

АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ $\Sigma\Delta$ -АЦП С АНАЛОГО-ЦИФРОВЫМ ФИЛЬТРОМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Анализ инструментальной составляющей погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП, относящиеся к преобразователям информации неканонического вида, представляет весьма сложную задачу, поскольку отсутствует возможность использования принципа декомпозиции, т.е. разложения структуры $\Sigma\Delta$ -АЦП на отдельные слабо связанные звенья. В связи с этим проведен анализ инструментальной составляющей погрешности данного класса преобразователей информации в программных средах NI Multisim и Simulink.

Материалы и методы. В работе проведен анализ влияния реальных параметров элементов на инструментальную погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП. Имитационная модель разработана в NI Multisim.

Результаты и выводы. Приведенные модельные исследования зависимости линейности передаточной функции $\Sigma\Delta$ -АЦП от параметров аналоговых элементов $\Sigma\Delta$ -модулятора и аналого-цифрового фильтра показали достаточно сильную зависимость инструментальной составляющей погрешности от значений коэффициентов децимации и входного напряжения.

Ключевые слова: интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, $\Sigma\Delta$ -модулятор, аналого-цифровой фильтр, инструментальная составляющая погрешности, модельный эксперимент, компьютерная модель.

V. N. Ashanin, A. A. Korotkov

THE ANALYSIS OF THE ERROR INSTRUMENTAL COMPONENT OF $\Sigma\Delta$ – ADC WITH THE ANALOG-DIGITAL FILTER

Abstract.

Backgrounds. The analysis of error instrumental component of $\Sigma\Delta$ -ADC, relating to converters of uncanonical look information, is a very complex technical task as it is not possible to use the principle of decomposition, i.e. dividing structure of $\Sigma\Delta$ -ADC to separate loosely bound elements. Due to this fact, the analysis of the instrumental component of such class errors of information converters in software environments of NI Multisim and Simulink was carried out.

Materials and methods. In this work the analysis of actual parameters influence of elements on the instrumental error of $\Sigma\Delta$ -ADC is carried out. The imitating model is developed in NI Multisim.

Results and conclusions. The given model researches of conversion linearity function $\Sigma\Delta$ -ADC dependence on parameters of sigma-delta modulator analog elements and the analog-to-digital filter showed quite strong influence on error instrumental component value for different values of decimation ratio and input voltage.

Key words: integrating analog-digital converter, $\Sigma\Delta$ -modulator, analog-digital filter, instrumental error component, model experiment, computer model.

Введение

Структурно $\Sigma\Delta$ -АЦП состоит из $\Sigma\Delta$ -модулятора и цифрового фильтра-дециматора [1, 2]. Анализ методической составляющей погрешности $\Sigma\Delta$ -модулятора, а также методов ее уменьшения посвящено достаточно много работ [1–6]. В свою очередь из-за невозможности использования принципа декомпозиции, т.е. разложения структуры $\Sigma\Delta$ -модулятора на отдельные слабо связанные звенья [3, 7], исследование его инструментальной составляющей погрешности представляет также не менее сложную и важную задачу. Поэтому единственный путь, обеспечивающий достоверную оценку погрешности, состоит в проведении натурных и модельных экспериментов. Последние предпочтительны, так как позволяют управлять условиями и параметрами проведения эксперимента (при минимальных затратах времени и ресурсов). При анализе инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП необходимо учитывать параметры наиболее критичных с этой точки зрения узлов реального устройства, а именно: интегратора, компаратора, цифроаналогового преобразователя (ЦАП) [1, 8, 9].

