

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas USTINAVIČIUS

# SPARČIŲJŲ SKAITMENINIŲ-ANALOGINIŲ KEITIKLIŲ NUSISTOVĖJIMO TRUKMIŲ TIKRINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Mokslinis vadovas**

Prof. dr. Vygaudas KVEDARAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

*<http://leidykla.vgtu.lt>*

VGTU leidyklos TECHNIKA 1829-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-749-0

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2010

© Tomas, Ustinavičius, 2010

*[tomas.ustinavicius@gmail.com](mailto:tomas.ustinavicius@gmail.com)*

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tomas USTINAVIČIUS

# TESTING OF SETTling TIMES OF FAST DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



Vilnius LEIDYKLA  
TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2010.

### **Scientific Supervisor**

Prof Dr Vygaudas KVEDARAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

# Reziümė

Disertacijoje nagrinėjami ir sprendžiami skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK) nusistovėjimo trukmių tikrinimo uždaviniai. Didesnio skilčių skaičiaus sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmės tyrimas yra sudėtingas dėl ypač mažų atskaitos lygių, dažniausia sudarančių pusę ar vieną mažiausią reikšminį skaičių (MRS). Didėjant tiriamojo SAK skilčių skaičiui, ši klaidos sritis mažėja, tai nulemia, kad tiriamąjį signalą tampa sudėtinga išskirti triukšmų fone.

Disertaciją sudaro reziumė lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, literatūros ir publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniamе skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje apžvelgiami SAK dinaminių parametrų metrologijos klausimai: ypač SAK nusistovėjimo trukmių apibrėžimų ir matavimų vienovės klausimai. Aptariami šiuo metu naudojami SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo metodai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir konkretizuojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikiami ir analizuojami nauji specializuotų stroboskopinių keitiklių grandynai. Sudaryta ir ištirta nauja specialiojo kodu valdomo stroboskopinio keitiklio struktūrinė schema, turinti platesnes funkcines galimybes, turinti mažesnę savųjų triukšmų lygį, paprastesnę grandyną, mažesnius savuosius triukšmus ir išėjime generuojanti tiriamųjų signalų skaitmeninį masyvą.

Trečiajame skyriuje tiriamas skaitmeninio signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmas. Tiriama signalo laiko ir amplitudės nestabilumą, signalo švytavimų slopimo dekremento, baltojo ir  $1/f$  triukšmų įtaka SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatams. Nustatyta, kad didžiausią įtaką nusistovėjimo trukmės nuokrypoms turi keitiklio savieji  $1/f$  tipo triukšmai.

Ketvirtajame skyriuje analizuojama, kad tiriamojo SAK išėjimo signalo skaitmenį filtravimą galima vykdyti tik jį periodizavus. Parodyta, kad standartiniai skaitmeniniai žemųjų dažnių filtrai neleistinai iškraipo SAK signalą. Pristatomas sukurtas naujas dažninis keterinis filtras, kuris efektyviai (iki 10 kartų) slopina keitiklio savuosius triukšmus. Aprašomi pasiūlyti tiriamojo signalo filtravimo keteriniu filtru ir jo vidurkinimo algoritmas ir programa slopinanti keitiklio savuosius triukšmus iki 60 kartų. Pateikiami nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatai naudojant sudarytą algoritmą.

Disertacijos tematika atspausdinti šeši moksliniai straipsniai: du – moksliniuose žurnaluose, įrašytuose į Thomson ISI Web of Science duomenų bazę, vienas – moksliniame žurnale, įrašytame į Copernicus duomenų bazę, trys – kituose leidiniuose.

# Abstract

This thesis analyzes and solves the objectives of digital-to-analog converters (DAC) settling time testing. Fast DAC settling time investigation of bigger number of bits is complicated because of especially small reference levels, usually comprising the least significant bit (LSB). Increasing the number of DAC bits, the error band is decreasing. This determines that it is difficult to distinguish the investigated signal in the noise background.

The dissertation consists of the abstracts in the Lithuanian and English languages, an introduction, four chapters, a summary of the results, the list of literature and publications on the topic of the thesis.

In the introduction there are analyzed the relevance of the problem, the aim and objectives of this thesis are formulated, the authors' reports and publications, the structure of the thesis are presented.

In the first chapter the issues of DAC dynamic parameters testing are overviewed, especially the issues of definition of DAC settling times and the unity of measurement. The current methods of DAC settling time testing are discussed. At the end of this chapter the conclusions are formulated and the tasks of the dissertation are specified.

In the second chapter new circuits of specialized sampling converter are analyzed. New structural circuit of sampling converter controlled by code with more extensive functionality, with lower level of internal noise, more simple circuit and generating code array of investigated digital signals in output are created and tested.

The third chapter investigates the algorithm of digital signal processing and settling time testing. It investigates the influence of output signal instabilities in time and amplitude on white and  $1/f$  noise on the results of DAC settling time testing. It was found out that a tester's internal noise of  $1/f$  type has the greatest impact on the settling time instabilities has.

The fourth chapter shows that the DAC output signal digital filtering can be carried out only by periodic signal. It is shown that the standard digital low frequency filters distorts DAC signal. A new frequency comb filter, which effectively (up to 10 times) inhibits converters internal noise are introduced. The proposed test signal filtering comb filter and an averaging algorithm and program inhibiting the converter's internal noises up to 60 times are presented. The results of settling time testing by using the created algorithm are given.

Six articles were published on the theme of this thesis: two articles were published in scientific journals of Thomson ISI Web of Science database, one article – in scientific journal of Copernicus database, three articles – in other publications.

---

# Žymėjimai

## Pagrindiniai simboliai

|              |                                                                                        |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$          | – nusistovėjimo trukmės atskaitos lygis mažiausio reikšminio skaičiaus (MRS) vertėmis; |
| $A_{sv}$     | – nusistovėjimo signalo švytavimų amplitudė;                                           |
| $F [ ]$      | – greitoji Fourier transformacija;                                                     |
| $f_0$        | – centrinis harmonikos dažnis;                                                         |
| $f_1$        | – bandomųjų impulsų dažnis;                                                            |
| $F^{-1} [ ]$ | – atgalinė Fourier transformacija;                                                     |
| $f_2$        | – kvarcinio generatoriaus dažnis;                                                      |
| $f_A$        | – aukščiausias keitiklio keičiamo (perduodamo) signalo dažnis;                         |
| $F_a$        | – aukštųjų dažnių filtro dažninė charakteristika;                                      |
| $f_{ASK}$    | – ASK taktavimo dažnis;                                                                |
| $f_{CO}$     | – kvarcinio generatoriaus generuojamų signalų dažnis;                                  |
| $f_C$        | – centrinis harmonikos dažnis;                                                         |
| $f_d$        | – signalo spektro žemiausia harmonika;                                                 |
| $f_{FIFO}$   | – FIFO atmintinės darbo sparta;                                                        |

|             |                                                                                                                                         |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $f_{NCO}$   | – kodu valdomo generatoriaus (NCO) dažnis;                                                                                              |
| $f_p$       | – filtro kritinis dažnis;                                                                                                               |
| $f_s$       | – pirmosios tiriamojo signalo spektro harmonikos dažnis;                                                                                |
| $f_S$       | – NCO generatoriaus išėjimo signalo dažnis;                                                                                             |
| $F_S$       | – skirtumas tarp tiriamojo signalo ir stroboskopinių impulsų dažnių;                                                                    |
| $f_{SPS}$   | – stroboskopinių impulsų dažnis;                                                                                                        |
| $f_D$       | – ASK diskretizavimo dažnis;                                                                                                            |
| $F_{Smaks}$ | – maksimalioji skirtuminio dažnio vertė;                                                                                                |
| $F_{Smin}$  | – minimali skirtuminio dažnio vertė;                                                                                                    |
| $F_t$       | – triukšmo spektro gaubiamoji;                                                                                                          |
| $f_T$       | – bandomųjų impulsų pasikartojimo dažnis;                                                                                               |
| $f_{tl}$    | – sinusinių signalų imituoto triukšmo dažnis;                                                                                           |
| $f_{TPS}$   | – bandomųjų impulsų dažnis;                                                                                                             |
| $F_Z$       | – žemųjų dažnių filtro dažninė charakteristika;                                                                                         |
| $g$         | – akimirkinių verčių atskaitų skaičius tenkantis $t_{min}$ ;                                                                            |
| $H(n)$      | – svorio funkcija;                                                                                                                      |
| $K$         | – Baterforto, Čebiševo aukštųjų dažnių filtro eilė;                                                                                     |
| $k_A$       | – atskaitos lygio koeficientas MRS vienetais;                                                                                           |
| $k_{at}$    | – atsargos koeficientas;                                                                                                                |
| $k_d$       | – generatoriaus vidinio dažnio daugintuvo dauginimo koeficientas;                                                                       |
| $k_f$       | – nustatytas NCO generatoriaus fazės kodas;                                                                                             |
| $k_k$       | – stroboskopinio keitiklio perdavimo koeficientas;                                                                                      |
| $k_m$       | – stroboskopinio maišiklio perdavimo koeficientas;                                                                                      |
| $k_{MRS}$   | – mažiausias reikšminio skaičiaus kodo vienetų skaičius, kai SAK turi $m$ skilčių, o ASK – $n$ kilčių;                                  |
| $k_p$       | – koeficientas, įvertinantis ASK analoginio kanalo baigtinės praleidžiamų dažnių juostos sukiamą SAK nusistovėjimo trukmės neapibrėžtį; |
| $k_{pr}$    | – nusistovėjimo trukmės tikrinimo pradžios momentą atitinkantis skaitiklio C2 dešimtainis kodas;                                        |
| $k_r$       | – dešimtainis generatoriaus NCO valdymo kodas;                                                                                          |
| $k_s$       | – stiprintuvo suminis stiprinimo koeficientas;                                                                                          |
| $l$         | – impulsų skaitiklio C2 pradinio nustatymo kodas;                                                                                       |
| $M$         | – diskretinių verčių skaičius signalo periode;                                                                                          |

|              |                                                                                                                      |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m_d$        | – signalo diskretinė vertė;                                                                                          |
| $M_s$        | – stroboskopinių impulsų skaičius, nustatytame vėlinime;                                                             |
| $n_{vid}^0$  | – nustatyta išjungto SAK įtampos vidurkinta kodo vertė;                                                              |
| $n_{vid}^1$  | – nustatyta įjungto SAK įtampos kodo vidurkinta vertė;                                                               |
| $n$          | – ASK skilčių skaičius;                                                                                              |
| $N_a$        | – atskaitos lygių kodas;                                                                                             |
| $n_{ats1-4}$ | – signalų atskaitos lygių kodai;                                                                                     |
| $N_d$        | – skaitmeninio masyvo diskrečių skaičius;                                                                            |
| $n_{FIFO}$   | – atmintinės informacinės talpa;                                                                                     |
| $n_g$        | – sinusinio signalo diskretinės vertės numeris;                                                                      |
| $n_f$        | – generatoriaus fazės nustatymo kodo skilčių skaičius;                                                               |
| $n_i$        | – sinusinio signalo periodų skaičius;                                                                                |
| $n_n$        | – generatoriaus dažnio valdymo žodžio skilčių skaičius;                                                              |
| $n_{svt}$    | – stroboskopinių impulsų, strobuojančių viename taške, skaičius;                                                     |
| $N_P$        | – diskretinių verčių kiekis tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu periode;                                       |
| $n_{p(10)}$  | – generatoriaus dažnio keitimo žingsnis;                                                                             |
| $N_s$        | – nustatytų skirtingų stroboskopinių impulsų vėlinimo trukmių skaičius;                                              |
| $n_s$        | – apdorojamų pseudo periodinių tiriamojo signalo sekų skaičius;                                                      |
| $n_v$        | – stroboskopinių impulsų skaičius viename taške;                                                                     |
| $n_z$        | – priimtas minimalus stroboskopinių impulsų skaičius tenkantis tiriamojo signalo frontui;                            |
| $P$          | – tikrinamų nusistovėjimo trukmių skaičius;                                                                          |
| $P$          | – ASK MRS, tenkantis SAK atskaitos lygiui, skaičius;                                                                 |
| $p_p$        | – nusistovėjimo trukmės tikrinimo pradžios momentą atitinkantis generatoriaus NCO fazės nustatymo dešimtainis kodas; |
| $p_T$        | – dažnio daliklio dalinimo koeficientas;                                                                             |
| $q$          | – laiko mastelio transformacijos koeficientas;                                                                       |
| $q_M$        | – maksimalus laiko mastelio transformacijos koeficientas;                                                            |
| $R$          | – tiriamojo signalo realizacijų skaičius;                                                                            |
| $R$          | – dešimtainis generatoriaus dažnio nustatymo kodas;                                                                  |
| $s$          | – dešimtainis fazės nustatymo kodas;                                                                                 |

|             |                                                                                             |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S$         | – tarpinės (buferinės) atmintinės talpa (žodžiais);                                         |
| $S(t)$      | – tiriamasis SAK signalas;                                                                  |
| $S_{IN}$    | – įėjimo signalas;                                                                          |
| $S_{IS}$    | – išėjimo signalas;                                                                         |
| $S_S$       | – SAK tiriamojo signalo statusas nusistovėjimo trukmės atskaitos pradžios zonoje;           |
| $S_{st}(t)$ | – stačiakampis impulsas (meandras);                                                         |
| $t_1$       | – automatiškai reguliuojamo stiprinimo stiprintuvo veikimo trukmė;                          |
| $t_2$       | – lygio nustatymo bloko veikimo trukmė;                                                     |
| $t_3$       | – tiriamojo signalo dalis, kurioje yra tikrinama nusistovėjusi vertė;                       |
| $t_A$       | – laiko trukmė tarp dviejų akimirkinių tiriamųjų signalų verčių kodų ASK išėjime;           |
| $t_c$       | – impulsų skaitikliu C2 nustatyto vėlinimo trukmė;                                          |
| $T_D$       | – vieno tiriamojo signalo periodo pakeistu laiko masteliu vienos diskretinės vertės trukmė; |
| $t_D$       | – vienos diskretinės vertės trukmė perskaičiuota į realų tiriamojo SAK laiką;               |
| $t_f$       | – SAK išėjimo impulso fronto trukmė;                                                        |
| $t_{fmin}$  | – tiriamųjų SAK išėjimo signalų minimali fronto vertė;                                      |
| $t_m$       | – nusistovėjimo trukmės tikrinimo trukmė;                                                   |
| $t_{m2}$    | – matavimo trukmė pasiūlytu keitikliu;                                                      |
| $t_{mat}$   | – vienos SAK išėjimo signalo nusistovėjimo trukmės tikrinimo trukmė;                        |
| $t_n$       | – tikrinama nusistovėjimo trukmė;                                                           |
| $t_{n01}$   | – SAK nusistovėjimo trukmė, kai įėjimo kodas didėja;                                        |
| $t_{nmin}$  | – mažiausia įtaisu nustatoma SAK nusistovėjimo trukmė;                                      |
| $t_p$       | – nusistovėjimo pabaigos tikrinimo trukmė;                                                  |
| $T_P$       | – tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu periodas;                                       |
| $t_r$       | – stroboskopinių impulsų vėlinimo trukmė;                                                   |
| $t_{smin}$  | – įrenginio nustatoma minimali nusistovėjimo trukmė;                                        |
| $t_{st}$    | – nusistovėjimo pradžios momento nustatymo trukmė;                                          |
| $t_{sv}$    | – signalo vėlinimo trukmė;                                                                  |
| $t_{TASK}$  | – ASK taktavimo periodas;                                                                   |
| $t_{UI}$    | – nusistovėjusios vertės tikrinimo trukmė;                                                  |

|               |                                                                                                 |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_{TPS}^0$   | – bandomojo impulso žemojo lygio įtampa;                                                        |
| $U_{TPS}^1$   | – bandomojo impulso aukštojo lygio įtampa;                                                      |
| $U^0$         | – išjungto SAK nusistovėjusios įtampos vertė;                                                   |
| $U_{0...000}$ | – SAK išėjimo įtampa atitinkanti skalės pradžios (0...000) kodą;                                |
| $U_{01...11}$ | – SAK išėjimo įtampa atitinkanti vieno žingsnio iki pusės skalės (01...11) kodą (0...000) kodą; |
| $U^1$         | – įjungto SAK nusistovėjusios įtampos vertė;                                                    |
| $U_{1...111}$ | – SAK išėjimo įtampa atitinkanti visos skalės (0...000) kodą;                                   |
| $U_{10...00}$ | – SAK išėjimo įtampa atitinkanti pusės skalės (10...00) kodą;                                   |
| $U_A$         | – nusistovėjimo trukmės tikrinimo atskaitos lygio įtampa;                                       |
| $U_{ASK}$     | – ASK įėjimo įtampų diapazonas;                                                                 |
| $U_{ats}$     | – atsargos įtampa;                                                                              |
| $U_B$         | – bandomojo signalo amplitudė;                                                                  |
| $u_{in}(t)$   | – bandomieji impulsai;                                                                          |
| $u_{is}(t)$   | – stroboskopinio keitiklio išėjimo įtampa;                                                      |
| $U_{Išz}$     | – keitiklio išėjimo įtampa strobuojant viename taške;                                           |
| $U_{MRSAn}$   | – $n$ skilčių ASK mažiausio reikšminio skaičiaus įtampa;                                        |
| $U_{MRSSm}$   | – $m$ skilčių SAK mažiausio reikšminio skaičiaus (MRS) įtampa SAK išėjime;                      |
| $U_{mS}$      | – SAK amplitudės vertė ASK įėjime;                                                              |
| $U_S$         | – vardinė tiriamojo SAK išėjimo signalo amplitudė;                                              |
| $U_{SAK}$     | – SAK išėjimo įtampos amplitudė;                                                                |
| $U_{SAKD}$    | – tiriamojo SAK išėjimo įtampų vardinis diapazonas;                                             |
| $u_{sin}(t)$  | – sinchronizacijos impulsai;                                                                    |
| $u_{str}(t)$  | – stroboskopiniai impulsai;                                                                     |
| $U_z$         | – tiriamojo signalo $z$ akimirkinės vertės įtampa keitiklio išėjime;                            |
| $u_{is}(t)$   | – keitiklio išėjimo įtampa;                                                                     |
| $\Delta f$    | – $N_i$ periodų sinusinio signalo spektro plotis;                                               |
| $\Delta F$    | – tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu dažnių juosta;                                      |
| $\Delta F_D$  | – generatoriaus perderinimo diapazonas;                                                         |
| $\Delta F_p$  | – skaitmeninio derinimo generatoriaus maksimalus leidžiamas perderinimo žingsnis;               |
| $\Delta t$    | – stroboskopinis žingsnis;                                                                      |

|                  |                                                                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta t_{dr}$  | – keitiklio išėjimo signalo pradžios nestabilumas;                                                                  |
| $\Delta t_m$     | – SAK išėjimo signalo nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypa;                                                     |
| $\Delta u$       | – klaidos srities nustatymo nuokrypa;                                                                               |
| $\Delta U_{SAK}$ | – realių SAK išėjimo signalo amplitudės nuokrypa;                                                                   |
| $\delta t_n$     | – nustatyta SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo santykinė neapibrėžtis dėl baigtinio ASK diskretizavimo dažnio, %; |
| $\delta k$       | – santykinė atskaitos koeficiento įvertinimo neapibrėžtis;                                                          |
| $\varphi_{NCO}$  | – kodu nustatoma generatoriaus signalo fazės vertė;                                                                 |
| $\beta$          | – signalo nusistovėjimo švytavimų slopimo dekrementas;                                                              |
| $\omega$         | – SAK signalo jam nusistojant švytavimo kampinis dažnis;                                                            |
| $\varphi$        | – švytavimo signalo pradinė fazė.                                                                                   |

## Santrumpos

|      |                                                               |
|------|---------------------------------------------------------------|
| AGFT | – atbulinė diskretinė Fourier transformacija;                 |
| AK   | – asmeninis kompiuteris;                                      |
| ASK  | – analoginis skaitmeninis keitiklis;                          |
| ASR  | – automatinio stiprinimo reguliavimo grandinė;                |
| BIG  | – bandomųjų impulsų generatorius;                             |
| C    | – dažnio daliklis;                                            |
| CO   | – kvarcinis generatorius (angl. <i>quartz oscillator</i> );   |
| DST  | – diferencinis stiprintuvas;                                  |
| FADP | – fazinė automatinė dažnio paderinimo grandinė;               |
| FIFO | – duomenų atmintinė (angl. <i>First Input First Output</i> ); |
| IB   | – indikacijos blokas;                                         |
| IG   | – integrinis grandynas;                                       |
| ISK  | – impulsų skaitiklis;                                         |
| KG   | – korekcijos grandinė;                                        |
| KK   | – kompensacinis keitiklis;                                    |
| KTG  | – keičiamos trukmės impulsų generatorius;                     |
| LF   | – lygio fiksavimo grandinė;                                   |
| LIM  | – laiko intervalų matavimo įtaisas;                           |
| LN   | – lygio nustatymo blokas;                                     |

|      |                                                                                 |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|
| mP   | – mikroprocesorius;                                                             |
| MRS  | – mažiausias reikšminis skaičius;                                               |
| NCO  | – kodu valdomas generatorius (angl. <i>numerically controlled oscillator</i> ); |
| OS   | – operacinis stiprintuvas;                                                      |
| PG   | – palyginimo grandinė;                                                          |
| PĮ   | – programinis įrenginys;                                                        |
| PORT | – asmeninio kompiuterio prijungimo įrenginys;                                   |
| PS   | – palyginimo grandinė;                                                          |
| QG   | – kvarcinis generatorius;                                                       |
| S    | – analoginis raktas;                                                            |
| SA   | – spektrų atskyrimo blokas;                                                     |
| SAK  | – skaitmeninis-analoginis keitiklis;                                            |
| SH   | – stroboskopiniai maišikliai;                                                   |
| SIF  | – stroboskopinių impulsų formuotuvai;                                           |
| SIG  | – stroboskopinių impulsų generatorius;                                          |
| SK   | – stroboskopiniai keitiklis;                                                    |
| SM   | – stroboskopinis maišiklis;                                                     |
| SPS  | – stroboskopinių impulsų formuotuvai;                                           |
| ST   | – stiprintuvas;                                                                 |
| T    | – tablo „Tinkamas/Brokuotas“;                                                   |
| TPS  | – bandomųjų impulsų formuotuvai;                                                |
| TS   | – trukmių $t_{sv}$ ir $t_n$ tikrinimo grandinė;                                 |
| VB   | – valdymo blokas;                                                               |
| VĮ   | – valdymo įtaisas;                                                              |
| VL   | – vėlinimo grandinė.                                                            |



---

# Turinys

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IVADAS .....                                                                                                 | 1  |
| Problemos formulavimas.....                                                                                  | 1  |
| Darbo aktualumas.....                                                                                        | 2  |
| Tyrimų objektai.....                                                                                         | 3  |
| Darbo tikslas.....                                                                                           | 3  |
| Darbo uždaviniai .....                                                                                       | 3  |
| Tyrimų metodika.....                                                                                         | 4  |
| Mokslinis darbo naujumas.....                                                                                | 4  |
| Praktinė darbo vertė .....                                                                                   | 5  |
| Ginamieji teiginiai.....                                                                                     | 5  |
| Darbo rezultatų aprobavimas.....                                                                             | 5  |
| Disertacijos struktūra.....                                                                                  | 6  |
| 1. SPARČIŲJŲ INTEGRINIŲ GRANDYNŲ NUSISTOVĖJIMO TRUKMIŲ<br>TIKRINIMAS .....                                   | 7  |
| 1.1. Skaitmeninių-analoginių keitiklių dinaminiai parametrai .....                                           | 7  |
| 1.1.1. Skaitmeninio-analoginio keitiklio nusistovėjimo trukmė .....                                          | 8  |
| 1.1.2. Sklidimo vėlinimo trukmės.....                                                                        | 14 |
| 1.2. Sparčiųjų skaitmeninių-analoginių keitiklių nusistovėjimo trukmių tikrinimo<br>metodai ir įtaisai ..... | 15 |
| 1.3. Oscilografiniai stroboskopiniai metodai.....                                                            | 16 |
| 1.4. Nusistovėjimo trukmės tikrinimas, nustatant slenkančius atskaitos lygius .....                          | 19 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2. NAUJI SPECIALIŲJŲ STROBOSKOPINIŲ KEITIKLIŲ GRANDYNAI .....                                                                                        | 33  |
| 2.1. Specialiojo keitiklio stroboskopinio žingsnio formavimo schemos sudarymas ..                                                                    | 33  |
| 2.1.1. Transformacijos koeficientas ir stroboskopinis žingsnis .....                                                                                 | 42  |
| 2.1.2. Strobavimo viename taške režimo nustatymas .....                                                                                              | 43  |
| 2.2 Specialiojo keitiklio schema.....                                                                                                                | 45  |
| 2.2.1. Tiriamojo signalo keitimas skaitmeniniu masyvu .....                                                                                          | 47  |
| 2.2.2. Keitiklio darbas strobuojant signalą viename taške .....                                                                                      | 51  |
| 2.3. Antrojo skyriaus išvados .....                                                                                                                  | 55  |
| 3. SPARČIŲJŲ SKAITMENINIŲ-ANALOGINIŲ KEITIKLIŲ SKAITMENINIO<br>NUSISTOVĖJIMO TRUKMĖS TIKRINIMO ALGORITMO TYRIMAS.....                                | 57  |
| 3.1. Skaitmeninio-analoginio keitiklio signalų skaitmeninio apdorojimo ir<br>nusistovėjimo trukmių tikrinimo algoritmo tyrimas .....                 | 57  |
| 3.2. Tiriamojo signalo laiko ir amplitudės verčių nestabilumo įtakos tyrimas .....                                                                   | 59  |
| 3.2.1. Keitiklio savųjų triukšmų skaitmeniniai modeliai ir baltojo triukšmo<br>įtakos tyrimas .....                                                  | 61  |
| 3.2.2. Keitiklio savųjų triukšmų įtakos tyrimas .....                                                                                                | 64  |
| 3.2.3. Keitiklio našumo tyrimas .....                                                                                                                | 69  |
| 3.3. Trečiojo skyriaus išvados .....                                                                                                                 | 70  |
| 4. TIRIAMŲJŲ SKAITMENINIŲ-ANALOGINIŲ KEITIKLIŲ IŠĖJIMO SIGNALŲ<br>SKAITMENINIS FILTRAVIMAS IR NUSISTOVĖJIMO TRUKMIŲ<br>TIKRINIMAS .....              | 71  |
| 4.1. Tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų skaitmeninių masyvų spektrai .....                                                                         | 72  |
| 4.2. Tiriamojo skaitmeninio signalo periodizavimas .....                                                                                             | 73  |
| 4.3. Tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų masyvų skaitmeninis filtravimas .....                                                                      | 77  |
| 4.3.1. Tiriamojo signalo filtravimas standartiniais filtrais.....                                                                                    | 77  |
| 4.3.2. Skaitmeninio keterinio filtro sudarymas.....                                                                                                  | 80  |
| 4.3.3. Skaitmeninio keterinio filtro algoritmas ir jo tyrimas .....                                                                                  | 82  |
| 4.4. Tiriamojo skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo signalo filtravimo ir<br>vidurkinimo skaitmeninio apdorojimo algoritmas ir jo tyrimas ..... | 87  |
| 4.5. Tiriamojo skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo signalo vidurkinimo ir<br>filtravimo algoritmo našumo tyrimas .....                         | 90  |
| 4.6. Kitokių tipų signalų filtravimas .....                                                                                                          | 91  |
| 4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados .....                                                                                                               | 94  |
| BENDROSIOS IŠVADOS .....                                                                                                                             | 95  |
| LITERATŪRA IR ŠALTINIAI .....                                                                                                                        | 97  |
| AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA .....                                                                                                       | 103 |

---

# Contents

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                                                 | 1  |
| The Problem Formulation .....                                                      | 1  |
| The Importance of the Thesis .....                                                 | 2  |
| The Object of Research .....                                                       | 3  |
| The Goal of the Thesis .....                                                       | 3  |
| The Tasks of the Thesis .....                                                      | 3  |
| The Research Methodology .....                                                     | 4  |
| The Importance of Scientific Novelty .....                                         | 4  |
| The Practical Significance of Achieved Results .....                               | 5  |
| The Defended Statements .....                                                      | 5  |
| The Approval of the Results .....                                                  | 5  |
| The Dissertation Structure .....                                                   | 6  |
| 1. TESTING OF FAST INTEGRAL CIRCUITS SETTTLING TIME .....                          | 7  |
| 1.1. Dynamics Parameters of Digital-to-Analog Converters .....                     | 7  |
| 1.1.1. Settling Time of Digital-to-Analog Converters .....                         | 8  |
| 1.1.2. Slope Time .....                                                            | 14 |
| 1.2. Fast Digital Analog Converters' Settling Time Testing Methods and Tools ..... | 15 |
| 1.3. Oscillograph Stroboscope Methods .....                                        | 16 |
| 1.4. Testing of Settling Time Setting up Exchange of Readout Levels .....          | 19 |
| 2. NEW SPECIALISED SAMPLING CONVERTERS' CIRCUITS .....                             | 33 |

|                                                                                                                                            |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 2.1. Creation of Circuit of Specialised Converter Stroboscopic Step Formation .....                                                        | 33      |
| 2.1.1. Transformation Coefficient and Sampling Step .....                                                                                  | 42      |
| 2.1.2. The Establishment of Sampling Regime in One Point .....                                                                             | 43      |
| 2.2 The Circuit of Special Converter .....                                                                                                 | 45      |
| 2.2.1. Testing Signal Change into Digital Array .....                                                                                      | 47      |
| 2.2.2. Converter's Operation in Sampling the Signal in One Point .....                                                                     | 51      |
| 2.3. The Conclusions of the Second Chapter .....                                                                                           | 55      |
| <br>3. INVESTIGATION OF FAST DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS OF<br>SETTLING TIME TESTING ALGORITHM .....                                      | <br>57  |
| 3.1. The Investigation of Digital-to-Analog Converter Signal Digital Processing and<br>Settling Time Verification Algorithm .....          | <br>57  |
| 3.2. The Investigation of the Dependence of the Output Signal Time and Amplitude<br>Instability .....                                      | <br>59  |
| 3.2.1. Converter's Internal Noises Digital Models and the Investigation of White<br>Noise Influence .....                                  | <br>61  |
| 3.2.2. The Investigation of the Influence of Converter's Internal Noises .....                                                             | 64      |
| 3.2.3. The Investigation of Converter's Productivity .....                                                                                 | 69      |
| 3.3. The Conclusions of the Third Chapter .....                                                                                            | 70      |
| <br>4. DIGITAL FILTERING OF OUTPUT DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS<br>SIGNALS AND TESTING OF SETTLING TIME .....                              | <br>71  |
| 4.1. The Digital Arrays Spectra of Testing Signal and Internal Noise .....                                                                 | 72      |
| 4.2. The Periodisation of Digital Output Signal .....                                                                                      | 73      |
| 4.3. Digital Filtering of the Output Signal and Internal Noise Arrays .....                                                                | 77      |
| 4.3.1. The Filtering of Output Signal with Standart Filters .....                                                                          | 77      |
| 4.3.2. The Design of Digital Comb Filter .....                                                                                             | 80      |
| 4.3.3. The Digital Comb Filter Algorithm and its Investigation .....                                                                       | 82      |
| 4.4. The Digital Processing Algorithm of Digital-to-Analog Converters Output<br>Signal Filtering and Averaging and its Investigation ..... | <br>87  |
| 4.5. The Investigation of Testing Digital-to-Analog Converters Output Signal<br>Averaging and Filtering Algorithm Productivity .....       | <br>90  |
| 4.6. Filtering of Other Types of Signals .....                                                                                             | 91      |
| 4.7. The Conclusions of the Fourth Chapter .....                                                                                           | 94      |
| <br>GENERAL CONCLUSIONS .....                                                                                                              | <br>95  |
| <br>REFERENCES .....                                                                                                                       | <br>97  |
| <br>THE AUTHOR'S ARTICLES ON DISSERTATION THEME .....                                                                                      | <br>103 |

---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Sparčiai besivystanti elektronikos pramonė gamina vis daugiau įvairių sparčiųjų skaitmeninių įtaisų: skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK), loginių elementų, registų, skaitiklių, ir pan. Šių įtaisų gamybos metu nustatomi įvairūs gaminių parametrai. Integrinių grandžių spartą nusako jų dinaminiai parametrai, kurių trukmės sudaro nanosekundes ar jų dalis. Tikslios žinios apie dinaminius parametrus leidžia suklasifikuoti gaminius pagal kokybės lygmenis, o nepakankamai aukštų dinaminų parametrų gaminius pripažinti netinkamais. Todėl yra būtina kuo tiksliau nustatyti šiuos dinaminius parametrus, kurių identifikavimas yra problemiškas ir kompleksinis uždavinys. Sprendžiant šią užduotį labai svarbu garantuoti pakankamą parametrų tikrinimo patikimumą ir tikslumą.

Didėjant SAK ir skaitmeninių integrinių grandynų (IG) veikimo spartai, SAK skilčių skaičiui, iškyla šių įtaisų parametrų tikrinimo ir kokybės kontrolės uždaviniai. Vertinant sparčiųjų (SAK) grandynų kokybę, svarbiausiu jų dinaminio parametro yra išėjimo įtampų ar srovių nusistovėjimo trukmės. Šių parametrų nustatymas yra pakankamai sudėtingas, kadangi nustatomos SAK išėjimo įtampos ar srovės klaidos sritis paprastai sudaro 1 mažiausią reikšminę skiltį (MRS). 12 skilčių SAK 1 MRS sudaro 0,025 % pilnos keitiklio išėjimo įtampos ar srovės skalės, 16 skilčių – 0,0015 % ir t. t. Šių keitiklių nusistovėjimo trukmės

siekia nuo vienetų iki dešimčių nanosekundžių. Todėl matavimo įranga yra pakankamai sudėtinga. Šiuo metu pasaulyje yra tobulinama jau esanti ir kuriama nauja SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo įranga (specialūs stroboskopiniai oscilografų priedai), sprendžiamos automatizuotų SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo problemos. Pradėti spręsti skaitmeninio SAK tiriamųjų signalų apdorojimo klausimai.

Disertacijoje yra sprendžiami aktualūs automatizuoto sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo uždaviniai: naujos struktūros specialaus kompensacinio stroboskopinio keitiklio kūrimo bei SAK tiriamųjų signalų žinomų ir naujai pasiūlytų skaitmeninio apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo būdų tyrimai.

## Darbo aktualumas

Mokslo ir technikos pažanga leidžia sukurti naujus vis spartesnius bei tikslesnius integrinis grandynus ir tuo pačiu didina poreikį nustatyti vis mažesnius fizikinius dydžius ir jų pokyčius. Nepaisant naujausių technologijų laimėjimų ir galimybių ženkliai mažinti naujausių technologijų kūrimo ir diegimo kaštus, susiduriama su situacijomis, kai standartiniai, ilgą laiką naudoti sprendimai tampa netinkami ar per brangūs plačiam jų panaudojimui. Todėl tenka iš naujo analizuoti parametrų įvertinimo metodus ir atrasti galimybes juos keisti taip, kad, būdami patikimais ir tiksliais, leistų nustatyti šiuos naujus fizikinius dydžius, nustatyti mažesnes jų vertes ar padidinti tikrinimų tikslumą, bet reikalautų mažesnių įdiegimo investicijų, jų panaudojimas būtų supaprastintas, garantuotų mažus kaštus ir laiduotų greitą įdiegtų technologijų atsiperkamumą.

Tyrimų objektas – automatinis sparčiųjų skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK) nusistovėjimo trukmių tikrinimas. Sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo metu tenka registruoti trumpus laiko intervalus signalui kintant labai mažose 1 MRS ribose. 12 skilčių SAK 1 MRS sudaro tik 0,025 % visos jo skalės, o 16 skilčių SAK – 0,0015 %. Šiuolaikinių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmės yra nuo vienetų iki kelių dešimčių nanosekundžių. Taigi SAK kokybė yra susieta su dviejų parametrų – trukmės ir lygio vertės – mažų dydžių nustatymu. Akivaizdu, kad susiduriama su trumpų nusistovėjimo trukmių (nanosekundžių eilės) tikrinimu ir dideliais šių duomenų masyvais, kuriuos reikia kaupti, apdoroti ir nustatyti gaminio kokybės klasę. Sparčiųjų SAK ir kitų skaitmeninių parametrų tikrinimo bei stroboskopinio laiko mastelio keitimo problemas tyrė ir gerų rezultatų, kuriant automatizuotus nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaisus, pasiekė Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkai (Багданскис *et al.* 1986; Багданскис *et al.* 1987; Багданскис *et al.* 1985; Kvedaras, V. *et al.* 1985; Kvedaras, V. *et al.* 1982; Kvedaras, V. *et al.* 2001;

Kvedaras, V. *et al.* 2004; Кведарас, В. *et al.* 1988; Kvedaras, V. *et al.* 2003; Kvedaras, R. *et al.* 2008; Kvedaras, V. *et al.* 2000; Kvedaras, V. *et al.* 2003; Pocius 1992; Naidionov *et al.* 1973). Tačiau SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo srityje liko dalis neišspręstų uždavinių – žinomi metodai neleidžia kokybiškai, paprastai ir pigiai tikrinti sparčiųjų daugelio skilčių SAK nusistovėjimo trukmių. Be to, reikalavimai kokybei nuolat didėja, nes SAK gaminami vis spartesni ir nuolat didėja skilčių skaičius.

Didesnio skilčių skaičiaus SAK nusistovėjimo trukmių matavimas ir tikrinimas yra sudėtingas uždavinys dėl ypač mažų atskaitos lygių (mažos klaidos srities), kas nulemia, kad tiriamojo signalo dalį, kurioje vykdomas nusistovėjimo trukmės tikrinimas, tampa sudėtinga išskirti triukšmų fone. Daugelis problemų, susijusių su sparčiųjų integrinių grandynų dinaminių parametrų tikrinimu, buvo sprendžiamos analitiškai ir kuriant specialiuosius testerus, o taip pat pradėti nagrinėti ir taikyti SAK signalų skaitmeninio apdorojimo metodai nusistovėjimo trukmių tikrinimo procedūrose. Šiuo metu reiktų skirti daugiau dėmesio naujų specialiųjų testerių kūrimui, ir skaitmeniniam tiriamųjų SAK signalų apdorojimui ir nusistovėjimo trukmių tikrinimui. Dėl šios priežasties darbe buvo siekiama sukurti naujos kartos specialiųjų testerių, naujus skaitmeninius tiriamųjų signalų apdorojimo metodus, įgalinančius efektyviau automatizuotai tikrinti SAK nusistovėjimo trukmes, o taip pat įvertinti sukurtų SAK tiriamojo signalo skaitmeninio apdorojimo metodų galimybes ir taikymo sritis.

## Tyrimų objektai

Darbo tyrimo objektai yra:

- skaitmeninių-analoginių keitiklių nusistovėjimo trukmių tikrinimas;
- naujų specialiųjų stroboskopinių keitiklių grandynai ir jų analizė;
- skaitmeninių SAK tiriamųjų signalų apdorojimo metodai ir algoritmai.

## Darbo tikslas

Darbo tikslas – SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo scheminių ir skaitmeninio apdorojimo metodų tyrimas ir tobulinimas.

## Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti darbe numatyta spręsti tokius uždavinius:

1. Pasiūlyti ir ištirti naują specialųjį stroboskopinio keitiklio grandyną.
2. Ištirti SAK skaitmeninį tiriamojo signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmą bei nustatyti pagrindinius faktorius sukeliančius nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypas.
3. Sukurti naujus efektyvesnius SAK tiriamųjų signalų skaitmeninio filtravimo metodus.
4. Pasiūlyti naujus skaitmeninius signalo apdorojimo metodus, leidžiančius tikrinti didesnio skilčių skaičiaus SAK nusistovėjimo trukmes.
5. Patikrinti sudarytų skaitmeninio signalų apdorojimo ir nusistovėjimo trukmių tikrinimo algoritmų veikimą.

## Tyrimų metodika

Darbe naudojami analitiniai ir skaitmeniniai tyrimo metodai. Pasiūlytas naujas specialusis stroboskopinis keitiklio grandynas analizuojamas analitiniais metodais. Sukurti skaitmeninio dažninio keterinio filtro ir du SAK tiriamojo signalo skaitmeninio apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmai perkelti į LabView<sup>®</sup> programinį paketą ir atliktas jų patikrinimas.

