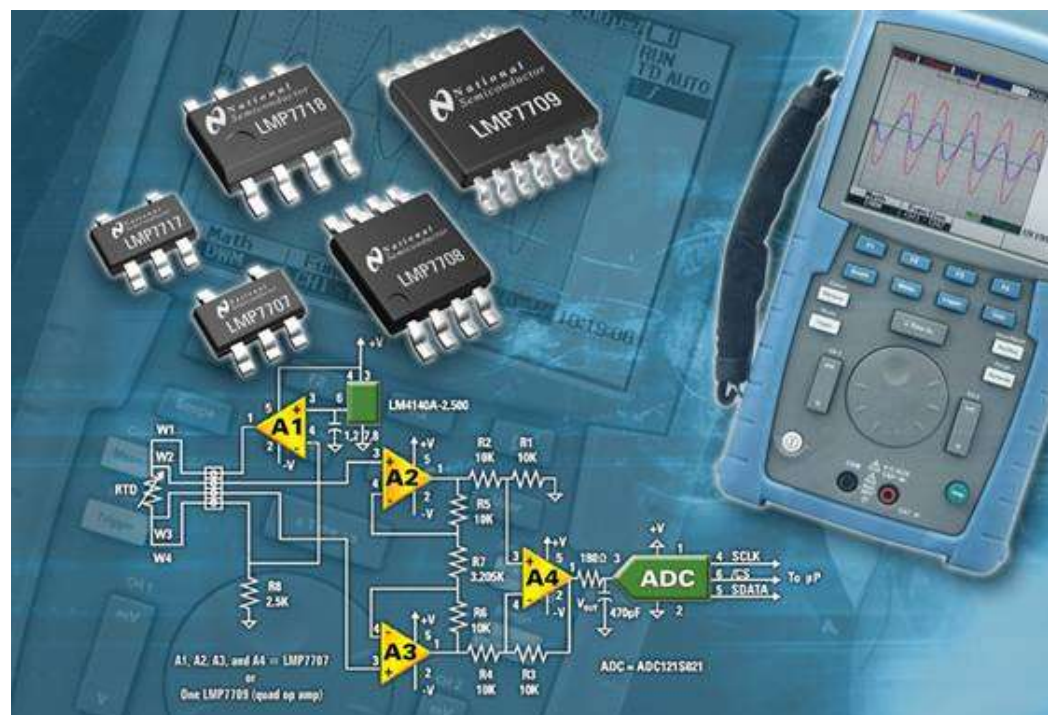
