

# Переваги використання АЦП CTSD у прецизійних сигнальних колах

Абхілаша Кавлі (Abhilasha Kawle), Васім Шайх (Wasim Shaikh), Analog Devices

**Розробники прецизійних сигнальних кіл стикаються з проблемою забезпечення необхідних характеристик шуму в застосуваннях із середньою смугою пропускання та часто зрештою доходять компромісу між цими характеристиками та точністю. Ми розглянемо проектування схеми сигнального кола на прикладі використання сигма-дельта АЦП з безперервним часом перетворення AD4134, що дає змогу зменшити розмір рішення та скоротити час виведення кінцевої продукції на ринок.**

## ВСТУП

У багатьох застосуваннях і алгоритмах цифрової обробки даних потреба в покращенні роздільної здатності та точності для всіх технологій перетворювачів зросла за останні два десятиліття. Обмеження роздільної здатності та точності АЦП було подолано завдяки використанню зовнішнього цифрового контролера, який витягував і видавав точніші результати за допомогою програмних методів, до яких належать усе-

реднення та оптимізовані схеми фільтрації. Щоб зменшити обсяг подальшої обробки в цифровому мікроконтролері або DSP, можна скористатися високопродуктивним прецизійним АЦП — це скоротить час оптимізації на цифровій стороні. Крім того, можна також використовувати дешевший мікроконтролер або DSP. Прецизійні АЦП набули широкого поширення в таких застосуваннях (див. рис. 1):

- промислове контрольно-вимірювальне обладнання: вимірювання

вібрацій, динамічних сигналів, вимірювання температури, тиску, механічної напруги, витрати, акустичний аналіз;

- медичне обладнання: електрофізіологія, аналіз крові, електрокардіограми (ЕКГ);
- оборонні застосування: гідроакустичні станції, телеметрія;
- тестування та вимірювання: аудіотести, тестове обладнання, аналіз якості електроенергії.

Вхідний аналоговий сигнал, який обробляється АЦП, є вихідним сигналом напруги або струму датчика або сигналом контуру керування зі зворотним зв'язком зі смугою пропускання до декількох сотень кГц. Формат і швидкість роботи цифрового виводу АЦП залежать від застосування і подальшого оброблення, що здійснюється цифровим контролером. Зазвичай розробники сигнальних кіл програмують швидкість передавання вихідних даних (ODR) АЦП

