

А. А. Коротков

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ СИГНАЛА С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

A. A. Korotkov

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATING ANALOG-DIGITAL CONVERTER WITH OVERSAMPLING WITH INTERMEDIATE WIDTH-PULSE MODULATION IN THE COMPOSITION OF INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассмотрены вопросы, связанные с выбором технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП, который удовлетворяет ТЗ на ИИС, и решением задачи проектирования Σ -АЦП, реализующего один из вариантов импульсной модуляции, максимально близким к характеристикам технического аналога. **Материалы и методы.** Для выбора технического аналога была проведена систематизация $\Sigma\Delta$ -АЦП и сформирована экспертная система с интегрированной базой данных. Для разработки имитационной модели, соответствующей параметрам технического аналога, была использована программная среда NI Multisim 12.0. **Результаты.** Разработана имитационная модель интегрирующего аналого-цифрового преобразователя с передискретизацией сигнала с промежуточной широтно-импульсной модуляцией в составе информационно-измерительных систем. Основные параметры разработанной модели совпадают с параметрами зарубежного технического аналога. **Выводы.** Разработанная Multisim-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП согласно дихотомической систематизации относится к классу 1-1-1, т.е. с коррекцией, с элементами схемы, приближенными к реальным, реализуемая.

A b s t r a c t. Background. The article discusses the issues associated with the selection of a technical analogue from the subclass $\Sigma\Delta$ -ADC, which satisfies the technical requirements for IMS and solving the design problem of Σ -ADC, which implements one of the options for pulse modulation, as close as possible to the characteristics of the technical analogue. **Materials and methods.** To select a technical analogue, a $\Sigma\Delta$ -ADC was systematized and an expert system was formed with an integrated database. To develop a simulation model that matches the parameters of a technical analog, the NI Multisim 12.0 software environment was used. **Results.** A simulation model of an integrating analog-to-digital converter with signal oversampling with intermediate pulse-width modulation as part of information-measuring systems is developed. The main parameters of the developed model coincide with the parameters of a foreign technical analogue. **Conclusions.** According to the dichotomous systematization, the developed Multisim-model $\Sigma\Delta$ -ADC belongs to the class 1-1-1, i.e. with correction, with circuit elements close to real, realizable.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегрирующий аналого-цифровой преобразователь, широтно-импульсная модуляция сигнала, погрешность от краевых эффектов, технический аналог, имитационная модель.

К e y w o r d s: integrating analog-to-digital converter, pulse-width modulation of the signal, error from edge effects, technical analogue, simulation model.

Введение

В настоящее время в информационно-измерительных системах (ИИС) при построении измерительных каналов как правило используются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), основанные на принципе импульсно-разностной модуляции (Δ -модуляция). Они строятся на основе алгоритмов уравнивающего интегрирующего развертывающего преобразования, что в сочетании с использованием Δ -модуляции позволяет создавать многоуровневые интегрирующие прецизионные АЦП (ИАЦП) по технологии цифровых интегральных схем, отличающиеся низкой стоимостью. Это ставит их вне конкуренции по отношению к остальным подклассам АЦП.

На основе алгоритмов уравнивающего интегрирующего развертывающего преобразования могут быть построены разнообразные варианты Σ -АЦП с преобразованием сигнала в один из видов импульсной модуляции: импульсно-разностный ($\Sigma\Delta$ -АЦП), широтно-импульсный (ΣT -АЦП), частотно-импульсный ($\Sigma\Omega$ -АЦП), фазо-импульсный ($\Sigma\psi$ -АЦП), кодо-импульсный (КИМ) сигнал [1, 2]. Среди перечисленных вариантов Σ -АЦП наибольшее распространение получил подкласс $\Sigma\Delta$ -АЦП из-за возможности реализации аналоговых интеграторов по технологии CMOS (КМОП-технологии), а алгоритмов цифровой фильтрации измерительных сигналов, реализованных по технологии SoC (Система на кристалле) [3–8]. Их развитие все последнее время шло по пути совершенствования технологий, что является главным недостатком при проектировании ИИС, в случае если возникают ограничения на элементную базу. Тогда целесообразно рассматривать Σ -АЦП, использующие перечисленные выше виды импульсной модуляции, для которых могут быть преодолены ограничения на элементную базу. Однако на этом пути возникает целый ряд нерешенных задач, связанных с недостаточностью теории и практики разработки всего класса Σ -АЦП.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с выбором технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП, который удовлетворяет ТЗ на ИИС и решением задачи проектирования Σ -АЦП, реализующего один из вариантов импульсной модуляции, максимально близким к характеристикам технического аналога.