Инструментальная составляющая погрешности интегрирующих преобразователей информации с Σ -архитектурой аналитическими методами рассмотрена в работах [5, 9]. Первые попытки провести анализ инструментальной погрешности с помощью приложения Simulink программной среды Matlab были предприняты в конце 1990-х – начале 2000-х гг. зарубежными учеными [10–12]. Был создан специализированный инструментальный SDToolbox [13], который позволяет анализировать влияние неидеальностей аналоговых узлов. Simulink также активно используется во множестве современных работ [14–22]. Несколько ограничивает возможности анализа то, что программная среда имеет акцентированность на цифровые блоки и аналоговые блоки с идеализированными параметрами. Корректное использование Simulink и SDToolbox с возможностью получения достоверных результатов подразумевает уверенные навыки программирования. Например, в случае необходимости учета абсорбционных свойств конденсатора интегратора или задания реальных значений параметров операционных усилителей (ОУ) в составе интегратора и компаратора требуется написание кода. В работах [23–25] предлагается проведение модельных экспериментов с помощью программной среды NI Multisim. Акцентированность данной среды на аналоговые структурные элементы с возможностью детальной корректировки их параметров некоторым образом позволяет облегчить процесс моделирования. Анализ инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -модулятора на основании метода разделения функций [26] проведен в работах [24, 25]. Цель данной работы – рассмотрение инструментальной составляющей погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП.

1. Анализ инструментальной погрешности аналого-цифрового фильтра

Для анализа инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП разработана схема эксперимента (рис. 1), созданная в программной среде NI Multisim 12.0.

При проектировании однобитных $\Sigma\Delta$ -модуляторов первого и выше порядков использовалась методика, описанная в работах [26, 27].

Модулятор реализован на аналоговом интеграторе. Выбор объясняется целым рядом достоинств, среди которых:

- отсутствие необходимости в антиэлайзинговом фильтре;
- относительно нежесткие требования к динамическим свойствам ОУ в составе интегратора, так как токи перезаряда интегрирующей емкости распределены по всему такту работы модулятора (не сосредоточены в виде коротких импульсов, как в непрерывно-дискретном интеграторе);
- меньшее влияние коммутационных выбросов (источником их являются лишь ключи в составе ЦАП) [1].

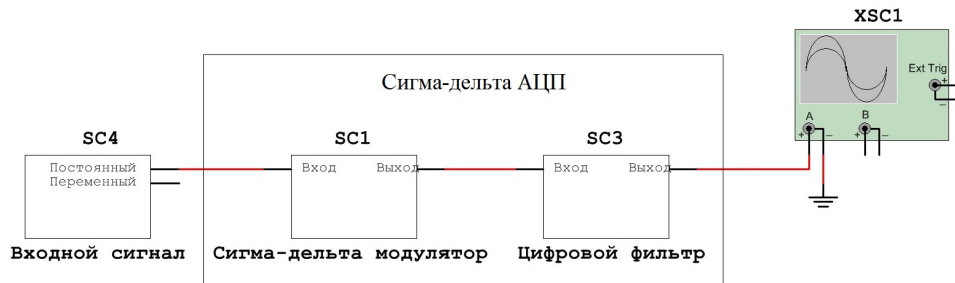


Рис. 1. Структурная схема модельного эксперимента

На вход $\Sigma\Delta$ -модулятора подается скачок постоянного напряжения $0 \rightarrow 1$ В. Сигнал с выхода модулятора (рис. 2) поступает к аналого-цифровому фильтру. С точки зрения технологии целесообразно использовать одинаковую аналого-цифровую структуру исполнения модулятора и фильтра [27, 28], поэтому аналого-цифровой фильтр реализован на основе интегрирующего дискретизатора (ИД).