## Mokslinis darbo naujumas

1. Darbe pasiūlyta nauja specialiojo stroboskopinio keitiklio schema, turinti didesnes funkcines galimybes, paprastesnį grandyną, kuris leidžia sumažinti prietaiso savųjų triukšmų lygį.

2. Pasiūlyta sudaryti skaitmenizuotų tiriamųjų signalų pseudo periodines sekas, tuo iš dalies atskiriant tiriamųjų signalų ir keitiklio savųjų triukšmų spektrus.

3. Pasiūlytas, sukurtas ir realizuotas skaitmeninis keterinis filtras, kuris efektyviai (iki 10 kartų) filtruoja keitiklio savuosius  $1/f$  ir baltojo tipų triukšmus, neiškraipydamas tiriamojo signalo.

4. Nustatyta, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras filtruoja ir kitų tipų signalus, kuriems galima sudaryti pseudo periodines sekas.

5. Sudarytas naujas SAK tiriamųjų signalų apdorojimo algoritmas, apjungiantis skaitmeninį keterinį filtravimą ir signalo vidurkinimą ir leidžiantis žymiai (iki 60 kartų) padidinti savųjų triukšmų slopinimo efektyvumą.

6. Patikrintas sudarytas keterinio filtro ir naujo algoritmo veikimas, bei nusistovėjimo trukmės tikrinimas, o taip pat gautos nusistovėjimo trukmių nuokrypos.

## Praktinė darbo vertė

Pasiūlyti sprendimai garantuoja patikimą didesnio skilčių skaičiaus sparčiųjų SAK dinaminių parametų tikrinimą. Sukurta naujo specializuoto stroboskopinio keitiklio struktūra, pasižyminti didesnėmis funkcinėmis galimybėmis ir mažesniais savaisiais triukšmais. Sukurta tiriamų SAK signalų skaitmeninio apdorojimo programa įgalina tikrinti didesnio skilčių skaičiaus SAK nusistovėjimo trukmes.

Sukurtas skaitmeninis keterinis filtras filtruoja ne tik SAK tiriamuosius signalus, bet ir kitų tipų signalus, kai galima sudaryti šių signalų pseudo periodines sekas.

## Ginamieji teiginiai

1. Naujas stroboskopinio keitiklio grandynas, turintis kodu valdomą stroboskopinio žingsnio formavimo ir tiriamojo signalo keitimo į kodų masyvą blokus, išplečia funkcinės galimybės, turi mažesni savųjų triukšmų lygį ir tinka iki 16 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės tikrinti.
2. Skaitmeninio keterinio filtro struktūra, algoritmas ir programa įgalina pasiekti efektyvų keitiklio savųjų triukšmų slopinimą (6–8 kartus), neįskraipant tiriamojo signalo.
3. Skaitmeninio signalo filtravimo, vidurkinimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmas ir programa įgalina slopinti (60 kartų) keitiklio savuosius triukšmus ir tikrinti iki 16 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės.

## Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tematika atspausdinti šeši moksliniai straipsniai: du – moksliniuose žurnaluose, įrašytuose į Thomson ISI Web of Science duomenų bazę, vienas – moksliniame žurnale, įrašytame į Copernicus duomenų bazę, trys – kituose leidiniuose.

Darbo rezultatai pristatyti ir aptarti 9-iose mokslinėse konferencijose:

1. Tarptautinėje konferencijoje „Mechatronic Systems and Materials (MSM 2007)“, Lietuvoje, Kaune.
2. 11-ojoje, 12-ojoje, 13-ojoje ir 14-ojoje tarptautinėje konferencijoje „Elektronika“ 2007, 2008, 2009, 2010 Lietuvoje, Vilniuje.
3. 18-oje Tarptautinėje Mikrobangų, Radarų ir belaidžio ryšio konferencijoje „Mikon 2010“, Vilniuje.
4. 10-ojoje, 11-ojoje, 12-ojoje respublikinėse Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Elektronika ir elektrotechnika“ 2007, 2008, ir 2009, Lietuvoje, Vilniuje.

## **Disertacijos struktūra**

Disertaciją sudaro reziumė lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, literatūros ir publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Disertacijoje yra 123 puslapiai, 62 paveikslai, 1 lentelė ir 39 numeruotos formulės. Rašant disertaciją panaudoti 79 literatūros šaltiniai.

---

# Sparčiųjų integrinių grandynų nusistovėjimo trukmių tikrinimas

Skyriuje apžvelgiamos plačiai naudojamų naujų sparčiųjų skaitmeninių-analoginių (SAK) dinaminių parametrų apibrėžimai ir svarbiausių iš jų – tai nusistovėjimo trukmių tikrinimo metodai (Barzdenas *et al.* 2006; Marcinkevičius *et al.* 2004; Schoenwetter 1983; Schoenwetter 1985; Souders *et al.* 1987; Williams 1998a; Williams 1999; Williams 1998b; Williams 2009; Williams 2010; Tekstronix Inc 2004; Application Notes AN-120. 2010). Skyrius pabaigiamas tikslo ir sprendžiamų uždavinių suformulavimu.

## 1.1. Skaitmeninių-analoginių keitiklių dinaminiai parametrai

Pastaruoju metu SAK įrenginių naudojimas visą laiką auga, didėja gaminių SAK sparta, didėja jų skilčių skaičius. Todėl didelis dėmesys kreipiamas SAK parametrų metrologijai ir terminologijai. Šia tema paskelbta daug mokslinių straipsnių (Balestrieri *et al.* 2004; Balestrieri *et al.* 2005; Kiss *et al.* 2004; Albiol *et al.* 2004; Crippa *et al.* 2002; Parthasarathy *et al.* 2000; Linear Techno-

logy 1998). JAV pradėti leisti nauji SAK terminologijos ir tyrimų metodų standartai (IEEE Std. 1658. 2005).

Matavimų standartizavimas yra svarbus analizuojant ir lyginant skirtingų gamintojų įrenginius skirtingose pasaulio vietose. Renkantis įrenginį paprasti ir aiškūs SAK parametrų terminai padeda lengvai nustatyti įrangos galimybes.

SAK dinaminių parametrų specifikacija pasirenkama atsižvelgiant į tai, kad, kiekvienas parametras turi būti nedviprasmiškai apibrėžiamas ir praktiškai nustatomas. Toliau analizuojami SAK dinaminiai parametrai, įskaitant nusistovėjimo trukmę, sklidimo vėlinimo trukmę, impulso kilimo trukmę ir impulso kritimo trukmę.

### 1.1.1. Skaitmeninio-analoginio keitiklio nusistovėjimo trukmė

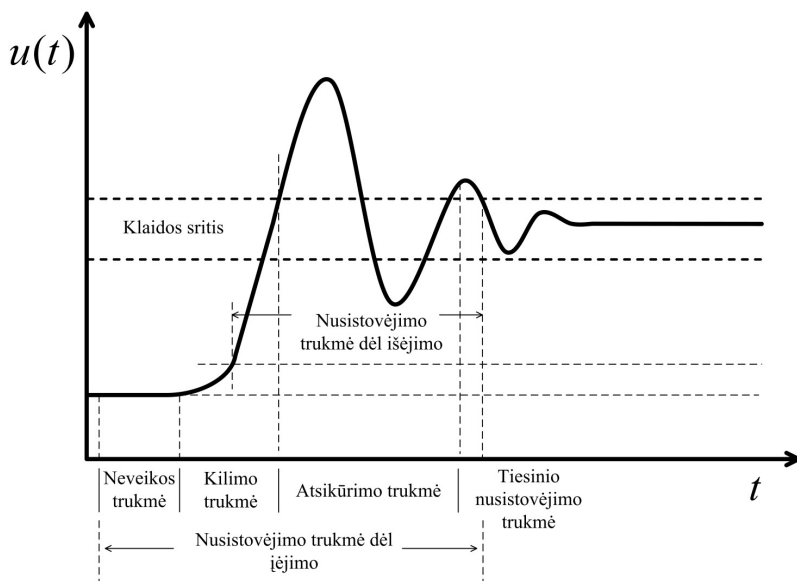
*SAK nusistovėjimo trukmė* (angl. *settling time*) yra labai svarbus parametras, nes dalis analoginių operacijų turi būti vykdoma nuosekliai, kiekviena operacija turi nusistovėti iki kitos operacijos pradžios (Intersil 1986), tačiau vienas iš sunkiausiai tikrinamų.

Šis parametras apibrėžia laiko tarpą nuo signalo pasikeitimo įėjime iki nusistovėjusios reikšmės signalo išėjime suformavimo. Skiriamos trys SAK nusistovėjimo trukmės dedamosios (1.1 pav.). Tai – neveikos trukmė (angl. *dead time*), kilimo trukmė (angl. *slew time*), atsikūrimo trukmė (angl. *recovery time*), tiesinio nusistovėjimo trukmė (angl. *linear settling*).

Neveikos trukmė paprastai yra labai trumpa, ir per ją SAK išėjime signalas nekinta. Per kilimo fazę išėjimo signalas artėja prie galutinės reikšmės. Kilimo trukmės metu SAK išėjimo signalas pereina iš vienos nusistovėjusios būsenos į kitą. Atsikūrimo trukmė – tai trukmė, per kurią SAK išėjimo signalas atsistato po kilimo ir nusistovi klaidos srities ribose (Williams 1998a).

Dabartiniu metu yra naudojama keletas skirtingų nusistovėjimo trukmės apibrėžimų, pagal kuriuos yra nustatomos skirtingų gamintojų SAK nusistovėjimo trukmės. Šie apibrėžimai skiriasi pasirinktu pradiniu nustatymo momentu – nustatoma įvertinant neveikos trukmę, įvertinama tik dalis kilimo trukmės; pasirinktu matavimo pabaigos momentu, kuriam gali būti nustatomos skirtingos klaidos sritis ribos (pvz.,  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1$ ,  $\pm 5$  MRS,  $\pm 0,1$  % nuo SAK išėjimo įtampų (srovių) diapazono ir t. t.) (1.2 pav.). Nusistovėjimo trukmei apibrėžti, naudojama visa eilė gana skirtingų apibrėžimų. Dažniausia naudojamas apibrėžimas: „tai laiko trukmė reikalinga nusistovėti išėjimo signalui nurodytoje nusistovėjimo režimo srityje matuojamoje atsižvelgiant į 50 % tašką arba į SAK duomenų

pralaidumą arba nuo laiko momento kai įvedami nauji duomenys (1.2 pav.) (Kester 2006; Kester 2004).



**1.1 pav.** SAK nusistovėjimo trukmė (Kester W. 2006)

**Fig. 1.1.** DAC settling time (Kester W. 2006)

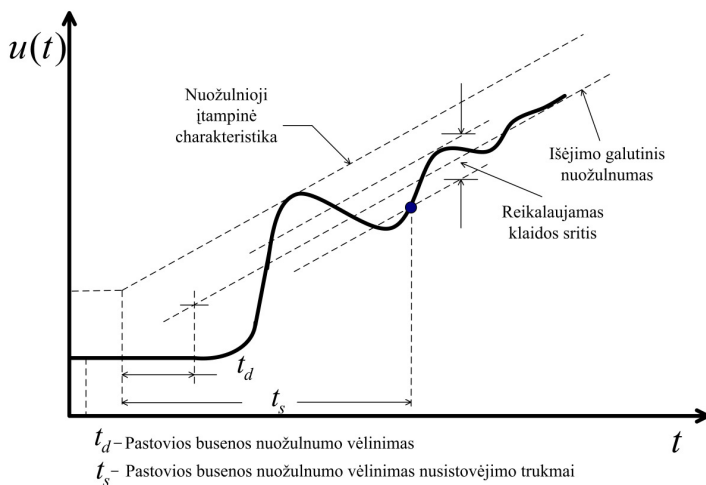
Literatūroje (IEC 60748-4. 1997; JESD99A.01. 1997) skiriami trys nusistovėjimo trukmės apibrėžimai: 1) skaitmeninis 2) etaloninis ir 3) tiesinio kitimo.

Pirmasis apibrėžia SAK skaitmenines charakteristikas, pradinį momentą apibūdinant kaip „skaitmeninio įėjimo pokytį, kai etaloninė įtampa nekinta“. Kiti du apibrėžimai naudojami daugianarių SAK etaloninių signalų charakteristikose „keičiant etaloninę įtampą, o skaitmeninį įėjimą laikant pastovų“. Taip pat skaitmeninio nusistovėjimo trukmė yra „laiko intervalas nuo skaitmeninio įėjimo signalo pokyčio momento iki momento kai analoginis išėjimo signalas paskutinį kartą patenka į klaidos sritį artėdamas prie galutinės reikšmės“.

Etaloninė nusistovėjimo trukmė yra „laiko intervalas nuo etaloninės įtampos pokyčio momento iki momento kai analoginis išėjimo signalas paskutinį kartą patenka į klaidos sritį artėdamas prie galutinės reikšmės“. Tiesinio kitimo nusistovėjimo trukmė yra „laiko intervalas nuo momento kai etaloninė įtampa pradeda kisti tiesiškai iki momento kai analoginis išėjimo signalas paskutinį kartą patenka į klaidos sritį artėdamas prie galutinės reikšmės“ (1.2 pav.).

Nepaisant nusistovėjimo trukmės apibrėžimo, standartas (IEEE Std. 181. 2003) apibrėžia nusistovėjimo trukmę kaip „laiko intervalą nuo 50 % etaloninio

lygio, jei nenurodyta kitaip, iki galutinio momento kai bangos formos signalas kerta nustatytos srities ribą“.



**1.2 pav.** SAK tiesinio kitimo nusistovėjimo trukmė (JESD99A.01. 1997)

**Fig. 1.2.** DAC settling time to steady-state ramp (JESD99A.01. 1997)

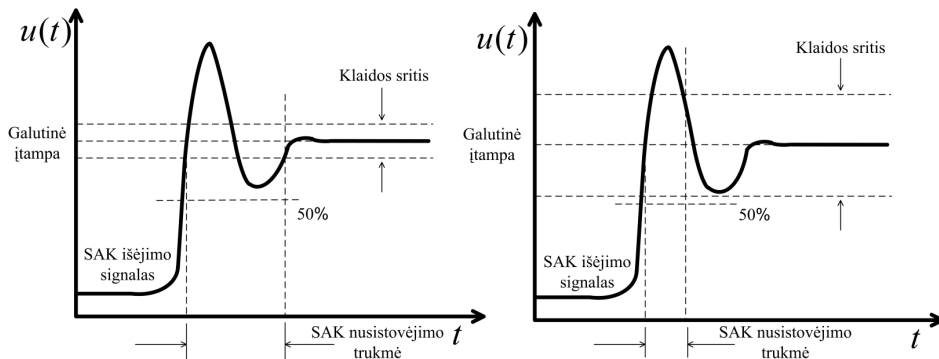
Visi iki šiol aptarti apibūrinimai nesuteikia pakankamai informacijos apie tinkamo kodo pasirinkimą, norint pasiekti pradinį ar galutinį išėjimo lygius. Jei kitimo trukmė yra trumpesnė lyginant su kitomis nusistovėjimo laiko komponentėmis, kas yra įprasta dabartiniuose SAK, nusistovėjimo trukmė labai priklauso nuo išėjimo signalo dydžio (Kester 2006).

SAK nusistovėjimo trukmė priklauso nuo išėjimo signalo amplitudės ir keitimo metodo. Akivaizdu, kad šis sprendimas reikalauja daug laiko ir yra ekonomiškai nepriimtinas, taigi pasiūlytas metodas susideda iš blogiausio keitimo kodo tikrinimo ir nustatymo.

Kai kurie keitikliai viena kryptimi nusistovi greičiau nei kita, jei atliekamas abipusis procesas (įjungiant ir išjungiant SAK), išėjimo įtampa mažėjimo kryptimi gali nusistovėti kur kas lėčiau nei augimo kryptimi (Analog Device 1996). Todėl, (Burns *et al.* 2001) siūlo SAK keitimus atlikti siekiant išmatuoti nusistovėjimo trukmę „nuo pilnai minimalios iki pilnai maksimalios skalės verčių ir atvirkščiai, nes jie turi didesnius įtampos svyravimus“. Tačiau šie keitimai ne visuomet laikomi blogiausio keitimo atveju. Kaip pavyzdžiui, vidutinė nusistovėjimo trukmė yra aktuali dvejetainiuose (angl. *binary-weighted*) SAK, nes konvertavimas iš 0111. . . 1 į 1000. . . 0 kodą yra ilgiausias. Todėl būsenos (Kester 2006), dažniausiai naudojamos nusistovėjimo laiko nustatymų pokyčiams nustatyti yra „pilna skalė ir 1 MRS“.

SAK gamintojų dokumentacijose pateikiama keletas nusistovėjimo laiko apibrėžimų. Tai laiko intervalas, matuojamas nuo išėjimo signalo pokyčio (Analog Device 2001; Atmel 2001) arba „50 % pilnos skalės taško“ (Philips 1999) arba dar bendriau – kai tik SAK priima komandą pakeista išėjimo reikšmę (Maxim 2000) iki kol išėjimo signalas nusistovi klaidos srityje.

Klaidos sritis galėtų būti išreiškiama „pilnos skalės, galutinės įtampos ar fiksuotos įtampos“ (Burns *et al.* 2001) procentais arba mažiausios reikšminės skilties išraiška (Kester 2006). Akivaizdu, kad tikrinant SAK nusistovėjimo trukmes kuo didesnė yra klaidos sritis, tuo trumpesnė nusistovėjimo trukmė (1.3 pav.).



**1.3 pav.** SAK nusistovėjimo trukmė su skirtinga klaidos sritimi

**Fig. 1.3.** DAC settling time versus different error band amplitudes

Jei klaidos sritis apibrėžiama kaip  $\pm 0,5$  MRS, 10 V pilnos skalės ir 8 skilčių SAK turės  $\pm 20$  mV leistiną klaidos sritį. Taigi tokie pat du 10 ir 12 skilčių SAK turės atitinkamai  $\pm 5$  mV ir  $\pm 1,22$  mV klaidos sritis (Analog Device 1996). Tai visai nereiškia, kad 12 skilčių SAK yra lėtesnis už 8 skilčių SAK. Paprasčiausiai reikia tiksliau nustatyti klaidos sritį (Analog Device 1996).

Gamintojo dokumentacijoje pateikiama klaidos sritis gali būti išreiškiama MRS vienetais ar procentine „pilnos skalės įtampos“ išraiška (Philips 1999) ir priimama kaip  $\pm 0,5$  MRS arba kitaip susiejant su galutine verte (National Semiconductor 1999). Šaltinyje (Williams 1998b) priduriama, kad nusistovėjimo trukmė dažnai apibrėžiamas kaip „pilnos 10 V skalės keitimas“.

Trumpai apžvelgsime anksčiau aprašytus nusistovėjimo laiko apibrėžimų kūrimo procesus. Pradedant nuo dviejų parametrų apibrėžimų atsižvelgiant į įėjimo ir išėjimo signalus, nusistovėjimo trukmės tikrinimas tampa aiškesnis įtraukus visas komponentes (neveikos trukmę, kilimo trukmę, atsikūrimo trukmę ir tiesinį nusistovėjimą).

Visgi, tokio tipo apibrėžimai dviem skirtingiems signalams (SAK įėjime ir išėjime) turi būti giliau išnagrinėti. Kita vertus ieškant tinkamo nusistovėjimo trukmės apibrėžimo atsižvelgiant į išėjimo signalą tenka nagrinėti SAK išėjimo signalą, kas galiausiai priveda prie dar tikslesnių matavimų poreikio.

Kadangi dažnai sunku nustatyti keitimo pradžios momentą, būtina nustatyti išėjimo signalo amplitudės pradinį tašką. 50 % taškas, pateiktas (IEEE Std. 1241. 2001; IEEE Std. 181. 2003) kaip pradžios taškas, neveikiamas jokių triukšmų kurie galėtų imituoti proceso pradžią.

Kita problema sprendžiama (IEEE Std. 1241. 2001) šaltinyje, yra išėjimo signalo nusistovėjusios vertės nustatymas atsižvelgiant į nusistovėjimo trukmės skaičiavimą. Dėl triukšmų, o konkrečiau dėl  $1/f$  triukšmo galutinė reikšmė kai kuriais atvejais nenustatoma. Standartas IEEE 1241 kaip kompromisą siūlo 1 s intervalą, nes po šios trukmės, keitimo procesas gali būti pamatuotas skaitmeniniu voltmetru (IEEE Std. 1241. 2001).

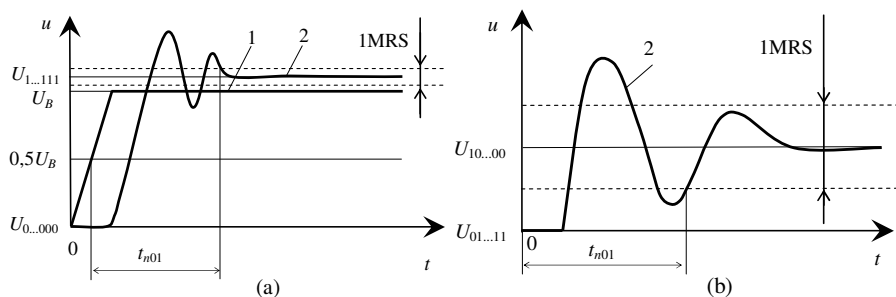
Kai 1 sekundės trukmė yra per ilgas laiko tarpas, naudojamas kitas nusistovėjimo trukmės apibrėžimas (trumpo nusistovėjimo laiko) (IEEE Std. 1241 2001). Pagal aukščiau pateiktą informaciją formuluojami sekantys apibrėžimai. Kai nusistovėjimo trukmė priklausoma nuo įėjimo signalo, siūlomi du apibrėžimai:

1) nusistovėjimo trukmė yra laiko intervalas, matuojamas nuo skaitmeninio įėjimo pokyčio momento iki momento, kai signalas patenka ir lieka klaidos srityje artimas galutinei reikšmei. Galutinė reikšmė (jeigu nenurodyta kitaip) pasiekama praėjus 1 sekundei nuo signalo fronto pradžios. Jeigu nenurodyta kitaip, turi būti įvertinamas blogiausias keitimo atvejis;

2) trumpa nusistovėjimo trukmė – tai laiko intervalas matuojamas nuo skaitmeninio įėjimo pokyčio momento iki momento, kai signalas patenka ir lieka klaidos srityje. Galutinė reikšmė pasiekama per nurodytą trukmę, kuri yra trumpesnė nei 1 sekundė nuo signalo fronto pradžios. Jeigu nenurodyta kitaip, turi būti įvertinamas blogiausias keitimo atvejis. Kai nusistovėjimo trukmė priklauso nuo išėjimo signalo, siūlomi tokie du apibrėžimai: 1) išėjimo signalo nusistovėjimo trukmė – tai trukmė, per kurią išėjimo signalas patenka ir lieka klaidos srityje ir artėja prie galutinės reikšmės, matuojama nuo 50 % signalo taško. Galutinė reikšmė (jei nenurodyta kitaip) pasiekama praėjus 1 sekunde po signalo kylimo pradžios; 2) išėjimo signalo trumpoji nusistovėjimo trukmė – tai trukmė, per kurią kylantis signalas patenka ir pasilieka klaidos srityje artimai galutinei reikšmei, matuojamai nuo 50 % signalo taško. Galutinė vertė pasiekama per nurodytą trukmę, kuri yra trumpesnė nei viena sekundė nuo signalo pradžios. Jeigu nenurodyta kitaip, turi būti įvertintas blogiausias keitimo atvejis. Šie apibrėžimai turi apibrėžti klaidos srities specifikacijas, laiko, per kurį pasiekama galutinė reikšmė ir blogiausio keitimo atvejo.

Nagrinėta informacija apie klaidos sritį yra labai svarbi, nes kai kurių 14 ir 16 skilčių SAK nusistovėjimo trukmė tikrinama kaip 12 skilčių SAK, nes išmatuoti 16 skilčių SAK nusistovėjimo trukmę, kai klaidos sritis yra 1 MRS – labai sudėtinga (Kester 2006).

Todėl reikia mažiausiai keturių apibrėžimų norint tinkamai apibrėžti visus praktikoje atliekamus nusistovėjimo trukmės tikrinimo metodus. Kai priimamos visos nusistovėjimo laiko komponentės (nusistovėjimo trukmė) arba be komponentių (išėjimo signalo nusistovėjimo trukmė), atvejai kai 1 sekundės trukmė galutinės reikšmės nustatymui dėl tam tikrų praktinių taikymų yra neleistina (trumpo nusistovėjimo trukmė ir trumpo išėjimo signalo nusistovėjimo trukmė).



**1.4 pav.** SAK visos (a) ir pusės skalės (b) nusistovėjimo trukmių tikrinimo iliustracija: 1 – bandomųjų impulsų generatoriaus signalas; 2 – SAK išėjimo įtampa

**Fig. 1.4.** Illustration of settling time testing of DAC of full (a) and half scale (b) settling time: 1 – signal of stimulus generator; 2 – output signal of DAC

Taigi nusistovėjimo trukmė, blogiausiam atvejui, gali būti matuojama visos arba pusės SAK skalės metodais (Analog-Digital Conversion *et al.* 2004; Balestrieri 2006; Williams 2010) (1.4 pav.). 1.4 paveiksle:  $U_B$  – bandomojo signalo amplitudė;  $U_{0...000}$  – SAK išėjimo įtampa atitinkanti skalės pradžios (0...000) kodą;  $U_{1...111}$  – SAK išėjimo įtampa atitinkanti visos skalės (1...111) kodą;  $U_{10...00}$  – SAK išėjimo įtampa atitinkanti pusės skalės (10...00) kodą;  $U_{01...11}$  – SAK išėjimo įtampa atitinkanti vieno žingsnio iki pusės skalės (01...11) kodą; 1MRS – viena mažiausia reikšminė skiltis;  $t_{n01}$  – SAK nusistovėjimo trukmė, kai įėjimo kodas didėja. Visa SAK skalė gaunama tuo pačiu laiko momentu į visus jo įėjimus pasiuntus loginį 1. Tai lygiavertiška kodo 0...000 pakeitimo kodu 1...111. SAK išėjime esanti skalės pradžios įtampa  $U_{0...000}$  turi pasiekti įtampą atitinkančią visos skalės kodą  $U_{1...111}$ . Šiuo atveju keitiklio išėjimo įtampa pasikeičia maksimaliai. Pereinamasis procesas laikomas pasibaigusiu, kai SAK išėjimo įtampa patenka į sritį  $U_{1...111} \pm 0,5$  MRS (užduota klaidos sritis) (1.4 pav., a).

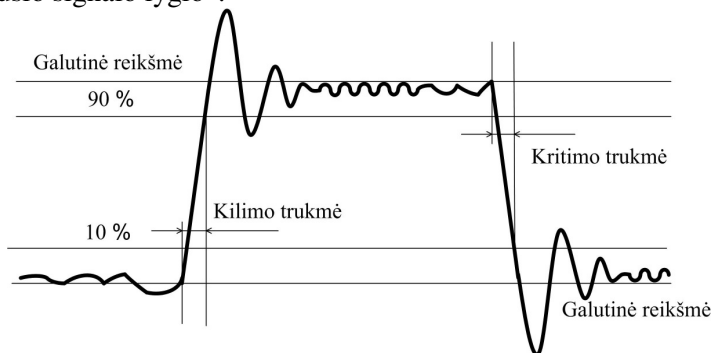
Tikrinant SAK nusistovėjimo trukmę pusės skalės metodu, keitiklio įėjime esantis kodas 01...11 pakeičiamas pusės skalės kodu 10...00. SAK išėjime esanti  $U_{01...11}$  įtampa turi pasiekti lygį atitinkantį pusės skalės kodą  $U_{10...00}$ . Šiuo atveju keitiklio išėjimo įtampa padidėja minimaliai – tik 1 MRS, tačiau šiuo atveju pakeičiami visų SAK skilčių kodai. Pereinamasis procesas laikomas pasibaigusiu, kai SAK išėjimo įtampa patenka į sritį  $U_{10...00} \pm 0,5 \text{ MRS}$  (1.4 pav., b).

### 1.1.2. Sklidimo vėlinimo trukmės

Šie parametrai apibūdina vieną iš nusistovėjimo laiko komponentų – kitimo trukmę. Dėl šios priežasties standartas (IEC 60748-4. 1997) apjungia jų apibrėžimą su kritimo trukme (angl. *slope time*), pvz., signalo pokyčiui dėl įėjimo signalo lygio, laiko intervalas nuo neveikos pabaigos iki momento, kai išėjimo signalas pirmą kartą kerta nustatytą ribą ir artėja prie galutinės reikšmės“.

Neveikos trukmė, tai trukmė nuo funkcijos įėjimo signalo lygio pokyčio iki momento, per kurį išėjimo signalas kerta ribą artimą pradinei reikšmei“. Standarte (IEC 60748-4. 1997) taip pat pažymima, kad neveikos trukmės pabaigos kritimo trukmės pradžios amplitudės taškas sudaro 10 %, o galutinis amplitudės taškas – 90 % galutinės reikšmės.

Standarte (IEEE Std. 1241. 2001) kylančio fronto trukmė apibrėžiama taip: „tai trukmė kai signalas nuo 10 % kitimo proceso lygio pasiekia 90 % lygį“, o krentančio fronto trukmė apibrėžiama taip: „tai trukmė kai signalas nuo 90 % lygio nukrenta iki 10 % proceso lygio“ (1.5 pav.). Šie du apibrėžimai nepriklauso nuo neveikos trukmės apibrėžimo ir nuo įėjimo signalo pokyčio. Tačiau, nustatyti keitimo proceso ribas būtina. Standartas (IEEE Std. 1241. 2001) skaitmeniniams loginiams signalams keitimo riba apibrėžiama kaip „riba tarp žemiausio ir aukščiausio signalo lygio“.



1.5 pav. SAK kylančio ir krentančio frontų trukmės  
Fig. 1.5. DAC rise and fall times

Apibrėžiant didėjimo trukmę vietoj keitimo diapazono šaltinyje (Philips 1999) naudojama pilnos skalės žingsnio sąvoka. Procentinė amplitudė tarp kylančio ir krentančio laikų turi būti apskaičiuojama, ji gali būti 10 %/90 % ar 20 %/80 % (Jasper 2009), taip pat ir 30 %/70 % (Burns *et al.* 2001).

Šie du parametrai keičiami vienu išsireiškimu – pereinamąja trukmė, kuri apibrėžiama taip: „skirtumas tarp dviejų to paties kitimo etaloninių lygių momentų. Jeigu nenurodyta kitaip, du etaloniniai lygiai yra 10 % ir 90 %.” Aišku, kad teigiamos bangos perėjimo trukmė atitiks kylančio ir neigiamos bangos perėjimo atveju atitiks mažėjimo trukmę.

Išnagrinėjus aukščiau pateiktą informaciją formuluojami sekantys apibrėžimai. 1) Kilimo trukmė – tai tokia trukmė, per kurią signalas nuo 10 % išėjimo signalo amplitudės vertės pasiekia 90 % (jeigu nenurodyta kitaip) vertę atsižvelgiant į blogiausią išėjimo signalo pokytį. 2) Kritimo trukmė – tai trukmė, kai signalas nuo 90 % išėjimo signalo amplitudės vertės sumažėja iki 10 % (jeigu nenurodyta kitaip) vertės atsižvelgiant į blogiausią išėjimo signalo pokytį.

Formuluotės „išėjimo charakteristika (angl. *output response*)“ ir „nustatytas blogiausias išėjimo signalo pokytis“ leidžia šiuos išsireiškimus naudoti etaloninio nusistovėjimo trukmei ir tiesinio kitimo nusistovėjimo trukmei, jeigu jie nėra priklausomi nuo kodo keitimo ar žingsnio charakteristikos.

## 1.2. Sparčiųjų skaitmeninių-analoginių keitiklių nusistovėjimo trukmių tikrinimo metodai ir įtaisai

Kaip minėta aukščiau svarbiausi SAK dinaminiai parametrai yra išėjimo signalų įtampų ar srovių nusistovėjimo trukmės jiems įsijungiant ir išsijungiant (Kvedaras *et al.* 1992). Kaip minėta aukščiau, šie parametrai yra sunkiausiai išmatuojami, todėl jiems ir skirsim didžiausią dėmesį.

Tikrinant sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes, randamas laiko intervalas  $t_n$ , per kurį pasibaigia pereinamieji procesai visose keitiklio skiltyse.

Nustatomos trukmės pradžios momento tikrinimas yra toks pat, kaip ir kitų dinaminių parametrų (kilimo, kritimo, neveikos trukmių), todėl ypatingų problemų nekelia. Nusistovėjimo trukmės įvertinimo pabaigos atskaitos lygio įtampa yra didesnė (mažesnė) už nusistovėjusią vertę dydžiu (Kvedaras *et al.* 2003):

$$U_A = \frac{U_{SAK} \cdot k_A}{2^m}, \quad (1.1)$$

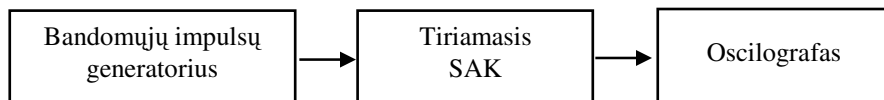
čia  $U_{SAK}$  – SAK išėjimo įtampos amplitudė;  $k_A$  – atskaitos lygio koeficientas MRS vienetais;  $m$  – SAK skilčių skaičius.

Visos ar pusės SAK skalės nusistovėjimo trukmės tikrinimo metu tenka registruoti trumpus laiko intervalus signalui kintant labai mažose 1 MRS ribose. 12 skilčių SAK 1 MRS sudaro tik 0,025 % visos skalės ( $U_{SAK} = 1$  V, atskaitos lygiai sudarys  $U_A = \pm 122 \mu\text{V}$ ), o 16 skilčių SAK – 0,0015 %. Akivaizdu, kad nanosekundiniame diapazone įvertinti nusistovėjusią SAK išėjimo signalo vertę ir nustatyti tokius atskaitos lygius yra pakankamai sudėtinga. Tenka įvertinti ypač mažus signalo amplitudės pokyčius. Šiuolaikinių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmės yra nuo vienetų iki kelių dešimčių nanosekundžių.

Svarbu pabrėžti, kad šių dydžių įvertinimui keliami uždaviniai dažniausiai sąlygoja požingsninių visų įvertinimą sąlygojančių funkcinių mazgų kokybinių parametrų gerinimą bei paskesnį skaitmeninį rezultatų apdorojimą. Tik taip pasiekta keliamų įvertinimo kokybės reikalavimų ir užtikrinti patikimą įrenginių darbą.

### 1.3. Oscilografiniai stroboskopiniai metodai

SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimui pirmiausia buvo naudojami plačiajuosčiai oscilografai su trumpa nusistovėjimo trukme (Test and Measurement Catalog 2004) (1.6 pav.).



**1.6 pav.** SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimas plačiajuosčio oscilografo pagalba  
**Fig. 1.6.** DAC settling time testing with broadband oscilloscope

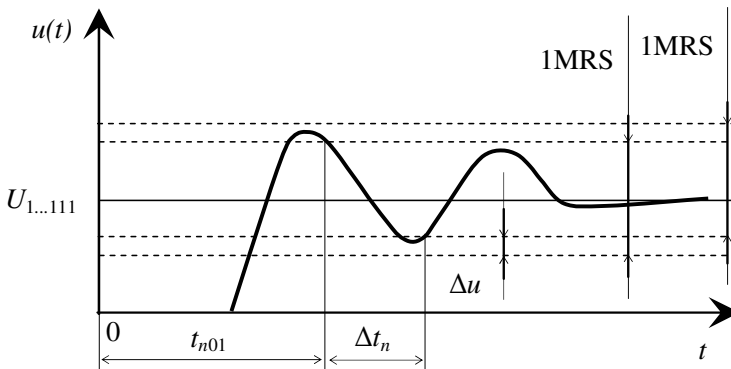
Toks nusistovėjimo trukmės tikrinimas yra paprastas, tačiau turi esminių trūkumų. Naudojant oscilografus, sudėtinga aukšto lygio signalė identifikuoti labai mažus signalo lygių pokyčius. Pvz., nustatant 12 skilčių SAK visos skalės nusistovėjimo trukmę, klaidos sritis, esant 1 V išėjimo įtampai, lygus 0,244 mV. Šiuo atveju nusistovėjimo trukmę galima tikrinti, jei oscilografo jautris bus didelis ir sieks (0,1–1) mV/pad. Tačiau, kai nustatomas toks didelis jo jautris, SAK persijungimo įtampa labai perkrauna oscilografo įėjimo kanalą. Daugumos oscilografų atsistatymo po perkrovos trukmė ženkliai iškreipia tiriamojo SAK signalą ir įneša esmines nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypas. Antra, matavimai vykdomi rankiniu būdu ir todėl reikia aukštos kvalifikacijos darbuotojų. Todėl procesas nenašus ir yra didelė operatoriaus klaidų tikimybė.

Oscilografo įtaka sumažinama naudojant nejautrius perkrovoms oscilografus ar specialius matavimo keitiklius (Schoenwetter 1983; Schoenwetter 1985; Mittermayer *et al.* 1999; Robert 2005), kompensuojančius SAK išėjimo įtampos šuolius. Tokia nusistovėjimo trukmės tikrinimo metodika leidžia sumažinti oscilografo perkrovos įtaką rezultatui. Tačiau tikrinimo procesas ir toliau vykdomas oscilografo ekrane rankiniu būdu ir lieka nenašus. Panaudojus stroboskopinius matavimo keitiklius (Williams 1998a; Williams 1999; Williams 1998b; DPOs *et al.* 2004; Williams 2009; Williams 2010) (1.7 pav.), pavyksta sukurti nusistovėjimo trukmės tikrinimo įtaisus, leidžiančius analizuoti iki 16–18 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės siekiančias iki 30 ns.

Todėl nusistovėjimo trukmę galima tikrinti oscilografo ekrane arba, šį masyvą persiuntus į AK, rezultatus pagal programą apskaičiuoti nusistovėjimo trukmę ir ją pateikti skaitmeniniame pavidale. Šiuolaikinių skaitmeninių oscilografų praleidžiamų dažnių juosta siekia gigahercus ir jų sparta yra pakankama SAK dinaminiams parametrams tikrinti.

Tačiau nustatant SAK nusistovėjimo trukmes oscilografiniais metodais, labai svarbu naudoti oscilografus turinčius didelį vertikalaus kanalo jautrį ir gerą skiriamąją gebą – oscilografus su dideliu ASK skilčių skaičiumi. Dėl labai mažo SAK klaidos srities, paminėti du parametrai iš esmės nulemia SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo galimybes. Daugumos skaitmeninių ir fosforo atminties oscilografų skiriamoji geba yra 8 skiltys. Yra oscilografų, kuriuose po įėjimo signalo atskaitų vidurkinimo pasiekama 11 skilčių skiriamoji geba.

1.8 paveiksle parodyta, kad net maža  $\Delta u$  nuokrypa, nustatant klaidos sritį įtakoja dideles nusistovėjimo trukmės verčių tikrinimo klaidas  $\Delta t_n$ .



**1.8 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  atsiradimas dėl klaidos srities nustatymo nuokrypos  $\Delta u$

**Fig. 1.8.** The rise of settling time error  $\Delta t_m$  because of inaccurate set  $\Delta u$  error field

To priežastimi yra klaida randant signalo nusistovėjimo vertę, klaida arba įtampos dreifas, nustatant klaidos srities ribas. Įvertinus, kad tiksliai nusistovėjimo trukmės tikrinimui reikia labai tiksliai nustatyti SAK išėjimo srovės ar įtampos nusistovėjusią vertę, oscilografo skiriamoji geba turi būti 3 arba 4 skiltimis didesnė už tiriamojo SAK skyrą. Taigi TDS8000 serijos skaitmeniniais oscilografais teoriškai galima tikrinti tik 10 arba 11 skilčių SAK nusistovėjimo trukmes.