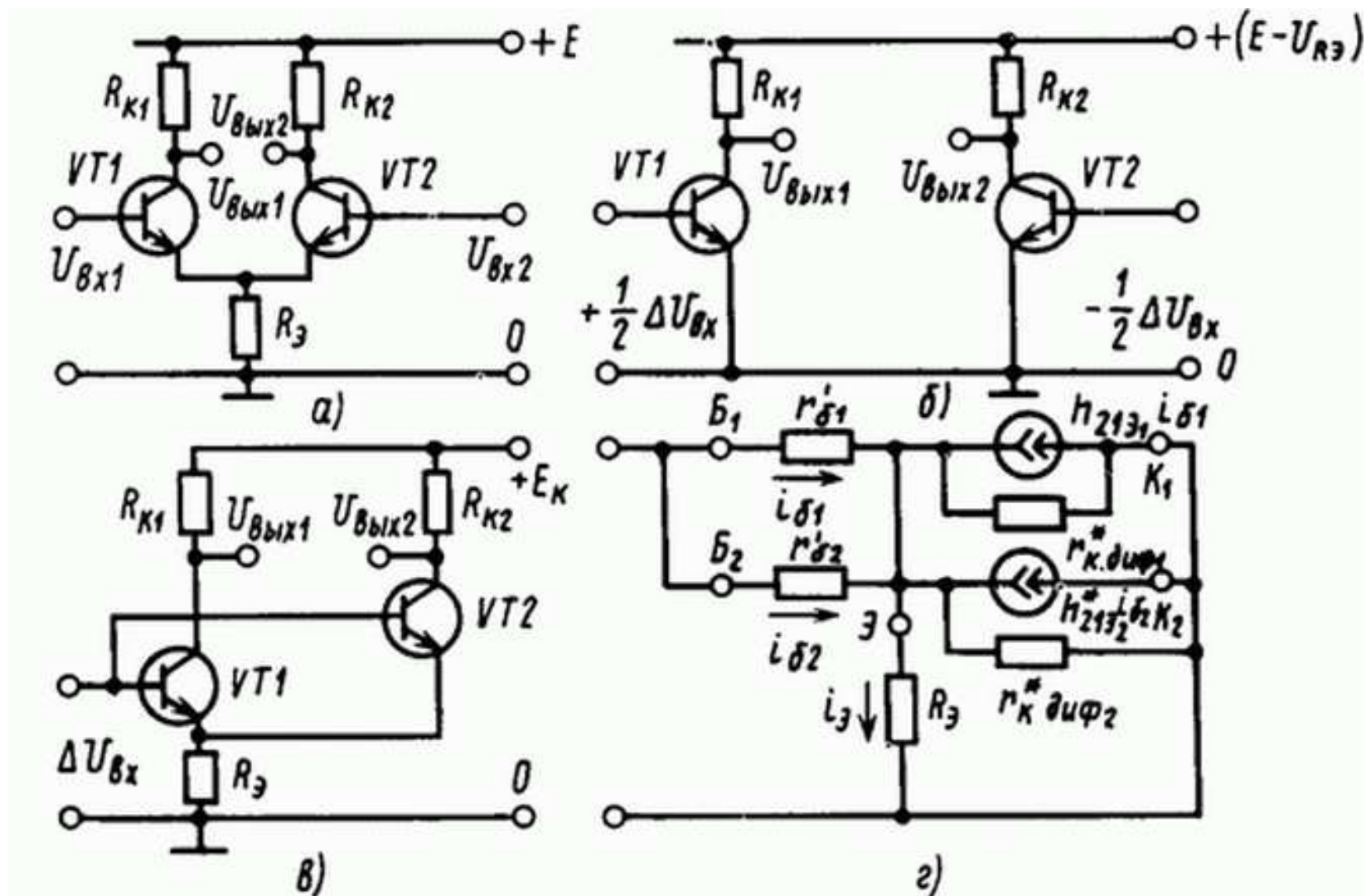


