

УДК 78.02:681.82.073

DOI: <https://doi.org/10.34064/khnum1-79.14>**Воронцов Сергій Олександрович**

Харківський національний університет мистецтв імені І. П. Котляревського,
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
кафедра композиції та інструментування
e-mail: vorontsov@num.kharkiv.ua; ORCID iD: 0000-0002-9396-0726

Бондаренко Марія Василівна

Харківський національний університет мистецтв імені І. П. Котляревського,
кандидат мистецтвознавства, доцент,
кафедра спеціального фортепіано
e-mail: mariya.bondarenko@num.kharkiv.ua; ORCID iD: 0000-0001-5193-2535

**Концепції цифрового звукозапису
та компроміси між швидкістю й точністю**

У статті розглядається важливий технологічний етап процесу програвання високоякісних музичних записів із цифрових носіїв, на якому власне здійснюється перехід від цифрового коду, що міститься у комп'ютерних файлах (WAV або FLAC), які зберігаються на жорстких дисках, оптичних дисках, у накопичувачах мобільних пристроїв, мережових сховищах даних (NAS), на стрімінгових сервісах тощо, до коливань електричної напруги, що створюють звукові хвилі у просторі, де відбувається прослуховування музики. Цей перехід від цифрового аудіо до аналогового сигналу завжди відбувається за допомогою пристрою, що має назву ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач. Розглядаються дві базові концепції побудови ЦАПів, а саме – сходова архітектура R2R старої школи проти новітньої сигма-дельта модуляції і передискретизації (Delta-Sigma DAC), що використовується для перетворення цифрових даних із більшою глибиною квантування (16–24 біт) у високошвидкісний одинітний потік. Висвітлено переваги кожної концепції в плані достовірності звучання, а також, чому відтворювані записи можуть при програванні звучати по-різному.

© Видавець ХНУМ імені І. П. Котляревського, 2026.



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-SA 4.0.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ключові слова: *цифрове аудіо; музичні звукозаписи; цифро-аналоговий перетворювач; R2R DAC; сходово-структура; сигма-дельта модуляція.*

Постановка проблеми.

У сучасному світі музика як вид мистецтва не може обходитися без цифрових технологій запису та відтворення звуку. Незалежно від того, яким жанрам віддають перевагу ті чи інші групи слухачів, фактично всюди відтворення музики відбувається виключно із цифрових носіїв. Раніше, у часи, коли люди слухали грамофонні платівки, зрозуміти, як саме відбувається звукозапис і програвання музики, було доволі нескладно. Тоді весь процес зводився до того, щоби механічним способом (через коливання мембрани та сполученої з нею голки-різака) перенести коливання повітря (що мають силу, амплітуду, частоту), які були спричинені звуковими хвилями, що лунали під час виконання музичного твору, на якийсь матеріальний носій, наприклад платівку (створюючи на ній відповідні нерівності у вигляді безперервної спіральної канавки-доріжки), де отриманий механічний профіль звукових хвиль міг зберігатися протягом тривалого часу, а потім, при програванні, записані коливання за допомогою голки зчитувалися з поверхні платівки при її обертанні на програвачі – грамофоні чи патефоні. Навіть після того, як у процес звукозапису було додано етап перетворення механічних коливань на коливання електричної напруги (в мембрані мікрофона), що привело до суттєвого поліпшення якості звучання, технологія програвання музики залишалася цілком зрозумілою, бо зберігалася концепція «аналогічності», тобто незмінності самої форми звукових коливань, притаманних тому чи іншому музичному твору. Пізніше такий процес фіксації звуку, коли безперервні коливання звукових хвиль або електричної напруги зберігаються незмінними на фізичних носіях, таких як вініл або магнітна стрічка, отримав назву «аналоговий звукозапис».

Сприйняття музики слухачами виявляється залежним від достовірності звучання та складності жанру музичного твору. Особливо це стосується класичної музики. Водночас музикантові доволі часто

буває складно зрозуміти природу цифрового звукозапису, особливо той його момент, де відбувається перехід від аналогового простору в домен, де панує цифровий код, і згодом повернення назад, від цифри на аналогові терени, де все більш-менш зрозуміле, тому що звуковий сигнал повертається в аналогову форму. Ми намагатимемося в простих і наочних термінах пояснити суть трансформації, що відбувається при відновленні тієї самої форми коливань аналогового сигналу, яка була зафіксована під час запису виконання музичного твору, базуючись на даних, що містяться у двійковому коді комп'ютерних файлів найбільш поширених форматів – WAV, FLAC, APE або інших, таких як DSD (Direct Stream Digital), включаючи DSF, DFF та SACD ISO, що також є некомпресованими і, відповідно, зберігають дуже високу якість музичного звучання.

Цифровий файл як «рецепт», згідно з яким відтворюється звучання музичної композиції, має в собі абсолютно все, у ньому є кожна нота, кожна емоція, кожна найменша подробиця звуковидобування, як-то шелест каніфолі смичка скрипки, звук дихання виконавця через тростину кларнета або саксофона, турбулентність повітряного потоку, що утворюється на дульці флейти, багатство обертонів рояля, де основна нота супроводжується каскадом високочастотних коливань; тому доволі часто звуки інструментів описують як такі, що мають колір, тепло, сріблясту забарвленість і багато чого іншого. Але ось у чому справа – спосіб, у який цифровий «рецепт» перетворюється на аналоговий звук, може суттєво змінити сприйняття музичного твору слухачами. Є доволі поширене англійське висловлювання – “Laws are like sausages. It is best not to see them being made”, що перекладається так: «Закони як ковбаски, і краще не бачити, як їх створюють».