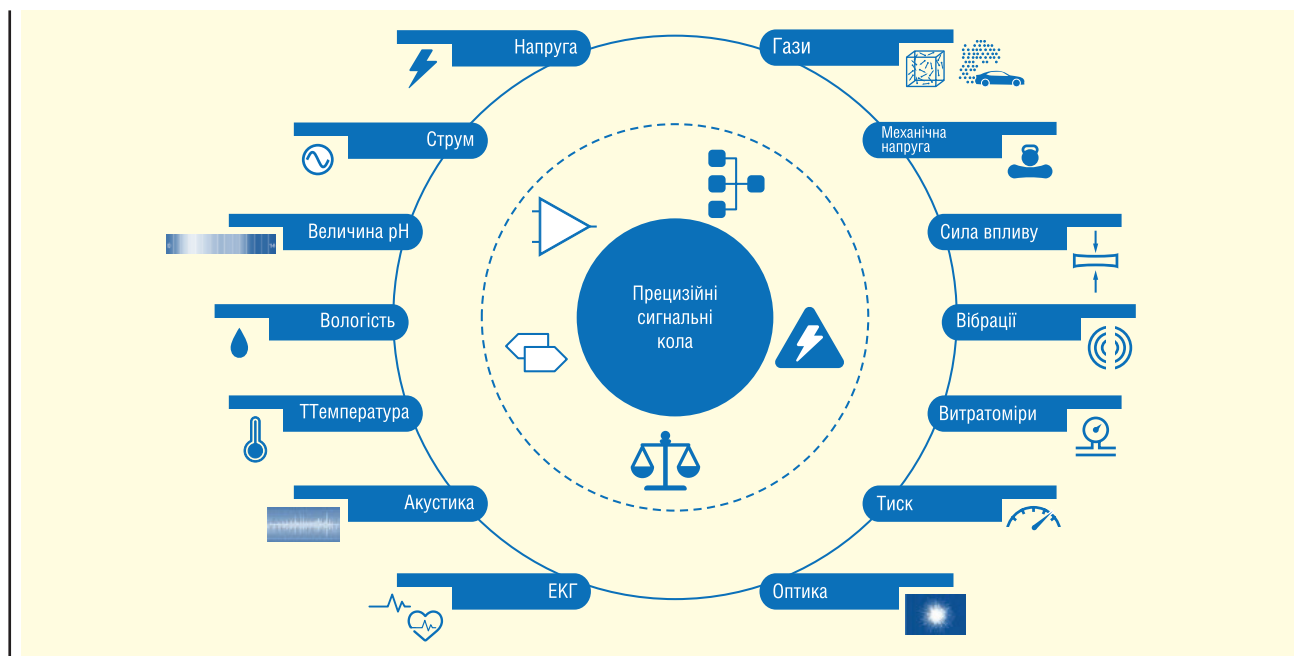


Рис. 1. Приклади використання прецизійних АЦП у сигнальному колі

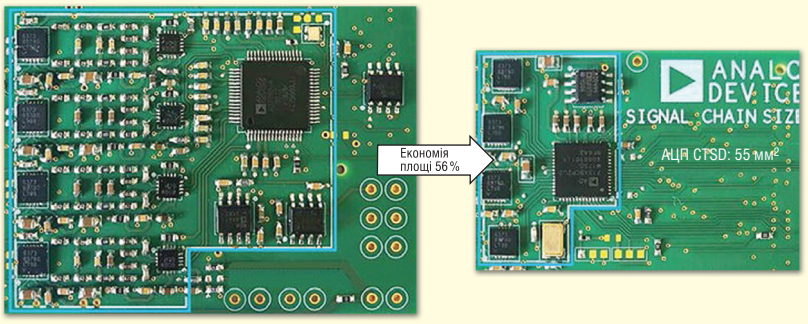


Рис. 2. Компактне рішення з новим і простим у використанні АЦП CTSD від ADI

відповідно до теореми Котельникова так, щоб частота перетворення цифрового контролера щонайменше вдвічі перевищувала частоту вхідного сигналу. Більшість АЦП гнучко підлаштовують швидкість вихідних даних залежно від заданої смуги частот сигналу.

Перед надходженням в АЦП вхідного сигналу він проходить кілька етапів формування. Кола формування сигналу з жорсткими вимогами розробляються і налаштовуються відповідно до конкретних технологій АЦП, що гарантовано забезпечує характеристики перетворювачів, які заявлені в технічному описі. Завдання розробника сигнальних кіл не обмежується тільки вибором АЦП. Для створення та налаштування периферії часто потрібно чимало часу та зусиль. Компанія Analog Devices надає технічну підтримку на найвищому рівні у вигляді інструментів симуляції та моделей, що дають змогу розв'язати більшість завдань проектування.

## НОВИЙ ПІДХІД: СПРОЩЕННЯ РОЗРОБКИ ЗА ДОПОМОГОЮ АРХІТЕКТУРИ CTSD

Сигма-дельта архітектура з безперервним часом перетворення (continuous-time sigma-delta, CTSD), яку переважно використовували в аудіо-та високошвидкісних АЦП, адаптована до прецизійних застосувань, забезпечуючи найвищу точність і спрощуючи сигнальне коло. Переваги цієї архітектури дають змогу позбутися розв'язання завдань пов'язаних із проектуванням периферії.

На рисунку 2 показано приклад того, як спростити та скоротити наявні сигнальні кола АЦП на 56% за допомогою цього нового рішення, що забезпечує високу щільність каналів. Ми розглянемо деякі ключові проблеми, пов'язані з проектуванням сигнального кола для типових застосувань, і покажемо, як сиг-

ма-дельта АЦП із безперервним часом перетворення розв'язують ці завдання.

### КРОК 1: ВИБІР АЦП

Необхідно не тільки домогтися високої роздільної здатності й точності кінцевого цифрового вихідного сигналу, а й вибрати правильний АЦП із широкого діапазону компонентів, що важливіше за вибір ширини смуги сигналу, ODR, типу й діапазону обробки сигналу. Як правило, у більшості застосувань цифровим контролерам потрібні свої алгоритми для обробки амплітуди, фази або частоти вхідного сигналу.

Для точного вимірювання необхідно, щоб похибки оцифрування були мінімальними. У таблиці 1 перелічено основні похибки оцифрування та відповідні параметри, результати вимірювання яких зазначено в технічному описі.

Зазначені в таблиці робочі параметри за змінним струмом пов'язані з амплітудою і частотою сигналу. У низькочастотних застосуваннях або системах постійного струму, до яких відносяться системи вимірювання потужності з вхідними сигналами в діапазоні 50–60 Гц, слід враховувати похибки вимірювання АЦП таких параметрів, як зміщення, посилення, INL і фліккер-шум. Ці параметри за постійним струмом також вимагають певного рівня температурної стабільності залежно від передбачува-

ного використання приладу. Компанія ADI пропонує широку низку передових у цій галузі високопродуктивних АЦП для застосувань, які мають забезпечити високу точність, швидкість або роботу за обмеженого бюджету електроживлення. Порівняння одного набору характеристик АЦП з набором іншого перетворювача не можна вважати коректним вибором АЦП, оскільки слід також врахувати загальну продуктивність системи та труднощі проектування. Саме на цьому етапі важливим є вибір технології або архітектури АЦП. Традиційно перевагу віддають двом архітектурам аналого-цифрових перетворювачів. Найпоширенішою з них є АЦП послідовного наближення (SAR), який функціонує відповідно до згаданої теореми Котельникова. Перевагами АЦП послідовного наближення є чудова продуктивність за постійним струмом і малі форм-фактори з малою затримкою та масштабуванням енергоспоживання завдяки зміні параметра ODR.

