

# ЦИФРОВА СХЕМОТЕХНІКА

## ЗАНЯТТЯ 10. ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ



# ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, НАВІЩО?

Уявіть світ, де цифри так і залишаються цифрами, не знаходячи свого втілення в плавних вигинах хвиль, у теплих нотах музики, у реальних образах на екрані. Світ, де людський слух не може почути ніжний гітарний перебір із цифрового файлу, а очі бачать лише код, а не кольори й форми.

Цифро-аналоговий перетворювач — це міст між двома реальностями. Він перетворює суху, дискретну мову машин у м'яку і неперервну гармонію, зрозумілу нашому сприйняттю. Без нього сучасна музика залишилася б лише набором чисел у пам'яті комп'ютера, а голос у телефоні звучав би не як співбесідник, а як нерозбірливий потік одиниць і нулів.

Без ЦАП технологічний прогрес залишився б неповним. Ми могли б створювати ідеальні цифрові моделі, але вони б ніколи не виходили за межі обчислень. Реальність стала б цифровою в найгіршому сенсі — без звуку, без плавності, без живого дотику до того, що ми любимо і сприймаємо природним.

ЦАП — це не просто компонент електронної схеми. Це доказ того, що цифровий світ завжди прагне з'єднатися з аналоговим, так само як людина прагне зрозуміти світ не лише через цифри, а й через відчуття.

*Графоман Олег С*

## Instructions for Use



# ВИЗНАЧЕННЯ ЦАП

---

**Цифро-аналоговий перетворювач** (ЦАП, англ. DAC — Digital-to-Analog Converter) — це електронний пристрій, який перетворює цифровий код у неперервний аналоговий сигнал.

**ЦАП** працює за принципом створення напруги або струму, пропорційного цифровому коду. Розрядність перетворювача визначає кількість рівнів сигналу, які він може відтворити, а отже, впливає на точність вихідного аналогового сигналу.

## Призначення:

- Відтворення аналогового сигналу з цифрового представлення
- Формування сигналів для керування аналоговими пристроями
- Генерація сигналів у системах зв'язку та автоматизації

## Сфери застосування:

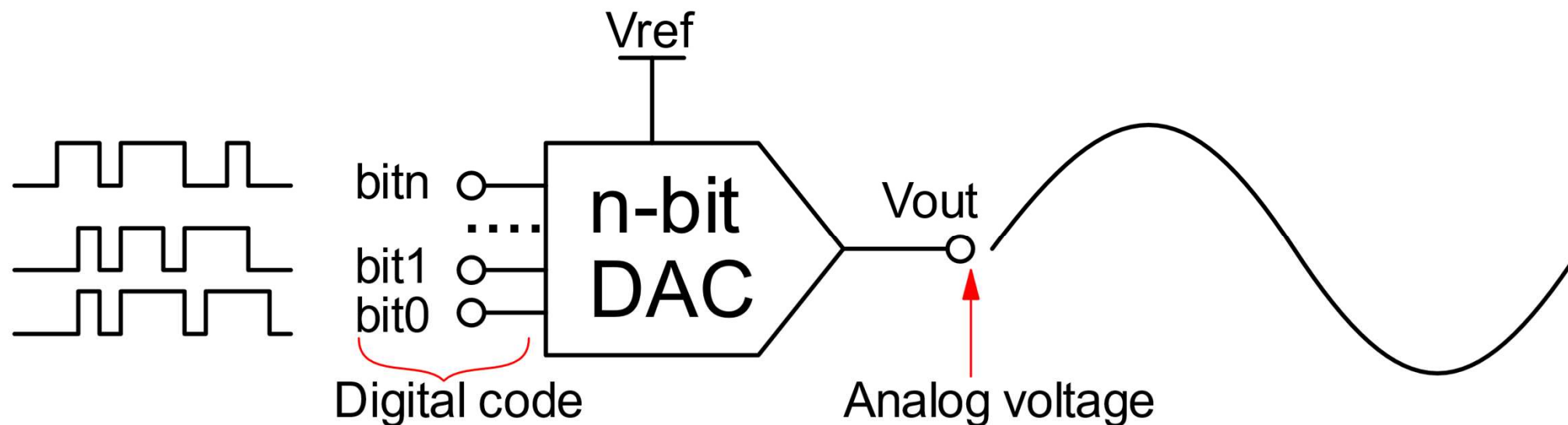
- **Аудіосистеми** — використовується в звукових картах, аудіоплеєрах та цифрових музичних інструментах
- **Відеотехніка** — для перетворення цифрових зображень у аналогові (старіші телевізори, відеокамери)
- **Телекомунікації** — застосовується у радіозв'язку, передавачах сигналів
- **Мікроконтролери** — для керування двигунами, дисплеями, сенсорами
- **Осцилографи та вимірювальні прилади** — використовуються для точного відтворення сигналів

# ПРИНЦИП РОБОТИ ЦАП

Як це працює:

1. **Дискретний вхідний код** (наприклад, 8-бітове значення 10101100) надходить у ЦАП.
2. **Генерується відповідний рівень напруги** – чим більше значення, тим вища вихідна напруга.
3. **Згладжування сигналу** – щоб уникнути різких стрибків між дискретними рівнями, використовуються фільтри низьких частот.

У результаті отримуємо плавну аналогову хвилю, яку можна передати на динаміки, підсилювачі чи інші аналогові пристрої.

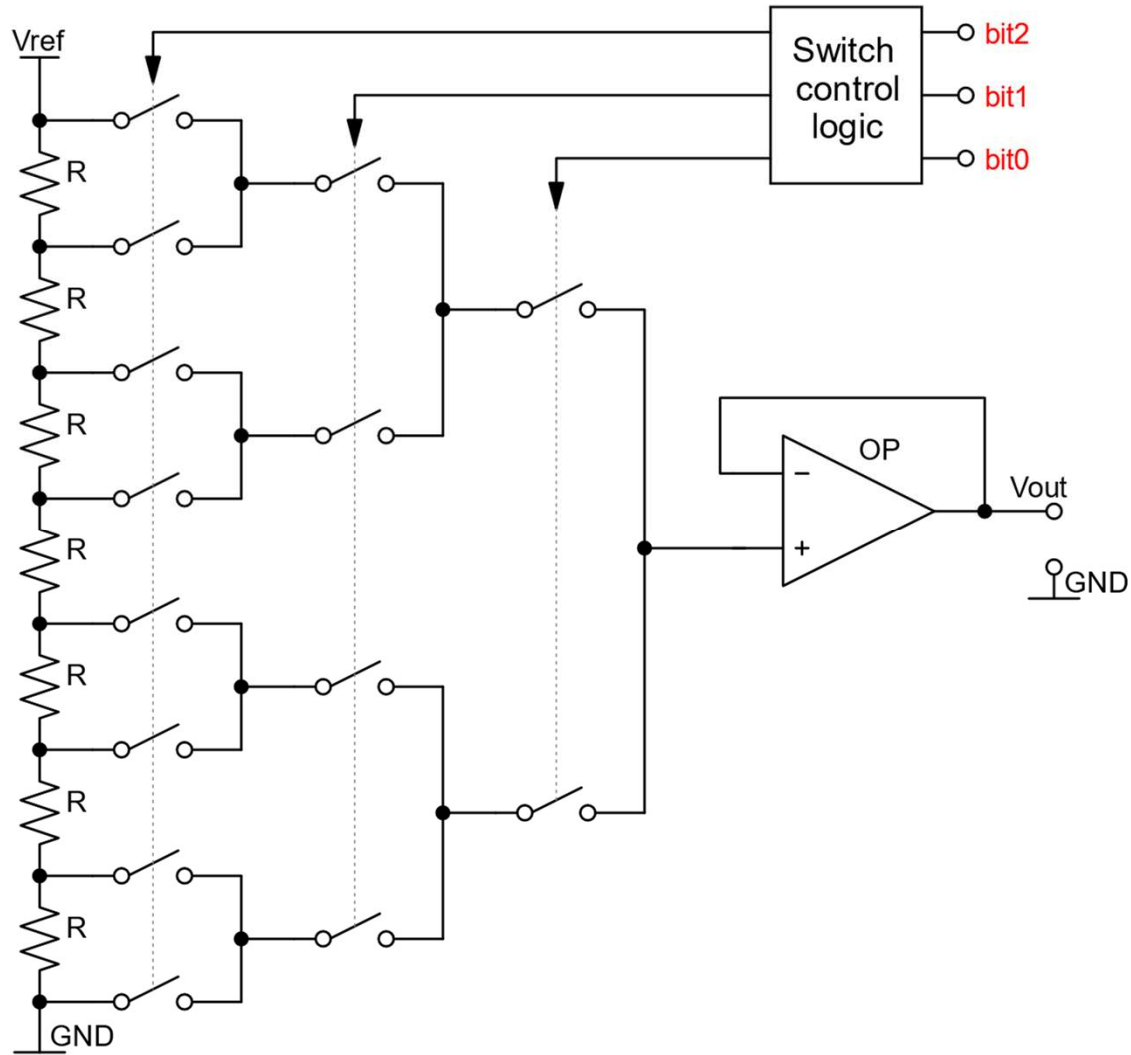


# ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦАП

- 1. Розрядність (Resolution).** Визначає, скільки рівнів може відтворювати ЦАП. (**8 біт** → 256 рівнів, **12 біт** → 4096, рівнів, **16 біт** → 65 536 рівнів, **24 біт** → 16 777 216 рівнів, **32 біт** → 4 294 967 296)
- 2. Опорна напруга (Reference voltage, Vref).** Максимальна напруга на виході ЦАП.  $LSB = V_{ref} / (2^N)$ , де N – розрядність ЦАП.
- 3. Швидкодія (Sampling Rate/Conversion Rate).** Визначає, скільки разів за секунду ЦАП може перетворити цифрові дані в аналоговий сигнал, наприклад для аудіо сигналу є стандарти 44.1 кГц, 48 кГц, 96 кГц; для відео чи радіозв'язку 1-100+ МГц (<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/2895fa.pdf>)
- 4. Точність (Integral & Differential Nonlinearity, Noise, Offset):**
  - **Лінійність** (наскільки реальна вихідна напруга відповідає теоретичним значенням)  
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-dnl-and-inl-specifications-of-a-digital-to-analog-converter/>
  - **Шуми** (Quantization Noise, Thermal Noise(Johnson-Nyquist Noise), Crosstalk Noise, Power Supply Noise)
  - **Температурна стабільність** (деякі ЦАП змінюють характеристики при нагріванні)



# STRING DAC



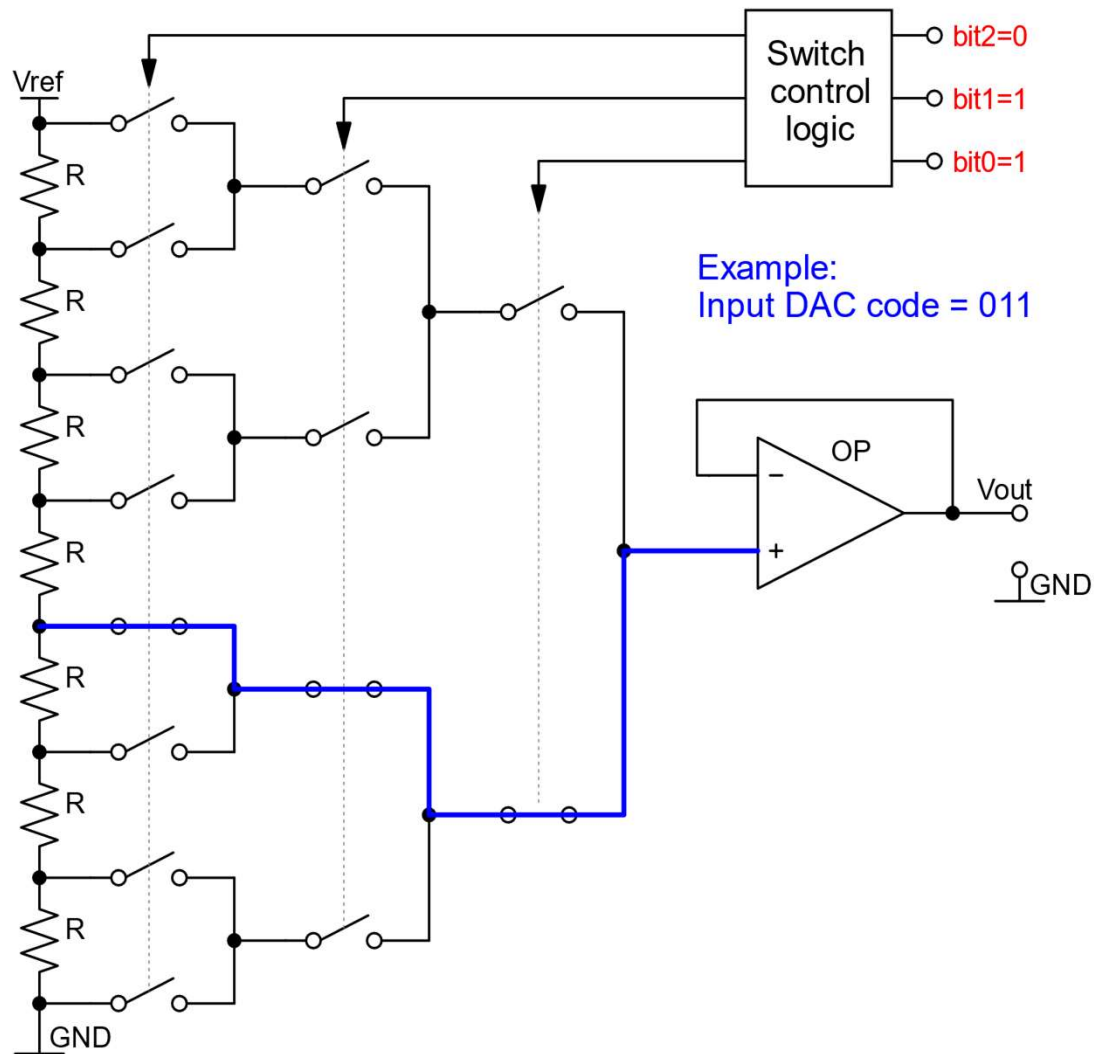
## Принцип роботи

**String DAC** (рядковий ЦАП або ЦАП на основі резисторного ланцюжка) побудований на послідовному ланцюжку однакових резисторів, які створюють рівномірно поділені рівні напруги.

### ◆ Як це працює?

1. Вхідний цифровий код вибирає один із вузлів ланцюжка резисторів.
2. Цей вузол підключається до виходу за допомогою аналогового мультиплексора.
3. На виході отримуємо відповідну напругу, яка відповідає введеному цифровому значенню.
4. ОП слугує буфером (повтроювач) отриманої на резисторах напруги

# STRING DAC



## Приклад (3-бітний String DAC):

- є **7 резисторів**, які ділять напругу живлення на **8 рівнів**.
- цифровий код **000** підключає перший вузол (найменша напруга).
- цифровий код **111** підключає останній вузол (найвища напруга, Vref).
- проміжні значення дають відповідні рівні напруги.

Приклад. Код **011** буде підключати 4 вузол, що дасть на виході напругу:

$$V_{out} = \frac{3}{7} V_{ref}$$

# STRING DAC

---

## Переваги String DAC

- ✓ **Висока лінійність** – оскільки всі резистори однакові, відхилення напруги між сусідніми рівнями мінімальні.
- ✓ **Простота реалізації** – схема містить лише резисторний ланцюжок і мультиплексор.
- ✓ **Відсутність шумів від перемикування бітів** – немає потреби в операціях додавання чи зважування, як у R-2R DAC.

## Недоліки String DAC

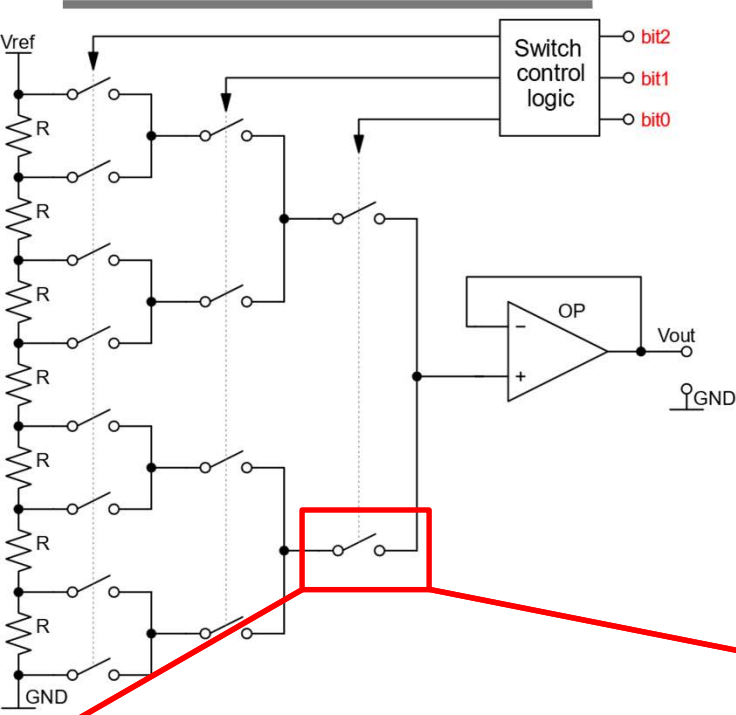
- ✗ **Експоненційне зростання кількості елементів** – для  $n$ -бітного ЦАП необхідно  $2^n - 1$  (або  $2^n$  залежно від схеми) резисторів. Це робить схему складною і дорогою для високих розрядностей (наприклад, 16 або 24 біти).
- ✗ **Складність і дороговизна при високій розрядності** – велика кількість резисторів та мультиплексорів робить схему громіздкою, що ускладнює її виробництво та підвищує вартість.
- ✗ **Чутливість до теплових ефектів** – зміни температури можуть впливати на характеристики резисторів, що призводить до зміщення напруги і похибок у результаті.



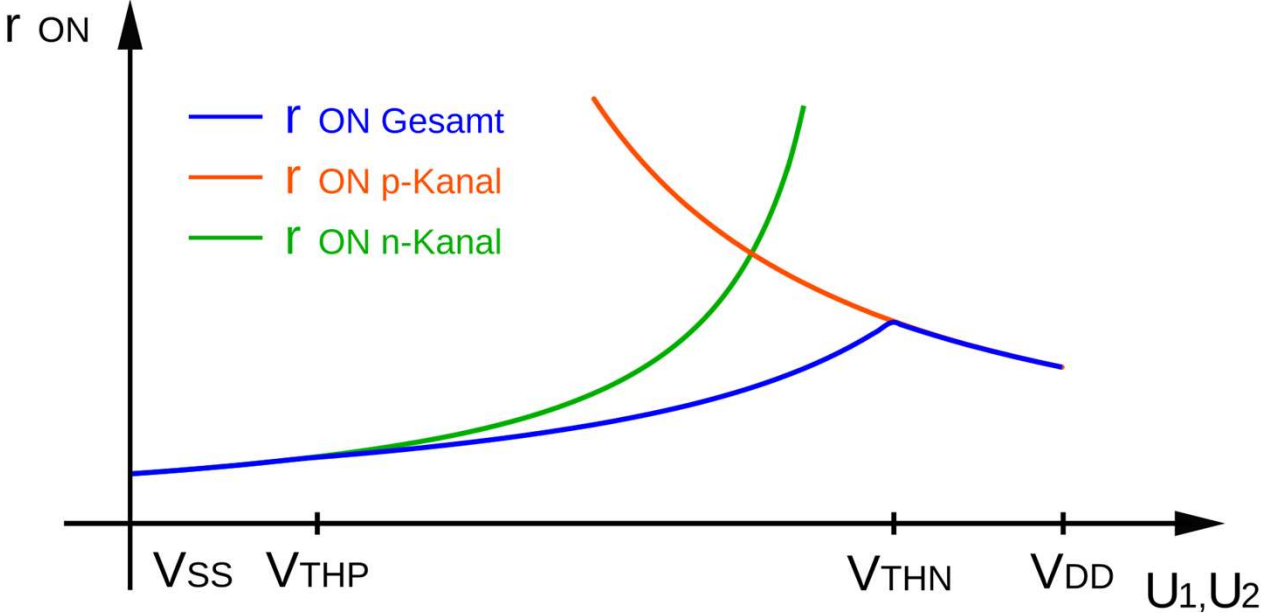
---

Тут починається «ліричний відступ»

# OFF TOPIC. TRANSMISSION GATE



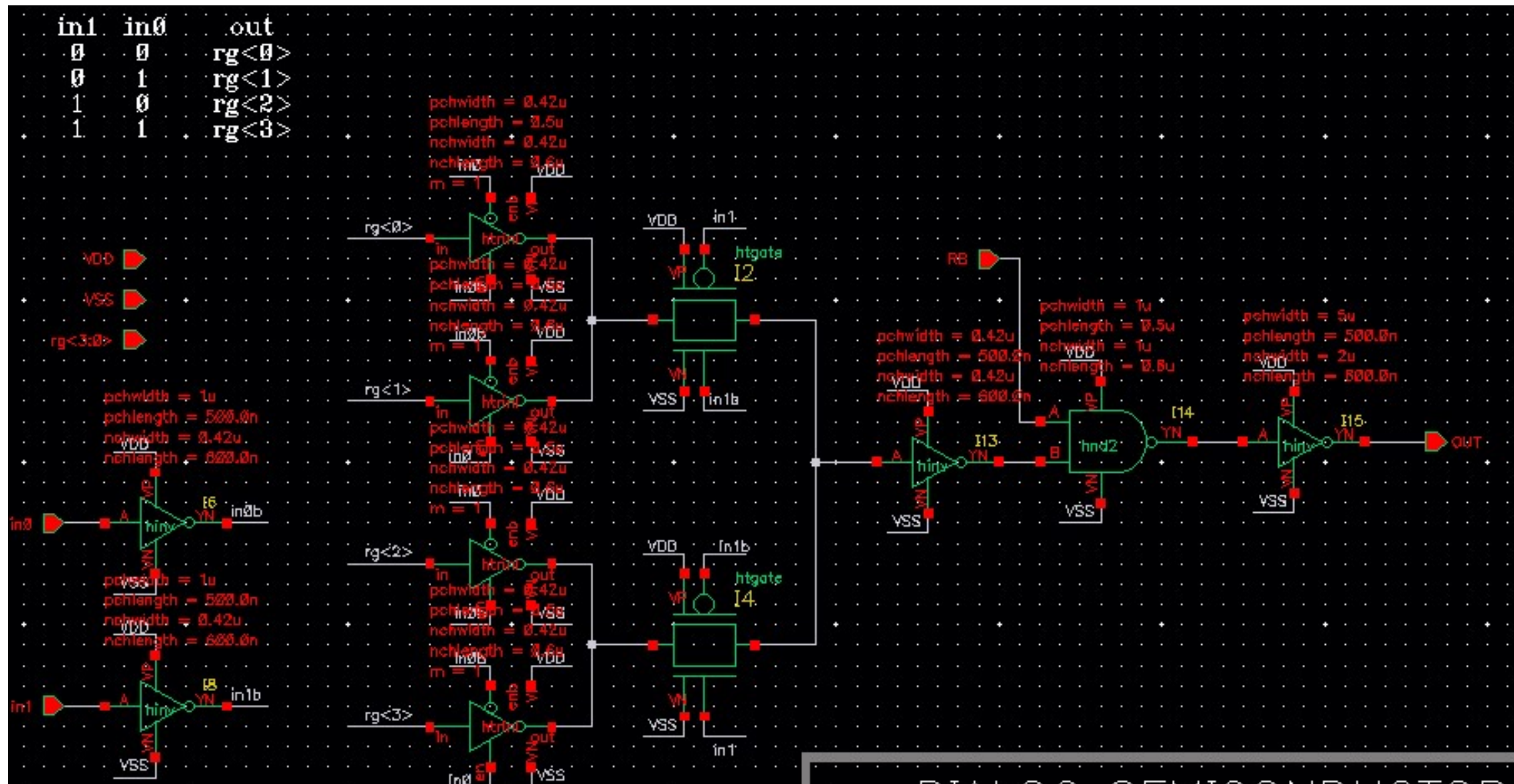
Передавальний вентиль (TG) — це аналоговий вентиль, подібний до реле, який може проводити в обох напрямках або блокувати керуючим сигналом майже з будь-яким потенціалом напруги. Це комутатор на основі CMOS, у якому PMOS пропускає сильний 1, але поганий 0, а NMOS пропускає сильний 0, але поганий 1. І PMOS, і NMOS працюють одночасно.



Transmission Logic Circuit	Graphical Symbol

Характеристика опору TG.  $V_{THN}$  і  $V_{THP}$  позначають ті положення, в яких напруга, що перемикається, досягає потенціалу, де досягається порогова напруга відповідного транзистора.

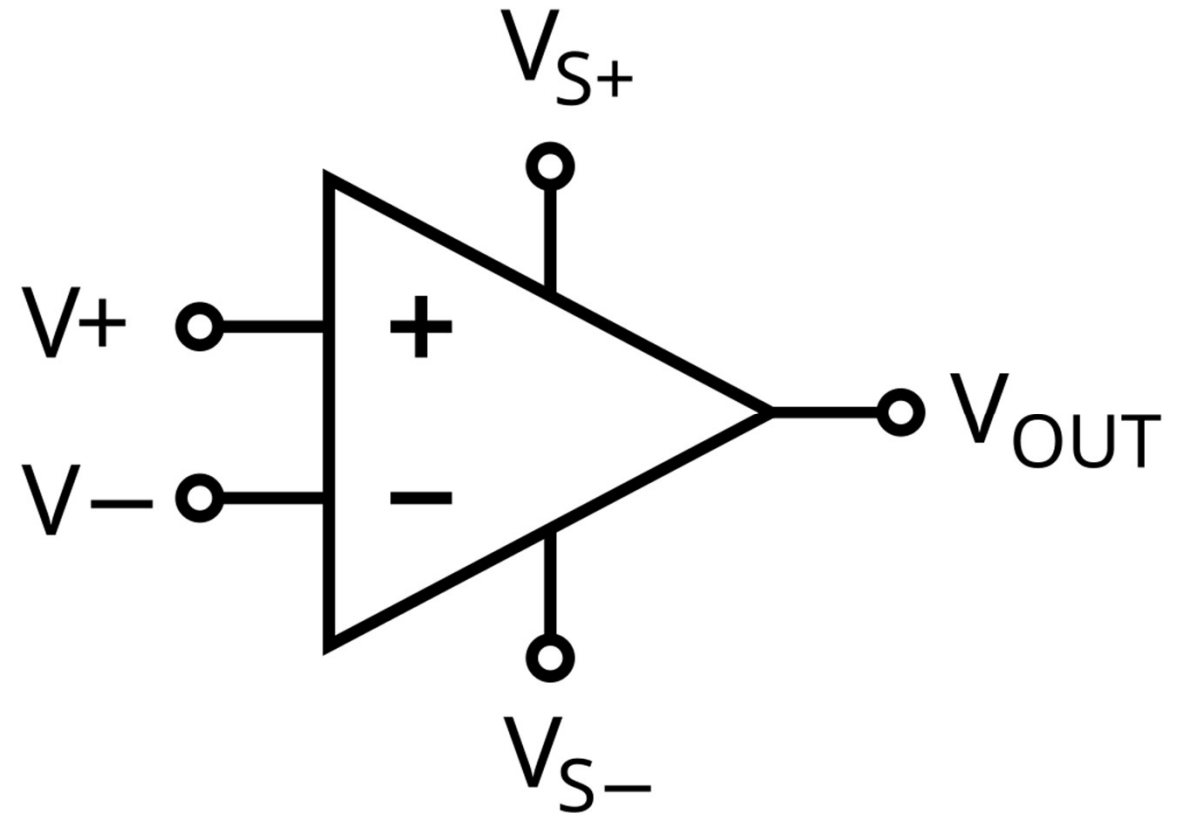
# СТРУКТУРА ВИПАДКОВОГО ЕЛЕМЕНТА, ХЗ ЯКОГО)



# OFF TOPIC. OPERATIONAL AMPLIFIER (OPAMP). ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ

**Операційний підсилювач (ОП)** — це високочутливий підсилювач з дуже великим коефіцієнтом підсилення напруги, який використовується для обробки аналогових сигналів.

- Має два входи: **інверсний (-)** і **неінверсний (+)**
- Має один вихід
- Часто в схемах живиться від двополярного джерела живлення (наприклад,  $\pm 15\text{ В}$ )



🧠 Назва “операційний” походить від того, що ці підсилювачі спочатку використовувались для виконання математичних операцій (додавання, інтегрування, логарифмування тощо).

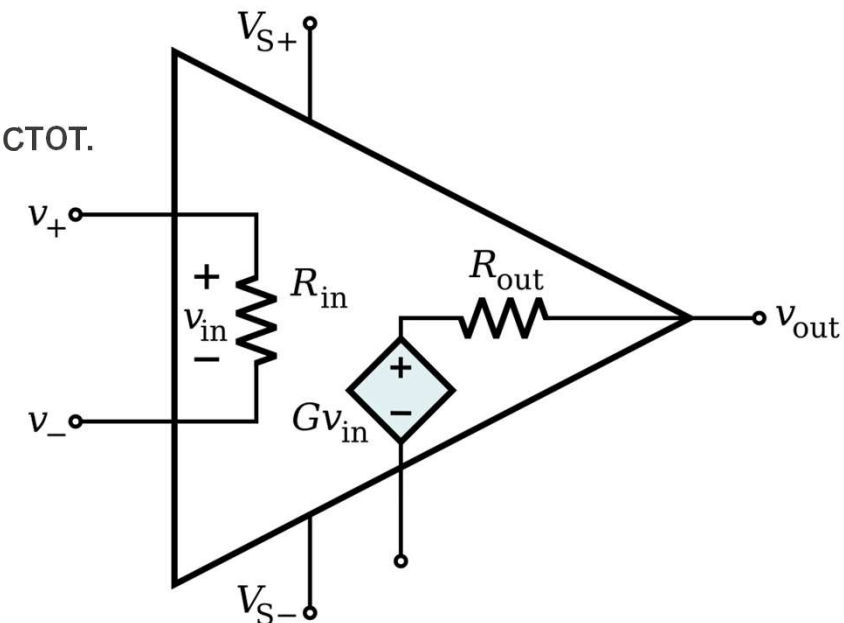
# OFF TOPIC. OPERATIONAL AMPLIFIER (OPAMP).

## Ідеальний операційний підсилювач

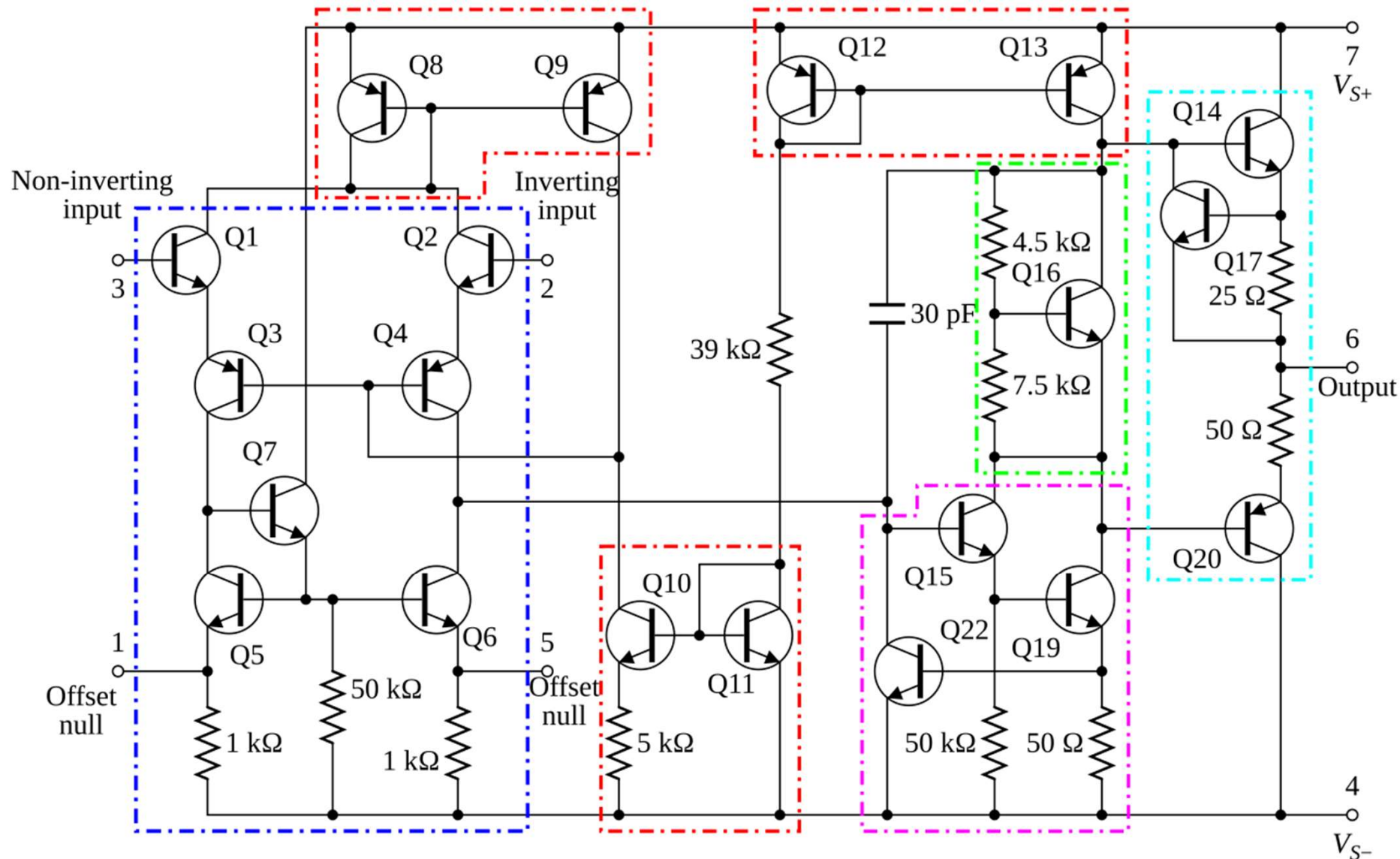
- Нескінченний коефіцієнт підсилення  $A \rightarrow \infty$ . Це означає, що навіть дуже мала різниця між входами призводить до великої вихідної напруги. В схемах зі зворотним зв'язком це призводить до того, що різниця між  $V_+$  і  $V_-$  практично дорівнює нулю.
  - Нескінченно великий вхідний опір  $R_{in} \rightarrow \infty$ . Жоден струм не тече у входи підсилювача:  $I_+ = I_- = 0$ .
  - Нульовий вихідний опір  $R_{out} = 0$ . Вихід може забезпечувати струм без втрати напруги.
  - Нескінченне послаблення синфазного сигналу. Ідеальний ОП не реагує на однакову напругу на обох входах:  $V_+ = V_- \Rightarrow V_{out} = 0$ .
  - Нескінченно широка смуга пропускання
  - Підсилення не зменшується з частотою. Ідеальний ОП працює однаково для всіх частот.
- 🔍 Наслідки в схемах, якщо є негативний (від'ємний) зворотний зв'язок:

**Різниця між входами  $\approx 0$ :  $V_+ \approx V_-$**

**Струм на вході ОП = 0.**



# ДЛЯ ГЛИБШОГО РОЗУМІННЯ БУДОВИ ОП



current mirrors  
differential amplifier;  
class A gain stage;  
voltage level shifter;  
output stage.



# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

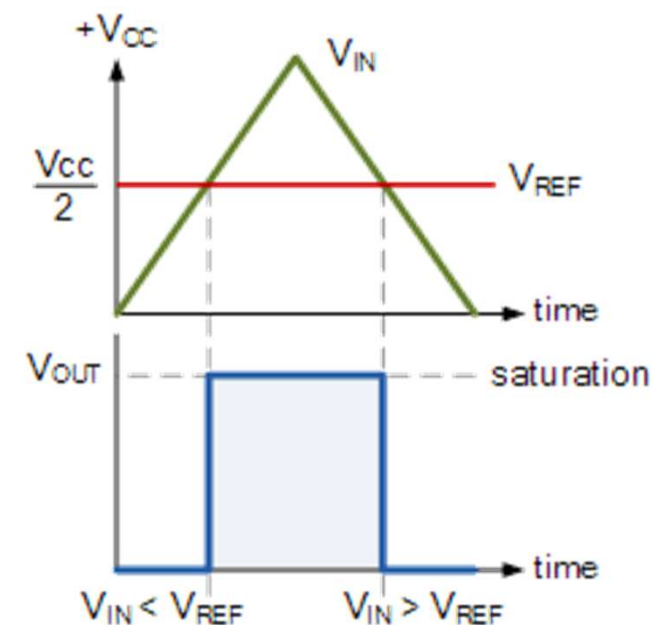
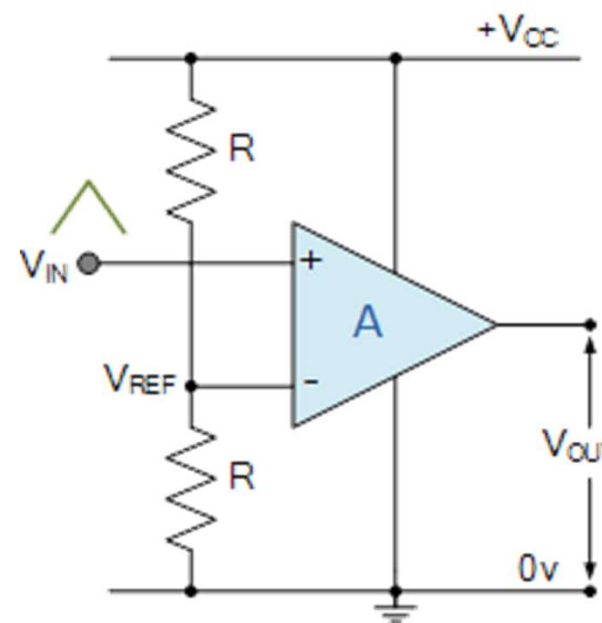
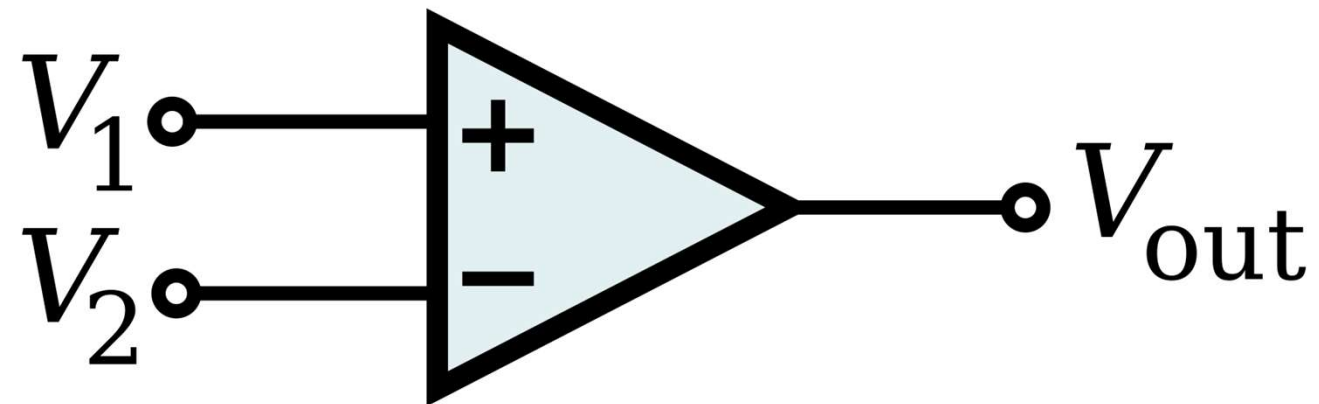
1. **Компаратор** — це схема на операційному підсилювачі без зворотного зв'язку, яка **порівнює** два вхідні сигнали і видає **цифровий (дискретний) вихід**.

## Принцип роботи:

- Сигнали подаються на **інверсний (-)** і **неінверсний (+)** входи
- Оскільки підсилення дуже велике і зворотного зв'язку немає, навіть незначна різниця між входами викликає перехід виходу в **режим насичення**
- Підсилювач працює як **перемикач**: або максимум, або мінімум

## 🧠 Застосування:

- Схеми **порогу спрацювання**
- **Детектори рівня**
- Побудова **ШИМ** та **сигналізаторів**



## БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**2. Тригер Шмітта** — це компаратор з позитивним зворотним зв'язком, який має дві різні порогові напруги: одну для перемикання вгору, іншу — для перемикання вниз.

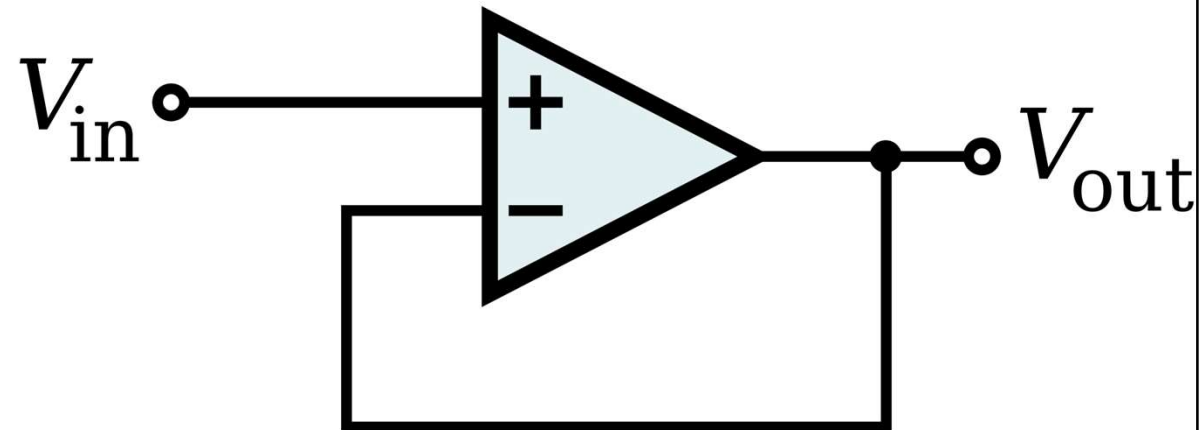
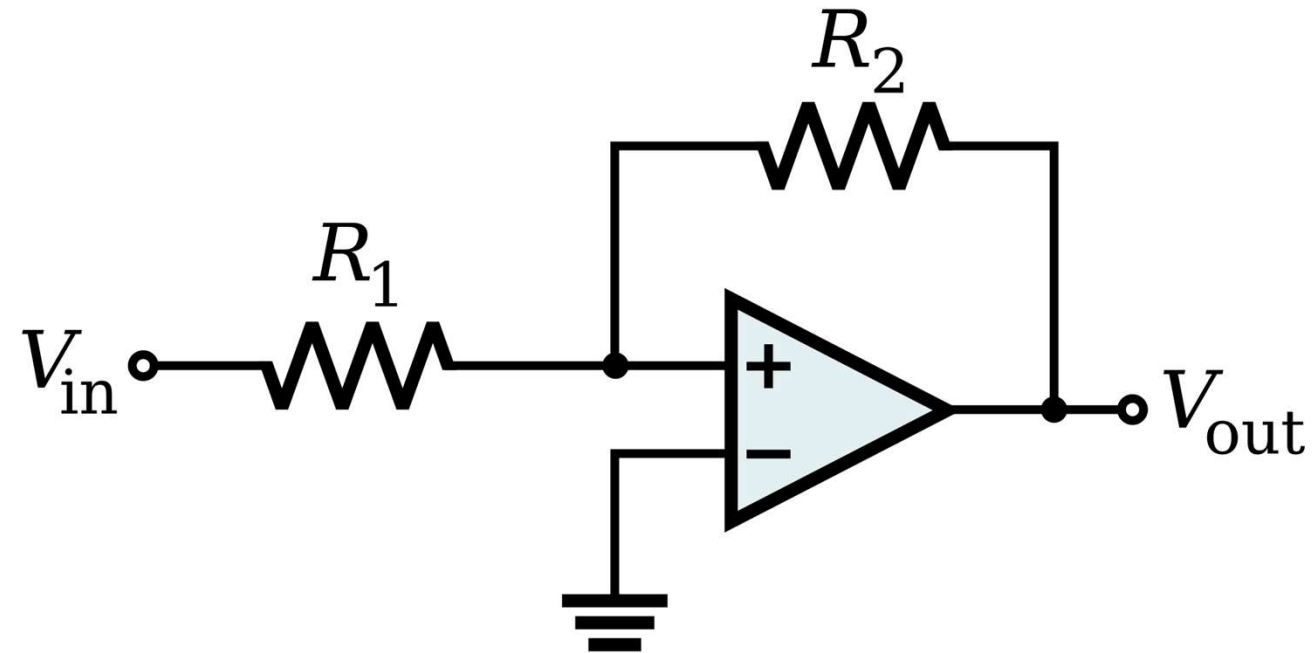
Застосування:

- Обробка зашумлених сигналів
- Генератори прямокутних імпульсів
- Дебаунсинг (очищення контактів кнопок)
- Цифровізація аналогових сигналів

**3. Повторювач напруги (Buffer, Voltage Follower)** - це схема, в якій вихід операційного підсилювача підключений напряму до інверсного входу, а сигнал подається на неінверсний вхід.

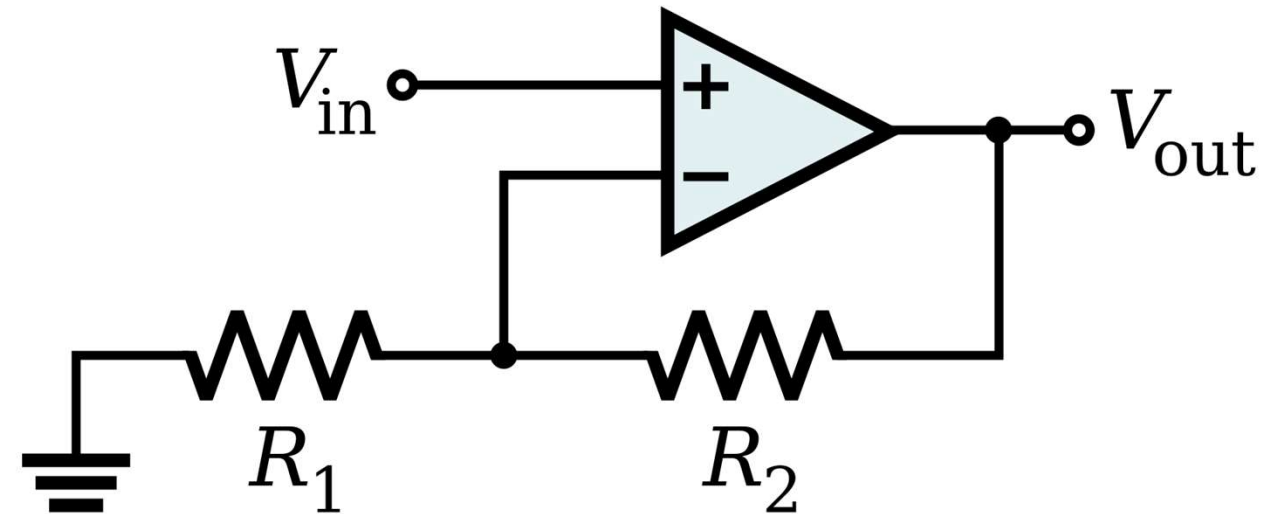
Застосування:

- Роз'єднання (ізоляція) каскадів схеми
- Передача сигналу без спотворення на навантаження
- Узгодження високого вхідного опору (імпедансу 😊) з низьким вихідним



# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**4. Неінвертуючий підсилювач** - це схема на операційному підсилювачі, яка підсилює вхідну напругу **без зміни її полярності**. Тобто фаза сигналу зберігається.



$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}$$

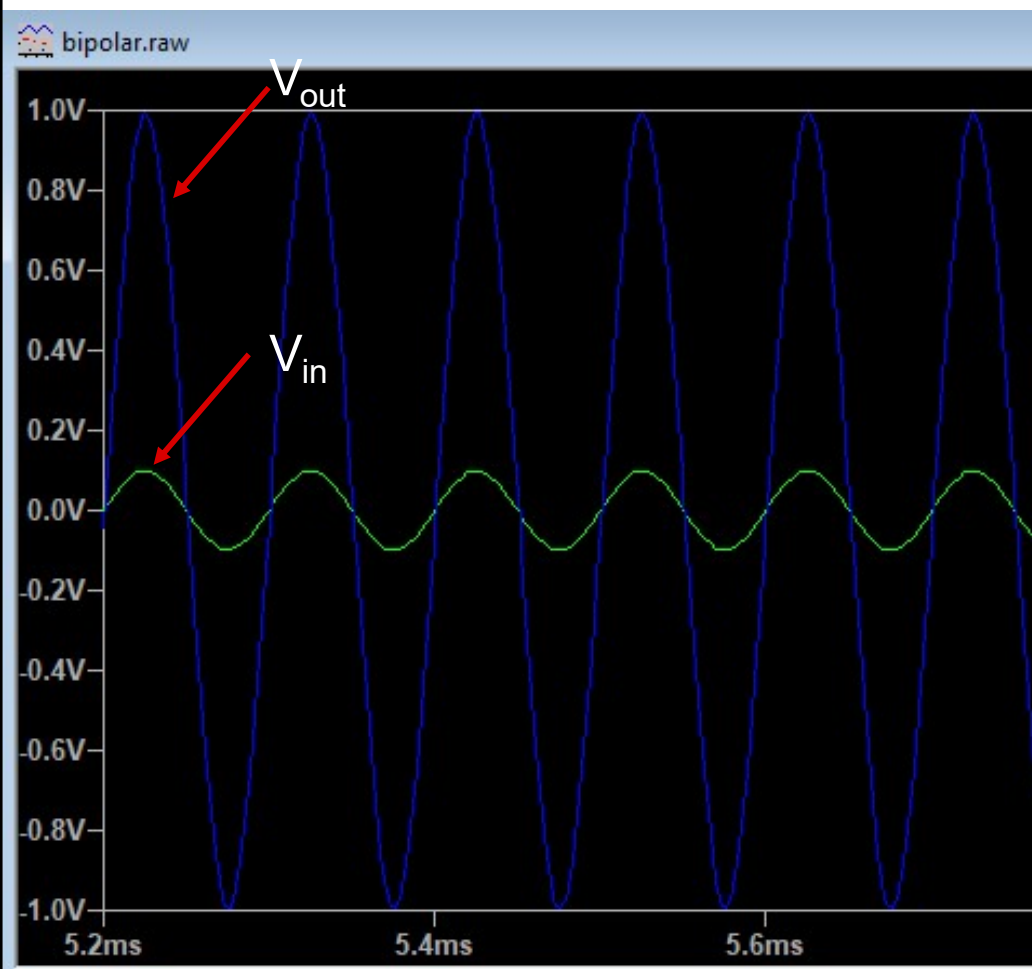
## Приклад застосування:

Сигнал з терморезистора або температурного датчика (наприклад, LM35) має дуже малу амплітуду, наприклад 0...0.3 В.

## Задача:

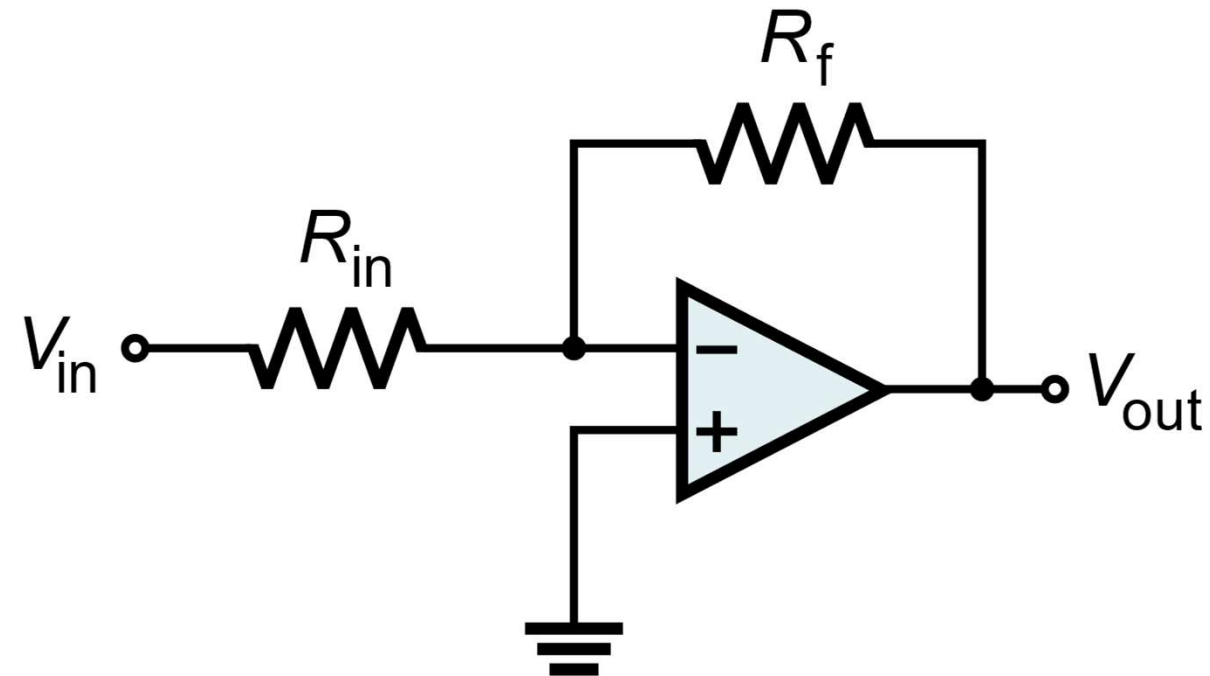
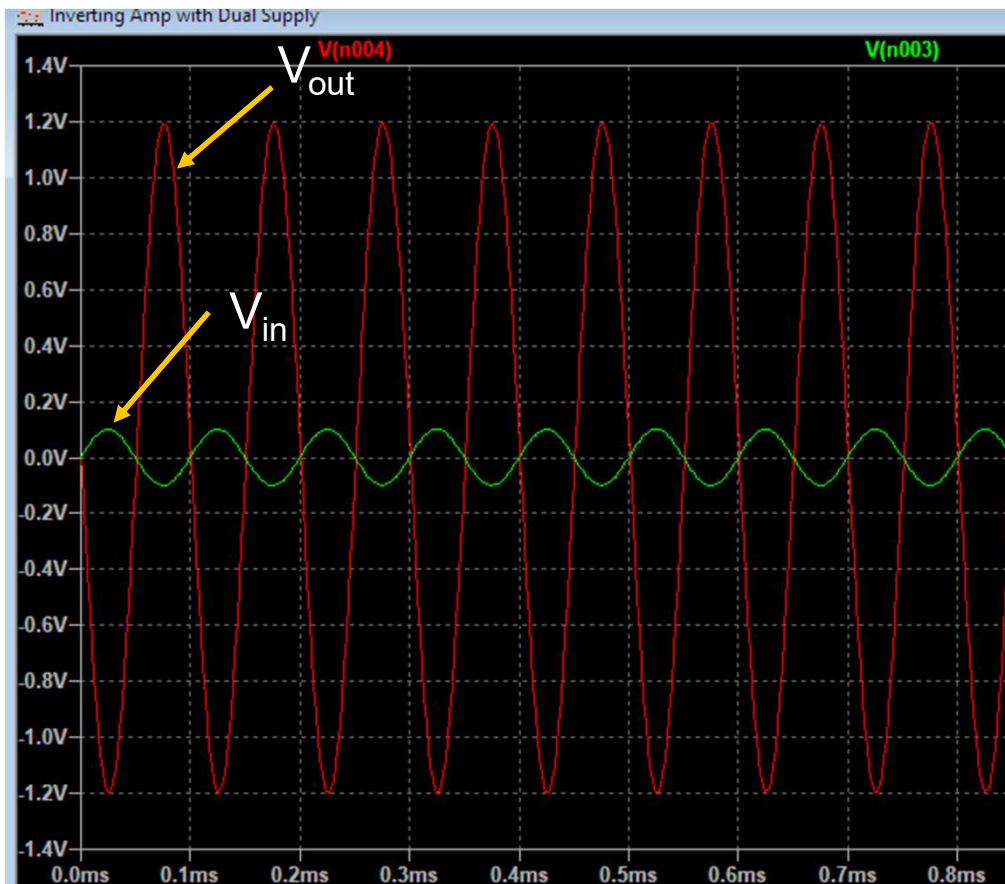
Потрібно підсилити сигнал до рівня, зручного для обробки мікроконтролером (наприклад, до 0...3 В).

**Рішення:** Використовуємо неінвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення 10, для цього задаємося резисторами ( $R_2=90k$ ,  $R_1=10k$ )



# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

5. Інвертуючий підсилювач - це схема на операційному підсилювачі, яка **підсилює вхідний сигнал із зміною полярності** (фази на  $180^\circ$ ).



$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} V_{in}$$

Вхідний опір =  $R_{in}$  (обмежений)

Вихідний опір — низький

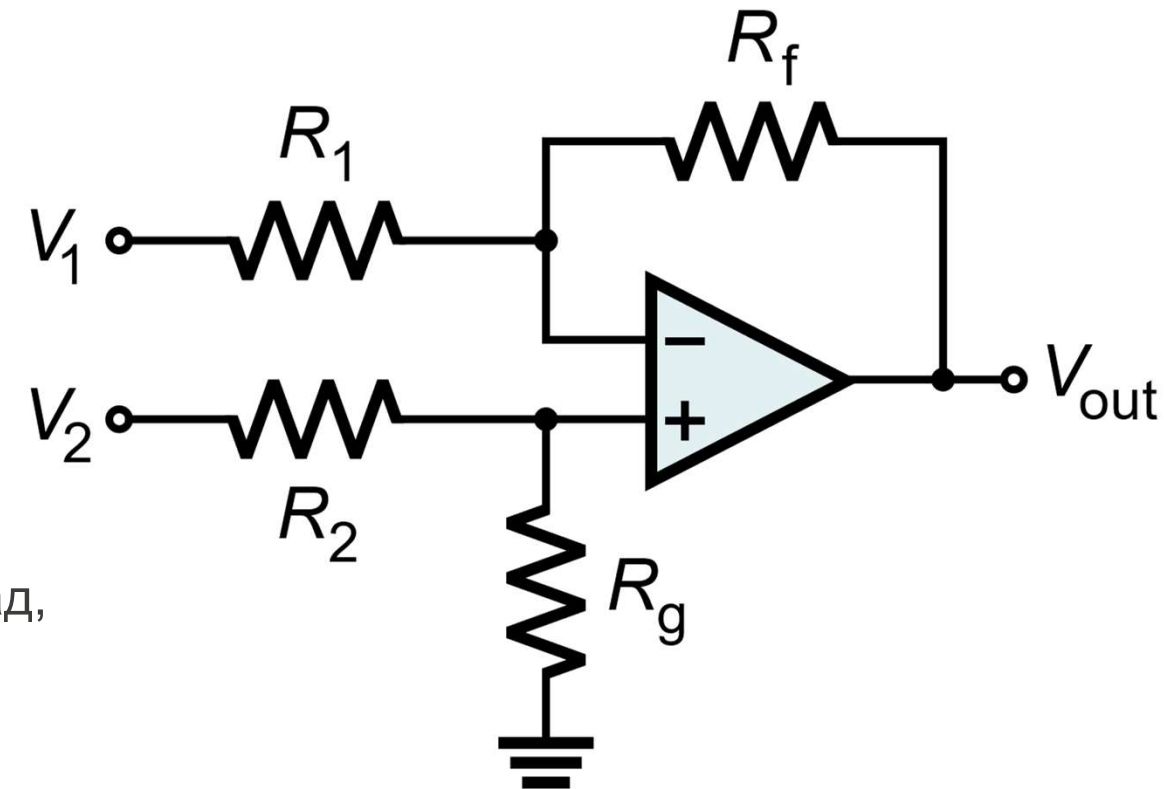
Можна задавати будь-яке підсилення (в тому числі дробове)

# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

6. Диференційний підсилювач - це схема на операційному підсилювачі, яка підсилює **різницю між двома вхідними сигналами**, придушуючи спільний (синфазний) шум.

## Застосування:

- Зняття сигналів з **датчиків зі слабким виходом** (наприклад, тензодатчики, біоелектричні сенсори)
- Придушення **перешкод** у довгих з'єднаннях
- Побудова **інструментальних підсилювачів**

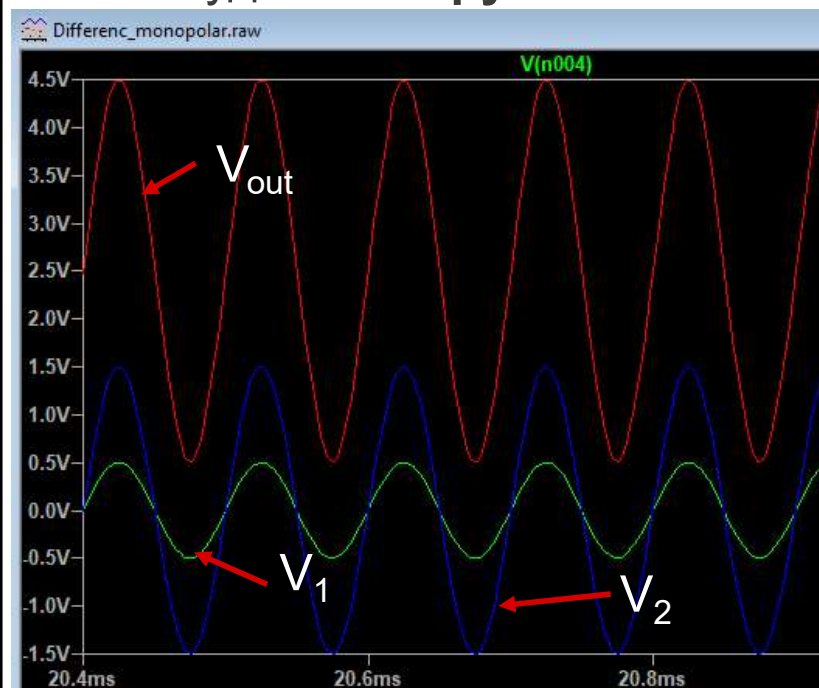


При умові, якщо  $R_1/R_f = R_2/R_g$

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_1} V_{dif} = \frac{R_f}{R_1} (V_2 - V_1)$$

\*Вихідний сигнал додатково був зміщений по амплітуді на  $V_{DD}/2$

**Приклад.** Підсилення сигналу з тензодатчика, що має малу амплітуду (мілівольти) і супроводжується шумом. Для цього можна використати диференційний підсилювач, що виділяє лише корисну різницю між сигналами та підсилює її, ігноруючи синфазний шум.





# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**7. Суматор** - це схема на операційному підсилювачі, яка додає кілька вхідних сигналів і формує на виході їх зважену суму. Зазвичай реалізується в інверсній конфігурації.

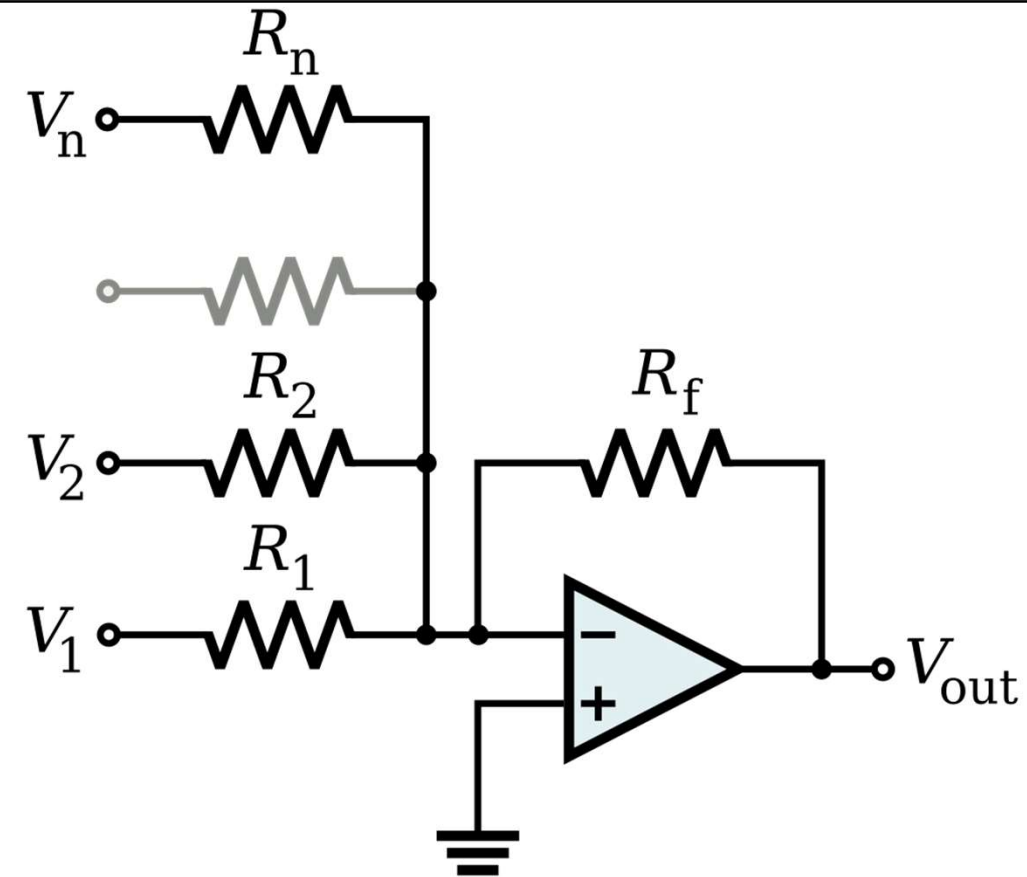
✓ **Приклад застосування: зведення аудіосигналів**

**Ситуація:**

Є кілька джерел аудіо (мікрофон, музика, звук з відео), і їх потрібно об'єднати в один канал для запису або передачі.

**Рішення:**

Використати суматор, який додасть всі сигнали з відповідними коефіцієнтами (вагами), і подасть результат на вихід або наступний каскад обробки.



$$V_{\text{out}} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

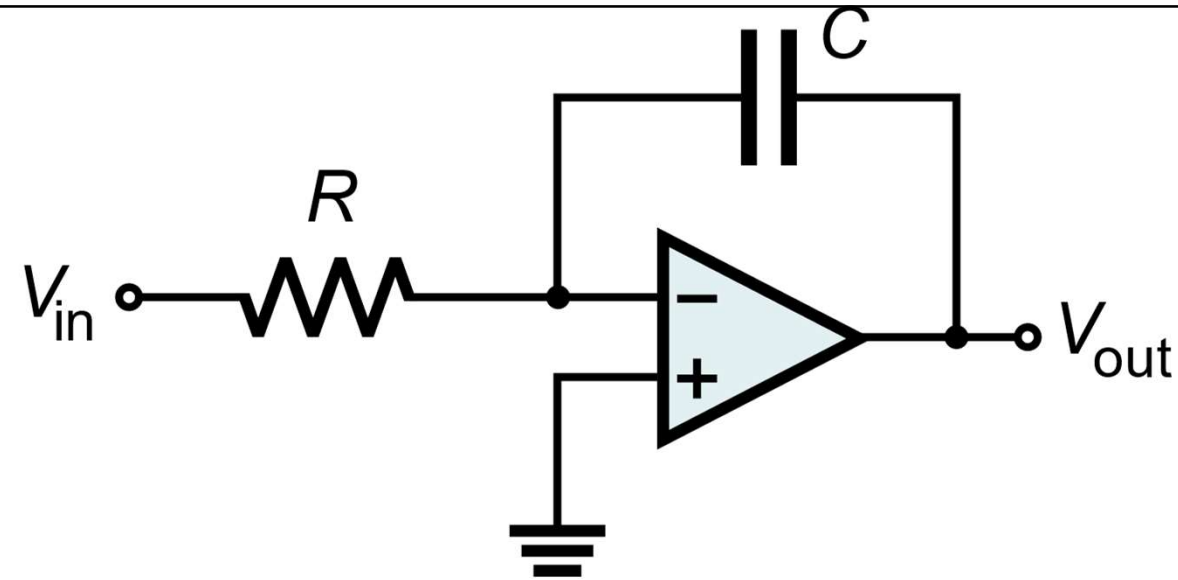
Якщо  $R_1 = R_2 = \dots = R_n$

$$V_{\text{out}} = -\frac{R_f}{R_1} (V_1 + V_2 + \dots + V_n)$$

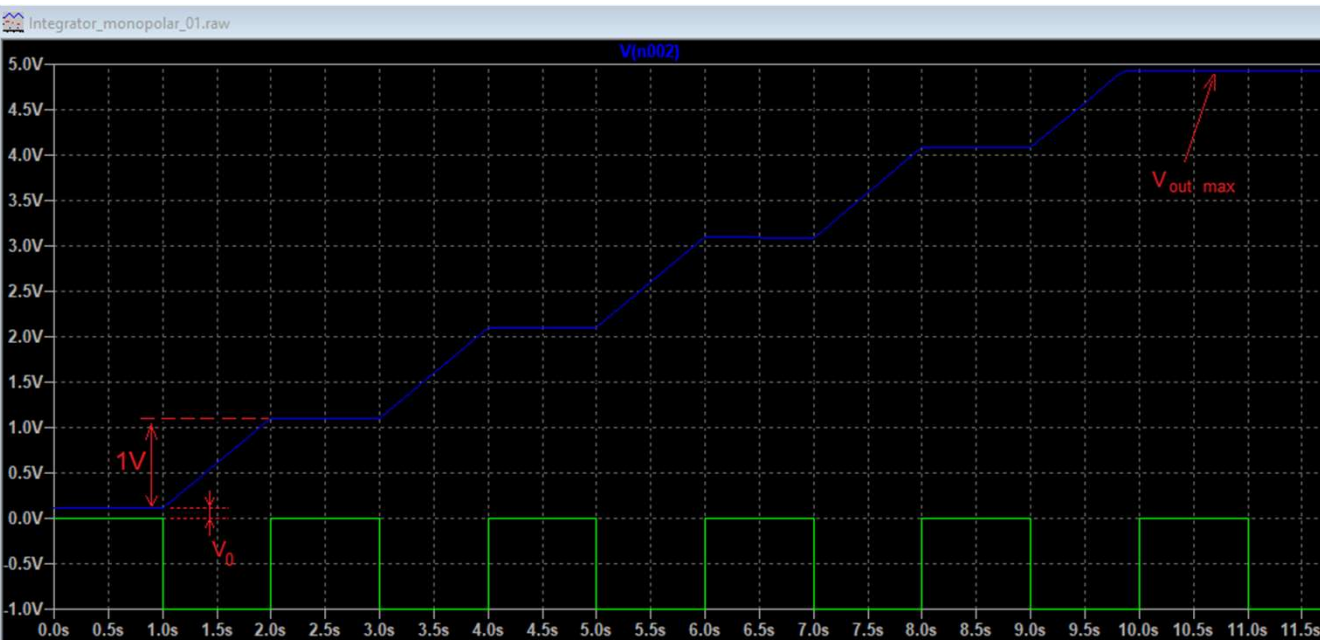


# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**8. Інтегратор** - це схема, яка формує на виході інтеграл від вхідного сигналу. Тобто, якщо на вхід подається напруга  $V_{in}$ , то вихідна напруга змінюється пропорційно площі під кривою вхідного сигналу.



$$V_{out}(t_1) = V_{out}(t_0) - \frac{1}{RC} \int_{t_0}^{t_1} V_{in}(t) dt$$

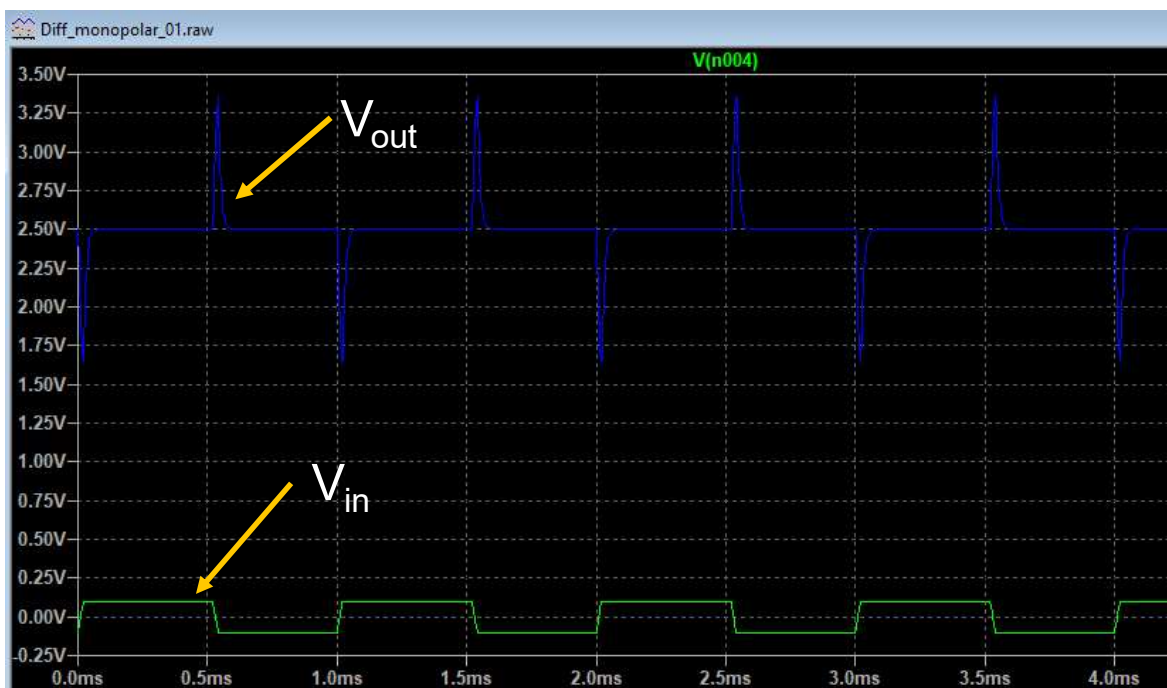
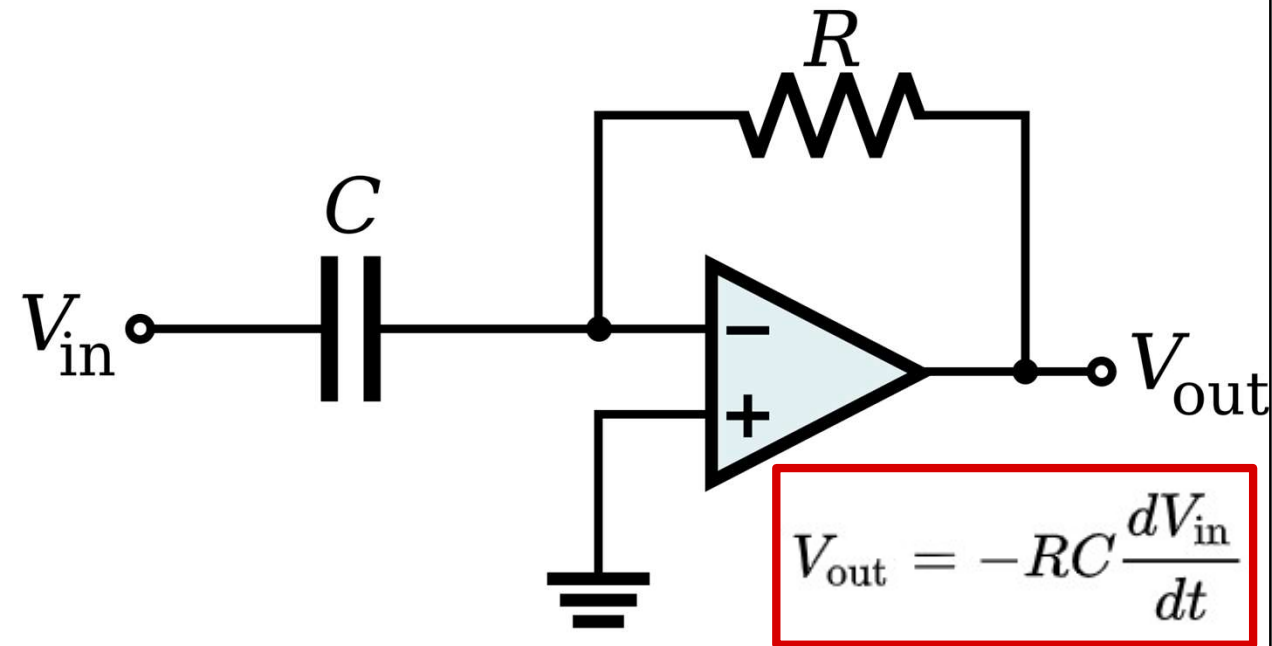


- 1. Аналогові обчислювачі.** Використовується для математичного інтегрування в рівняннях (наприклад, моделювання руху за прискоренням)
- 2. Генерація пилоподібного сигналу.** Якщо на вхід подати **сталу напругу**, вихід буде **лінійно змінюватися** (підйом або спад)
- 3. ПІД-регулятори.** Інтегруюча частина регулятора в системах автоматичного керування
- 4. Фільтрація сигналів.** Низькочастотний фільтр, який приглушує шум високих частот

# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**9. Диференціатор** - це схема, яка формує на виході похідну від вхідного сигналу, тобто показує, як швидко змінюється сигнал у часі.

Схема **підсилює шум**, тому часто використовують модифікований диференціатор із обмеженням високих частот



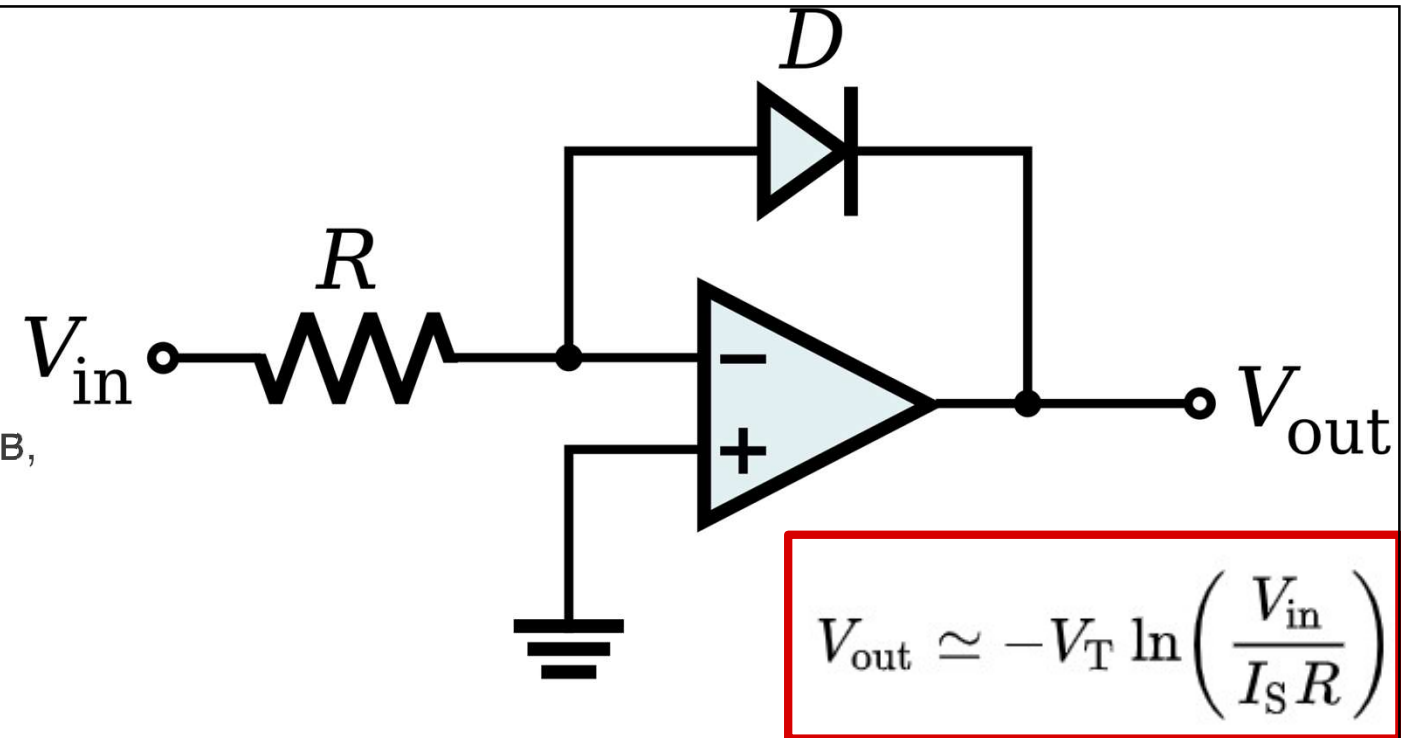
\*Вихідний сигнал додатково був зміщений по амплітуді на  $V_{DD}/2$

- 1. Виділення фронтів імпульсів.** Визначення моментів зміни сигналу — наприклад, детекція **переходів** в цифрових схемах
- 2. Аналогові обчислення.** Використовується у системах, де треба **обчислювати похідну** — наприклад, для моделювання швидкості за зміною положення
- 3. Виявлення коливань або збурень.** У системах керування — виявлення швидких змін у параметрах, що може свідчити про помилки чи нестабільність
- 4. Сигналізація.** Вихідний імпульс при появі сигналу — зручно для **активації реле чи логіки**

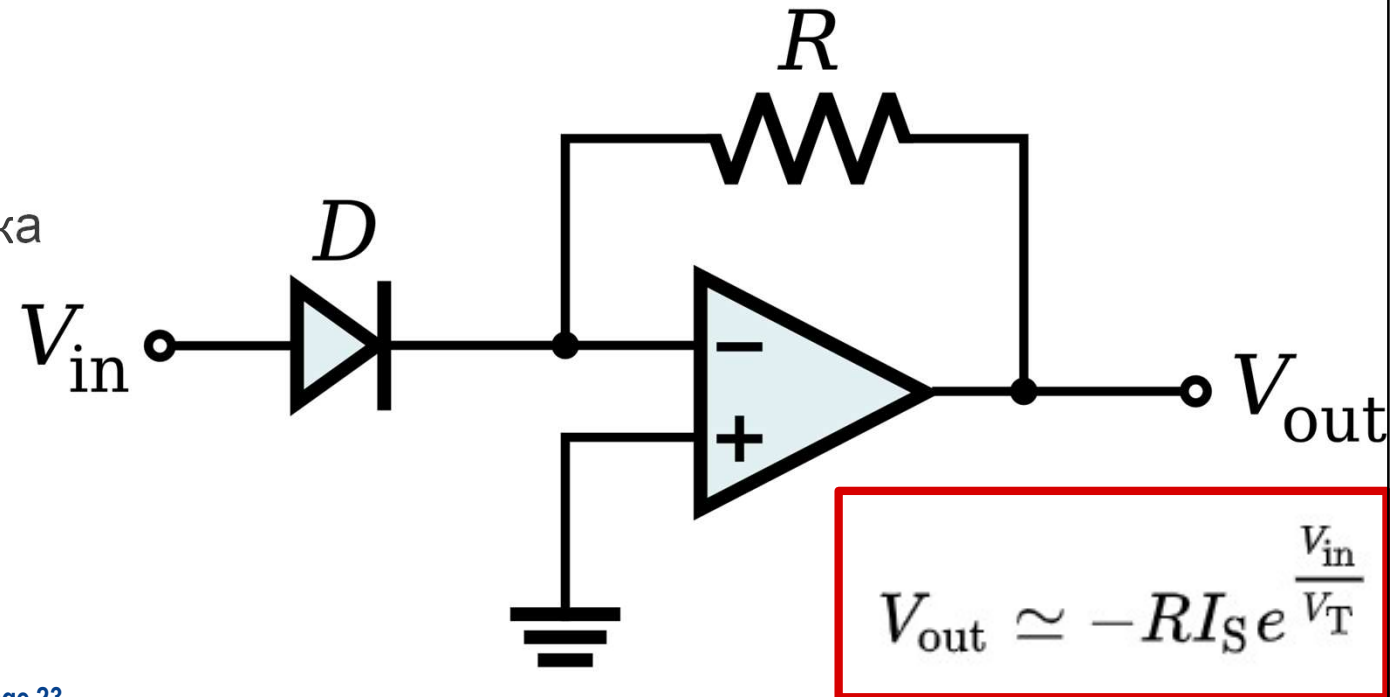
## БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**10. Логарифматор** — це схема, яка формує на виході логарифм вхідної напруги.

Застосовується для розширення діапазону сигналів, множення через додавання логарифмів або в експоненційному масштабуванні.



**11. Делогарифматор (експоненціатор)** — схема, яка формує на виході експоненту від вхідного сигналу. Використовується в аналогових схемах для аналогового множення/ділення, логарифмічної компресії, та генерації експоненційних функцій.

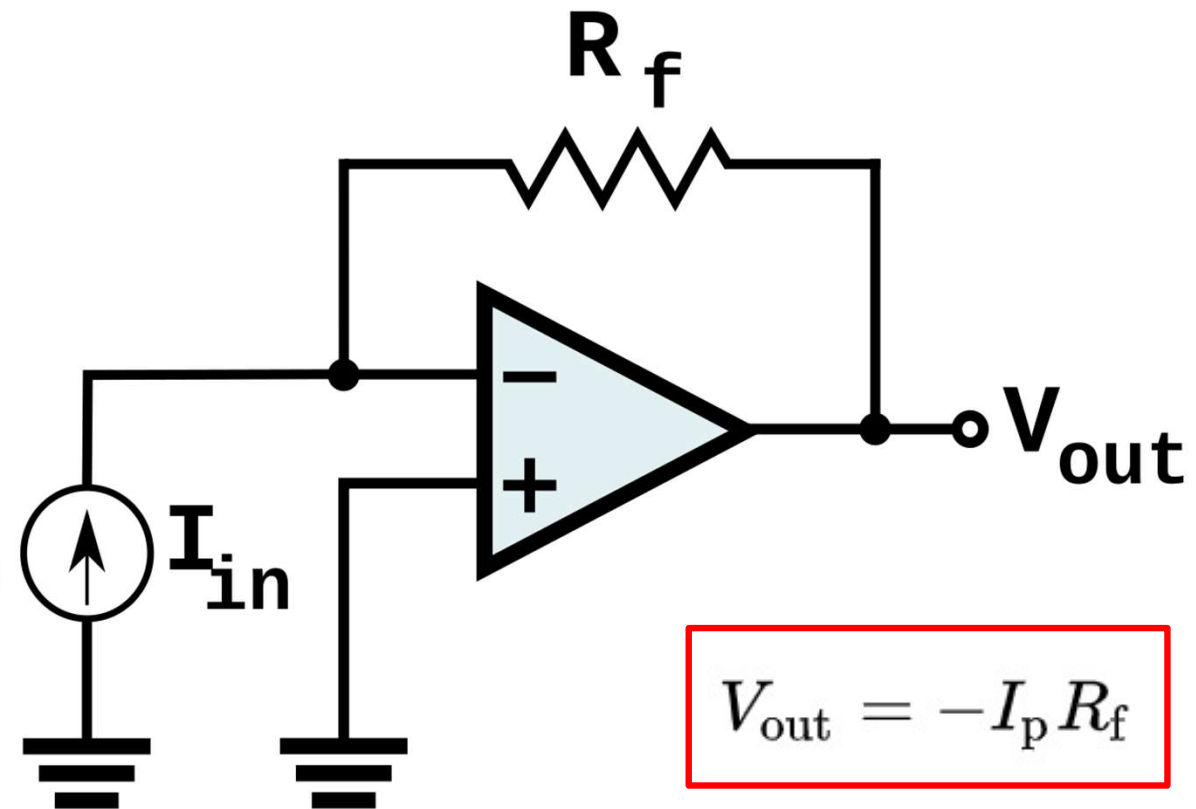


# БАЗОВІ СХЕМИ НА ОП

**12. Трансмпедансний підсилювач (TIA)** — це схема на операційному підсилювачі, яка перетворює струм на вході у напругу на виході. «Трансмпедансний» походить від поєднання слів: "Trans-" — означає перетворення (як у "transducer", "transfer") "Impedance" — опір, але в ширшому розумінні: співвідношення між напругою і струмом.

Приклади застосування:

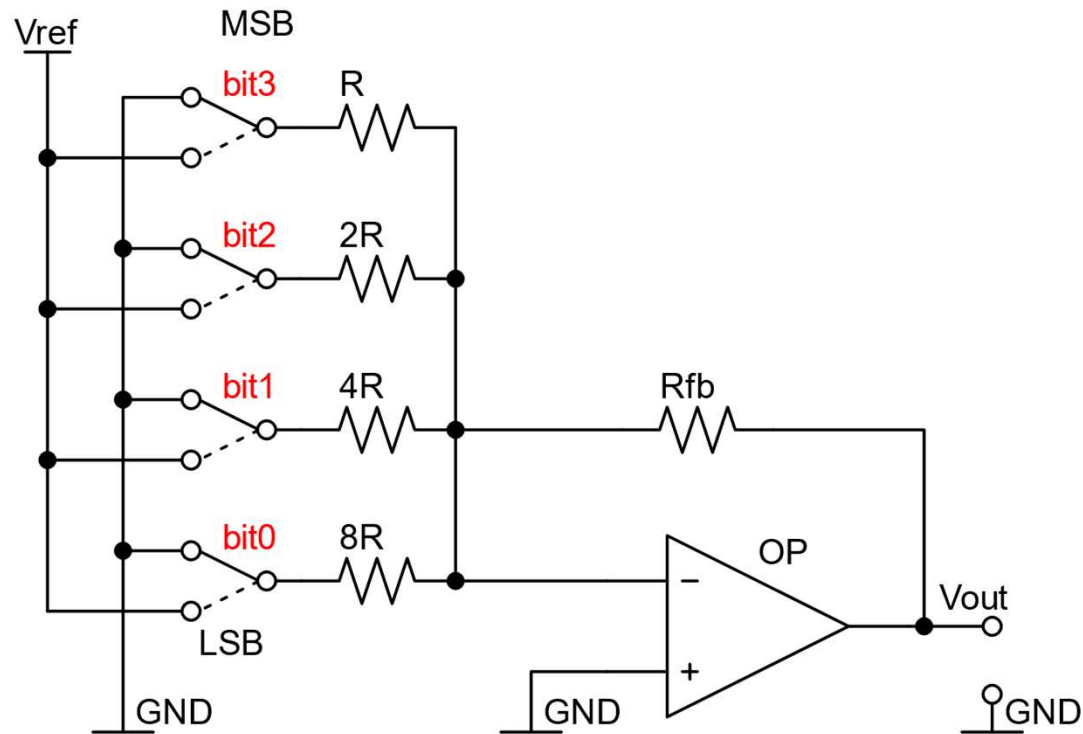
- 1. Зчитування сигналів з фотодіодів.** У фотометрії, лазерних датчиках, телекомунікаціях — перетворення світлового потоку на напругу
- 2. Вимірювання дуже малих струмів.** Наприклад, у сенсорах хімічного або біологічного аналізу
- 3. Оптичні сенсори.** Використовується в LiDAR, енкодерах, IR-датчиках
- 4. Підсилення сигналів з п'єзоелектричних елементів,** де на виході — не напруга, а струм



---

Вертаємось до заняття...

# WEIGHTED RESISTOR DAC



**Weighted Resistor DAC** (ЦАП на двійково-зважених резисторах) використовує набір резисторів із різними значеннями опорів для перетворення цифрового коду в аналоговий сигнал.

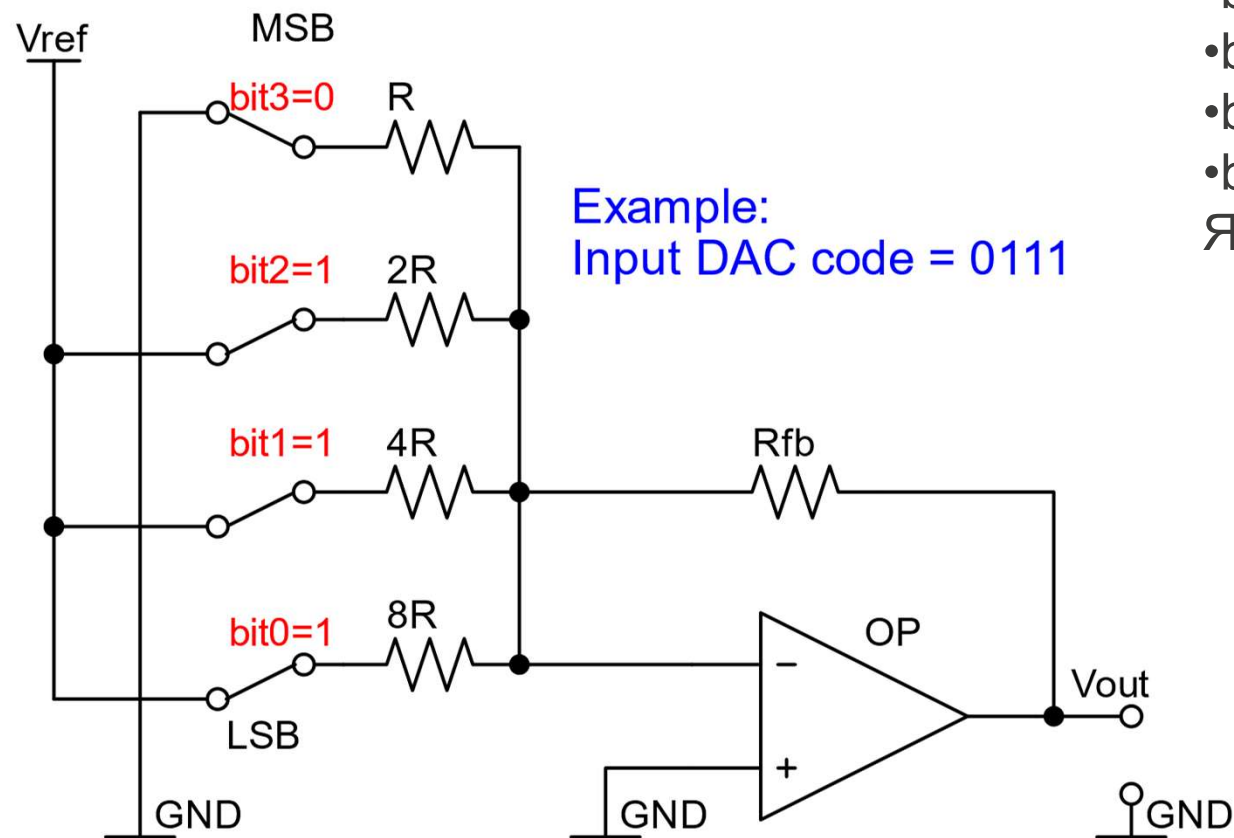
## ◆ Як це працює?

1. Кожен біт цифрового входу керує ключем (транзистором або перемикачем), який підключає відповідний резистор до вихідного вузла.
2. Резистори мають опори, обернено пропорційні значенню біта:
  - найстарший біт (MSB) має найменший резистор (найбільший вплив на вихід).
  - наймолодший біт (LSB) має найбільший резистор (найменший вплив).
3. Струми від кожного резистора підсумовуються, створюючи вихідну напругу, яка пропорційна введеному цифровому числу.

$$V_{out} = -V_{ref} * \frac{R_{fb}}{R} \left( \frac{bit0}{8} + \frac{bit1}{4} + \frac{bit2}{2} + bit3 \right)$$



# WEIGHTED RESISTOR DAC



Приклад (3-бітний Weighted Resistor DAC):

- bit3 (MSB) підключає резистор  $R$ ;
- bit2 резистор  $2R$ ;
- bit1 резистор  $4R$ ;
- bit0 (LSB) резистор  $8R$

Якщо **вхід = 0111** (7 у десятковій системі), то вихід буде:

$$V_{out} = -V_{ref} * \frac{R_{fb}}{R} \left( \frac{1}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} + 0 \right)$$

$$V_{out} = -V_{ref} * \frac{7 * R_{fb}}{8 * R}$$

# WEIGHTED RESISTOR DAC

## Переваги Weighted Resistor DAC

- ✓ **Проста схема** – менше елементів, ніж у String DAC (потрібно лише  $n$  резисторів, а не  $2^n$ ).
- ✓ **Висока швидкодія** – швидше, ніж String DAC, оскільки потрібно комутувати лише кілька ключів.
- ✓ **Менша затримка** – всі біти одночасно впливають на вихідний сигнал без складних обчислень.

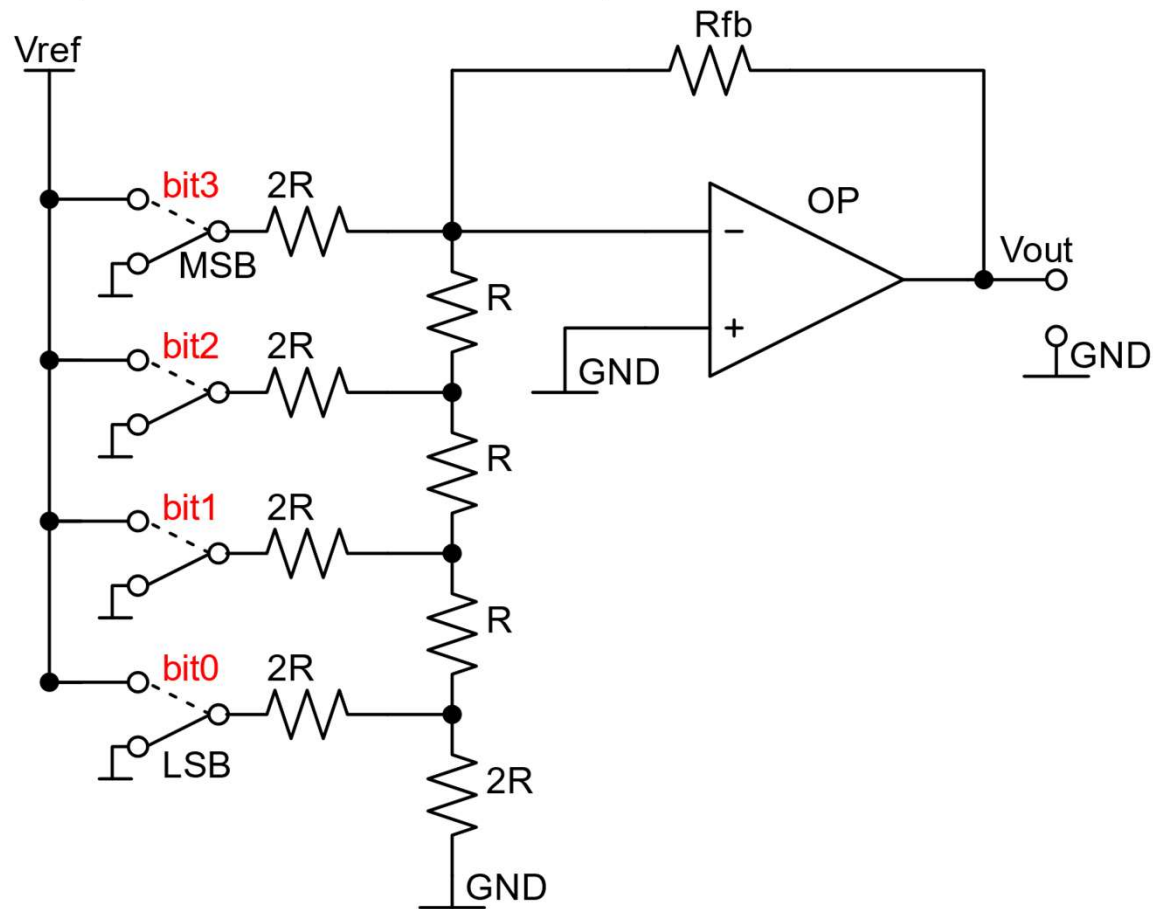
## Недоліки Weighted Resistor DAC

- ✗ **Проблеми з точністю резисторів** – потрібні резистори з дуже точними номіналами (наприклад, для 8-бітного DAC співвідношення резисторів має бути від 1 до 256). Навіть невеликі відхилення спричиняють значні похибки.
- ✗ **Чутливість до температури** – різні резистори можуть змінювати свій опір через нагрів, що впливає на вихідний сигнал.
- ✗ **Обмеження по бітності** – через проблеми з точністю резисторів, **звичайно не використовують більше 8-10 біт**.

## Де використовується?

- ◆ Просте аудіообладнання
- ◆ Мікроконтролери з вбудованими DAC
- ◆ Генератори сигналів (не здивуюся, якщо такий використовується в генераторах 🤖, котрі лежать в 009)

# R2R DAC



$$V_{out} = -V_{ref} * \frac{R_{fb}}{R} \left( \frac{bit0}{16} + \frac{bit1}{8} + \frac{bit2}{4} + \frac{bit3}{2} \right)$$

**R-2R DAC** (ЦАП на резисторній матриці R-2R) є однією з найпоширеніших схем цифро-аналогового перетворювача завдяки простоті та високій точності.

## ◆ Основна ідея:

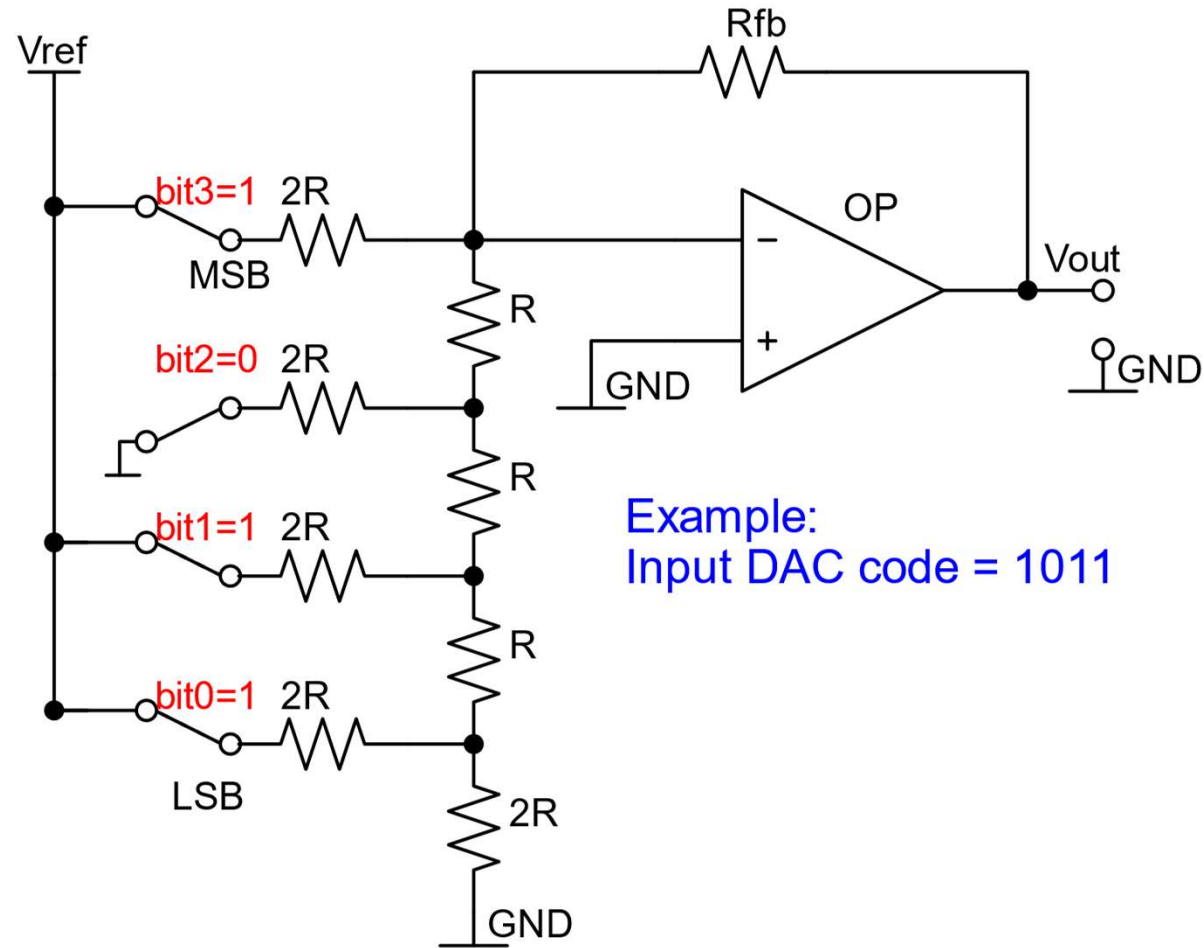
Він використовує **лише два номінали резисторів R та 2R** (2R опір, що у 2 рази більший за R).

Ці резистори формують **R-2R ланцюг**, який працює як **подільник струму**, зважуючи кожен біт вхідного цифрового сигналу пропорційно його значенню.

## ◆ Як це працює?

1. Кожен біт цифрового числа керує ключем (перемикачем або транзистором), який підключає відповідний вузол схеми до **Vref** (логічна "1") або до **заземлення** (логічний "0").
2. Через особливу побудову ланцюга **струми з кожного біта підсумовуються**, формуючи вихідну аналогову напругу.
3. Найстарший біт (MSB) має найбільший вплив на вихід, а наймолодший біт (LSB) – найменший.

# R2R DAC



$$V_{out} = -V_{ref} * \frac{R_{fb}}{R} \left( \frac{1}{16} + \frac{1}{8} + \frac{0}{4} + \frac{1}{2} \right)$$

$$V_{out} = -V_{ref} * \frac{11 * R_{fb}}{16 * R}$$

При умові, якщо  $R_{fb} = R$

$$V_{out} = -\frac{11}{16} V_{ref}$$

# R2R DAC

---

## Переваги R-2R DAC

- ✓ Використовує тільки два номінали резисторів – легше виробляти з високою точністю.
- ✓ Висока точність та лінійність – не має проблем із великим розкидом номіналів, як у Weighted Resistor DAC.
- ✓ Добре масштабується – підходить навіть для високорозрядних ЦАП (12, 16, 24 біти).
- ✓ Невелика кількість елементів – значно менше резисторів, ніж у String DAC.

## Недоліки R-2R DAC

- ✗ Вплив паразитних ємностей – у високочастотних застосуваннях (дуже швидке перетворення) ємності між резисторами можуть спричиняти похибки.
- ✗ Чутливість до якості комутаційних елементів. Транзистори або ключі, що перемикають біти, повинні мати мінімальні втрати.
- ✗ Складність у реалізації на дискретних компонентах – хоча схема проста, точність резисторів R і 2R повинна бути дуже високою (мінімальні відхилення можуть спотворювати вихідний сигнал).

## Де використовується?

- ◆ Високоточні аудіо-ЦАП (частотою 44.1 кГц і більше)
- ◆ Генератори сигналів
- ◆ Системи керування у вбудованих мікроконтролерах

## Чому R-2R DAC кращий за Weighted Resistor DAC?

- ◆ Використовує лише два значення опору, а не широкий діапазон.
- ◆ Легше реалізувати для високих розрядностей (10+ біт).
- ◆ Вищий рівень точності та менші температурні похибки.

# ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОЗГАЛЯНУТИХ ЦАП

Характеристика	String DAC	Weighted Resistor DAC	R-2R DAC
 Принцип роботи	Подільник напруги з $2^n$ резисторів + мультиплексор	Сума струмів через резистори з різною вагою	Подільник струму з резисторів R та 2R
 Кількість резисторів	$2^n$	n	$2n$
 Тип резисторів	Однакові	Потрібні резистори з різними значеннями	Лише два номінали (R та 2R)
 Споживання енергії	Високе при великій розрядності	Середнє	Низьке
 Швидкодія	Низька при високій розрядності	Висока	Висока
 Точність / Лінійність	Висока при правильному підборі резисторів	Обмежена через труднощі з точним підбором	Висока
 Розширюваність (кількість біт)	Погано масштабується (через $2^n$ резисторів)	Обмежено до ~8-10 біт	Добре масштабується (до 16+ біт)
 Складність реалізації	Висока при великій розрядності	Складна через вимоги до резисторів	Проста та зручна для інтеграції
 Стабільність при температурі	Залежна від стабільності резисторів	Дуже чутлива	Стабільна (менше резисторів – менше проблем)
 Застосування	Прецизійні прилади, калібрувальні системи	Просте аудіо, мікроконтролери	Аудіо, вбудовані системи, точні DAC



---

**Renesas.com**