А втім, у зв'язку зі стрімким прогресом у виробництві сучасної апаратури для прослуховування музики, що має місце особливо в останні роки, виникає нагальна необхідність уважно подивитися на ту «кухню», де відбувається відбудова аналогового сигналу відповідно до цифрового «рецепту». Виявляється, при використанні однакових інгредієнтів існує принаймні більше ніж один спосіб виготовлення

того сигналу, що є нічим іншим, як залежністю амплітуди електричної напруги від часу, і який після підсилення спричиняє коливання дифузора гучномовців. Загалом це будівництво починається всередині пристрою, який має назву ЦАП, тобто цифро-аналоговий перетворювач. Відповідно, «усередині» того ЦАПа існують два дуже різні підходи – як дві різні філософії – для того, щоб перетворювати сукупності цифр на музику. Перший – це підхід старої школи з використанням прецизійного обладнання (що має шалену точність), а другий – навпаки – покладається на надзвичайну швидкість і дуже складний математичний апарат для того, щоб отримати той самий результат. Обидва підходи можуть забезпечити неймовірно якісне звучання і також демонструвати феноменальні характеристики, що вимірюються за допомогою найсучасніших приладів об'єктивного контролю.

Останні дослідження і публікації за темою. Еволюція і вдосконалення пристроїв цифро-аналогового перетворення значно пришвидшилися після появи аудіо компакт-дисків (Audio CD) у 1983 році. Наприкінці минулого століття технологія компанії *PS Audio Ultralink* була, напевно, найкращою і найбільш досконалою, тому що забезпечувала можливість обробляти до 20 бітів одночасно. Це було видатним досягненням, бо типові ЦАП на той час були спроможні ефективно обробляти тільки 16 бітів, і навіть якщо використовувалися певні додаткові трюки, як це робили в компанії *Ultralink*, це дозволяло обробляти 18 бітів або, в окремих випадках, 20, але аж ніяк не 24 біти, а тим більше було неможливо дістатися до 32 бітів.

Традиційно ЦАП базуються на використанні технології PCM¹ – імпульсно-кодової модуляції (див. Linear Pulse Code Modulated Audio,

¹ PCM (Pulse Code Modulation) – це метод цифрового кодування аудіо, який використовується для запису, передачі і відтворення аналогових аудіосигналів. Це процес вимірювання амплітуди звукового сигналу через певні малі часові відрізки (дискретизація), округлення отриманих значень його рівнів (квантування) та їх цифровий запис у двійковому коді (оцифрування). Тобто звуковий сигнал розподіляється на малі оцифровані аудіофрагменти (семпли), кожен з яких закодований відповідними числовими значеннями. PCM є основою для багатьох цифрових аудіоформатів,

2024), у якій діапазон частот дискретизації становить 44,1–192kHz, і для збереження повноти звучання глибина квантування повинна бути 16 або 24 біти. ЦАП, що працюють з 1-бітними потоками даних DSD / Direct Stream Digital (докладніше див.: *(Що таке аудіо формат DSD?*, 2002–2026) і частотами дискретизації 2.8224 MHz – DSD64 (Standard) або 5.6448 MHz – DSD128, з'явилися значно пізніше, але, маючи на увазі, що швидкість потоку бітів аудіо, тобто аудіо бітрейт², тут також залишається на достатньо високому рівні, то це забезпечує найкращу якість звучання музичних записів.

Подальший розвиток цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) здійснювався переважно спеціалізованими виробниками напівпровідників та високоякісними аудіоінженерними фірмами: було оптимізовано межі частот дискретизації, рівнів шуму та архітектурний дизайн (Tuijl, Homberg, Reefman, Bastiaansen, & Dussen, 2004). Утім провідні аудіофільські бренди і спеціалізовані виробники зазвичай не використовують готові мікросхеми (SW1X Audio Design, 2025), розробляючи власні, користувацькі, архітектури для досягнення меншого спотворення та бездоганної синхронізації сигналу.

24-бітні цифро-аналогові перетворювачі з частотою дискретизації 192 кГц вже досягають динамічного діапазону 120 дБ. Були розроблені та використовуються 5-бітні архітектури обробки найвищих бітів для побудови ЦАП, що оптимізовані для високоякісного споживчого аудіо (Fujimori, Nogi, & Sugimoto, 2000).

таких як WAV, AIFF, FLAC, забезпечуючи високу якість звуку без спотворень. Ця технологія широко використовується в різних областях, включаючи продукування музики, радіомовлення та аудіозапис.

² Вимірюється в кілобітах за секунду (кбіт/с) і визначає обсяг даних, що обробляються за секунду, безпосередньо впливаючи на якість аудіо та розмір файлу. Стандартний аудіо бітрейт для компакт-диска – 1411 кбіт/с. Висока роздільна здатність (High-Res Audio), що має місце для аудіо високої чіткості, наприклад, 24-біт/96 кГц або 24-біт/192 кГц, використовує набагато вищий бітрейт, який може сягати 9216 кбіт/с і вище.

Слід мати на увазі, що аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі стали важливими схемами, які широко використовуються не тільки для звукозапису музики, але й у різних галузях промисловості, зв'язку, енергетики тощо, та визнані перспективним предметом досліджень у галузі електронної інженерії (Chan, Rakuljic, & Galton, 2008), (Jiale He, Xingchen Tian, Hansen Wei, et. al., 2023).

Утім нас цікавлять насамперед ЦАП, які використовуються у звуковідтворенні, і на цю тему існують доволі цікаві огляди споживчих цифро-аналогових перетворювачів у ціновому діапазоні від найдешевших (кілька доларів США), розміром трохи більших за коробочку від сірників, до якісних пристроїв, які задовольняють навіть вибагливих аудіофілів (Fletcher, 2020).

