

## Signalų technologijos T 121

## SAK IŠĖJIMO SIGNALŲ PRADINIS SKAITMENINIS FILTRAVIMAS

Tomas Ustinavičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
El. paštas: tomas.ustinavicius@gmail.com

**Santrauka.** Parodyta, kad sudarytame skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK) tiriamųjų signalų skaitmeninio apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės nustatymo algoritme didžiausią įtaką nustatymo nuokrypoms turi stroboskopinio keitiklio žemųjų dažnių savieji triukšmai. Pasiūlyta tiriamąjį skaitmeninį signalą filtruoti ir iš  $n$  tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų realizacijų sudaryti pseudoperiodinį signalą, kuriame atskirti tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų spektrai. Nustatyta, kad standartiniai žemųjų dažnių filtrai, dėl labai aukštų tiriamojo signalo perdavimo kokybei keliamų reikalavimų, yra netinkami. Pasiūlyta skaitmeninio keterinio filtro struktūra. Tyrimais nustatyta, kad toks filtras efektyviai gali slopinti įvairių signalų, praėjusių nustatymo grandines, savuosius triukšmus.

**Reikšminiai žodžiai:** SAK dinaminų parametrų nustatymas,  $1/f$  triukšmas, baltasis triukšmas, skaitmeninis keterinis filtras.

## Įvadas

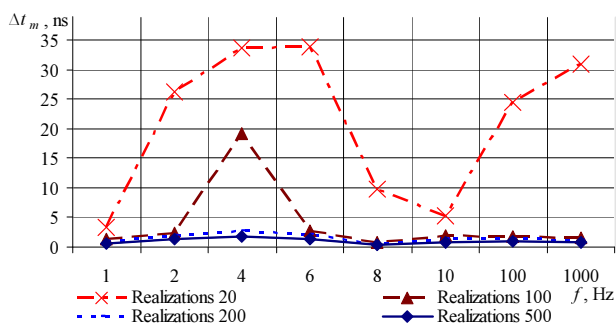
Dabartinėje technikoje dažnai naudojami ir kuriami nauji spartūs skaitmeniniai-analoginiai (SAK) ir analoginiai-skaitmeniniai keitikliai (ASK). Vienas svarbiausių parametrų apibūdinančių jų spartą yra išėjimo signalo nusistovėjimo trukmė. Sparčiųjų SAK dinaminų parametrų ir jų nusistovėjimo trukmių nustatymas yra sudėtingas uždavinys (Marcinkevičius *et al.* 2004; Barzdenas *et al.* 2006; Williams *et al.* 1998; Balestrieri *et al.* 2006; Kvedaras *et al.* 2003; Kvedaras *et al.* 2008). Sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių nustatymui naudotini specialūs stroboskopiniai pikinio detektavimo testeriai turintys mažus savuosius triukšmus. Daugelio skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių nustatymui reikia naudoti skaitmeninius SAK tiriamųjų signalų apdorojimą ir nusistovėjimo trukmės nustatymą (Kvedaras *et al.* 2003; Kvedaras *et al.* 2008). Vykdyti eksperimentiniai sukurto SAK tiriamųjų signalų skaitmeninio apdorojimo algoritmo tyrimai parodė, kad šitokiu būdu galima nustatyti iki 14 skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes. Tačiau jis turi trūkumų: tenka apdoroti daug tiriamųjų signalų (iki 500 ir daugiau); didėjant tiriamųjų SAK skilčių skaičiui auga nustatymo nuokrypos, nors apdorojamų tiriamųjų signalų skaičius yra didelis. Darbo uždavinys yra ištirti nuokrypų šaltinius ir pasiūlyti tiriamųjų signalų pradinio skaitmeninio filtravimo metodą.

## Tiriamąjo SAK signalo apdorojimo algoritmo tyrimas

Darbe (Kvedaras *et al.* 2003) parodyta, kad viena iš svarbiausių nuokrypų generuoja keitiklio signalų kanalo

savieji triukšmai. Kaip parodyta (Kvedaras 2001) kompensacinių stroboskopinių keitiklių savuosius triukšmus apsprendžia operacinių stiprintuvų savieji triukšmai. Darbe (Application Notes 1996) parodyta, kad operacinių stiprintuvų savieji triukšmai – tai  $1/f$  ir baltojo triukšmų suma.