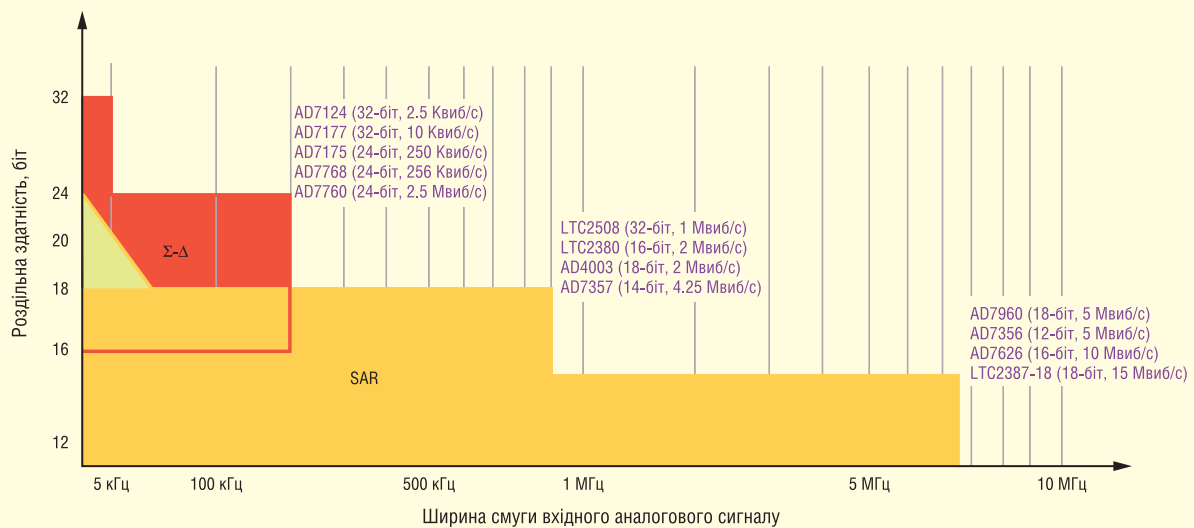
Другою з двох згаданих технологій є сигма-дельта АЦП з дискретним часом перетворення (DTSD), який працює за принципом забезпечення більшої кількості вибірок для зниження втрат інформації. Оскільки в цьому випадку частота дискретизації набагато вища за частоту Котельникова, дискретизація є надлишковою. Додаткова перевага такої архітектури полягає в тому, що похибки, які додаються під час дискретизації, зводяться до мінімуму в заданій смузі частот. Завдяки цьому в АЦП DTSD — чудова продуктивність за постійним і змінним струмами, але й більша затримка.

На рисунку 3 показано типові значення ширини смуги аналогового вхідного сигналу у випадках використання поширених АЦП SAR і DTSD з різними швидкостями і роздільною здатністю.

Крім того, тепер з'явився новий клас прецизійних АЦП. Вони засновані на технології АЦП CTSD, яка не поступається за своїми характеристиками АЦП DTSD, але унікальна тим, що спрощує

Таблиця 1. Похибки АЦП і показники продуктивності

| Похибки АЦП під час оцифрування   | Відповідні вимірювані параметри з технічного опису   |
|---|--|
| Тепловий шум і шум квантування  | Відношення сигнал/шум (SNR), динамічний діапазон (DR)  |
| Спотворення   | Загальні гармонійні спотворення (THD), інтермодуляційні спотворення (IMD)  |
| Звади   | Перехресні завади, придушення завад, викликаних накладенням сигналу, придушення пульсації живлення (PSRR), коефіцієнт придушення синфазного сигналу (CMRR) |
| Похибка амплітуди і фази  | Похибка посилення, амплітуда і фаза зменшуються на заданій частоті   |
| Затримка між вхідним сигналом АЦП і кінцевим цифровим вихідним сигналом | Затримка, час встановлення   |



**Рис. 3.** Приклади використання архітектур прецизійних АЦП

весь процес проектування сигнального кола. Проблеми, які виникають на кількох наступних етапах розроблення сигнального кола, вирішуються за допомогою цього нового сімейства АЦП.

## КРОК 2: ВХІДНИЙ СИГНАЛ АЦП

Датчики, вихідні сигнали яких надходять на обробку в АЦП, можуть мати дуже високу чутливість. Розробники мають добре розуміти структуру вхідної схеми АЦП, до якого під'єднується датчик, щоб похибки перетворювача не спотворювали фактичний сигнал датчика.

