

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 62-791.4

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*

А.Ф. УЛЯШИН¹, А.А. ВЕЛИЧКО²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу современных интегральных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). На данный момент ряд зарубежных компаний, таких как Analog Devices, Texas Instruments и Microchip, выпускают АЦП в интегральном исполнении. Каждый производитель использует собственную методику реализации устройства. Основной задачей таких устройств является преобразование напряжения в двоичный код. АЦП применяются везде, где требуется принимать аналоговый сигнал и обрабатывать его в цифровой форме. Примерами могут служить такие области применения, как средства связи и телекоммуникаций, различные радиотехнические системы и измерительная техника. Очень важными характеристиками такой аппаратуры является динамический диапазон, простота реализации и быстродействие. Средства АЦП постоянно совершенствуются, что ведет к увеличению быстродействия преобразователей и полосы частот преобразуемых сигналов, увеличению динамического диапазона, чувствительности и точности АЦП. Значительный интерес к быстродействию АЦП с большим динамическим диапазоном объясняется тем, что в подавляющем большинстве телекоммуникационных и радиотехнических систем всё чаще применяются схемы прямого преобразования сигнала без промежуточного преобразования частоты. Также получили свое развитие и широкополосные приложения. Основным требованием в этих приложениях является высокая чувствительность и широкий динамический диапазон преобразователя для одновременной регистрации сильных и слабых сигналов. В настоящей работе проведен сравнительный анализ основных видов АЦП, предложенных на рынке, с целью выявления наиболее оптимального метода их построения для использования в современной аппаратуре.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, быстродействие, динамический диапазон, чувствительность, широкополосность, аналоговый сигнал, цифровой сигнал, системы телекоммуникации

* Статья получена 07 октября 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В наше время цифровая обработка сигналов практически полностью проникла в такие области применения, как средства связи и телекоммуникаций, различные радиотехнические системы и измерительная техника. Ключевым превосходством цифровых средств сбора и обработки данных в сравнении с аналоговыми является возможность создания в рамках единственной аппаратной платформы набора устройств, позволяющих изменять выполняемые функции путем обновления программного обеспечения. Но из-за того, что физические явления имеют аналоговый характер, одной из важнейших и неотъемлемых задач современной цифровой техники является преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму. Именно поэтому развитие и увеличение областей использования цифровых систем обработки сигналов невозможно без развития систем аналого-цифрового преобразования [1].

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал). Базовым элементом любого АЦП является аналоговый компаратор.

Аналоговый компаратор – электронная схема, которая сравнивает два напряжения и формирует цифровой сигнал, показывающий, какой из них имеет большее значение. Аналоговый компаратор имеет в своем составе два входа и один выход, которые можно условно обозначить как U_+ , U_- и U_0 соответственно.

Напряжение U_{REF} называют опорным. Иллюстрация работы аналогового компаратора представлена на рис. 1.

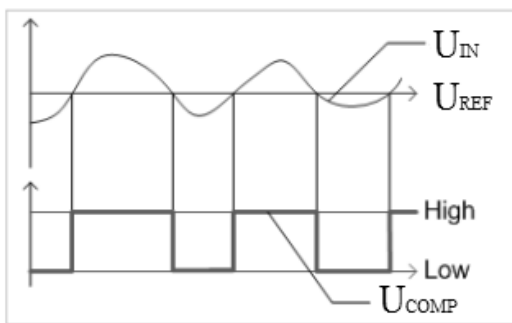


Рис. 1. Работа аналогового компаратора

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае микросхему АЦП можно представить в виде блока (рис. 2), в состав которого входит один аналоговый вход, один или два входа для подачи опорного (образцового) напряжения, а также цифровые выходы для выдачи кода, соответствующего текущему значению аналогового сигнала.