# Электротехника и электроника

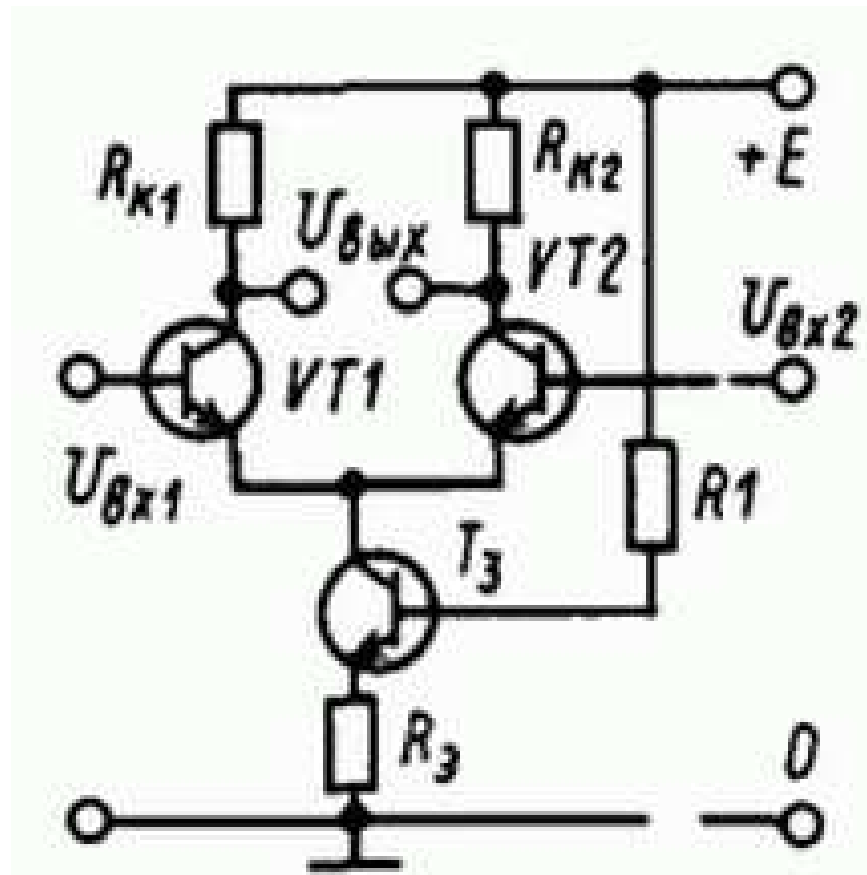
## Операционные усилители



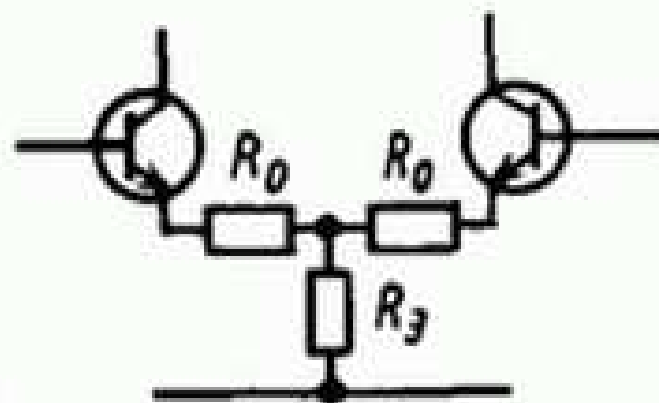
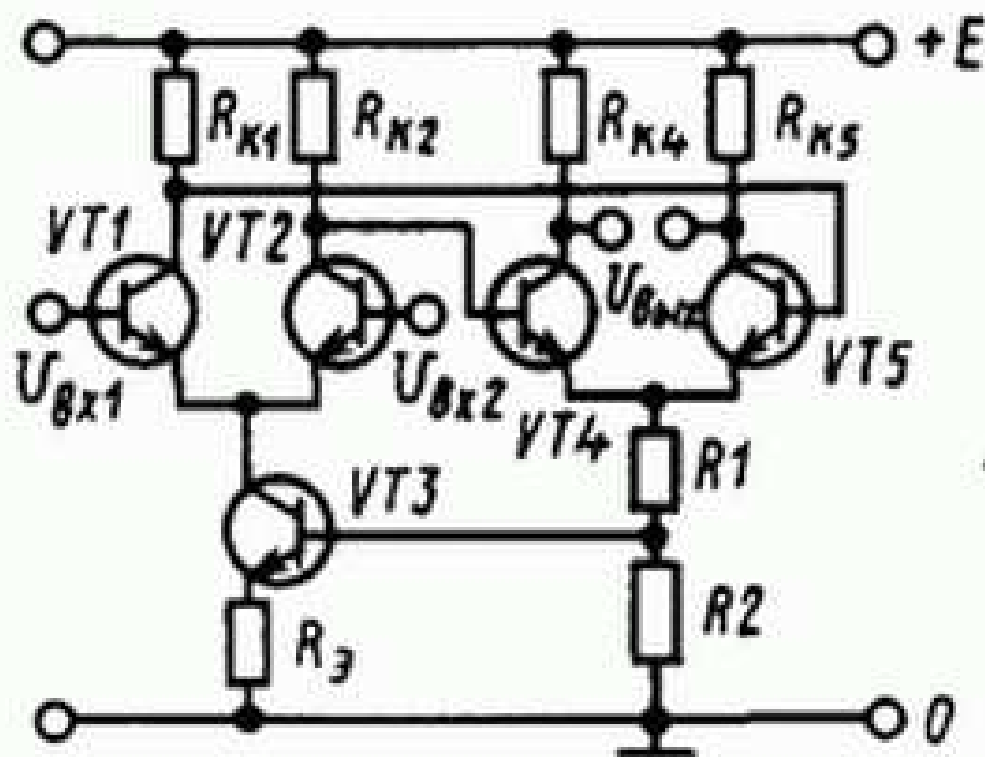
# Дифференциальный усилительный каскад