Вхід традиційних АЦП SAR і DTSD являє собою схему вибірки та зберігання з конденсатором, що перемикається (див. рис. 4). На кожному фронті тактового сигналу вибірки, коли перемикач вибірки змінює свій стан увімкнення/вимкнення, необхідно формувати струм для заряджання або розряджання запам'ятовувального конденсатора вибірки/збереження до нового вхідного дискретного значення. Цей струм забезпечується вхідним джерелом, яким

у розглянутому випадку є датчик. Крім того, у самому перемикачі є паразитні ємності, які повертають деякий заряд у датчик. Цей заряд також повинен поглинатися датчиком, щоб уникнути спотворення власного сигналу.

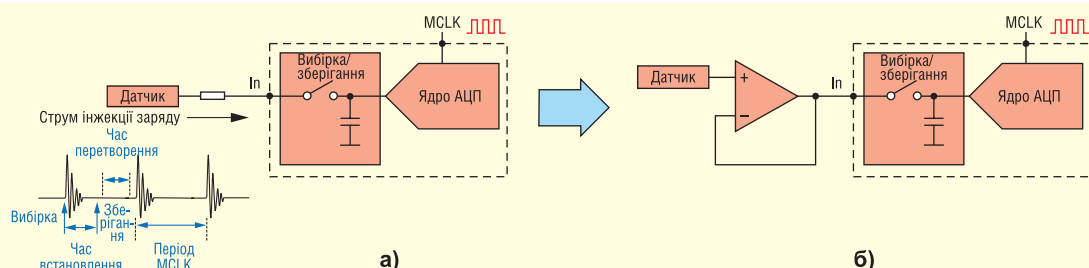
Більшість датчиків не в змозі забезпечити таку величину струмів, що вказує на їхню нездатність безпосередньо керувати комутаційними схемами. Навіть якщо датчик відповідав би вимогам щодо струму, через його кінцевий імпеданс похибка у вхідному сигналі АЦП збільшилася б. Струм перезаряджання конденсатора вибірки/зберігання є функцією вхідного сигналу. Цей струм спричиняє падіння напруги на імпедансі датчика, що залежить від вхідного сигналу. Як видно з рисунка 4а, вхідний сигнал АЦП має деяку похибку. Для розв'язання цієї проблеми між датчиком і АЦП встановлюють керувальний підсилювач (див. рис. 4б).

Насамперед підсилювач має підтримувати зарядовий струм заряду і розряду конденсатора. Вихідний сигнал підсилювача повинен вийти на сталі значення до кінця циклу вибірки. Це означає, що підсилювач повинен забезпе-

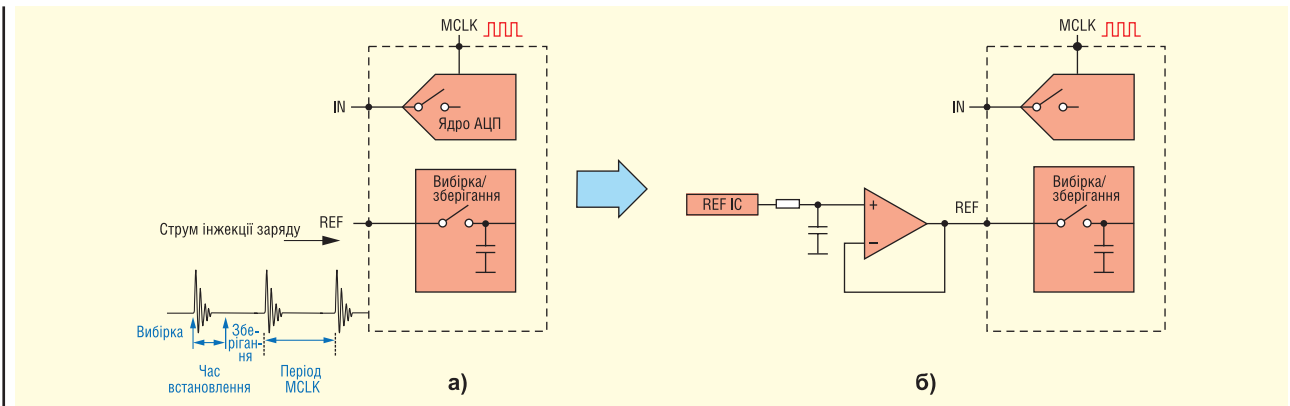
чувати миттєві стрибки струму, відповідні високій швидкості наростання вихідної напруги, і малий час встановлення при цих перехідних процесах, що узгоджується з високою пропускнуою здатністю. У міру збільшення частоти дискретизації та роздільної здатності АЦП виконання цих вимог стає критично важливим.