Выбор технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП

Можно выделить два пути развития Σ -АЦП, по которым осуществляется совершенствование данного класса преобразователей. Совершенствование связано в первую очередь с развитием элементной базы, что дает расширение частотного диапазона, снижение энергопотребления и габаритов, а также повышение точности за счет более сложных структурно-алгоритмических решений.

Однако при этом есть серьезные ограничения, связанные с рядом методических погрешностей, из которых основной является погрешность от краевых эффектов [8, 9]. Кроме того, при реализации алгоритмов преобразования информации в АЦП с сигма-дельта архитектурой возникает проблема привязки результата измерения к времени преобразования, что существенно ограничивает их применение при решении измерительных задач [10].

Ко второму пути развития ИАЦП можно отнести использование технических решений из ранних разработок, когда главная проблема совершенствования ИАЦП, связанная с несовершенством элементной базы, решалась путем поиска новых вариантов структур и алгоритмов ИАЦП.

В многообразной практике измерительной техники возникают задачи, инженерные решения которых вызывают значительные трудности в рамках концепции использования $\Sigma\Delta$ -АЦП в виде монолитных ИМС. В этих случаях целесообразно в качестве альтернативы рассматривать варианты АЦП с промежуточной ШИМ [11].

Концепция $\Sigma\Delta$ -АЦП в виде монолитных ИМС предполагает использование сложных цифровых фильтров, что вызывает значительные трудности при смене технологии изготовления, при наличии ограничительного списка на элементную базу, необходимости предельного снижения энергопотребления, повышения помехоустойчивости (использование аналоговых интеграторов) и т.д.

Погрешность от краевых эффектов интегрирующих АЦП связана с невозможностью обеспечения равенства интегральных значений измеряемой величины с интегральными значениями опорного напряжения в конце интервала интегрирования. Значение амплитуды остаточного напряжения является погрешностью от краевого эффекта (погрешность квантования во временной области), в отличие от $\Sigma\Delta$ -АЦП, для которых имеет место погрешность квантования по амплитуде.

С этой точки зрения $\Sigma\Delta$ -АЦП можно разделить на два подкласса по критерию наличия или отсутствия элементов коррекции погрешности от краевых эффектов. На первом этапе проектирования разрабатываются идеальные модели $\Sigma\Delta$ -АЦП для анализа методических погрешностей, которые в дальнейшем переводятся в модели, отражающие реальные характеристики элементов для оценки инструментальных погрешностей.

Однако может возникнуть ситуация, когда выбранная структура в силу внешних ограничений на элементную базу не может быть реализована или будет обладать недопустимыми характеристиками. Поэтому необходимо предусмотреть заключительное разделение структурно-алгоритмических решений на два подкласса – реализуемые и нереализуемые для данных конкретных условий реализации. Описанные выше процедуры разработки $\Sigma\Delta$ -АЦП удобно представить в виде дихотомической систематизации, представленной на рис. 1.