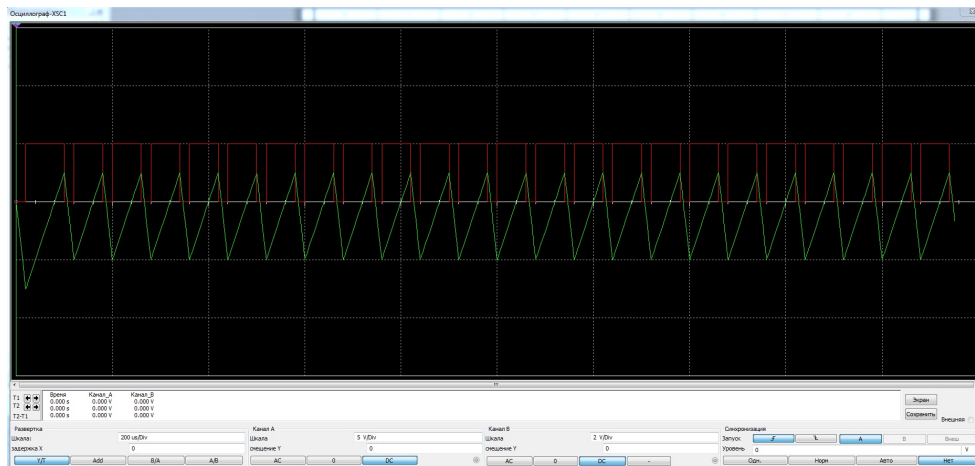


Рис. 2. Осциллограммы выходных сигналов интегратора (нижняя) и модулятора (верхняя)

На рис. 3 приведена функциональная схема ИД первого порядка [1], выходной сигнал которого (рис. 4) представляет собой дискретные выборки интегральных значений аналогового входного сигнала.

Интегратор в схеме на рис. 3 имеет передаточную функцию $H(p) = 1/(R_1 C_1 p)$. Можно считать, что цифровой фильтр неявно присутствует в схеме на рис. 3, если предположить, что $H(z) = 1$ [1].

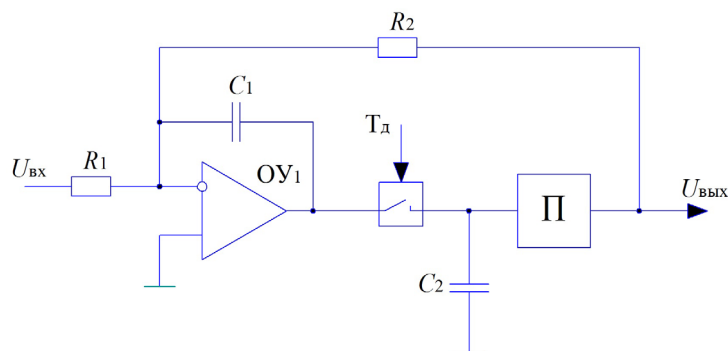


Рис. 3. Функциональная схема интегрирующего дискретизатора первого порядка

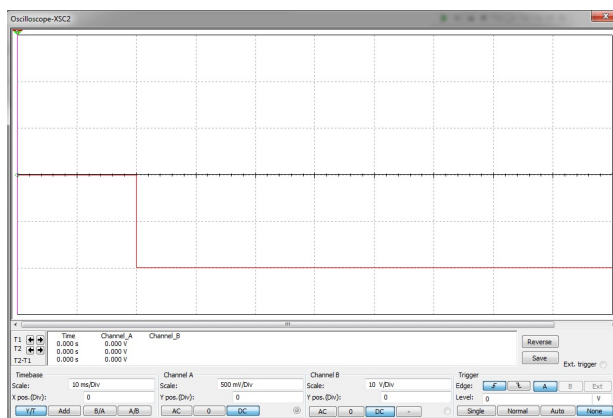


Рис. 4. Выходной сигнал интегрирующего дискретизатора

Устройство выборки и хранения ИД реализовано на основе аналогового ключа, запоминающей емкости C_2 и повторителя П.

При реализации модели заданы идеальные и наилучшие на сегодня параметры аналоговых элементов модулятора: коэффициент усиления ОУ интегратора и компаратора 10^8 , выходное сопротивление ОУ интегратора 1 Ом, входное сопротивление ОУ интегратора 100 МОм, учтены абсорбционные явления в интегрирующем конденсаторе ($K_a = 0,01$), скорость срабатывания компаратора 4 нс, сопротивления аналогового ключа в замкнутом и разомкнутом состояниях соответственно 0,1 Ом и 100 ГОм.

Поскольку включение $\Sigma\Delta$ -модулятора и аналого-цифрового фильтра последовательное, то инструментальная составляющая погрешности определяется и параметрами элементов фильтра. В табл. 1 представлены значения инструментальной погрешности фильтра в составе $\Sigma\Delta$ -АЦП. Порядок модулятора соответствует порядку фильтра.