Мета статті – привернути увагу широкої аудиторії до певних технологічних аспектів цифрового звукозапису музичних творів, які зумовлюють достовірність звучання і повноту їх сприйняття слухачами в різних жанрах класичної і сучасної музики.

Новизна й практична цінність дослідження. Чи не кожний сучасний гаджет, створений для задоволення різних потреб споживача, має у своєму складі ЦАП, а у пристроях для звукозапису та звуковідтворення, з якими так чи інакше працює сьогодні кожний музикант, наявність цифро-аналогових перетворювачів є об'єктивною реальністю, якої неможливо уникнути. Водночас принципи функціонування цифрового звуковідтворювального обладнання зазвичай лишаються «*terra incognita*» для більшості музичної спільноти, хоча їх розуміння є вкрай необхідним, наприклад, сучасному звукорежисерові або композиторові – творцеві нових електронних звучань, як, утім, і музикознавцеві, що вдається до аналізу новітньої музики. У силу специфіки своєї освіти науковці-музикознавці у своїх працях й досі майже не звертаються до подібної тематики, тоді як навантажені професійною термінологією пояснення спеціалістів – звукоінженерів-дослідників – потребують таких самих поглиблених спеціальних знань і від своїх реципієнтів. Отже, тематика й спрямованість цієї статті мають *безперечну новизну для читача-музиканта*, а отримані ним нові знання

можуть бути застосовані в практиці звукорежисури, музичної композиції, музикознавчих та музично-акустичних досліджень.

Методологія дослідження. Авторами статті обраний комплексний міждисциплінарний дослідницький підхід: загальнонаукові методи аналізу та порівняння (аналогового та цифрового принципів звукозапису, двох основних концепцій побудови ЦАП, $R2R$ та сигма-дельта модуляції та передискретизації, *Delta-Sigma DAC*), експерименту (прослуховування запису музичного твору) та узагальнення (формування висновків) застосовано до специфічного матеріалу сучасних досліджень у сфері цифрової звукоінженерії з її фізико-математичним наповненням (аналіз принципів роботи ЦАП).

Виклад основного матеріалу дослідження.

Ще раз зазначимо, що цифрові музичні файли – це не звук, вони є наборами даних, довгими і складними рядками й послідовностями цифр «0» і «1». Для того, щоби перетворити ці величезні, мовчазні послідовності на безперервний електричний сигнал, який може потім стати звуком, саме і потрібен ЦАП (англійською DAC, тобто Digital-to-Analog-Converter, *Іл. 1*):

Іл. 1. Функція ЦАПа (DAC) у процесі відтворення звуку з цифрового носія.



Тут треба на хвилинку зупинитися й усвідомити, що абсолютна більшість сучасної споживчої електроніки (смартфони та ін.) зазвичай містить якийсь ЦАП, але він є компонентом, про який дбають в останню чергу, тому що пріоритети там зовсім інші, наприклад, чіткість зображення, якість камери, міркування енергозбереження; отже, якість аудіо опиняється лише десь наприкінці списку. У таких пристроях ЦАП, швидше за все, є частиною великих інтегрованих чипів, що призначені не для забезпечення якісного відтворення музичних записів, а для того, щоби мати лише задовільну якість аудіо, проте бути дешевшими й конкурентоспроможнішими порівняно з продукцією інших виробників. Ось чому окремо виділені ЦАП, сфокусовані на забезпеченні якості аудіовідтворення, які є наріжним каменем цифрових систем класу High-End³.

Розглянемо, як відбувається відтворення аудіосигналу, що є залежністю амплітуди електричної напруги від часу, на прикладі ЦАПа традиційної сходової R2R структури. Вхідними даними тут є цифровий код або бітовий потік і, якщо взяти його найменшу частинку, то це є слово довжиною 16 бітів: нагадаємо, що в комп'ютерній техніці довжина слова – це кількість бітів, які обробляються одночасно. Відкидаючи хедери, у яких містяться відомості про те, до чого саме, тобто до якого музичного твору належить цей фрагмент цифрових даних, бачимо, що це слово є не щось інше, як один рівень напруги, лише один з тієї величезної кількості відліків амплітуди сигналу, з яких складається весь музичний твір⁴.

Усвідомлюючи, що 16 бітів – це 2^{16} рівнів сигналу і, відповідно, становить приблизно 65 тисяч можливих значень амплітуди, отримуємо приблизно 90 децибел динамічного діапазону. І цей показник

³ High End (Хай-Енд) – маркетинговий термін, що означає елітну, преміальну аудіо- та відеоапаратуру найвищої якості. Це техніка, створена без компромісів щодо якості звука, компонентів чи матеріалів, орієнтована на вимогливих аудіофілів.

⁴ Нагадаємо, що музичний твір тривалістю, наприклад, 3 хвилини, у записі на CD складається із сукупності 7 928 000 відліків амплітуди сигналу. Ця кількість виходить, якщо помножити частоту дискретизації 44100 на кількість секунд.

береться до уваги при застосуванні схеми, за якою відбувається безперервне вмикання-вимикання напруги, яке рахується по ступенях двійки: 2, 4, 8, 16, 32 тощо. Цей цифровий код потрапляє на сходову структуру перемикачів, яка є не чим іншим, як послідовністю перемикачів типу «увімкнено / вимкнено» поспіль один за одним, загальною кількістю 16. Кожен із цих перемикачів – це резистор, що має якийсь певний опір, але це зовсім не звичайний резистор, а прецизійний резистор. І це є ключем, бо кожен із резисторів повинен бути насправді дуже прецизійним, і ці резистори впорядковані як сходи, бо схема їх підключення нагадує сходи; тобто у цій схемі присутні рядкові перемикачі (рядкові резистори), що утворюють сходову структуру.