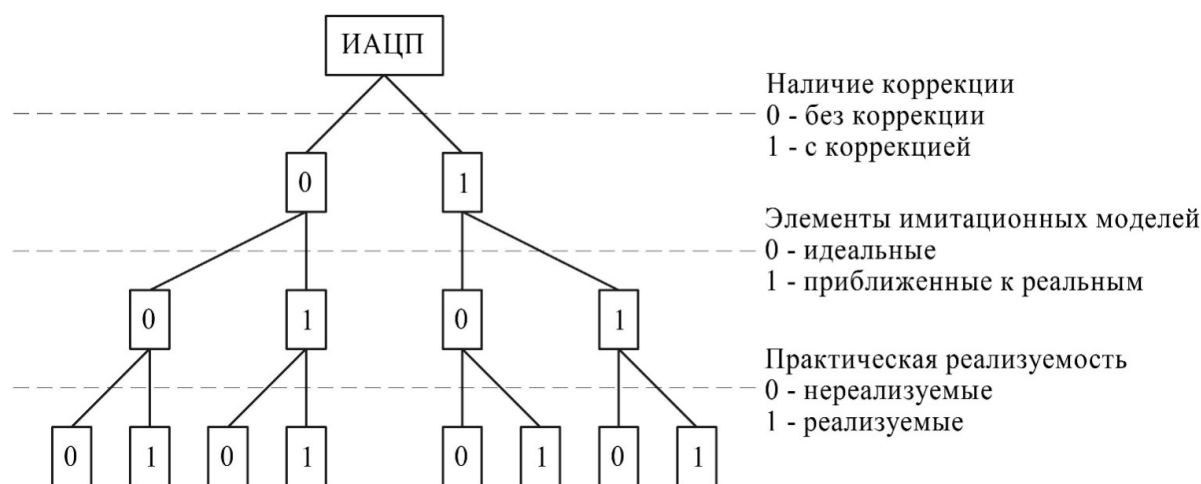


Рис. 1. Дихотомическая систематизация $\Sigma\Delta$ -АЦП

Данная систематизация позволила провести исследование известных структур $\Sigma\Delta$ -АЦП, осуществить поиск новых технических решений в рамках единого методологического подхода. Согласно этому подходу может быть решена важная задача проектирования, а именно, обоснованное принятие решения о реальных технических характеристиках $\Sigma\Delta$ -АЦП при условии минимальных затрат на экспериментальные исследования. Данный подход основан на понятии о ближайшем техническом аналоге, который используется в смежных областях измерительной техники и обладает совокупностью технических характеристик, в первом приближении удовлетворяющих требованиям технического задания. Однако в силу ряда ограничений непосредственное использование технического аналога либо встречается существенные трудности, либо полностью невозможно. В данной работе в качестве технических аналогов для $\Sigma\Delta$ -АЦП рассматривается подкласс $\Sigma\Delta$ -АЦП, выполненный по технологии «система на кристалле», которые являются несомненными лидерами по таким характеристикам, как разрядность, энергопотребление, стоимость. Наличие технического аналога упрощает проведение обоснованного принятия решения о реальных технических характеристиках $\Sigma\Delta$ -АЦП на этапе анализа практической реализуемости. Это достигается за счет выявления критически важных

элементов, параметры которых определяют инструментальную погрешность $\Sigma\Delta$ -АЦП, и сопоставления их с характеристиками технического аналога ($\Sigma\Delta$ -АЦП).

Для решения задачи выбора технического аналога необходимо сформулировать критерии выбора и организовать прикладное ПО с базой данных на $\Sigma\Delta$ -АЦП. На последнем уровне проектирования решается задача, важная с точки зрения практической реализации, учета ограничений по выбору элементной базы, технологии, а также на системном уровне, в рамках которого формулируются дополнительные требования по интеграции АЦП в информационно-измерительные системы. Несмотря на явную избыточность данного подхода, в качестве положительного момента можно отметить гарантию получения реализуемого технического решения, оптимального по множеству критериев, заложенных в техническое задание.

Существует большое количество разновидностей $\Sigma\Delta$ -модуляторов. Поэтому целесообразно ограничиться их разделением на подклассы лишь по самым основным признакам. В качестве таковых будем использовать классификационные признаки, которые изложены в работе [8]. Классификационный граф $\Sigma\Delta$ -модуляторов представлен на рис. 2.