# Дифференциальный каскад со стабилизатором тока



# Усилитель с отрицательной обратной связью по синфазному сигналу





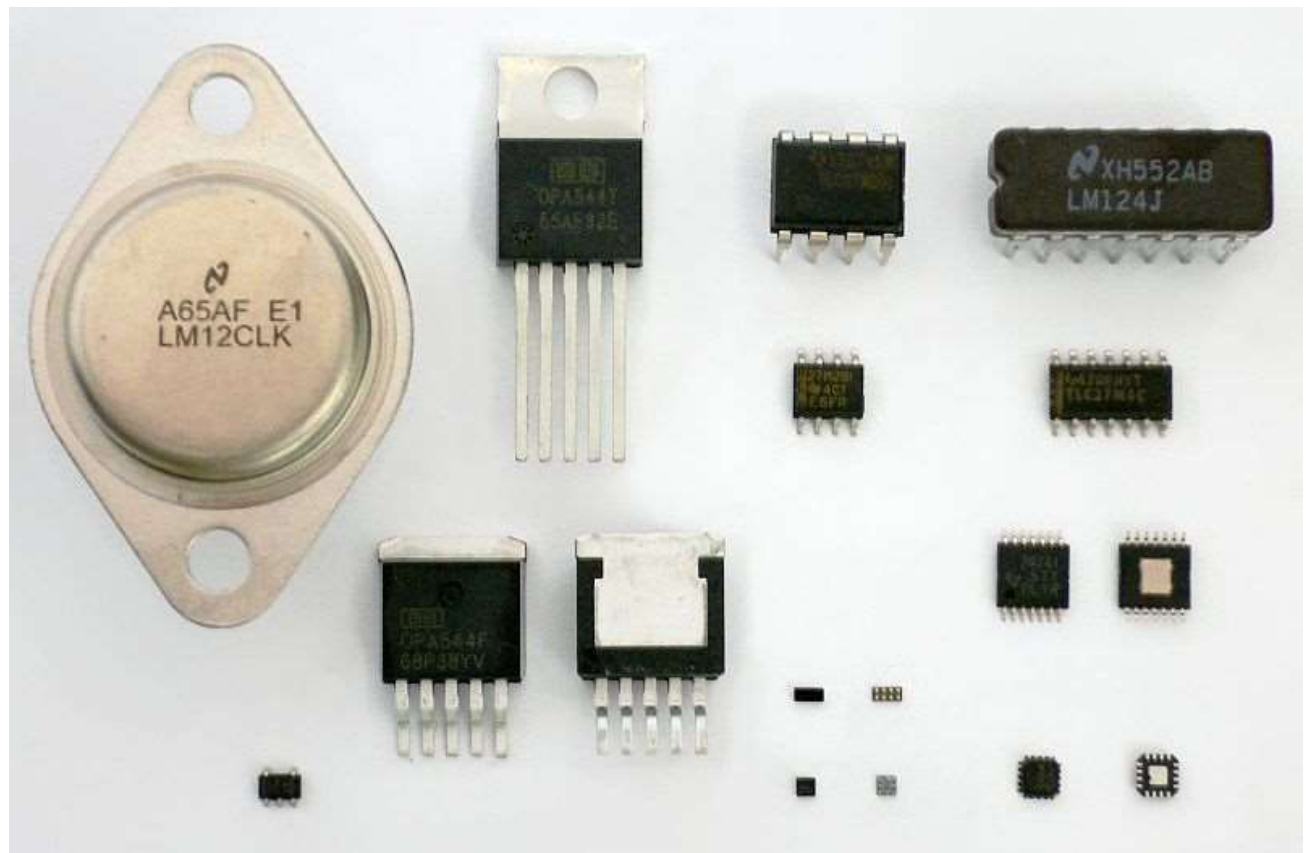
## Операционный усилитель

---

Операционный усилитель (ОУ, OpAmp) — усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и, как правило, единственным выходом, имеющий высокий коэффициент усиления.

