

# EMBEDDED

л.7

Аналогова периферія

Палій Святослав



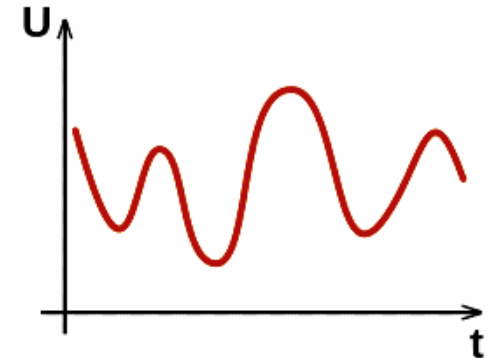
Наш світ не цифровий, і  
не дискретний в часі!

---

# Аналоговий сигнал

Аналоговий сигнал - це тип сигналу, який представляє дані як безперервну варіацію фізичної величини. Він може бути у вигляді електричного струму, звуку, світла та інших фізичних величин. Наприклад, звукові хвилі або радіохвилі можуть бути прикладами аналогових сигналів. У порівнянні з цифровими сигналами, які представляють дані у вигляді окремих дискретних значень, аналогові сигнали мають безперервний спектр значень.

Приклад аналогового сигнала



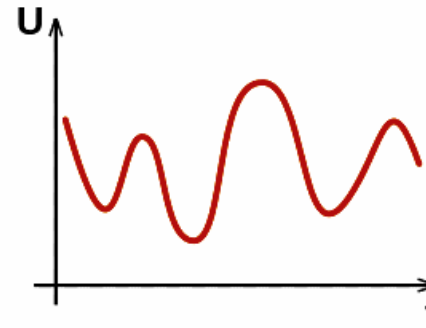
Ось декілька прикладів аналогових сигналів:

1. **Звукові хвилі** - наприклад, коли ви говорите або слухаєте музику.
2. **Радіохвилі** - використовуються для передачі сигналів радіо та телебачення.
3. **Світлові хвилі** - використовуються в оптичних волокнах для передачі даних, а також в пультах дистанційного управління.
4. **Температурні зміни** - звичайний термометр, який показує зміну температури в реальному часі.
5. **Електричні сигнали** - сигнали з датчиків, навіть наші м'язи та нерви керуються електричними сигналами.

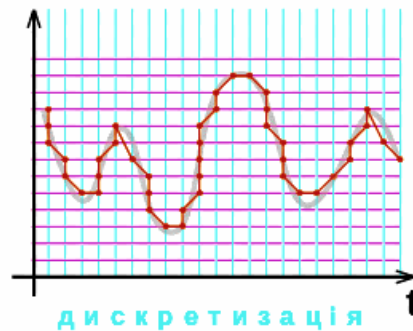
Як правило для взаємодії з мікроконтролерами сигнали приводяться до їх електричних еквівалентів.

# Перетворення аналогового сигналу до цифрового вигляду

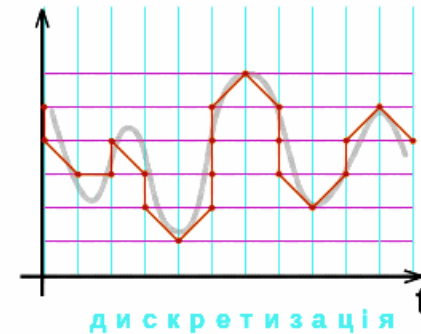
Приклад аналогового сигналу



Кодування сигналу у цифровий вигляд (висока якість)

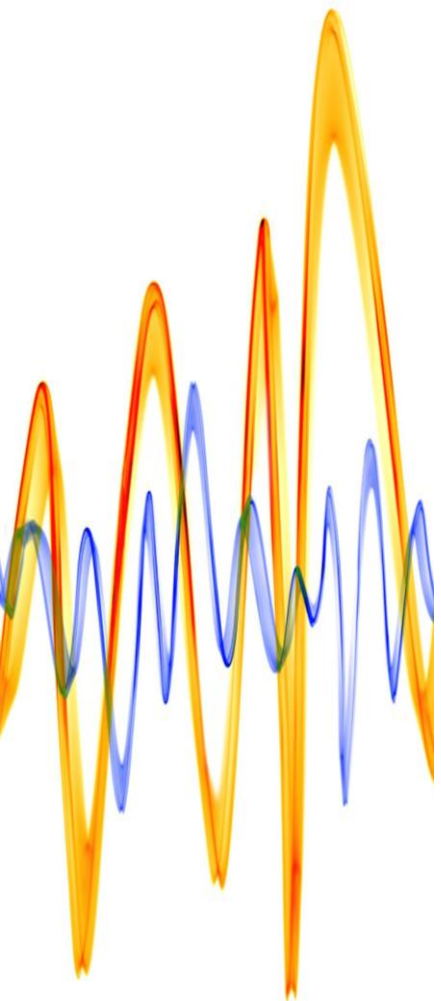


Кодування сигналу у цифровий вигляд (низька якість)



Аналоговий сигнал триває безперервно протягом усього часу. Він може бути представлений у вигляді синусоїдального коливання або у загальному випадку, розкладеним у ряд Фур'є, як сума синусоїдальних коливань з певними амплітудами та частотами. На відміну від аналогових сигналів, дискретні сигнали обмежені в часі та складаються з окремих імпульсів. Перевагою аналогових сигналів є відсутність невизначеності між відліками, яка існує у дискретних сигналах

# Характеристики аналогового сигналу



- **Амплітуда:** Це максимальний розмах значень сигналу. Для електричних сигналів вимірюється у вольтях або амперах.
- **Частота:** Це кількість коливань сигналу в секунду. Вимірюється у герцах (Гц).
- **Довжина хвилі:** Це відстань між двома послідовними піками або впадинами сигналу. Вона обернено пропорційна частоті.
- **Спектр:** Це представлення сигналу у частотній області, що показує, з яких частот складається сигнал.
- **Фаза:** Це початкова точка у часовій шкалі коливання сигналу. Вона визначає зміщення сигналу у часі.
- **Шум:** Небажані зміни у сигналі, які можуть вплинути на його якість і передачу.
- **SNR:** співвідношення сигнал/шум, рівень шуму (котрий може також додаватися каналом передачі по відношення до корисної частини сигналу)

## Переваги аналогових сигналів

Аналогові сигнали прості у обробці та передачі, а також рідні для реального світу що робить їх ідеальними для певних застосувань.

## Недоліки аналогових сигналів

Шум і спотворення притаманні аналоговим каналам та засобам обробки та можуть суттєво впливати на якість аналогових сигналів, знижуючи їх ефективність.

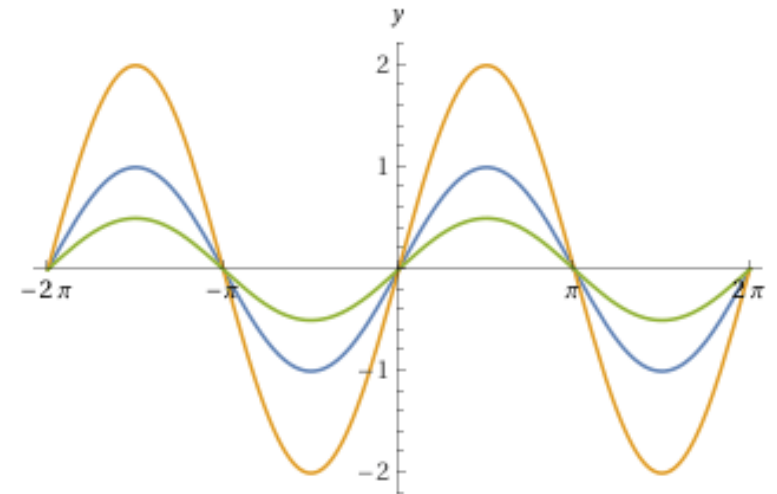
# Обробка аналогового сигналу

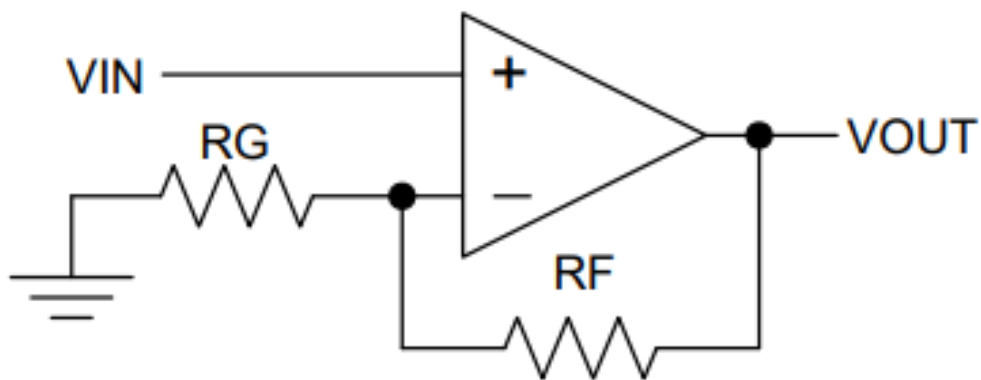
Зазвичай перед приведенням сигналу до цифрової форми сигнал потрібно «підігнати» під певні рамки, котрі відображають можливості цифрової системи сприйняти такий сигнал.

