

## Analoginės informacijos keitiklių išrinkimo ir saugojimo schemas dinaminė charakteristikų skaičiavimas

A. Marcinkevičius, V. Jasonis

Radio aparatūros katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

Naugarduko g. 41, LT-2006 Vilnius, Lietuva, e. p. a.marcinkevicius@el.vtu.lt, tel. 8 5 2744772

### Įvadas

Viena iš priemonių ASK spartai didinti – keitiklio įėjime panaudoti išrinkimo ir saugojimo schemą (ISS). ISS nuskaito įėjime veikiančio analoginio signalo momentinę vertę ir išsaugo tam tikrą laiką, lygų ASK keitimo laikui. ISS naudojamos daugumoje sparčių ir tikslių informacijos keitiklių [1, 2, 3].

Išrinkimo ir saugojimo schema – tai puslaidininkinė analoginė atmintis, kurios darbą apibūdina grupė statinių ir dinaminė parametrai. Šių parametrai skaičiavimas ir modeliavimas, esant skirtingiems schemas darbo režimams, yra nevienareikšmiškas ir sudėtingas, todėl mokslinėse publikacijose nepakankamai išanalizuotas. ISS spartą sąlygoja apertūriniai dinaminiai parametrai, nuo kurių priklauso analoginio signalo pakeitimo į skaitmeninį trukmė ir tikslumas. Vienas pagrindinių dinaminė parametrai yra apertūrinis laikas ir apertūrinė neapibrėžtis.

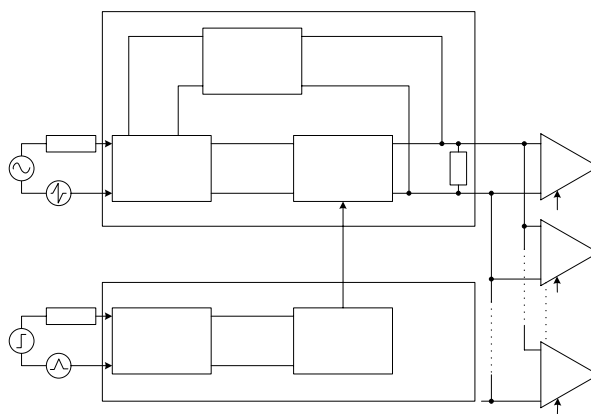
Šio darbo tikslas – išsiaiškinti ir ištirti ISS amplitudinių apertūrinių paklaidų priklausomybes nuo analoginio signalo spektro maksimalaus dažnio ir strobavimo impulsų bei adityviųjų triukšmų parametrai. Siekiant šio tikslo, straipsnyje nagrinėjama supaprastinta ISS ekvivalentinė schema, išvedamos apertūrinių paklaidų apskaičiavimo lygtys ir pateikiami dažninių charakteristikų modeliavimo rezultatai.

### ISS struktūrinis modelis

Apibendrinta ISS modelio struktūrinė schema pateikta 1 paveiksle.

ISS inertiškumas sukonzentruotas analoginio signalo momentinės vertės saugojimo grandyje, kurią sudaro stiprintuvas, atminties kondensatorius ir jo komutavimo elektroninė schema. Modelyje nagrinėjami du kanalai: analoginio signalo pakeitimo kanalas K1 ir strobavimo kanalas K2. Būdingieji struktūrinio modelio parametrai šie:  $R_x, R_s, Z_k$  – atitinkamai įėjimo signalo šaltinio, strobavimo impulsų šaltinio ir apkrovos komparatorių įėjimo ekvivalentinės varžos;  $U_x(t), U_s(t), U_{x, tr}, U_{s, tr}$  – analoginio ir strobavimo signalų bei adityviųjų triukšmų įtampos atitinkamai signaliniame ir strobavimo kanaluose;  $U_{y1} = f_x(U_{x1}), U_{y2} = f_s(U_{s1})$  – bendroju atveju netiesinės įėjimo ir strobavimo kanalų amplitudinės perdavimo

charakteristikos;  $h(\tau, c_o, t), h_s(\tau, t)$  – signalo ir strobavimo kanalų pereinamosios charakteristikos.