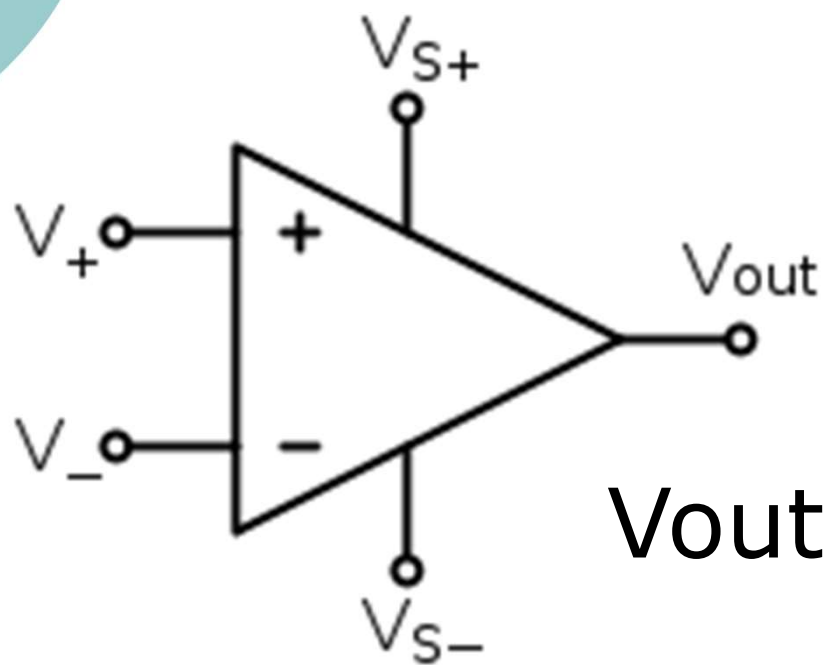
почти всегда используются в схемах с глубокой отрицательной обратной связью, которая, благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ, полностью определяет коэффициент передачи полученной схемы.

# Внешний вид ОУ



## Обозначение ОУ

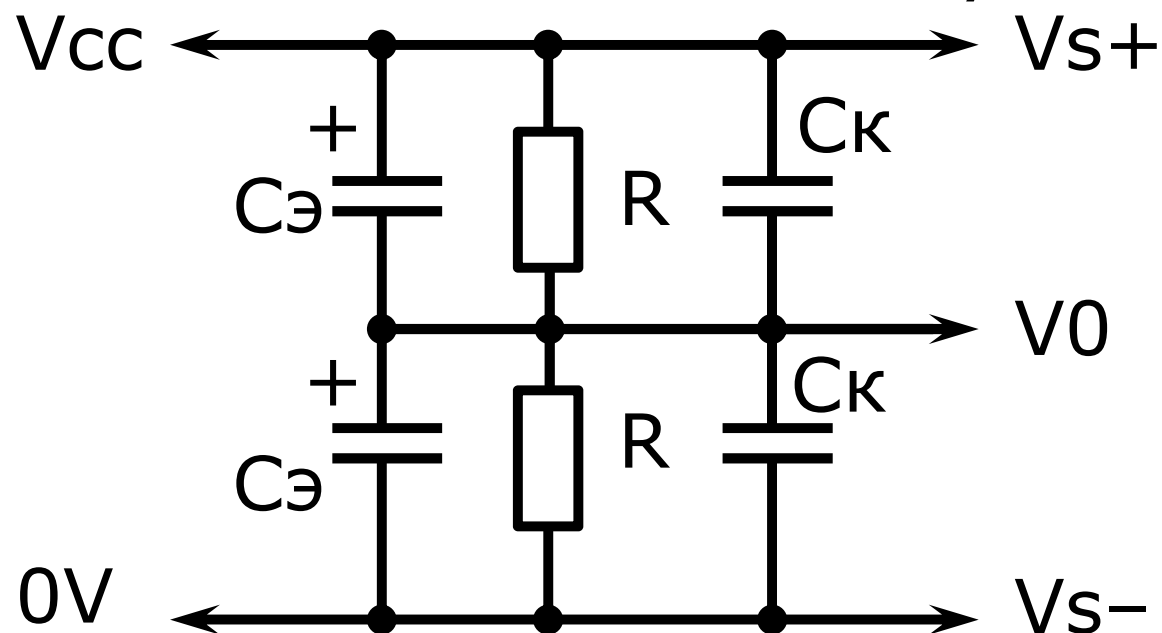
---



$$V_{out} = (V_+ - V_-) * K$$

## Питание

1. Двуполярное питание (например, 0V, +15V, -15V).
2. Униполярное питание (средняя точка создается искусственно):





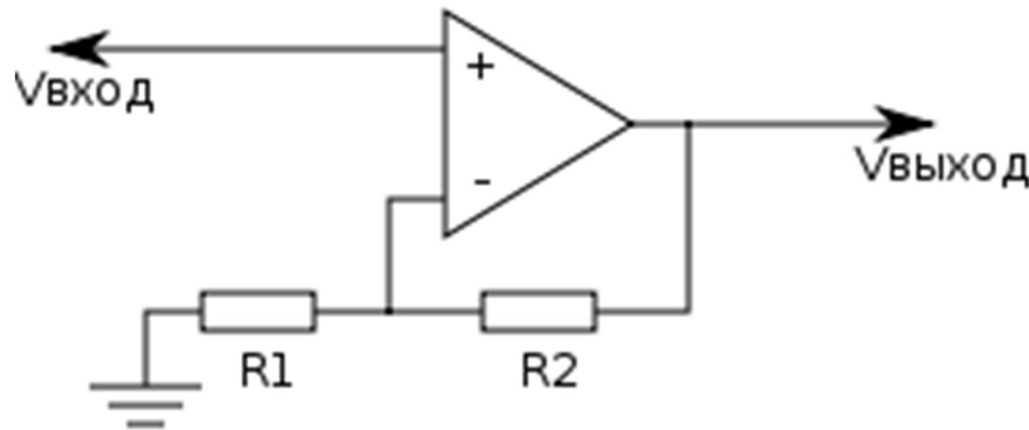
## Идеальный ОУ

Бесконечно большой коэффициент усиления  
(при отсутствии обратной связи):  $G = \infty$

Бесконечно большое входное сопротивление  
 $R_{вх} = \infty$

- Нулевое выходное сопротивление  $R_{вых} = 0$
- Способность выставить на выходе любое значение напряжения
- Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе
- Полоса пропускания: от постоянного тока до бесконечности
- Нечувствительность к синфазной помехе