Kita vertus, oscilografo TDS8000 didžiausias jautris yra 10 mV/padalai, o 12 skilčių SAK klaidos sritis lygi 1 MRS ( $\pm 0,5$  MRS). Tai sudaro 244  $\mu\text{V}$  arba  $\pm 122 \mu\text{V}$  nuo SAK išėjimo nusistovėjusios įtampos vertės. Taigi oscilografo,



$TS_1, TS_2$  – laiko momentų  $t_{sv}$  ir  $t_n$  tikrinimo grandinės;  $PI$  – programinis įrenginys,  $T$  – tablo „Tinkamas/Brokuotas“. Matuoklis veikia taip. Bandomųjų impulsų generatoriaus BIG išėjimo impulsai, kurių pasikartojimo dažnis, įsijungimo ir išsijungimo trukmės bei „log.1“ ir „log.0“ įtampų vertės atitinka testavimo metodikos reikalaujamas vertes, siunčiami į lygiagrečiai sujungtus tiriamojo SAK įėjimus ir į pirmojo stroboskopinio keitiklio  $SK_1$  įėjimą. SAK išėjimo signalai siunčiami į stroboskopinius keitikius  $SK_2$  ir  $SK_3$ . BIG išėjimo impulsų dažnį  $F_C$  nustato kvarcinis generatorius  $QG_1$ .

Į antruosius stroboskopinių keitikių  $SK_1, SK_2$  ir  $SK_3$  įėjimus siunčiami trumpi stroboskopiniai impulsai. Stroboskopinių impulsų generatorių SIG išėjimo impulsų dažnį nustato antrasis kvarcinis generatorius  $QG_2$ . Bandomųjų impulsų dažnis  $f_T = f_C + F_S$ ,  $f_T \approx f_C \gg F_S$ . Kadangi stroboskopinių impulsų dažnis parinktas didesnis už bandomųjų impulsų dažnį, tiriamojo signalo laiko mastelis keičiamas apgręžiant laiko ašį. Toks sprendimas leidžia gerokai supaprastinti informacijos apdorojimo grandinę, nes nusistovėjimo trukmė šiuo atveju skaičiuojama nuo pirmojo laiko momento, kai viršijamas klaidos srities lygis, iki laiko momento, kai signalo akimirkinė vertė pasiekia pusę nusistovėjusio išėjimo signalo amplitudės. Be to, atgalinis laiko mastelio keitimas leidžia žymiai sumažinti reikalavimus keitiklio juostos pločiui (Kvedaras, V. *et al* 2005) ir neperkrauti keitiklio ir stiprintuvų iki matavimo pradžios momento ir taip išvengti nusistovėjimo trukmių tikrinimo klaidų dėl šių priežasčių.

Laiko mastelio transformacijos koeficientas lygus:

$$q = \frac{F_T}{\Delta F}. \quad (1.2)$$

Sustiprinti pirmojo ir antrojo arba trečiojo stroboskopinių keitikių išėjimo signalai siunčiami į korekcijos grandinę  $KG$ , kuri suformuoja paleidimo komandą signalo vėlinimo trukmės  $t_{sv}$  apskaičiavimui bei stabdymo komandą nusistovėjimo trukmės  $t_n$  apskaičiavimui. Šias komandas atitinkantys signalai siunčiami į valdymo įtaisą  $VĮ$ . Signalų vėlinimo trukmės  $t_{sv}$  skaitmeninis įvertis užfiksuojamas impulsų skaitiklyje  $ISK$ .

Testuojant SAK nusistovėjimo trukmę, signalas iš antrojo arba trečiojo stroboskopinio keitiklio siunčiamas į automatinio stiprinimo reguliavimo grandinę  $ASR$ , kuri stabilizuoja impulsų amplitudę. Šiuo atveju, nepriklausomai nuo SAK išėjimo impulso amplitudės jo išėjime (leidžiama, kad realių SAK išėjimo srovės (įtampų) amplitudės vertės skirtųsi viena nuo kitos iki  $\pm 20\%$ ), palyginimo grandinės  $PG$  įėjime signalo amplitudė visada bus vienoda, nesikeis ir komparatoriumi nustatomos amplitudės klaidos srities dydis. Antruosiuose palyginimo grandinės  $PG$  įėjimuose nustatomos dvi didžiausios „slenkančių“ atskaitos įtampų vertės  $\pm U_{An} = \pm U_A + (U^{(0)} + sU_P)$ , čia  $U^{(0)}$  – nusistovėjusios normuo-

tos SAK įtampos vertės;  $U_p$  – atskaitos lygių perstūmimo įtampos vertė;  $s = -p, \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots, p$ . Kai signalo akimirkinė vertė tampa didesnė už amplitudės klaidos srities viršutinę ribą arba mažesnė už jos žemutinę ribą, palyginimo grandinė PG generuoja signalą leidžiantį pradėti nusistovėjimo trukmės  $t_n$  tikrinimą. Šis signalas per valdymo įtaisą VĮ paleidžia impulsų skaitiklį ISK. Korekcijos grandinės išėjimo signalas stabdo matavimą, kai bandomasis impulsas kisdamas pasiekia užduotą įtampą. Išmatuojama vertė  $t'_n$ . Atskaitos lygiai pakeičiami dydžiu  $U_p$  ir matavimas kartojamas, išmatuojama kita vertė  $t''_n$ . Išsaugomas mažesnis matavimo rezultatas, matavimas kartojamas, kol pasiekiamą minimali  $U_{An}$  vertė. Mažiausia  $t'_n$  vertė priimama lygi nustatomi trukmei. Rezultato skaitinė vertė parodoma indikacijos bloke ir rodoma tablo „Tinkamas/Brokuotas“ ekrane.

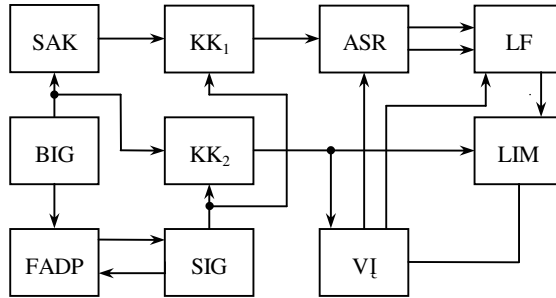
Taigi šiame matuoklyje panaudota: santykinai paprastas stroboskopinis pikinio detektavimo keitiklis turintis didelį ir plačią signalų diapazoną pastovų perdavimo koeficientą bei mažus savuosius triukšmus (Kvedaras, V. *et al.* 1982); atgalinis laiko mastelio keitimo metodas; pakeisto laiko mastelio SAK išėjimo impulsų automatinis stiprinimo reguliavimas, pašalinantis skirtingų SAK pavyzdžių išėjimo impulso įtampų kitimo iki  $\pm 20\%$  įtaką nusistovėjimo trukmei; daugkartinis nusistovėjimo trukmės matavimas, keičiant klaidos srities nustatymo įtampą ir tikros nusistovėjimo trukmės išrinkimą iš gauto trukmių masės.

Didesnio skilčių skaičiaus keitiklių nusistovėjimo trukmių tikrinimas šiuo matuokliu yra apsunkintas dėl sąlyginai didelių, siekiančių (150–200)  $\mu V$ , pikinio detektavimo keitiklių savųjų triukšmų ir SAK išėjimo impulso daug didesnės švytavimo slopimo dekremento.

## 1.5. Nusistovėjimo trukmių tikrinimo metodas, normuojant tiriamųjų signalų amplitudes

Darbe (Kvedaras, V. *et al.* 1993) analizuojamas automatizuotas sparčiųjų 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaisas, normuojant tiriamųjų signalų amplitudes. Sparčiųjų 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių matuoklio struktūrinė schema (1.10 pav.), kur: KK1, KK2 – kompensaciniai keitikliai; BIG, SIG – bandomųjų ir stroboskopinių impulsų generatoriai; FADP – fazinė automatinė dažnio paderinimo grandinė; ASR – automatinio stiprinimo reguliavimo grandinė; LF – lygio fiksavimo grandinė; LIM – laiko intervalų matavimo įtaisas; VĮ – valdymo įtaisas, sudaryta naudojant sukurtą automatizuoto matavi-

mo metodą, normuojant tiriamųjų signalų amplitudes ir sukurta kompensacinį pikinio detektavimo stroboskopinį keitiklį (1.11 pav.) (Kvedaras, V. *et al.* 1993).



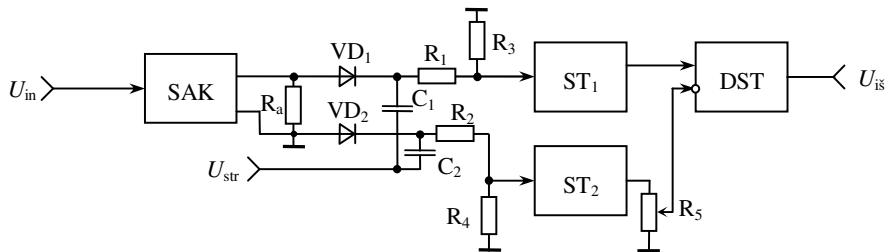
**1.10 pav.** Prietaisas, tikrinantis nusistovėjimo trukmes, normuojant tiriamųjų signalų amplitudes

**Fig. 1.10.** Device testing settling time by rationing the amplitudes of testing signal

Spartieji 10 skilčių SAK, turi didelę švytavių slopimo dekrementą ir jų išėjimo įtampa arba srovė po perjungimo švytuoja trumpai. Todėl taikyti spartiesiems 10 skilčių SAK nepakeistą prieš tai aprašytą tikrinimo metodą negalima. Sparčiųjų 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaise tinka tik dalis techninių sprendimų panaudotų 8 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaise: pikinio detektavimo stroboskopiniai keitikliai su dviem kvarciniais generatoriais, atgalinis laiko mastelio keitimas ir SAK išėjimo impulso automatinis stiprinimo reguliavimas. Šiems prietaisams reikalingi stroboskopiniai keitikliai turintys mažesnę savųjų triukšmų lygį.

Darbuose (Kvedaras, R. 2003; Kvedaras, V. 1992; Kvedaras, V. 1993) pasiūlytas matuoklyje naudojamas kompensacinis keitiklis, leidęs esminiai (iki 80 %) sumažinti stroboskopinių impulsų generatoriaus ir tiriamojo SAK prijungimo schemas įnešamus trukdžius. (1.11 pav., kur SAK – tiriamasis skaitmeninis-analoginis keitiklis;  $ST_{1,2}$  – pirmojo ir antrojo stroboskopinių keitiklių stiprintuvai; DST – diferencinis stiprintuvas;  $VD_1, C_1, R_1, R_3, VD_2, C_2, R_2, R_4$  – pirmojo ir antrojo stroboskopinių keitiklių elementai;  $R_a$  – SAK apkrovos rezistorius;  $R_5$  – potenciometas trukdžių kanaluose suvienodinimui;  $u_{in}(t)$  – bandomieji impulsai;  $u_{str}(t)$  – stroboskopiniai impulsai;  $u_{is}(t)$  – kompensacinio stroboskopinio keitiklio išėjimo įtampa). Šie trukdžiai mažinami kompensavimo metodu taip. Pirmojo maišiklio  $VD_1, C_1, R_1$  išėjime yra gaunama SAK išėjimo įtamos ir stroboskopinių impulsų suma. Antrojo stroboskopinio maišiklio  $VD_2, C_2, R_2$ , prijungto prie tiriamojo SAK analoginio korpuso išvado, išėjime yra

gaunama stroboskopinių impulsų ir tiriamojo SAK analoginiame išėjime veikiančio trukdžio sukurta įtampa.



**1.11 pav.** Kompensacinis stroboskopinis keitiklis

**Fig. 1.11.** The compensating sampling converter

Šios įtampos stiprinamos stiprintuvuose  $ST_{1,2}$  ir siunčiamos į diferencinį stiprintuvą DST kompensavimui. Diferencinio stiprintuvo išėjimo įtampa  $u_{is}(t)$  proporcinga pirmojo ir antrojo keitiklių sustiprintų signalų skirtumui. Tuo būdu, šio stiprintuvo išėjime stroboskopinių impulsų nestabilumo sukelti išėjimo signalo trukdžiai yra kompensuojami.

Sukurti nauji kompensaciniai stroboskopiniai pikinio detektavimo keitikliai leido realizuoti automatizuotus sparčiųjų 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių testerus, kuriais galima tikrinti nusistovėjimo trukmes nuo 3 ns.

## 1.6. Nusistovėjimo trukmių tikrinimo metodas, taikant skaitmeninį signalų apdorojimą

Kai reikia tikrinti sparčiųjų 12 ir daugiau skilčių SAK nusistovėjimo trukmes, specialiųjų keitiklių savųjų triukšmų lygis tampa per didelis. Todėl tikrinimo nuokrypos išauga arba tikrinimas tampa visai negalimas. Darbuose (Kvedaras, V. *et al.* 2004; Kvedaras, R. 2005) pasiūlyta naudoti skaitmeninį tiriamojo signalo apdorojimą.

Šiam tikslui sparčiųjų SAK išėjimo įtampos (srovės) akimirkinės vertės keičiamos jų kodų masyvu, vykdomas skaitmeninis masyvo apdorojimas ir nusistovėjimo trukmių apskaičiavimas AK. Kaip parodyta (Kvedaras, V. *et al.* 2004), tokio tipo įrenginiams tinka tik ASK, kurio skilčių skaičius yra:

$$n \geq \frac{1}{\log 2} \log \frac{U_{ASK} 2^m p}{U_{SAK} k_A}, \quad (1.3)$$

čia  $U_{ASK}$  – ASK įėjimo įtampų diapazonas;  $p$  – ASK MRS, tenkančių SAK atskaitos lygiui, skaičius.

Diskretizavimo dažnis yra:

$$f_T = \frac{100}{t_{nmin} \delta t_n}, \quad (1.4)$$

čia  $t_{nmin}$  – mažiausia prietaisu nustatoma SAK nusistovėjimo trukmė;  $\delta t_n$  – nustatyta SAK nusistovėjimo trukmės įvertinimo santykinė neapibrėžtis dėl baigtinio ASK diskretizavimo dažnio, %.

Analoginio kanalo praleidžiamųjų dažnių juostos plotis yra:

$$\Delta F = \frac{0,35 k_p}{t_f}, \quad (1.5)$$

čia  $t_f$  – SAK išėjimo impulsų frontų trukmės;  $k_p$  – koeficientas, įvertinantis ASK analoginio kanalo baigtinės praleidžiamųjų dažnių juostos sukeltą SAK nusistovėjimo trukmės neapibrėžtį (kai  $k_p = 3$ ,  $\delta t_{nmin} = 3\%$ , kai  $k_p = 10$ ,  $\delta t_{nmin} = 1\%$ ).

Iš (1.3)–(1.5) reikalavimų išplaukia, kad sparčiųjų 12 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės analizei reikėtų panaudoti 18 ir didesnio skilčių skaičiaus ASK ar skaitmeninį oscilografą, dirbantį didesniu už 5 GHz taktiniu dažniu ir turintį (320–1140) MHz analoginio kanalo praleidžiamųjų dažnių juostos plotį. Šiuo metu nė vienas gaminamas įrenginys neturi tokių parametrų.

Šioms problemoms spręsti iš dalies tinka VGTU sukurti sparčiųjų 8 ir 10 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių įvertinimo įrenginiai (Kvedaras, V. *et al.* 1982; Багданскис *et al.* 1986; Kvedaras, V. *et al.* 1993) kuriuose naudojant kompensacinius stroboskopinius pikinio detektavimo keitiklius (Kvedaras, V. *et al.* 2001) pavyksta pasiekti mažą laiko mastelio keitimo netolygumą, mažą savųjų triukšmų ir trukdžių lygį. Be to, jie yra palyginti paprasti ir gali būti jungiami tiesiog prie tiriamojo SAK kontaktoriaus išvado, tuo praktiškai panaikinant tiriamojo signalo aukštadažnį kanalą ir iškraipymus jame.

Šiuose keitikliuose dažnai nustatomas atgalinis laiko mastelio keitimas, leidžiantis supaprastinti matuoklių schemas (Kvedaras, V. 2004), darbe analizuojama, kokią įtaką turės keitiklio greitaveika nusistovėjimo trukmės matavimams. Darbe (Kvedaras, V. 2004) parodyta, kad, nustačius atgalinį laiko mastelio keitimą, reikalavimai keitiklio greitaveikai yra mažesni už reikalavimus keitiklio greitaveikai nustačius tiesioginį laiko mastelio keitimą. Keitiklio išėjime gaunamas tiriamasis sustiprintas signalas pakeistu laiko masteliu, o tai leidžia naudoti gaminamus integrinius ASK.

Tačiau vis tik šių keitiklių savųjų triukšmų ir trukdžių lygis, siekiantis 40–60  $\mu\text{V}$  (Багданскис *et al.* 1986; Kvedaras, V. *et al.* 1982), yra per didelis, nes yra tik du ar tris kartus mažesnis už tiriamojo 12 skilčių SAK atskaitos lygius. Dėl to nepavyksta reikiamu patikimumu identifikuoti SAK išėjimo amplitudės pokyčių, taigi, kaip buvo parodyta 1.3 punkte, nepavyksta reikiamu patikimumu įvertinti tiriamojo objekto (šiuo atveju SAK) nusistovėjimo trukmės. Be to, keitiklio savieji triukšmai ir trukdžiai veikia nusistovėjimo trukmės įvertinimo rezultatai du kartus – tikrinant SAK išėjimo signalo nusistovėjusią vertę ir nustatant pačią nusistovėjimo trukmę. Dėl to jų įtaka įvertinimo kokybei dar labiau padidėja.

Tyrimai parodė, kad keitiklio triukšmus ir trukdžius sukelia grandinėje naudojamų elektroninių elementų savieji triukšmai.

Norint užtikrinti reikiamą mažų tiriamo signalo amplitudės pokyčių įvertinimą, bei nusistovėjimo trukmių tikrinimą, tenka imtis papildomų priemonių šių triukšmų įtakos įvertinimo rezultatui ir jo neapibrėžtims mažinti. Savųjų triukšmų ir trukdžių mažinimui pasiūlyta naudoti skaitmenines signalų apdorojimo priemones. Pakeitus tiriamojo signalo laiko mastelį, į skaitmeninį signalą galima keisti palyginti nesparčiais ASK ir tolimesnį apdorojimą bei reikiamų parametrų įvertinimą atlikti tik skaitmenine forma. Tam tiriamasis signalas pakeistu laiko masteliu ASK keičiamas į jo akimirkinių verčių kodų masyvą ir toliau apdorojamas skaitmeninėmis priemonėmis.

VGTU sukurtuose prietaisuose (Багданскис *et al.* 1986; Kvedaras, V. *et al.* 1993; Квядарас, В. *et al.* 1988) yra stiprinama tik ta tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu dalis, kurioje yra vertinama nusistovėjimo trukmė. Taigi mažas amplitudės pokytis yra pakeičiamas palyginti dideliu, kurį įvertinti galima paprasčiau ir nebūtina naudoti didelio skiltiškumo ASK. Tačiau būtina užtikrinti, kad būtų išnaudojamas visas ASK dinaminis diapazonas. Pagal reikalaujamą spartą ir dažninius parametrus parinkus tinkamą  $n$  skilčių ASK, keitiklio perdavimo koeficientas turi būti:

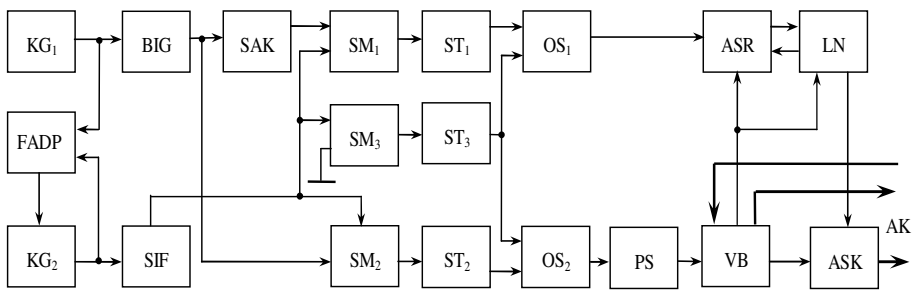
$$k_k \geq \frac{2^{n-m} U_{ASK}}{U_{SAK} k_A \delta k}, \quad (1.6)$$

čia  $\delta k$  – santykinė atskaitos koeficiento įvertinimo neapibrėžtis.

12 skilčių SAK nusistovėjimo trukmių tyrimo įrenginiui parinkus 10 skilčių ASK, gaunama  $k_k \geq 80$ , o parinkus 8 skilčių ASK –  $k_k \geq 320$ . Tokios keitiklio perdavimo koeficiento vertės yra palyginti nesudėtingai pasiekiamos.

### 1.6.1. Nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaisas, taikant skaitmeninį signalų apdorojimą

Darbe (Kvedaras, V. *et al.* 2003) aprašytas sukurtas įrenginys pateiktas 1.12 paveiksle. Šioje schemoje  $KG_1$ ,  $KG_2$  – kvarciniai generatoriai; BIG – bandomųjų impulsų generatorius; SIF – stroboskopinių impulsų formuotuvas; FADP – fazinio automatinio dažnio paderinimo grandinė; SAK – tiriamasis skaitmeninis-analoginis keitiklis;  $SM_1$ – $SM_3$  – stroboskopiniai maišikliai;  $ST_1$ – $ST_3$  – stiprintuvai;  $OS_1$ ,  $OS_2$  – operaciniai stiprintuvai; ASR – automatiškai reguliuojamo stiprinimo stiprintuvas; PS – palyginimo grandinė; VB – valdymo blokas; LN – lygio nustatymo blokas; ASK – analoginis-skaitmeninis keitiklis; AK – asmeninis kompiuteris.



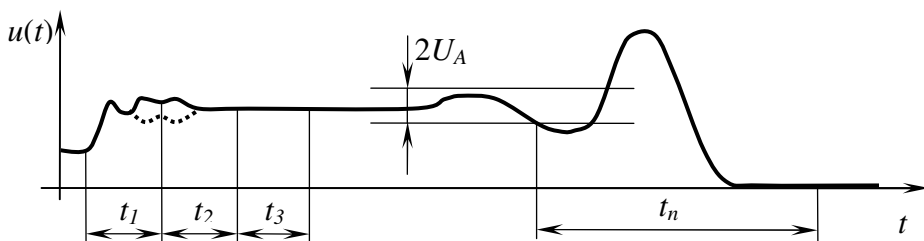
**1.12 pav.** Stroboskopinio keitiklio, keičiančio akimirksnines įtampas vertes į kodą, struktūrinė schema

**Fig 1.12.** The structure diagramme of the sampling converter transforming the momentary values of voltage into code

Keitiklis veikia taip. Stroboskopinių impulsų siunčiamų iš SIF į stroboskopinius maišiklius  $SM_{1,2,3}$  dažnį nustato kvarcinio generatoriaus  $KG_2$   $f_2$  dažnio išėjimo impulsai. Bandomųjų impulsų generuojamų BIG dažnį  $f_1$  nustato kvarcinio generatoriaus  $KG_1$  išėjimo impulsai. Dažnis  $f_2$  parenkamas aukštesnis už dažnį  $f_1$ . Todėl keitiklis vienu kartu pakeičia tiriamųjų signalų laiko mastelį ir jų laiko ašies kryptį, keitiklio išėjimo signalai skleidžiami nuo galinių impulsų frontų link priekinių. Fazinio automatinio dažnio paderinimo grandinė FADP paderina  $KG_2$  dažnį taip, kad dažnių skirtumas  $(f_2 - f_1)$  visą trukmę išliktų pastovus. Tai garantuoja laiko mastelio transformacijos koeficiento  $q$  pastovumą. BIG išėjime gaunami pagal SAK bandymų sąlygas reikalaujamo dažnio, frontų truk-

mių, loginio vieneto ir loginio nulio įtampų impulsai. Šie bandomieji impulsai siunčiami į stroboskopinį maišiklį  $SM_2$  ir visus tiriamojo SAK informacijos įėjimus. SAK išėjime pakaitomis nustatoma minimali ir maksimali išėjimo įtampa (srovė). Tiriamojo SAK išėjimo impulsai patenka į pirmąjį stroboskopinį maišiklį  $SM_1$ . Į antruosius maišiklių  $SM_1$ – $SM_3$  įėjimus siunčiami trumpi stroboskopiniai impulsai iš SIF. Maišiklių  $SM_1$  ir  $SM_2$  išėjimų žemadažniai signalai stiprinami stiprintuvuose  $ST_1$  bei  $ST_2$ , o  $ST_3$  išėjime gaunamas sustiprintas  $SM_3$  „nulinio“ signalas. Šis signalas operaciniuose stiprintuvuose  $OS_1$  ir  $OS_2$  atimamas iš tiriamųjų signalų stiprintuvų  $ST_1$  ir  $ST_2$  išėjimuose ir labai sumažina keitiklių savųjų triukšmų ir trukdžių lygį.  $OS_1$  išėjimo signalas siunčiamas į impulsinę automatinio stiprinimo reguliavimo grandinę ASR.

VGTU sukurta 10 skilčių ASR schema (Kvedaras, V. *et al.* 1993) lygina impulsinio signalo nusistovėjusias vertes su nustatytais lygiais ir keičia signalo perdavimo koeficientą taip, kad nepriklausomai nuo tiriamojo SAK signalo amplitudės, jo vertė ASR išėjime būtų pastovi. ASR išėjimo signalas perduodamas į lygio nustatymo bloką LN. Šioje grandinėje tiriamasis signalas stiprinamas, ribojamas ir jo nusistovėjusi vertė fiksuojama taip, kad LN išėjime būtų lygi nuliui (ASK diapazono vidurinei vertei). 1.13 paveiksle parodyta į ASK perduodamo tiriamojo signalo dalis, kur  $t_1$ ,  $t_2$ , – ASR, LN veikimo trukmės,  $t_3$  – tiriamojo signalo dalis, kurioje yra tikrinama nusistovėjusi vertė,  $t_n$  – tikrinama nusistovėjimo trukmė;  $U_A$  – AK kodu nustatomos atskaitos lygių vertės.



1.13 pav. Tiriamojo signalo ASK įėjime diagrama

Fig. 1.13. The diagram of ADC input signal

ASK darbą kontroliuoja valdymo blokas VB. Synchroniškai nustatomai nusistovėjimo trukmės pabaigai palyginimo grandinėje PS generuojami impulsai yra siunčiami į VB. Šie impulsai stabdo ASK bei valdo ASR ir LN darbą. Pasibaigus LN darbo trukmei ( $t_2$ ), VB įjungia ASK ir perduoda synchronizacijos signalą asmeniniam kompiuteriui (AK). Pradedama tiriamojo signalo diskretizacija. ASK tiriamojo signalo akimirkinėms vertėms proporcingą kodą perduoda į AK darbinę atmintinę, kur jos įšimenamos. Pasibaigus  $t_n$ , ASK darbas stabdomas.

Jei įrašomo į AK masyvo sparta yra per didelė (pvz. per maža AK sąsajos sparta, vyksta kiti lygiagretieji procesai ir pan.), naudojama tarpinė (buferinė) atmintinė, kurios informacinė talpa (žodžiais) turi apimti visą tiriamojo signalo trukmę nuo  $t_3$  pabaigos iki  $t_n$  pabaigos:

$$S = \frac{q f_T}{2 f_1}. \quad (1.7)$$

Realiams keitikliui ir signalui reikalaujama  $S \approx 4096$  žodžių. Įsiminta vieno signalo keitimo ciklo informacija yra įvedama į AK, todėl tarpinės atmintinės talpa nėra didelė.

Įvertinant nusistovėjimo trukmę AK, reikia žinoti SAK tiriamojo signalo mažiausio reikšminio skaičiaus kodą ir laiko trukmę tarp dviejų akimirkinių signalo verčių kodų. SAK MRS kodas ASK išėjime:

$$n_{MRS} = 2^{(n-m)} \frac{U_S K_{SK}}{U_{ASK}}, \quad (1.8)$$

čia  $n$  – naudojamo ASK skilčių skaičius;  $m$  – tiriamojo SAK skilčių skaičius;  $U_S$  – vardinė tiriamojo SAK išėjimo signalo amplitudė;  $K_{SK}$  – keitiklio perdavimo koeficientas, kai SAK išėjimo signalo amplitudė lygi vardinei.

Kito SAK egzemplioriaus išėjimo signalo amplitudei turint kitą vertę, keitikliu nustatomos kitos vertės  $K_{SKi}$  taip, kad MRS vertė ASK įėjime būtų ta pati. Automatinio reguliavimo grandinė taip pat eliminuoja keitiklio savuosius išėjimo signalo dreifus bei keitiklio perdavimo koeficiento nestabilumą. Taigi nepriklausomai nuo tiriamo SAK ir jo išėjimo signalo amplitudės išsibarstymo (leidžiami išsibarstymai siekia 20 %) iš ASK gaunamas tas pats skaitmeninis nusistovėjusios vertės kodas.

Laiko trukmė tarp dviejų akimirkinių tiriamųjų signalų verčių kodų ASK išėjime:

$$t_A = \frac{t_T}{q} = \frac{(f_1 - f_2)}{f_T f_1}, \quad (1.9)$$

čia  $t_T = 1 / f_D$  – ASK diskretizavimo periodas,  $q = f_1 / (f_1 - f_2)$  – laiko mastelio transformacijos koeficientas.

Taigi nusistovėjimo trukmę galima įvertinti apdorojant ASK kvantuotą ir diskretizuotą signalą. Tačiau svarbu užtikrinti, kad ASK diskretizavimo dažnis būtų pakankamai stabilus, nes jo nestabilumas, kaip matoma iš (1.11) sukelia įvertinimo rezultato neapibrėžtis.

## 1.6.2. Skaitmeninis signalo apdorojimas

Kaip jau buvo minėta keitiklio savuosius triukšmus sukelia keitiklio grandinėje naudojamų elektroninių elementų savieji triukšmai, o šie savieji triukšmai veikia nusistovėjimo trukmės įvertinimo rezultatą du kartus – tikrinant SAK išėjimo signalo nusistovėjusią vertę ir nustatant pačią nusistovėjimo trukmę. Darbe (Kvedaras, V. *et al.* 2003) buvo parodyta, kad didesnio skilčių skaičiaus SAK nusistovėjimo trukmės tyrimas yra sudėtingas dėl ypač mažų atskaitos lygių, kas nulemia, kad tiriamąjį signalą tampa sudėtinga išskirti triukšmų fone. Dėl šios priežasties siekiant kiek galima padidinti nusistovėjimo trukmės matavimo patikimumą tenka imtis metodų šių triukšmų įtakos įvertinimo rezultatui ir jo neapibrėžtims mažinti. Savųjų triukšmų ir trukdžių mažinimui tikslinga naudoti skaitmenines signalų apdorojimo priemones.

Darbe (Kvedaras, R. *et al.* 2008), tolimesniais tyrimais buvo siekiama nustatyti kiek galima padidinti nusistovėjimo trukmės tikrinimo efektyvumas apdorojant gautą matavimo verčių masyvą skaitmeninėmis priemonėmis.

Gautos SK išėjimo signalo modelio realizacijos pasiūlyta apdoroti LabView<sup>®</sup> paketu atliekant numatytas procedūras:

- a) pradinį signalo filtravimą (tačiau reikia paminėti, kad šioje tyrimo stadijoje procedūra neatliekama);
- b) signalo realizacijų sutapdinimą laike;
- c) signalo realizacijų sutapdinimą pagal nusistovėjusias vertes;
- d) vidurkinto signalo gavimą;
- e) nusistovėjusios signalo vertės nustatymą;
- f) atskaitos lygių nustatymą;
- g) nusistovėjimo trukmės pradžios diskretinės vertės numerio nustatymą;
- h) nusistovėjimo trukmės pabaigos diskretinės vertės numerio nustatymą;
- i) nusistovėjimo trukmės skaičiavimą ir lyginimą su idealaus SAK išėjimo signalo nusistovėjimo verte.

Įgyvendinus šias procedūras darbe (Kvedaras, V. *et al.* 2003; Kvedaras, R. *et al.* 2008) pateikta LabView<sup>®</sup> paketu sukurta valdymo algoritmas, apjungianti visą numatytą tyrimo strategiją į vieningą valdymo sistemą. Šioje sistemoje galima lengvai keisti veikiančio baltojo triukšmo ir nestabilumų parametrus bei vidurkinamų signalo realizacijų skaičių. Be to, galima atlikti didelį skaičių matavimų ir atlikti idealaus bei realaus signalo po skaitmeninio apdorojimo nusistovėjimo laikų statistinę analizę. Taip atliekamas skaitmeninio signalo algoritmo efektyvumo įvertinimas.

Nustatyta, kad su esama aparatine įranga (įvertinant triukšmų lygius ir nestabilumą) galima pasiekti ne daugiau 3 % matavimo neapibrėžtis tikrinant 12

skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmės, nustačius 0,5 mažiausios skilties vertės atskaitos lygius. Nustatyta, kad skaitmeninis signalo apdorojimo algoritmas, net netaikant pradinio SK signalo filtravimo, efektyviai eliminuoja signalo realizacijų pradinių momentų nesutapimus bei nusistovėjusios signalo vertės nestabilumą bei efektyviai mažina SK vidinių triukšmų įtaką. Priklausomai nuo triukšmų amplitudės būtina užtikrinti pakankamą signalo realizacijų, paduodamų į skaitmeninį signalų apdorojimo algoritmą, skaičių.

Nors sukurtas tiriamojo signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmas leido sumažinti savųjų triukšmų įtaką matavimo nuokrypoms, tačiau matavimai turi eilę trūkumų: esant didesniai triukšmų lygiui būtina apdoroti didelį signalo realizacijų kiekį, kurio apdorojimas LabView<sup>®</sup> paketu trunka ilgai (500 realizacijų apdorojimas trunka apie 30 sek.), didėjant tiriamųjų SAK skilčių skaičiui auga matavimo nuokrypos, nors apdorojamų tiriamųjų signalų skaičius yra didelis, nėra algoritmo tyrimo rezultatų kintant signalo nestabilumo pobūdžiams (signalų pradžios nestabilumo (drebinimo), signalo amplitudės nestabilumo ir tiriamos matavimo nuokrypos, atsirandančios dėl nusistovėjusio signalo vertės nestabilumo ir triukšmo įtampos) ir jų įtakos SAK išėjimo signalo nusistovėjimo trukmės tikrinimui, pateiktame algoritme nėra įgyvendintas pradinis signalų skaitmeninis filtravimas. Dėl to tolimesniuose tyrimuose būtina įvertinti šiuos trūkumus ir įgyvendinti pradinį skaitmeninį signalų filtravimą.

## 1.7. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas

Analizuojant sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo metodus ir prietaisus nustatytos sekantys trūkumai ir problemos.

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad šiuo metu dar nėra nusistovėjusi dinaminų parametrų ir ypač nusistovėjimo trukmių tikrinimo terminija, todėl pastaruoju metu didelis dėmesys skiriamas SAK dinaminų parametrų metrologijos klausimams: šių parametrų, o ypač SAK nusistovėjimo trukmių apibrėžimų ir tikrinimų vienovės klausimams.

2. Nustatyta, kad SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimas yra sudėtinga problema dėl SAK didelės spartos (nuo vienetų nanosekundžių), didelio jų skilčių skaičiaus (iki 24 skilčių) ir ypač mažos jų klaidos srities. Šios srities ribos, didėjant tiriamojo SAK skilčių skaičiui mažėja.

3. Literatūros analizė parodė, kad šiuo metu praktikoje yra naudotini stroboskopiniai oscilografiniai ir automatizuoti specialūs nusistovėjimo trukmės tikrinimo metodai. Naudojant oscilografinius matavimo metodus susiduriama su oscilografų perkrovimo ir jų riboto jautrumo problemomis. Šios problemos sprendžiamos, naudojant specialiuosius stroboskopinius keitiklius ir tikslius stiprintuvus. Sukurtas stroboskopinis keitiklis, kuris leidžia tikrinti 16–18 skilčių

sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes, kai nustatyta 1 MRS klaidos sritis, tačiau išlieka pagrindinis šio metodo trūkumas: tikrinimas neautomatizuotas, jį vykdo aukštos kvalifikacijos specialistas.

4. Analizuojami automatizuoti specialieji nusistovėjimo trukmės tikrinimo prietaisai yra perspektyvesni, nes leidžia padidinti tikrinimų našumą, nereikalauja aukštos kvalifikacijos specialistų. Juose naudojami kompensaciniai stroboskopiniai pikinio detektavimo keitikliai, atgalinis laiko mastelio keitimas, signalo pakeistu laiko masteliu amplitudės nustatymas ir nusistovėjimo trukmės tikrinimas, tačiau dėl keitiklių savųjų triukšmų lygio šiuo metu galima tikrinti tik iki 10 skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes, kai nustatyta 1 MRS klaidos sritis. Naudojant naujus sprendimus ir įtaisus, bei keičiant keitiklio struktūrą reikia sumažinti šių keitiklių savųjų triukšmų lygį.

5. Automatizuotuose matuokliuose įdiegus tiriamojo signalo keitimą į akimirkinių verčių skaitmeninį masyvą, jo persiuntimą į AK, skaitmeninį signalo apdorojimą bei nusistovėjimo trukmės įvertinimą, automatizuotu metodu galima tikrinti iki 14 skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes, kai nustatyta 1 MRS klaidos sritis. Darbe tiriamas tik savųjų baltojo tipo triukšmų įtaka tikrinimo nuokrypoms. Tačiau nėra atlikta tyrimų, rodančių šio signalo apdorojimo teikiamas potencines galimybes, kokie keitiklio savieji triukšmai turi didžiausią įtaką tikrinimo nuokrypoms, be to reikalingi tyrimai leidžiantys parinkti ar sudaryti skaitmeninio SAK tiriamųjų signalų apdorojimo algoritmus, leidžiančius žymiai efektyviau slopinti keitiklių savuosius triukšmus.



---

## Nauji specialiųjų stroboskopinių keitiklių grandynai

Šioje dalyje yra tiriamos galimybės sukurti naują, paprastesnį, bet turintį didesnes funkcines galimybes ir parametrus specialiojo kompensacinio stroboskopinio keitiklio grandyną. Nagrinėjami reikalavimai tokiam keitikliui, aprašomas sudaryto stroboskopinio žingsnio formavimo ir tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu stiprinimo ir keitimo skaitmeniniu masvyu grandynų veikimas. Nustatytos priklausomybės surišančios ASK diskretizavimo ir kvantavimo žingsnius su tiriamojo SAK mažiausiu reikšminiu skaičium.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Ustinavičius *et al.* 2009a).

### 2.1. Specialiojo keitiklio stroboskopinio žingsnio formavimo schemos sudarymas

Kaip buvo parodyta 1 dalyje, vienas iš perspektyviausių metodų tikrinti sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes yra automatizuotų specialiųjų stroboskopinių keitiklių naudojimas. Jau ilgą laiką specialiuosiuose stroboskopiniuose keitikliuose skirtuose sparčiųjų SAK dinaminiais parametrams matuoti, yra

naudojami: kompensacinis stroboskopinis keitiklis, dviejų kvarcinių generatorių stroboskopinio žingsnio formavimo ir tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu automatinio stiprinimo reguliavimo grandynai (Kvedaras, V. *et al.* 1993). Tokia keitiklių struktūra leido pasiekti santykinai žemą savųjų triukšmų lygį (60–100  $\mu\text{V}$ ), gauti stabilų ir pastovų stroboskopinį žingsnį, tikslius signalo nusistovėjusių verčių ir atskaitos lygių nustatymus. Sukurti ir pagaminti įrenginiai užtikrino 10 skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimą 10–100 ns diapazone su nuokrypomis neviršijančiomis  $\pm 10\%$ . Tačiau šie keitikliai yra pakankamai sudėtingi: juose naudojami kompensaciniai pikinio detektavimo maišikliai, pakankamai sudėtingi tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu stiprinimo, automatinio stiprinimo reguliavimo ir apdorojimo grandynai, ribotų funkcinių galimybių žingsnio formavimo grandynai. Žingsnio formavimo grandyne naudojami du kvarciniai generatoriai, o pastovus generatorių dažnio skirtumas palaikomas fazės reguliavimo grandynu. Sudėtingi tiriamojo signalo stiprinimo, automatinio stiprinimo reguliavimo ir apdorojimo grandynai, savo ruožtu yra padidintų savųjų triukšmų šaltiniai.