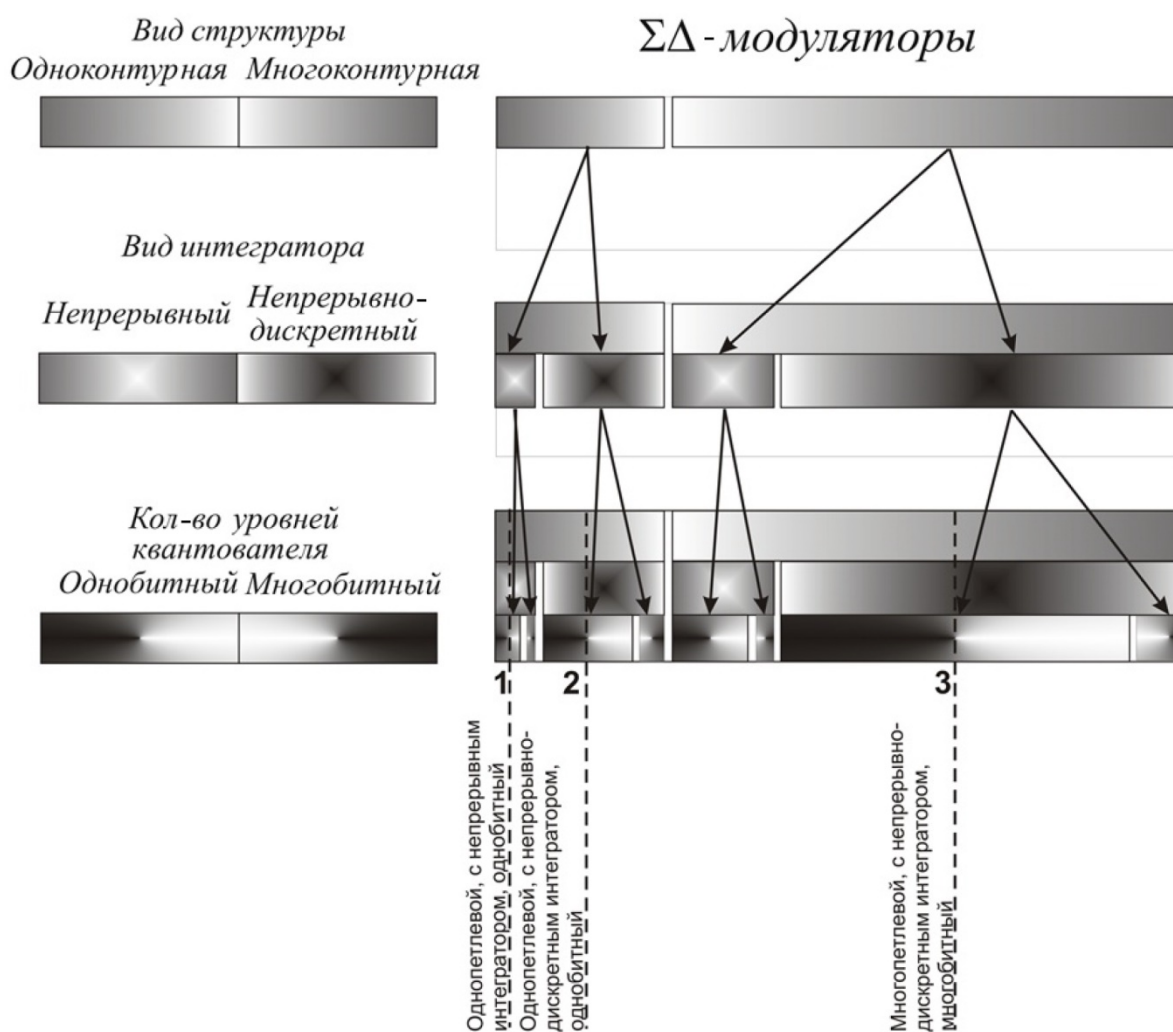


Рис. 2. Классификационный граф $\Sigma\Delta$ -модуляторов

В разработанной СППР [12] предусмотрено два режима работы – Новичок и Эксперт. Доступен выбор типа преобразователя. В режиме эксперта доступно редактирование характеристик микросхем и расстановка приоритета их отбора по 8-балльной шкале (1 – самые важные). По умолчанию приоритет выставлен 1, параметры не учитываются до указания.

В ходе анализа характеристик производимых микросхем для выбора технического аналога предложено следующее деление параметров по классам:

- быстродействие: высокое (свыше 10М выборок в секунду), среднее (от 10к до 10М), низкое (до 10к), где к – кило (10^3), М – мега (10^6);
 - точность (эффективная разрядность, ENOB – Effective Number of Bits): высокая (от 20 бит), средняя (16–20 бит), низкая (до 16 бит);
 - потребляемая мощность: маломощные (до 100 мВт), мощные (свыше 100 мВт);
 - заявленная разрядность: высокая (от 20 бит), средняя (16–20 бит), низкая (до 16 бит);
 - тип интерфейса: последовательный (serial), параллельный (parallel), иной;
 - тип корпуса (номенклатура корпусов взята из прилагаемых сопроводительных информационных листов микросхем – DataSheet);
 - тип выхода: аналоговый (токовый), цифровой;
 - цена: дорогие (свыше 50 \$), средние (10–50 \$), недорогие (до 10 \$).
- Разработанная СППР показана на рис. 3.

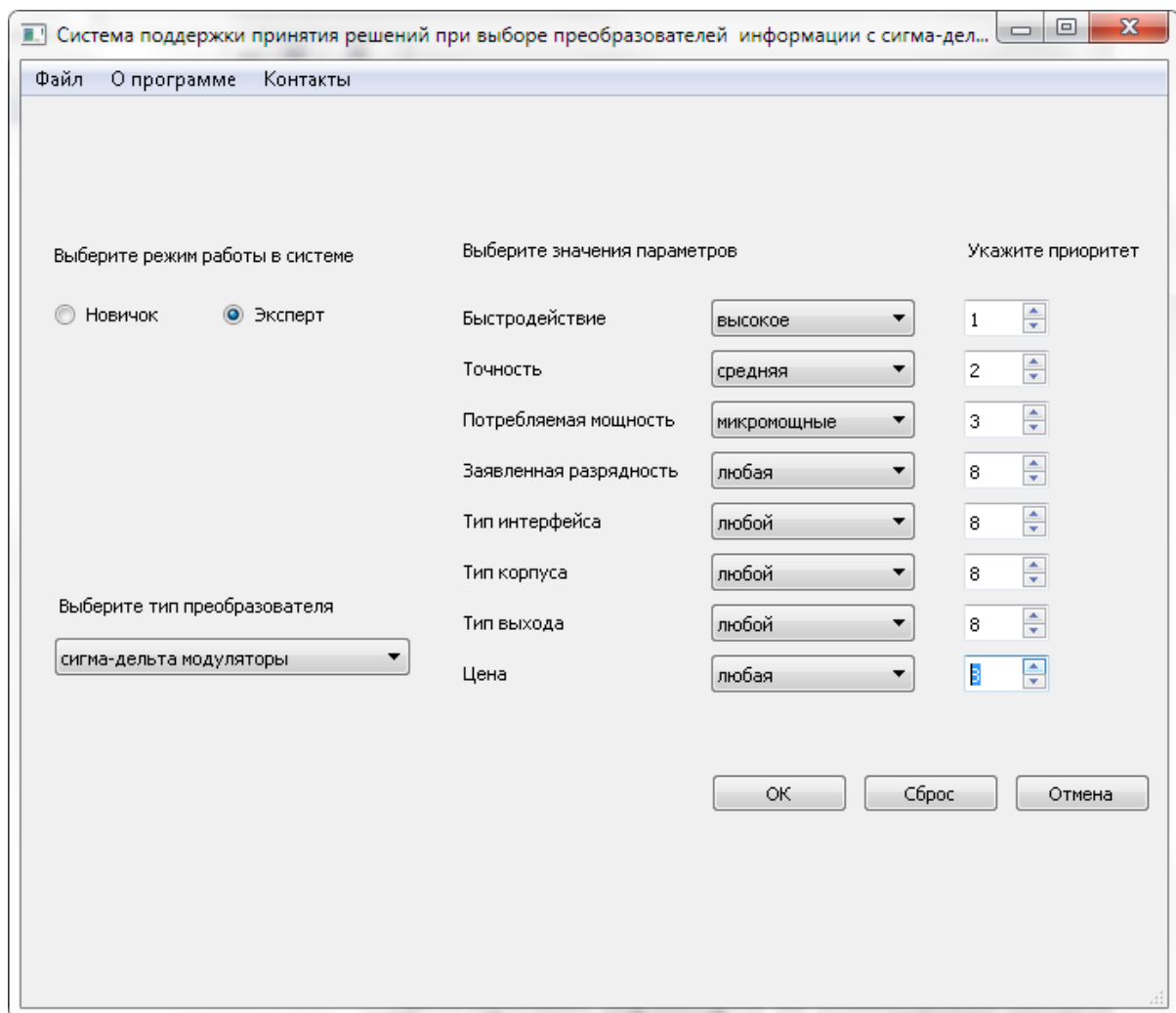


Рис. 3. Оконная форма СППР

СППР позволяет выбрать технический аналог, параметры которого удовлетворяют разрабатываемому проекту – ADS1605 и ADS1606 от Texas Instruments.

Интегрирующий АЦП с широтно-импульсной модуляцией

Средствами программной среды NI Multisim была разработана имитационная модель 16-битного $\Sigma\Delta$ -АЦП [13] с частотой дискретизации 5 МГц (рис. 4), по характеристикам близкая к техническому аналогу – ADS1605 и ADS1606 от Texas Instruments.

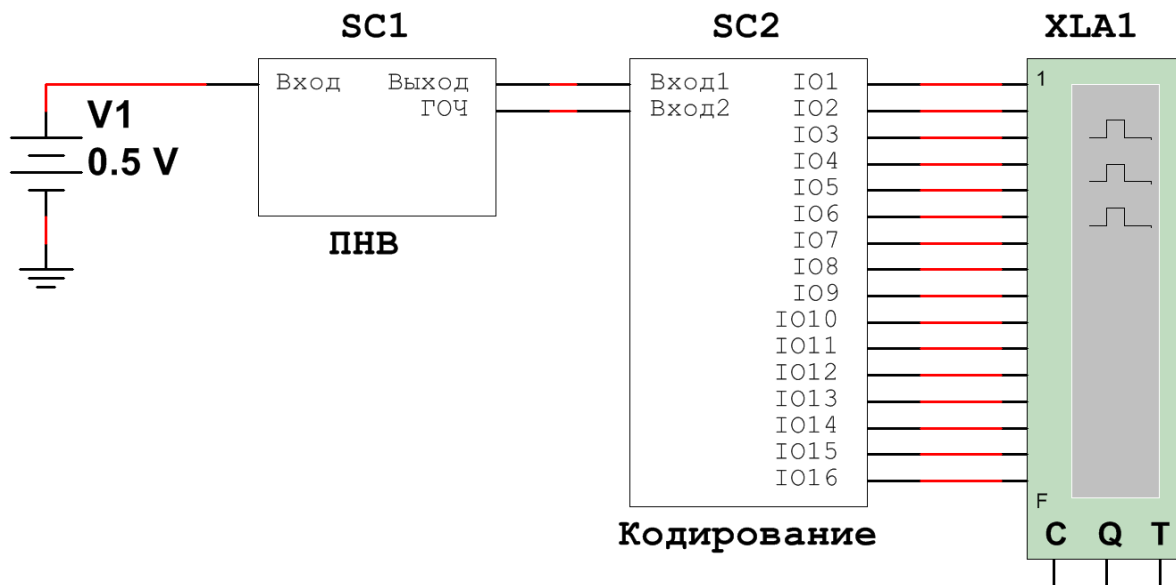


Рис. 4. Multisim-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП с идеальными параметрами элементов

Поскольку модельный лист имеет размерные ограничения, устройство структурно разделено на две подсистемы (SC1 и SC2), имитирующие преобразователь напряжения в интервал времени и подсистему кодирования информативного интервала времени. Подсистема SC1 представлена на рис. 5.

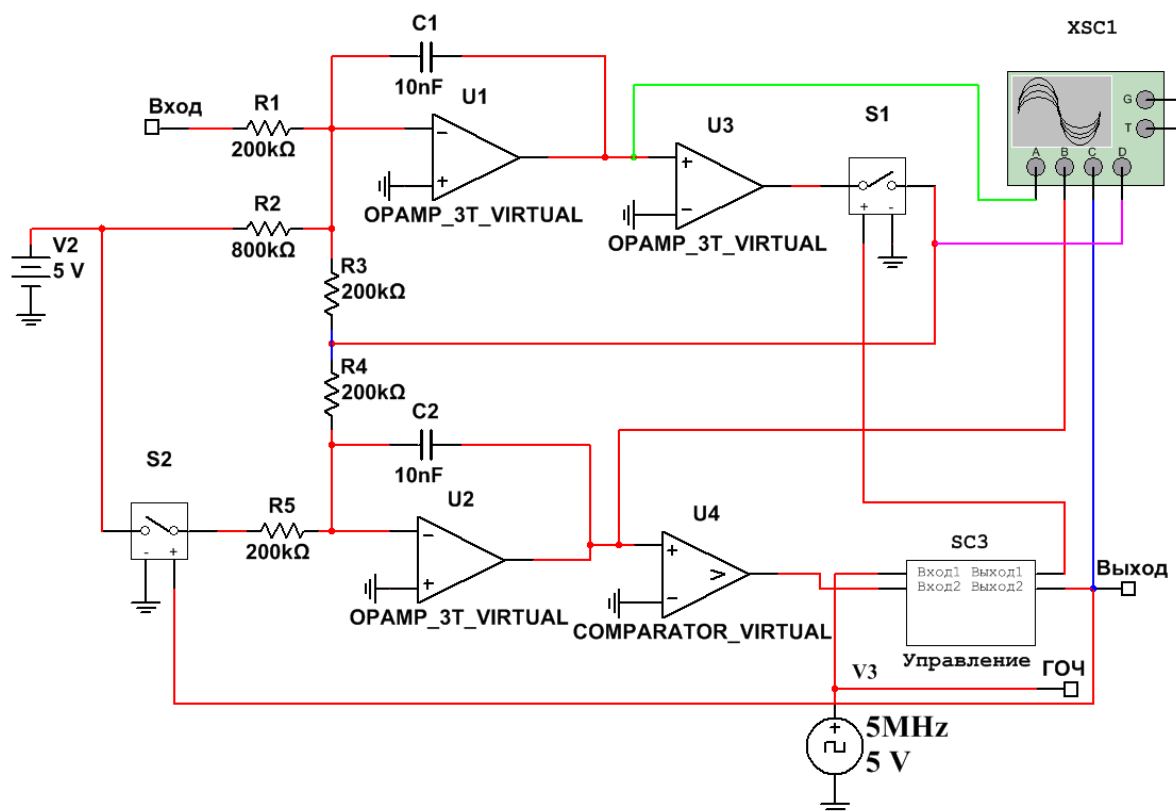


Рис. 5. Подсистема SC1

Подсистема кодирования информативного интервала времени (SC2) представлена на рис. 6.