Зазвичай це інтегральна схема, тому що, якби будувати її з окремих резисторів, то їхні допуски, які варіюються від одного резистора до іншого, одразу унеможливають використання такої структури для прецизійного перетворення сигналу, який потрапляє на цю структуру у вигляді цифрового коду. Для успішної роботи всієї схеми точність виготовлення резисторів повинна бути просто карколомною. Якщо навіть дуже якісний резистор має точність 1%, то резистори, які утворюють таку сходову структуру, повинні толерувати допуски на рівні $<0,0001\%$, і це ще не все: вони мають поводитися однаково й при змінах температури оточення. Також зрозуміло, що, чим більше бітів потрібно обробляти одночасно, тим більш складним стає завдання перетворення сигналу, бо дуже стрімко зростає потреба мати резистори з допусками, що є абсолютно мізерними, такими, що виходять за межі можливостей сучасних технологій виготовлення мікрочіпів.

Таким чином, кожен із цих перемикачів, залежно від того, що на них потрапляє – 0 чи 1, створюють певний обсяг електричного струму; якщо струм більший, то більшою буде напруга, якщо струм менше, то менше напруга, і ці коливання струму, що відбуваються 44100 разів на секунду (у випадку, коли частота дискретизації становить 44,1 кГц), – це й є те, що утворює аналоговий сигнал, який «виготовляється» відповідно до того, яким був цифровий код музичного твору. Далі використовується вже доволі простий пристрій,

що перетворює коливання струму на коливання напруги. І нарешті! На виході з'являється електрична напруга, яка й є тим сигналом, точнісінько таким, що був зафіксований під час звукозапису музичного твору, який вже можна прослуховувати.

Утім, якщо поставити завдання повторити таку саме маніпуляцію, щоби перетворити на аналоговий сигнал цифровий код розрядністю 24 або 32 біта, то виявляється, що це неможливо. Як сформульовано в назві відомого фільму, «місія нездійснена», бо виходить за межі можливого на практиці, коли найменші похибки в номіналах резисторів, об'єктивне існування яких неможливо ігнорувати, ведуть до того, що при збільшенні кількості «сходинок» (тобто якщо кількість резисторних перемикачів більше 16-ти) починає стрімко накопичуватися загальна похибка перетворювання, і це унеможлиблює роботу всієї сходової схеми.

То що ж робити? Відповідь була надана, щойно на допомогу прийшла так звана сигма-дельта модуляція ($\Sigma\Delta$; або дельта-сигма, $\Delta\Sigma$) (Embedded Staff, 2004; Beis, 2024). Виявляється, це фактично та сама сигма-дельта модуляція, яка використовується при перетворенні DSD (Direct Stream Digital), відомому як процес конвертації 1-бітних аудіо-файлів, таких як DSF, DFF, в інші формати, – зазвичай це PCM формати WAV, FLAC чи апсемплінг в DSD64 або DSD256.

Таким чином, майже всі сучасні ЦАП використовують сигма-дельта модуляцію на кінцевому етапі для того, щоб опрацювати останні один, два або три біти. Ці додаткові сигма-дельта модулятори, з точки зору математики, є суцільним божевіллям, але вони працюють, фактично виконуючи роль перетворення DSD, і воно, у свою чергу, дозволяє потім повернутися до ІКМ, тобто імпульсно-кової модуляції⁵, яка, так би мовити, є більш природною або, принаймні, більш звичною і зрозумілою. Хоча саме наявність закінчення DSD у всіх

⁵ ІКМ, імпульсно-кова модуляція – український переклад аббревіатури PCM (Pulse Code Modulation), про яку йшлося вище (див. примітку 1).

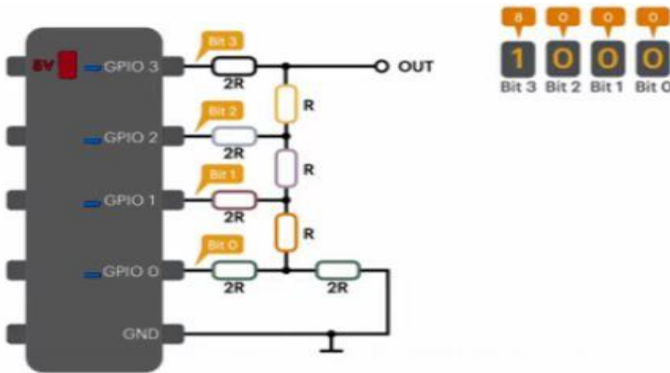
ЦАПх, що використовують ІКМ, можна вважати зайвим етапом перетворення сигналу. Багато дослідників вважають, що DSD ЦАП є кращими, тому що подібний останній (вимушений) крок перетворення в ІКМ там не потрібен.

Ми не будемо висловлювати власну думку стосовно того, які саме ЦАП, DSD чи ІКМ є більш природними для прослуховування музики, тому що тут, як завжди, – кому що до вподоби. Ба більше, доволі часто думки інженерів-дослідників, які розробляють науково-теоретичні засади та математичний функціонал ЦАПів, є абсолютно протилежними, що відображається навіть у назвах наукових праць, наприклад, «Чому професійне 1-бітне сигма-дельта перетворення – погана ідея» (Lipschitz, & Vanderkooy, 2000) або «Чому Direct Stream Digital (DSD) є найкращим вибором як цифровий аудіоформат» (Reefman, & Nuijten, 2001). Якщо ж висловити бажання зробити абсолютно довершений ЦАП, яке могло би здійснитися помахом чарівної палички, то, без жодних сумнівів, це був би 32-бітний ЦАП, побудований за схемою R2R. Було би неперевершеним дивом, якби обмеження фізичної і технологічної природи не забороняли побудову 24-бітного РСМ ЦАПх.