1 pav. ISS modelio struktūrinė schema

Kanalo K1 išėjime gauname aproksimuotą signalą  $U_y$ , kuris patenka į komparatorių  $K_1, K_2, K_3, \dots, K_N$  įėjimus, kad būtų pakeistas į skaitmeninį kodą  $U_{A1}, U_{A2}, \dots, U_{AN}$ ,  $U_{AN}$  – komparatorių atraminės įtampos;  $N$  – komparatorių skaičius, kuris priklauso nuo keitiklio skilčių skaičiaus.

### Lygtys apertūrinėms paklaidoms apskaičiuoti

Strobavimo kanalo perdavimo charakteristiką, išskleidus funkciją  $U_{y2} = f_s(U_{s1}, U_{s, tr})$  Teiloro eilute pagal adityviojo triukšmo parametrai ir tarus, kad  $U_{s, tr} < U_{s1}$ , galima užrašyti taip [4]:

$$U_{y2} = f_s(U_{s1} + U_{s, tr}) \approx f_s(U_{s1}) + M_{s, tr} \frac{df_s(U_{s1})}{dU_{s1}}. \quad (1)$$

Tada strobavimo kanalo triukšmo įtampos lygtį  $i$ -ajam išrinkimui išreikšime tokia lygtimi:

$$U_{s, tr, i} \cong U_{s, tr}(t_{xi}) + U_{s, tr}^{(1)}(t_{xi}) \Delta t; \quad (2)$$

čia  $t_{xi}$  – signalo  $i$ -osios vertės saugojimo pradžia arba laiko momentas, kai baigiamas  $i$ -asis išrinkimas;  $\Delta t$  – apertūrinis laikas;  $U_{s, tr}^{(1)}(t_{xi})$  – triukšmo įtampos strobavimo kanale pirmosios eilės išvestinė.

SS išėjimo signalą saugojimo pradžioje galima užrašyti tokia lygtimi [5]:

$$U_{yi} = \frac{1}{A_n} \int_{\nu}^{\tau_s} U_{s.tr.i} U_{y1i} dt; \quad (3)$$

čia

$$U_{y1i} = U_{y1}(t_{xi} + t) = U_{y1}(t_{xi}) + U_{y1}^{(1)}(t_{xi}) \Delta t; \quad (4)$$

$A_n = \int_{\nu}^{\tau_s} U_{s1}(t) dt$  – normuojantysis koeficientas;  $\tau_s$  – strobavimo impulso fronto trukmė.

Paprastai adityviojo triukšmo  $U_{s.tr}$  strobavimo kanale autokoreliacijos trukmė gerokai mažesnė už diskretizacijos intervalą. Tuomet, įvertinus (2) ir (4) lygtis, signalo išraiška (3) kanalo K1 išėjime  $i$ -ajam strobavimo laiko momentui įgauna tokį pavidalą:

$$U_{yi} = U_{y1}(t_{xi}) + U_{y1}^{(1)}(t_{xi}) \frac{\tau_s}{\nu + 2} + U_{y1}(t_{xi}) \left[ \frac{U_{s.tr}(t_{xi})}{U_{s1 \max}} \right] \times \\ \times (\nu + 1) + U_{y1}(t_{xi}) \frac{U_{y1}^{(1)}(t_{xi})}{U_{s1 \max}} + U_{y1}^{(1)}(t_{xi}) \frac{U_{s.tr}(t_{xi})}{U_{s1 \max}} + \\ + U_{y1}^{(1)}(t_{xi}) \frac{U_{y1}^{(1)}(t_{xi})}{U_{s1 \max}} \frac{\tau_s^2}{(\nu + 1)^2}; \quad (5)$$

čia  $\nu$  – ISS elektroninio rakto charakteristikos netiesiškumo parametras.

Dinaminei apertūrinei paklaidai nustatyti galima panaudoti signalo ir triukšmo skirtumo kvadrato matematinės vilties įvertį  $i$ -ajam laiko momentui  $t_{xi}$ :

$$M[\Delta_a^2(t_{xi})] = M \left\{ \left[ \frac{U_{y1}^{(1)}(t_{xi})}{U_{y1 \max}} - \frac{U_{s.tr}(t_{xi})}{U_{s1 \max}} \right]^2 \right\}. \quad (6)$$

Kartu įvertinę triukšmo koreliaciją strobavimo kanale su strobavimo impulsais iš (5) ir (6) lygčių, gausime tokią formulę:

$$M[\Delta_a^2(t_{xi})] = \tau_s^2 \left\{ r_x^{(2)}(0) (\nu + 2)^{-2} + r_{s.tr}^{(2)}(0) (\nu + 1)^{-2} \gamma_s^{-2} \right\} - \\ - U_{s \max}^{-2} \left\{ r_{s.tr}^{(2)}(0) \sigma_x^2 + r_x^{(2)}(0) \sigma_{s.tr} \right\}; \quad (7)$$

čia  $\gamma_s$  – strobavimo impulsų fronto statumo koeficientas;  $\sigma_x$  – signalo dispersija;  $\sigma_{s.tr}$  – triukšmo dispersija strobavimo kanale;  $r_{s.tr}^{(2)}(0)$  – strobavimo kanale triukšmo normuotos autokoreliacinės funkcijos antrosios eilės išvestinė;  $r_x^{(2)}(0)$  – signalo kanale triukšmo normuotos autokoreliacinės funkcijos antrosios eilės išvestinė;  $U_{s \max}$  – strobavimo impulso maksimali vertė.

Tuomet iš (7) lygties vidutinės apertūrinės kvadratinės paklaidos (pereinant iš išrinkimo režimo į saugojimo režimą) išraiška, įvertinus ISS perjungimo charakteristikos netiesiškumą ir strobavimo kanalo triukšmą:

$$\sigma_a = \frac{1}{\sigma_x} \sqrt{M[\Delta_a^2(t_{xi})]} = \left\{ \sigma_{s.tr}^2 \cdot U_{s \max}^{-2} (\nu + 1)^2 - r_x^{(2)}(0) \right\} \times$$

$$\times \sigma_x^2 \left( \frac{\tau_s}{\nu + 2} \right)^2 + \tau_s^2 \sigma_x^2 U_{s \max}^{-2} \left[ r_x^{(2)}(0) r_{s.tr}^{(2)}(0) (\nu + 1)^{-2} - \right. \\ \left. - r_{s.tr}^{(2)}(0) \sigma_x^{-2} - r_x^{(2)}(0) \sigma_{s.tr}^2 \right]. \quad (8)$$

Iš (8) formulės galima apskaičiuoti apertūrinės paklaidos priklausomybę nuo strobavimo impulso fronto trukmės  $\tau_s$  ir perjungimo rakto netiesiškumo koeficiento  $\nu$  kvadrato, strobavimo impulsų fronto statumo  $\gamma_s$  ir adityviojo triukšmo dispersijos kvadrato bei strobavimo impulsų amplitudės.

Kai įėjimo signalas  $U_x$  sinusinis, tuomet antroji autokoreliacinės funkcijos išvestinė  $r_x^{(2)}(0) = -\omega_x^2$ .

Kartu strobavimo kanalo triukšmą aproksimavę sinusine funkcija su amplitude  $U_{s.tr}$  ir dažniu  $\omega_{s.tr}$ , gausime  $r_{s.tr}^{(2)}(0) = -\omega_{s.tr}^2$ , o  $\sigma_{s.tr} = U_{s.tr} / \sqrt{2}$ . Tuomet (8) lygtis užrašoma taip:

$$\delta_a = \left\{ \omega_x^2 \tau_s^2 \left[ (\nu + 2)^{-2} + 0,5 \omega_{s.tr}^2 U_{s.tr}^2 U_{s \max}^{-2} (\nu + 1)^{-1} + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,5 U_{s.tr} U_{s \max}^{-2} + 0,5 U_{s.tr}^2 U_{s \max}^{-2} \right] + \right. \\ \left. + 0,5 U_{s.tr}^2 U_{s \max}^{-2} (\nu + 1)^2 \right\}. \quad (9)$$

Iš (9) lygties matome, kad esminiai dinaminiai parametrai, nuo kurių priklauso apertūrinė paklaida, yra  $\omega_x^2$ ,  $\omega_{s.tr}^2$ ,  $\tau_s^2$  ir santykis  $U_{s.tr} / U_{s \max}$ .

ISS dinaminei paklaidai dėl apertūrinės neapibrėžties įvertinti keitimo kanalą galima modeliuoti grandine (2 pav.), kurios vėlinimo trukmė yra atsitiktinio triukšmo laiko funkcija  $\eta(t)$ .



2 pav. Apertūrinės neapibrėžties modelio schema

Vėlinimo grandinės impulsinė charakteristika užrašoma tokia lygtimi:

$$h(j\omega, t) = \exp(-j\omega\eta(t)). \quad (10)$$

Vidutinė kvadratinė paklaida gali būti išreikšta kaip triukšmo ir signalo dispersijų santykis, t. y.

$$\delta = \sigma_\phi^2 / \sigma_x^2 = 1 / 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} S_\phi(\omega) d\omega; \quad (11)$$

čia  $S_\phi(\omega)$  – apertūrinės funkcijos spektrinis tankis;  $\sigma_\phi^2$  – apertūrinių fluktuacijų dispersija;  $\sigma_x^2$  – signalo dispersija.

Tarus, kad įėjimo signalas  $U_x$  yra sinusinis, apertūrinių fluktuacijų dispersiją galima užrašyti taip:

$$\sigma_\phi^2 = \sigma_x^2 \left( 1 - \theta_y(\omega_s - \omega_{s,\tau}) \right); \quad (12)$$

čia  $\sigma_x^2$  – įėjimo signalo dispersija;  $\theta_y(\omega_s, -\omega_{s,\tau})$  – vėlinimo grandinės charakterinė funkcija.

Kai funkcijos  $\eta(t)$  tikimybinis skirstinys yra normalusis, ir jo apertūrinė neapibrėžtis yra  $\Delta t_{\eta}^2$ , o autokoreliacinė funkcija –  $r_{\eta}(\tau)$ , tuomet

$$\theta_y(\omega_s - \omega_{s,\tau}) = \exp\{-\omega_s^2 [1 - r_{\eta}(\tau)]\} \quad (13)$$

Kai ( $\tau \rightarrow \infty$ ), dvimatė funkcija  $\theta_y$ , (12) tampa vienmate ir ją galima užrašyti taip:

$$\theta_y(\omega_s - \omega_{s,\infty}) = \theta_y(\sqrt{2}\omega_s) = \exp(-\Delta t_{\eta}^2 \omega_s^2). \quad (14)$$

Iš (12) ir (14) gausime:

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_x^2 [1 - \exp(-\Delta t_{\eta}^2 \omega_s^2)]. \quad (15)$$

Analoginio signalo efektyvusis spektro plotis

$$\omega_s = \Omega_x = \sqrt{-r_x^2(0)}. \quad (16)$$

Iš (15) ir (16) lygčių paklaida dėl apertūrinės neapibrėžties

$$\sigma_{\eta} = [1 - \exp(-\Delta t_{\eta}^2 \Omega_x^2)]^{0,5}. \quad (17)$$

### Modeliavimo rezultatai

Gautos matematinės išraiškos kiekybiškai įvertina ISS tikslumo arba signalo ir triukšmo santykio priklausomybę nuo strobavimo triukšmo dispersijos ir koreliacijos su strobavimo impulsais.

Iš (9) ir (17) lygčių buvo apskaičiuotos signalo ir triukšmo santykio priklausomybės nuo analoginio signalo dažnio, t. y.  $\chi_A = \sigma_a^{-2}(f_x)$  ir  $\chi_{\Delta t} = \sigma_{\eta}^{-2}(f_x)$ .

Modeliavimo rezultatai pateikti 3 ir 4 paveiksluose. Matome, kad  $10\lg\sigma_a^{-2}$  ir  $10\lg\sigma_{\eta}^{-2}$  vertės, didėjant analoginio signalo spektro dažniui, mažėja. Kartu apertūrinei paklaidai esminę įtaką turi strobavimo impulsų fronto trukmė  $\tau_s$  ir triukšmų amplitudė  $U_{s,tr}$ . Žemųjų dažnių diapazone ryškesnė yra elektroninio rakto netiesiškumo  $\nu$  įtaka (3 pav.)

Apertūrinės neapibrėžties įtaka signalo ir triukšmo santykiui pasireiškia visame dažnių diapazone (4 pav.) ir priklauso nuo apertūrinės neapibrėžties laiko  $\Delta t_a$ . Pvz.,  $\Delta t_a$  padidėjus nuo 5 ps iki 10 ps, santykis  $\chi_{\Delta t}$ , kai  $f_x = 100$  MHz, sumažėja apie 10dB.

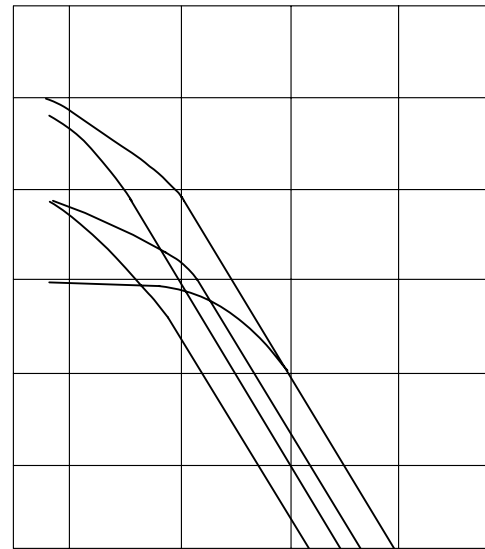
Norint padidinti plačiajuosčių ISS tikslumą, reikia optimizuoti signalinio ir strobavimo traktų topologijos architektūrą, kad sumažėtų triukšmų amplitudė ir apertūrinė neapibrėžtis (6).

### Išvados

1. Sudarytas apibendrintas išrinkimo ir saugojimo schemas analoginiams informacijos keitikliams struktūrinis modelis ir pagal jį gautos analitinės išraiškos dinaminėms apertūrinėms paklaidoms apskaičiuoti.

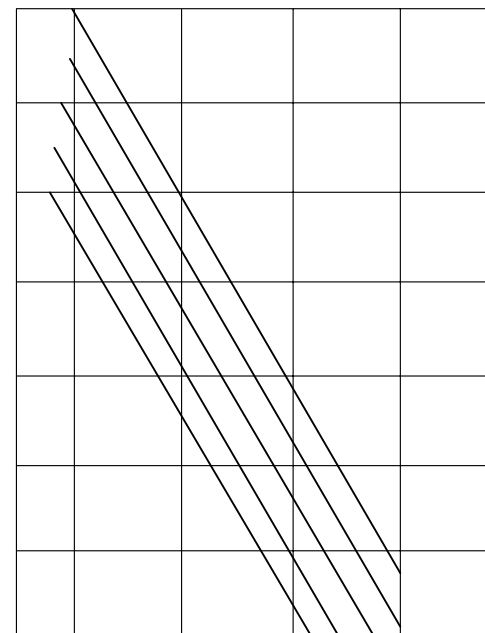
2. Atliktas ISS apertūrinių paklaidų dažnių charakteristikų modeliavimas įvertinant strobavimo signalo ir triukšmo dinaminį parametrų įtaką. Nustatyta, kad apertūrinei paklaidai aukštųjų dažnių srityje esminę įtaką turi strobavimo impulsų fronto trukmė ir triukšmo amplitudė. Žemųjų dažnių srityje ryškesnė yra elektroninio rakto netiesiškumo įtaka. Padidinus strobavimo impulsų fronto trukmę tris kartus, signalo ir triukšmo santykis sumažėja vidutiniškai 10 dB, o padidinus triukšmo amplitudę dešimt kartų šis santykis sumažėja 20 dB.

$10\lg\sigma_a^{-2}$



3 pav. ISS apertūrinės paklaidos priklausomybė nuo analoginio signalo dažnio, kai: 1)  $\tau_s=1$  ns;  $U_{s,tr}=0,1$  mV;  $\nu=4$  2)  $\tau_s=1$  ns;  $U_{s,tr}=1,0$  mV;  $\nu=1$  3)  $\tau_s=3$  ns;  $U_{s,tr}=0,1$  mV;  $\nu=4$  4)  $\tau_b=1$  ns;  $U_{s,tr}=1$  mV;  $\nu=4$  5)  $\tau_b=3$  ns;  $U_{s,tr}=1$  mV;  $\nu=1$

$10\lg\sigma_{\eta}^{-2}$



4 pav. ISS paklaidos dėl apertūrinės neapibrėžties  $\Delta t_a$  priklausomybė nuo analoginio signalo dažnio

3. Apertūrinės neapibrėžties įtaka signalo ir triukšmo santykiui ypač ryški aukštųjų dažnių srityje, kai analoginio signalo maksimalus dažnis viršija 10 MHz. Norint padidinti signalo ir triukšmo santykį penkiais decibelais apertūrinę neapibrėžtį reikia sumažinti apie du kartus.

## Literatūra

1. **Li Yunchu, Sanchez – Sinencio Edgar.** A Wide Input Bandwidth 7 – bit 300 – MSample/s Folding and Current – Mode Interpolating ADC // IEEE Journal of Solid – State Circuits. – 2003. – Vol. 38, No. 8. – P. 1405 – 1410.
2. **Yotsuyanagi M., Etoh T., and Hirata K.** A 10 Bit 50 MHz Pipelined CMOS A/D Converter with S/H // IEEE Journal of Solid State Circuits.–1993.–Vol. 28, No. 3.–P. 292–300.
3. **Shimizu T., et al.** 10-bit, 20 MHz Two – Step Parallel A/D Converter with Internal S/H // IEEE Journal of Solid State Circuits.–1989.–Vol. 24, No. 1.–P.13–20.
4. **Мельников Б. Н.** Анализ апертурной дрожи в быстродействующих УВХ // Радиотехника: Научные труды. –Каунас:Технология, 1993.–Т. 29, № 1.–114 с.
5. **Rutkauskas T., Marcinkevičius A.** Atminties schemos analogas – skaičius keitikliuose // Elektronika'99. Tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga. – Kaunas: Technologija, 1999.–P. 132–135.
6. **Marcinkevičius A., Poviliauskas D.** Analoginių skaitmeninių informacijos keitiklių komparatorių grandyno topologijos architektūra ir parametrų skaičiavimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2001.–Nr. 1(30)– P.15–21.

Pateikta spaudai 2004 04 22

### **A. Marcinkevičius, V. Jasonis. Analoginės informacijos keitiklių išrinkimo ir saugojimo schemos dinaminė charakteristikų skaičiavimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 5(54). – P. 23–26.**