Таблица 1
Инструментальная погрешность аналого-цифрового фильтра

Параметры элементов модулятора	Параметры элементов фильтра	Порядок модулятора и фильтра	
		1	3
		Относительная погрешность, %	
Идеальные	Наилучшие	$8,722 \cdot 10^{-3}$	$9,146 \cdot 10^{-3}$

Полученные значения подтверждают структурную и элементную схожесть $\Sigma\Delta$ -модулятора и аналого-цифрового фильтра на основе ИД.

Поэтому несомненный интерес представляет анализ зависимости инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП от порядка фильтра и коэффициента децимации фильтра.

2. Анализ инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП

Как было отмечено ранее, с точки зрения технологии целесообразно аналого-цифровое исполнение модулятора и фильтра [26, 27]. Поэтому для анализа инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП с аналого-цифровым фильтром высокого порядка разработана компьютерная модель фильтра-дециматора на основе ИД третьего порядка в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 5. На практике ИД третьего порядка в качестве цифрового фильтра не применяется, но, теоретически, может быть использован как КИХ-фильтр третьего порядка.

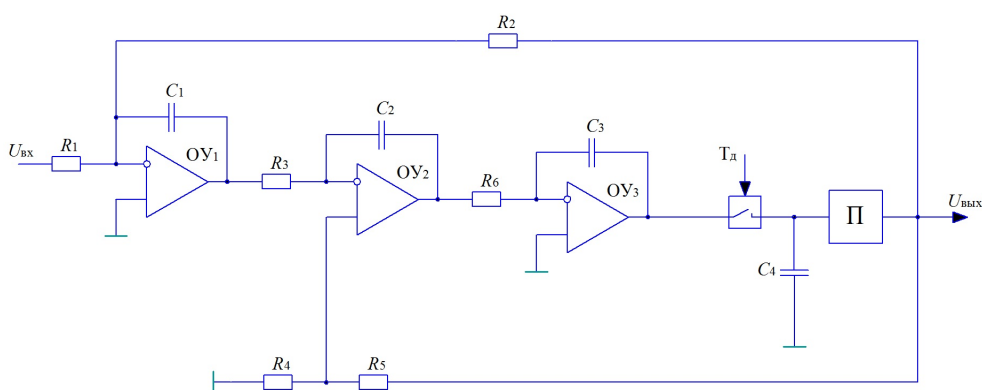


Рис. 5. Функциональная схема интегрирующего дискретизатора третьего порядка

Схемотехнически ИД близок к $\Sigma\Delta$ -модулятору, следовательно, рассматривать отдельно его инструментальную составляющую погрешности нецелесообразно. В качестве подтверждения данного тезиса приведены несколько результатов симуляций, в которых учтены параметры аналоговых узлов ИД (табл. 1, 2).

Таблица 2

Инструментальная погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП
с цифровым фильтром высокого порядка

Коэффициент децимации	Параметры аналоговых узлов модулятора	Параметры электронных компонентов цифрового фильтра	Порядок модулятора		
			1	2	3
			Относительная погрешность, %		
1/10 ³	Наилучшие	Идеальные	5,771 · 10 ⁻⁴	8,128 · 10 ⁻⁴	1,087 · 10 ⁻³
1/10 ⁴	Наилучшие		1,420 · 10 ⁻³	8,140 · 10 ⁻⁴	1,068 · 10 ⁻³
1/10 ³	Наилучшие	Наилучшие	1,399 · 10 ⁻³	7,320 · 10 ⁻⁴	9,560 · 10 ⁻⁴
1/10 ⁴	Наилучшие		2,009 · 10 ⁻³	4,120 · 10 ⁻⁴	1,603 · 10 ⁻⁴

Как видно из данных, погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП с аналого-цифровым фильтром на основе ИД высокого порядка несколько выше. Обусловлены эти значения нелинейностью функции преобразования. Чтобы исследовать этот вопрос, были проведены замеры усредненных значений множества выборок при различных коэффициентах децимации. Порядок модулятора соответствует порядку фильтра. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Нелинейность преобразования множества выборок

Количество выборок	$U_{ВХ}, В$	Порядок модулятора и фильтра			
		1		3	
		Усредненное значение множества выборок a	Нелинейность, %	Усредненное значение множества выборок a	Нелинейность, %
10^2	0	2,500031345	—	2,499842522	—
	0,25	2,800151942	0,440	2,812259986	$2,448 \cdot 10^{-3}$
	0,5	3,100271093	0,792	3,124730250	$2,716 \cdot 10^{-3}$
	0,75	3,425085164	0,362	3,437284228	$5,007 \cdot 10^{-4}$
	1	3,750015728	—	3,749787744	—
10^3	0	2,487604750	—	2,505524471	—
	0,25	2,796086219	0,044	2,818676037	$2,280 \cdot 10^{-3}$
	0,5	3,109529705	0,080	3,131895209	$1,946 \cdot 10^{-3}$
	0,75	3,422965624	0,182	3,445139859	$9,324 \cdot 10^{-4}$
	1	3,726457385	—	3,758387817	—
10^4	0	2,487624717	—	2,505495043	—
	0,25	2,798576939	$8,326 \cdot 10^{-6}$	2,818694008	$1,253 \cdot 10^{-3}$
	0,5	3,109529250	$1,180 \cdot 10^{-5}$	3,131921284	$1,352 \cdot 10^{-3}$
	0,75	3,420481717	$1,067 \cdot 10^{-5}$	3,445174903	$6,684 \cdot 10^{-4}$
	1	3,731434537	—	3,758432230	—

При увеличении количества выборок у фильтра первого порядка нелинейность снижается на порядок или даже несколько порядков. Происходит это благодаря усреднению большего количества значений сигнала на выходе модулятора. В случае использования фильтра высокого порядка изменение количества выборок сказывается незначительно.

С целью определения влияния коэффициента децимации фильтра на инструментальную погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП был произведен ряд симуляций при частотах дискретизации цифрового фильтра в 10^2 , 10^3 и 10^4 раз меньше, чем частота дискретизации $\Sigma\Delta$ -модулятора. Порядок модулятора соответствует порядку фильтра. Результаты модельного эксперимента при наилучших параметрах элементной базы АЦП приведены в табл. 4.

Из полученных данных можно сделать вывод, что коэффициент децимации существенно влияет на инструментальную составляющую погрешности, непосредственно сказываясь на линейности преобразования. Помимо коэффициента децимации, на линейность преобразования, как было пояснено ранее, влияет порядок цифрового фильтра.

Таблица 4

Влияние коэффициента децимации
на инструментальную погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП

Количество выборок	$U_{\text{ВХ}},$ В	Порядок модулятора и цифрового фильтра			
		1		3	
		Усредненное значение множества выборок a	Относительная погрешность, %	Усредненное значение множества выборок a	Относительная погрешность, %
10^2	0	2,500031302	$1,720 \cdot 10^{-6}$	2,499806563	$1,438 \cdot 10^{-3}$
	0,25	2,825023250	0,888	2,812262499	$8,936 \cdot 10^{-5}$
	0,5	3,124841335	0,793	3,124697167	$1,059 \cdot 10^{-3}$
	0,75	3,425084451	$2,082 \cdot 10^{-5}$	3,437208314	$2,209 \cdot 10^{-3}$
	1	3,749952437	$1,688 \cdot 10^{-3}$	3,749725553	$1,659 \cdot 10^{-3}$
10^3	0	2,487605166	$1,672 \cdot 10^{-5}$	2,505522977	$5,963 \cdot 10^{-5}$
	0,25	2,796086693	$1,695 \cdot 10^{-5}$	2,818667990	$2,855 \cdot 10^{-4}$
	0,5	3,109530214	$1,637 \cdot 10^{-5}$	3,131875075	$6,291 \cdot 10^{-4}$
	0,75	3,422966141	$1,510 \cdot 10^{-5}$	3,445107927	$9,269 \cdot 10^{-4}$
	1	3,726458032	$1,736 \cdot 10^{-5}$	3,758346933	$1,087 \cdot 10^{-3}$
10^4	0	2,487624708	$3,618 \cdot 10^{-7}$	2,505502658	$3,039 \cdot 10^{-4}$
	0,25	2,798576713	$8,076 \cdot 10^{-6}$	2,818693473	$1,898 \cdot 10^{-5}$
	0,5	3,109529593	$1,070 \cdot 10^{-5}$	3,131909553	$3,923 \cdot 10^{-4}$
	0,75	3,420481944	$6,636 \cdot 10^{-6}$	3,445155185	$5,723 \cdot 10^{-4}$
	1	3,731434885	$9,326 \cdot 10^{-6}$	3,758392058	$1,068 \cdot 10^{-3}$

Рассматривая инструментальную составляющую погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП, нельзя обойти стороной влияние температуры окружающей среды. В качестве реальных аналогов резисторов в опорном канале выбраны прецизионные резисторы типа С2-29В. Температурный коэффициент сопротивления С2-29В в температурном диапазоне 20...155 °С составляет $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Смоделировано изменение температуры на 10 °С, результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Инструментальная погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП при изменении температуры

Изменение температуры, °С	Порядок модулятора и фильтра	
	1	3
	Относительная погрешность, %	
+10	$13,513 \cdot 10^{-3}$	$24,490 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, даже при незначительном изменении сопротивлений опорного канала модулятора и фильтра ощутимо меняется инструментальная погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП в целом.

Заключение

Значение инструментальной составляющей погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП зависит от параметров элементной базы, порядка модулятора и фильтра-дециматора, коэффициента децимации, а также изменения сопротивления опорного канала модулятора от температуры.

Библиографический список

1. **Ашанин, В. Н.** $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирования / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2009. – 188 с.
2. **Schreier, R.** Understanding Delta-Sigma Data Converters / R. Schreier, G. C. Temes // IEEE Press. – 2008. – 446 p.
3. **Ашанин, В. Н.** Проблемы синтеза измерительных преобразователей гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Датчики и системы. – 2011. – № 7. – С. 2–7.
4. **Ашанин, В. Н.** Реализация концепций $\Sigma\Delta$ -АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин, А. И. Надеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер.: Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 226–236.
5. **Шахов, Э. К.** Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
6. **Иванов, В. А.** Исследование шумов квантования $\Delta\Sigma$ -АЦП и разработка методов их снижения : дис. ... канд. техн. наук / Иванов В. А. – М. : МЭИ, 2013. – 164 с.
7. **Ашанин, В. Н.** Классификация измерительных преобразователей информации непрерывно-дискретной системы гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 98–104.
8. **Ашанин, В. Н.** Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2009. – 214 с.
9. **Ашанин, В. Н.** Теоретическое и экспериментальное исследование методов совершенствования интегрирующих аналого-цифровых преобразователей : дис. ... канд. техн. наук / Ашанин В. Н. – Л. : ЛПИ, 1982. – 232 с.
10. Modeling sigma-delta modulator non-idealities in SIMULINK / S. Brigati, F. Francesconi, P. Malcovati, D. Tonietto, A. Baschiroto, F. Maloberti // Proceedings of ISCAS '99. – 1999. – Vol. 2. – P. 384–387.
11. Behavioral modeling of switched-capacitor sigma-delta modulators / P. Malcovati, S. Brigati, F. Francesconi, F. Maloberti, F. Cusinato, A. Baschiroto // IEEE Trans. on Circuits and Systems I. – 2003. – Vol. 50, № 3. – P. 352–364.
12. **Norsworthy, S. R.** Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation / S. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes. – Piscataway, NJ : IEEE Press, 1997.
13. Category: Control Systems, File: SD Toolbox [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>.
14. **Fornasari, A.** Improved Modeling of Sigma-Delta Modulator Non-Idealities in SIMULINK / A. Fornasari, P. Malcovati, F. Maloberti // Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS (Kobe. – 23–26 May 2005). – 2005. – Vol. 6. – P. 5982–5985.
15. Analysis of clock jitter error in multibit continuous-time $\Sigma\Delta$ modulators with NRZ feedback waveform / R. Tortosa, J. M. de la Rosa, A. Rodríguez-Vázquez, F. V. Fernández. // IEEE International Symposium: Circuits and Systems, ISCAS. – 2005. – May. – P. 3103–3106.
16. Modeling of a Second Order Non-Ideal Sigma-Delta Modulator / A. Dendouga, N. E. Bouguechal, S. Kouda, S. Barra // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2010. – № 5 (6). – P. 327–332.
17. **Verma, P.** A Graphical User Interface (GUI) implemented Low-pass continuous time Sigma-delta ADC with improved SNR & ENOB / P. Verma, A. K. Sahu // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2014. – № 4 (6). – P. 144–149.

18. **Hajare, S. S.** Modeling Non-Idealities of CT Sigma-Delta Modulator for Software Defined Radio / S. S. Hajare, M. R. Madki // International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. – 2013. – Vol. 2, № 1. – P. 233–240.
19. Modeling of a Second Order Sigma-Delta Modulator with Imperfections / A. Dendouga, N. E. Bouguechal, S. Kouda, S. Barra // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2011. – Vol. 3, № 2. – P. 248–258.
20. A Wideband High Dynamic Range Continuous-Time Sigma-Delta ADC for Wireless Applications / Ye Xu // Master's Thesis at school of ICT. – Integrated Devices and Circuits. – 2010. – Aug. – 77 p.
21. Continuous time sigma delta ADC design and non-idealities analysis / Yuan Jun, Zhang Zhaofeng, Wu Jun, Wang Chao, Chen Zhenhai, Qian Wenrong, Yang Yintang // Journal of Semiconductors. – 2011. – Vol. 32, № 12. – P. 125007-1–125007-6.
22. Modeling of Sigma-Delta Modulator Non-Idealities with Two Step Quantization in MATLAB/SIMULINK / S. Jaykar, K. Pande, A. Peshattiwar, A. Parkhi // International Journal of Computing and Technology. – 2014. – Vol. 1, iss. 2. – P. 94–99.
23. **Коротков, А. А.** Анализ инструментальной погрешности $\Sigma\Delta$ -модулятора с помощью компьютерного моделирования / А. А. Коротков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 190–194.
24. **Ашанин, В. Н.** Определение инструментальной составляющей погрешности однобитных $\Sigma\Delta$ -модуляторов на основе принципа разделения функций / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков, Б. В. Чувькин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 50–52.
25. **Ашанин, В. Н.** Анализ инструментальной составляющей погрешности однобитных $\Sigma\Delta$ -модуляторов / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков, Б. В. Чувькин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 52–61.
26. **Шахов, Э. К.** Разделение функций – основной принцип совершенствования средств измерений / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Датчики и системы. – 2006. – № 7. – С. 2–7.
27. **Ашанин, В. Н.** $\Sigma\Delta$ -АЦП: Синтез одноконтурных структур / Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 91–106.
28. **Ашанин, В. Н.** $\Sigma\Delta$ -АЦП: Синтез структур высоких порядков / Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 67–79.

References

1. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *$\Sigma\Delta$ -analogo-tsifrovye preobrazovateli: osnovy teorii i proektirovaniya* [$\Sigma\Delta$ -analog-digital converters: fundamentals of theory and design]. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2009, 188 p.
2. Schreier R., Temes G. C. *IEEE Press*. 2008, 446 p.
3. Ashanin V. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2011, no. 7, pp. 2–7.
4. Ashanin V. N., Shakhov E. K., Nadeev A. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Ser.: Tekhnicheskie nauki* [University proceeding. Volga region. Engineering sciences]. 2006, no. 6, pp. 226–236.
5. Shakhov E. K., Mikhotin V. D. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli napryazheniya* [Integrated voltage converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p.
6. Ivanov V. A. *Issledovanie shumov kvantovaniya $\Delta\Sigma$ -ATsP i razrabotka metodov ikh snizheniya: dis. kand. tekhn. nauk* [Research of quantization noise $\Delta\Sigma$ -ATsP and development of methods for their reduction: dissertation to apply for the degree of the candidate of medical sciences]. Moscow: MEI, 2013, 164 p.