**Посилення (ампліфікація):** Це процес збільшення амплітуди (сили) сигналу. Ампліфікатори використовуються для посилення слабких сигналів, щоб їх можна було легше обробити або передати на відстань. Наприклад, підсилювач звуку збільшує амплітуду звукових хвиль, роблячи звук гучнішим.

**Послаблення (атенюація):** Це процес зменшення амплітуди (сили) сигналу. Атенюатори використовуються для зменшення сили сильних сигналів, щоб запобігти перевантаженню або навіть і пошкодженню обладнання.

**Застосування аналогових фільтрів:** таким способом можна вилучити частину спектру сигналу, котрий є радше шумом або не несе корисної інформації.





$$A = 1 + \frac{R_f}{R_g},$$

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)$$

## Операційний підсилювач OPA2134PA двоканальний DIP8 1шт

код: SKV414



ДОСТАВКА ПО УКРАЇНІ

6 МІСЯЦІВ ГАРАНТІЇ

ПРОКОНСУЛЬТУЄМО ДО І ПІСЛЯ ПРОДАЖУ

29 грн

в наявності

- 1 + КУПИТИ

[Купити в один клік](#)

10 голосувати

[Знайшли дешевше?](#)

Опис

Відгуки

Задати питання

Малощумний операційний підсилювач **OPA2134** (DIP-8) з ультранизьким рівнем спотворень і польовими транзисторами на вході. Призначений для посилення слабких сигналів в аудіотехніці, підсилювачах з великим входним опором в широкому діапазоні живлючої напруги.

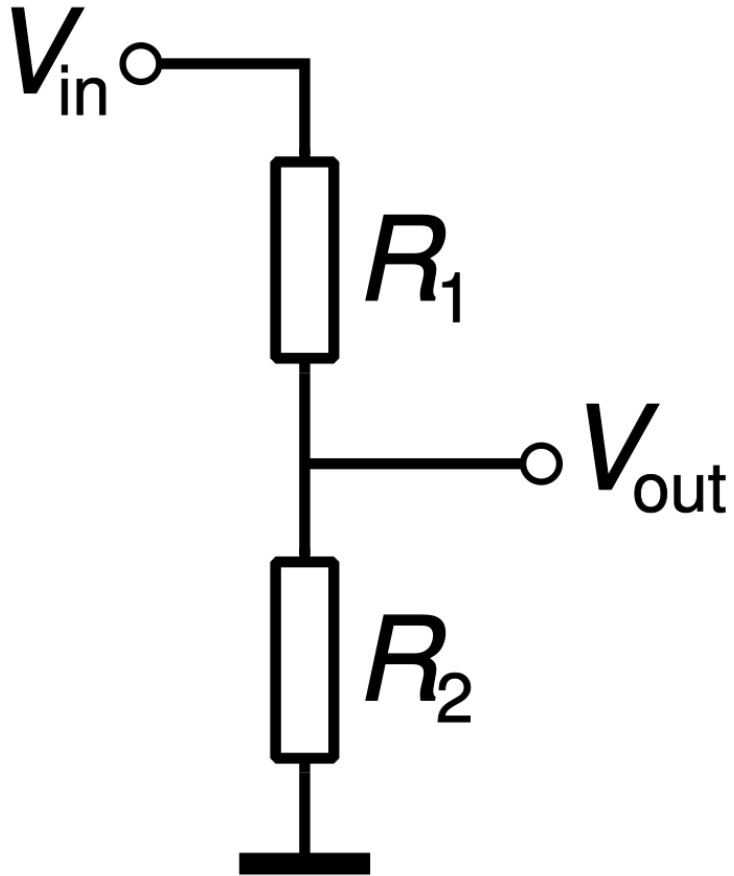
### Характеристики:

- Маркування: OP2134PA
- Корпус: PDIP-8
- Рівень спотворень: 0.00008% на навантаженні 2 кОм
- Вхідний струм: 5 пА
- Швидкість наростання вихідного сигналу: 20 В/мкс
- Частота одиничного посилення: 8 МГц
- Напруга живлення: від  $\pm 2.5$  до  $\pm 18$  В

### Посилання:

- [Даташит](#)

Найпростіша атенюація  
може виглядати ось так:

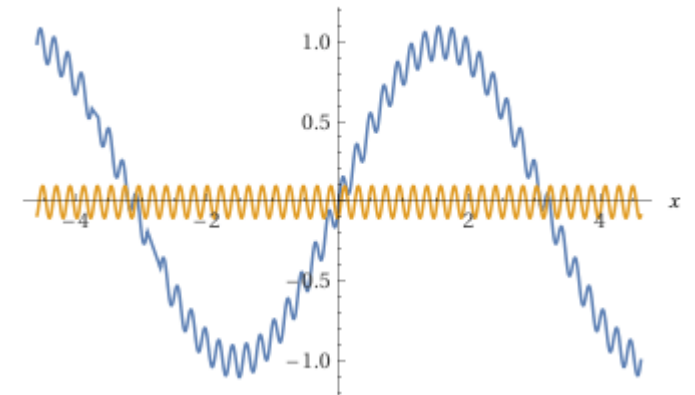
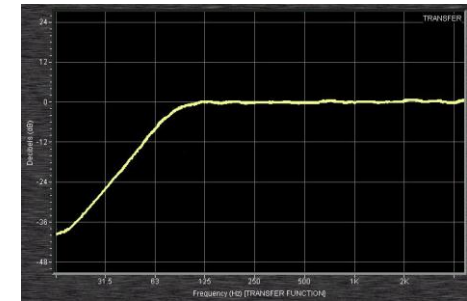
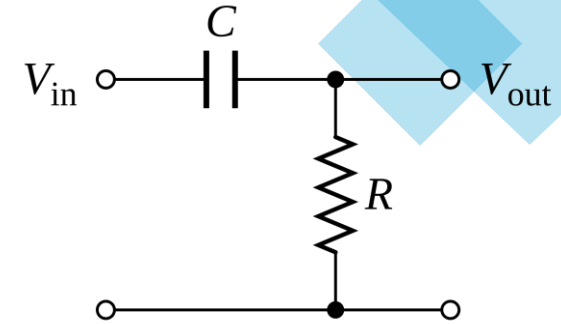
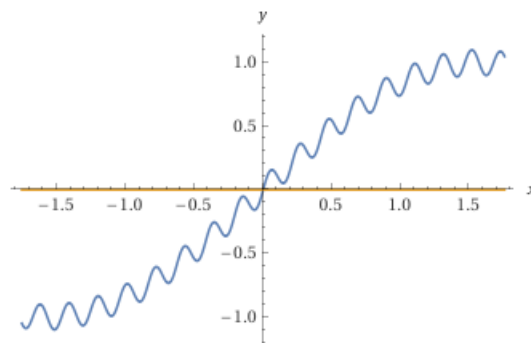
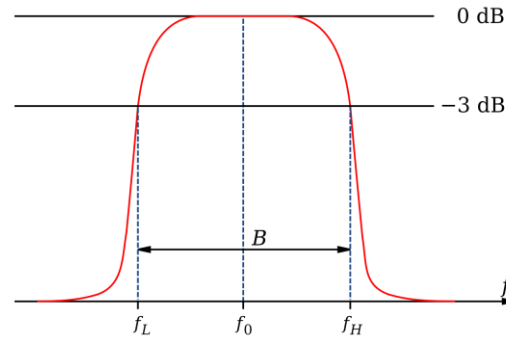
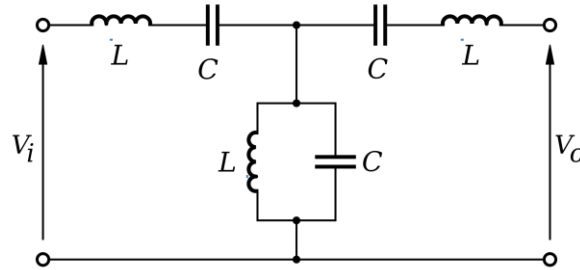
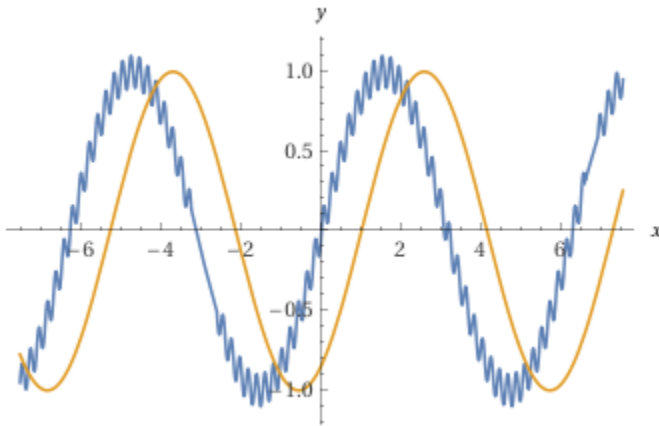
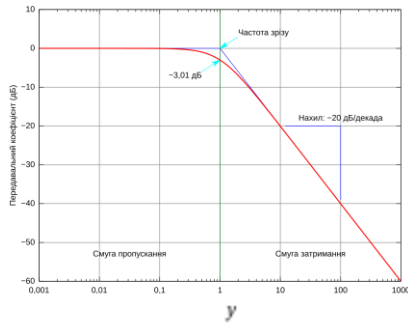
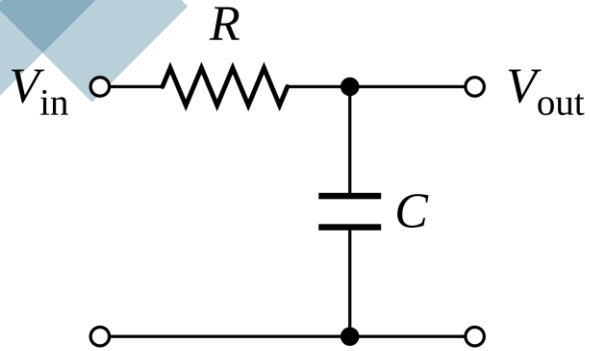


$$A = \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

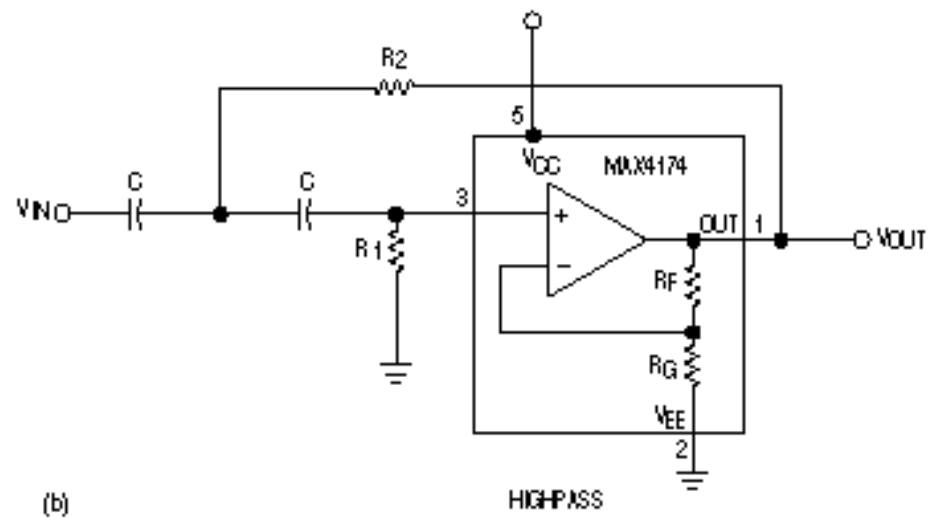
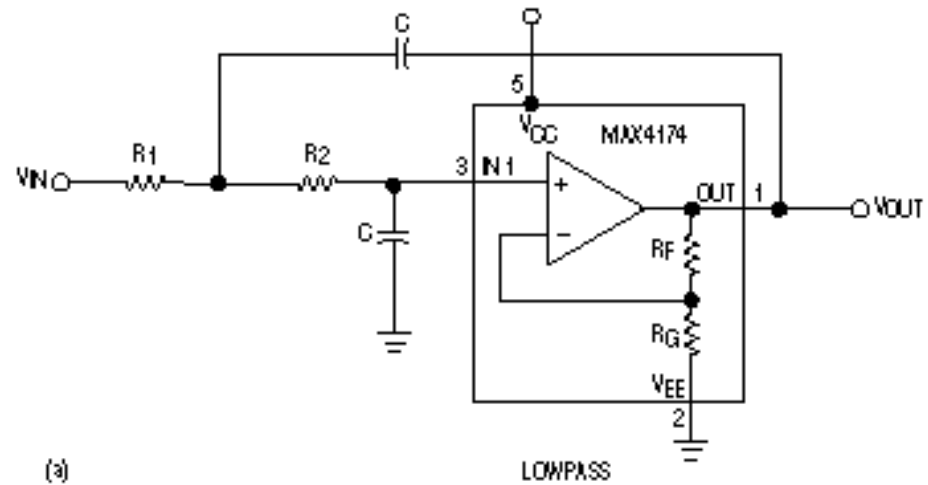


# Найпростіші фільтри



Дуже просто але трохи детальніше + online калькулятор

<https://myproject.com.ua/kalkuliator-reaktyvnoho-oporu-kondensatoriv-ta-kotushok.html>



В даному прикладі фільтр Батерворта.

При використанні операційних підсилювачів можна одночасно добитися ефекту посилення і фільтрації сигналу одночасно.

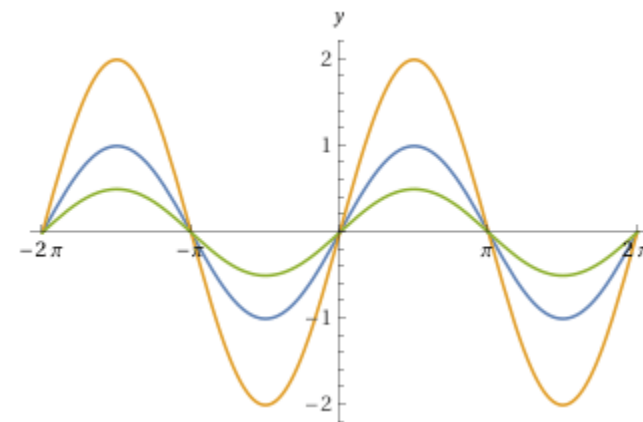
# Ключові інструменти

Зазвичай перед приведенням сигналу до цифрової форми сигнал потрібно «підігнати» під певні рамки, котрі відображають можливості цифрової системи сприйняти такий сигнал.

**Посилення (ампліфікація):** Це процес збільшення амплітуди (сили) сигналу. Ампліфікатори використовуються для посилення слабких сигналів, щоб їх можна було легше обробити або передати на відстань. Наприклад, підсилювач звуку збільшує амплітуду звукових хвиль, роблячи звук гучнішим.

**Послаблення (атенюація):** Це процес зменшення амплітуди (сили) сигналу. Атенюатори використовуються для зменшення сили сильних сигналів, щоб запобігти перевантаженню або навіть і пошкодженню обладнання.