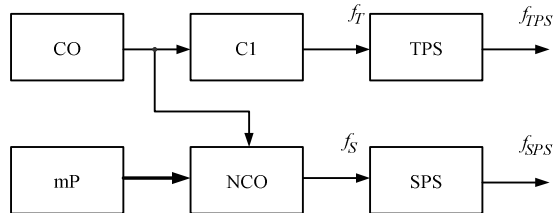
Sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo testeriuose iki šiol buvo naudojama stroboskopinio žingsnio su dviem kvarciniais generatoriais grandinė. Ši grandinė, kai kvarcinių generatorių generuojamų signalų skirtuminis dažnis yra palaikomas impulsinės fazės paderinimo schemos, palaiko pastovų transformacijos koeficientą ir yra sąlyginai nesudėtinga (Kvedaras, V. *et al.* 1993). Tačiau tokia grandinė yra labai specializuota: joje būna nustatoma viena laiko mastelio transformacijos vertė ir keitimo metodas (pvz., nuoseklusis arba atgalinis laiko mastelio keitimas). Nusistovėjimo trukmės tikrinimo procesas, naudojant stroboskopinius keitiklius, būtų daug lankstesnis, jei stroboskopinio žingsnio nustatymo grandinė leistų pasirinkti laiko mastelio transformacijos keitimo metodą, transformacijos koeficiento dydį, keletą bandomųjų impulsų pasikartojimo dažnių ir pan.

Vienas iš kelių tobulinant stroboskopinio žingsnio formavimo grandyną, yra jo funkcinių galimybių išplėtimas. Tokios papildomos funkcinės galimybės būtų: laiko mastelio transformacijos koeficiento ir metodo (tiesioginis ir atgalinis mastelio keitimas, strobavimas viename taške ir pan.) keitimas, stroboskopinių impulsų laiko padėties (vėlinimo) keitimas skaitmeniniu metodu.

Sudarytos naujos skaitmeninio nustatymo stroboskopinio žingsnio formavimo schemos variantas, kuriame naudojamas kodu valdomas generatorius pateiktas 2.1 paveiksle. Šioje schemoje CO – kvarcinis generatorius, C1 – dažnio daliklis, TPS – bandomųjų impulsų formuotuvas, mP – mikroprocesorius, NCO – kodu valdomas generatorius, SPS – stroboskopinių impulsų formuotuvas.

Šiandien pramonė gamina kodu valdomų generatorių (NCO) grandynus, kurių išėjimo signalo dažnis, o dažnai ir jų fazė gali būti nustatomi ir keičiami plačiose ribose į generatorių siunčiamu valdymo kodu (Analog Device 1996). Kodu

valdomų generatorių išėjimo signalų dažnis nustatomas kaip diskretinių dažnių aibė, o žingsnio dydis tarp gretimų generatoriaus dažnių verčių priklauso nuo generatoriaus valdymo kodo skilčių skaičiaus.



**2.1 pav.** Skaitmeninio nustatymo stroboskopinio žingsnio formuotuvo struktūrinė schema

**Fig. 2.1.** Structural diagram of numerical setting sampling step former

Skaitmeninio nustatymo stroboskopinio žingsnio formavimo grandynas veikia taip. Kvarcinis generatorius CO skirtas generuoti kodu valdomo generatoriaus (NCO) sinchronizacijos signalams ir paleisti bandomųjų impulsų formuotuvą TPS (padalinus CO signalo dažnį dažnio daliklyje C1). CO dažnis nustatomas pagal NCO reikalavimus, o reikiamas bandomųjų impulsų pasikartojimo dažnis  $f_T$  gaunamas padalinus CO dažnį, dažnio daliklyje C1. Pavyzdžiui, kodu valdomam generatoriui AD9831, CO dažnis gali būti parinktas  $f_{CO} = 25$  MHz, o reikiamas bandomųjų impulsų dažnis  $f_T = 1$  MHz, gaunamas nustačius dažnio daliklio dalinimo koeficientą lygų  $p_T = 25$ .

Tuo būdu, panaudojus tokius NCO generatorius SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaise, galima nustatyti skirtingas transformacijos koeficiento vertes, kuriuos apspręs nustatomas kodu valdomo generatoriaus dažnis, o NCO perderinimo žingsnis apsprendžia koeficiento keitimo dydį. Čia reikia pažymėti, kad ankstesniuose nusistovėjimo trukmės tikrinimo grandynuose transformacijos koeficiento vertė buvo priimama tokia, kad nusistovėjimo trukmės tikrinimo grandynas būtų paprasčiausias (pvz.,  $q = 10000$ ). Nusistovėjimo trukmių tikrinimo prietaise, kuriame panaudotas siūlomas stroboskopinis žingsnio formavimo grandynas, o signalai papildomai apdorojami ir nusistovėjusi vertė nustatoma AK, transformacijos koeficiento vertė gali būti bet kokio tinkamo ir žinomo dydžio.

Laiko mastelio transformacijos koeficientą, kaip žinia, keitikliuose apsprendžia stroboskopinių impulsų vėlinimas bandomųjų impulsų atžvilgiu arba bandomųjų impulsų ir stroboskopinių impulsų dažnių skirtumas (pvz.,  $f_{TPS} = 1$  MHz,  $q = 10000$ , tai dažnių skirtumas tarp bandomųjų ir stroboskopinių impulsų dažnių turės būti  $F_S = f_{TPS} - f_{SPS} = 100$  Hz). Todėl, jei NCO generatoriaus dažnio

perderinimo žingsnis yra per didelis (generatoriaus dažnio valdymo kodo skilčių skaičius yra nepakankamas), gali būti neįmanoma nustatyti priimtinas laiko mastelio transformacijos vertes.

Kodu valdomo generatoriaus generuojamo išėjimo signalo dažnis nustatomas iš mikroprocesoriaus persiunčiamu ir įrašomu į generatoriaus vidinį registrą valdymo kodu (Analog Device 2004). Nustatyto signalo dažnio generatoriaus išėjimo vertė:

$$f_s = \frac{rk_d f_{CO}}{2^{n_n}}, \quad (2.1)$$

čia  $r$  – dešimtainis generatoriaus dažnio nustatymo  $2^{n_n}$  skilčių kodas;  $n_n$  – generatoriaus valdymo žodžio skilčių skaičius;  $f_{CO}$  – kvarcinio generatoriaus dažnis;  $k_d$  – generatoriaus vidinio dažnio daugintuvo dauginimo koeficientas (jei daugintuvo nėra arba jis nenaudojamas –  $k_d = 1$ ).

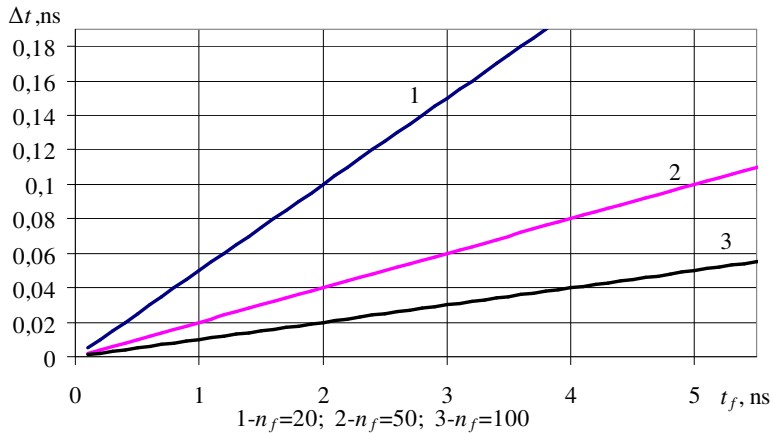
Laiko mastelio transformacijos koeficientas šiuo atveju bus lygus:

$$q = \frac{f_T}{f_T - f_s} = \frac{\frac{f_{CO}}{p_T}}{\frac{f_{CO}}{p_T} - \frac{k_d r f_{CO}}{2^{n_n}}} = \frac{\frac{1}{p_T}}{\frac{1}{p_T} - \frac{k_d r}{2^{n_n}}} = \frac{\frac{1}{p_T}}{\frac{1}{p_T} - \frac{k_d r}{2^{n_n}}} = \frac{2^{n_n}}{2^{n_n} - k_d r p_T}, \quad (2.2)$$

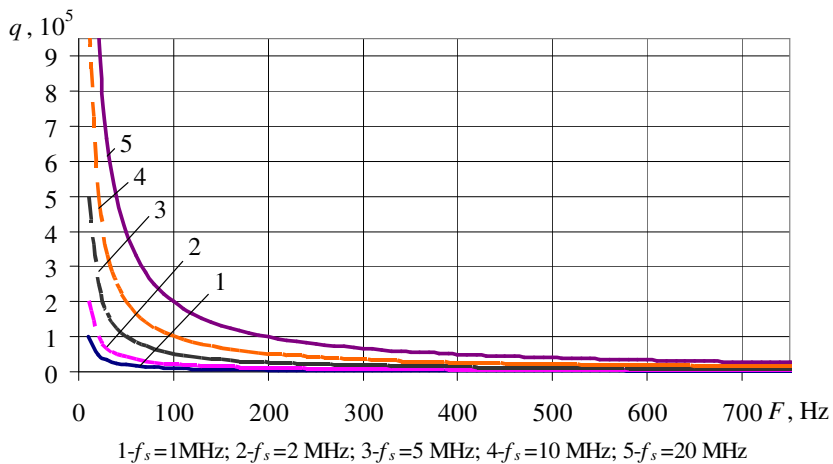
čia  $p_T$  – dažnio daliklio, dalinančio kvarcinio generatoriaus išėjimo signalo dažnį, dalinimo koeficientas, jei jo nėra  $p_T = 1$  (šie koeficientai gali būti skirtingi dėl realizavimo patogumo, pvz., AD9851  $f_{CO}$  turi būti 30 MHz, tai, kad būtų  $f_T = 1$  MHz,  $p_T = 30$ , o  $f_{NCO}$  gali būti ir 1 MHz).

Stroboskopiniame keitiklyje nustatomi transformacijos koeficientas  $q$  ir stroboskopinis žingsnis  $\Delta t$  yra tarpusavyje susiję dydžiai. Nustačius mažą transformacijos koeficientą  $q$ , sumažės tiriamojo signalo periodas pakeistu masteliu, sutrumpės nusistovėjimo trukmės tikrinimo laikas, bet išaugs stroboskopinis žingsnis  $\Delta t$  ir dėl to gali padidėti nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypa. Ir atvirkščiai – nustačius didelį transformacijos koeficientą  $q$ , padidės tiriamojo signalo periodas pakeistu masteliu, išaugs nusistovėjimo trukmės tikrinimo laikas, bet sumažės stroboskopinis žingsnis  $\Delta t$  ir dėl to mažės nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypa. Todėl prietaise transformacijos koeficientas turi būti nustatytas optimaliose ribose, kai tikrinimo našumas yra priimtinas, o nuokrypa dėl baigtinio stroboskopinio žingsnio dydžio  $\Delta t$  iš esmės nepadidėja. Tiksliuose stroboskopiniuose keitikliuose dažniausia yra priimama, kad tiriamojo signalo frontui tektų ne mažiau kaip 20–100 stroboskopinių impulsų (Kvedaras, V. 2005). Maksimalių leidžiamų stroboskopinių žingsnių (kai  $\Delta t = 20t_{fmin}$ ) dydžių priklausomybė nuo mažiausių tiriamojo signalo frontų trukmių pateikta 2.2 pa-

veiksle. Transformacijos koeficiento  $q$  priklausomybė nuo skirtuminio dažnio pateikta 2.3 paveiksle.



**2.2 pav.** Maksimalaus leidžiamo stroboskopinio žingsnio dydžio priklausomybė nuo mažiausios tiriamojo signalo fronto trukmės  
**Fig. 2.2.** The dependence of maximum sampling step size on minimal testing signal front time



**2.3 pav.** Laiko mastelio transformacijos koeficiento priklausomybė nuo generatoriaus skirtuminio dažnio  
**Fig. 2.3.** The dependence of time scale transformation coefficient to differential frequency of generators

Įvertinus šias pastabas galima nustatyti reikaujamą mažiausią skaitmeninio derinimo generatoriaus dažnio keitimo žingsnio dydį. Iš vienos pusės, skaitmeninio derinimo generatoriaus dažnio perderinimo žingsnis turi būti toks, kad žinant tiriamųjų SAK frontų trukmes bei reikalaujamus bandomųjų impulsų dažnius, galima būtų nustatyti stroboskopinį žingsnį mažesnį už reikaujamą maksimalią stroboskopinio žingsnio vertę. Iš kitos pusės, turi būti galimybė nustatyti generatoriaus dažnį tokį, kad laiko mastelio transformacijos koeficientas nebūtų per daug didelis ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo laikas nebūtų per daug ilgas. Dažnių skirtumas tarp stroboskopinių bandomųjų impulsų dažnių, tam, kad būtų įvykdyta pirmoji sąlyga, turi būti:

$$\Delta t \leq \frac{t_{fmin}}{n_z}; \quad \Delta t = \frac{F_{Smaks}}{f_T^2}; \quad \frac{t_{fmin}}{n_z} \geq \frac{F_{Smaks}}{f_T^2}; \quad F_{Smaks} \leq \frac{f_T^2 t_{fmin}}{n_z}, \quad (2.3)$$

čia  $F_{Smaks}$  – maksimali skirtuminio dažnio vertė;  $t_{fmin}$  – tiriamųjų SAK minimali frontų vertė;  $f_T$  – bandomųjų impulsų pasikartojimo dažnis;  $n_z$  – priimtas minimalus stroboskopinių impulsų skaičius tenkantis tiriamojo signalo frontui.

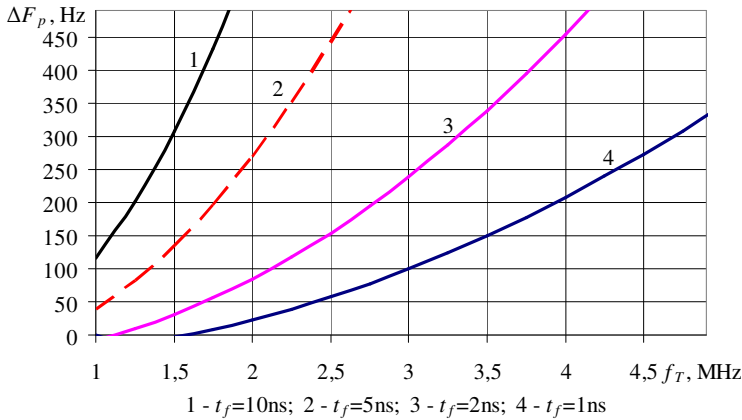
Maksimali priimtina transformacijos koeficiento vertė  $q_M$ , atsižvelgiant į nusistovėjimo trukmės tikrinimo laiką, gali būti paprastai išreikšta priimtinu minimaliu dažnių tarp stroboskopinių ir bandomųjų impulsų skirtumu  $F_{Smin}$  (pvz., 25 Hz, 50 Hz ir pan.).

Tada skaitmeninio derinimo generatoriaus maksimalus leidžiamas perderinimo žingsnis turi būti:

$$\Delta F_{Sp} = \frac{F_{Smaks} - F_{Smin}}{k_{at}} = \frac{\frac{f_T^2 t_{fmin}}{n_z} - F_{Smin}}{k_{at}} = \frac{f_T^2 t_{fmin} - F_{Smin} n_z}{k_{at}}, \quad (2.4)$$

čia  $k_{at}$  – atsargos koeficientas.

Generatoriaus NCO maksimalaus leidžiamo dažnio perderinimo žingsnio priklausomybė nuo tiriamojo SAK išėjimo impulsų fronto trukmės, prie skirtingų bandomųjų signalų pasikartojimo dažnių pateikta 2.4 paveiksle. Kaip matyti iš grafikų, mažėjant tiriamųjų frontų trukmėms ir bandomųjų impulsų dažniams perderinimo žingsnio dydis mažėja. Nustačius  $F_{Smin} = 50$  Hz, perderinimo žingsnio vertė tampa neigiama kai  $f_T \leq 1,5$  MHz ir  $t_{fmin} \leq 1$  ns bei  $f_T \leq 1$  MHz ir  $t_{fmin} \leq 2$  ns, tai reiškia, kad pasirinktų  $\Delta t_{maks}$  ir  $F_{Smin}$  reikšmių patenkinti šiomis sąlygomis negalima. Skaitmeninio valdymo generatoriai paprastai turi apibrėžtą perderinimo diapazoną  $\Delta F_{DNCO}$ .



**2.4 pav.** Skaitmeninio valdymo generatoriaus dažnio nustatymo žingsnio maksimalios galimos vertės priklausomybė nuo bandomųjų impulsų dažnio prie skirtingų tiriamojo signalo fronto trukmių

**Fig. 2.4.** Maximum value of frequency adjustment step of numericcally control generator depends from frequency of test pulses, when different testing signal front time

Pagal nustatytas bandomųjų impulsų dažnio, SAK tiriamųjų impulsų frontų vertes, priimtą minimalią skirtuminio dažnio  $F_s$  vertę iš 2.4 paveikslo galima nustatyti reikalingą maksimalią generatoriaus dažnio perderinimo žingsnio vertę. Tada generatorius turi turėti:

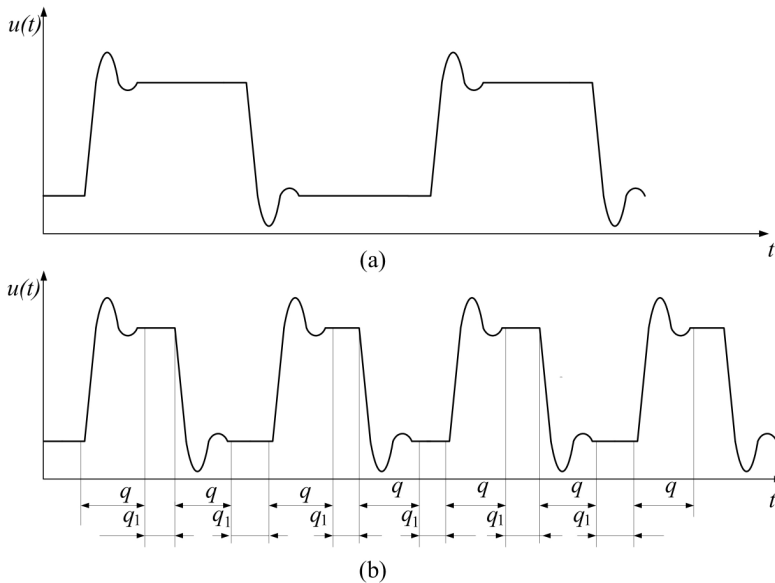
$$n_{p(10)} = \frac{\Delta F_{DNCO}}{\Delta F_p}, \quad (2.5)$$

žingsnių.

Sakykim, NCO diapazonas  $\Delta F_{DNCO} = 25\text{ MHz}$  ir  $\Delta F_p = 50\text{ Hz}$ , tai  $n_p = 500000$ , ir gaunama  $2^{19} = 524288$ , taigi reikia 19 skilčių generatoriaus valdymo žodžio, o jei  $\Delta F_{DNCO} = 180\text{ MHz}$  ir  $\Delta F_p = 50\text{ Hz}$ , tai  $n_p = 3600000$ , ir  $2^{21} = 4194304$ .

Tikrinimo trukmė gali būti sumažinta, nes daugelis pramoninių skaitmeninio valdymo generatorių grandynų turi du ar keturis vidinius generatoriaus valdymo žodžių atminties registrus, o signalų dažnis perjungiamas taip, kad fazės kitimas generatoriaus išėjime liktų tolydinis. Todėl nusistovėjimo trukmių tikrinimui naudojant tiriamųjų signalų apdorojimą AK, stroboskopinio žingsnio vertė gali būti lengvai nustatoma dviejų skirtingų verčių – maža, parinkta pagal 2.2 paveikslą, kai tiriamos greitai kintančios tiriamojo signalo dalys (pvz., frontai ar

signalu sritys arti nusistovėjimo tikrinimo atskaitos verčių) ir didelė, kai tiriamos lėtai kintančios signalo dalys (pvz., impulsų nusistovėjusios dalys) (2.5 pav.).



**2.5 pav.** Tiriamojo signalo pavyzdžiai stroboskopinio keitiklio išėjime: a – nustačius pastovų laiko mastelio transformacijos koeficientą  $q$ ; b – nustačius du skirtingus laiko mastelio transformacijos koeficientus  $q > q_1$

**Fig. 2.5.** The examples of testing signal in sampling converter output: a – when setting constant time scale transformation coefficient  $q$ , b – when setting two different time scales transformation coefficients  $q > q_1$

Kai generatoriaus dažnis nustatomas skaitmeniniu kodu, tai, kaip minėta anksčiau, transformacijos koeficientų ir tuo pačiu stroboskopinių žingsnių vertės gali būti nustatytos tik diskretinių verčių. Įvertinant reikiamą perderinimo žingsnį išraiškoje (2.4) buvo priimta, kad generatoriaus bent vienu perderinimo žingsniu bus gautos priimtinos  $q$  ir  $\Delta t$  vertės. Norint realizuoti 2.4 pateiktą keitiklio darbo pavyzdį perderinimo žingsnių turi būti daugiau. Priimkim, kad generatoriaus perderinimo diapazonas  $\Delta F_D = 25$  MHz, valdymo žodis – 28 skiltys. Tada transformacijos koeficiento vertė, pakeitus generatoriaus valdymo kodą 1 MRS vienetu, pakis 0,343 vieneto (priėmus, kad  $q$  dydis dažniausia būna tarp tūkstančių ir dešimčių tūkstančių, tai perderinimo žingsnis nykstamai mažas dydis).

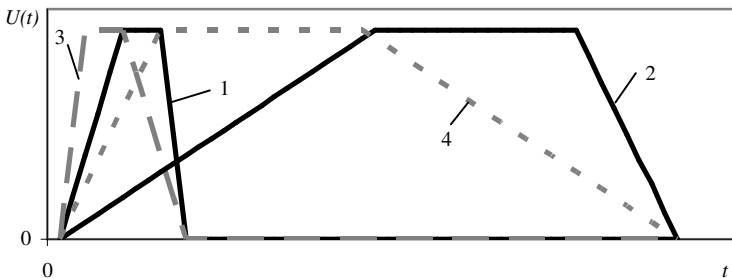
Kodu valdomo generatoriaus NCO išėjimo impulsų dažnį galima nustatyti užduotu dydžiu mažesnę už CO dažnį, užduotu dydžiu didesnę už jį arba lygų generatoriaus CO išėjimo signalo dažniui. Ši NCO generatoriaus savybė leidžia

žymiai išplėsti grandyno funkcines galimybes: a) stroboskopinių impulsų dažnį nustačius užduotu dydžiu mažesni už bandomųjų impulsų dažnį ( $f_{SPS} < f_{TPS}$  arba  $\frac{f_{SPS}}{p_d} < f_{TPS}$ ) realizuojamas nuoseklusis tiriamųjų signalų laiko mastelio keitimas

(signalas išėjime yra analogiškas signalui įėjime, bet pakeistu laiko masteliu (2.6 pav. 1 kreivė), pakeitus NCO generatoriaus dažnį nedidelėse ribose, keičiamas signalo laiko mastelio transformacijos koeficientas (2.6 pav. 2 kreivė); b) stroboskopinių impulsų dažnį nustačius užduotu dydžiu didesni už bandomųjų impulsų dažnį ( $f_{SPS} > f_{TPS}$  arba  $\frac{f_{SPS}}{p_d} > f_{TPS}$ ) realizuojamas atgalinis tiriamųjų sig-

nalų laiko mastelio keitimas (signalas išėjime yra analogiškas signalui įėjime pakeistame laiko mastelyje, bet keičiamas nuo galinio fronto link priekinio (2.6 pav. 3 kreivė)), pakeitus generatoriaus dažnį nedidelėse ribose, keičiamas signalo laiko mastelio transformacijos koeficientas (2.6 pav. 4 kreivė); c) stroboskopinių impulsų dažnį nustačius lygų bandomųjų impulsų dažniui ( $f_{SPS} = f_{TPS}$  arba  $\frac{f_{SPS}}{n_d} = f_{TPS}$ ) realizuojamas tiriamųjų signalų strobavimas viename taške.

Šiame režime keitiklio išėjimo įtampa  $U_{I\check{z}_z} = KU_z$ , čia  $U_z$  – vienos tiriamojo signalo akimirkinės vertės  $z$  keitiklio įėjime įtampa (2.8 pav.).

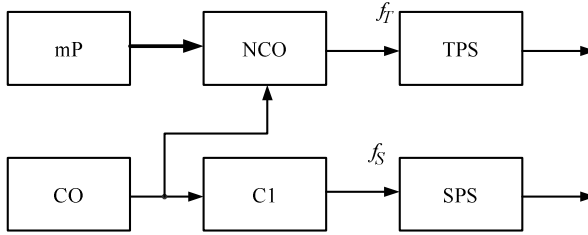


**2.6 pav.** Keitiklio išėjimo signalo vaizdas, keičiant NCO signalų dažnį

**Fig. 2.6.** The view of converter output signal changing NCO signal frequency

Pramonės gaminamų NCO generatorių išėjimo signalo dažniai kodu nustomi, bet kokios vertės jo darbo diapazone. Kai kurių NCO generatorių išėjime sumontuoti specialūs juostiniai filtrai, o išėjime gali būti gaunami dar didesnio dažnio signalai (pvz., AD9851 iki 240 MHz). Modernizavus stroboskopinio žingsnio formavimo schemą (2.7 pav.), o NCO generatoriaus dažnį nustačius

$f_{NCOI} = n_g f_{NCO}$ , čia  $n_g = 2, 3, \dots$ , tada TPS impulsų siunčiamų į tiriamąją schemą dažnis yra  $n_g$  kartų didesnis už stroboskopinių impulsų dažnį. Šiuo atveju, stroboskopinis impulsas generuojamas kas  $n_g$  tiriamojo signalo periodų, gaunamas stroboskopinis laiko mastelio keitimas laiko imčių metodu, ir vyksta normalus tiriamojo signalo laiko mastelio keitimas. Todėl ši schema leidžia sudaryti prietaisus, kurių įėjimo signalo dažniai gali būti NCO generatorių darbo diapazone ir tenkina sąlygą  $f_{NCOI} = n_g f_{NCO}$ .



**2.7 pav.** Skaitmeninio valdymo ir kelių bandomųjų signalų dažnių stroboskopinio žingsnio formavimo struktūrinė schema

**Fig. 2.7.** The formation of digital steering and several testing signal frequency sampling step

### 2.1.1. Transformacijos koeficientas ir stroboskopinis žingsnis

Kaip minėta aukščiau, jeigu TPS išėjimo signalų dažnis  $f_{TPS} = f_{CO}/p$  yra didesnis už SPS formuotuvo išėjime generuojamų impulsų dažnį  $f_{SPS} = \frac{6rf_{CO}}{p2^{32}}$ , tai grandynas veikia nuoseklaus laiko mastelio keitimo režimu. Tada signalo transformacijos koeficientas ir stroboskopinis žingsnis bus:

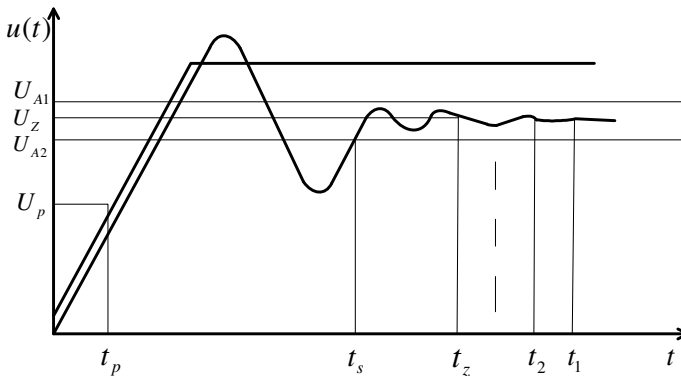
$$q = \frac{f_{TPS}}{f_{TPS} - f_{SPS}} = \frac{2^{32}}{2^{32} - 6rcp_T}, \quad (2.6)$$

$$\Delta t = \frac{f_{TPS} - f_{SPS}}{f_{TPS}^2} = \frac{p_T(2^{32}p_T - 6rcp_T)}{2^{32}p_T f_{CO}}. \quad (2.7)$$

Kai  $f_{SPS}$  nustatomas aukštesnis už  $f_{TPS}$ , tada nustatomas atgalinis laiko mastelio keitimas, o transformacijos koeficientas ir stroboskopinis žingsnis yra toks pat kaip ir pirmu atveju (2.6) ir (2.7).

### 2.1.2. Strobavimo viename taške režimo nustatymas

Jei generatoriaus dažnis bus nustatytas lygus  $f_T = n_d f_s$ , tai stroboskopinis keitiklis pereis į strobavimo viename taške režimą ir stroboskopinio keitiklio maišiklio diodas visą laiką bus atidaromas vienu laiko momentu  $t_z$ , o į keitiklio išėjimą bus siunčiama įtampa  $U_z$  (2.8 pav.). Momentą  $t_z$  apspręs bandomojo ir stroboskopinio impulsų tarpusavio padėtis laike. Iš NCO generatoriaus generuojamų sinusinės formos signalų vidiniame (pvz., AD9851 grandyne) ar išoriniame komparatoriuose formuojami impulsiniai signalai. Todėl, keičiant generatoriaus generuojamo sinusinio signalo fazę, galima keisti suformuotų impulsų sekos laiko padėtį.



**2.8 pav.** Nusistovėjusių verčių  $U_z$  nustatymas realiaame tiriamajame signale, strobuojant viename taške

**Fig. 2.8.** Determination of settling value  $U_z$  of real testing signal, when used sampling in one point mode

Daugelis pramoninių generatorių gali iš mikroprocesoriaus persiunčiamu valdymo kodu keisti išėjimo signalo fazę. Kodu nustatoma signalo fazės vertė yra lygi:

$$\varphi_{rNCO} = \frac{2\pi s}{2^{n_f}}, \quad (2.8)$$

čia  $s$  – dešimtainis fazės nustatymo kodas;  $n_f$  – generatoriaus fazės nustatymo skilčių skaičius.

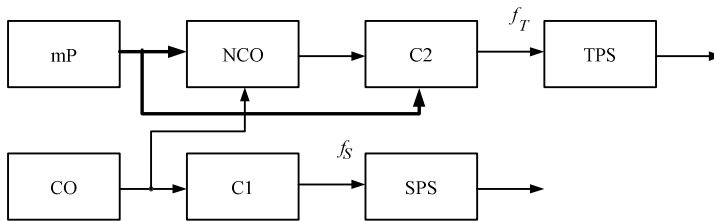
Keičiant išėjimo signalo fazę, suformuoto bandomojo impulso vėlinimas pakis žingsniu

$$t_{rNCO} = \frac{2\pi}{2^{n_f} f_{NCO}}. \quad (2.9)$$

Tuo būdu, keičiant generatoriaus fazės valdymo kodą galima keisti išėjimo impulsų vėlinimo trukmės vertę. Daugumos generatorių fazės posūkio reguliavimo kodas turi 12 skilčių. Tada nustačius NCO generatoriaus dažnį lygų 1 MHz, stroboskopinio impulso postūmio žingsnis yra  $t_{rNCO} = 1,5$  ns.

Daugumas generatorių turi įmontuotus keturis fazės posūkio kampo nustatymo registrus. Į šiuos 12 skilčių registrus iš anksto gali būti įrašomos reikiamos fazių vertės ir generatoriaus adresų signalais PSELn vienas iš šių registrų prijungiamas prie generatoriaus fazių sumavimo schemos, pakeisdamas generatoriaus formuojamo signalo fazę užduota verte. Į šiuos registrus gali būti įrašyti fazės valdymo kodai, kurie nustato stroboskopinio impulso padėtį laike taip, kad keitiklio išėjime būtų signalo nusistovėjusios vertės. Nusistovėjusių tiriamojo signalo verčių nustatymas, naudojant strobavimo viename taške režimą, gali sumažinti nusistovėjusių verčių tikrinimo nuokrypas ir sutrumpinti šio proceso trukmę.

SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimui taip pat gali būti naudojamas strobavimo viename taške režimas. Tačiau šiuo atveju stroboskopinio impulso vėlinimo keitimo žingsnis gali būti per didelis. Buvo išnagrinėta galimybė sumažinti galimą stroboskopinio žingsnio keitimo dydį. Sudaryta mažo žingsnio formavimo schema pateikta 2.9 paveiksle.



**2.9 pav.** Strobavimo viename taške skaitmeninio žingsnio formavimo struktūrinė schema

**Fig. 2.9.** Structural diagram of numerical setting sampling in one point step former

Šioje schemoje generatoriaus NCO dažnis nustatytas  $p_T$  kartų (pvz., 16 kartų) didesnis, o reikiamas tikrinimui signalų dažnis gaunamas impulsų skaitiklio C2, dalinančio signalo dažnį  $p_T$  kartų, išėjime. Reikia turėti omenyje, kad fazės valdymo kodas persiunčiamas į NCO, daliklio C2 išėjime keičia fazę (laiko poslinkį) tik  $2\pi/p_T f_{NCO}$  diapazone.

Pasirinkus skaitiklį, kurio  $p_T = 16$  ir NCO generatoriaus dažnį parinkus  $f_{NCO} = 16$  MHz, stroboskopinio impulso poslinkio mažiausias žingsnis bandomo-

jo impulso atžvilgiu pagal (2.9) bus  $t_{rNCO} = 95,8$  ps. Padidinus NCO dažnį ir skaitiklio C2 talpą, galima dar sumažinti šį žingsnį. Skaitiklis C2 parenkamas su pradiniu nustatymu, todėl keičiant C2 pradinio nustatymo kodą keičiamas impulsų vėlinimas  $2\pi/pf_{NCO}$  žingsniais. Todėl suminis stroboskopinio impulso trukmės poslinkio žingsnis C2 išėjime, keičiant NCO fazės nustatymo ir C2 pradinio nustatymo kodus, apims visą tiriamojo signalo periodą.

Reikia pažymėti, kad galimybė nustatyti reikiamo dydžio fazės poslinkį suteikia siūlomai žingsnio formavimo schemai didelį lankstumą. Pavyzdžiui, nustatant signalo nusistovėjusias vertes, kai dėl trukdžių, nusistovėjusi vertė nėra pastovi (2.8 pav.), galima žingsnio formavimo grandyne nustatyti stroboskopinio impulso poslinkio dydį lygų  $t_z$ , o antrajame NCO generatoriaus registre dažnio vertę nustatančią didelį transformacijos koeficientą  $q$  ir keisti tiriamojo signalo laiko mastelį iki laiko momento  $t_1$  režimu artimu strobavimui viename taške. Nustatyta nusistovėjusi vertė bus suvidurkinta trukmių ( $t_z - t_1$ ) vertė.

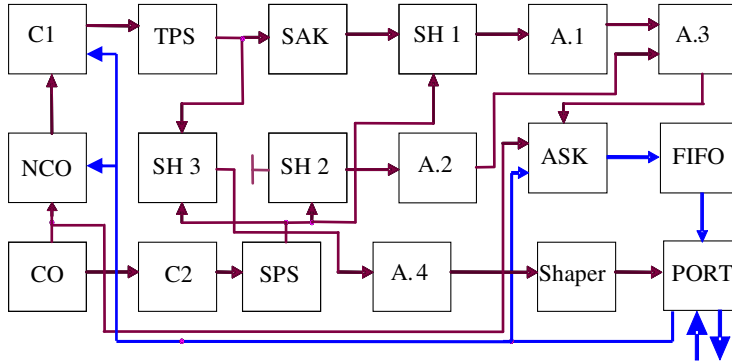
Tais atvejais, kai bandymų sąlygos neleidžia keisti bandomųjų impulsų dažnio, ar jų fazės, žingsnio formavimo schemeje gali būti įjungiami elektroniniai komutatoriai keičiantys bandomųjų ir stroboskopinių impulsų šaltinius vietomis.

Atlikta analizė rodo, kad sukurta nauja stroboskopinio žingsnio formavimo schema turi žymiai didesnes funkcines galimybes.

## 2.2 Specialiojo keitiklio schema

Sukurto keitiklio struktūrinė schema pateikta 2.10 paveiksle. Šioje schemeje TPS – bandomųjų impulsų formuotuvai; SPS – stroboskopinių impulsų formuotuvai; CO – kvarcinis generatorius; NCO – kodu valdomas generatorius; SH 1, SH 2, SH 3 – stroboskopiniai maišikliai; A.1–A.4 – stiprintuvai; ASK – analoginis-skaitmeninis keitiklis; Shaper – formuotuvai; FIFO – duomenų atmintinė; PORT – AK prijungimo įrenginys. Joje, vietoje anksčiau naudotų dviejų kvarcinių generatorių su automatiniu fazės paderinimo grandynu, yra panaudotas naujai sukurtas, aukščiau aprašytas žingsnio formavimo grandynas. Kodu valdomo generatoriaus NCO (pvz. AD9831) išėjimo impulsų pasikartojimo dažnis, keičiant jo valdymo kodą, darbo diapazone gali būti nustatomas  $r$  žingsniu (pvz., generatoriui AD9831 žingsniu lygiu 0,04 Hz). Generatoriaus NCO išėjimo impulsai persiunčiami į impulsų skaitiklį C1, pastarojo signalas – į bandomųjų impulsų formuotuvą. Generatoriaus NCO generuojamo signalo dažnis nustatomas toks, kad impulsų skaitiklio C1 išėjimo impulsų pasikartojimo dažnis atitiktų bandymo sąlygų nustatytą dažnį, o TPS formuoja užduotų parametrų (fronto trukmių,  $U_{TPS}^1$  ir  $U_{TPS}^0$  nusistovėjusių lygių) SAK bandomuosius impulsus. Tuo

tarpu, kvarcinio generatoriaus CO išėjimo signalas per dažnio daliklį C2 yra siunčiamas į stroboskopinių impulsų formuotuvą SPS.



**2.10 pav.** SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimo keitiklio struktūrinė schema.

**Fig. 2.10.** Structural diagram of converter of fast multibit DAC settling time testing

Stroboskopinių impulsų pasikartojimo dažnis:

$$f_{SPS} = \frac{f_{CO}}{p_T}, \quad (2.10)$$

čia  $f_{CO}$  – kvarcinio generatoriaus generuojamų signalų dažnis;  $p_T$  – dažnio daliklio C2 dalinimo koeficientas.

Impulsų skaitiklinio C2 išėjimo impulsai yra siunčiami į stroboskopinių impulsų SPS formuotuvą. Suformuoti trumpi stroboskopiniai impulsai yra siunčiami į stroboskopinius maišiklius SH1–SH3.

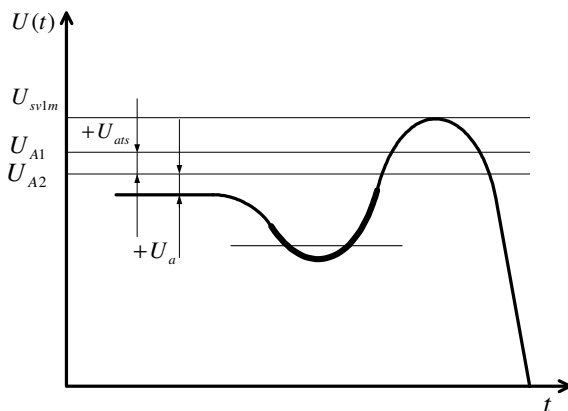
Į antruosius maišiklių SH1 ir SH2 įėjimus siunčiami tiriamojo SAK išėjimo signalai, o į SH3 antrąjį įėjimą – bandomųjų impulsų formuotuvo TPS išėjimo impulsai. Šie impulsai dar yra siunčiami į visus tiriamojo SAK informacinius įėjimus. Keičiant visuose SAK įėjimuose signalo lygį iš vienos nusistovėjusios būsenos į kitą ir atgal, SAK išėjimo srovė (įtampa) kinta nuo minimalios iki maksimalios jos vertės ir atgal. Taip užtikrinama visos skalės SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo sąlygos. Formuotuve TPS suformavus kitokių SAK valdymo signalus, keitiklis vykdys kitokių nusistovėjimo trukmių (pvz., pusės amplitudės) tikrinimą.