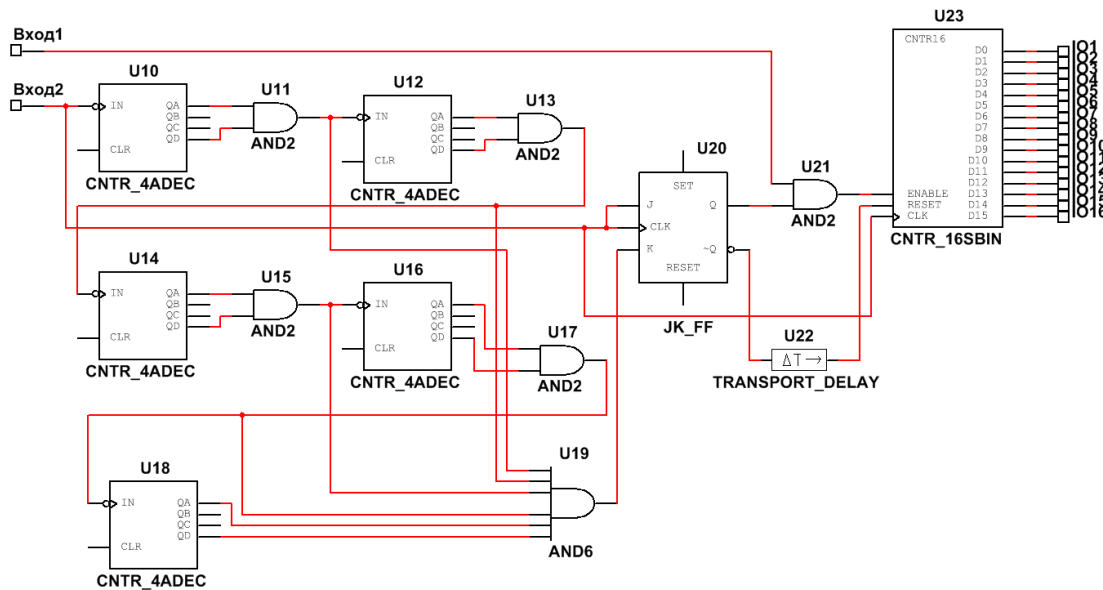


Рис. 6. Подсистема SC2

Исследование разработанной Multisim-модели $\Sigma\Delta$ -АЦП показало [13], что при идеальных параметрах аналоговых элементов отклонения линейности преобразования полностью отсутствуют. Также была исследована реакция АЦП на сетевую помеху в виде гармонического входного сигнала (синусоида) частотой 50 Гц и амплитудой 1 В. Для гармонического воздействия частотой 50; 49,5; 49 Гц помехоподавление ИАЦП без входного фильтра составило $-76,5$; $-70,5$; $-55,7$ дБ соответственно.

Заключение

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с выбором технического аналога из подкласса $\Sigma\Delta$ -АЦП, который удовлетворяет ТЗ на ИИС и решением задачи проектирования Σ -АЦП, реализующего один из вариантов импульсной модуляции, максимально близким к характеристикам технического аналога.

Разработанная Multisim-модель $\Sigma\Delta$ -АЦП согласно дихотомической систематизации относится к классу 1-1-1, т.е. с коррекцией, с элементами схемы, приближенными к реальным, реализуемая. По разрядности и частоте дискретизации соответствует техническому аналогу ADS1605 и ADS1606 от Texas Instruments.