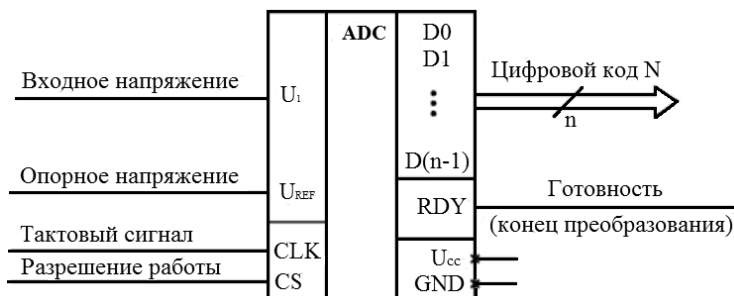


Рис. 2. Микросхема АЦП

Часто микросхема АЦП имеет также вход для подачи тактового сигнала CLK , сигнал разрешения работы CS и сигнал, указывающий о готовности выходного цифрового кода RDY . На микросхему подается одно или два питающих напряжения и общий провод. В общем и целом микросхемы АЦП сложнее, чем микросхемы ЦАП, их разновидностей заметно больше, по этой причине сформулировать для них общие принципы применения сложнее. Опорное напряжение АЦП определяет диапазон входного напряжения, в котором производится преобразование. Оно может быть как постоянным, так и допускать изменение в некоторых пределах. Иногда предусматривается подача на АЦП двух опорных напряжений с разными знаками, тогда АЦП способен работать как с положительными, так и с отрицательными входными напряжениями.

Выходной цифровой код N (n -разрядный) однозначно соответствует уровню входного напряжения. Код может принимать $2n$ значений, т. е. АЦП может различать $2n$ уровней входного напряжения. Количество разрядов выходного кода n является важнейшей характеристикой АЦП. По наступлению готовности выходного кода выдается сигнал окончания преобразования RDY , по которому внешнее устройство может читать код N .

Управляется работа АЦП тактовым сигналом CLK , который задает частоту преобразования, то есть частоту выдачи выходных кодов. Максимальная тактовая частота – второй важнейший параметр АЦП. В ряде микросхем присутствует встроенный генератор тактовых сигналов, поэтому к их выводам подключается кварцевый генератор или конденсатор, который задает частоту преобразования. Сигнал CS разрешает работу микросхемы.

Выпускается огромное множество самых различных АЦП, которые отличаются скоростью работы (частота преобразования от сотен килогерц до сотен мегагерц), разрядностью (от 6 до 24), допустимыми диапазонами входного сигнала, величинами погрешностей, уровнями питающих напряжений, методами выдачи выходного кода (параллельный или последовательный), другими параметрами.

Обычно микросхемы с большим количеством разрядов имеют невысокое быстродействие, а наиболее быстродействующие микросхемы имеют небольшое число разрядов. Область применения любой микросхемы АЦП во многом определяется использованным в ней принципом преобразования, поэтому необходимо знать особенности этих принципов. Для выбора и использования АЦП необходимо пользоваться подробными справочными данными от фирмы-производителя.

В качестве базового элемента любого АЦП используется компаратор напряжения, который сравнивает два входных аналоговых напряжения и в зависимости от результата сравнения выдает выходной цифровой сигнал – нуль или единицу. Компаратор работает с большим диапазоном входных напряжений и имеет высокое быстродействие [2].

2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЦП

Структурная схема АЦП параллельного типа показана на рис. 3. В данной схеме используются логарифмические и антилогарифмические усилители. Схема обеспечивает логарифмирование входных сигналов X и Y с их последующим суммированием и потенцированием (антилогарифмированием) этой суммы. В результате по законам логарифмирования получается сигнал, пропорциональный произведению двух входных сигналов [3].

В большинстве высокоскоростных осциллографов и некоторых высокочастотных измерительных приборах используют параллельные АЦП из-за того, что они могут обеспечить высокую скорость преобразования сигналов. Зачастую параллельные АЦП имеют разрешение до восьми разрядов, но встречаются также и 10-разрядные версии.