Šiais abejais atvejais SH1 keitiklio išėjime gaunamas tiriamojo SAK išėjimo signalas pakeistu laiko masteliu, o SH3 išėjime – formuotuvo TPS išėjimo signalas pakeistu laiko masteliu. Tuo tarpu, SH2 keitiklio išėjime gaunama stroboskopinių impulsų sudaroma keitiklio „nulinė“ linija. Stroboskopinių impulsų pa-

sikartojimo dažniai gali būti nustatomi pakankamai aukšti ( $\geq 1$  MHz), todėl keitikliai veikia pikinio detektavimo režimu, kuris leidžia, esant pakankamai paprastai schemai, gauti didelį perdavimo koeficientą, žemą savųjų triukšmų lygį. Šie sprendimai leidžia realizuoti kompensacinio pikinio detektavimo stroboskopinių keitiklių darbo režimą. Keitiklių SH1 ir SH2 signalai stiprinami stiprintuvuose A.1–A.2 ir siunčiami į stiprintuvą A.3, o A.4 signalas siunčiamas į formuotuvą Shaper. Signalas iš A.3, kuriame iš tiriamojo signalo ir stroboskopinių impulsų trukdžių yra atimti trukdžių signalas persiustas iš A.2, siunčiamas į ASK.

### 2.2.1. Tiriamojo signalo keitimas skaitmeniniu masyvu

Tiriamasis signalas bus pakeistas į skaitmeninį masyvą be papildomų klaidų, jei stroboskopinio keitiklio perdavimo koeficientas bus suderintas su naudojamu ASK keičiamųjų įtampų diapazonu, o keitiklio laiko mastelio transformacijos koeficientas – su ASK taktavimo dažniu. Žinoma, kad tiriamųjų SAK išėjimo įtampos tarp skirtingų jų egzempliorių gali skirtis  $\pm \Delta U_{SAK}$  dydžiu. Be to, tiriamojo SAK išėjimo įtampa, jam persijungiant dažniausia švytuoja (2.11 pav.) pirmojo švytavimo amplitudė  $U_{sv1m}$ .



2.11 pav. Dalis SAK išėjimo signalo  
Fig. 2.11. Part of output signal of DAC

Ši vertė taip pat gali skirtis skirtingiems SAK egzemplioriams, tačiau šis švytavimas neįneša tikrinimo nuokrypų. Todėl, reikia užtikrinti, kad stiprintuvo

išėjime tiriamojo signalo maksimali nusistovėjusi vertė ir atskaitos lygio suma būtų mažesnė už ASK maksimalaus įėjimo įtampų diapazono vertę.

Todėl stroboskopinio keitiklio perdavimo koeficientas  $k_k = k_m k_s$ , čia  $k_m$  – maišiklio perdavimo koeficientas;  $k_s$  – stiprintuvų suminis stiprinimo koeficientas, turi tenkinti sąlygą:

$$k_k \leq \frac{U_{ASKD}}{(1 + \delta U_{SAK}) U_{SAKD} + U_A + U_{ats}}, \quad (2.11)$$

čia  $U_{ASK}$  ir  $U_{SAKD}$  – ASK įėjimo ir tiriamojo SAK išėjimo įtampų diapazonai;  $\delta U_{SAK}$  – santykinė SAK išėjimo įtampų nuokrypa tarp skirtingų jų egzempliorių;  $U_A$  – nusistovėjimo trukmės tikrinimo atskaitos lygio įtampa;  $U_{ats}$  – atsargos įtampa.

Sakykim, ASK diapazonas 6 V tai stiprintuvų išėjimo signalo amplitudė turės būti (kai  $\delta U_{SAK} = 0,2 U_{SAKD}$ ;  $U_A = 0,5$  MRS  $= 0,5 U_{SAKD}/2^n$ ;  $U_{ats} = 0,2$  V) – 4,2 V, keitiklio perdavimo koeficientas – taip pat turi būti 4,2. SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo keitikliuose maišiklio perdavimo koeficientas dažniausia nustatomas lygus –  $k_m = 0,5$ , tada stiprintuvų suminis stiprinimo koeficientas –  $k_s = U_{is}/U_k = 4,2/0,5 = 8,4$  karto).

Tuo būdu, pasiūlytame keitiklyje tiriamasis signalas yra stiprinamas tik 8 kartus, kai anksčiau naudotuose keitikliuose signalas buvo stiprinamas 300 kartų ir tam naudojami 5–6 operaciniai stiprintuvai. Akivaizdu, kad keitiklio savųjų triukšmų lygis pasiūlytame keitiklyje bus mažesnis.

Kai tiriamasis SAK yra  $n$  skilčių, tai jo mažiausio reikšminio skaičiaus (MRS) įtampa ASK įėjime:

$$U_{MRSSm} = \frac{U_{mS}}{2^m}, \quad (2.12)$$

čia  $U_{mS}$  – SAK amplitudės vertė ASK įėjime,  $m$  – tiriamojo SAK skilčių skaičius.

ASK mažiausio reikšminio skaičiaus įtampa:

$$U_{MRSAn} = \frac{U_{ASK}}{2^n}, \quad (2.13)$$

čia  $U_{ASK}$  – ASK įtampų diapazonas,  $n$  – naudojamo ASK skilčių skaičius.

Tada tiriamojo SAK 1MRS bus išreikštas:

$$k_{MRS} = \frac{U_{MRSSm}}{U_{MRSAn}}. \quad (2.14)$$

ASK kodo vienetais. ASK kodo vienetų skaičius atitinkantis skirtingo skilčių skaičiaus tiriamųjų SAK vieną mažiausią reikšminį skaičių pateiktas 2.1 lentelėje.

**2.1 lentelė.** ASK kodo vienetų skaičius atitinkantis skirtingo skilčių skaičiaus tiriamųjų SAK vieną mažiausią reikšminį skaičių

**Table 2.1.** The number of ADC code unit corresponding to different bit number testing DAC the smallest number

| Tiriam-<br>jo SAK<br>skilčių<br>skaičius | 14                            |           | 16                            |           | 18                            |           | 20                            |           |
|------------------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| ASK<br>skilčių<br>skaičius               | $U_{MRSSm}/U_{MRSA_n}, \mu V$ | $k_{MRS}$ | $U_{MRSSm}/U_{MRSA_n}, \mu V$ | $k_{MRS}$ | $U_{MRSSm}/U_{MRSA_n}, \mu V$ | $k_{MRS}$ | $U_{MRSSm}/U_{MRSA_n}, \mu V$ | $k_{MRS}$ |
| 18                                       | 256/22,8                      | 11,2      | 64,09/22,8                    | 2,25      | 16,01/22,8                    | —         | 4/22,8                        | —         |
| 20                                       | 256/5,7                       | 44,9      | 64,09/5,7                     | 5,7       | 16,01/5,7                     | 16        | 4/5,72                        | 4         |
| 22                                       | 256/1,43                      | 179       | 64,09/1,43                    | 44,9      | 16,01/1,43                    | 5,7       | 4/1,43                        | 16        |
| 24                                       | 256/0,357                     | 727       | 64,09/0,357                   | 179       | 16,01/0,357                   | 44,9      | 4/0,357                       | 64        |
| 28                                       | 256/0,0223                    | 11400     | 64,09/0,0223                  | 2873      | 16,01/0,0223                  | 718       | 4/0,0223                      | 179       |

Kaip matyti iš 2.1 lentelės, tiriant 14 skilčių SAK ir keitiklyje naudojant 18 skilčių ASK, vienas SAK MRS yra atvaizduojamas 11,2 ASK MRS vienetais. Atskaitos kodo lygis  $N_a$ , šiuo atveju, bus nustatomas 5 ASK MRS vienetais, tai sudarys  $\pm 20 \%$  nuo reikiamo atskaitos lygio, kas akivaizdžiai netenkina. Naudojant 20 skilčių  $\Sigma\Delta$  ASK, vienas SAK MRS atvaizduojamas 44,9 ASK MRS vienetais. Tada, atskaitos lygio nustatymo paklaida –  $\pm 3 \%$  ir tai priimtinas dydis.

Be to, ASK išėjime gaunamas skaitmeninis masyvas dar yra papildomas ASK savaisiais triukšmais. Kaip matyti iš keitiklyje naudojami ASK turi turėti 18 ir daugiau skilčių. Tokie ASK šiuo metu gaminami, naudojant taip vadinamą  $\Sigma\Delta$  struktūrą. Literatūroje (Kerter 2006) teigiama, kad  $\Sigma\Delta$  ASK savieji triukšmai neviršija jo  $\pm 0,5$  MRS. Taigi šių triukšmų dedamosios skaitmeninėje formoje (naudojant 20 skilčių ASK) sudarys  $\delta k_{irASK} = \pm 0,5/44,9$  vertės, t. y. 1,11 % nuo SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo atskaitos lygio. Paprastai nustatant signalo nusistovėjusias vertes yra naudojama kelerių signalo nusistovėjusių verčių vidurkinimo procedūra, todėl ASK savųjų triukšmų įtaka nustatant nusistovėjusias vertes bus dar mažesnė ir tolimesniame nagrinėjime gali būti nevertinama. Dėl ASK savųjų triukšmų taip pat generuojamos ir nusistovėjimo atskaitos pradžios klaidos. Akivaizdu, kad ASK išėjime tiriamojo SAK skaitmeninio masyvo vertės viena nuo kitos gali skirtis bent jau naudojamo ASK 1 MRS dydžiu. Dėl savųjų ASK triukšmų  $\leq 0,5$  MRS, masyvo vertė gali pakisti  $\pm 1$  MRS. Tokia masyvo klaida gali generuoti SAK nusistovėjimo trukmės nuokrypa:

$$\Delta t_{ASKtr} = \frac{U_{MRSAn}}{S_s}, \quad (2.15)$$

čia  $S_s$  – SAK tiriamojo signalo statumas nusistovėjimo trukmės atskaitos pradžios zonoje.

Sakykim SAK signalo frontas 5 ns, amplitudė 1 V ir statumas toks  $S_s = 5 \text{ V/ns}$ . 20 skilčių ASK  $U_{MRSAn} = 5,7 \text{ } \mu\text{V}$ , tai  $\Delta t = 0,03 \text{ ps}$ . Tokia nuokrypa yra nykstamai maža. Artėjant prie švytavimo viršūnės,  $S_s$  mažėja (2.11 pav. parodykinta dalis), tačiau net ir  $S_s$  sumažėjus 100 kartų nuokrypa sudaro pikosekundes, todėl nevertintina.

Nustatant SAK nusistovėjusias vertes ir jas vidurkinant ne tik mažėja klaida dėl tiriamojo signalo nusistovėjusios vertės nepastovumo (pvz., dėl keitiklio savųjų triukšmų), bet vidurkinimas taip pat mažina efektyviąją ASK MRS vertę. Todėl, galima konstatuoti, kad tiriamiems 14 skilčių SAK keitiklyje reikia naudoti  $\geq 18$  skilčių ASK, 16 skilčių –  $\geq 20$  skilčių ASK, 18 skilčių –  $\geq 24$  skilčių ASK, 20 skilčių –  $\geq 26$  skilčių ASK. Šiuo metu gaminama 24 skilčių  $\Sigma\Delta\text{ASK}$ . Todėl ši schema tinkama iki 18 skilčių SAK tikrinimui.

Kitas svarbus parametras, kurį turi tenkinti ASK yra jo taktavimo dažnis. Taktavimo dažnis turi tenkinti sąlygą:

$$f_{ASK} \geq \frac{g}{t_{s \min}}, \quad (2.16)$$

čia  $t_{s \min}$  – įrenginio nustatoma minimali nusistovėjimo trukmė;  $g$  – akimirkinių verčių atskaitų skaičius tenkantis  $t_{s \min}$ .

Kai  $t_{s \min} = 10 \text{ ns}$ , o  $g = 100$ , tai  $f_{ASK} \geq 1 \text{ MHz}$ , tai priimtini dydžiai dabar gaminamiems 24 skilčių  $\Sigma\Delta\text{ASK}$ .

Jeigu pasirenkama  $f_{SPS} = f_{ASK}$ , tiriamojo signalo periodas bus pakeistas sveiku gauto masyvo verčių skaičium:

$$N_p = T_p f_{SPS}, \quad (2.17)$$

čia  $T_p$  – tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu periodas.

Be to, kai naudojamas skaitmeninis tiriamojo signalo apdorojimas, dažniausiai ASK taktavimo dažnis apsprendžia ir nustatomą nusistovėjimo trukmę. Tiriamojo signalo skaitmeninio masyvo vienos diskretinės vertės trukmė sudarys:

$$t_D = \frac{T_p}{qN_p}. \quad (2.18)$$

Specialiuosiuose stroboskopiniuose keitikliuose, skirtuose tikrinti SAK nusistovėjimo trukmę, tiriamojo signalo periodas dažniausia nustatomas lygus

$T_p = 1 \mu s$ ,  $q = 10000$ , o diskretinių verčių skaičius periode  $N_p = 10000$ , tada vienos diskretinės vertės trukmė, įvertinus stroboskopinio keitiklio transformacijos koeficientą –  $t_D = 100 ps$ .

ASK taktavimo periodas  $t_{TASK} = 1/f_{ASK}$ , matyti, kad stroboskopinis žingsnis ir ASK taktavimo periodai, šiuo atveju, sutampa. Akivaizdu, kad didesnio ASK taktavimo dažnio ir nereikia, tačiau stroboskopinis žingsnis gali būti nustatomas ir mažesnis. Reikalingas stroboskopinis žingsnis yra nustatomas pagal Naikvisto teoremą, arba (skaitmeniniuose oscilografuose – dabar – aukščiausio dažnio periode turi būti 4 ar 10 stroboskopinių impulsų,) žiūrима, kiek impulsų reikia stačiausiam tiriamojo signalo frontui. Jeigu mūsų atveju, tiriamojo signalo fronto trukmė 5 ns, tai frontui tenka  $5 ns/0,1 ns = 50$  stroboskopinių impulsų.

ASK išėjimo skaitmeninis masyvas keis savo vertes (2.16) nustatytu dažniu. ASK išėjime gauti tiriamojo signalo akimirkinių verčių kodai turi būti nuosekliai įrašomi į atmintinę. Šiems tikslams geriausia tinka nuoseklioji „Pirmas įėjime – pirmas išėjime“ į (FIFO) tipo atmintinė. Ši atmintinė turi turėti 24 skiltis, o informacijos įrašymo sparta turi būti suderinta su ASK darbo sparta (t. y.  $f_{FIFO} = f_{ASK}$ ). Nagrinėtam aukščiau atvejui –  $f_{FIFO} \geq 1 MHz$ ). Tam, kad į FIFO atmintinę būtų įrašytas visas tiriamojo SAK signalo periodas, jos informacinė talpa turi būti lygi:

$$n_{FIFO} = \frac{qf_{ASK}}{f_{TPS}} = \frac{qf_{COPT}}{f_{CO}} = \frac{2^{32} p_T^2}{2^{32} p - 6rp_T}. \quad (2.19)$$

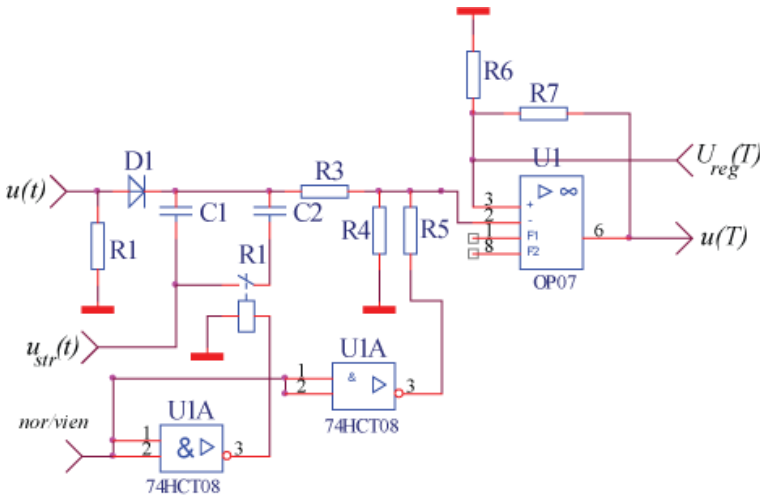
Tiesa, pasiūlyta prietaiso struktūra leidžia, keičiant NCO valdymo kodą, keisti stroboskopinį žingsnį. Pvz., nustačius didesnę stroboskopinį žingsnį randamas momentas, kurioje pradėdama tikrinti nusistovėjimo trukmė, po to keičiama stroboskopinio impulso padėtis laike (pakeitus NCO fazę), stroboskopinis impulsas gražinamas apibrėžta trukme atgal bandomojo impulso atžvilgiu ir, nustačius kitą NCO dažnį, mažu žingsniu randama tiksli nusistovėjimo trukmės tikrinimo pradžios vieta. Arba mažu dydžiu, kas  $n$ , keičiant stroboskopinių impulsų keičiant fazę taip pat randama tiksli įsijungimo vieta.

FIFO sukauptas vieno tiriamojo signalo periodo skaitmeninis masyvo kodai per sąsają siunčiami į AK, informacijos keitimosi su AK sparta.

## 2.2.2. Keitiklio darbas strobuojant signalą viename taške

Kaip žinoma, tikrinant tiriamųjų SAK nusistovėjimo trukmes, didžiausią įtaką jų tikrinimo nuokrypų dydžiui turi keitiklių savieji triukšmai. Todėl suda-

rant tikrinimų algoritmus visais metodais stengiamasi sumažinti šių triukšmų įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimui. Kaip buvo minėta anksčiau, naujoji kodu valdoma žingsnio formavimo schema leidžia lengvai realizuoti strobavimo viename taške režimą. Šių triukšmų dydį galima sumažinti, keitiklyje nustačius strobavimo viename taške režimą, o taip pat padidinus maišiklio atminties kondensatoriaus išsikrovimo laiko pastoviąją. Šiuo atveju,  $n_{svt}$  stroboskopinių impulsų keičia tiriamojo signalo tą pačią akimirkinę vertę, padidėja tiriamosios akimirkinės vertės integravimo keitiklyje pastovioji ir savųjų maišiklio triukšmų lygis atminties talpoje sumažėja. Tam keitiklyje gali būti naudojami komutuojami stroboskopinio maišiklio parametrai (2.12 pav.): įjungiamas papildomas kondensatorius C2 ir atjungiamas varžas R5. Taip padidinama pikinio detektavimo keitiklio laiko pastovioji ir tuo pačiu padidinamas savųjų triukšmų ir integravimas keitiklyje.



2.12 pav. Specialiojo maišiklio su keičiamais parametrais schema

Fig. 2.12. The circuit of special sampling mixer with changing parameters

Nusistovėjimo trukmės tikrinimas šiame režime vykdomas taip. Kaip minėta aukščiau,  $f_{TPS}$  ir  $f_{SPS}$  nustatomi lygūs. Fazės kodas  $k_f$  generatoriuje NCO ir pradinio nustatymo kodas  $l$  impulsų skaitiklyje C2, o tuo pačiu ir stroboskopinio impulso vėlinimas nustatomi tokie, kad būtų tiriama nusistovėjusi tiriamojo signalo akimirkinė vertė ( $U^l$ ) laiko momentu  $t_1$  (2.8 pav.). Tiriamojo signalo akimirkinė vertė stiprinama stiprintuvuose A.1 ir A.2 siunčiama į ASK, kur keičiama į jai proporcingą kodą. Po  $n_{svt}$  stroboskopinių impulsų atminties talpoje sukaupta signalo akimirkinė vertė, sustiprinama ir ASK pakeičiama į skaitmeni-

nį kodą, kuris įrašomas atmintinėje FIFO. Kelis kartus nedideliu dydžiu keičiamas NCO fazės nustatymo kodas (keičiama stroboskopinio impulso vieta, ji nustatoma lygi  $t_2, t_3, \dots, t_z$ ) ir nustatomos kitos  $U^1$  vertės. Sukaupiti  $U^1$  verčių masyvai persiunčiami į AK.

Analogiškai yra nustatoma nusistovėjusi  $U^0$  vertė.

Persiūsti į AK  $U^1$  ir  $U^0$  verčių kodai gali būti papildomai apdorojami skaitmeniniais metodais. Nustatomos jų vidurkintų kodų  $n_{vid}^1$  ir  $n_{vid}^0$  vertės, tiriamojo signalo amplitudės vertės  $n_{vid} = n_{vid}^1 - n_{vid}^0$ , signalų atskaitos lygių kodai

$n_{ats1-4} = \frac{n_{vid} A}{2^m} \pm n_{vid}^{(0)}$ , čia  $A$  – nusistovėjimo trukmės atskaitos lygis MRS vertėmis.

Reikia pažymėti, kad tikrinimo algoritmai gali būti ir kitokie. Pavyzdžiui, pakeitus generatoriaus fazės kodą ir skaitiklio C2 kodą, nustatoma stroboskopinio impulso vieta  $t_1$  ir generatoriaus dažnio kodas toks, kad transformacijos koeficientas  $q$  būtų didelės vertės, tada skaitmeninio masyvo vertė bus vidutinė vertė gauta apibrėžtoje signalo zonoje šalia laiko momento  $t_1$ , o keitiklio darbo režimas artimas strobavimo viename taške režimui.

Toliau pereinama į laiko mastelio keitimą ir tikrinama nusistovėjimo trukmė.

Tikrinant nusistovėjimo trukmę, taip pat gali būti naudojamas strobavimo viename taške režimas, o bandomųjų ir stroboskopinių impulsų dažniai palaikomi  $f_{TPS} = f_{SPS}$ . Kodu nuosekliai keičiama generatoriaus išėjimo signalo fazės vertė, taip užduotu žingsniu mažinant stroboskopinių impulsų vėlinimą tiriamojo signalo atžvilgiu. Analogiškai  $U^1$  ir  $U^0$  nustatymui, vidurkinti akimirkinių verčių kodai įrašomi į FIFO, o po to siunčiami į AK atmintį. AK programa apdoroja persiūstus akimirkinių verčių kodus ir lygina su nustatytais nusistovėjimo trukmės tikrinimo atskaitos lygiais. Kai tiriamojo signalo vidurkintas akimirkinės vertės kodas tampa didesnis už didesnįjį atskaitos lygį  $n_{ats1(2)}$  arba mažesnis už mažesnįjį atskaitos lygį  $n_{ats3(4)}$  nustatomi stroboskopinių impulsų vėlinimo kodai  $k_s$  ir  $p_s$ , čia  $k_s$  ir  $p_s$  – nustatytos generatoriaus signalo fazės ir impulsų skaitiklio C2 kodų vertės (2.6 paveiksle parodytas šį atvejį atitinkantis laiko momentas  $t_s$  ir atskaitos kodus  $n_{ats1(2)}$  atitinkančios įtampos  $U_{1(2)}$ ).

Po to toliau mažinant stroboskopinių impulsų vėlinimą (keičiant NCO fazės nustatymo ir C2 pradinio nustatymo kodus), ieškoma momento, kai bandomojo signalo akimirkinė vertė viršys atskaitos  $U_p$  lygį ir formuotuvą Shaper generuos impulsą, siunčiamą į AK. Šis impulsas – tai nusistovėjimo trukmės nustatymo pabaigos impulsas.

Nustatomos skaitiklio C2 ir generatoriaus NCO kodų vertės  $k_{pr}$  ir  $p_p$  (2.8 paveiksle parodytas šį atvejį atitinkantis laiko momentas  $t_p$ ).

Nustatoma tikrinama nusistovėjimo trukmė:

$$t_n = (p_p - p_s)t_r + (k_{pr} - k_s)t_c, \quad (2.20)$$

čia  $t_r$  ir  $t_c$  – generatoriaus NCO fazės nustatymo kodo ir impulsų skaitiklio C2 pradinio nustatymo vieno MRS sukuriamos stroboskopinių impulsų postūmių trukmės.

Nusistovėjimo trukmės tikrinimas gali būti kartojamas eilę kartų tam, kad atsitiktinių klaidų įtaka tikrinimo rezultatui būtų kuo mažesnė.

Laikotarpį, kurio metu randamas tikrinimo pradžios momentas tiksliai apibrėžti sunku, nes jos trukmė skirtingiems SAK egzemplioriams yra skirtinga. Ji taip pat priklausys nuo NCO ir C2 kodų nustatymo algoritmo. Įvertinimui priimkim, kad tam reiks  $N_s$  skirtingų vėlinimų po  $M_s$  stroboskopinių impulsų kiekviename iš vėlinimų, tada ši trukmė bus:

$$t_{st} = N_s M_s t_{TPS}. \quad (2.21)$$

Priimkim  $N_s = 500$ ,  $M_s = 20$ ,  $t_{TPS} = 1$  MHz, tai  $t_{st} = 500 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 10$  ms.

Tikrinimo pabaigos momentas priklauso nuo prietaise sumontuoto bandomųjų impulsų generatoriaus vėlinimo nestabilumo ir paprastai būna nedidelės vertės. Trukmė gali būti nustatyta pagal (2.26) išraišką įstačius į ją  $N_p$  ir  $M_p$  vertes. Priimkim  $N_s = 50$ ,  $M_s = 20$ ,  $t_{TPS} = 1$  MHz, tai  $t_p = 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 1$  ms.

Tada viso  $P$  tikrinimų (vidurkinant daugkartinius tikrinimus) trukmė bus:

$$t_m = P(2t_{U1} + t_{st} + t_p). \quad (2.22)$$

Priėmus  $P = 100$ , gaunama  $t_m = 100(2 \cdot 10 + 10 + 1)$  ms = 3,1 s.

Analogiško tikrinimo naudojant pateiktą prietaisą tikrinimo trukmę apspręs į atmintį įrašytų tiriamojo signalo realizacijų skaičiaus įrašymo trukmės, sakykim tai  $R$  realizacijų. Tada ši trukmė bus lygi:

$$t_{m2} = R t_{TPS} q. \quad (2.23)$$

Priimkim, kad  $t_{TPS} = 1$  MHz,  $q = 10000$ ,  $R = 20-100$ , tada  $t_{m2} = (20-100) \cdot 10^{-6} \cdot 10000 = 0,2-1$  s.

Tikrinimo trukmės skaičiavimai yra atlikti neįvertinant skaitmeninio apdorojimo AK trukmės.

## 2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudaryta nauja, skaitmeniniu kodu valdomo stroboskopinio žingsnio specialiesiems stroboskopiniams keitikliams formavimo struktūrinė schema. Žingsnio formavimo grandynas turi didesnes funkcines galimybes: keičiant kodu valdomo generatoriaus kodą galima nustatyti tiesioginį, atgalinį laiko mastelio keitimą arba strobavimą viename taške; keisti bandomųjų impulsų pasikartojimo dažnį, keisti bandomųjų impulsų pasikartojimo dažnį, keisti transformacijos koeficiento dydį; keisti stroboskopinių impulsų vėlinimą tiriamojo signalo atžvilgiu. Nustatyti reikalavimai NCO perderinimui.

2. Gautos žingsnio formavimo schemoje nustatomų keitiklio laiko mastelio transformacijos koeficiento, stroboskopinio žingsnio, stroboskopinio impulso vėlinimo, keičiant kodu valdomo generatoriaus išėjimo signalo fazę ir skaitiklio išankstinio nustatymo kodų vertes. Jos leidžia įvertinti pagrindinius keitiklio parametrus: nustatyti tiriamojo SAK signalo keitimo į skaitmeninį kodą parametrus.

3. Sudaryta nauja specialiojo kodu valdomo stroboskopinio keitiklio struktūrinė schema, turinti platesnes funkcines galimybes, paprastesnį grandyną, išėjime generuojanti tiriamųjų signalų skaitmeninį masyvą. Gautos išraiškos leidžiančios nustatyti tiriamojo signalo perdavimo keitiklyje koeficientą, kai žinomas naudojamo keitiklyje ASK keičiamų įtampų diapazonas, nustatyti reikalaujamas ASK skilčių skaičius ir diskretizavimo dažnis. Gautos SAK tiriamojo signalo akimirkinių verčių išraiška keitiklio išėjimo skaitmeninio kodo vienetais ir trukmės tarp šių dviejų verčių išraiška, kas leidžia atliktus skaitmeninį signalo masyvo apdorojimą nustatyti skaitmenines atskaitos lygių vertes ir SAK nusistovėjimo trukmę.



---

## **Sparčiųjų skaitmeninių-analoginių keitiklių skaitmeninio nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo tyrimas**

Šiame skyriuje pateikiama sudaryto tiriamojo SAK signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo veikimas veikiant įvairiems faktoriams: tiriamojo signalo amplitudės nepastovumui, pradžios momento nestabilumui, skirtingiems signalo švytavimų slopimo dekrementams. Tiriama keitiklio baltojo ir  $1/f$  savųjų triukšmų įtaka SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatams.

Skyriaus tematika paskelbta du autoriaus straipsniai (Ustinavičius, T. 2007; Ustinavičius, T. 2008).

### **3.1. Skaitmeninio-analoginio keitiklio signalų skaitmeninio apdorojimo ir nusistovėjimo trukmių tikrinimo algoritmo tyrimas**

Tyrimui naudojamas skaitmeninis SAK signalo modelis sudarytas, tiriant algoritmo veikimą (Kvedaras, R. 2005).

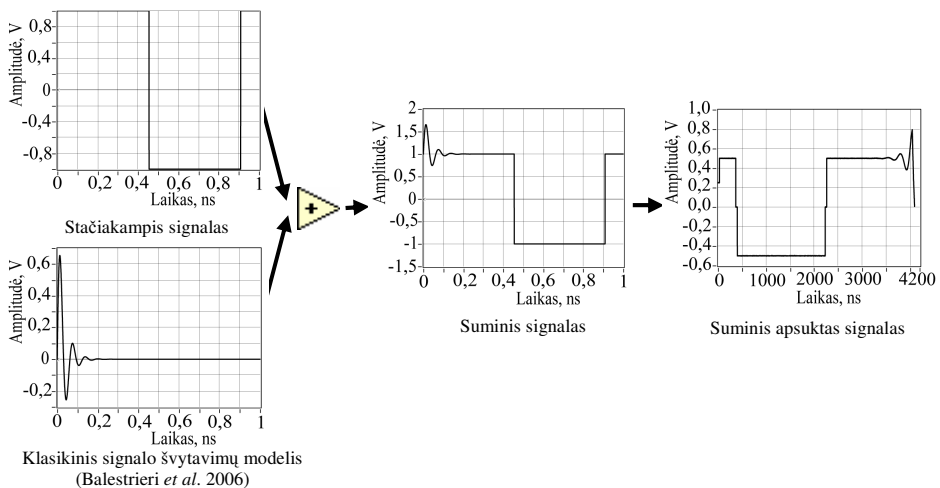
Skaitmeniniam signalo modeliui sudaryti naudojama išraiška:

$$S(t) = S_{st}(t) + A_{sv} e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3.1)$$

čia  $S_{st}(t)$  – stačiakampis impulsas (meandras);  $A_{sv}$  – nusistovėjimo signalo švytavimų amplitudė;  $\beta$  – signalo nusistovėjimo švytavimų slopimo dekrementas;  $\omega$  – švytavimo signalo kampinis dažnis;  $\varphi$  – švytavimo signalo pradinė fazė.

Kaip parodyta (Kvedaras, V. 2004), SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo stroboskopiniuose keitikliuose naudotinas atgalinis laiko mastelio keitimas. Šiuo atveju, ne tik tampa paprastesnis nusistovėjimo trukmės tikrinimas, bet ir keliaimi mažesni reikalavimai keitiklio dinaminiams parametrams. Todėl modelyje gautas signalo verčių masyvas yra apskukamas.

Naudojant LabView<sup>®</sup> programų paketą yra sudarytas SAK išėjimo signalo be trukdžių modelis. Signalų masyvo verčių grafinis atvaizdas pateiktas 3.1 paveiksle. Panaudotame modelyje galima keisti signalo parametrus (trukmę, švytavimų amplitudę, jų slopimo dekrementą), todėl galima modeliuoti skirtingų tipų tiriamųjų SAK išėjimo signalus.



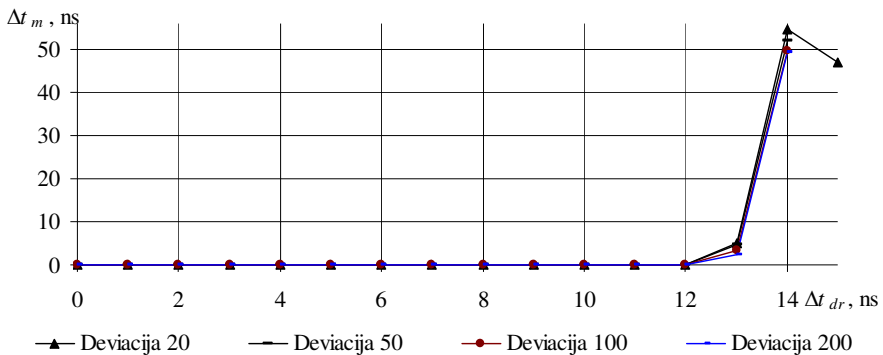
**3.1 pav.** SAK išėjimo signalo modelio verčių masyvo ir jo sudėtinių dalių, sudarytų LabView<sup>®</sup> paketu, grafikai

**Fig. 3.1.** Diagrams of DAC output signal model values array and it's composites created with LabView<sup>®</sup>

Naudojant šį SAK išėjimo signalo masyvą, pagal modeliuojamo SAK skilčių skaičių, nustatomi reikalaujami nusistovėjimo trukmės atskaitos lygiai ir tikrinama nusistovėjimo trukmė.

### 3.2. Tiriomojo signalo laiko ir amplitudės verčių nestabilumo įtakos tyrimas

SAK išėjimo skaitmeninio signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo tyrimuose pirmiausia buvo tikrinama signalo pradžios nestabilumo (drebejimo) įtaka nusistovėjimo trukmės nuokrypoms. Tyrimo metu buvo generuojami tiriomojo signalo realizacijų pradžios momento atsitiktinis nestabilumas vienodos tikimybės dėsnio, o visi kiti galimi nestabilumai buvo prilyginti nuliui. Realiose stroboskopinio laiko mastelio keitikliuose vykstantys procesai įtakoja signalo pakeistu laiko masteliu periodo pradžios nestabilumus. Tyrimo metu kiekvienai tiriomojo signalo realizacijai atsitiktiniu dėsnio buvo nustatomas skirtingas tiriomojo signalo pradžios momentas. Buvo tiriama keičiant apdorojamų signalų realizacijų skaičius (nuo 20 iki 200), 100 kartų vykdoma signalų apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo procedūra. Po to buvo skaičiuojama per šiuos 100 realizacijų nustatytų nusistovėjimo trukmių vidutinė vertė ir dispersija. Tyrimais nustatyta, kad esant signalo pradžios nestabilumui iki 12 nanosekundžių, nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypa lygi nuliui (3.2 pav.). Realiose SAK nusistovėjimo trukmės tikrinimo prietaisuose šis nestabilumas neviršija 0,5–1 ns. Taigi sukurti signalo apdorojimo algoritmas ir programa, kuriuose yra numatytas signalų realizacijų pradžių sutapdinimas, visiškai eliminuoja signalo pradžios nestabilumą.

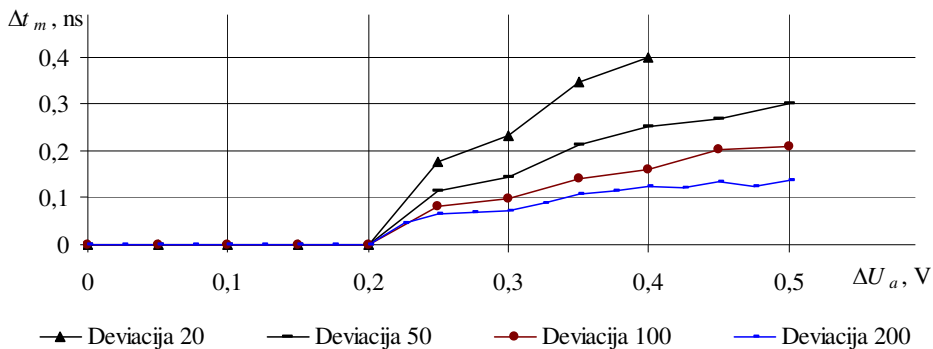


**3.2 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo signalo pradžios nestabilumo  $\Delta t_{dr}$  po jo sutapdinimo laike

**Fig. 3.2.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from signal start instability  $\Delta t_{dr}$  after superposition in time

Antrajame tyrimų etape, atliktame analogiškai pirmam etapui, buvo tiriama signalo realizacijų amplitudžių nestabilumo įtaka nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypų dydžiui. Tyrimo metu buvo generuojami tiriamojo signalo realizacijų amplitudžių atsitiktinis nestabilumas vienodos tikimybės dėsnio, o visi kiti galimi nestabilumai buvo prilyginti nuliui. Realių stroboskopinio laiko mastelio keitiklių išėjimo signalo amplitudės nestabilumas priklauso nuo tiriamojo SAK išėjimo signalo amplitudės ir keitiklio schemos. Tiriamųjų SAK išėjimo signalo amplitudžių vertės skirtingiems egzemplioriams, pagal gamintojų normas, gali skirtis iki  $\pm 20\%$ . Keitiklių, kurie turi sumontuotą automatinio stiprinimo reguliavimo grandinę (Kvedaras, V. *et al.* 1992), išėjimo signalų amplitudės skiriasi iki  $\pm 0,5\%$ .

Tyrimai parodė, kad keičiantis signalo realizacijų nusistovėjusioms vertėms iki  $\pm 20\%$  signalo amplitudės, po skaitmeninio signalo apdorojimo nusistovėjimo tikrinimo nuokrypa lygi nuliui (3.3 pav.). Realių keitiklių išėjimo signalo amplitudės nusistovėjusios vertės nestabilumas neviršija  $\pm 0,5\%$ . Taigi sukurtas algoritmas pilnai eliminuoja signalo nusistovėjusios vertės nestabilumo įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimui. Sudarytas algoritmas tinka apdoroti ir 2 dalyje pasiūlyto keitiklio išėjimo signalus, kurių amplitudės, priklausomai nuo tiriamojo SAK egzemplioriaus, gali skirtis  $\pm 20\%$ , o nuokrypos net ir viršijus šį dydį yra priimtinos.



**3.3 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo signalo nusistovėjusių verčių nestabilumo  $\Delta U_a$

**Fig. 3.3.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from signal settling values instability  $\Delta U_a$

Taip yra, todėl, kad tiriamame algoritme yra numatyta šių tiriamojo signalo amplitudžių nestabilumo kompensacija, nustatant kiekvienos realizacijos nusistovėjusios vertės reikšmę ir suvienodinant visų apdorojamų signalų realizacijų

nusistovėjusias signalų vertes. Šiam tikslui signalo realizacijų nusistovėjusiose srityse parenkama 100 signalo akimirkinių verčių atskaitų ir šios signalo vertės yra vidurkinamos. Gauti suvidurkinti nusistovėjusių signalo verčių kodai lyginami su užduotu nusistovėjusios vertės kodu ir visos akimirkinės tos realizacijos signalo vertės perskaičiuojamos.

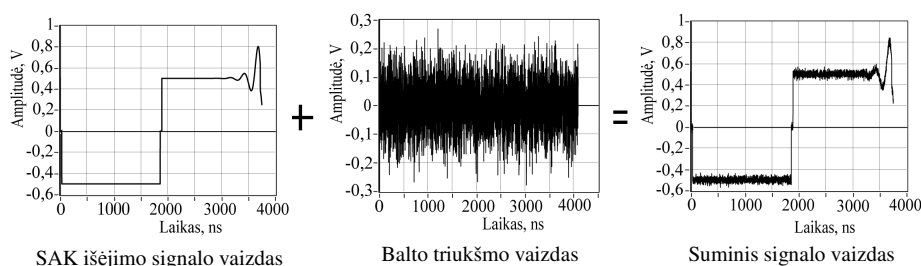
Atlikti tyrimai parodė, kad sudarytas algoritmas yra nejautrus tiriamojo signalo pakeistu laiko masteliu realizacijų pradžios momento ir amplitudžių nestabilumams.

### 3.2.1. Keitiklio savųjų triukšmų skaitmeniniai modeliai ir baltojo triukšmo įtakos tyrimas

Darbe (Kvedaras, V. 2001) parodyta, kad kompensacinio pikinio detektavimo keitiklio išėjime vyrauja operacinių stiprintuvų generuoti keitiklio savieji triukšmai. Kaip parodyta (Aplication Notes AN-519.1. 1996), operacinių stiprintuvų savieji triukšmai – tai  $1/f$  tipo ir baltojo tipo triukšmų suma. Analogiškai rezultatai yra gauti tiriant realių kompensacinių pikinio detektavimo stroboskopiinių keitiklių išėjimo signalų triukšmus. Atlikti tyrimai (Kvedaras, V. 2001) taip pat parodė, kad keitiklio savieji triukšmai yra viena iš didžiausių nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypų dedamųjų. Dėl šios priežasties savųjų triukšmų įtakos tyrimai yra labai svarbūs.