Библиографический список

1. Ашанин, В. Н. Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 214 с.
2. Ашанин, В. Н. Виды интегрирующих аналого-цифровых преобразователей / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов // Измерения. Контроль. Автоматизация: состояние, проблемы, перспективы. – 2009. – № 3 – С. 47–51.
3. Lee, W. L. A novel higher order interpolative modulator topology for high resolution oversampling A/D converters: Master's Thesis / W. L. Lee. – Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 1982.
4. Adams, R. W. Design and implementation of an audio 18-bit analog-to-digital converter using oversampling techniques / R. W. Adams // Journal of the Audio Engineering Society. – 1986. – Vol. 34, № 3. – P. 153–166.
5. Norsworthy, S. R. Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation / S. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes. – Piscataway, NJ : IEEE Press, 1997.
6. Xu, Ye. 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. – 77 p.
7. Schreier, R. Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : IEEE Press, 2005. – 446 p.
8. Ашанин, В. Н. $\Sigma\Delta$ -АЦП: основы теории и проектирование : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 188 с.

9. Шахов, Э. К. Интегрирующие развертывающие преобразователи / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
10. Ашанин, В. Н. Особенности оценки погрешности измерения преобразователей информации с дискретизацией сигнала / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2009. – Вып. 10. – С. 10–11.
11. Надеев, А. И. Сравнительный анализ интегрирующих АЦП с промежуточным преобразованием в сигналы широтной и разностной импульсной модуляции / А. И. Надеев // Информационно-измерительная техника : межвуз. сб. науч. тр. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – Вып. 31. – С. 99–106.
12. Ashanin, V. N. Development of Engineering Application for a Choice of Data Converters with Sigma Delta Architecture / V. N. Ashanin, B. V. Chuvykin, A. A. Korotkov, I. A. Sidorova // Selected, peer reviewed papers from the 2015 The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE). – Moscow, 2015. – P. 251–254.
13. Ashanin, V. N. Realisation of Integrating Analog-Digital Converter with Intermediate Time-Impulse Modulation Using NI Multisim / V. N. Ashanin, A. A. Korotkov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. – MWENT 2018. – Proceedings 1. – 2018. – P. 1–7.

References

1. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monografiya* [Theory of integrating analog-to-digital conversion: monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009, 214 p. [In Russian]
2. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Izmereniya. Kontrol'. Avtomatizatsiya: sostoyanie, problema, perspektivy* [Measurements. Control. Automation: state, problems, prospects]. 2009, no. 3, pp. 47–51. [In Russian]
3. Lee W. L. *A novel higher order interpolative modulator topology for high resolution oversampling A/D converters: Master's Thesis*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
4. Adams R. W. *Journal of the Audio Engineering Society*. 1986, vol. 34, no. 3, pp. 153–166.
5. Norsworthy S. R., Schreier R., Temes G. C. *Delta-Sigma Data Converters. Theory, Design and Simulation*. Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 1997.
6. Xu Ye. *Master's Thesis at school of ICT. – Integrated Devices and Circuits*. 2010, 77 p.
7. Schreier R., Temes G. C. *Understanding delta-sigma data converters*. New Jersey: IEEE Press, 2005, 446 p.
8. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *ΣΔ-АЦП: основы теории и проектирование: monografiya* [ΣΔ-ADC: fundamentals of theory and design : monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009, 188 p. [In Russian]
9. Shakhov E. K., Mikhotin V. D. *Integriruyushchie razvertvyvayushchie preobrazovateli* [Integrating deployable converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
10. Ashanin V. N., Chuvykin B. V. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: collection of articles of the International scientific and technical conference] Penza: PGTA, 2009, iss. 10, pp. 10–11. [In Russian]
11. Nadeev A. I. *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Information and measurement technology: interuniversity collection of scientific papers]. Penza: Izd-vo PGU, 2007, iss. 31, pp. 99–106. [In Russian]
12. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Korotkov A. A., Sidorova I. A. *Selected, peer reviewed papers from the 2015 The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE)*. Moscow, 2015, pp. 251–254.
13. Ashanin V. N., Korotkov A. A. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies*. MWENT 2018, Proceedings 1, 2018, pp. 1–7.

Коротков Алексей Александрович

аспирант,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
 инженер-конструктор 2-й категории,
 Научно-исследовательский институт
 электронно-механических приборов
 (Россия, г. пенза, ул. Каракозова, 4)
 E-mail: lexifer@mail.ru

Korotkov Aleksey Aleksandrovich

postgraduate student,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia);
 design engineer of the 2nd category,
 Research Institute of Electronic
 and Mechanical Devices
 (4 Karakozova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Коротков, А. А. Разработка интегрирующего аналого-цифрового преобразователя с передискретизацией сигнала с промежуточной широтно-импульсной модуляцией в составе информационно-измерительных систем / А. А. Коротков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 3 (33). – С. 60–68. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-3-7.