Принципи роботи R2R ЦАПх

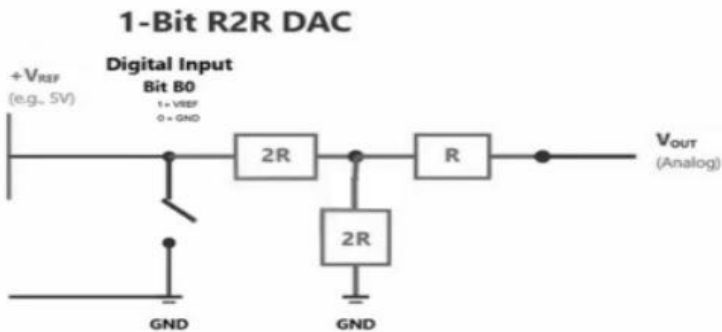
Існує безліч літератури, де пояснюються принципи роботи R2R ЦАПів, утім доволі важно знайти джерела, де ці пояснення були би чіткими і зрозумілими, а викладення матеріалу стислим. Варто обмежитися тільки двома з них. Перше – невеличка анімація (Blueprint IoT, 2025), яка допомагає зрозуміти, яким чином впорядковуються резистори, утворюючи по факту дільник напруги. Далі на рисунку (Іл. 2) показана схема 4-бітного ЦАПх; відповідно цифровий сигнал є сукупністю 4 бітів, які в певний момент часу потрапляють на вихідні піни (контакти) керівного мікроконтролера. Ці піни позначені як GPIO 0–GPIO 3 (вхідно-вихідні піни загального призначення), а також пін GND – загальний дріт або точка, яка прийнята за нульовий потенціал. Найстарший біт 3 – це пін GPIO 3.

Іл. 2. Схема 4-бітного ЦАП (Blueprint IoT, 2025).



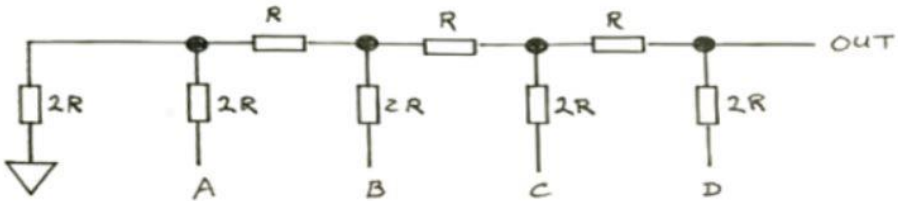
Дивлячись на цю схему, можна зрозуміти, як вона працює, і який сигнал буде на виході залежно від того, яка саме комбінація бітів потрапляє в цей момент часу на входні піни. Загалом це називається «сходова резисторна структура R2R», але чому вона нагадує сходи, стане зрозуміло, якщо цю структуру будувати побітно, починаючи з одного біта (Іл. 3):

Іл. 3. Схема 1-бітного ЦАП.



Ми не будемо коментувати, як працює цей 1-бітний ЦАП – тут немає нічого складного, натомість для початку розглянемо 4-бітний, керуючись поясненнями, наданими у другому зі згаданих джерел (IMSAI Guy, 2024), тому що перехід потім до справжнього 16-бітного ЦАПу буде цілком зрозумілим. Дивимось на схему (Іл. 4):

Іл. 4. Спрощена схема 4-бітного ЦАПа (IMSAI Guy, 2024).

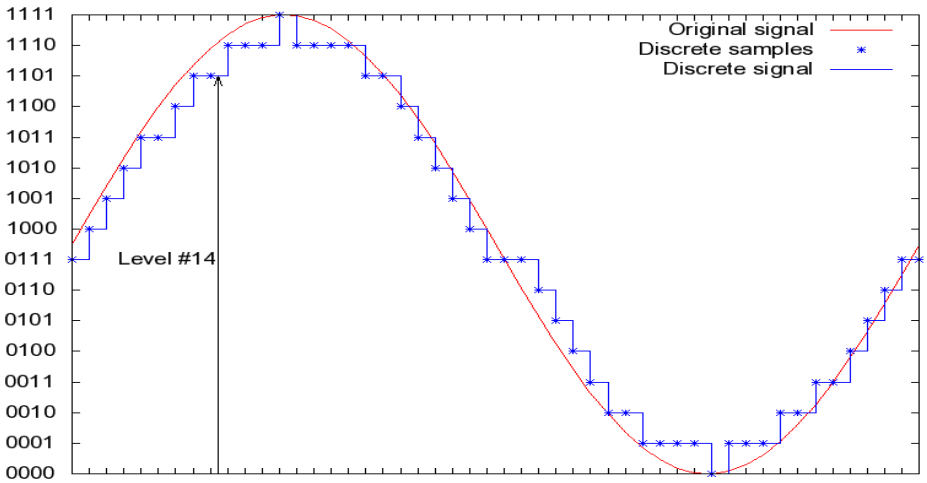


Фактично це та сама схема, тільки наведена в іншому, дещо спрощеному вигляді. І є доволі проста формула, яка дозволяє визначити напругу на виході цієї схеми:

$$V_{OUT} = \frac{A + 2B + 4C + 8D}{16}$$

Зрозуміло, що входні сигнали A, B, C, D можуть дорівнювати лише 0 або 1. Тобто 0 – це коли напруга відсутня, а 1 означає, що рівень напруги, наприклад, у точці A точно дорівнює напрузі живлення всієї схеми (наприклад, +5 вольт), яка прикладається в місці, позначеному стрілочкою ліворуч (Іл. 4). Нескладно порахувати, що існує 16 комбінацій і, відповідно, на виході напруга може становити 0, 1/16, 2/16, 3/16, ..., 14/16, 15/16 від напруги живлення. На графіку нижче – це залежність напруги аудіосигналу від часу – показано, як саме відновлюється форма звукової хвилі в момент, коли на ЦАП потрапляє код 1101, що на цьому графіку позначено як рівень 14 (Іл. 5).