Tyrimams buvo sukurti keitiklio savųjų triukšmų skaitmeniniai modeliai, kuriuos sudaro baltojo ir  $1/f$  tipų triukšmų masyvų generavimo moduliai.

Baltojo triukšmo ir  $1/f$  tipo triukšmų skaitmeniniams masyvams gauti buvo panaudoti LabView<sup>®</sup> paketo standartiniai blokai (Bitter *at el.* 2007; Johnson *at el.* 2006; Mahesh *at el.* 1998), o tiriamojo signalo modelis su triukšmais gautas sumuojant anksčiau sukurtą tiriamojo signalo masyvą su triukšmo masyvais (3.4 pav.).



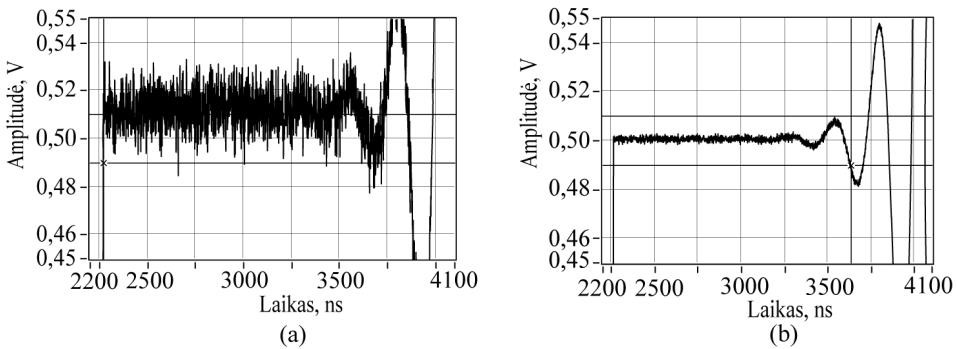
**3.4 pav.** Keitiklio tiriamojo signalo masyvas su savuoju baltuoju triukšmu

**Fig. 3.4.** Converter testing signal array with internal noise

Šiuose modeliuose su tiriamuoju signalu galima sumuoti atskirai baltąjį ir  $1/f$  tipų triukšmus ir atskirai tirti šių triukšmų įtaką nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypoms, o taip pat galima sumuoti abu šiuos triukšmus ir tirti bendrą šių triukšmų įtaką nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypoms.

Skaitmeninis signalas apdorojamas ir nusistovėjimo trukmė nustatoma taip:

LabView<sup>®</sup> programų pakete sudarytas SAK išėjimo signalo skaitmeninis modelis (3.5 pav., a), keičiant signalo masyvo parametrus bei prie signalo masyvo sumuojamų generuotų triukšmų masyvą, tiriamas signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo efektyvumas. Sudarytas modelis leidžia keisti triukšmų parametrus, įvesti signalo amplitudės ir laiko nestabilumus.



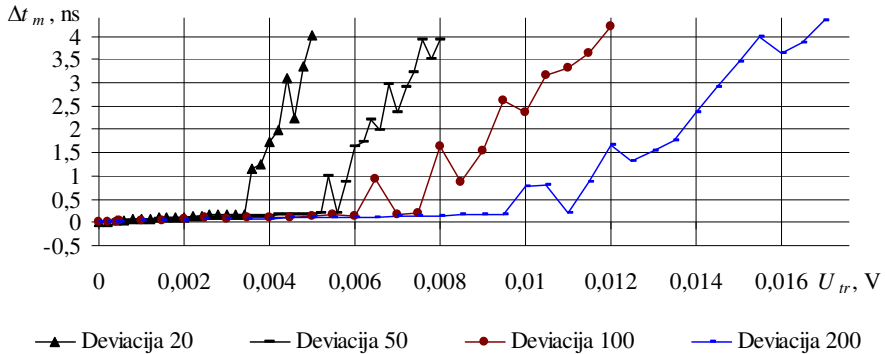
**3.5 pav.** Viena modelio signalo su nestabilumais ir triukšmais realizacija (a) ir jos vaizdas po skaitmeninio apdorojimo (b)

**Fig. 3.5.** Realization of one model signal with instability and noises (a) and its view after digital processing (b)

Tiriamąjį signalą su triukšmais skaitmeninis masyvas apdorojamas pagal sudarytą signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmą įgyvendinančią programą. Kaip minėta apžvalgoje programa vykdo: a) apdorojamą signalo realizacijų sutapdinimą laike; b) signalo realizacijų sutapdinimą pagal nustatytas realizacijos nusistovėjusias vertes; c) sudaro suvidurkintą tiriamąjį signalą (3.5 pav., b); d) nustato nusistovėjusią suvidurkinto signalo vertę; e) nustato atskaitos lygius; f) nustato nusistovėjimo trukmės pradžios diskretinės vertės numerį; g) nustato nusistovėjimo trukmės pabaigos diskretinės vertės numerį; h) skaičiuoja nusistovėjimo trukmę, lygina ją su nustatytomis normomis; k) skaičiuoja serijos nusistovėjimo trukmės tikrinimų nuokrypą.

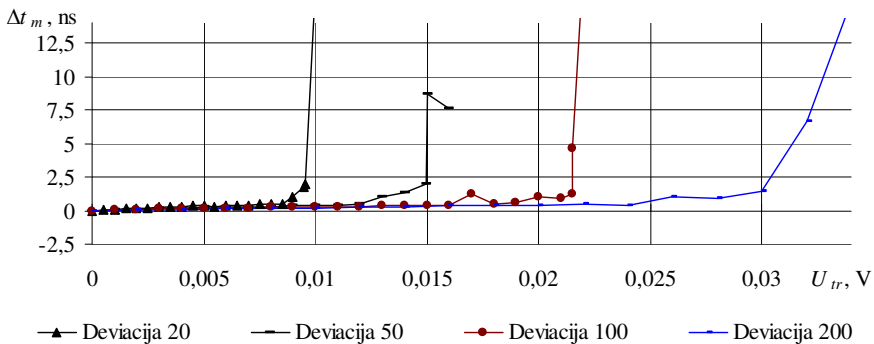
Skirtingų tipų spartieji SAK turi skirtingos amplitudės ir skirtingo slopimo dekremento švytavimus persijungiant SAK iš vienos būsenos į kitą. Todėl trečiajame tyrimo etape buvo siekiama nustatyti SAK tiriamųjų signalų švytavimų slopimo dekremento įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms. Tyri-

muose, signalai su skirtingais švytavimo procesais buvo sumuojami su skirtingų lygių baltuoju triukšmu. Tyrimo metu buvo nustatomas apdorojamų signalų švytavimų slopimo dekrementas:  $\beta = 30$  (3.6 pav.),  $\beta = 45$  (3.7 pav.) ir  $\beta = 60$  (3.8 pav.), kas atitinka daugumos realių sparčiųjų SAK nusistovėjimo procesą.



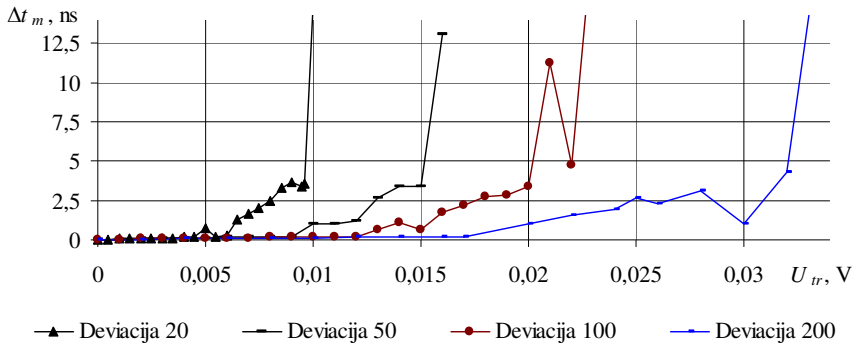
**3.6 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo triukšmų įtampos  $U_{tr}$ , kai signalo švytavimų slopimo dekrementas  $\beta = 30$ , esant skirtingam tiriamojo signalo realizacijų skaičiui

**Fig. 3.6.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from noise voltage  $U_{tr}$  when signal swing attenuation ratio  $\beta = 30$  with different testing signal realization numbers



**3.7 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo triukšmų įtampos  $U_{tr}$ , kai signalo švytavimų slopimo dekrementas  $\beta = 45$ , esant skirtingam tiriamojo signalo realizacijų skaičiui

**Fig. 3.7.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from noise voltage  $U_{tr}$  when signal swing attenuation ratio  $\beta = 45$  with different testing signal realization numbers



**3.8 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo triukšmų įtampos  $U_{tr}$ , kai signalo švytavimų slopimo dekrementas  $\beta = 60$ , esant skirtingam tiriamojo signalo realizacijų skaičiui

**Fig. 3.8.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from noise voltage  $U_{tr}$  when signal swing attenuation ratio  $\beta = 60$  with different testing signal realization numbers

Iš atliktų tyrimų matyti, kad didėjant švytavimų slopimo dekrementui, keitiklio savųjų triukšmų įtaka nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms mažėja. Tiriamiesiems signalams su greitesniu švytavimų slopimo dekrementu (t y. nustatius slopimo dekrementą  $\beta = 45$  vietoj 30, o tai būdinga naujiems SAK), nusistovėjimo trukmės tikrinimo paklaida sumažėja dvigubai. Taip pat padidinus apdorojamų signalo realizacijų skaičių iki 200, nustatytų nusistovėjimo trukmių tiek vidutinės vertės pokytis, tiek deviacija sumažėja tris kartus, lyginant su nuokrypom gaunamom apdorojant 20 realizacijų ir esant tokiam pačiam savųjų triukšmų lygiui.

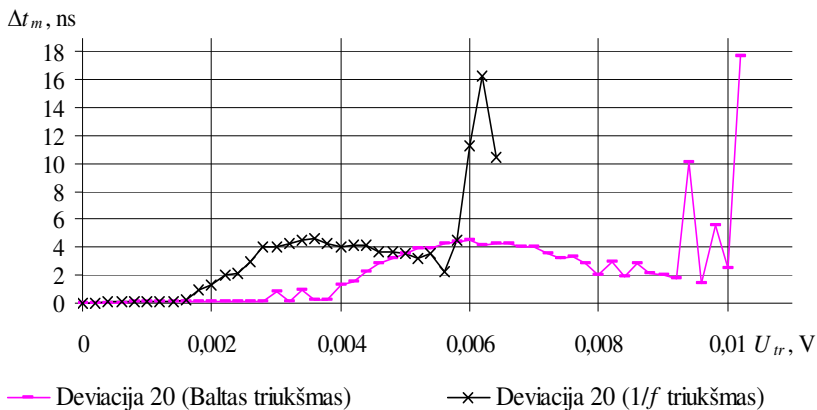
### 3.2.2. Keitiklio savųjų triukšmų įtakos tyrimas

Sekančiame etape buvo siekiama nustatyti baltojo ir  $1/f$  triukšmų sumos (kas atitinka keitiklio savųjų triukšmų pobūdį) įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms. Tyrimo metu buvo apdorojami SAK tiriamieji signalai, kurių švytavimų slopimo dekrementas  $\beta = 30$ . Tokio dydžio konstanta buvo parinkta, todėl, kadangi prieš tai gauti rezultatai parodė, kad šiuo atveju gaunami blogiausi nuokrypų rezultatai. Šių tyrimų metu prie sudaryto tiriamojo signalo skaitmeninio masyvo buvo sumuojami baltojo ir  $1/f$  tipų triukšmų signalų masyvai ir nustatoma jų įtaka nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms. Tyrimų

metu visi kiti galimi tiriamojo signalo nestabilumai ir triukšmai buvo prilyginti nuliui. Tyrimo procedūra analogiška aprašytajai aukščiau.

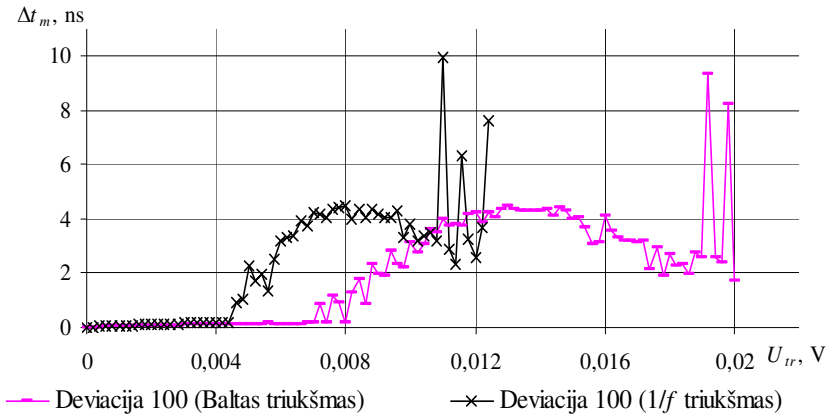
Pirmojo etapo metu buvo tiriama baltojo triukšmo įtaka signalo nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms. Tyrimo metu, buvo didinamas baltojo triukšmo lygis prie skirtingo apdorojamų signalų skaičiaus. Atlikti tyrimai rodo, kad tokia pati nusistovėjimo trukmės tikrinimo vidutinės vertės nuokrypa ir rezultatų deviacija, apdorojant 500 signalo realizacijų, gaunama, kai keitiklio savųjų triukšmų įtampa yra 4,6 ir 4,8 karto didesnė, negu apdorojant 20 signalo realizacijų (3.9–3.10 pav.). Matyti, kad signalo realizacijų akimirkinių verčių vidurkinimas sumažina matuoklio savųjų baltojo tipo triukšmų įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatams beveik penkis kartus.

Antrojo tyrimo metu buvo keičiamas tik  $1/f$  triukšmo lygis, o visi kiti galimi nestabilumai buvo prilyginti nuliui. Iš šių tyrimų paaiškėjo, kad esant tokiam pačiam  $1/f$  triukšmo lygiui ir apdorojant signalo 500 realizacijų vietoje 20, nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypa taip pat sumažėja apie penkis kartus (3.9–3.10 pav.). Tačiau iš rezultatų matyti, kad sukurtas algoritmas yra žymiai jautresnis  $1/f$  triukšmams. Šis triukšmas generuoja tokias pat nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypas prie žymiai (1,5–2 kartus) mažesnių triukšmo lygių negu veikiant baltajam triukšmui.

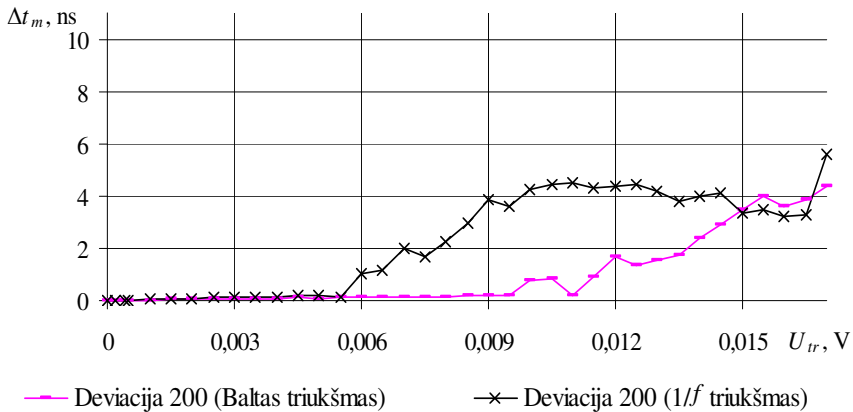


**3.9 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo baltojo ir  $1/f$  triukšmų įtamos  $U_{tr}$ , kai apdorojama 20 signalo realizacijų

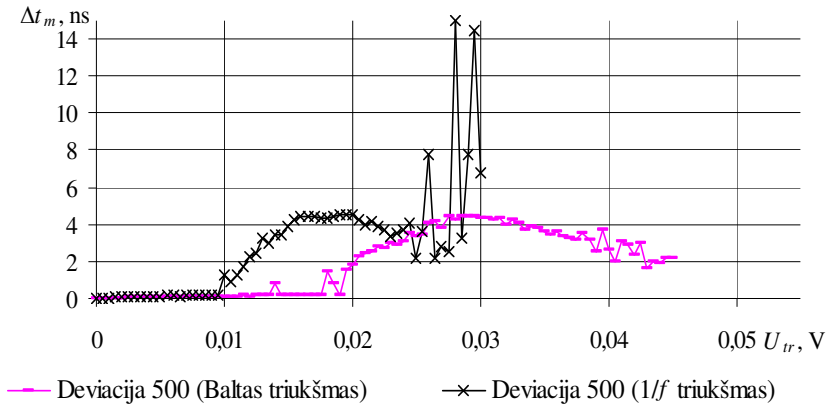
**Fig. 3.9.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from white and  $1/f$  noise voltage  $U_{tr}$ , when 20 signal realizations are processed



**3.10 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo baltojo ir  $1/f$  triukšmų įtampos  $U_{tr}$ , kai apdorojama 100 signalo realizacijų.  
**Fig. 3.10.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from white and  $1/f$  noise voltage  $U_{tr}$ , when 100 signal realizations are processed



**3.11 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo baltojo ir  $1/f$  triukšmų įtampos  $U_{tr}$ , kai apdorojama 200 signalo realizacijų.  
**Fig. 3.11.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from white and  $1/f$  noise voltage  $U_{tr}$ , when 200 signal realizations are processed



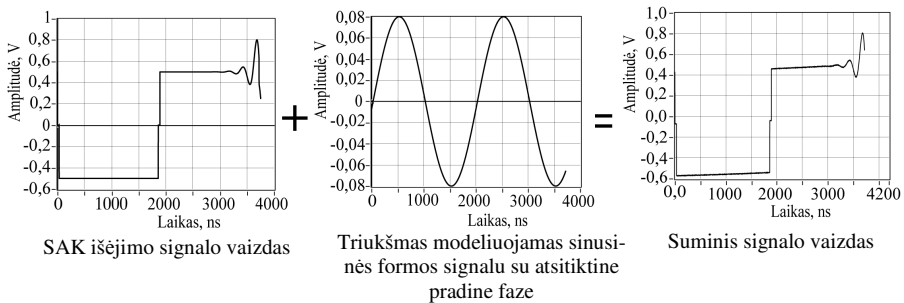
**3.12 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo baltąjo ir  $1/f$  triukšmų įtamos  $U_{tr}$ , kai atliekama 500 signalo realizacijų

**Fig. 3.12.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from white and  $1/f$  noise voltage  $U_{tr}$ , when 500 signal realizations are processed

Atlikus SAK išėjimo signalo skaitmeninio apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo tyrimą buvo nustatyta, jog, veikiant bet kuriam – baltajam ar  $1/f$  triukšmams ir didinant apdorojamų signalo realizacijų skaičių nuo 20 iki 500, nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos sumažėja beveik penkis kartus. Tai reiškia, kad padidinus apdorojamų signalų skaičių nuo 20 iki 500, tą pačią įrangą (keitiklį, apdorojimo algoritmą) galima naudoti dviem skiltimis tikslesnių SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimui.

Nustatyta, kad esant vienodam apdorojamų realizacijų skaičiui ir triukšmų intensyvumui, didžiausią įtaką tikrinimo nuokrypoms turi  $1/f$  triukšmas ir šios nuokrypos yra 2 kartus didesnės nei baltąjo triukšmo generuotos nuokrypos. Dėl šios priežasties buvo tiriama, kokio dažnio  $1/f$  triukšmas turi didžiausią įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatams.

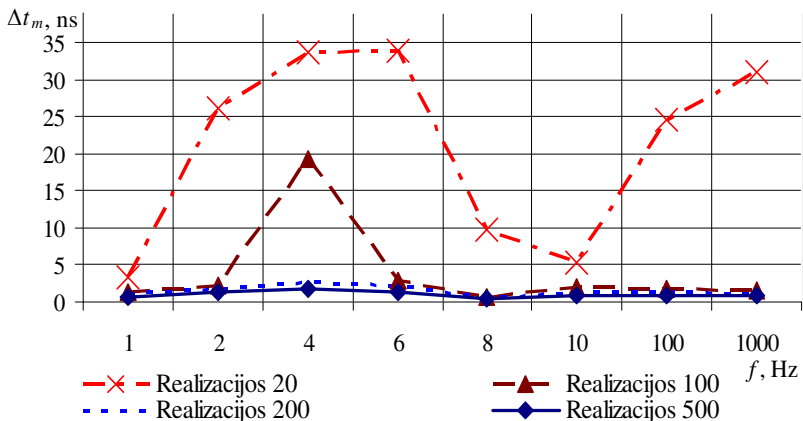
Kitas tyrimo uždavinys – nustatyti kokių dažnių triukšmams sudarytasis SAK išėjimo signalo apdorojimo algoritmas yra jautriausias. Šiuo tikslu buvo sukurtas triukšmo modelis, kuriame  $1/f$  triukšmo skaitmeniniam masyvui gauti buvo sukurtas triukšmo modelis, kuriame triukšmą imituoja sinusinės formos signalas su atsitiktine pradine faze, o tiriamojo signalo masyvas gautas sumuojant tiriamojo signalo masyvą su šiuo triukšmo masyvu (3.13 pav.). Tokiam triukšmo signalui, galima keisti dažnį, amplitudę ir fazės deviacijos dydį ir, taip tirti kaip sukurtasis algoritmas slopina skirtingų dažnių triukšmus.



**3.13 pav.** Keitiklio tiriamojo signalo ir parenkamo dažnio savųjų triukšmų skaitmeninio signalo modelio sudarymas

**Fig. 3.13.** Creation of converter testing signal and selected frequency internal noises digital signal model

Tam, kad tiriamojo signalo ir sinusinio signalo masyvai būtų atsitiktiniai vienas kito atžvilgiu, sinusinio signalo, imituojančio triukšmo signalą, dažniai yra parenkami iracionalūs tiriamojo signalo pasikartojimo dažniui, o jų pradinė fazė kiekvienai signalo realizacijai nustatoma atsitiktinės vertės. Todėl, kiekvienoje naujoje tiriamojo signalo realizacijoje, tiriamojo signalo ir triukšmus imituojančio sinusinio signalo fazių skirtumas bus atsitiktinis. Tyrimo metu buvo keičiamas tik šio triukšmo dažnis, jo amplitudė ir fazės deviacijos dydis palikomi pastovūs, o visi kiti galimi nestabilumai buvo prilyginti nuliui (3.14 pav.).



**3.14 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo triukšmo dažnio  $f$ , kai apdorojama 20–500 signalo realizacijų

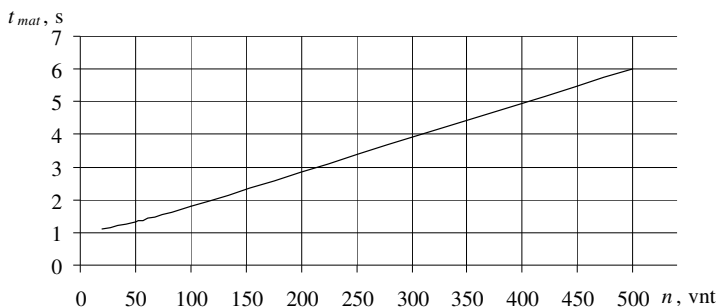
**Fig. 3.14.** Dependence of settling time error  $\Delta t_m$  to noise frequency  $f$  for 20–500 numbers of realizations of signal

Tyrimai parodė, kad didžiausias nusistovėjimo trukmės nuokrypas generuoja triukšmai, kurių dažnis yra tarp 0,1 ir 8 Hz (3.14 pav.). t.y.  $1/f$  triukšmo dažnių sritis. Iš čia matyti, kad vyraujančius stroboskopinio keitiklio išėjimo signalė  $1/f$  tipo triukšmus sudarytas skaitmeninio apdorojimo algoritmas slopina nepakankamai efektyviai. Kaip matyti iš paveikslo, šių nuokrypų dydis nėra pakankamai slopinamas net didinant apdorojamų signalų skaičių. Kaip matyti, iš 3.14 paveikslo tiriamojo signalo dreifai keitiklio išėjime neturi įtakos nusistovėjimo trukmės tikrinimui. Taip yra, todėl, kad sukurtas algoritmo lygių kompensavimo ir amplitudžių suvienodinimo procedūra sėkmingai eliminuoja atsirandančius tiriamojo signalo dreifus. Kaip matyti iš pateiktų rezultatų algoritmo apdorojamų signalų vidurkinimo procedūra ir nustačius pakankamą apdorojamų tiriamųjų signalų skaičių, sėkmingai slopina aukštesnio dažnio (virš 100 Hz) savųjų triukšmų įtaką.

Kompensacinių pikinio detektavimo stroboskopinių keitiklių savieji triukšmai, kaip parodyta (Kvedaras, V. 2001) analogiškai operacinių stiprintuvų saviesiems triukšmams, Šių stiprintuvų savieji triukšmai yra  $1/f$  ir baltojo triukšmų suma (Application Notes AN-519.1. 1996), kuriame pagal intensyvumą vyrauja  $1/f$  triukšmai. Taigi, kada keitiklio savieji triukšmai yra didžiausi, tada sukurtasis algoritmas yra mažiausiai veiksmingas.

### 3.2.3. Keitiklio našumo tyrimas

Vienas iš svarbių parametrų yra nusistovėjimo trukmių tikrinimo našumas, nes gali būti, kad didinant tiriamųjų signalų apdorojamų realizacijų skaičių smarkiai sumažės našumas ir jis taps nepriimtinas realiai aparatūrai.



**3.15 pav.** Vienos nusistovėjimo trukmės tikrinimo laiko  $t_{mat}$  priklausomybė nuo apdorojamų signalų realizacijų skaičiaus

**Fig. 3.15.** Dependence of one settling time testing time  $t_{mat}$  from processed signal realization number

Darbo metu nustatyta, kad, padidinus apdorojamų signalo realizacijų skaičių 25 kartus nuo 20 iki 500, triukšmų generuota nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypa sumažėja penkis kartus, o vieno tikrinimo trukmė pailgėja tik 6 kartus ir sudaro apie 6 s (3.15 pav.), kas dažniausiai neviršija tokiems darbams priimtinius dydžius.

### 3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Tyrimai parodė, kad, naudojant skaitmeninio signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmą, tiriamųjų signalų keitiklio išėjime pradžios nestabilumas iki 12 nanosekundžių ir signalo amplitudės nestabilumas iki  $\pm 20\%$  neįneša papildomų nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypų.

2. Tyrimai parodė, kad nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatai labai priklauso nuo signalo nusistovėjimo švytavimų slopimo dekremento. Modelyje slopimo dekrementą  $\beta$  padidinus nuo 30 iki 45, nusistovėjimo trukmės nuokrypa sumažėja dvigubai. Šiandieniniai SAK pasižymi dideliais slopimo dekrementais ( $\geq 45$ ), todėl nustatant šių SAK nusistovėjimo trukmes, tikrinimo nuokrypos bus mažesnės du kartus.

3. Atlikus triukšmų įtakos nusistovėjimo trukmių tikrinimams tyrimą parodyta, kad padidinus apdorojamų realizacijų skaičių 25 kartus, (nuo 20 iki 500), tikrinimo nuokrypa dėl triukšmų sumažėja daugiau kaip keturis su puse karto. Todėl padidinus apdorojamų realizacijų skaičių, tą pačią įrangą (keitiklį, apdorojimo algoritmą) galima naudoti dviem skiltimis tikslesnių SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimui.

4. Atlikti tyrimai parodė, kad didžiausią įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms turi savieji keitiklio triukšmai. Baltojo triukšmo įtaka nusistovėjimo trukmių tikrinimo paklaidai yra du kartus mažesnė nei  $1/f$  triukšmų įtaka. Didžiausią įtaką nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypoms turi žemojo nuo 1 iki 80 Hz dažnio triukšmai. Todėl pageidautina SAK tiriamojo signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmą tobulinti žemųjų dažnių triukšmų įtakos mažinimo nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypoms linkme.

5. Tyrimais įrodyta, kad sukurtas matuoklis su skaitmeninio signalo apdorojimu, naudojant 500 signalo apdorojamų realizacijų, tinka sparčiųjų iki 14 skilčių SAK nusistovėjimo trukmei matuoti, nustatant  $\pm 0,5$  MRS atskaitos lygius.

---

## **Tiriamųjų skaitmeninių-analoginių keitiklių išėjimo signalų skaitmeninis filtravimas ir nusistovėjimo trukmių tikrinimas**

Ankstesniuose skyriuose parodyta, kad naudojant specialiuosius stroboskopinius keitiklius, tiriamąjį signalą pakeistu masteliu pakeistus į skaitmeninį masyvą ir AK vykdant skaitmeninį šių masyvų skaitmeninį vidurkinimą ir nusistovėjimo trukmės nustatymą, galima tikrinti 12–14 skilčių sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes.

Šiame skyriuje sprendžiami stroboskopinio keitiklio išėjimo signalo filtravimo uždaviniai siekiant, kad keitiklio savųjų triukšmų įtampa būtų esminiai sumažinta, o tiriamasis signalas – neiškraipytas. Tam yra nagrinėjamas SAK tiriamojo signalo spektras, siūloma sudaryti skaitmeninio tiriamojo signalo pseudo periodinę seką. Parodyta, kad standartiniai skaitmeniniai filtrai netinka tiriamojo signalo filtravimui, aprašomas sudarytas naujo skaitmeninio keterinio filtro algoritmas ir jį realizuojanti programa. Aprašomas sudarytas naujas tiriamojo signalo skaitmeninio apdorojimo algoritmas apimantis signalo filtravimą bei vidurkinimą ir skaitmeninį nusistovėjimo trukmės nustatymą. Sudaryta jį

realizuojanti programa ir ištirtas signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės nustatymo efektyvumas.

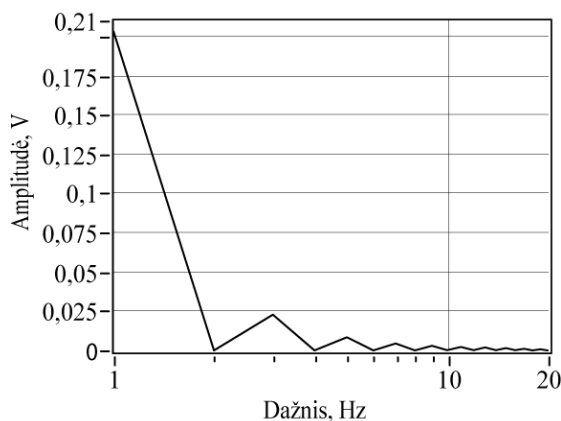
Skyriaus medžiaga publikuota trijuose autoriaus straipsniuose (Ustinavičius 2010a; Ustinavičius *et al.* 2009b; Ustinavičius *et al.* 2010b).

## 4.1. Tiriomojo signalo ir savųjų triukšmų skaitmeninių masyvų spektrai

Parinkti skaitmeninio apdorojimo filtrą galima tik išnagrinėjus tiriomojo signalo ir specialiųjų keitiklių savųjų triukšmų parametrus ir ypatybes.

Sustiprinto tiriomojo SAK išėjimo signalo pakeistu laiko masteliu ir keitiklio savųjų triukšmų signalas, kaip parodyta 2 skyriuje, siunčiamas į ASK. Čia tiriomojo signalo vienas periodas ir tuo metu veikiantys savieji triukšmai (signalas ir triukšmų suminis signalas) keičiamas į skaitmeninį masyvą ir siunčiamas į AK.

Vienas SAK tiriomojo signalo periodas ASK yra keičiamas į  $N_P$  diskretinių verčių masyvą, kuris talpinamas AK atmintinėje.



**4.1 pav.** Tiriomojo signalo vienos realizacijos pakeistos į skaitmeninį masyvą diskretinio spektro gaubiamoji

**Fig. 4.1.** Envelope of one realization digital signal discrete spectrum

Skaitmeninė tiriomojo signalo vieno periodo ir keitiklio savųjų triukšmų skaitmeninė realizacija turi diskretųjį spektrą (Lai *et al.* 2005; Rathore 2006; Rathore 2003; Cory 2005; Van de Plassche 2003), kurio (harmonikos) dažnių

ašyje išdėstytos kas  $2\pi/N_d$ , kur  $N_d$  – skaitmeninio masyvo diskrečių skaičius (mūsų atveju  $N_d = N_p$ ). Todėl, tiek tiriamojo signalo, tiek savųjų triukšmų įtampa, kuri yra diskretizuojama kartu su tiriamuoju signalu, harmonikos (harmonikų dažniai) sutaps, o suminių harmonikų amplitudės – abiejų signalų harmonikų suma (4.1. pav.). Keičiant į skaitmeninę formą kitą tiriamojo signalo periodą (realizaciją), tiriamasis signalas bus toks pat, o keitiklio savieji triukšmai – atsitiktinis dydis – turės kitas vertes, todėl suminio skaitmeninio signalo spektre pakis tik spektro dedamųjų amplitudės. Filtruoti tokius keitiklio savuosius triukšmus, neiškraipant tiriamojo signalo, yra labai sudėtinga. Vienas galimų tokių signalų apdorojimo metodų – vidurkinimas – ir buvo panaudotas anksčiau tirtame algoritme.

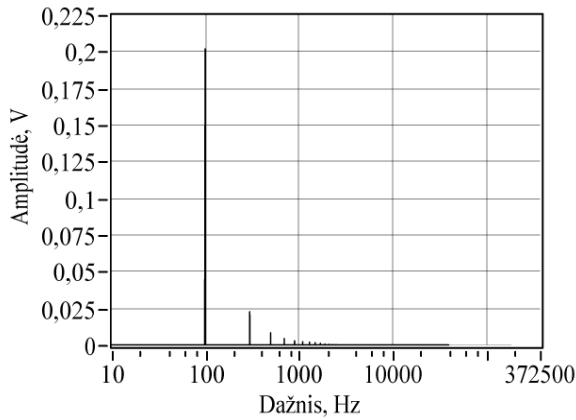
Tyrimais buvo nustatyta, kad vidurkinimo galimybės praktiškai išnaudotos, todėl buvo prieita išvados, kad reikalingas kitas signalų apdorojimo metodas.

Signalų vidurkinimo algoritme yra naudojama  $n_s$  tiriamojo signalo skaitmeninių masyvų, kuriuos sudaro pilnas tiriamojo signalo periodas. Stroboskopinio keitiklio išėjime signalas pakeistu laiko masteliu sudaromas iš tiriamojo signalo akimirkinių verčių, imamų iš tiriamojo SAK išėjimo signalo skirtingų periodų, todėl tai suvidurkintas signalas. Dėl šios priežasties, galima tvirtinti, kad SAK išėjimo signalas yra toks pat kiekvienos signalo realizacijos metu. Tuo tarpu keitiklio savieji triukšmai kiekvienos realizacijos metu yra skirtingi (atsitiktiniai). Buvo pasiūlyta iš  $n_s$  tiriamojo signalo realizacijų (periodų) sudaryti pseudo periodinę tiriamųjų signalų skaitmeninių masyvų seką.

## 4.2. Tiriamojo skaitmeninio signalo periodizavimas

Specialiojo stroboskopinio keitiklio tiriamojo išėjimo signalo pakeistu laiko masteliu pasikartojimo dažnis yra pastovus ir lygus  $F_s$ . Keitiklyje ASK taktavimo dažnį nustato žingsnio formavimo generatoriai, todėl į AK perduodamas skaitmeninis masyvas tiksliai lygus tiriamojo signalo periodui pakeistu laiko masteliu, o šio signalo spektras yra diskretinis. Signalų harmonikos išdėstytos kas  $F_s$  iki keitiklio pralaidumo juostos ribojamo dažnio (4.2 pav.).

Realiuose SAK nusistovėjimo trukmės nustatymo įrenginiuose, kaip minėta aukščiau, yra diskretizuojama ir į kompiuterio atmintinę persiunčiama SAK tiriamojo signalo  $n_s$  periodų skaitmeninių masyvų. Keičiant į skaitmeninę formą  $n_s$ -ąjį tiriamojo signalo periodą (realizaciją), tiriamasis signalas yra toks pat, o kiekvienos iš  $n_s$  realizacijų keitiklio savieji triukšmai – atsitiktinis dydis – turės kitas vertes, todėl suminio skaitmeninio signalo spektre pakis tik spektro dedamųjų amplitudės.



**4.2 pav.** Tiriomojo signalo spektras keitiklio išėjime, priėmus  $F_S = 100$  Hz  
**Fig. 4.2.** Magnitude spectrum of investigation signal of converter output, when  $F_S = 100$  Hz

Kai šias  $n_s$  tiriomojo signalo ir triukšmų realizacijų, tiksliai atitinkančių tiriomojo signalo periodą, apjungiame į vieną tiriomųjų impulsų seką, gaunamas pseudo periodinis tiriamasis signalas.

Kaip žinoma, tiriąmąjį SAK signalą sudaro stačiakampis impulsas su švytimais baigiantis persijungimams. Analizei priimame, kad tiriamasis signalas yra diskretinis stačiakampis pseudo periodinis signalas (Харкевич 1957).

Kai diskretizuojama tik  $n$  tiriomojo signalo periodų ir iš jų sudaroma pseudo periodinė seka, sinusinės spektro dedamosios turės; pirmoji –  $n$  periodų, trečioji  $3n$  periodų, penktoji  $5n$  periodų ir t. t., o toks baigtinio periodų skaičiaus sinuso dėsniu kintantis signalas aprašomas:

$$u_s(m) = \begin{cases} \sin(2\pi m/M), & \text{kai } |m| < \frac{n_i}{2}, \\ 0, & \text{kai } |m| > \frac{n_i}{2}, \end{cases} \quad (4.1)$$

čia  $m$  – sinusinio signalo diskretinė vertė;  $n_i$  – diskretinių verčių skaičius sinusinio signalo periode.

Sinusinio signalo sudaryto iš  $n_i$  periodų spektras:

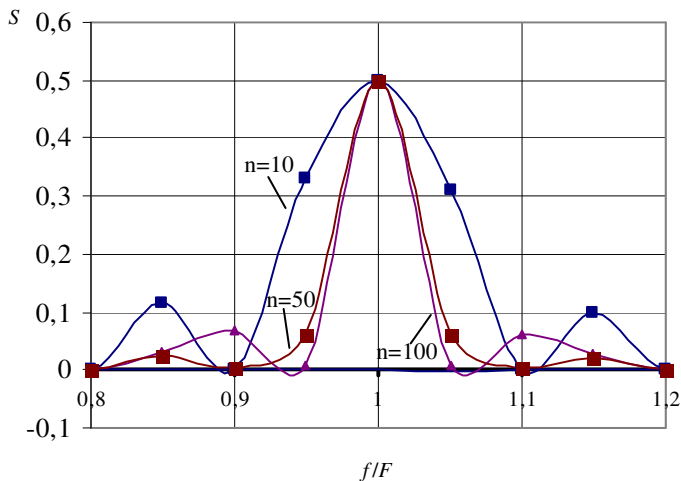
$$G_t = \frac{F}{\pi(F^2 - f^2)} \sin \frac{\pi n_i f}{2F}. \quad (4.2)$$

$N_i$  periodų sinusinio signalo spektro plotis (neįvertinus mažų periferinių dalių):

$$\Delta f = \frac{f_c}{n_i}, \quad (4.3)$$

čia  $f_c$  – centrinis harmonikos dažnis.

Sinuso dėsnio kintančio pseudo periodinio signalo spektro užimamas plotis, kaip matyti iš 4.3 paveikslėlio, didinant pasikartojimų skaičių, siaurėja.



