left( \frac{e_2}{e_s + e_R} \right)^2 \right\}. \quad (2)$$

3 pav. b dalyje pateikta pirmosios pakopos triukšmo koeficiento priklausomybė nuo dažnio. Matyti, kad triukšmų koeficientas padidėja esant keitklio lygiagrečiam rezonansui. Vidutiniškai triukšmai padidėja apie 2,9 karto.

#### Antrosios pakopos triukšmai

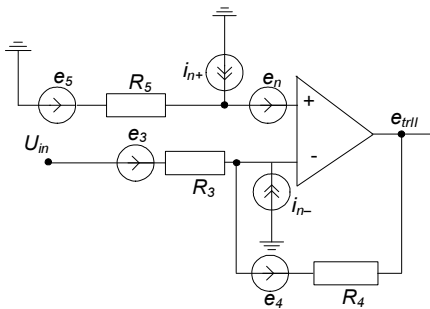
Antrosios pakopos operacinio stiprintuvo triukšminis modelis pateiktas 4 pav. (Texas Instruments 1999).

Antrosios pakopos neinvertuojančio operacinio stiprintuvo LMH6624 triukšmų galios spektrinis tankis išėjime neįvertinus pirmosios pakopos įnešamų triukšmų, kai  $K_2 = 100$ :

$$e_{trII}^2 = K_2^2 e_n^2 + K_2^2 i_{n+}^2 R_5^2 + K_2^2 e_3^2 + (K_2 - 1)^2 e_3^2 + i_{n-}^2 R_4^2 + e_4^2. \quad (3)$$

Bendrasis trakto triukšmų galios spektrinis tankis surandamas:

$$e_{tr}^2 = e_{trI}^2 (K_2 - 1)^2 + e_{trII}^2. \quad (4)$$



4 pav. Antrosios pakopos triukšminis modelis

Fig. 4. Noise model of second section

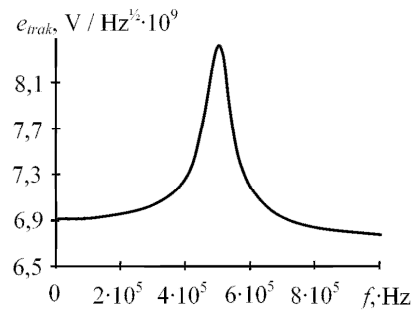
Tuomet suminių trakto triukšmų spektrinis tankis apskaičiuojamas:

$$e_{tr}^2 = (K_2 - 1)^2 e_{trI}^2 + K_2^2 e_n^2 + K_2^2 i_{n+}^2 R_5^2 + i_{n-}^2 R_4^2 + K_2^2 e_3^2 + (K_2 - 1)^2 e_3^2 + e_4^2. \quad (5)$$

Antrosios pakopos triukšmo koeficientas randamas triukšmo galios išraišką (5) padaliję iš  $(K_2 - 1)^2 e_{trI}^2$ :

$$F_2 = \left\{ 1 + \left( \frac{K_2}{K_2 - 1} \right)^2 \left( \frac{e_n}{e_{trI}} \right)^2 + \left( \frac{K_2}{K_2 - 1} \right)^2 R_5^2 \left( \frac{i_{n+}}{e_{trI}} \right)^2 + \left( \frac{1}{K_2 - 1} \right)^2 R_4^2 \left( \frac{i_{n-}}{e_{trI}} \right)^2 + \left( \frac{K_2}{K_2 - 1} \right)^2 \left( \frac{e_3}{e_{trI}} \right)^2 + \left( \frac{e_3}{e_{trI}} \right)^2 + \left( \frac{1}{K_2 - 1} \right)^2 \left( \frac{e_4}{e_{trI}} \right)^2 \right\}. \quad (6)$$

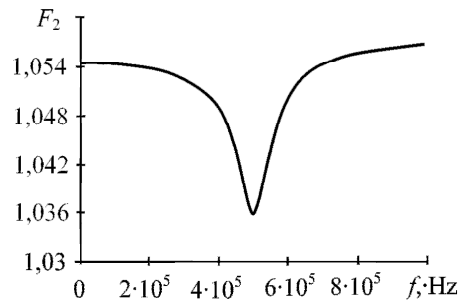
Suminis viso elektroakustinio trakto triukšmų galios spektrinis tankis pavaizduotas 5 pav.



5 pav. Suminis trakto triukšmų galios spektrinis tankis

Fig. 5. Overall spectral density of noise power

Antrosios pakopos triukšmų koeficiento  $F_2$  priklausomybė nuo dažnio pateikta 6 pav.