**Застосування аналогових фільтрів:** таким способом можна вилучити частину спектру сигналу, котрий є радше шумом або не несе корисної інформації.

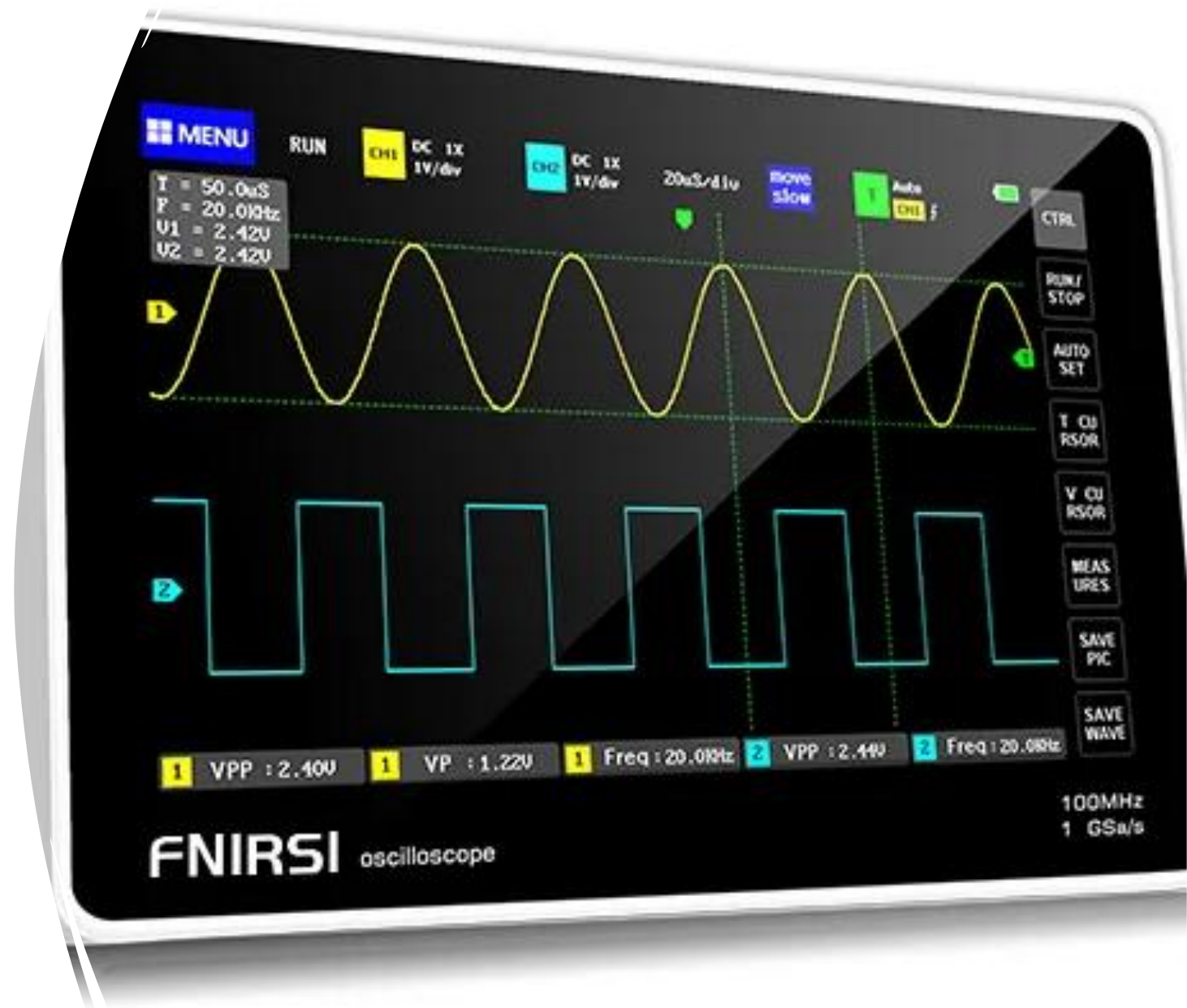


# Ключові інструменти

## Осцилограф

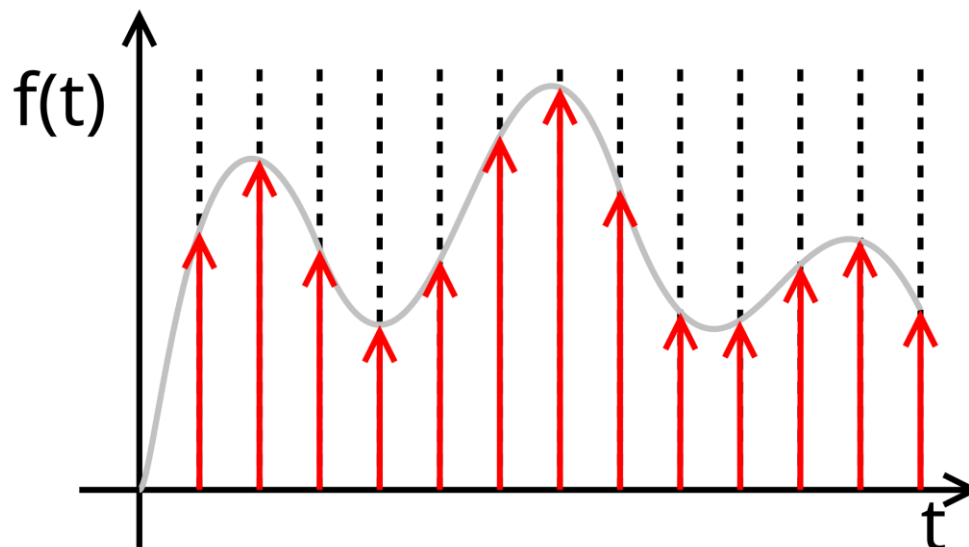
Генератор сигналів,

Аналізатор спектру

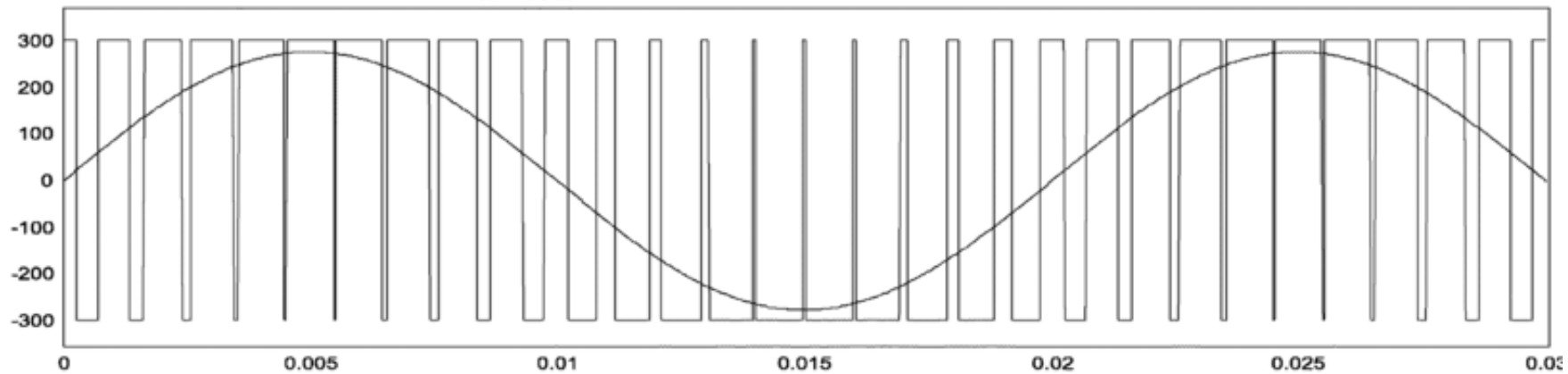


# Цифро-Аналогове Перетворення

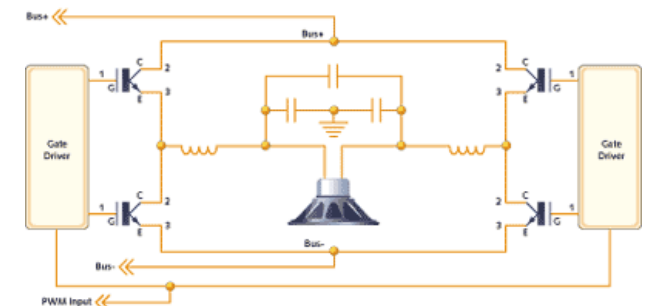
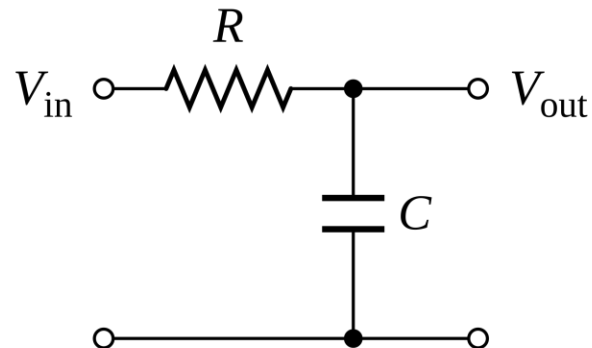
Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП, **DAC** — *Digital-to-Analog Converter*) — електронний пристрій для перетворення цифрового сигналу на аналоговий.



# PWM

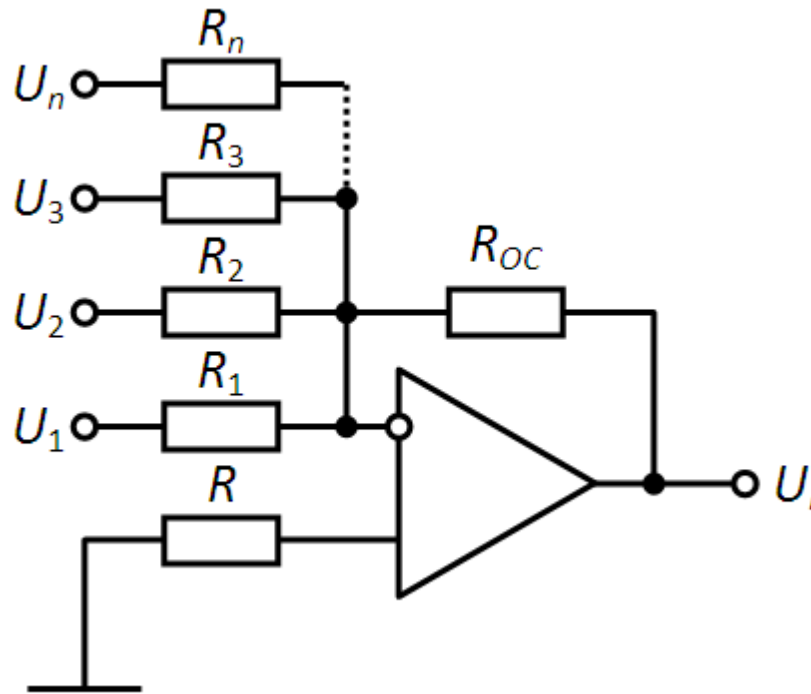


# Filter



В деяких випадках можна навіть обійтися без фільтра, якщо процес яким керують є достатньо повільним. Саме такий підхід реалізовано в Arduino за допомогою функції **analogWrite(pin, value)**

- DAC на принципі суматора струмів



$$R_2 = R_1 / 2$$

$$R_3 = R_2 / 2 = R_1 / 4$$

$$R_4 = R_3 / 2 = R_2 / 4 = R_1 / 8$$

Отже існують DAC на принципі

- ШІМ – дуже прості в реалізації
- Набору резисторів – точні та швидкі, складні для реалізації в мікросхемі
- Набору джерел струму – подібно до набору  $R$ , легше інтегруються
- Дельта-сигма модуляції (інтегруючі) – легко реалізуються, краще як ШІМ.
- Послідовного наближення - мало місця на кристалі, відносно повільні
- Повного набору резисторів – дуже точні але дорогі
- Гібридні (суміш вищевказаних методів)

# Основні параметри ЦАП

**Роздільна здатність** Кількість можливих рівнів виходу, які ЦАП призначений відтворювати. Зазвичай це вказується як кількість бітів, які він використовує, що є двійковим логарифмом кількості рівнів. Наприклад, 8-бітний ЦАП призначений для 256 ( $2^8$ ) рівнів. Роздільна здатність пов'язана з ефективною кількістю бітів, що є вимірюванням фактичної роздільної здатності, досягнутої ЦАП.

**Максимальна частота дискретизації** Максимальна швидкість, з якою схема ЦАП може працювати і все ще виробляти правильний вихід. Критерій Найквіста визначає зв'язок між частотою дискретизації та шириною смуги пропускання дискретизованого сигналу.

**Монотонність** Здатність аналогового виходу ЦАП рухатися лише в напрямку, в якому рухається цифровий вхід (тобто, якщо вхід збільшується, вихід не знижується перед тим, як встановити правильний вихід).

**Загальні гармонічні спотворення та шум (THD+N)** Вимірювання спотворень та шуму, введених у сигнал ЦАП. Це виражається у відсотках від загальної потужності небажаних гармонічних спотворень та шуму, що супроводжують бажаний сигнал.

**Динамічний діапазон** Вимірювання різниці між найбільшими та найменшими сигналами, які ЦАП може відтворити, виражене в децибелах. Це зазвичай пов'язано з роздільною здатністю та рівнем шуму.



# Критерій Найквіста (теорема Котельнікова)

## Теорема Найквіста-Шеннона

Якщо неперервний сигнал має спектр, обмежений частотою  $F_{\text{MAX}}$ , то його можна однозначно і без втрат відновити за дискретними відліками, узятими з частотою  $f_{\text{ДИСКР}} = 2F_{\text{MAX}}$

### Або обернено (критерій):

*Для того, щоб відновити сигнал за його відліками без втрат, необхідно, щоб частота дискретизації була хоча б удвічі більшою за максимальну частоту первинного неперервного сигналу.*

$$F_{\text{ДИСКР}} \geq 2F_{\text{MAX}}$$

Будь-який аналоговий сигнал можна відновити з якою завгодно точністю за його дискретними відліками, взятими з частотою щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту, якою обмежений спектр реального сигналу.


Якщо максимальна частота в сигналі перевищує половину частоти дискретизації, то способу відновити сигнал з дискретного в аналоговий без спотворення не існує.

Теорему сформулював Гаррі Найквіст 1928 року. 1933 року подібні дані опублікував В. О. Котельников

Модуль звукового I2S ЦАП на PCM5102 32-біт 384K для Raspberry Pi

код: DPC316

Додаткові категорії товару: [Периферія\\_розширення](#) | [Audio\\_звук\\_голос\\_mp3](#)



ДОСТАВКА ПО УКРАЇНІ

6 МІСЯЦІВ ГАРАНТІЇ

ПРОКОНСУЛЬТУЄМО ДО 1 ПІСЛЯ ПРОДАЖУ

166 грн

в наявності

- 1 +

КУПИТИ

[Купити в один клік](#)

★ ★ ★ ★ ★

4

голосувати

[Знайшли дешевше?](#)

Опис

Відгуки (22)

Задати питання

Модуль високоякісного звукового ЦАП на мікросхемі **PCM5102** призначений для використання з міні-комп'ютерами Raspberry Pi, Orange Pi і ін. Для використання їх у ролі аудіо та відео-програвачів.

Як відомо, звуковий вихід міні-комп'ютерів далекий від ідеалу, проте, розробники процесорів, на яких вони побудовані, передбачили на кристалі стандартний звуковий цифровий інтерфейс I2S для підключення додаткових зовнішніх ЦАП, використовуючи який можна підключити до виходу комп'ютера "дорослий" підсилювач з цифровим входом або плату з зовнішнім ЦАП, як, наприклад, дана плата. Для своїх розмірів та вартості модуль володіє відмінними характеристиками і дозволяє насолодитися якісним 24-біт 192 кГц звуком як у навушниках так і через додатковий підсилювач потужності.

Для підключення модуля використовується всього 5 дрітів(зліва номер контакту GPIO роз'єму Raspberry Pi):

- 04 - VCC - Напруга живлення 5 В
- 39 - GND - Загальний дріт
- 35 - LCK - Сигнал перемикання правий/лівий канал
- 40 - DIN - Послідовні дані
- 12 - BCK - Сигнал синхронізації

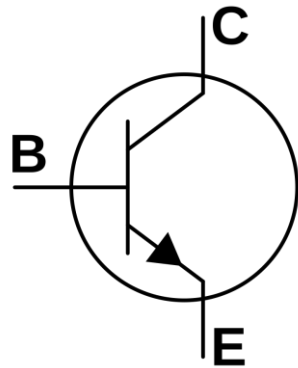
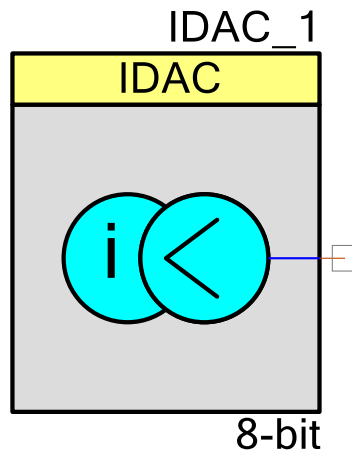
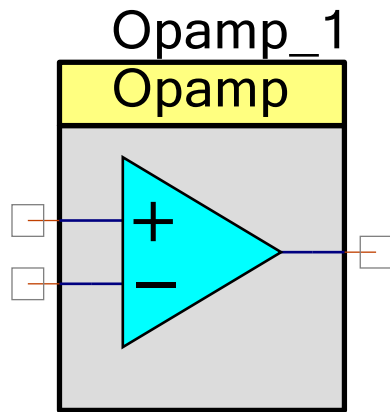
Характеристики:

- Максимальна розрядність ЦАП: 32-біт
- Максимальна частота дискретизації: 384КГц
- Максимальна частота дискретизації для 24-біт: 192 кГц
- Максимальна системна частота: 50МГц
- Роз'єм лінійного виходу: 3,5мм jack
- Мікросхема ЦАП: PCM5102a
- Інтерфейс: I2S
- Динамічний діапазон: 112db
- Співвідношення сигнал/шум: 112db
- Рівень третьої гармоніки: -93db
- Напруга живлення: 3.3В
- Розмір: 32x24x7 мм

Typical Performance (3.3 V Power Supply)

PARAMETER	PCM5102 / PCM5101 / PCM5100
SNR	112 / 106 / 100 dB
Dynamic range	112 / 106 / 100 dB
THD+N at -1 dBFS	-93/ -92 / -90 dB
Full-scale single-ended output	2.1 V <sub>RMS</sub> (GND center)
Normal 8× oversampling digital filter latency	20t <sub>S</sub>
Low latency 8× oversampling digital filter latency	3.5t <sub>S</sub>
Sampling frequency	8 kHz to 384 kHz
System clock multiples (f <sub>SCK</sub> ): 64, 128, 192, 256, 384, 512, 768, 1024, 1152, 1536, 2048, 3072	Up to 50 MHz

# Струмовий DAC



Configure 'IDAC\_1'

Name: IDAC\_1

Configure Built-in

Polarity

☐ Positive (Source)

☒ Negative (Sink)

Resolution

☒ 8-bit

☐ 7-bit

Value

uA: 144.0

8 bit hex: 78

Note: changing any value field recalculates the others

Range

☒ 0-306 uA (1.2 uA/bit)

☐ 0-612 uA (2.4 uA/bit)

Datasheet OK Apply Cancel

# Аналогово-Цифровий Перетворювач

---

- **Аналого-цифровий перетворювач** (АЦП, *Analog-to-digital converter, ADC*) — пристрій, що перетворює вхідний аналоговий сигнал в дискретний (цифровий) код, який кількісно характеризує моментне значення вхідного сигналу. Обернений за функцією до цифро-аналогового перетворювача.
- **Розрядність** - кількість дискретних значень, які перетворювач може видати на виході. Вимірюється в бітах. Наприклад, АЦП, здатний видати 256 дискретних значень, має розрядність 8 бітів. Часто зустрічаються 10-бітні, 12-бітні АЦП, тобто не кратні розміру байта. Ціна розряду може бути також визначена в величинах вхідного сигналу, наприклад, у вольтях. Для діапазон вхідних значень = від 0 до 10 вольт та розрядності АЦП 8 бітів маємо ціну розряду  $10\text{В} / 256 = 0.039$  вольт
- **Ефективна кількість розрядів** (effective number of bits — ENOB), як правило може бути меншою, ніж реальна розрядність АЦП. При перетворенні сильно зашумленого сигналу молодші біти вихідного коду практично непридатні, оскільки містять шум. Для досягнення заявленої розрядності співвідношення С/Ш вхідного сигналу повинне бути приблизно 6 дБ на кожен біт розрядності.
- **Лінійні та нелінійні АЦП** – в лінійних АЦП ціна кожного розряду є однаковою, тобто аналоговий вхід пов'язаний з цифровим кодом лінійною пропорцією. В нелінійних АЦП вхід може бути пов'язаний з цифровим кодом за нелінійним, наприклад логарифмічним законом. Логарифмічні АЦП мають дуже великий динамічний діапазон і ефективно застосовуються при роботі з обробкою голосу.
- **Точність** - Усім АЦП властиві помилки які є наслідком фізичної недосконалості АЦП. Це призводить до того, що передавальна характеристика відрізняється від бажаної функції перетворення. Важливими параметрами, що описують точність, є інтегральна нелінійність (INL) і диференціальна нелінійність (DNL).
- **Частота дискретизації** – Максимальна швидкість, з якою схема АЦП може працювати і все ще виробляти правильний код. Так само як і в ЦАП Критерій Найквіста визначає зв'язок між частотою дискретизації та шириною смуги пропускання сигналу.

# Типи АЦП

- АЦП прямого перетворення або паралельний АЦП
- АЦП **послідовного наближення** або АЦП з порозрядним врівноваженням
- АЦП диференціального кодування (*delta-encoded ADC*)
- АЦП порівняння з зубчастим сигналом
- АЦП Уілкінсона
- Інтегруючий АЦП
- АЦП з урівноваженням заряду
- Двошвидкісний АЦП.
- Конвеєрні АЦП
- **Дельта-Сигма АЦП**

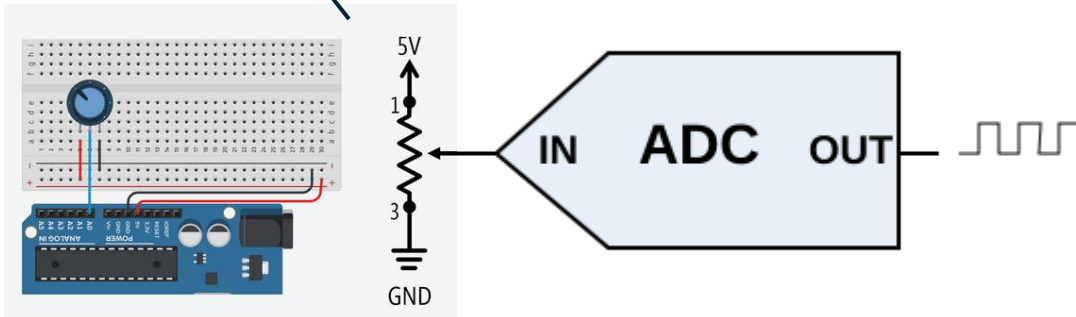
Параметр	SAR АЦП	Delta-Sigma АЦП
Принцип роботи	Послідовне наближення	Модуляція дельта-сигми
Швидкість	Висока	Низька-середня
Роздільна здатність	До 16 біт	До 24 біт
Енергоспоживання	Низьке	Високе
Застосування	Осцилоскопи, системи реального часу	Аудіо, високоточні вимірювання

Детальніше тут:

[https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналого-цифровий\\_перетворювач](https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналого-цифровий_перетворювач)

# Джерело опори АЦП (Reference)

Параметр	Ratiometric АЦП	Reference АЦП
Принцип роботи	Вимірювання відносних значень	Вимірювання відносно стабільного сигналу
Застосування	Датчики, потенціометри	Високоточні вимірювальні пристрої
Залежність від коливань живлення	Низька	Висока
Точність	Відносна точність	Висока абсолютна точність



## Ultra-Small, Low-Power, 12-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference

Check for Samples: [ADS1013](#) [ADS1014](#) [ADS1015](#)

### FEATURES

- **ULTRA-SMALL QFN PACKAGE:**  
2mm × 1.5mm × 0.4mm
- **WIDE SUPPLY RANGE:** 2.0V to 5.5V
- **LOW CURRENT CONSUMPTION:**  
Continuous Mode: Only 150µA  
Single-Shot Mode: Auto Shut-Down
- **PROGRAMMABLE DATA RATE:**  
128SPS to 3.3kSPS
- **INTERNAL LOW-DRIFT VOLTAGE REFERENCE**
- **INTERNAL OSCILLATOR**
- **INTERNAL PGA**
- **I<sup>2</sup>C™ INTERFACE:** Pin-Selectable Addresses
- **FOUR SINGLE-ENDED OR TWO DIFFERENTIAL INPUTS (ADS1015)**
- **PROGRAMMABLE COMPARATOR (ADS1014 and ADS1015)**

### APPLICATIONS

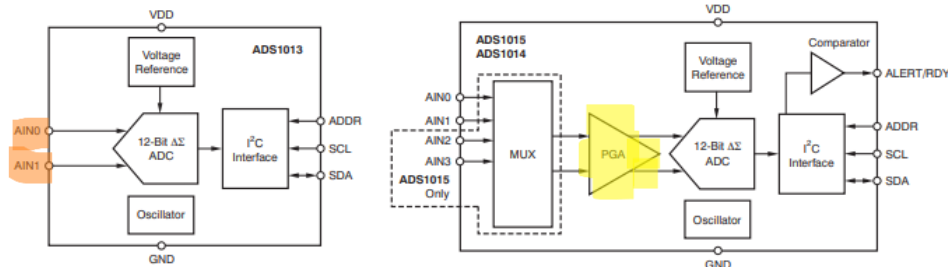
- **PORTABLE INSTRUMENTATION**
- **CONSUMER GOODS**
- **BATTERY MONITORING**
- **TEMPERATURE MEASUREMENT**
- **FACTORY AUTOMATION AND PROCESS CONTROLS**

### DESCRIPTION

The ADS1013, ADS1014, and ADS1015 are precision analog-to-digital converters (ADCs) with 12 bits of resolution offered in an ultra-small, leadless QFN-10 package or an MSOP-10 package. The ADS1013/4/5 are designed with precision, power, and ease of implementation in mind. The ADS1013/4/5 feature an onboard reference and oscillator. Data are transferred via an I<sup>2</sup>C-compatible serial interface; four I<sup>2</sup>C slave addresses can be selected. The ADS1013/4/5 operate from a single power supply ranging from 2.0V to 5.5V.

The ADS1013/4/5 can perform conversions at rates up to 3300 samples per second (SPS). An onboard PGA is available on the ADS1014 and ADS1015 that offers input ranges from the supply to as low as ±256mV, allowing both large and small signals to be measured with high resolution. The ADS1015 also features an input multiplexer (MUX) that provides two differential or four single-ended inputs.

The ADS1013/4/5 operate either in continuous conversion mode or a single-shot mode that automatically powers down after a conversion and greatly reduces current consumption during idle periods. The ADS1013/4/5 are specified from –40°C to +125°C.



### Configure 'ADC\_SAR\_Seq\_1'

Name:

#### General

#### Channels

#### Built-in

#### Timing

- ☒ Channel sample rate (SPS):  [13889 - 250000] SPS
- ☐ Clock frequency (kHz):  [1000 - 18000] kHz
- Actual sample rate per channel: 166666 SPS
- Actual clock frequency: 12000 kHz

#### Input range

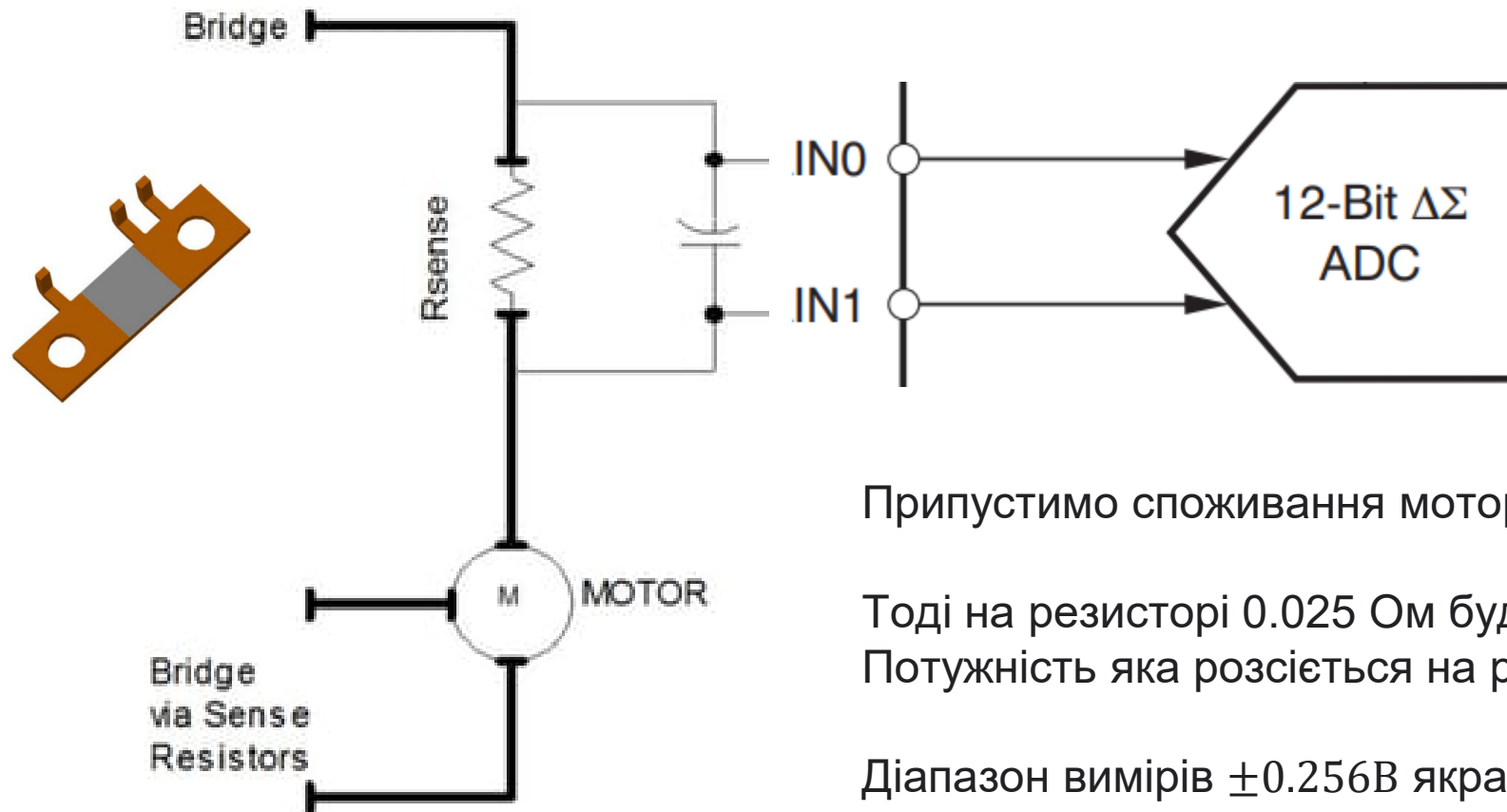
- Vref select:
- Vref value (V):
- Single ended negative input:
- Differential mode range:
- Single ended mode range:

#### Interrupt limits

- Low limit (hex):  High limit (hex):

[Datasheet](#)

# Диференційний вхід



Припустимо споживання мотора 10А

Тоді на резисторі 0.025 Ом буде падіння 0.25В

Потужність яка розсіється на резисторі буде 2.5Вт

Діапазон вимірів  $\pm 0.256\text{В}$  якраз дасть нам можливість вимірювати струм мотора до 10А з невеликим запасом при обертанні в обидві сторони.



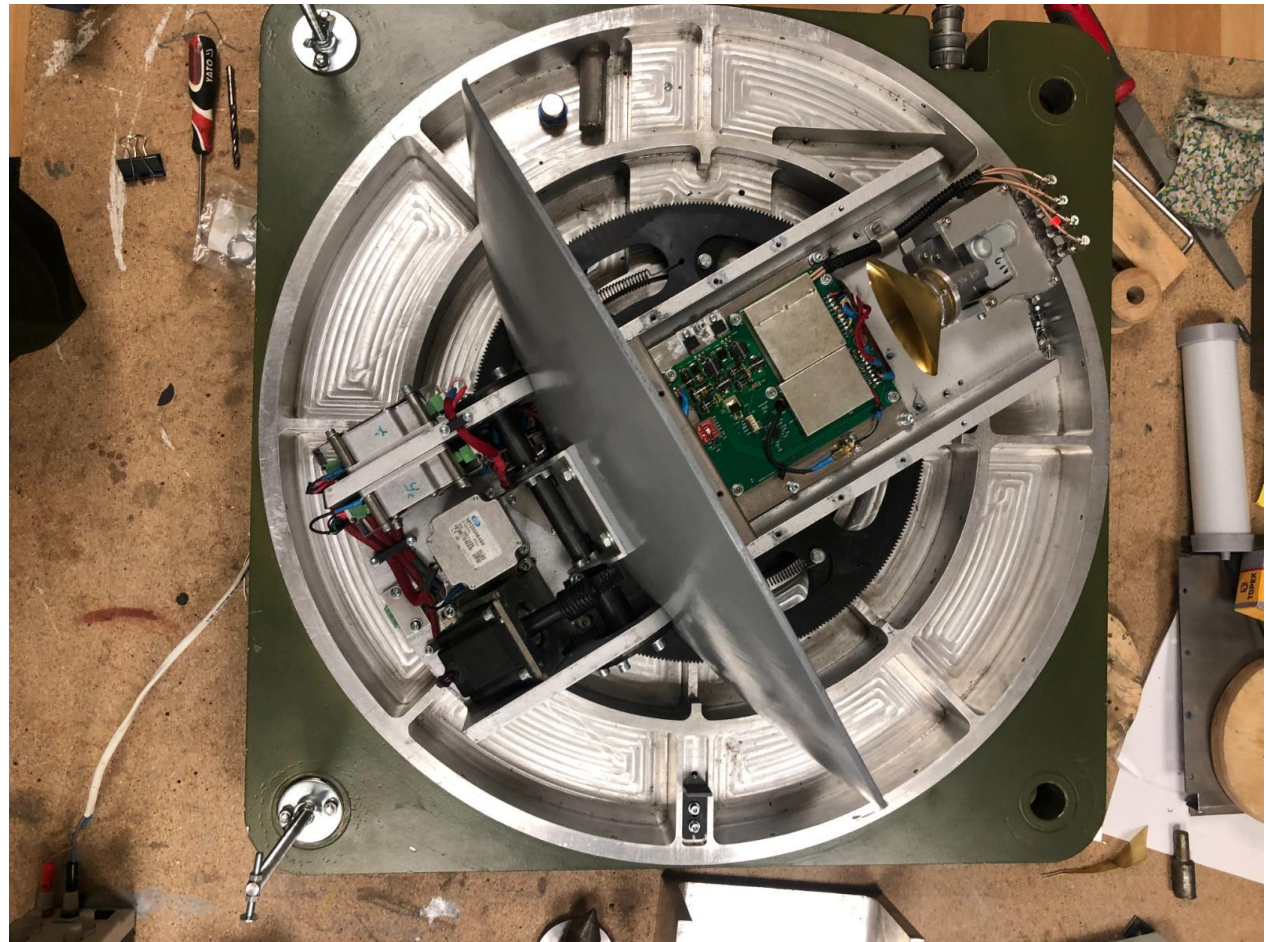
# Синхронність

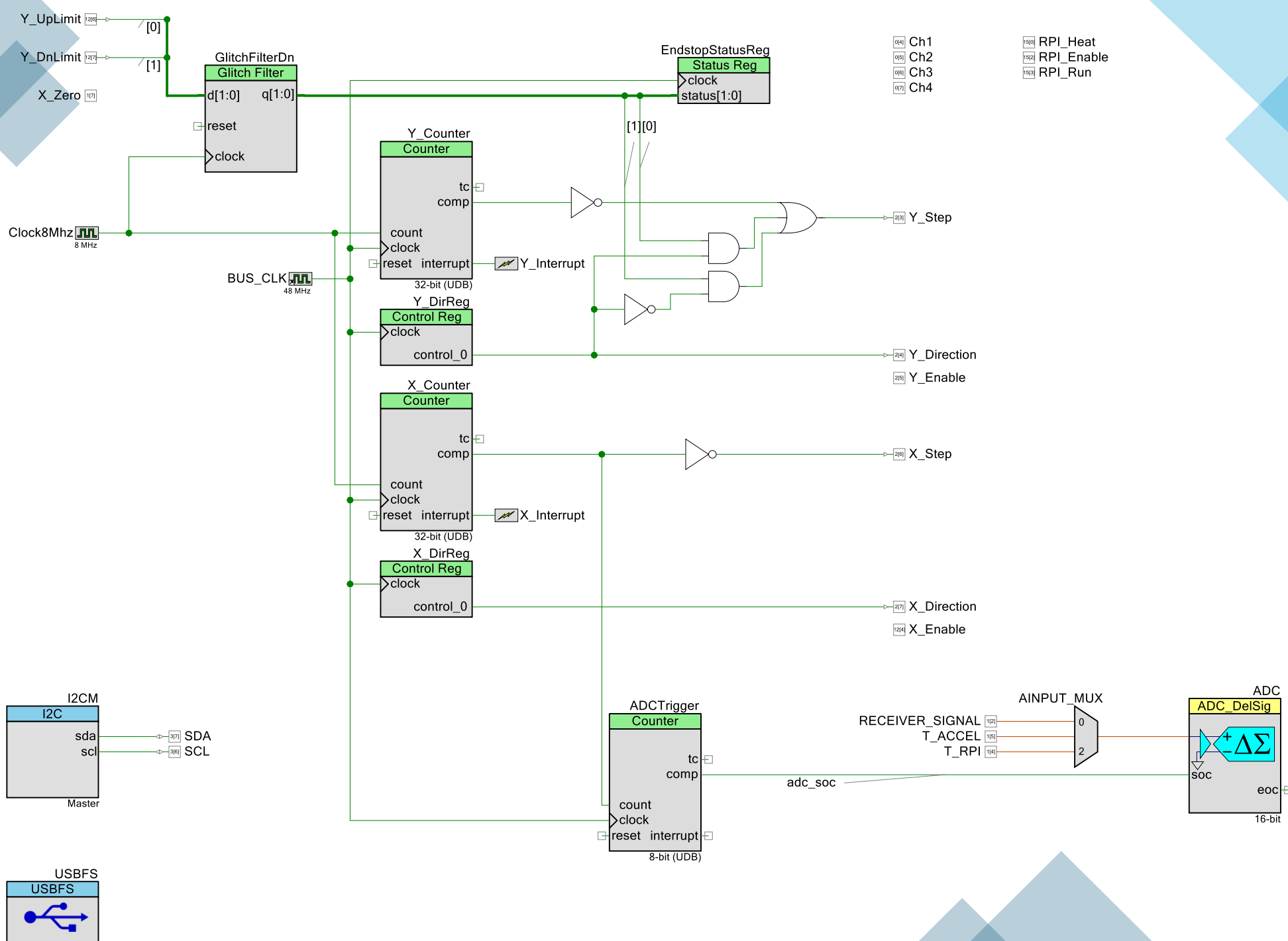
Доволі часто потрібно дотримуватися синхронності або до часу або до якихось інших подій в системі.

Наприклад при роботі зі звуком порушення рівномірності вимірювання призведе до невиправних спотворень звуку.

В конкретному приладі була необхідність синхронізувати вимірювання АЦП до кута повороту антени.

**Синхронізація реалізовується за допомогою сигналу SOC (Start-Of-Conversion)**









Щиро дякую!