Великою проблемою для інженерів, особливо тих, хто працює з застосуваннями із середньою шириною смуги пропускання, є правильний вибір підсилювача для АЦП. Як згадувалося, компанія ADI надає набір імітаційних моделей та інструментальних засобів драйвера прецизійного АЦП, які спрощують вирішення цього завдання. Деякі з нових АЦП SAR і DTSD дають змогу пом'якшити цю проблему за допомогою сучасних методів вибірки, які повністю виключають необхідність у вибірці струму, що споживається, у перехідних процесах або допускають наявність інтегрованого підсилювача. Однак будь-яке рішення обмежує смугу частот сигналу або зменшує продуктивність АЦП.

Перевага АЦП CTSD у тому, що вони розв'язують цю проблему, даючи змогу легко керувати вхідною резистив-



**Рис. 4.** Зворотнє надходження інжекційного заряду з конденсатора, що перемикається, у датчик (а); блокування заряду, що повертається, за допомогою вхідного буфера (б)



**Рис. 5.** Зворотнє надходження інжекційного заряду з конденсатора, що перемикається, в ІС опорної напруги (а); блокування заряду, що повертається, за допомогою буфера опорної напруги (б)

ною схемою, а не схемою з конденсатором, який перемикається. Таким чином, знімаються жорсткі вимоги до підсилювачів забезпечити широкую смугу пропускання і високу швидкість наростання вихідної напруги. Якщо датчики безпосередньо керують цим резистивним навантаженням, їх можна безпосередньо під'єднати до АЦП CTSD; в інших випадках між датчиком і АЦП CTSD можна встановити будь-який малощумний підсилювач із малою смугою пропускання.

### КРОК 3: ВЗАЄМОДІЯ ДОН З АЦП

Не менш складною є проблема, пов'язана з вибором джерела опорної напруги (ДОН). На вході для підключення зовнішнього ДОН традиційних АЦП також встановлений конденсатор, що перемикається. На кожному фронті тактової частоти дискретизації це джерело повинне заряджати внутрішні конденсатори, що вимагає великого комутованого струму з хорошим часом встановлення.

ІС опорної напруги, що пропонуються на ринку, не підтримують вимогу забезпечити великий комутований струм і мають обмежену смугу пропускання. Друга проблема сполучення полягає в тому, що шум від цих опорних сигналів великий порівняно з шумом АЦП. Для фільтрації шуму цих сигналів використовується RC-коло 1-го порядку. З одного боку, ми обмежуємо смугу пропускання сигналу опорної напруги, щоб зменшити шум, а, з іншого, прагнемо забезпечити малий час встановлення. Це дві взаємовиключні вимоги. З цієї причини для керування опорним виводом АЦП використовується малощумний буфер (див. рис. 5б). Швидкість наростання вихідної напруги і смугу пропускання буфера визначають з огляду на частоту дискретизації та роздільну здатність АЦП.

Як і у випадку з інструментальними засобами для драйвера прецизійного АЦП, у компанії ADI є відповідні інструменти для моделювання та правильного вибору буферів ДОН для АЦП. Крім того, деякі нові АЦП SAR і DTSD оснащені власним буфером опорного сигналу, але у них є обмеження щодо продуктивності та пропускну здатності.

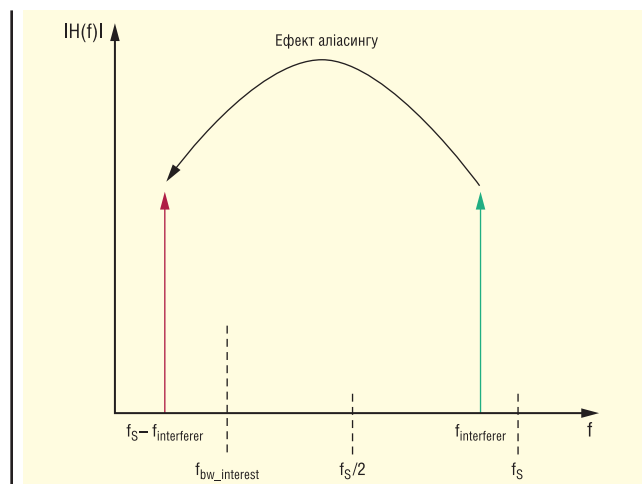
Перевага АЦП CTSD полягає в тому, що цей етап проектування можна повністю пропустити, оскільки перетворювачі такого типу забезпечують новий і простіший спосіб керування резистивним навантаженням, що не потребує широкої смуги пропускання і великої швидкості наростання вихідної напруги буфера. ІС опорної напруги з фільтром нижніх частот можна безпосередньо під'єднувати до опорного виводу.