6 pav. Antrosios pakopos triukšmų koeficiento priklausomybė nuo dažnio

Fig. 6. Second section noise coefficient's frequency dependency

Vadovaudamiesi paskutiniųjų metų tyrimo rezultatais (Coutard *et al.* 2008; Dumbrava *et al.* 2006; Adomavičius 2009), nustatėme parametrų vertes  $p_i$ . Jos surašytos

**Lentelė.** Elektroakustinio trakto modelių parametrai

**Table.** Electroacoustic channel model parameters

Modelis	$p_i$	$R_1, \Omega$	$R_2, \Omega$	$R_3, \Omega$	$R_4, \Omega$	$K_1$	$K_2$	$K$	$Q, 10^{-7} V^2/Hz$
Pirminis		47	188	47	4700	5	100	500	5,87
Optimalus		22	88	47	4700	5	100	500	5,03
Kiti		40	360	40	200	10	50	500	5,62
		22	2178	47	235	100	5	500	587
		22	22	22	5500	2	250	500	5,77
		55	220	40	4000	5	100	500	6,18
Pastovūs parametrai		$e_s = f(Z_s)$ $e_1 = f(R_1)$ $e_2 = f(R_2)$		$e_d = f(r_d)$ $i_n = 2,3 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ $e_n = 0,92 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$		$R_5 = 47 \Omega$ $r_d = 100 \Omega$ $R = 50 \Omega$			

lentelėje. To pasėkoje gavome elektroakustinio trakto modelį, kuris išreiškiamas (6) matematine išraiška ir lentelėje duotais parametrais  $p_i$ . Šis elektroakustinio trakto modelis yra neoptimalus, nes triukšmai nėra minimalūs.

Atlikę elektroakustinio trakto komponentų tyrimą ir jų analizę nustatėme trakto parametrus  $p_i \rightarrow R_i, e_i^2, K_i$  šie parametrai pateikti lentelėje.

### Elektroakustinio trakto modeliavimas minimizuojant triukšmus

Elektroakustiniam traktui keliami reikalavimai:

- Jis turi būti funkcionalus.
- Turi garantuoti reikalaujamą signalo stiprinimo lygį.
- Sukeliami triukšmai turi būti minimalūs.

Modeliavimo tikslas – suprojektuoti elektroakustinį traktą su optimaliais parametrais ir minimizuota triukšmo funkcija.

Triukšmo funkcijos  $e_{tr}^2 = \psi(f)$  minimizavimas suprantamas kaip suradimas  $e_{tr}^2$  mažiausių verčių. Tai yra suradimas naujos triukšmo funkcijos  $\psi_I(f)$ .

Operacinio stiprintuvo išėjime triukšmas yra dažnio  $f$  ir parametru  $p_i$  funkcija, tai yra  $R_i, e_i^2$  ir  $K_i$  funkcija:

$$e_{tr}^2 = \psi(f, p_i). \quad (7)$$

Minimizavimą modeliavimo metu galima atlikti ieškant mažiausios integralo

$$\int_{f_p}^{f_g} \psi(f, p_i) df \quad (8)$$

vertės ir taip surandant optimalius triukšmo funkcijos parametrus  $p_{iop}$ .

To pasėkoje gaunama nauja triukšmo funkcija  $e_{trN}^2$  priklausanti nuo parametru  $p_i$  ir turinti optimalias jų vertes:

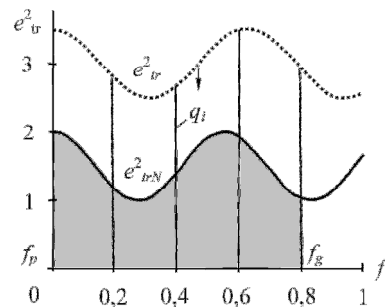
$$e_{trN}^2 = \psi_I(f, p_{iop}) \quad (9)$$

Modeliuojant elektroakustinį traktą garantuojanti minimalų išėjimo triukšmą reikia integruoti triukšmo funkciją

$$\int_{f_p}^{f_g} \psi(f, p_i) df = Q\psi_I(f, p_i) \quad (10)$$

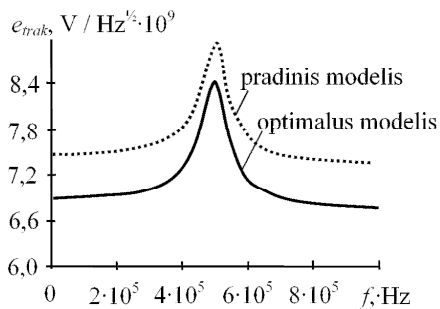
ir rasti jos minimumą  $\min Q\psi_I(f, p_i)$ . Šio optimizavimo proceso (geometrinė interpretacija 7 pav.) matematinė išraiška tokia:

$$\begin{aligned} \min Q\psi_I(f, p_i) &= \lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n q_i \\ &= \lim_{i \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \psi(f, p_i) \Delta f \\ &= \min \int_{f_p}^{f_g} \psi(f, p_i) df. \end{aligned} \quad (11)$$



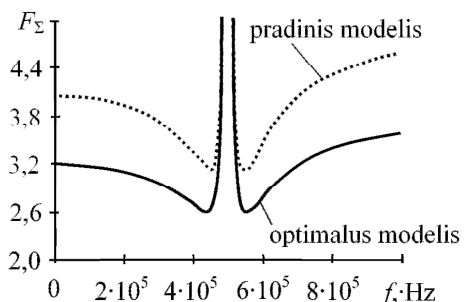
**7 pav.** Modeliavimo geometrinė interpretacija

**Fig. 7.** Geometrical interpretation of modelling



8 pav. Suminių trakto triukšmų spektrinis tankis

Fig. 8. Total spectral density of noise power



9 pav. Triukšmų koeficiento minimizavimas

Fig. 9. Minimization of noise coefficient

Buvo sudaryta programa įgyvendinanti išvardintus elektroakustinio trakto modeliavimui principus ir atliktas modeliavimas. Gautas elektroakustinio trakto modelis, kuris išreikštas (6) formule ir lentelės parametrais. Gauti tyrimo rezultatai pavaizduoti 8 ir 9 pav. Juose pateikta pirminio ir minimizuoto modelio grafikai.

Iš 8 pav. ir lentelės matyti, kad optimizavus pirminę ultragarsinę sistemą, esant trakto stiprinimo koeficientams  $K_1 = 5$  ir  $K_2 = 100$ , gaunami mažesni ultragarsinio trakto triukšmai.

### Išvados

1. Pateikti ultragarsinės sistemos atskirų trakto mazgų triukšminiai modeliai ir sudarytas elektroakustinio trakto triukšminis modelis.

2. Pateiktos matematinės išraiškos triukšmų galios spektriniam tankiui ir triukšmų koeficientui skaičiuoti.

3. Nustatyti ultragarsinės sistemos trakto optimalūs parametrai, garantuojantys minimalius triukšmus.

4. Optimizavimus ultragarsinį traktą triukšmų vertė sumažinta apie 20 % .

### Padėkos

Dėkoju doc. dr. Vytautui Dumbravai už pagalbą rengiant straipsnį.

### Literatūra

- Adomavičius, P. 2009. Ultragarsinio trakto triukšminių modelių tyrimas, in *Telekomunikacijos ir elektronika*, Kaunas: Technologija, 33–34.
- Coutard, F.; Tisserand, E.; Schweitzer, P. 2008. Optimal design of an ultrasonic low-noise chain of reception, *Sensors and Actuators A* 143: 265–271.
- Dumbrava, V.; Svilainis, L. 2006. Ultragarsinio keitiklio pradinio stiprintuvo triukšminis modelis, *Elektronika ir elektrotechnika* 2(66): 21 – 25.
- Dumbrava, V. 2002. *Signalai ir sistemos* 1 dalis. Kaunas: Technologija. 261 p.
- Texas Instruments. 1999. Noise analysis in operational amplifier circuit. *Application Report SLVA043A. Digital signal processing solutions*.
- Sherrity, S.; Wiedericky, H. D.; Mukherjee, B. K.; Sayer, M. 1997. An accurate equivalent circuit for the unloaded piezoelectric vibrator in the thickness mode, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30: 2354–2363. doi:10.1088/0022-3727/30/16/014

### INVESTIGATION OF NOISE IN ELECTRONIC ULTRASONIC SYSTEMS

P. Adomavičius

Abstract

Noise models in ultrasonic control system have been investigated. Ultrasonic system channel consist of exciting generator, ultrasonic transducer, amplitude limiter, amplifier, low band filter and A/D converter. The ultrasonic transducers have been described as Von Hippel model, Van Dyke model or improved Van Dyke model. Advantages and disadvantages of these models are discussed in this paper. Noise models of amplitude limiter and linear operational amplifier are presented. The summary results of calculated noise spectral density of ultrasonic system channel have been presented.

**Keywords:** ultrasonic digital systems, channel noises, noise assessment.