Atlikus sukurto SAK išėjimo signalo skaitmeninio apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės nustatymo algoritmo tyrimą, buvo nustatyta (Ustinavičius *et al.* 2008), jog vykdomas skaitmeninis tiriamojo signalo apdorojimas efektyviai slopina baltojo ir  $1/f$  triukšmus. Tyrimų metu, padidinus apdorojamų signalo realizacijų skaičių iki 500, nustatymo nuokrypa sumažėjo penkis kartus. Tačiau, esant vienodam apdorojamų realizacijų skaičiui, didžiausią įtaką nustatymo nuokrypoms turi  $1/f$  triukšmas. Šių triukšmų sukeltos nusistovėjimo trukmės nustatymo nuokrypos buvo 2 kartus didesnės nei baltojo triukšmo generuotos nuokrypos. Dėl šios priežasties buvo tiriama, kokio dažnio  $1/f$  triukšmas turi didžiausią įtaką nusistovėjimo trukmės nustatymo rezultatams. Tam buvo sudarytas skaitmeninis triukšmo signalų generavimo modulis. Jis leidžia generuoti atsitiktinės fazės sinuso dėsnio kintantį skaitmeninio signalo masyvą 0–1 000 Hz dažnio diapazone. Suminis tiriamojo SAK išėjimo signalo ir triukšmų skaitmeninis masyvas buvo apdorojamas sukurtuoju algoritmu. Tyrimai parodė, kad didžiausias nusistovėjimo trukmės nustatymo nuokrypas generuoja triukšmai, kurių dažnis yra tarp 0,1 ir 80 Hz (1 pav.). Matyti, kad vyraujančius stroboskopinio keitiklio išėjimo signale  $1/f$  tipo savuosius triukšmus sudarytas skaitmeninio apdorojimo algoritmas slopina nepakankamai efektyviai net didinant apdorojamų signalų skaičių.



**1 pav.** Nusistovėjimo trukmės nustatymo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo triukšmo dažnio  $f$ , kai apdorojama 20–500 signalo realizacijų (Ustinavičius *et al.* 2008)

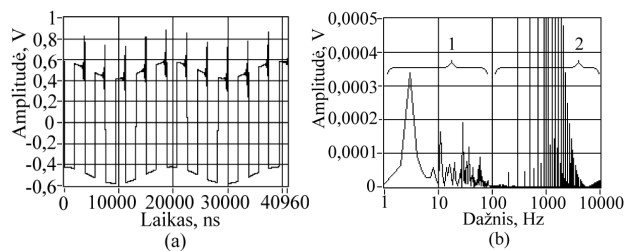
**Fig. 1.** Dependency of settling time error  $\Delta t_m$  on noise frequency  $f$  during 20–500 realizations (Ustinavičius *e al.* 2008)

Nustatyta, kad sukurto algoritmo lygių kompensavimo ir amplitudžių vienodinimo procedūros sėkmingai eliminuoja tiriamojo signalo dreifų įtaką nusistovėjimo trukmės nustatymo rezultatams. Algoritmo apdorojamų signalų vidurkinimo procedūra sėkmingai slopina aukštesnio dažnio (virš 100 Hz) savųjų triukšmų įtaką. Todėl buvo priimtas sprendimas, sudaryti pradinio filtravimo algoritmą slopinantį savuosius triukšmus 0–100 Hz diapazone.

### Pirminio filtravimo algoritmas

Sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių nustatyme sudaromi labai maža įtampos verte (šimtais ar mažiau  $\mu\text{V}$ ) besiskiriantys nuo tiriamojo signalo nusistovėjusių verčių atskaitos lygiai. Tuo būdu kuriamas filtras turi efektyviai eliminuoti savuosius triukšmus nurodytame diapazone, bet neturėti įtakos tiriamajam signalui. Dėl šios priežasties kuriamo filtro charakteristika filtro praleidžiamųjų dažnių ruože turi būti idealiai plokščia. Net ir nedideli tiriamojo signalo iškraipymai sukelia nepriimtinas nusistovėjimo trukmės nustatymo nuokrypas. Kai SAK tiriamojo signalo ir keitiklio savųjų triukšmų suma yra diskretizuojama ASK. Skaitmeninio signalo spektro dedamosios sutampa, todėl jų filtravimas sudėtingas.

Siūloma diskretizuoti  $n$  tiriamųjų SAK išėjimo signalus su jų savais triukšmais ir šiuos skaitmeninius masyvus įrašyti į kompiuterio atmintinę. Iš šių signalų realizacijų sudaryti pseudoperiodinio signalo skaitmeninį masyvą (2 pav. a). Tokio signalo masyvo spektro dedamosios bus sudarytos iš tiriamojo signalo spektro (2 pav., b dalies 2 spektras) ir, teisingai parinkus periodizavimo parametrus, skirtingai išdėstyto savųjų triukšmų spektro (2 pav., b dalies 1 spektras). Matyti, kad tiriamojo signalo ir vidinių triukšmų spektrai dalinai išsiskyrė, todėl triukšmus ir trukdžius galima filtruoti žemųjų dažnių filtrais.



**2 pav.** Pseudoperiodinio SAK išėjimo signalo ir savųjų triukšmų (a) skaitmeniniai signalai ir jų spektrai (b). 1 – triukšmo signalo spektras; 2 – tiriamojo signalo spektras

**Fig. 2.** DAC output signal of pseudo-periodic series with internal noises (a) and its spectrum (b). 1 – spectrum of internal noises; 2 – spectrum of a researched signal

Kaip buvo minėta, tiriamasis signalas filtravimo metu negali būti iškraipytas. Tokius reikalavimus turėtų tenkinti skaitmeninis Baterforto žemųjų dažnių filtras, kurio perdavimo charakteristika pralaidumo dažnių ruože yra pati plokščiausia.

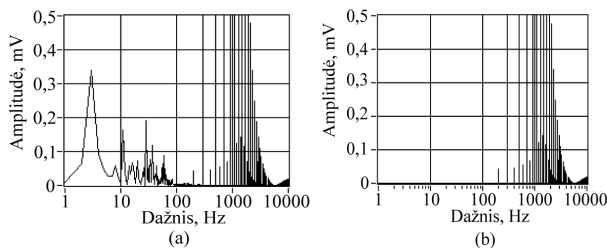
LabView® pakete buvo sudarytas signalo filtravimo algoritmas. Suminė tiriamojo signalo ir vidinių triukšmų skaitmeninių signalų pseudoperiodinė seka buvo siunčiama į Baterforto filtrą. Eksperimentai parodė, kad tiriamąjį signalą Baterforto filtras neleistinai iškraipo net parinkus filtro kritinį dažnį  $f_p$  lygų 1 Hz ir maksimalią LabView® paketo leidžiamą filtro eilę. Nusistovėjimo trukmės nustatyti negalima, nes signalo plokščiąją dalį Baterforto filtras neleistinai iškraipo. Buvo konstatuota, kad standartiniai filtrai yra netinkami pirminiam SAK tiriamojo signalo filtravimui.

Pasiūlyta skaitmeninio keturinio filtro struktūra (3 pav.) ir naudojant LabView® paketą, įgyvendintas skaitmeninis keturinis filtras. Sudarant filtrą, tiriamasis signalas greitosios Furjė transformacijos bloke  $F[\ ]$  yra keičiamas į jo spektrą. Spektrų atskyrimo bloke triukšmų spektro linijos diapazonuose (dažninėse juostose) 0–99, 101–199, 201–299 ir t. t. yra blokuojamos, o spektro linijos 100, 200, 300 ir pan., t. y. tiriamojo pseudoperiodinio signalo spektro dedamosios nėra blokuojamos. Taip



**3 pav.** Sukurto skaitmeninio keturinio filtro struktūrinė schema:  $S_{IN}$ ,  $S_{IS}$  – įėjimo ir išėjimo signalai;  $F[\ ]$ ,  $F^{-1}[\ ]$  – tiesioginės ir atvirkštinės Furjė transformacijos blokai, SA – spektrų atskyrimo blokas

**Fig. 3.** Structural diagram of designed digital comb filter:  $S_{IN}$ ,  $S_{IS}$  – input and output signals;  $F[\ ]$ ,  $F^{-1}[\ ]$  – blocks of direct and inverse Fourier transformation; SA – spectra separation block



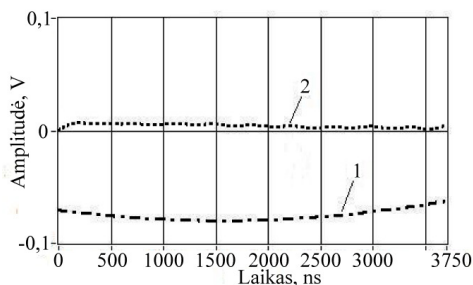
4 pav. Tiriomojo pseudoperiodinio skaitmeninio signalo spektras keterinio filtro įėjime (a) ir išėjime (b)

Fig. 4. Magnitude spectrums of pseudo-periodic test signal at the input (a) and output (b) of comb filter

triukšmų spektro dedamosios nesutampanti su signalo spektro dedamosiomis į filtro išėjimą nepatenka (4 pav.). Atvirkštinės Furje transformacijos bloke  $F^{-1}[\ ]$  atstatomas tiriomasis signalas, kurio savųjų triukšmų vidutinė kvadratinė įtampa yra labai sumažinta, o tiriomasis signalas – neiškraipytas. Reiktų pažymėti, jog triukšmo spektro dedamosios, kurios sutampa su signalo spektro dedamosiomis, filtras nefiltruoja. Dėl šios priežasties išlieka nedidelės signalo nuokrypos.

Filtro tyrimui buvo generuotas 100 periodų pseudo-periodinis tiriomojo signalo ir triukšmų masyvas. Triukšmai buvo imituojami  $f_{n1}$  dažnio sinusiniu signalu, kurio pradinei fazei kiekvienos tiriomojo signalo realizacijos pradžioje buvo suteikiama atsitiktinė vertė  $0-360^\circ$  diapazone vienodos tikimybės dėsnium. Triukšmų spektrą kiekvienos realizacijos metu sudaro atsitiktinės harmonikos, kurių didžioji dalis yra išsidėsčiusi dažnių ruože iki 100 Hz. 5 pav. parodyta nefiltruoto (1 kreivė) ir filtruoto (2 kreivė) tiriomojo signalo skaitmeninių masyvų akimirkinių verčių nuokrypos. Matyti, kad po filtravimo sukurtame skaitmeniniame keteriniame filtre signalo akimirkinių verčių nuokrypa gaunama daug mažesnė.

Reikia konstatuoti, kad sukurtas filtras efektyviai filtruoja ne tik žemųjų dažnių triukšmus, bet ir vidutinių bei aukštųjų dažnių triukšmus, kurių harmonikos nesutampa su tiriomųjų signalų harmonikomis.



5 pav. Tiriomojo signalo skaitmeninio masyvo akimirkinių verčių nuokrypos: 1 – filtro įėjime; 2 – filtro išėjime

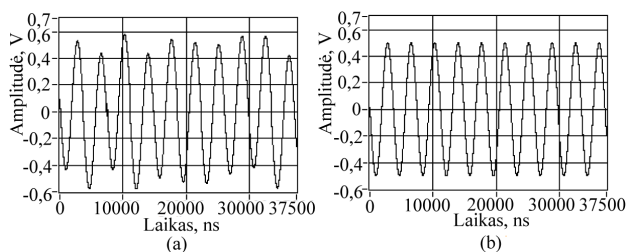
Fig. 5. Errors of instantaneous values of test signal digital array: 1 – error at filter input; 2 – error at filter output

## Kitų tipų signalų filtravimas

Tyrimams buvo sudaryti pseudoperiodiniai sinuso, trikampio ir pjūklo formos skaitmeninių signalų masyvai. Šių signalų  $n$  realizacijų skaitmeniniai masyvai buvo sudaromi su triukšmo signalų skaitmeniniais masyvais, periodizuojami ir perduodami į skaitmeninį keterinį filtrą. Sudarytas šiems signalams keterinis filtras buvo tiriamas analogiškai kaip ir SAK tiriomajam signalui.

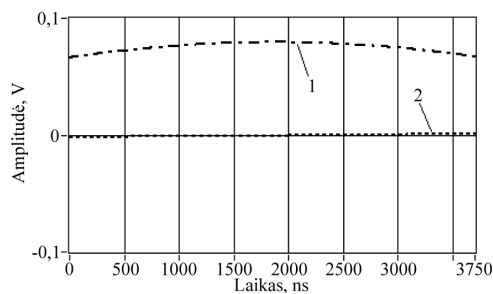
Pirmasis tiriomasis signalas buvo sinusoidė, kuriai buvo sudarytas ir patikrintas sukurtas skaitmeninio keterinio filtro veikimas LabView paketu. Sudarytas 100 periodų tiriomojo signalo ir triukšmų skaitmeninis masyvas (6 pav.) greitosios Furje transformacijos bloke keičiamas į spektrą. Spektrų linijos buvo filtruojamos diapazonuose (dažninėse juostose)  $0-99, 101-199, \dots$  Hz. Taip triukšmų spektro dedamosios nesutampanti su signalo spektro dedamosiomis (100, 200,  $\dots$  Hz) buvo panaikintos. Atlikus atvirkštinę Furje transformaciją gautas atstatytas išėjimo signalas, kuriame atsitiktinių triukšmų spektro dedamosios yra filtruotos, o tiriomasis signalas – neiškraipytas.

7 pav. parodyta nefiltruoto tiriomojo sinusinio (1 kreivė) ir filtruoto sinusinio (2 kreivė) signalų skaitmeninių masyvų nuokrypos. Matyti, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras neiškraipė tiriomojo sinusinio signalo (6 pav., b), o signalo nuokrypos labai sumažėjo.



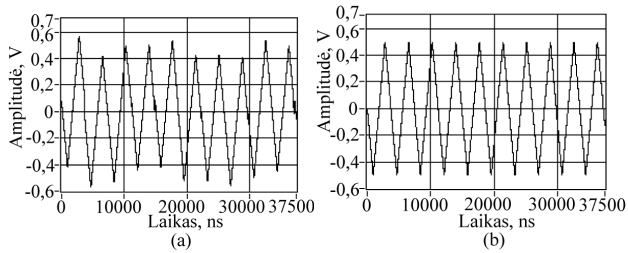
6 pav. Pseudoperiodinis sinusinis su savųjų žemųjų dažnių triukšmu signalas (a), skaitmeninio filtro išėjimo signalas (b)

Fig. 6. The pseudo-periodic sine wave signal with low-frequency internal noises (a) and comb filter output signal (b)



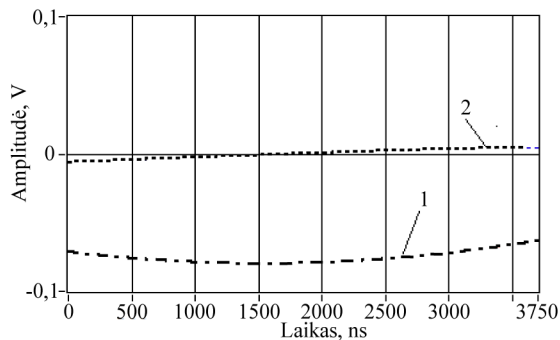
7 pav. Sinusinio signalo skaitmeninio masyvo akimirkinių verčių nuokrypos: 1 – filtro įėjime; 2 – filtro išėjime

Fig. 7. Errors of instantaneous values of sine wave signal digital array: 1 – error at filter input; 2 – error at filter output



**8 pav.** Pseudoperiodinio trikampio formos signalo ir savųjų žemųjų dažnių triukšmo skaitmeniniai signalai skaitmeninio filtro įėjime (a) ir išėjime (b)

**Fig. 8.** Graphic representations of the triangle wave realization of internal signal with low-frequency internal noises (a) and output signal after comb filter (b)



**9 pav.** Trikampio signalo skaitmeninio masyvo akimirkinių verčių nuokrypos: 1 – signalo filtro įėjime; 2 – signalo filtro išėjime

**Fig. 9.** Errors of instantaneous values of triangle signal digital array: 1 – error of filter input signal; 2 – error of filter output signal

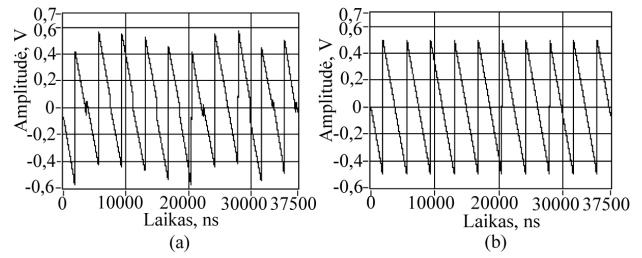
Kitas tiriamasis signalas buvo trikampės formos, kuris kaip ir ankstesnieji buvo sudarytas iš 100 periodų. Šio signalo pavyzdžiai keterinio filtro įėjime ir išėjime pateikti 8 pav.

9 pav. pateikti trikampio formos signalo tyrimo rezultatai: nefiltruoto tiriamojo trikampio signalo skaitmeninio masyvo (1 kreivė) ir filtruoto trikampio signalo skaitmeninio masyvo (2 kreivė) akimirkinių verčių nuokrypos.

Iš gautų rezultatų matyti, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras, kaip ir prieš tai tirtų signalų, neiškraipė tiriamojo trikampio signalo, o signalo nuokrypos po filtravimo iš esmės sumažėjo.

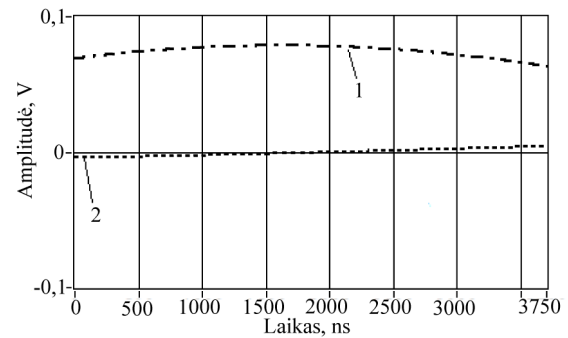
Buvo tirtas pjūklo formos signalas, kuris kaip ir prieš tai minėti signalai buvo sudarytas iš 100 periodų. 10 pav. pateikti šio signalo pavyzdžiai keterinio filtro įėjime ir išėjime.

11 pav. pateikta pjūklo formos signalo tyrimo rezultatai: nefiltruoto tiriamojo pjūklo formos signalo (1 kreivė) skaitmeninio masyvo ir filtruoto pjūklo formos signalo skaitmeninio masyvo (2 kreivė) nuokrypos.



**10 pav.** Pseudoperiodinio pjūklo formos signalo ir savųjų žemųjų dažnių triukšmo skaitmeniniai signalai skaitmeninio filtro įėjime (a) ir išėjime (b)

**Fig. 10.** Graphic representations of the saw-tooth wave realization of output signal with low-frequency internal noises (a) and output signal array after comb filter (b)



**11 pav.** Pjūklo formos signalo skaitmeninio masyvo akimirkinių verčių nuokrypos: 1 – signalo filtro įėjime; 2 – signalo filtro išėjime

**Fig. 11.** Errors of instantaneous values of saw-tooth signal digital array: 1 – error of filter input signal; 2 – error of filter output signal

Iš gautų rezultatų matyti, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras neiškraipė ir pjūklo formos signalo, o signalo nuokrypos po filtravimo iš esmės sumažėjo.

Tyrimai patvirtino, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras pašalina triukšmų spektro dedamąsias nesutampancias su tiriamojo signalo harmonikomis, tačiau triukšmo spektro dedamųjų, kurios sutampa su signalo spektro dedamosiomis – nefiltruoja.

Atlikus tyrimus matyti, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras neiškraipė tiriamųjų signalų, o savųjų triukšmų generuotos akimirkinės tiriamųjų signalų nuokrypos sumažėjo vidutiniškai 8 kartus. Todėl šis filtras gali būti naudojamas ne tik tiriamųjų SAK išėjimo signalų, bet ir kitų tipų signalų, kuriems galima sudaryti pseudoperiodines sekas, triukšmų filtravimui.

## Išvados

1. Pasiūlyta iš  $n$  tiriamojo signalo realizacijų sudaryti pseudoperiodinę skaitmeninių tiriamųjų signalų ir savųjų triukšmų seką. Teisingai parinkus periodizavimo para-

metrus, galima gauti iš dalies skirtingus tiriamojo signalo (pseudoperiodinio) ir savųjų triukšmų (atsitiktinio proceso) spektrus.

2. Nustatyta, kad tiriamojo SAK signalo filtravimui standartiniai skaitmeniniai filtrai netinka, kadangi šio signalo iškraipymams keliami ypač griežti reikalavimai.

3. Sukurtas skaitmeninis keterinis filtras, kuris leidžia filtruoti savųjų triukšmų spektro dedamąsias nesutampančias su tiriamojo signalo harmonikomis ir neiškraipo tiriamojo signalo. Atliktas proceso tyrimas patvirtino, kad sukurtas filtras 8 kartus slopina savuosius triukšmus.

4. Tyrimais nustatyta, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras gali būti naudojamas ir kitokių signalų filtravimui, kai galima sudaryti tiriamųjų signalų realizacijų pseudoperiodines sekas ir atskirti signalų ir trukdžių spektrus.

## Literatūra

- Application Notes AN-519.1. 1996. Operational Amplifiers Noise Prediction (All Op Amps), *Intersil Corp.* 64 p.
- Balestrieri, E. 2006. Some critical notes on DAC time domain specifications, in *Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 24–27.
- Barzdenas, E.; Navickas, R. 2006. Two chips digital diagnostics systems for mammography and dentography, *Electronics and Electrical Engineering* 2(66): 36–40.
- Kvedaras, R.; Kvedaras, V. 2008. The measurements of dynamic parameters of high-speed multi-bit DACs, *Electronics and Electrical Engineering* 3(83): 11–14.
- Kvedaras, V.; Kvedaras, R. 2003. Tester for investigation of dynamic parameters of ICs, *Electronics and Electrical Engineering* 7(49): 35–39.
- Kvedaras, V. 2001. Investigation of internal noise of sampling heads with peak detecting, *Electronics and Electrical Engineering* 3(32): 53–58.
- Lai, E. 2005. *Practical Digital signal Processing for Engineers and Technicians*. Elsevier Press. 289 p.
- Marcinkevičius, A.; Jasonis, V. 2004. Analoginės informacijos keitiklių išrinkimo ir saugojimo schemos dinaminių charakteristikų skaičiavimas, *Elektronika ir elektrotechnika* 5(54): 23–26.
- Ustinavičius, T. 2008. Tiriamųjų SAK signalų skaitmeninis apdorojimas, iš *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika*, 74–83.
- Williams, J. 1998. Measuring 16-bit settling times: the art of timely accuracy, *EDN*, 159 p.

## DIGITAL PROCESSING OF INVESTIGATED DAC'S SIGNALS

T. Ustinavicius

Abstract

The article shows that in designed algorithm for determination of digital signal processing and settling time of DAC the greatest influence on the test has 1/f type internal noise of the sampling converter. It is offered to filter the preliminary digital signal and to construct pseudo-periodic sequence from  $n$  realization periods of examined signals and internal noise. It is shown, that standard digital filters because of very high the demands are not suitable. The structure of digital comb filter is proposed. Investigations have shown that the given filter can effectively be used for filtering of various signals.

**Keywords:** measurement of dynamic parameters of DAC, 1/f noise, white noise, digital comb filter.