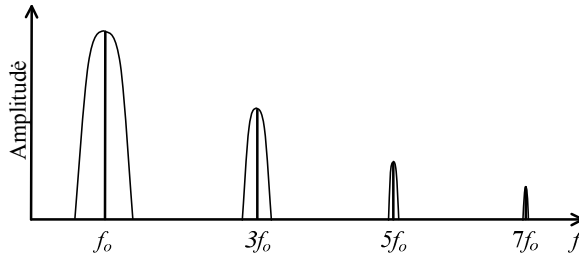
**4.3 pav.** Pirmosios pseudo periodinio stačiakampio impulso spektro dedamosios harmonikos aplinka prie skirtingo signalo pasikartojimo periodų skaičiaus  $n$

**Fig. 4.3.** The first pseudo-periodic rectangular pulse spectrum harmonic environment when different signal repeating period number

Stačiakampio pseudo periodinio signalo kiekvienai spektro dedamajai, kaip minėta aukščiau, periodų skaičius  $n_i$  didėja: pirmajai harmonikai jis yra  $n_i$  periodų, trečiajai –  $3n_i$ , penktajai –  $5n_i$  ir t. t., todėl tokio signalo spektras atrodys taip (4.4 pav.). Be to, didinant tiriamojo signalo realizacijų skaičių pseudo periodinėje sekoje, visų harmonikų užimamas plotas siaurėja. Pavyzdžiui, paėmus  $n_i = 100$ , pirmosios harmonikos spektro šoninės dalys ties 99 ir 101 Hz sudaro tik 3 % nuo pirmosios harmonikos amplitudės.

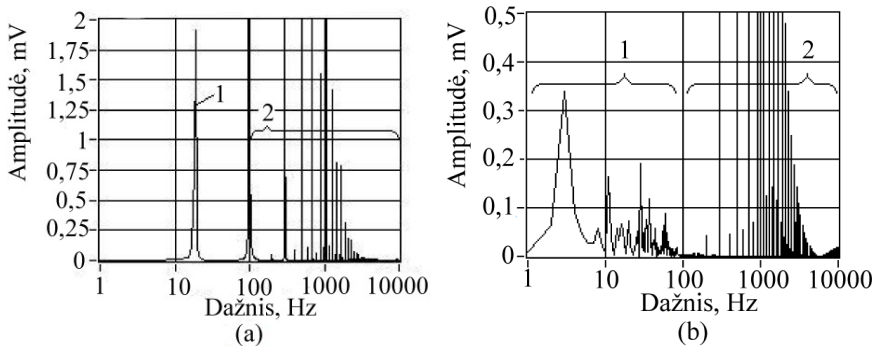
Diskretizuojant ir įrašant į atmintinę  $n_s$  tiriamųjų signalų realizacijų, sudarančių pseudo periodinę signalų seką, kartu yra diskretizuojamos ir keitiklio sąvųjų triukšmų vertės (Alan *et al.* 2003; Boaz 1997; Richard 2010; Steven 2004).

Signalų ir savųjų triukšmų spektrai gauti modeliuojant LabView<sup>®</sup> paketu pateikti 4.5 paveiksle, jame matyti, kad triukšmų spektras yra kitoks, atsitiktinis, nesurištas su signalo spektru.



**4.4 pav.** Pseudo periodinio signalo spektras  
**Fig. 4.4.** Magnitude spectrum of pseudo-periodic signal

Kaip matyti tiriamojo signalo spektro dedamosios ir keitiklio savųjų žemųjų dažnių triukšmų spektras, tiek kai jis imituojamas sinusiniu signalu (4.5 pav., a), tiek kada imituojamas sinusiniu signalu su atsitiktine faze (4.5 pav., b), skiriasi. 4.5 paveiksle: 1 – sinusinio signalo spektro linija; 2 – tiriamojo signalo spektras. Keltas uždavinys išspręstas: periodizavus tiriamąjį signalą, tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų spektrai pilnai ar dalinai skiriasi.



**4.5 pav.** Pseudo periodinio signalo ir savųjų triukšmų spektrai  
a – keitiklio savieji triukšmai imituoti 15 Hz sinusiniu signalu; b – keitiklio savieji triukšmai imituoti 15 Hz sinusiniu signalu su kiekvienoje realizacijoje nustatoma atsitiktine pradine faze

**Fig. 4.5.** Magnitude spectrum of pseudo-periodic test signal and internal noise: a – internal noise simulate of 15 Hz sine signal; b – internal noise simulate of 15 Hz sine signal with random phase in every realization

Reikia pažymėti, kad negalima kartoti vienos signalo realizacijos  $n_s$  kartų. Šiuo atveju kiekvieno periodo metu kartosis tas pats signalas ir tie patys trukdžiai ir triukšmai, kurie taps multiplikatyviniais trukdžiais. Jų filtravimas bus taip pat sudėtingas ar visai negalimas, kaip ir vienos realizacijos atveju. Pseudo periodiniam tiriamojo signalo masyvui gauti naudojant  $n_s$  tiriamojo elektrinio signalo realizacijų, kiekvienoje realizacijoje trukdžių ir triukšmų signalas yra atsitiktinis ir keičiant jį skaitmeniniu masyvu bei periodizuojant, šis trukdžių signalas liks adityvinis, jo spektro dedamosios bus savos ir nesutaps (4.5 pav., a) ar iš dalies nesutaps (4.5 pav., b) su tiriamojo signalo spektro dedamosiomis. Tokių triukšmo signalą galima filtruoti įprastais filtrais.

### 4.3. Tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų masyvų skaitmeninis filtravimas

Tikrinant sparčiųjų SAK nusistovėjimo trukmes, kaip minėta aukščiau, yra nustatomi labai maža įtampos verte (šimtų ar mažiau mikrovoltų) besiskiriantys nuo tiriamojo signalo nusistovėjusiųjų verčių atskaitos lygiai. Tuo būdu tiriamasis signalas, jį stiprinant ir keičiant, negali būti iškraipytas, o keitiklio savųjų triukšmų ir trukdžių įtampa turi būti efektyviai slopinama, kad šie triukšmai neįtakotų nusistovėjimo trukmės tikrinimo. Todėl kuriamas filtras turėtų efektyviai eliminuoti triukšmus mūsų nurodytame diapazone, bet neturėti įtakos tiriamajam signalui. Dėl šios priežasties kuriamojo filtro charakteristika filtro praleidžiamų dažnių juostoje turi būti idealiai plokščia, o už šios juostos ribų kaip galima efektyviau slopinti triukšmų signalą. Net ir nežymūs tiriamojo signalo iškraipymai sukels nepriimtinas nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypas.

#### 4.3.1. Tiriamojo signalo filtravimas standartiniais filtrais

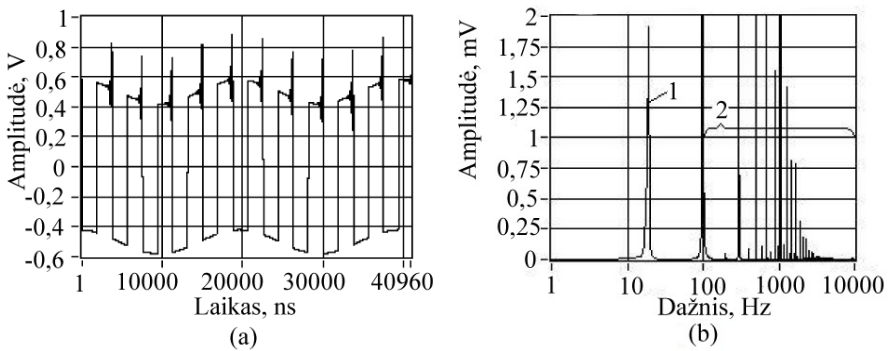
Signalų analizėje filtras – aparatūros įtaisas arba programa, kuri vienas signalo dedamąsias praleidžia, kitas sulaiko. Sistemų teorijos požiūriu, filtras yra sistema, transformuojanti įėjimo signalą  $x(t)$  į išėjimo signalą  $y(t)$  (4.6 pav.) (Wai-Kai 1995; Miroslav *et al.* 2001; Shenoj 1999; John 1999; John *et al.* 2001; Todd *et al.* 2000; Jonathan *et al.* 1998; Hari 1998).



**4.6 pav.** Filtras, kaip įėjimo signalą į išėjimo signalą transformuojantis įtaisas  
**Fig. 4.6.** Filter as a device transforming input signal into output

Kaip matyti iš 4.5 paveikslo, generuojamos pseudo periodinės skaitmeninės tiriamųjų signalų sekos pirmosios harmonikos dažnis turi būti parinktas aukštesnis už sukurtojo SAK tiriamųjų signalų apdorojimo algoritmo jautrumo ribą (80 Hz) (4.3 pav.). Po to šis tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų skaitmeninis masyvas gali būti filtruojamas skaitmeniniu žemųjų dažnių filtru. Be to, kaip buvo pažymėta, tiriamasis signalas, o ypač jo plokščioji dalis, filtravimo metu negali būti iškraipytas. Prieš tai atlikta standartinių filtrų analizė parodė, kad tokius reikalavimus turėtų tenkinti tik Baterforto ir Čebyševo II (LabView®) žemųjų dažnių filtrai, kurių perdavimo charakteristika pralaidumo juostoje yra plokščia.

LabView® paketu buvo sudarytas algoritmas, kuriame buvo generuojama tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų skaitmeninių signalų pseudo periodinė seka (4.7 pav.).

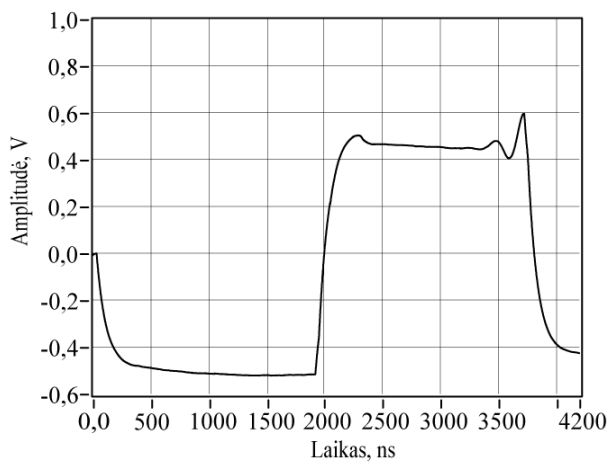


**4.7. pav.** Skaitmeninio pseudo periodinės sekos signalo ir savųjų triukšmų suma (a) ir jų spektrai (b): 1 – triukšmo signalo spektro linija; 2 – pseudo periodinio signalo spektras

**Fig. 4.7.** Sum of pseudo-periodic signal and internal noises (a) and its spectra(b): 1 – spectrum line of noise signal; 2 – spectrum of pseudo-periodic signal

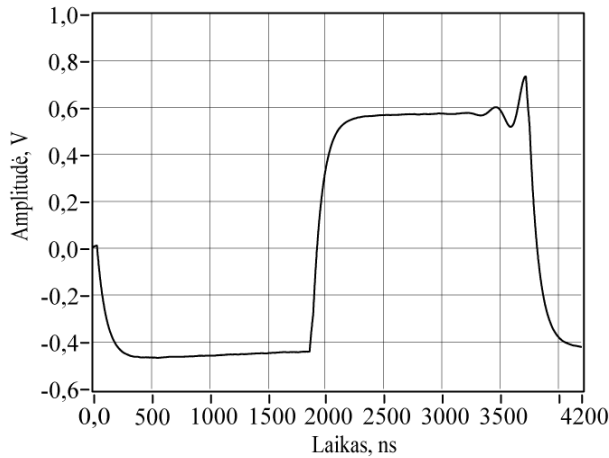
Analizuojant skaitmeninių filtrų savybes, buvo atrinkti skaitmeniniai Baterforto ir Čebyševo II žemųjų dažnių filtrai, kaip turintys plokščias charakteristikas

praleidžiamų dažnių juostoje (Selesnick *at el.* 1998). LabView<sup>®</sup> pakete (Fedosov *at el.* 2007; Vijay 1997; Vijay 1998) buvo sudaryti filtravimo algoritmai ir tiriamą, kaip šie filtrai filtruoja 4.5 paveiksle parodytą žemųjų dažnių triukšmų turintį tiriamąjį signalą. Šis signalas buvo siunčiamas į skaitmeninį Baterforto filtrą. Po to buvo tiriamas Baterforto filtro išėjime gaunamas signalas. Tyrimas parodė, kad tiriamąjį signalą Baterforto filtras neleistinais iškraipo net parinkus jo kritinį dažnį  $f_p$  lygų 5 Hz ir maksimalią LabView<sup>®</sup> paketo leidžiamą filtro eilę ( $k = 30$ ) (4.8 pav.).



**4.8 pav.** SAK išėjimo signalas filtruotas skaitmeniniu Baterforto aukštųjų dažnių filtru, kuriame nustatyta  $f_p = 5$  Hz,  $k = 30$ , kur  $f_p$ ,  $k$  – nustatomi Baterforto filtro parametrai  
**Fig. 4.8.** DAC output signal after digital Butterworth high-pass filter with  $f_p = 5$  Hz,  $k = 30$ , where  $f_p$ ,  $k$  – parameters of Butterworth filter

Kaip aukščiau minėta, kitas reikalavimus atitinkantis yra Čebiševo II žemų dažnių filtras. Ta pati tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų skaitmeninių signalų pseudo periodinė seka (4.5 pav.) buvo siunčiamas į Čebiševo filtrą ir buvo tiriamas Čebiševo filtro išėjime gaunamas signalas. Nustatyta, kad tiriamąjį signalą Čebiševo filtras taip pat neleistinais iškraipo, kaip ir Baterforto filtras, net parinkus jo kritinį dažnį  $f_p$  lygų 5 Hz ir maksimalią LabView<sup>®</sup> paketo leidžiamą filtro eilę ( $k = 30$ ) (4.9 pav.). Iš gautų rezultatų matyti, kad tiek Baterforto tiek Čebiševo II filtrai neleistinais iškraipo tiriamojo signalo plokščiąją dalį, todėl nusistovėjimo trukmių nustatymas ne tik nepagerėja, bet jų išvis nebegalima nustatyti.



**4.9 pav.** SAK išėjimo signalas filtruotas Čebiševo žemųjų dažnių filtru, kuriame nustatyta  $f_p = 5$  Hz,  $k = 30$ , kur  $f_p$ ,  $k$  – nustatomi Čebiševo filtro parametrai

**Fig. 4.9.** DAC output signal after Chebyshev high-pass filter with  $f_p = 5$  Hz,  $k = 30$ , where  $f_p$ ,  $k$  – parameters of Chebyshev filter

Iš atliktų bandymų ir tyrimų galima daryti išvadą, kad standartiniai žemųjų dažnių filtrai yra netinkami SAK tiriamojo signalo filtravimui, nes neleistinai iškraipo tiriamąjį signalą.

### 4.3.2. Skaitmeninio keterinio filtro sudarymas

Buvo pasiūlyta žemųjų dažnių saviesiems triukšmams filtruoti sukurti skaitmeninį keterinį filtrą.

Skaitmeninio dažninio keterinio filtro idėja yra tame, kad sudarius pseudo periodinę tiriamųjų SAK signalų seką, tiriamojo signalo spektras tampa diskretinis. Pseudo periodinio tiriamojo signalo ir keitiklio savųjų triukšmų skaitmeninis masyvas, vykdant tiesioginę Fourier transformaciją, verčiamas spektru. Pirmoji tiriamojo signalo harmonika turi dažnį  $f_s$ . Dažnių diapazone nuo 0 iki  $f_s$  jokių tiriamojo signalo harmonikų nėra, tačiau yra atsitiktinių keitiklio savųjų triukšmų spektro dedamosios. Toliau tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų spektro dedamosios dauginamos su sudaryto filtro svorio funkcija:

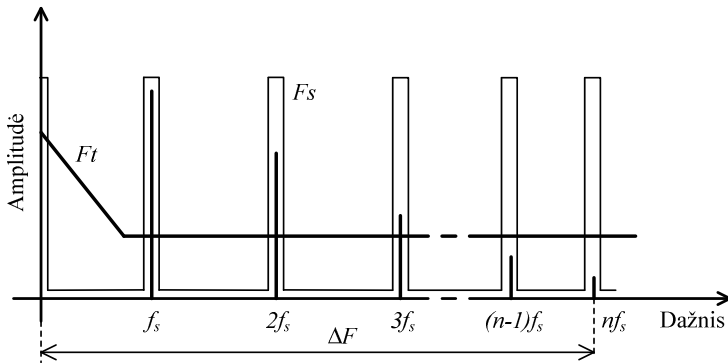
$$H(f) = \begin{cases} 1, & \text{kai } f \geq f_s, \\ 0, & \text{kai } f < f_s. \end{cases} \quad (4.4)$$

Tiriamąo signalo spektro pirmosios ir aukštesnių harmonikų vertės dauginamos iš 1, ir jos nepasikeičia, o žemųjų dažnių triukšmo ir trukdžių signalai, kurių dažniai yra ribose tarp 0 ir  $f_s$  bus dauginami iš 0 ir išėjimo spektre jų neliks. Po to, vykdoma atgalinė Fourier transformacija ir atstatomas tiriamojo signalo skaitmeninis masyvas, kuriame didžiausio intensyvumo žemųjų triukšmų nėra. Reikia pažymėti, kad triukšmai, kurių spektro dedamosios yra lygios ar didesnės už  $f_s$ , tokiaime filtre nėra filtruojamos.

Kai pseudo periodinėje sekoje periodų skaičius yra baigtinis, tada, kaip parodyta 4.1.1 punkte, apie pagrindinę spektro dedamąją susidaro papildomos „šoninės“ spektro linijos. Šiuo atveju, sukurtas filtras gali iškraipyti signalą. Iškraipymų galima išvengti sudarant pakankamai ilgą periodų seką, arba parenkant filtro svorio funkciją:

$$H(f) = \begin{cases} 1, & \text{kai } f \geq (f_s - f_d), \\ 0, & \text{kai } f < (f_s - f_d), \end{cases} \quad (4.5)$$

čia  $f_d$  – signalo spektro apie pirmąją harmoniką žemiausias dažnis.



**4.10 pav.** Tiriamojo pseudo periodinio signalo (dažnių juosta  $\Delta F$ ), keitiklio savųjų triukšmų ( $F_t$ ) spektrai ir sudaryto keterinio filtro dažninė charakteristika ( $F_s$ )

**Fig. 4.10.** Spectrum of testing pseudo periodic signal (frequency band  $\Delta F$ ), converter internal noises ( $F_t$ ) and created comb filter frequency characteristic ( $F_s$ )

Taip parinkus filtro svorio funkciją, tiriamasis signalas nebus iškraipytas.

Keitiklio išėjime veikia ir kiti savieji triukšmai (pvz., baltasis), kurių spektrai gali tęstis visoje tiriamojo signalo dažnių juostoje, todėl pageidautina ir šių

triukšmų dedamąsias kaip galima daugiau slopinti. Be to, (Application Note AN-519.1 *et al.* 1996) nurodoma, kad operacinių stiprintuvų  $1/f$  tipo triukšmai gali tęstis iki kilohercų diapazono. Todėl buvo pasiūlyta patobulinti pasiūlytą filtrą ir sudaryti dažninio keterinio filtro algoritmą. Toks filtras turi turėti keteras, dažniuose lygiuose  $f = nf_s$  (4.10 pav.), o jo svorio funkcija:

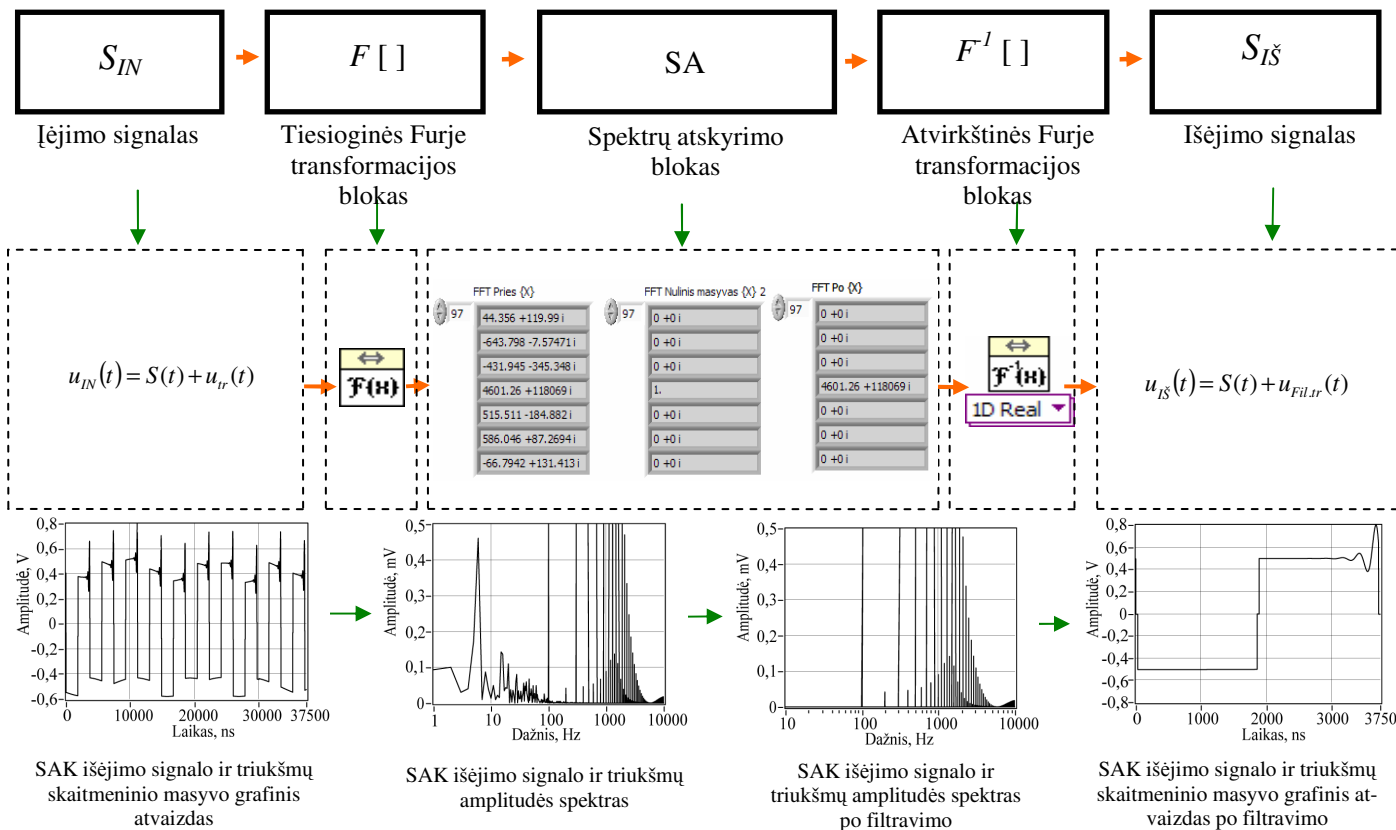
$$H(f) = \begin{cases} 1, & \text{kai } f = nf_s, \\ 0, & \text{kai } f < nf_s. \end{cases} \quad (4.6)$$

Jeigu tokia svorio funkcija apima visas tiriamojo signalo spektro dedamąsias (iki  $f = f_{maks}$ , kur  $f_{maks}$  – keitiklio išėjimo signalo spektro aukščiausio dažnio dedamoji), tai tiriamojo signalo spektras po filtravimo iš pseudo periodinio taps periodiniu ir jis iškraipytas nebus.

Reikia pažymėti, kad dažninis keterinis filtras nefiltruoja triukšmų ar trikdžių, kurių dažnis yra lygus tiriamojo signalo spektro dedamųjų dažniams ( $f_T = nf_s$ , kur  $n = 1, 2, 3, \dots$ ), (4.10 pav.).

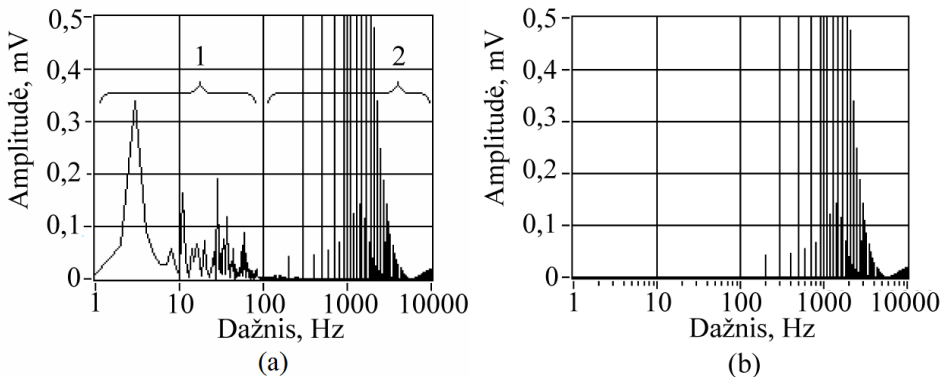
### 4.3.3. Skaitmeninio keterinio filtro algoritmas ir jo tyrimas

Sukurto filtro tyrimui LabView<sup>®</sup> programiniame pakete buvo sudaryta filtro programa, kurio struktūrinė schema pateikta 4.11 paveiksle. Filtro įėjimo signalu buvo skaitmeninis signalo ir keitiklio savųjų triukšmų masyvas siunčiamas iš sukurto tiriamojo signalo modelio bloko į greitosios Fourier transformacijos bloką (GFT) ir keičiamas į jo spektrinę atvaizdą. Tiriamojo signalo masyvo parametrai parinkti taip, kad signalo harmonikos yra  $1f_s = 100$ ,  $2f_s = 200$ ,  $3f_s = 300$  ir t. t. spektrinės linijos. Po to šio suminio tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų signalo spektrinės linijos diapazonuose (dažninėse juostose)  $0 \dots (1f_s - 1)$ ,  $(1f_s + 1) \dots (2f_s - 1)$ ,  $(2f_s + 1) \dots (3f_s - 1)$ ,  $(3f_s + 1) \dots (4f_s - 1)$  ir t. t. yra dauginamos iš daugiklio  $(0 + 0j)$  ir tampa lygios nuliui, o tiriamojo pseudo periodinio signalo spektrinės dedamosios ( $1N_s = 100$ ,  $2N_s = 200$ ,  $3N_s = 300$  ir t. t.) dauginamos iš daugiklio 1 ir nepakinta. Realaus keitiklio išėjimo signalo nėra harmonikų didesnių nei  $nf_s$ , kur  $nf_s$  – aukščiausia keitiklio keičiamo (perduodamo) dažnio signalas (4.10 pav.). Virš šio dažnio nebus nei signalo nei triukšmo dedamųjų, todėl filtro charakteristika turi būti sudaroma iki  $nf_s$ . Triukšmų spektro dedamosios nesusitampinės su tiriamojo signalo spektro dedamosiomis panaikinamos ir jų nėra dažninio filtro išėjimo spektre. Šis filtruoto signalo spektras atbulinės diskretinės Fourier transformacijos bloke (AGFT) yra vėl keičiamas į tiriamąjį signalą. Keitiklio savųjų triukšmų vidutinė kvadratinė įtampa išėjimo signalo yra esminiai sumažinta.



**4.11 pav.** Sukurto dažninio keterinio filtro struktūrinė schema  
**Fig. 4.11.** Structural diagram of designed frequency comb filter

Skaitmeninis dažninis keterinis filtras buvo sudarytas ir jo veikimas patikrintas LabView<sup>®</sup> paketu. Savieji triukšmai buvo imituojami  $f_{t1}$  dažnio sinusiniu signalu, kurio pradinė fazė kiekvienos tiriamojo signalo realizacijos pradžioje priima atsitiktinę vertę vienodos tikimybės dėsnio nuo 0 iki  $360^\circ$ . Šio triukšmo įtampos skaitmeninis masyvas buvo sumuojamas su tiriamojo signalo pseudo periodiniu, sudarytu iš 100 periodų skaitmeniniu masyvu ir greitosios Fourier transformacijos bloke keičiamas į spektrą (4.12 pav., a).



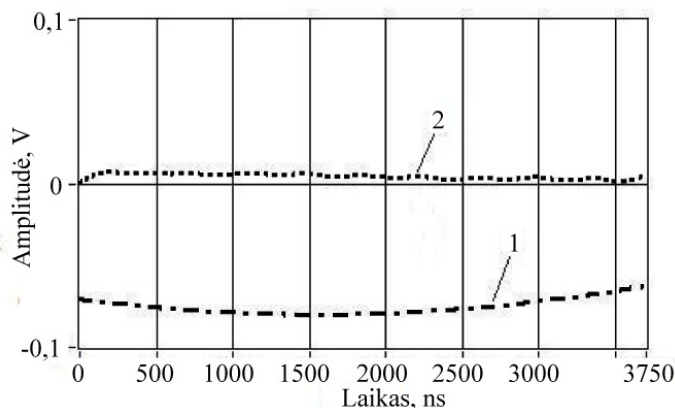
**4.12 pav.** Pseudo periodinio signalo ir savųjų žemųjų dažnių triukšmų skaitmeninių signalų spektrai filtro įėjime (a) ir išėjime (b). 1 – triukšmo spektras; 2 – tiriamojo signalo spektras

**Fig. 4.12.** Magnitude spectra of pseudo-periodic test signal and low-frequency internal noise in filter input (a) and output (b): 1 – spectrum of noise; 2 – spectrum of testing signal

Kaip matyti iš 4.12 paveikslo, savųjų triukšmų spektrą kiekvienos realizacijos metu sudaro atsitiktinės harmonikos, kurių didžioji dalis yra išsidėsčiusi dažnių diapazone iki 100 Hz, o tiriamojo signalo – aukščiau 100 Hz (4.12. pav., a, 2 spektras). Atlikus pseudo periodinio tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų skaitmeninių signalų analizę, matyti, kad srityje kur yra intensyviausios savųjų triukšmų spektro dedamosios (iki 80 Hz), sudaryto pseudo periodinio tiriamojo signalo spektro harmonikų arba nėra, arba jos atsiranda tik dėl baigtinio signalo pasikartojimų skaičiaus (4.12 pav.). Tyrimo metu buvo filtruojamos visos dažninės juostos ir gautas spektras (4.12 pav., b), kuriame atsitiktinio žemųjų dažnių triukšmų spektro dedamosios yra nufiltruotos. Be to, yra nufiltruotos ir matomos įėjimo signalo spektre triukšmo dedamosios buvusios tarp pirmosios ir antrosios, antrosios ir trečiosios ir t. t. tiriamojo signalo harmonikų. Tuo būdu, galima konstatuoti, kad užsibrėžtas tikslas – filtruoti žemo dažnio –  $1/f$  triukšmą pasiektas. Be to,

sukurtas skaitmeninis filtras nufiltravo ir aukštesnių dažnių savųjų triukšmų dedamąsias. Po to šis spektras atbulinės Fourier transformacijos pagalba buvo vėl pakeistas filtruotu tiriamuoju signalu (4.11 pav.). Kadangi signalo iškraipymų nematyti, buvo paskaičiuota akimirkinė tiriamojo signalo nuokrypa. Tam iš filtro įėjimo (nefiltruoto) ir išėjimo (filtruoto) signalų masyvų verčių buvo atimtos idealaus tiriamojo signalo skaitmeninio masyvo atitinkamos vertės. 4.12 paveiksle parodyta nefiltruoto tiriamojo signalo (1 kreivė) skaitmeninio masyvo akimirkinių verčių ir filtruoto signalo skaitmeninio masyvo akimirkinių verčių nuokrypos (2 kreivė). Matyti, kad sukurtas dažninis keterinis filtras neiškraipė tiriamojo signalo, o savųjų triukšmų generuota nuokrypa esminiai (iki 8 kartų) sumažėjo. Sukurtas filtras nefiltruoja savųjų triukšmų dedamųjų, kurių dažniai sutampa su tiriamojo signalo harmonikų dažniais, dėl to po filtravimo lieka nedidelė akimirkinių verčių nuokrypa.

Tyrimai parodė, kad filtruojant sudarytu filtru tiriamasis signalas nėra iškraipomas, todėl galima daryti išvadą, kad pseudo periodinė tiriamųjų signalų seka iš 100 periodų yra pakankama. 4.13 paveiksle pateikta tiriamojo signalo filtro išėjime akimirkinės nuokrypos periodo bėgyje rodo, kad sukurtas filtras neiškraipė tiriamojo signalo, o savųjų triukšmų įnešamos klaidos sumažėjo 8 kartus.

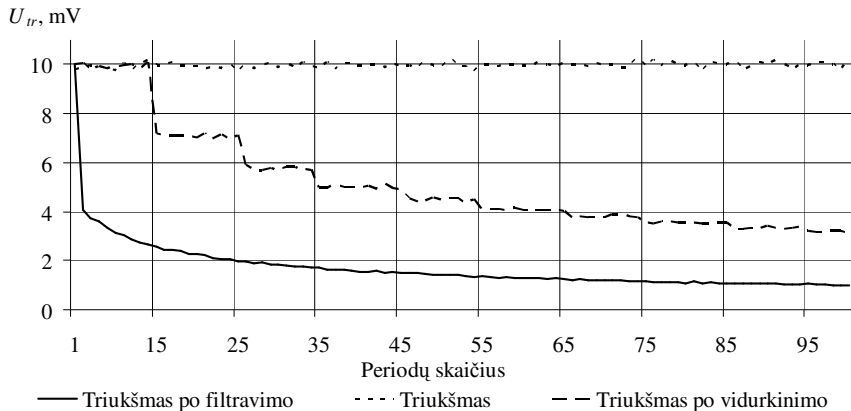


**4.13 pav.** SAK signalo įėjime (1 kreivė) ir filtruoto signalo skaitmeninių masyvų nuokrypos (2 kreivė)

**Fig. 4.13.** Errors of DAC input signal (1) and filtered digital signals arrays (2)

Buvo analizuojama, kiek sukurtas skaitmeninis dažninis keterinis filtras ir tiriamų signalų vidurkinimas efektyviai sumažina savųjų triukšmų lygį ir nusistovėjimo trukmių nustatymo nuokrypas. Taipogi buvo analizuojama kokią įtaką triukšmo lygio mažinimui turi parinktas apdorojamų signalo periodų skaičius.

Buvo patobulintas signalo apdorojimo algoritmas, leidžiantis parinkti skirtingą apdorojamų signalų skaičių, o signalo spektro centrinių harmonikų dažniai nepakinta. Atliktas modeliavimas parodė (4.14 pav.), kad sudarytas keterinis filtras vidutiniškai 30 % efektyviau nufiltruoja keitiklio savuosius triukšmus už ankstesnį vidurkinimo algoritmą esant tam pačiam apdorojamų signalų periodų skaičiui. Taip pat matyti, kad geri filtravimo rezultatai jau gaunami periodizavus 50–60 signalo periodų.



**4.14 pav.** Savųjų triukšmų slopinimo efektyvumas, naudojant vidurkinimą arba filtravimą priklausomai nuo apdorojamų periodų skaičiaus

**Fig. 4.14.** The efficiency of internal noise damping apply averaging or filtering from the different number of processed signal periods

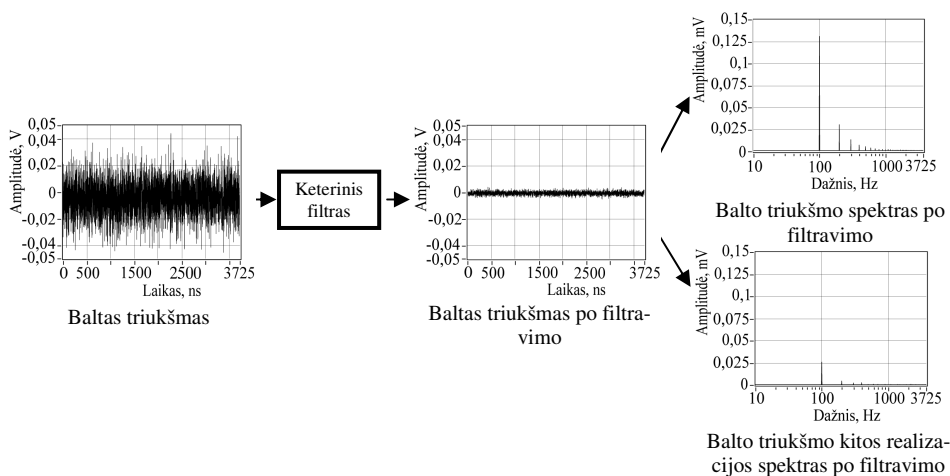
Matyti, kad sukurtas keterinis filtras nuslopina savuosius keitiklio triukšmus iki 10 kartų, kai filtruojama šimto periodų signalas ir apie 30 % geriau negu tai pasiekama naudojant vidurkinimo algoritmą. Toks triukšmų slopinimas leis tuo pačiu keitikliu nustatyti iki 3 skilčių didesnių SAK nusistovėjimo trukmes.

Reikia pabrėžti, kad sudarytas keterinis filtras nefiltruoja savųjų triukšmų, kurių dažniai sutampa su periodizuoto tiriamojo signalo harmonikų dažniais. Filtru išėjime triukšmas tampa periodiniu, su harmonikomis lygiomis  $n f_s$ . Dėl šios priežasties, sudaryto keterinio filtro efektyvumo tiesiogiai daugiau padidinti negalima, o tiriamųjų SAK skyra padidinama 3 skiltimis dažnai yra nepakankama. Papildomas filtruotų signalų akimirkinių verčių vidurkinimas tampa nebe efektyvus ir nebegali sumažinti triukšmo dedamųjų, kadangi visuose filtruoto signalo perioduose triukšmas turės tas pačias vertes ir fazes. Dėl šios priežasties, norint pasiekti geresnius savųjų triukšmų slopinimo rezultatus, reikalingas kitas sprendimas.

## 4.4. Tiriamojo skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo signalo filtravimo ir vidurkinimo skaitmeninio apdorojimo algoritmas ir jo tyrimas

Anksčiau buvo minėta, kad tiriamojo signalo skaitmeninis apdorojimas leidžia padidinti testuojamų SAK skyrą 2 skiltimis, o filtravimas sudarytu keteriniu filtru – 3 skiltimis. Kadangi savųjų triukšmų dažniai filtro išėjime yra kartotiniai tiriamojo signalo dažniui, tai kiekviename periode šie triukšmai yra vienodi ir tos pat fazės. Dėl šios priežasties, tiriamojo signalo vidurkinimas po filtravimo keteriniu filtru nėra efektyvus ir triukšmo ne sumažina. Tam, kad vidurkinimas būtų efektyvus reikia, kad po filtravimo keteriniu filtru tiriamieji signalai, siunčiami į vidurkinimo modulį turėtų skirtingas atsitiktines keitiklio savųjų triukšmų vertes.

Atlikta analizė ir modeliavimas rodo, kad keteriniu filtru filtruojant pseudo periodines tiriamųjų signalų sekas, skirtingų sekų tiriamieji signalai filtro išėjime yra vienodi, o serijų savieji triukšmai skiriasi (4.15 pav.). Todėl buvo pasiūlyta sudaryti naują SAK tiriamųjų signalų apdorojimo algoritmą, apjungiantį signalo sekų filtravimą ir filtruotų signalo sekų vidurkinimą.

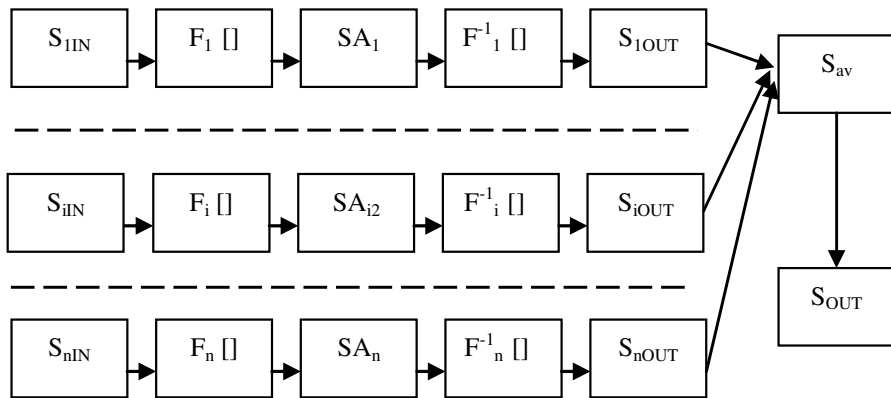


**4.15 pav.** Skirtingų realizacijų baltojo triukšmo filtravimas keteriniu filtru

**Fig. 4.15.** Filtering of different realization white noise with comb filter

Algoritmo realizavimui sudaroma  $n_s$  tiriamojo signalo pseudo periodinių sekų, jos filtruojamos sudarytu keteriniu filtru, imama visų filtruotų tiriamojo sig-

nalo sekų vienas periodas, ir jie vidurkinami (4.16 pav.). Šioje schemoje  $S_{1IN}$ ,  $S_{iIN}$ , ...,  $S_{nIN}$  – periodizuotos tiriamojo signalo sekos;  $F_1[]$ ,  $F_i[]$ , ...,  $F_n[]$  – sekų tiesioginės Fourier transformacijos blokai;  $SA_1$ ,  $SA_i$ , ...,  $SA_n$  – sekų ketenerinių filtrų blokai;  $F^{-1}_1[]$ ,  $F^{-1}_i[]$ , ...,  $F^{-1}_n[]$  – sekų atvirkštinės Fourier transformacijos blokai;  $S_{1IŠ}$ ,  $S_{iIŠ}$ , ...,  $S_{nIŠ}$  – sekų išėjimo signalai;  $S_{av}$  – sekų išėjimo signalų pirmo periodo vidurkinimo blokas;  $S_{OUT}$  – išėjimo signalas. Po signalo akimirkinių verčių vidurkinimo gautas apdorotas tiriamojo signalo periodo akimirkinių verčių masyvas persiunčiamas į algoritmo nusistovėjimo trukmės nustatymo modulį.