7. Ashanin V. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 3 (19), pp. 98–104.
8. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya* [Theory of integrating analog-digital conversion]. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2009, 214 p.
9. Ashanin V. N. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie metodov sovershenstvovaniya integriruyushchikh analogo-tsifrovyykh preobrazovateley: dis. kand. tekhn. nauk* [Theoretical and experimental study of methods for improving integrating analog-digital converters: dissertation to apply for the degree of the candidate of medical sciences]. Leningrad: LPI, 1982, 232 p.
10. Brigati S., Francesconi F., Malcovati P., Tonietto D., Baschiroto A., Maloberti F. *Proceedings of ISCAS '99*. 1999, vol. 2, pp. 384–387.
11. Malcovati P., Brigati S., Francesconi F., Maloberti F., Cusinato F., Baschiroto A. *IEEE Trans. on Circuits and Systems I*. 2003, vol. 50, no. 3, pp. 352–364.
12. Norsworthy S. R., Schreier R., Temes G. C. *Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997.
13. *Category: Control Systems, File: SD Toolbox* [Elektronnyy resurs]. Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>.
14. Fornasari A., Malcovati P., Maloberti F. *Proc. of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS (Kobe. – 23–26 May 2005)*. 2005, vol. 6, pp. 5982–5985.
15. Tortosa R., J. M. de la Rosa, Rodríguez-Vázquez A., Fernández F. V. *IEEE International Symposium: Circuits and Systems, ISCAS*. 2005, May, pp. 3103–3106.
16. Dendouga A., Bouguechal N. E., Kouda S., Barra S. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2010, no. 5 (6), pp. 327–332.
17. Verma P. A., Sahu A. K. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2014, no. 4 (6), pp. 144–149.
18. Hajare S. S., Madki M. R. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*. 2013, vol. 2, no. 1, pp. 233–240.
19. Dendouga A., Bouguechal N. E., Kouda S., Barra S. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 248–258.
20. Xu Ye *A Wideband High Dynamic Range Continuous-Time Sigma-Delta ADC for Wireless Applications*. Master's Thesis at school of ICT. Integrated Devices and Circuits. 2010, Aug., 77 p.
21. Yuan Jun, Zhang Zhaofeng, Wu Jun, Wang Chao, Chen Zhenhai, Qian Wenrong, Yang Yintang *Journal of Semiconductors*. 2011, vol. 32, no. 12, pp. 125007-1–125007-6.
22. Jaykar S., Pande K., Peshattiwar A., Parkhi A. *International Journal of Computing and Technology*. 2014, vol. 1, iss. 2, pp. 94–99.
23. Korotkov A. A. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international symposium Reliability and quality]. 2013, vol. 1, pp. 190–194.
24. Ashanin V. N., Korotkov A. A., Chuvykin B. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 2, pp. 50–52.
25. Ashanin V. N., Korotkov A. A., Chuvykin B. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 52–61.
26. Shakhov E. K., Ashanin V. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2006, no. 7, pp. 2–7.
27. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 1, pp. 91–106.

28. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 2, pp. 67–79.

Ашанин Василий Николаевич

кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электротехники
и транспортного электрооборудования,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Ashanin Vasily Nikolaevich

Candidate of engineering sciences,
professor, head of sub-department
of electrical engineering and transport
electrical equipment, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Коротков Алексей Александрович

инженер-конструктор, Научно-
исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)

E-mail: lexifer@mail.ru

Korotkov Aleksey Aleksandrovich

Design engineer, Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

УДК 681.325.3

Ашанин, В. Н.

Анализ инструментальной составляющей погрешности $\Sigma\Delta$ -АЦП с аналого-цифровым фильтром / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 1 (45). – С. 123–133. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-1-10.