Іл. 5. Відновлений аналоговий сигнал на виході 4-бітного ЦАП



Не зовсім зрозуміло, чому автор відео (IMSAI Guy, 2024), мабуть, жартома, називає цю схему “конвертором для бідних” (таймкод 0:48). Мабуть, тому, що такий 4-бітний ЦАП можна побудувати вдома, і є багато відеороликів, де люди саме це й роблять, згодом вимірюючи напругу на виході мультиметром і радіючи від того, що теорія збігається з практикою. Інша справа, що в реальності швидкість, з якою працює подібний ЦАП, є досить високою, вона збігається із частотою дискретизації і становить 44100 операцій за секунду і більше. Утім, професійні і доволі коштовні ЦАП працюють за таким саме принципом. Хоча є й нюанси, адже серед ЦАПів R2R існує такий елітний різновид, який називається ЦАП NOS⁶ R2R. Його ідея полягає в тому,

⁶ NOS (Non-Oversampling) – це тип ЦАП, який перетворює цифровий звук на аналоговий за допомогою сходів резисторів без передискретизації (oversampling) та цифрових фільтрів. Цінується аудіофілами за «аналогове», тепле та природне звучання, позбавлене цифрового «дзвону».

щоб уникнути будь-якої передискретизації, бо це вважається маніпуляцією, яка (начебто) додатково спотворює сигнал, і залишатися виключно в рамках сходової структури R2R, попри значні технологічні складності у побудові резисторної матриці надвисокої прецизійності.

Якщо R2R – це насамперед точність, то сигма-дельта-модуляція – це швидкість, дуже складна математика і цифрова обробка даних. Прецизійність коштує дорого, тому сьогодні переважна більшість ЦАПів, що використовуються в різних пристроях, від мобільних телефонів до професійного аудіобладнання, застосовують сигма-дельта-модуляцію.

Схеми, за якими побудовані ЦАП, що використовують цей підхід, є набагато складнішими за R2R, тому ми не будемо їх розглядати, а лише зазначимо, що там є декілька етапів перетворення сигналу. Перший етап – це попередня цифрова обробки вхідних даних і передискретизація. Другий етап – це власне і є сама сигма-дельта-модуляція, яка включає в себе дельта-модулятор, що бере різницю, інтегратор, який сумує значення (тобто сигма), компаратор, опрацювання зворотного зв'язку і формування наднизького рівня шуму шляхом переміщення його в область дуже високих частот за межами звукового діапазону. Третій етап – це власне є крок конверсії цифрового сигналу в аналоговий, але тут застосовується високошвидкісна, переважно 1-бітна конверсія, що нагадує 1-bit R2R DAC. Четвертий етап – опрацювання щільності імпульсів аудіосигналу, яке створює ефект зміни амплітуди, а по факту зміни гучності сигналу – чим більша щільність імпульсів, тим більша гучність (Іл. 6).

Іл. 6. Співвідношення щільності імпульсів та гучності.



І це вже є перехід до музики. П'ятий, заключний етап – це аналоговий фільтр низьких частот, тут відбувається згладжування сигналу таким чином, що імпульси перетворюються на безперервну хвилову форму, а також видаляється весь зайвий ультразвуковий шум, який був витіснений у цю область частот на другому етапі. На виході всієї схеми – стерильно чистий сигнал, який дозволяє почути найдрібніші деталі виконання музичного твору, про які ми згадували на початку цієї статті. Більшість поціновувачів сходяться на думці, що ЦАП на сигма-дельта-модуляції дають топову розбірливість, хоча розбірливість і краса звучання – це різні характеристики.

Для тестового прослуховування нами був обраний *Концерт для віолончелі з оркестром* відомого українського композитора Володимира Птушкіна. Зрозуміло, що прослуховувався не саундтрек цього відео, викладеного на *YouTube* (Ehsan Tavakkol, 2020), що, до речі, є компресованим mp3-аудіо з посереднім бітрейтом 210 кбіт/с, а старий звукозапис, зроблений свого часу на державній телерадіостудії в Києві, який зберігався у власному архіві композитора. Один із авторів статті став свідком того, як на початку 2010-х років композитор Володимир Птушкін був дуже вражений, можна навіть сказати, приголомшений звучанням власного твору, який йому було запропоновано послухати на системі High End, де використовувався саме R2R конвертор, побудований на чіпах компанії *Burr-Brown*, що на той час була і є досі визнаним лідером у створенні стерео цифро-аналогових перетворювачів преміум-класу.

Висновки.

Вважають, що ЦАП R2R NOS звучить набагато природніше та музично живіше, ніж будь-який ЦАП DSD із цифровими фільтрами та коригувальним зворотним зв'язком, успадкованим від його конструкції, хоча подібні ЦАП залишаються на досить високому ціновому рівні. Однак слід визнати, що не існує ЦАП без слабких місць, і навіть конструкції NOS R2R мають свої власні слабкі сторони.