### КРОК 4: ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕСПРИЙНЯТЛИВОСТІ СИГНАЛЬНОГО КОЛА ДО ЗАВАД

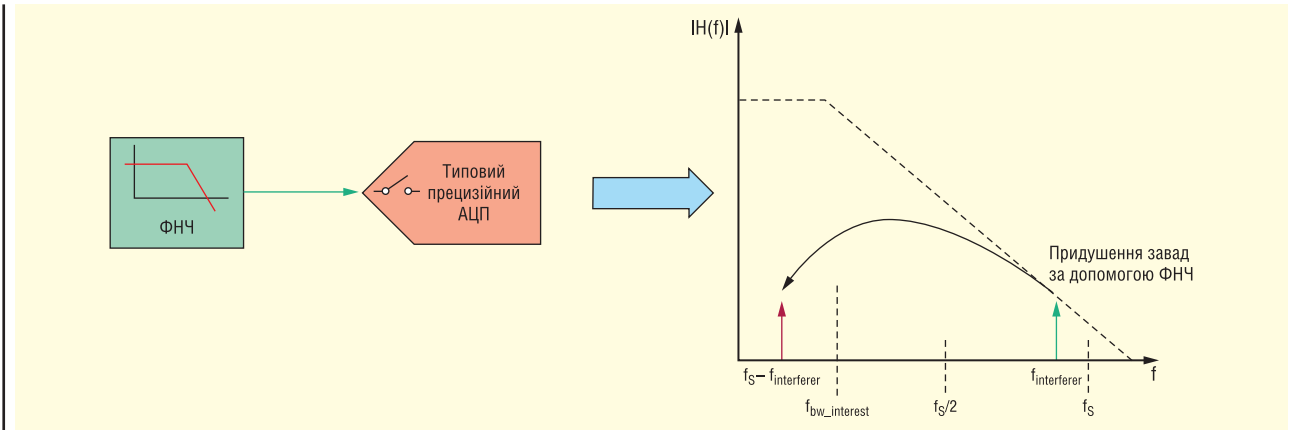
Вибірка й оцифрування безперервного сигналу призводить до появи шуму квантування. Частота дискретизації та кількість бітів задають граничне значення продуктивності АЦП. Після розв'язання проблем із продуктивністю, підключення до ДОН і входу необхідно усунути потрапляння високочастотного шуму в задану низькочастотну смугу. Цей ефект називається накладанням спектрів сигналів, або аліасингом. Згідно з теоремою про дискретизацію, будь-який тональний сигнал поблизу частоти вибірки повертається в смугу частот, як показано на рисунку 6, викликаючи появу небажаної інформації або похибки. Відбиті ВЧ-копії або позасмугові джерела завад погіршують у заданій смузі пропускання відношення сигнал/шум (SNR).

Для усунення аліасингу використовується фільтр нижніх частот, або фільтр, що усуває ефект накладення спектрів (AAF), який зменшує величину завади так, що коли вона проникає в смугу, зберігається потрібне відношення сигнал/шум. Цей ФНЧ зазвичай об'єднується з підсилювачем драйвера, як показано на рисунку 7.

Під час розроблення цього підсилювача найбільше утруднення являє собою пошук компромісу між малим часом встановлення і вимогами до фільтрації нижніх частот. Крім того, необхідно здійснити точне налаштування отриманої схеми



**Рис. 6.** Накладання спектрів позасмугових джерел завад у заданій смузі частот під час дискретизації



**Рис. 7.** Використання ФНЧ дає змогу зменшити вплив накладення спектрів на показник SNR усередині смуги

відповідно до потреб кожного застосування, що обмежує використання єдиної платформи для різних систем. Компанія ADI пропонує безліч засобів проектування фільтра згладжування, які полегшують вирішення цього завдання.

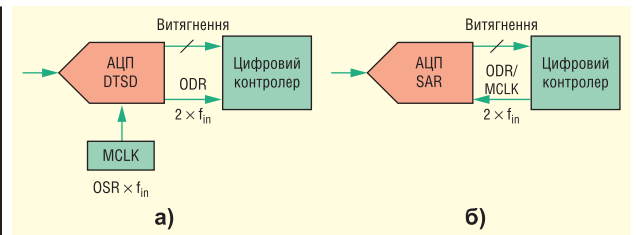
Несприйнятливість АЦП CTSD до завад зумовлена здатністю пригнічувати побічні НЧ-складові, яка є унікальною властивістю лише аналого-цифрових перетворювачів цього виду. АЦП з такою технологією не потрібна ААФ-фільтрація. Ця якість дає змогу під'єднувати АЦП CTSD до датчика без особливих зусиль.

## КРОК 5: ВИБІР ТАКОВОЇ ЧАСТОТИ АЦП І ШВИДКОСТІ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Тепер давайте обговоримо вимоги до тактової частоти традиційних АЦП двох згаданих класів. АЦП DTSD, що являє собою перетворювач із надлишковою дискретизацією, здійснює вибірки з вищою частотою, ніж частота Котельникова. Однак передача таких даних безпосередньо зовнішньому цифровому контролеру перевантажує його великою кількістю надлишкової інформації. У системі з надлишковою дискретизацією вихідний сигнал АЦП піддається децимації за допомогою вбудованих цифрових фільтрів, які забезпечують кінцевий цифровий вихідний сигнал перетворювача з меншою частотою, яка зазвичай удвічі перевищує частоту сигналу.