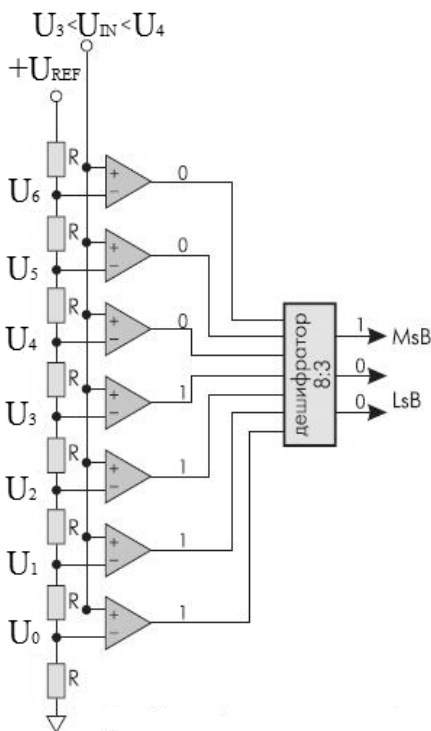


Рис. 3. АЦП параллельного преобразования

На рис. 3 изображена упрощенная блок-схема трехразрядного параллельного АЦП. Здесь используется массив компараторов, каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным напряжением. Такое опорное напряжение для каждого компаратора формируется на встроенном прецизионном резистивном делителе. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда (*LSB*), и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным $U_{REF} / 2^3$. В результате для трехразрядного АЦП требуется $(2^3 - 1)$ или семь компараторов. А, например, для восьмиразрядного параллельного АЦП потребуется уже 255 (или $(2^8 - 1)$) компараторов.

С увеличением входного напряжения компараторы последовательно устанавливают свои выходы в логическую единицу вместо логического ну-

ля, начиная с компаратора, отвечающего за младший значащий разряд. Можно представить преобразователь как ртутный термометр: с ростом температуры столбик ртути поднимается. На рис. 3 входное напряжение находится в интервале между U_3 и U_4 . Таким образом, 4 нижних компаратора имеют на выходе «1», а верхние три компаратора – «0». Дешифратор преобразует $(2^3 - 1)$ -разрядное цифровое слово с выходов компараторов в двоичный трехразрядный код.

Параллельные АЦП – достаточно быстрые устройства, но они имеют свои недостатки. Из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность, и их нецелесообразно использовать в приложениях с батарейным питанием [4].

Громоздкость структуры параллельного АЦП приводит к тому, что в некоторых АЦП применяется смешанный параллельно-последовательный принцип. Это несколько снижает быстродействие подобного АЦП по сравнению с обычным параллельным АЦП, но зато позволяет получить большое число разрядов, не увеличивая количество компараторов до $(2^n - 1)$.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ АЦП

Когда требуется получить разрешение 12, 14 или 16 разрядов и отсутствует необходимость в высокой скорости преобразования, а ключевыми факторами являются низкая цена и небольшое энергопотребление, то в таких случаях применяют АЦП последовательного типа (рис. 4). Этот тип АЦП больше всего можно встретить в различных измерительных приборах и системах сбора данных. На данный момент АЦП последовательного типа имеют возможность измерять напряжение с точностью до 16 разрядов с частотой дискретизации от 1×10^3 отсчетов в секунду до 1×10^6 отсчетов в секунду.

В последовательном АЦП входное напряжение последовательно сравнивается одним единственным компаратором с несколькими эталонными уровнями напряжения, и в зависимости от результатов сравнения формируется выходной код. На один вход компаратора подается входное напряжение, а на другой вход – эталонное напряжение, ступенчато изменяющееся во времени. Выходной сигнал компаратора подается на вход регистра последовательных приближений, тактируемого внешним тактовым сигналом. Выходной код регистра последовательных приближений поступает на ЦАП, который из опорного напряжения формирует изменяющееся эталонное напряжение.

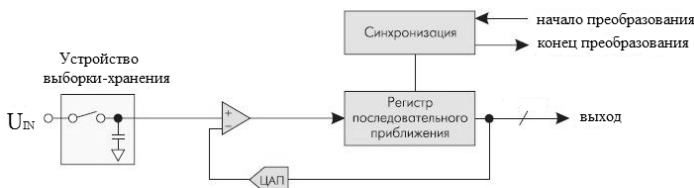


Рис. 4. АЦП последовательного типа

Работа АЦП последовательного приближения имеет особенность, связанную с переходными процессами во внутреннем ЦАП. В теории напряжение на выходе ЦАП для каждого из N внутренних тактов преобразования должно устанавливаться за одинаковый промежуток времени. На самом деле этот промежуток в первых тактах значительно больше, чем в последних. Поэтому время преобразования 16-разрядного АЦП последовательного приближения более, чем в два раза превышает время преобразования восьмиразрядного АЦП данного типа [5].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

С учетом вышеизложенного была смоделирована схема АЦП параллельного типа (рис. 5). Схема АЦП содержит в себе 8 одинаковых резисторов и резистивный делитель, который делит опорное напряжение на 7 уровней. Выходные сигналы компараторов с помощью шифратора преобразуются в трехразрядный двоичный код и подаются на индикатор.

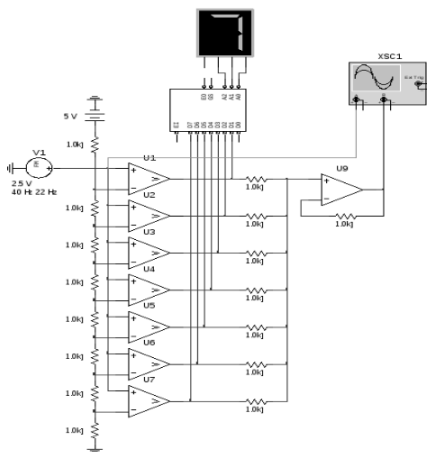


Рис. 5. Параллельный трехразрядный АЦП

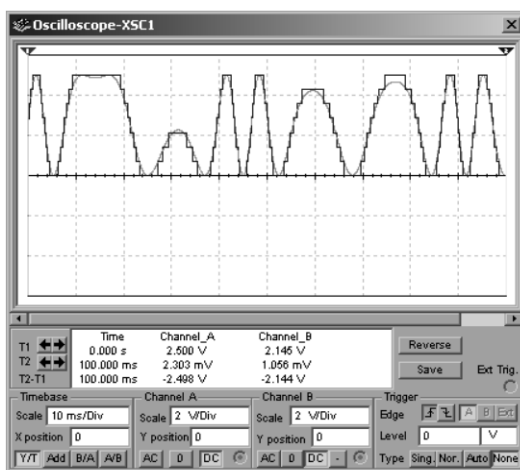


Рис. 6. Сигнал, снятый перед делителем (ломаная линия) и суммарный сигнал после прохождения компараторов (сплошная линия)

Данный тип АЦП отличается быстродействием, но для этого требуется большое число компараторов. Рассмотрим АЦП последовательного типа (рис. 7).

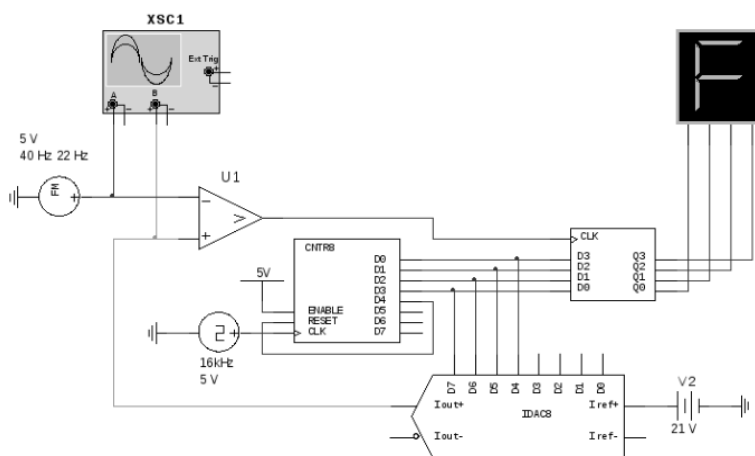


Рис. 7. Последовательный четырехбитный АЦП

На один из входов компаратора подается входное напряжение, на другой – выходное напряжение ЦАП. В самом начале работы счетчик принимает нулевое состояние, при этом выходное напряжение ЦАП равно нулю, а выходное напряжение компаратора принимает состояние «1». В момент подачи импульса на вход *CLK* счетчик начинает считывать импульсы, приходящие с генератора тактовых импульсов. Выходное напряжение ЦАП при этом линейно возрастает, пока не достигнет значения входного. При этом компаратор переходит в состояние логического нуля и счет импульсов останавливается. Установившееся число на выходе счетчика является пропорциональным напряжению на входе цифровым кодом. Далее процесс повторяется.

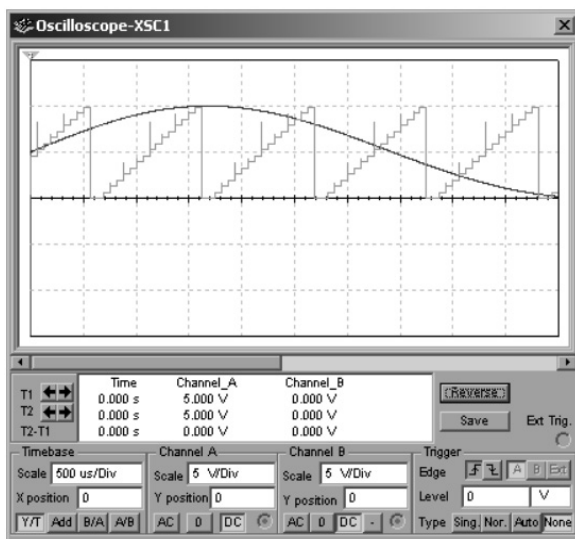


Рис. 8. Входное напряжение (сплошная линия) и линейно возрастающее напряжение на выходе ЦАП (ломаная линия)

Последовательные АЦП имеют низкое быстродействие. Из достоинств можно отметить сравнительную простоту реализации устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе описаны основные методы построения АЦП и проведен их сравнительный анализ. В ходе сравнения было выявлено, что АЦП параллельного типа лучше подходят для использования в современной аппа-

ратуре, нежели последовательные, в силу своего быстрогодействия. К преимуществам последовательных АЦП можно отнести достаточно простую реализацию в интегральном исполнении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: пер. с англ. – Изд. 2-е. – М.: БИНОМ, 2014. – 704 с.
2. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. В 2 т. Т. 1. – М.: Додэка, 2008. – 827 с.
3. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. В 2 т. Т. 2. – М.: Додэка, 2008. – 941 с.
4. Справочник по нелинейным схемам: Проектирование устройств на базе аналоговых функциональных модулей и интегральных схем: справочник / под ред. Д.Х. Шейнголда. – М.: Мир, 1977. – 529 с.
5. *Борисенко А.Л.* Схемотехника аналоговых электронных устройств. Функциональные узлы: учебное пособие для вузов. – М.: Юрайт, 2019. – 126 с.
6. *Якубовский С.В.* Аналоговые и цифровые интегральные схемы: справочник. – М.: Советское радио, 2008. – 336 с.
7. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: справочник / И.В. Новаченко, В.М. Петухов, И.П. Блудов, А.В. Юровский. – М.: Радио и связь, 1989. – 383 с.
8. *Волович Г.И.* Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 530 с.
9. *Павлов В.Н.* Схемотехника аналоговых электронных устройств. – М.: Академия, 2008. – 288 с.

Ульяшин Александр Федорович, магистрант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы обработки сигналов, измерительные устройства. Имеет 3 научные публикации. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

Величко Александр Андреевич, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – системы обработки сигналов, измерительные устройства. Имеет более 50 научных публикаций. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49

Comparative analysis of methods for constructing analog-to-digital converters*

A.F. Ulyashin¹, A.A. Velichko²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student of the department of semiconductor devices and microelectronics. E-mail: ulyashin_2018@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Professor of the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics. E-mail: Velichko@amber.ref.nstu.ru

This paper is devoted to the comparative analysis of modern integrated analog-to-digital converters (ADCs). At the moment, a number of foreign companies, such as Analog Devices, Texas Instruments and Microchip, produce ADCs in integrated design. Each manufacturer uses its own method of implementing the device. The main task of such devices is to convert voltage to binary code. ADCs are used wherever it is necessary to receive an analog signal and process it in digital form. Examples include applications such as communications and telecommunications, various radio systems, and measurement technology. Very important characteristics of such equipment are dynamic range, ease of implementation and speed. The means of analog-to-digital conversion are constantly being improved, which leads to an increase in the speed of the converters and the frequency band of the converted signals, an increase in the dynamic range, sensitivity and accuracy of the ADC. Significant interest in high-speed ADCs with a large dynamic range is explained by the fact that in the vast majority of telecommunications and radio engineering systems, direct signal conversion schemes without intermediate frequency conversion are increasingly used. Broadband applications have also been developed. The main requirement in these applications is the high sensitivity and wide dynamic range of the transducer for simultaneous detection of strong and weak signals. In this paper, a comparative analysis of the main types of analog-to-digital converters offered on the market is carried out in order to identify the most optimal construction method for using it in modern equipment.

Keywords: analog-to-digital converter, speed, dynamic range, sensitivity, broadband, analog signal, digital signal, telecommunication systems

REFERENCES

1. Horowitz P., Hill U. *The art of electronics*. 2nd ed. New York, Cambridge University Press, 1998 (Russ. ed.: Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki*. 2nd ed. Moscow, BINOM Publ., 2014. 704 p.).
2. Tittse U., Schenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*. V 2 t. T. 1 [Semiconductor circuitry. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Dodeka Publ., 2008. 827 p. (In Russian).

* Received 07 October 2020.

3. Tittse U., Schenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika*. V 2 t. T. 2 [Semiconductor circuitry. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Dodeka Publ., 2008. 941 p. (In Russian).
4. Sheingold D.H., ed. *Nonlinear circuits handbook: designing with analog function modules and IC's*. Norwood, MA, Analog Devices, inc., 1976 (Russ. ed.: *Proektirovanie ustroystv na baze analogovykh funktsional'nykh modulei i integral'nykh skhem: spravochnik*. Ed. by D.Kh. Sheingold. Moscow, Mir Publ., 1977. 529 p.).
5. Borisenko A.L. *Skhemotekhnika analogovykh elektronnykh ustroystv. Funktsional'nye uzly* [Circuitry of analog electronic devices. Functional nodes: a textbook for universities]. Moscow, Yurait Publ., 2019. 126 p.
6. Yakubovskii S.V. *Analogovye i tsifrovye integral'nye skhemy* [Analog and digital integrated circuits]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 2008. 336 p.
7. Novachenko I.V., Petukhov V.M., Bludov I.P., Yurovskii A.V. *Mikroskhemy dlya bytovoi radioapparatury* [Microchips for household radio equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 383 p.
8. Volovich G.I. *Skhemotekhnika analogovykh i analogo-tsifrovyykh elektronnykh ustroystv* [Circuitry of analog and analog-digital electronic devices]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2005. 530 p.
9. Pavlov V.N. *Skhemotekhnika analogovykh elektronnykh ustroystv* [Circuitry of analog electronic devices]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 288 p.

Для цитирования:

Уляшин А.Ф., Величко А.А. Сравнительный анализ методов построения аналого-цифровых преобразователей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 4 (99). – С. 38–49. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49.

For citation:

Ulyashin A.F., Velichko A.A. Sravnitel'nyi analiz metodov postroeniya analogo-tsifrovyykh preobrazovatelei [Comparative analysis of methods for constructing analog-to-digital]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (99), pp. 38–49. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-4-38-49.