Ідеальні симуляції ЦАП R2R показують чисті, чіткі, швидкі та високолінійні вихідні сигнали, а їхні характеристики аналізуються в частотній області за допомогою швидкого перетворення Фур'є⁷ (ШПФ), яке виявляє гармоніки, побічні ефекти та відношення «сигнал / шум» реконструйованого сигналу. Проте практичні схеми R2R через неточності можуть демонструвати деякі спотворення спектру ШПФ, що іноді вимагає додаткового калібрування та вдосконалення виробництва резисторів. Також високоякісні ЦАП використовують тільки надточні фемтосекундні (10^{-15} секунди), тактові генератори з низьким джиттером, щоби запобігти помилкам синхронізації (відомим як джиттер), що викликають цифрові спотворення. Важливі й операційні підсилювачі (ОП), які використовуються одразу після головного чіпу для перетворення струму в придатний для використання сигнал напруги. І нарешті, вихідний аналоговий каскад, що служить як кінцевий буфер, який виводить сигнал на підсилювач або навушники.

Слід зазначити, що ціна, яку доводилося платити за точність схової структури R2R, традиційно була доволі високою. Для досягнення неймовірної прецизійності застосовувалися різні методи лазерного обрізання і скрупульозного зіставлення резисторів. Тому протягом тривалого часу високоякісні R2R ЦАП були доступні тільки вузькому колу поціновувачів, які мали фінансову можливість дозволити собі подібне задоволення. Утім за останні декілька років ситуація помітно змінилася, і розвиток виробництва уможливив побудову дуже якісних ЦАПів за значно меншу ціну. З'явилися нові бренди (наприклад, *Schiit Audio*, *Denafraps*), які зробили

⁷ Швидке перетворення Фур'є (ШПФ, англійською FFT – Fast Fourier transformation), – це математичний метод деконструювання складної форми хвилі на її складові синусоїди. Швидке перетворення Фур'є – важливий метод вимірювання в науці про аудіо та акустику. Воно перетворює сигнал на окремі спектральні компоненти і таким чином надає інформацію про частоти сигналу (NTi Audio, 2026).

ексклюзивні пристрої доступними для широкої аудиторії, і це також спонукало інші відомі бренди, такі як той самий *Burr-Brown*, суттєво знизити ціни на власну продукцію. Тому двері у світ ексклюзивного високоякісного аудіо зараз широко відчинені.

Отже, з урахуванням розглянутих у цій статті особливостей побудови цифро-аналогових перетворювачів, **перспективою розвитку теми** може бути обговорення того, як дві різні «філософії» ЦАП схильні представляти музику або моделі її прослуховування, про які повідомляють слухачі, бо це вже є об'єктивністю, що базується на багаторічному консенсусі аудіофілів та безпосередньому досвіді використання ЦАПів, побудованих по технології R2R або дельта-сигма модуляції.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

- Beis, U. (2024). *An Introduction to Delta Sigma Converters*. Beis.de. <https://www.beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma.html> [in English].
- Blueprint IoT (2025). *R2R DAC explained | How does a digital to analogue converter works?* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=MBonjCM5_tE&t=4s [in English].
- Chan, K. L., Rakuljic, N. & Galton, I. (2008). Segmented Dynamic Element Matching for High-Resolution Digital-to-Analog Conversion. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 55(11), 3383–3392. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.2001757> [in English].
- Ehsan Tavakkol (2020). *Vladimir Ptushkin – Concerto for violoncello and orchestra*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ejgV-M6v5no> [in English].
- Embedded Staff (2004, June 23). *Sigma-delta techniques extend DAC resolution*. Embedded.com. [AspenCore Media group]. <https://www.embedded.com/sigma-delta-techniques-extend-dac-resolution/> [in English].
- Fletcher, D. (2020, April 7). *Cheap vs Expensive Digital Analogue Converters (DAC)s – Are they any good?*. Daniel Fletcher, Audio product development specialist. <https://djfletcher.co.uk/2020/04/07/cheap-vs-expensive-digital-analogue-converters-dacs-are-they-any-good/> [in English].

- Fujimori, I., Nogi, A., & Sugimoto, T. (2000). A multibit delta-sigma audio DAC with 120-dB dynamic range. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 35(8), 1066–1073, <https://doi.org/10.1109/4.859495> [in English]
- IMSAI Guy (2024). *DAC resistor ladder*, #2038. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Ron_ES-gPQg [in English].
- Jiale He, Xingchen Tian, Hansen Wei, Yingbo Tian, & Bingxun He (2023). An overview of principles and types of ADC and DAC. *Journal of Physics: Conference Series*, 2649: The 2023 International Conference on Mechatronics and Smart Systems, 24.06.2023, Oxford, UK, 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2649/1/012050> [in English].
- Linear Pulse Code Modulated Audio (LPCM)* (2024). Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000011.shtml> [in English].
- Lipschitz, S., & Vanderkooy, J. (2000). Why Professional 1-Bit Sigma-Delta Conversion is a Bad Idea. *AES 109th Convention*, September 22–25, Los Angeles, California, USA. http://peufeu.free.fr/audio/extremist_dac/files/1-Bit-Is-Bad.pdf [in English].
- NTi Audio (2026). *Fast Fourier Transformation FFT*. <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transformation-fft> [in English].
- Reefman, D., & Nuijten, P. (2001). Why Direct Stream Digital (DSD) is the best choice as a digital audio format. *AES 110th Convention*, May 12–15, Amsterdam, The Netherlands, 5396. <https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=9902> [in English].
- SW1X Audio Design (2025). *Our Top 5 R2R DACs | AD1865 vs TDA1541 vs PCM56 vs AD1862 vs TDA1540 vs PCM58 Comparison*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FhJk8XRazgw> [in English].
- Tuijl, E., van, Homberg, J., van den, Reefman, D., Bastiaansen, C., & Dussen, L., van der (2004). A 128f/sub s/ multi-bit /spl Sigma//spl Delta/ CMOS audio DAC with real-time DEM and 115dB SFDR. In *2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, vol. 1* (pp. 368–369). <https://doi.org/10.1109/ISSCC.2004.1332747> [in English].
- What is the DSD audio format?* (2002–2026). Caravan Smart House. <https://hifidom.com.ua/novyny/163-dsdformat> [in Ukrainian].