У випадку з АЦП DTSD потрібно скласти план із забезпечення високочастотної тактової частоти АЦП і запрограмувати швидкість вихідних даних. АЦП видасть готовий цифровий вихідний сигнал за заданої швидкості передавання вихідних даних і заданої тактової частоти. Цифровий контролер використовує сигнал ODR для синхронізації даних.

Далі ми розглянемо вимоги до тактової частоти аналого-цифрових перетворювачів послідовного наближення, принцип роботи яких зазвичай заснований на теоремі Котельникова. У цьому випадку частота дискретизації АЦП забезпечується цифровим контролером, а синхросигнал також є тактовим сигналом у тракті передачі вихідних даних. Однак використання цього сигналу зменшує гнучкість у виборі часового режиму, оскільки часові співвідношення між вибіркою та зберіганням мають добре контролюватися для забезпечення оптимальної продуктивності АЦП. Цей приклад також свідчить про те, що синхронізація цифрового вихідного сигналу має бути добре узгоджена зі згаданими вимогами.



**Рис. 8.** Вимоги до тактової частоти: АЦП DTSD (а); АЦП послідовного наближення (б)

Розглядаючи вимоги до тактової частоти цих обох архітектур, стає зрозуміло — величина швидкості передавання вихідних даних (ODR) пов'язана з тактовою частотою АЦП, що є обмеженням у багатьох системах, де ODR дрейфує, змінюється динамічно або має відповідати частоті вхідного аналогового сигналу. На рисунку 8 порівнюються вимоги до тактової частоти АЦП DTSD і послідовного наближення.

Перевага АЦП CTSD у тому, що він з'єднаний з новим асинхронним перетворювачем частоти дискретизації (ASRC), який повторно дискретизує дані АЦП за будь-якої заданої швидкості передавання вихідних даних. Перетворювач ASRC також дає змогу точно встановлювати ODR на будь-яку частоту і виходити за рамки давнього обмеження цього показника до кратної частоти дискретизації. Вимоги до частоти і часових співвідношень ODR в цьому випадку повністю залежать від цифрового інтерфейсу і ніяк не пов'язані з частотою дискретизації АЦП. Ця функція спрощує проектування цифрової розв'язки під час розроблення сигнальних кіл.

## КРОК 6: ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ЗОВНІШНЬОГО ЦИФРОВОГО КОНТРОЛЕРА

Інтерфейси даних працюють у двох режимах, коли АЦП взаємодіють із цифровим контролером. У першому з них АЦП виступає як хост, що надає тактову частоту цифрового сигналу/ODR і вибирає сигнальний фронт синхросигналу такий, щоб цифровий контролер міг синхронізуватися з даними АЦП. Другий режим — режим приймача. У ньому цифровий контролер є хостом, забезпечує тактову частоту ODR і задає фронти синхросигналу, за якими стануть синхронізуватися дані АЦП.

Якщо вибирається АЦП DTSD, то він є хостом для наступного цифрового контролера, оскільки забезпечує тактову частоту ODR. Якщо ж обирається АЦП послідовного наближення, синхронізацію ODR має забезпечити цифровий

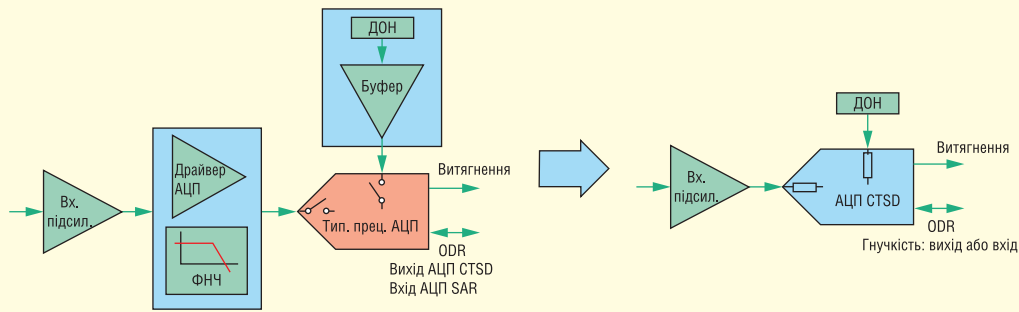


Рис. 9. Сигнальне коло з традиційним прецизійним АЦП порівняно з колом з АЦП CTSD