Nagrinėjami išrinkimo ir saugojimo schemų (ISS) analoginiams-skaitmeniniams informacijos keitikliams apibendrinti modeliai ir apertūrinių paklaidų skaičiavimo metodai. Sudarytos analitinės lygtys ISS apertūrinėms dažninėms charakteristikoms modeliuoti priklausomai nuo strobavimo impulsų ir adityviųjų triukšmų dinaminėms parametrų. Remiantis dažnių charakteristikų skaičiavimo rezultatais, parodyta, kad apertūrinei paklaidai aukštųjų dažnių srityje esminę įtaką turi strobavimo impulsų fronto trukmė ir triukšmo amplitudė. Apertūrinės neapibrėžties įtaka signalo ir triukšmo santykiui ypač ryški yra aukštųjų dažnių srityje, kai analoginio signalo maksimalus dažnis viršija 10 MHz. Norint padidinti signalo ir triukšmo santykį reikia mažinti apertūrinę neapibrėžtį, elektroninio rakto inertiškumą, didinti strobavimo impulsų fronto statumą ir mažinti triukšmų amplitudę. Gautos matematinės išraiškos kiekybiškai įvertina ISS tikslumo arba signalo ir triukšmo santykio priklausomybę nuo strobavimo triukšmo dispersijos ir koreliacijos su strobavimo impulsais. Norint padidinti plačiajuosčių ISS tikslumą, reikia optimizuoti signalinio ir strobavimo traktų topologijos architektūrą, kad sumažėtų triukšmų amplitudė ir apertūrinė neapibrėžtis. Il.4, bibl.6 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

### **A. Marcinkevičius, V. Jasonis. Calculation of Dynamic Characteristics of the Sample-and-Hold Circuit for Analog Information Converters // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technology, 2004. – No. 5(54). – P. 23–26.**

Generalized models of sample-and-hold circuits (SHC) for analog-to-digital information converters and methods of aperture error calculation are considered. Analytical equations for modeling the SHC aperture frequency characteristics depending on the dynamic parameters of strobe pulses and additive noises were designed. On the basis of calculation results of frequency characteristics, it is shown that the strobe pulse front duration and the noise amplitude have significant influence on the aperture error in the high-frequency region. The influence of the aperture uncertainty on the signal-to-noise ratio is most displayed in the high-frequency region when the analog signal maximum frequency exceeds 10 MHz. To increase the signal-to-noise ratio, the aperture uncertainty and the electron key inertness have to be reduced, the strobe pulse front steepness should be increased and the noise amplitude must be reduced. The obtained mathematical expressions estimate the dependence of the SHC accuracy or the signal-to-noise ratio on the strobe pulse dispersion and the correlation with strobe pulses. To increase the wide-band SHC accuracy, the layout architecture of the signal and strobe paths must be optimized in order to decrease the noise amplitude and aperture uncertainty. Ill. 4, bibl. 6 (in Lithuanian; summary in Lithuanian, English and Russian).

### **А. Марцинкявичюс, В. Ясонис. Расчёт динамических характеристик устройства выборки и хранения для аналого-цифровых преобразователей информации // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 5(54). – С. 23–26.**

В статье рассматривается обобщённая модель и методика расчёта апертурных погрешностей устройства выборки и хранения. Приведены аналитические уравнения для расчёта апертурно-частотных характеристик в зависимости от динамических параметров стробирующих импульсов и адитивных помех. На основе результатов моделирования показано, что на апертурную погрешность в диапазоне высоких частот существенно влияет крутизна фронта стробирующих импульсов и амплитуда помехи. Влияние апертурной неопределённости на отношение сигнал / помеха особенно значимое в диапазоне высоких частот, когда частота аналогового сигнала превышает 10 MHz. Для увеличения отношения сигнал / помеха необходимо уменьшить апертурную дрожь, нелинейность характеристики схемы электронного ключа, увеличить крутизну фронта стробирующих импульсов и уменьшить амплитуду помехи. Полученные уравнения позволяют количественно оценить точность УВХ или определить отношение сигнал / помеха в зависимости от дисперсии стробирования и корреляции помехи. Для увеличения точности широкополосных УВХ необходимо оптимизировать топологию сигнальных и стробирующих цепей с целью уменьшения амплитуды помех и дисперсии апертурной дрожи. Ил. 4, библи. 6 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.10902