Serhii Vorontsov

Kharkiv I. P. Kotlyarevsky National University of Arts,
PhD in Phys. and Math, Associate Professor,
the Department of Composition and Orchestration
email: vorontsov@num.kharkiv.ua; ORCID iD: 0000-0002-9396-0726

Mariya Bondarenko

Kharkiv I. P. Kotlyarevsky National University of Arts,
PhD in Art Studies, Associate Professor, Special Piano Department
email: mariya.bondarenko@num.kharkiv.ua; ORCID iD: 0000-0001-5193-2535

**Digital audio recording concepts
and trade-offs between speed and accuracy**

Statement of the problem. *The perception of music by listeners is dependent on the authenticity of the sound and the complexity of the musical genre. This is especially true of classical music. A digital file, as a recipe for reproducing the sound of a musical piece, contains absolutely everything, it contains every note, every emotion, every smallest detail of sound dynamics and expression. But here is the thing, the way, in which a digital recipe can be transformed into analog sound, can completely change the perception of a musical piece by listeners. And it appears that there is more than one way to produce an analog signal which eventually drives speakers to produce sound. The article examines an important technological stage in the process of playing high-quality music recordings from digital media, which is the actual transition from digital code contained in computer files (WAV or FLAC) stored on hard drives, optical discs, mobile device memory, network attached storage (NAS), streaming services, etc., to electrical voltage fluctuations that create sound waves in the space where music is listened to. This transition from digital audio to an analog signal always occurs using a device called a DAC (digital-to-analog converter).*

Objectives, methods, and novelty of the research. *The purpose of the article is to draw the attention of a wide audience to certain technological aspects of digital sound recording of musical works, which determine the reliability of the sound and the completeness of their perception by listeners. The authors of the article have chosen a comprehensive interdisciplinary research approach: general scientific methods of analysis and comparison (of the analog and digital principles of sound recording, two main concepts of DAC construction, R2R and sigma-delta modulation*

and oversampling, Delta-Sigma DAC), experiment (listening to a recording of a musical work) and generalization of the obtained results are applied to the specific material of modern research in the field of digital sound engineering with its physical and mathematical content (analysis of the principles of DAC operation).

Almost every modern gadget created for the needs of the consumer has a DAC in its composition, and in devices for sound recording and sound reproduction, with which musicians work today, the presence of digital-analog converters is an objective reality. At the same time, the principles of functioning of digital sound reproduction equipment usually remain “terra incognita” for the majority of the musical community, although their understanding is extremely necessary, for example, for a modern sound engineer or composer – the creator of new electronic sounds, as well as for a musicologist who resorts to the analysis of modern music. Due to the specifics of their education, musicologists still rarely address such topics in their works, while the explanations of specialists – sound engineers-researchers – loaded with professional terminology require the same in-depth specialized knowledge from their recipients. Therefore, the topic and focus of this article are undoubtedly new for the musician reader, and the new knowledge he or she gains can be applied in the practice of sound engineering, musical composition, musicological and musical-acoustic research.

Research results. Two basic concepts for building a DAC were considered, namely the old-school R2R ladder architecture versus the latest sigma-delta modulation and resampling (Delta-Sigma DAC), which is used to convert digital data with a higher quantization depth of 16-24 bits into a high-speed single-bit stream. The advantages of each concept in terms of sound fidelity were highlighted, as well as why the records may sound different when playing music. The Concerto for cello with orchestra by the famous Ukrainian composer Volodymyr Ptushkin was selected for the test listening. It is clear that the soundtrack of this YouTube video was not listened to, which, by the way, is compressed mp3 audio with a mediocre bitrate of 210 kbit/s, but an old sound recording made at the time at the Kyiv State TV and Radio Studio, which was kept in the composer's own archive. One of the authors witnessed how, in the early 2010s, the composer V. Ptushkin was very impressed, one might even say stunned, by the sound of his own work, which he was offered to listen to on a High End system that used an R2R converter built on chips from the Burr-Brown company, which at that time was and still is a recognized leader in creating premium stereo digital-to-analog converters.

Conclusion. If R2R is primarily about accuracy, sigma-delta modulation is about speed, even more complex mathematics and digital data processing. Precision comes

at a high cost, so today, the overwhelming number of DACs in wide variety of devices, from mobile phones to professional audio gear use sigma-delta modulation. It should be noted that the concept of an audio digital-to-analog converter is broader than just of a specialized integrated microchip soldered to the motherboard of the device that implements mathematical conversions of digital code into an audio signal, it is also the device itself as a whole (a separate DAC, audio interface, etc.). So, the quality of music playback depends not only on the microchip itself, but sometimes even more so on the quality of other components that make up the entire device.

Key words: *digital audio; music recordings; digital-to-analog converter; R2R DAC; ladder structure; sigma-delta modulation.*

*Стаття надійшла до редакції 5.05.2026,
рекомендована до друку 1.06.2026, оприлюднена 29.06.2026.*