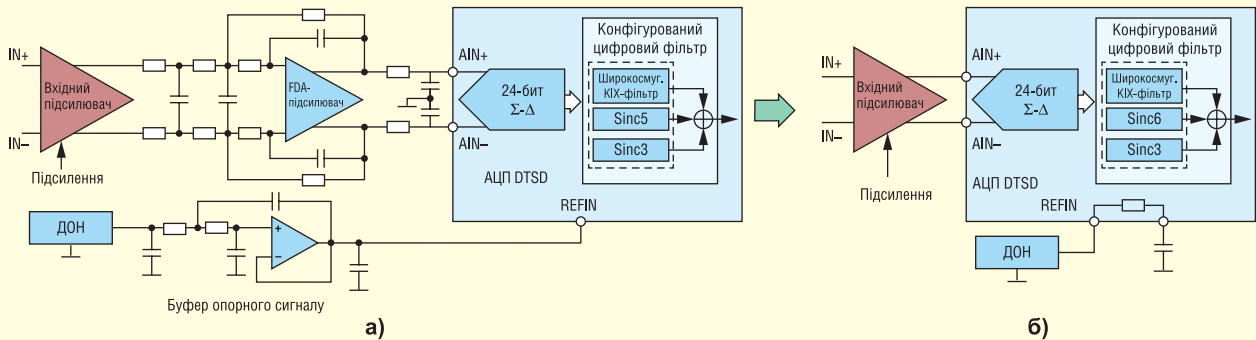


Рис. 10. Сигнальне коло з традиційним прецизійним АЦП порівняно з колом з АЦП CTSD

контролер, оскільки АЦП цього виду завжди конфігуруються як периферійні пристрої. Отже, очевидним обмеженням є те, що після вибору архітектури АЦП цифровий інтерфейс змушений працювати або в режимі хоста, або в керованому хостом режимі. Наразі відсутня гнучкість у виборі інтерфейсу незалежно від архітектури АЦП.

Новий ASRC-перетворювач, під'єднаний до АЦП CTSD, дає змогу незалежно налаштувати режим інтерфейсу даних АЦП. Це відкриває абсолютно нові можливості для застосувань, у яких високопродуктивні АЦП можуть конфігуруватися в будь-якому режимі, що підходить для цифрового контролера, незалежно від архітектури перетворювачів.

## СИГНАЛЬНЕ КОЛО

На рисунку 9 показано структурну схему традиційного сигнального кола з аналоговим входом (AFE), у якому є вхідний драйвер АЦП, фільтр придушення побічних НЧ-складових і буфер опорної напруги. Цю схему можна значно спростити за допомогою АЦП CTSD. На рисунку 10а показано приклад сигнального кола з АЦП DTSD, розробка якого потребує значних зусиль для забезпечення точного налаштування та характеристик АЦП, заявлених у технічному описі.

Для полегшення праці розробників компанія ADI пропонує вихідні проекти, які можна повторно використовувати або змінювати залежно від потреб застосувань із цими АЦП.

На рисунку 10б показано сигнальне коло з АЦП CTSD із вхідним аналоговим інтерфейсом, який спростили завдяки виключенню зі схеми дискретизації АЦП конденсатора, який можна перемикає, та ДОН. Схема дискретизації, що перемикається, була перенесена далі в ядро АЦП, що зробило сигнальний і опорний входи суто резистивними. У результаті було отримано АЦП практично без циклу вибірки, або аналого-цифровий перетворювач окремого класу. Крім того, функція передачі сигналу АЦП цього класу імітує характеристику фільтра згладжування. Це означає, що АЦП, за своєю суттю, послаблює джерела завод. Завдяки технології CTSD АЦП перетворився на готовий до використання (plug-and-play) компонент.

Таким чином, АЦП CTSD спрощують проектування сигнального кола, забезпечуючи водночас системне рішення з тим самим рівнем продуктивності, що й традиційне сигнальне коло АЦП, а також такі переваги:

- підвищено надійність сигнального кола, що безпосередньо зумовлено використанням меншої кількості периферійних компонентів;

- відсутність побічних НЧ-складових у смузі, мала затримка і відмінне міжканальне фазове узгодження;
- простіший аналоговий інтерфейс, який не потребує вибору і точного налаштування буферів опорного сигналу драйверів, що підвищує щільність каналів;
- подолано обмеження швидкості передавання вихідних даних (ODR), що є функцією тактової частоти;
- забезпечено незалежне керування інтерфейсом зовнішнього цифрового контролера;
- менший розмір, і на 56% скорочено список матеріалів, що зменшує час виведення продукції на ринок.

### Література:

1. Application Note AN-282: Fundamentals of Sampled Data Systems. Analog Devices.
2. Driving Precision Converters: Selecting Voltage References and Amplifiers. Analog Devices.
3. Kester Walt. MT-021 Tutorial: ADC Architectures II: Successive Approximation ADCs. Analog Devices. 2009.
4. Sigma-Delta ADC Tutorial. Analog Devices.
5. Shaikh Wasim and Srikanth Nittala. AC and DC Data Acquisition Signal Chains Made Easy. Analog Dialogue. Vol. 54. No. 3. August. 2020.