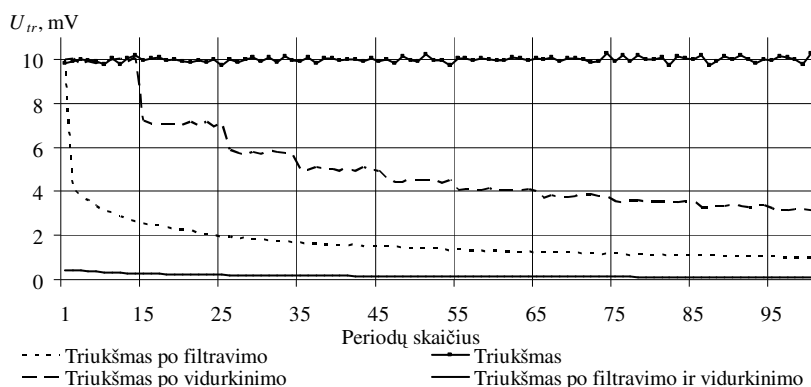


**4.16 pav.** Sudaryto tiriamojo signalo skaitmeninio filtravimo ir vidurkinimo algoritmo struktūrinė schema

**Fig. 4.16.** Structural diagram of algorithm of created testing signal digital filtering and averaging

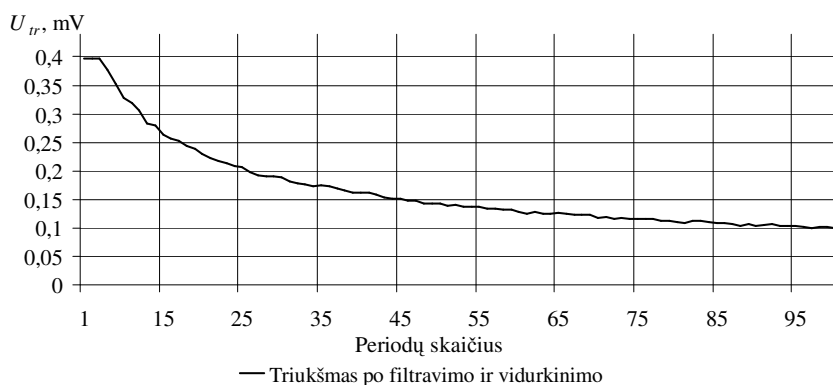
Sudarytame algoritme iš  $n_{pe}$  tiriamojo signalo ir keitiklio savųjų triukšmų periodų sudaromas pseudo periodinio tiriamojo signalo masyvas persiunčiamas į ketenerinį filtrą. Į atmintinę įrašomas vieno filtruoto tiriamojo signalo akimirkinių verčių periodo masyvas. Procesas kartojamas su  $n_s$  sudarytų naujų signalo sekų. Gauti  $n_s$  filtruotų tiriamojo signalo masyvų realizacijų buvo panaudoti po to sekančiam signalo vidurkinimui.

Pasiūlytas filtravimo ir vidurkinimo algoritmas buvo realizuotas LabView® paketu. Tyrimai parodė, kad pasiūlytas metodas labai efektyviai slopina savuosius triukšmus. Tyrimo rezultatai pateikti 4.17 ir 4.18 paveiksluose. Kaip matyti iš šių paveikslų triukšmai slopinami iki 100 kartų.



**4.17 pav.** Triukšmų lygis po skaitmeninio signalo apdorojimo vidurkinant, filtruojant bei filtruojant ir vidurkinant priklausomai nuo signalo periodų skaičiaus

**Fig. 4.17.** The level of noises after digital signal averaging, filtering or filtering and averaging depending on the number of signal periods



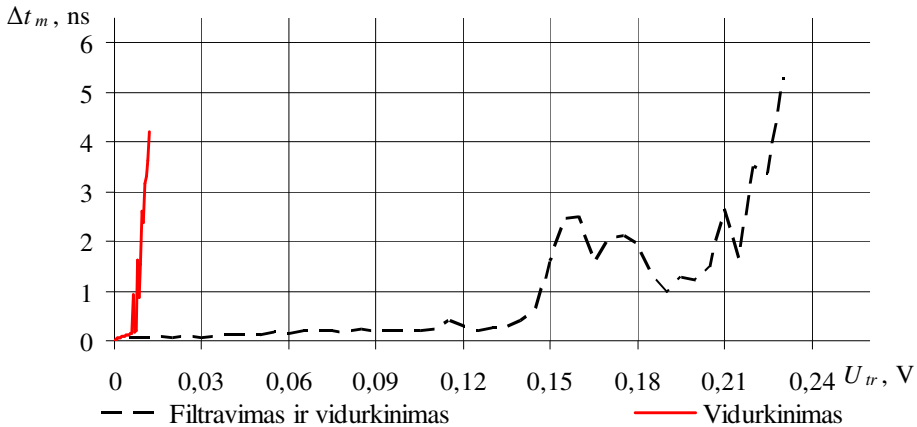
**4.18 pav.** Triukšmų lygis po skaitmeninio signalo apdorojimo filtruojant ir vidurkinant priklausomai nuo signalo periodų skaičiaus

**Fig. 4.18.** The level of noises after digital signal processing filtering and averaging depending on the number of signal periods

Tyrimas parodė, kad pasiūlytas filtravimo ir vidurkinimo algoritmas efektyviausia slopina (iki 100 kartų) keitiklio savuosius triukšmus, o tuo pačiu ir jų įtaką nusistovėjimo trukmių tikrinimui. Toks triukšmų slopinimas leidžia padidinti, tuo pačiu keitikliu ir jo savųjų triukšmų ribojamą, testuojamų SAK skyrą

6–7 skiltimis. Geri triukšmų slopinimo rezultatai gaunami periodizuojant 40 tiriamojo signalo periodų ir vidurkinant 10 sekų. Tuo tarpu, kai geram filtravimui reikia naudoti 100 periodų, o vidurkinimui – 500 ir daugiau periodų.

Naudojant šį skaitmeninio filtravimo ir vidurkinimo algoritmą buvo sudarytas filtravimo ir skaitmeninio nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmas. Atlikus algoritmo tyrimą buvo nustatyta, jog pastaruoju algoritmu gaunami 16 kartų geresni rezultatai negu su senuoju algoritmu, kuriame buvo vykdoma tik signalo vidurkinimas (4.19 pav.).



**4.19 pav.** Nusistovėjimo trukmės tikrinimo nuokrypos  $\Delta t_m$  priklausomybė nuo triukšmų įtampos  $U_{tr}$ , kai signalo švytavimų slopinimo dekrementas  $\beta = 30$ , esant skirtingam tiriamojo signalo realizacijų skaičiui

**Fig. 4.19.** Settling time testing deviation's  $\Delta t_m$  dependence from noise voltage  $U_{tr}$ , when signal sweep attenuation ratio  $\beta = 30$  different testing signal realization number

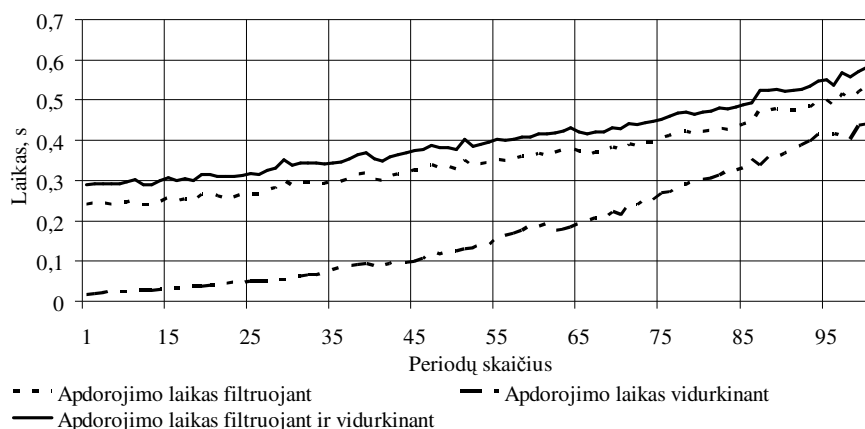
## 4.5. Tiriamojo skaitmeninio-analoginio keitiklio išėjimo signalo vidurkinimo ir filtravimo algoritmo našumo tyrimas

Vienas iš svarbių parametrų yra tiriamojo SAK išėjimo signalo vidurkinimo ir filtravimo algoritmo našumas, nes gali būti, kad didinant tiriamųjų signalų apdorojamų periodų skaičių smarkiai sumažės našumas ir jis taps nepriimtinas realiai aparatūrai.

Tyrimų metu nustatyta, kad, padidinus apdorojamų signalo periodų skaičių 100 kartų nuo 1 iki 100, triukšmo įtaka sumažėja septynis kartus vidurkinant ir dešimt kartų filtruojant signalą (4.17 pav.), o vieno signalo apdorojimo proceso

trukmė naudojant vidurkinimo algoritmą pailgėja 22,4 kartus, o filtruojant signalą tik 2,2 karto. Tačiau 100 periodų filtravimo procesas yra 80 milisekundžių ilgesnis, tačiau vienos nusistovėjimo trukmė nustatoma per 0,53 sekundės, o tai priimtinas dydis (4.20 pav.).

Atlikus pasiūlyto SAK išėjimo signalo skaitmeninio filtravimo ir vidurkinimo algoritmo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo tyrimą buvo nustatyta, kad 100 periodų filtravimo ir vidurkinimo proceso trukmės yra didesnes tik 30 %. Todėl galima daryti išvada, kad naujojo algoritmo apdorojimo trukmės taip pat yra priimtini dydžiai (4.20 pav.).



**4.20 pav.** SAK išėjimo signalo apdorojimo filtruojant arba vidurkinant arba filtruojant ir vidurkinant trukmės priklausomai nuo signalo periodų skaičiaus

**Fig. 4.20.** DAC output signal processing time when applied filtering or averaging or filtering and averaging depending on the number of signal periods

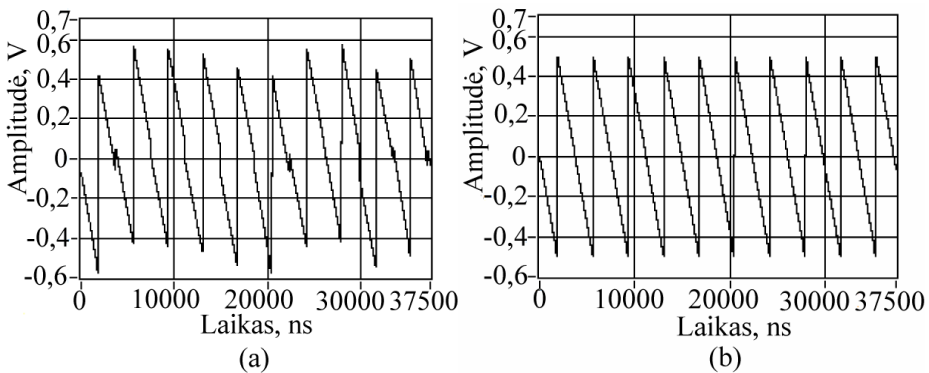
## 4.6. Kitokių tipų signalų filtravimas

Buvo tiriama ar pasiūlytas skaitmeninis keterinis filtras tinka ir kitokių tipų signalų triukšmams filtruoti neiškraipant tiriamojo signalo. Tyrimai buvo atliekami su sinusiniu, trikampių ir pjūklo formos signalais. Šiuos signalus filtruoti sukurtuoju keteriniu filtru galima filtruoti tik tuo atveju, kai galima naudoti  $n_s$  vienetų tiriamojo signalo realizacijų su atsitiktiniais kiekvienai realizacijai triukšmais.

Tyrimo metu, sudaryti šių signalų realizacijų  $n_s$  skaitmeniniai masyvai buvo sumuojami su triukšmo signalų skaitmeniniais masyvais, suminio signalo masyvai periodizuojami, ir perduodami į skaitmeninį keterinį filtrą. Reiktu pažymėti, kad kai iš eilės tiriamųjų signalų yra sudaroma pseudo periodinė jų seka, tai sig-

nalo spektras be pagrindinių harmonikų turės ir šalutines harmonikas išsidėsčiusias aplink pagrindinę harmoniką. Kuo mažiau signalo periodų sudaro pseudo periodinę seką, tuo mažesnės vertės bus pagrindinė harmonika ir platesnį dažnių ruožą užims šalutinės harmonikos ir tuo didesnės bus jų vertės. Kai sudaromas keterinis filtras tiriamajam pseudo periodiniam signalui, reikia tai įvertinti. Filtras tikrai neiškraipys tiriamojo signalo, kai jis bus sudarytas taip, kad neprilygintų nuliui tų dažnių harmonikų, kuriuose yra pseudo periodinio signalo spektro šoninės harmonikos. Kaip minėta aukščiau, didėjant pagrindinių harmonikų numeriui, šoninių harmonikų užimama dažnių juosta siaurėja, todėl ir keterinio filtro charakteristika gali būti siaurinama. Šiuo atveju, po filtravimo ir atgalinės Fourier transformacijos išėjime, nepriklausomai kiek dažnių sričių tarp pagrindinių harmonikų filtruoja keterinis filtras, bus gautas neiškraipytas pseudo periodinis signalas. Tačiau šiuo atveju filtravimo kokybė, ypač žemųjų dažnių diapazone, pablogės, nes triukšmai, kurių dažniai patenka į filtro neslopinamą dažnių diapazoną, pateks į filtro išėjimą.

Pirmiausia buvo tiriamas pjūklo dėsniu kintančio signalo filtravimas, kuriam patikrintas skaitmeninis keterinio filtro veikimas LabView<sup>®</sup> paketu.



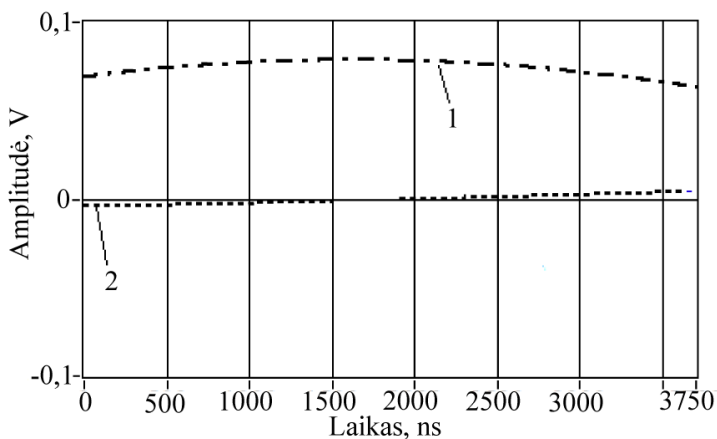
**4.21 pav.** Pseudo periodinio pjūklo formos signalo ir savųjų žemųjų dažnių triukšmo skaitmeninis signalas (a) ir skaitmeninio filtro išėjimo signalas (b)

**Fig. 4.21.** Graphic representation of the sawtooth wave realization output signal with low-frequency internal noises (a) and output signal array after comb filter (b)

Triukšmai buvo imituojami  $f_{t1} = 10$  Hz dažnio sinusiniu signalu, kurio pradinei fazei kiekvienos tiriamojo signalo realizacijos pradžioje buvo suteikiama atsitiktinė vertė nuo 0 iki  $360^\circ$  laipsnių diapazone vienodos tikimybės dėsniu. Sudarytas 100 periodų skaitmeninis masyvas (4.21 pav., a) greitosios Fourier transformacijos bloke keičiamas į spektrą. Triukšmų spektrą kiekvienos realizacijos metu sudaro atsitiktinės harmonikos, kurių didžioji dalis yra išsidėsčiusi dažnių

diapazone iki 100 Hz. Buvo filtruojamos spektrinės linijos diapazonuose (dažni-  
nėse juostose) 0–99; 101–199; 201–299 ir t. t., tuo būdu triukšmų spektro deda-  
mosios nesutampančios su signalo spektro dedamosiomis (100, 200, 300, ... Hz)  
buvo panaikintos. Atlikus atvirkštinę Fourier transformaciją gautas atstatytas  
išėjimo signalas, kuriame atsitiktinių triukšmų spektro dedamosios yra nufiltruo-  
tos (4.21 pav., b).

4.22 paveiksle parodyta nefiltruoto tiriamojo signalo (1 kreivė) skaitmeninio  
masyvo ir filtruoto signalo skaitmeninio masyvo (2 kreivė) nuokrypos. Matyti,  
kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras neiškraipė tiriamojo signalo, o triukš-  
mų lygis sumažėjo 8 kartus.



**4.22 pav.** Nefiltruoto pjūklo formos skaitmeninio signalo (1) ir filtruoto skaitmeninio  
signalu (2) nuokrypos

**Fig. 4.22.** Error of unfiltered (1) test sawtooth wave signal array and filtered test signal  
array (2)

Trikampio ir sinuso formos signalams sudaryto keterinio filtro tyrimas buvo  
atliekamas analogiškai kaip ir pjūklo formos signalui.

Iš gautų rezultatų nustatyta, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras, kaip  
ir prieš tai tirtu pjūklo formos signalu, neiškraipė tiriamojo trikampio ir sinuso  
formos signalų, o signalų nuokrypos po filtravimo sumažėjo 8 kartus.

Tačiau, reiktų paminėti, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras leidžia  
blokuoti savųjų triukšmų spektro dedamąsias nesutampančias su signalo harmo-  
nikomis, tačiau triukšmo spektro dedamosios, kurios sutampa su signalo spektro  
dedamosiomis, filtras nefiltruoja. Dėl šios priežasties išlieka nežymios signalo  
nuokrypos.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad sukurtas skaitmeninis keterinis filtras neiškraipė tiriamųjų signalų, o triukšmų generuota nuokrypa sumažėjo vidutiniškai 8 kartus ir šis filtras gali būti naudojamas ne tik tiriamųjų SAK išėjimo signalo, bet ir kitų tipų signalų, savųjų triukšmų spektro dedamųjų filtravimui.

## 4.7. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Diskretizuojant ir įvedant į AK vieną tiriamojo signalo ir keitiklio savųjų triukšmų ir trukdžių periodą, jų skaitmeninių masyvų spektrai persidengia, todėl šiuo triukšmus ir trukdžius filtruoti sudėtinga.
2. Pasiūlyta sudaryti pseudo periodinę skaitmeninių tiriamųjų signalų seką iš  $n_{\text{indekso}}$  tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų realizacijų, tada teisingai parinkus periodizavimo parametrus, tiriamojo signalo (pseudo periodinio) ir savųjų triukšmų (atsitiktinio proceso) spektro dedamosios gali būti skirtingos, todėl galima iš dalies atskirti tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų spektrus ir pastaruosius filtruoti.
3. Nustatyta, kad tiriamojo SAK signalo filtravimui standartiniai žemųjų dažnių filtrai netinka, nes šių signalų iškraipymams keliama ypač griežti reikalavimai.
4. Sudarytas naujas dažninis keterinis filtras, kuris blokuoja savųjų triukšmų spektro dedamąsias, bet neiškraipo tiriamojo signalo. Atliktas proceso modeliavimas parodė, kad sukurtas filtras slopina savuosius ne tik žemųjų dažnių, bet ir aukštesnių dažnių triukšmus.
5. Dažninis keterinis filtras įėjimo triukšmus slopina 10 kartų ir vidutiniškai 30 % efektyviau negu pradinis signalo vidurkinimas.
6. Sukurtas filtravimo ir filtruotų signalų vidurkinimo algoritmas leidžia savuosius triukšmus slopinti iki 100 kartų. Toks skaitmeninis signalo apdorojimas leidžia slopinti keitiklio savuosius triukšmus, tokiu dydžiu, kad leidžia padidinti tiriamųjų SAK skyrą 6–7 skiltimis, ribojamą keitiklio savųjų triukšmų.
7. Sukurtas dažninis keterinis filtras gali būti naudojamas ir kitokių (triampio, pjūklo ir t. t.) formų signalų skaitmeniniam filtravimui, kai yra galimybė į asmeninį kompiuterį įrašyti eilę tiriamųjų signalų ir triukšmų realizacijų skaitmeninius masyvus. Teisingai parinkus periodizavimo parametrus ir periodizavus signalą galima dalinai atskirti signalų ir triukšmų spektrus bei filtruoti sukurtu keteriniu filtru. Tyrimai rodo, kad triukšmų lygis slopinamas 8 kartus, neiškraipant signalo.

---

## Bendrosios išvados

1. Sudaryta nauja specialiojo stroboskopinio keitiklio struktūrinė schema leido supaprastinti tiriamojo signalo keitimą kodų masyvu, o tuo pačiu ir sumažinti savųjų triukšmų lygį, išplėsti žingsnio formavimo grandinės funkcines galimybes, t. y. kodu nustatyti tiesioginį, atgalinį laiko mastelio keitimą bei strobovimo viename taške režimą, keisti transformacijos koeficiento dydį, keisti stroboskopinio impulso vėlinimą.

2. Skaitmeninio signalo apdorojimo ir nusistovėjimo trukmės tikrinimo algoritmo tyrimai parodė, kad:

2.1. tiriamųjų signalų keitiklio išėjime periodo pradžios nestabilumas iki 12 nanosekundžių ir signalo amplitudės nestabilumas iki  $\pm 20\%$  signalo amplitudės nusistovėjimo trukmės tikrinimui neturi įtakos;

2.2. nusistovėjimo trukmės tikrinimo rezultatai priklauso nuo signalo virpesių slopimo dekremento; modelyje slopimo dekrementą  $\beta$  padidinus nuo 30 iki 45, nusistovėjimo trukmės nuokrypa sumažėja dvigubai. Šiandieniniai SAK pasižymi dideliais slopimo dekrementais ( $\geq 45$ ), todėl tikrinant šių SAK nusistovėjimo trukmes, nuokrypos bus mažesnės;

2.3. padidinus apdorojamų realizacijų skaičių 25 kartus (nuo 20 iki 500), tikrinimo nuokrypa dėl triukšmų sumažėja daugiau kaip keturis su puse karto, todėl, padidinus apdorojamų realizacijų skaičių, tą pačią įrangą (keitiklį, ap-

dorojimo algoritmą) galima naudoti dviem skiltimis tikslesnių SAK nusistovėjimo trukmių tikrinimui;

2.4. didžiausią įtaką nusistovėjimo trukmės tikrinimo paklaidoms turi savieji keitiklio triukšmai; baltojo triukšmo įtaka nusistovėjimo trukmių tikrinimo paklaidai yra du kartus mažesnė nei  $1/f$  triukšmų įtaka; nusistovėjimo trukmių tikrinimo nuokrypoms didžiausią įtaką turi žemojo nuo 1 iki 80 Hz dažnio triukšmai.

3. Nustatyta, kad, diskretizuojant ir įrašant į kompiuterį vieną tiriamojo signalo ir keitiklio savųjų triukšmų periodą, jų skaitmeninių masyvų spektrai persidengia, todėl filtruoti savuosius triukšmus sudėtinga. Pasiūlyta sudaryti pseudo periodinę skaitmeninių tiriamųjų signalų seką iš  $n$  tiriamojo signalo ir savųjų triukšmų realizacijų bei parodyta, kad tiriamojo signalo (pseudo periodinio) ir savųjų triukšmų (atsitiktinio proceso) spektrų dedamosios, teisingai parinkus periodizavimo parametrus, yra iš dalies skirtingos ir savuosius triukšmus galima filtruoti.

4. Nustatyta, kad tiriamojo SAK signalo filtravimui standartiniai žemųjų dažnių filtrai netinka, nes šių signalų iškraipymams keliama ypach griežti reikavimai. Sukurtas naujas dažninis keterinis skaitmeninis filtras, kuris blokuoja savųjų triukšmų spektro dedamąsias, bet neiškraipo tiriamojo signalo. Atliktas tyrimas parodė, kad sukurtas filtras efektyviai slopina (vidutiniškai 30 % efektyviau negu signalo vidurkinimas) ne tik žemųjų dažnių, bet ir aukštesnių dažnių savuosius triukšmus. Pasiūlyto filtravimo sudarytame dažniniame keteriniame filtre ir filtruoto periodinio signalo pirmųjų periodų vidurkinimo algoritmo tyrimas parodė, kad šiuo metodu savieji triukšmai slopinami 60 kartų.

5. Sukurtas dažninis keterinis filtras gali būti naudojamas ir kitokių (trikampio, pjūklo ir t. t.) formų signalų skaitmeniniam filtravimui, kai yra galimybė į asmeninę kompiuterį įrašyti eilę tiriamųjų signalų ir triukšmų realizacijų skaitmeninius masyvus. Teisingai parinkus periodizavimo parametrus ir periodizavus signalą, galima dalinai atskirti signalų ir triukšmų spektrus bei filtruoti sukurtu keteriniu filtru. Tyrimai rodo, kad triukšmų lygis slopinamas 8 kartus, neiškraipant signalo.

6. Tyrimais įrodyta, kad sukurtas keitiklis, skaitmeninio filtravimo ir signalo apdorojimo algoritmas bei programa, naudojant 100 apdorojamų signalų realizacijų, tinka sparčiųjų iki 16 skilčių SAK nusistovėjimo trukmės tikrinti, nustatant  $\pm 0,5$  MRS atskaitos lygį.

---

## Literatūra ir šaltiniai

Alan, V.; Oppenheim, R., W.; Schafer, J. R. 2003. Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall. 850 p. ISBN 0-13-754920-2.

Analog Device. 1996. AD9831. CMOS Complete DDS Synthesizer Datasheet. 16 p.

Analog Device. 2001. Data Converters: High Speed Digital-to-Analog Converters Glossary. 7 p.

Application Notes AN-519.1. 1996. Operational Amplifiers Noise Prediction (All Op Amps), *Intersil Corp.* 64 p.

Application Notes AN-120. 2010. 1ppm Settling Time Measurement for a Monolithic 18-Bit DAC, *Linear technology*. 36 p.

Atmel. 2001. Data Converter Terminology, *Cell-Based Application Specific Products Application Note*. 22 p.

Balestrieri, E. 2006. Some Critical Notes on DAC Time Domain Specifications, *Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2006*: 24-27.

Balestrieri, E.; Moisa, S.; Rapuano, S. 2005. DAC Static Parameter Specifications - Some Critical Notes", *Proc. Of 10th IMEKO TC4 Workshop on ADC Modeling and Testing, Gdynia and Jurata, Poland*: 81-86.

Balestrieri, E.; Daponte, P.; Rapuano, S. 2004. Digital to Analog Converters: a Metrological Overview, *Proc. of the 9th Workshop on ADC Modeling and Testing, Athens, Greece*, vol. 2: 875–880.

Barzdenas, E.; Navickas, R. 2006. Two Chips Digital Diagnostics Systems for Mammography and Dentography, *Elektronika ir elektrotechnika* 2(66): 36–40.

Bitter, R.; Mohiuddin, T.; Nawrocki, M. 2007. LabView Advanced Programming Techniques, *CRC Press*. 499 p.

Boaz, P. 1997. A Course in Digital Signal Processing, Wiley. 632 p. ISBN 0471149616.

Burns, M.; Roberts, G. W. 2001. An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement, *Oxford University Press*. 416 p.

Cory, L. C. 2005. LabVIEW Digital Signal Processing and Digital Communication, *McGraw-Hill*. 225 p.

Crippa, P.; Turchetti, C.; Conti, M. 2002. A Statistical Methodology for The Design of High-Performance CMOS Current-Steering Digital-to-Analog Converters, *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 21(4): 377–394.

Fedosov, V. P.; Nesterenko, A. K. 2007. Digital Signal Processing in LabVIEW DMC Progress. 472 p.

Hari, K. G. 1998. Digital Signal Processing Algorithms: Number Theory, Convolution, Fast Fourier Transforms, and Applications, *CRC Press*. 198 p. ISBN 0-8493-7178-3.

IEC 60748-4. 1997. Semiconductor Devices – Integrated Circuits – Part 4: Interface Integrated Circuits – Sec. 2: Blank Detail Specification for Linear Analogue-to-Digital Converters. 39 p.

IEEE Std. 1241. 2000. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. 40 p.

IEEE Std. 1658. 2005. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Digital-to-Analog Converters: 1290–1297.

IEEE Std. 181. 2003. IEEE Standard on Transitions, Pulses, and Related Waveforms: 1219–1217.

Intersil. 1986. Principles of Data Acquisition and Conversion, Application Note 002. 24 p.

Jasper, B. 2009. Practical Telecom DAC Testing. 16 p.

JESD99A.01. 2003. Terms, Definitions, and Letter Symbols for Microelectronic Devices, *IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 6 p.

John, G. A. 1999. Real-Time Signal Processing: Design and Implementation of Signal Processing Systems, *Prentice Hall PTR*. 125 p. ISBN 0136317715.

John, R. T. C.; Richard, J. J.; Michael, G. L. 2001. Theory and Design of Adaptive Filters, *Prentice Hall*. 324 p. ISBN 0-13-040265-6.

- Johnson, G. W.; Jennings, R. 2006. LabVIEW Graphical Programming, *McGraw-Hill Professional*. 608 p.
- Jonathan, M. B.; Martin, T. 1998. Digital Signal Processing: Mathematical and Computational Methods, *Software Development and Applications, Horwood Publishing*. 463 p. ISBN 1-898563-48-9.
- Kehtarnavaz, N. 2008. Digital Signal Processing System Design– LabVIEW-Based Hybrid Programming, *Academic Press*. 325 p.
- Kerter, W. 2006. ADC Noise Figure – An Often Misunderstood and Misinterpreted Specification, *Analog Device*. 9 p.
- Kester, W. 2004. Analog-Digital Conversion, *Analog Device Inc.* 1055 p. ISBN 0-916550-27-3.
- Kester, W. 2006. Evaluating High Speed DAC Performance, *Analog Device* MT-013. 16 p.
- Kiss, P.; Arias, J.; Li, D.; Boccuzzi, V. 2004. Stable High-order Delta-sigma Digital-to-analog Converters, *IEEE Trans. on Circuits and Systems* 51(1): 200-205.
- Kvedaras, R. 2005. Automatizuotų skaitmeninių sistemų mažiems pokyčiams įvertinti tyrimas, *Daktaro disertacija*. 157 p.
- 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. 2001. Stroboskopinių pikinio detektavimo keitiklių savųjų triukšmų tyrimas, *Elektronika ir elektrotechnika* 3 (32): 53-58. ISSN 1392–1215.
- Kvedaras, V. 2004. Stroboskopinių pikinio detektavimo keitiklių greیتaveikos įtaka skaitmeninių analoginių keitiklių nusistovėjimo trukmės matavimas, *Matavimai* 2 (30): 15-19. ISSN 1392–1223.
- Kvedaras, V.; Bagdanskis, E.; Naidionov, A.; Narbutas, M. 1982. Stroboskopinis keitiklis sparčių SAK dinaminių parametrų matavimui, *Radioelektronika. Lietuvos aukš. mokyk. darbai* 18(3): 45–51.
- Kvedaras, V.; Jankauskas, Z. 2003. Measurements of Propagation Delay Times of High – speed Logic ICs, *Measurement Science Review: Journal of the Institute of Measurement Science Slovak Academy of Sciences* 3(3): 159–162. ISSN 1335–8871.
- Kvedaras, V.; Kvedaras, R. 2000. Dugiakanalių stroboskopinių pikinio detektavimo keitiklių tyrimas, *Elektronika ir elektrotechnika* 6(29): 60–64. ISSN 1392–1215.
- Kvedaras, V.; Kvedaras, R. 2003. Tester for Investigation of Dynamic Parameters of ICs, *Elektronika ir elektrotechnika* 7(49): 35–39. ISSN 1392–1215.
- Kvedaras, V.; Mackevičius, S. 1992. Sklidimo vėlinimo laikų matavimas, *Radioelektronika VTU mokslo darbai* 28(3): 95–103.
- Kvedaras, V.; Mackevičius, S. 1993. Stroboskopinis SAK nusistovėjimo laikų matavimas, *Radioelektronika. Vilniaus technikos Universiteto darbai* 29(3): 92–98.

Lai, E. 2005. Practical Digital signal Processing for Engineers and Technicians, *Elsiever Press*. 289 p.

Linear Technology. 1998. Component and Measurement Advances Ensure 16-Bit DAC Settling Time, *Application Note* 74. 15 p.

Mahesh, L.; Chugani, A. R.; Samant, M. C. 1998. LabVIEW Signal Processing, *Prentice Hall PTR*. 634 p.

Maxim. 2000. ADC and DAC Glossary, *Application Note* 641. 13 p.

Miroslav, D. L.; Dejan, V.; Tosic, Brian, L. E. 2001. Filter Design for Signal Processing, *Prentice Hall*. 345 p. ISBN 0-201-36130-2.

Mittermayer, C.; Steininger, A. 1999. On the Determination of Dynamic Errors for Rise Time Measurement with an Oscilloscope, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 48 p. ISSN 0018-9456.

National Semiconductor, 1999. D/A Converters – Definition of Terms. 2 p.

Parthasarathy, K. L.; Geiger, R. L. 2000. Unambiguous Characterization and Specification of D/A Converter Performance, *Proc. of 2000 Midwest Symposium on Circuits and Systems*: 890-894.

Philips. 1999. Mixed Signal Testing Cookbook, *Nat. Lab. Report* 7103. 21 p.

Pocius, R. 1992. Stroboskopinio keitiklio elementų parametrų įtakos jo dinaminėms charakteristikoms tyrimas, *Radioelektronika: Mokslo darbai* 28(3): 95-103.

Rathore, S. T. 2003. Digital Measurement Techniques. *Alpha Science*. 309 p.

Rathore, S.T. 2006. Digital Measurement Techniques. 392 p. ISBN 81-7319-388-6.

Richard, G. L. 2010. Understanding Digital Signal Processing, *Prentice Hall*. 960 p. ISBN 0-13-108989-7.

Robert, B. N. 2005. Introduction to Instrumentation and Measurements. *CRC Press*. 743 p.

Schoenwetter, H. K. 1983. High Accuracy Settling Time Measurements, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* IM-32 No. 1: 22-27.

Schoenwetter, H. K. 1985. Settling Time Measurements, paper for Digital Methods in Waveform Metrology Seminar, Nat. Bur. Stand. (U.S.), *Spec. Publ.* 707, "Proceedings of the Seminar on Digital Methods in Waveform Metrology," Barry Bell, Ed: 87-109.

Selesnick, I. W.; Burrus, C. S. 1998. Generalized Digital Butterworth Filter Design, *IEEE Transactions on Signal Processing* 46(6): 1688-1694.

Shenoi, B. A. 1999. Magnitude and Delay Approximation of 1-D and 2-D Digital Filters. 92 p. ISBN 3-540-64161-0.

Souders, T. M.; Schoenwetter, H. K.; Hetrick, P. S. 1987. Characterization of a Sampling Voltage Tracker for Measuring Fast, Repetitive Signals, *IMTC/87 Conference*

*Proceedings, IEEE Instrumentation/Measurement Technology Conference, Boston*: 240–243.

Steven, W. S. 2004. *Digital Signal Processing – A Practical Guide for Engineers and Scientists*, Newnes. 643 p. ISBN 0–7506–7444–X.

Tektronix Inc. 2004. DPOs Deliver More Signal Information for Faster Design and Troubleshooting Answers, *Application notes AN 55W-16965*. 8 p.

Test and Measurement Catalog. 2004. Tektronix Inc. 60 p.

Todd, K. M.; Wynn, C. S. 2000. *Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing*, Prentice Hall. 254 p. ISBN 0–201–36186–8.

Van de Plassche, R. J. 2003. *CMOS Integrated Analog-to-digital And Digital-to-analog Converters*, Kluwer Academic Publishers. 25 p.

Vijay, M.; Douglas, B.; Williams, J. 1997. *The Digital Signal Processing Handbook*, CRC Press. 157 p. ISBN 0–8493–8572–5.

Vijay, M.; Douglas, B.; Williams. 1998. *The Digital Signal Processing Handbook*, CRC Press. 1776 p. ISBN 0–8493–8572–5.

Wai-Kai Chen. 1995. *The Circuits and Filters Handbook*, CRC Press: 1058–1071. ISBN 0–8493–8341–2.

Williams, J. 1998a. Component and Measurement Advances Ensure 16-bit DAC Settling time, *Linear Technology Corp*, AN 74. 48 p.

Williams, J. 1998b. Measuring 16-bit Settling Times: the Art of Timely Accuracy. *EDN*: 159 p.

Williams, J. 2010. Intense, Extensive, and Protracted Effort Yields a Measurement Circuit with 20-bit Resolution, *Linear Technology - EDN*. 8 p.

Williams, J. 1999. 30 Nanosecond Settling Time Measurement for a Precision Wideband Amplifier, *Application Note 79, Linear Technology Corp*. 32 p.

Багданскис, Э. К.; Бартулис, П. Ю.; Квядарас, В. Б.; Мисеркеев, Г. М. 1985. Тестер для измерения динамических параметров сверхбыстродействующих ЦАП, *Электронная промышленность* 9: 63–64.

Багданскис, Э. К.; Квядарас, В. Б.; Мацкевич, С. Ф.; Скурдянис, В. А. 1986. Лабораторный измеритель времени установления быстродействующих ЦАП, *Электронная промышленность*. вып 10. 30 p.

Багданскис, Э.-А. К.; Квядарас, В. Б. 1987. Измерение динамических параметров ЦАП, *Электронная промышленность* 5: 97–101.

Квядарас, В.; Багданскис, Э.-А. 1988. Измерение времени установления ЦАП, *Автометрия* 5. 7 p.

Харкевич, А. А. 1957. *Спектры и анализ*. Гос. Издательство технико-теоретической литературы. 255 p.



---

# Autoriaus publikacijos disertacijos tema

## **Straipsniai recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose**

Kvedaras, V., Kvedaras, R., Ustinavičius, T. 2009a. Method of Dynamic Parameters Measurement of High-Speed DAC's. *Solid State Phenomena*: 158–162. ISSN 1012–0394. (Thomson ISI Web of Science).

Ustinavičius, T., Kvedaras, R., Kvedaras, V., Jankauskas, Z. 2009b. Initial Digital Filtering of Testing Signals of High-Speed DAC's. *Electronics and Electrical Engineering*. 7(95): 63–66. ISSN 1392–1215. (Thomson ISI Web of Science).

Ustinavičius, T. 2010a. SAK išėjimo signalų pradinis skaitmeninis filtravimas. „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, *Elektronika ir elektrotechnika* 2(1): 45–49. ISSN 2029–2341. (Coppernicus).

## **Straipsniai kituose leidiniuose**

Ustinavičius, T. 2007. Skaitmeninio signalo apdorojimo algoritmo, SAK dinaminiam parametrui matuoti, tyrimas. *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*. *Elektronika ir elektrotechnika straipsnių rinkinys*: 53–61. ISBN 978–9955–28–184–9.

Ustinavičius, T. 2008. Tiriamųjų SAK signalų skaitmeninis apdorojimas. *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*. *Elektronika ir elektrotechnika straipsnių rinkinys*: 74–83. ISBN 978–9955–28–373–7.

Kvedaras, V, Kvedaras, R, Ustinavičius, T. 2010b. Method of Dynamic Parameters Measurement of High-speed D/A Converters. *18th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications MIKON-2010*: 44–48. ISBN 978–9955–690–20–7.

Tomas USTINAVIČIUS

SPARČIŲJŲ SKAITMENINIŲ-ANALOGINIŲ  
KEITIKLIŲ NUSISTOVĖJIMO TRUKMIŲ TIKRINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Tomas USTINAVIČIUS

TESTING OF SETTLING TIMES OF FAST  
DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2010 11 10. 10,0 sp. l. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto  
leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino UAB „Ciklonas“,  
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius