

1. Ковель, А.А. Математическое планирование эксперимента при отработке электронных элементов / А.А. Ковель, С.В. Покидько // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2008. – Т. 52. – №8. – С. 13-17.
2. Pavlova, O. Optimisation of conditions for deacetylation of chitin-containing raw materials / O. Pavlova, M. Trusova // Food science and technology. – 2021. – Vol. 15, № 3. – P. 63–70.
3. Ловкис, З.В. Эффективность использования хитозана как сорбента и стабилизатора в технологии пива/ З. В. Ловкис, О.В. Павлова, М.М. Трусова, Н.А. Политаева // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2023. – Т. 105. – № 3. – С. 102-113.
4. Бугаев, Ю.В. О статистической устойчивости оптимального решения, найденного по уравнению регрессии / Ю.В. Бугаев, Л.А. Коробова, И.Ю. Шурупова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2024. – 86(2). – С. 48-55.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Малуха З.А., Шихова У.А., Павлов Г.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь (Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники)

**Аннотация.** Рассматриваются особенности видов цифро-аналоговых преобразователей, описывается сравнительная характеристика данных видов. Обосновывается эффективность выбора ЦАП при определенных решаемых задачах.

**Ключевые слова:** цифро-аналоговый преобразователь, линейная архитектура, параллельная архитектура, hi-end, аудио.

В качестве источников цифрового сигнала могут выступать смартфон, компьютер и другие устройства. К примеру, из стриммингового сервиса получается аудиофайл. Для воспроизведения этой информации используются мультимедийные приложения, которые, в свою очередь, обращаются к драйверам операционной системы, отвечающим за непосредственно воспроизведения звукового потока, этими драйверами и является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). ЦАП – это электронное устройство, которое преобразует цифровые данные (например, MP3-файлы, потоковое аудио или CD-записи) в аналоговый сигнал, который может быть воспроизведен на колонках или наушниках [1].

Целью данного исследования является сравнение технических параметров различных видов ЦАП.

В настоящий момент существует два вида ЦАП по способу обработки: параллельные и последовательные. Параллельные ЦАП принимают все биты цифрового кода одновременно (параллельно), при этом каждый бит управляет своим собственным ключом или элементом в схеме преобразования. Например, в ЦАП с резистивной матрицей ( $R$ - $2R$  или с весовой матрицей) каждый бит управляет подключением соответствующего резистора к опорному напряжению или к земле. Данный вид отличается высокой скоростью преобразования и простотой управления, при этом этот вид сложен в производстве – соответственно дороже, так же они больше по размерам. На рисунке 1 приведена схема параллельного суммирования токов ЦАП [2].

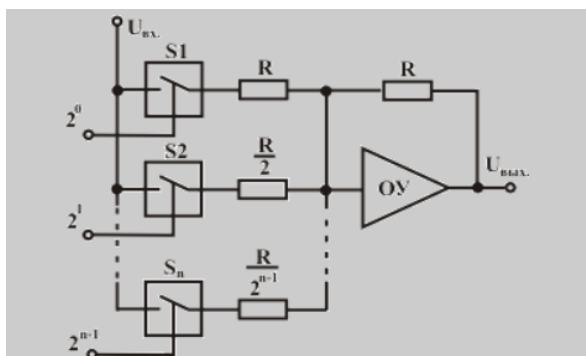


Рисунок 1 – параллельная схема суммирования токов ЦАП

Последовательные ЦАП принимают цифровой код по одному биту за раз (последовательно). Данные передаются по одному или нескольким линиям последовательной связи (например, SPI, I2C).

Внутри ЦАП данные сдвигаются в сдвиговый регистр, и после получения всех битов происходит преобразование в аналоговый сигнал. Данный вид выделяется простотой производства, но при этом обладает сложной логикой управления и более низкой скоростью преобразования. На рисунке 2 приведена структура последовательной схемы суммирования токов [2].

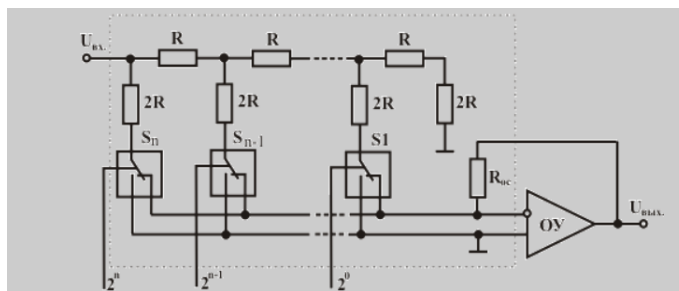


Рисунок 2 – последовательная схема суммирования токов ЦАП

К техническим характеристикам ЦАП относятся:

- Коэффициент гармонических искажений и шум (THD+N) – мера искажений, вносимых ЦАП в сигнал в виде гармоник, выражается в процентах. Чем выше значение сигнал/шум, тем более чистый звук.
- Выходной импеданс – это эффективное сопротивление, которое ЦАП представляет для подключенной к нему нагрузки. Для качественной передачи сигнала необходимо, чтобы выходной импеданс ЦАП был значительно меньше, чем входной импеданс нагрузки.
- Частота дискретизации (PCM) – параметр, который определяет, сколько раз в секунду измеряется аналоговый сигнал для преобразования в цифровой код. Измеряется в Гц, чем выше данный параметр, тем точнее воспроизводится сигнал.
- Отношение сигнал/шум (SNR) – отношение мощности полезного сигнала к мощности шума. Измеряется в дБ, чем выше данное значение, тем меньше паразитических шумов и соответственно чище звучание.

Для сравнительного анализа, согласно выделенным характеристикам, были взяты ЦАП из низкого ценового диапазона: ESS Sabre ES9038Q2M с параллельной архитектурой управления и ЦАП Cirrus Logic CS43131 с последовательной системой управления (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика ЦАП

| Название параметра |              |                  |
|--------------------|--------------|------------------|
| Тип архитектуры    | Параллельная | Последовательная |
| Разрядность        | 32-бит       | 32-бит           |
|                    | 120 дБ       | 115 дБ           |
|                    | 132 дБ       | 130 дБ           |
|                    | 768 кГц      | 384 кГц          |

Таким образом, сигнал ЦАП Sabre более чистый и точный за счет большей частоты дискретизации, чем у Cirrus Logic. Данное сравнение наглядно показывает преимущество ЦАП с параллельной архитектурой перед последовательной. Последовательная архитектура раньше применялась в бюджетных устройствах, в данный момент на рынке преобладает параллельная архитектура из-за ее улучшенных показателей.

В данный момент флагманские модели ЦАП приблизились к своему максимуму по качеству обработки сигнала, так называемому hi-end (обозначение высочайшего класса аудио) уровню, так, например цап Mutec ESS9038PRO является одним из лучших решений на данный момент, по качеству сигнала он приближен к идеалу. На рисунке 3 изображена микросхема ЦАП.

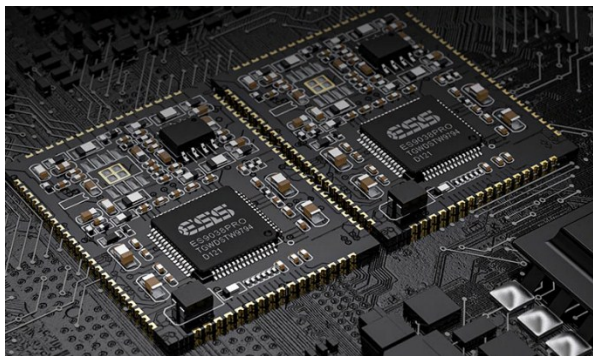


Рис 3 – изображение микросхемы ЦАП

Главной проблемой современных hi-end ЦАП является их дороговизна производства, для удешевления этого сегмента в данный момент идут разработки применения связки ЦАП и искусственный интеллект для улучшения качества аудио. В перспективе ИИ может значительно удешевить столь дорогой hi-end сегмент. ЦАП является неотъемлемым микросхемой в современности. В заключении можно утверждать, что применение искусственного интеллекта с ЦАП является перспективным решением, которое может позволить удешевить hi end сегмент.

В настоящий момент ЦАП получили широкое распространение в современной электронике. ЦАП с параллельной архитектурой применяют в сферах, где требуется высокое качество и скорость преобразования (например, профессиональное аудио, измерения), а последовательная архитектура применяется в энергоэффективных и массовых устройствах, в которых важна низкая стоимость.

**Список использованных источников:**

1. Цифро-аналоговый преобразователь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифро-аналоговый\\_преобразователь](https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифро-аналоговый_преобразователь)
2. Цифро-аналоговые преобразователи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://m-elek.h1n.ru/elektronic/teorie/dt/cap.html>