# Неинвертирующий усилитель



$$V_+ = V_{in}$$

$$V_- = V_{out} (R1/(R1+R2))$$

$$V_{out} = G(V_+ - V_-) = G(V_{in} - V_{out} (R1/(R1+R2)))$$

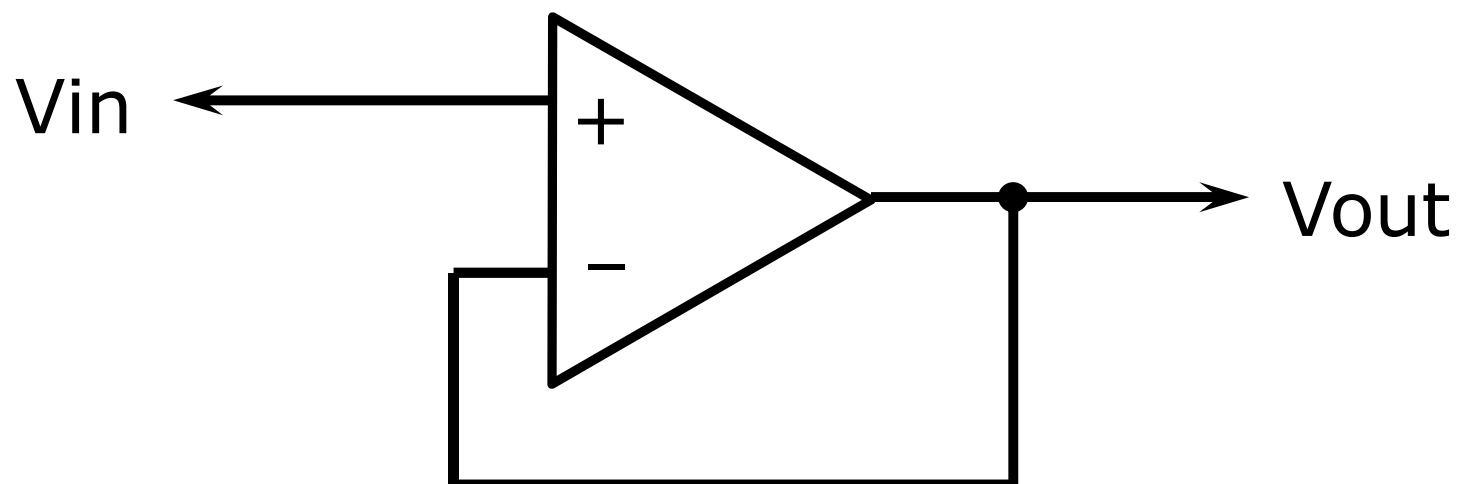
$$V_{out} (1 + G(R1/(R1+R2))) = G V_{in}$$

$$K = V_{out}/V_{in} = G/(1 + G(R1/(R1+R2))) =$$

$$= (G \rightarrow \infty) 1/(R1/(R1+R2)) = 1 + R2/R1$$

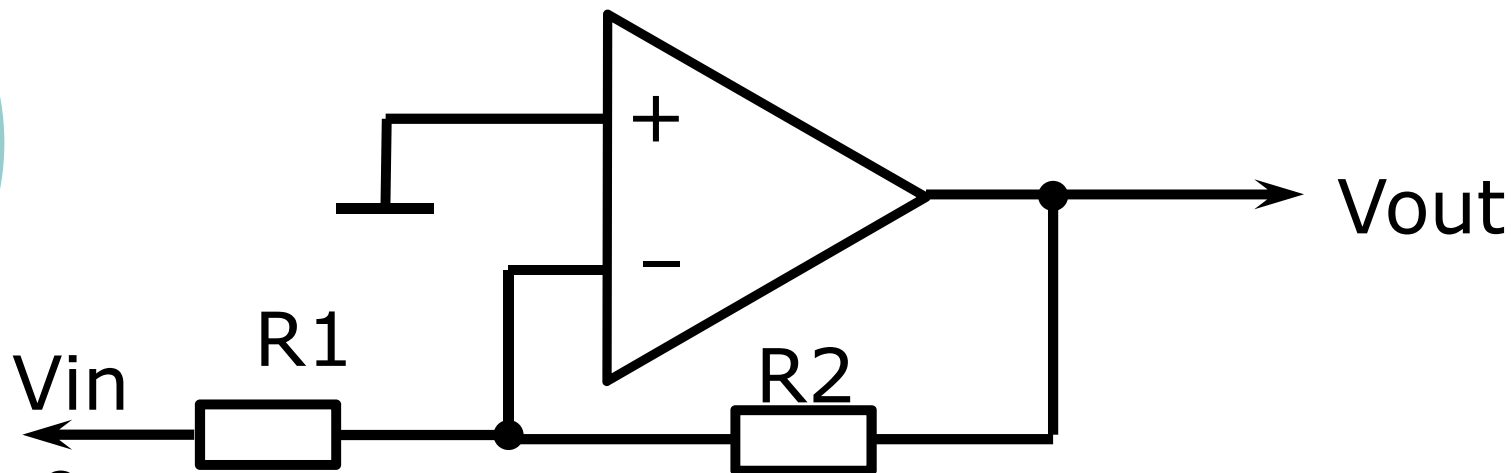
Внимание, вопрос:

---



$$K = 1$$

## Инвертирующий усилитель




$$V_+ = 0$$

$$V_- = V_{in} + (V_{out} - V_{in}) \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right)$$

$$V_{out} = G(V_+ - V_-) = -G \left( V_{in} + (V_{out} - V_{in}) \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right) \right)$$

$$V_{out} \left( 1 + G \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right) \right) = G V_{in} \left( \left( \frac{R1}{R1 + R2} \right) - 1 \right)$$

... →



$$V_+ = 0; V_- = V_{in} + (V_{out} - V_{in}) \frac{R1}{R1 + R2}$$

$$V_{out} = G(V_+ - V_-) = -G \left( V_{in} + (V_{out} - V_{in}) \frac{R1}{R1 + R2} \right)$$

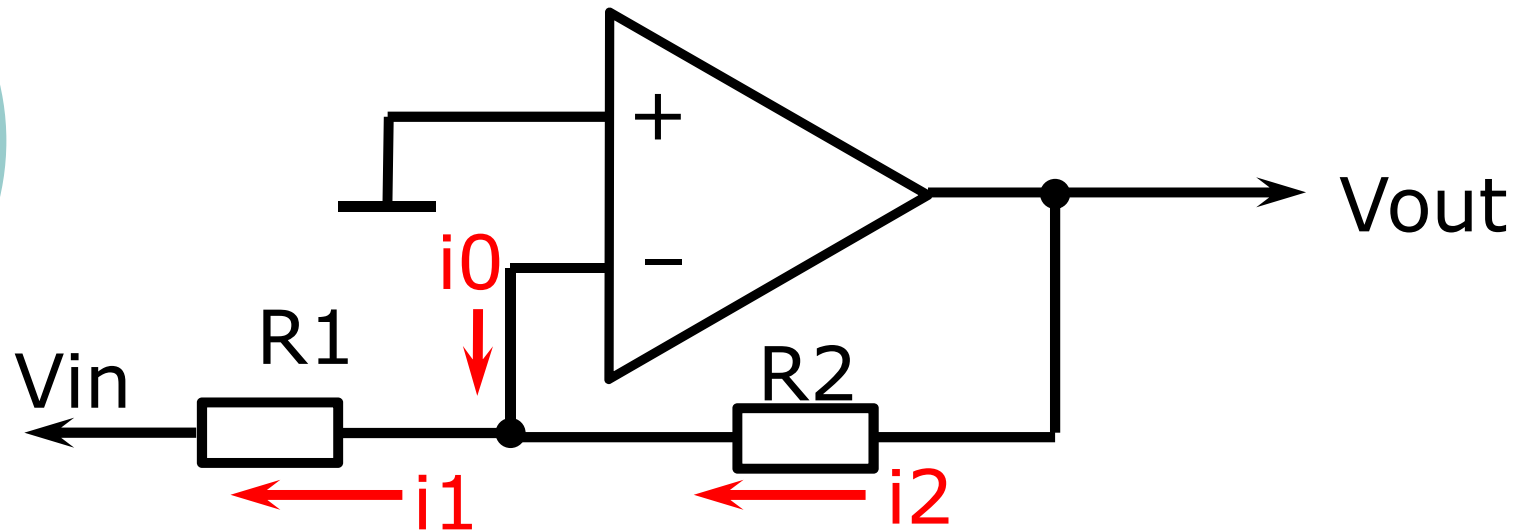
$$V_{out} \left( 1 + G \frac{R1}{R1 + R2} \right) = GV_{in} \left( \frac{R1}{R1 + R2} - 1 \right)$$

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{G \left( \frac{R1}{R1 + R2} - 1 \right)}{1 + G \frac{R1}{R1 + R2}}$$

При  $G \rightarrow \infty$ :

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{R1}{R1 + R2} - 1}{\frac{R1}{R1 + R2}} = \frac{\frac{R1 - R1 - R2}{R1 + R2}}{\frac{R1}{R1 + R2}} = -\frac{R2}{R1}$$

# Инвертирующий усилитель



$$i_1 = i_0 + i_2 = i_2$$

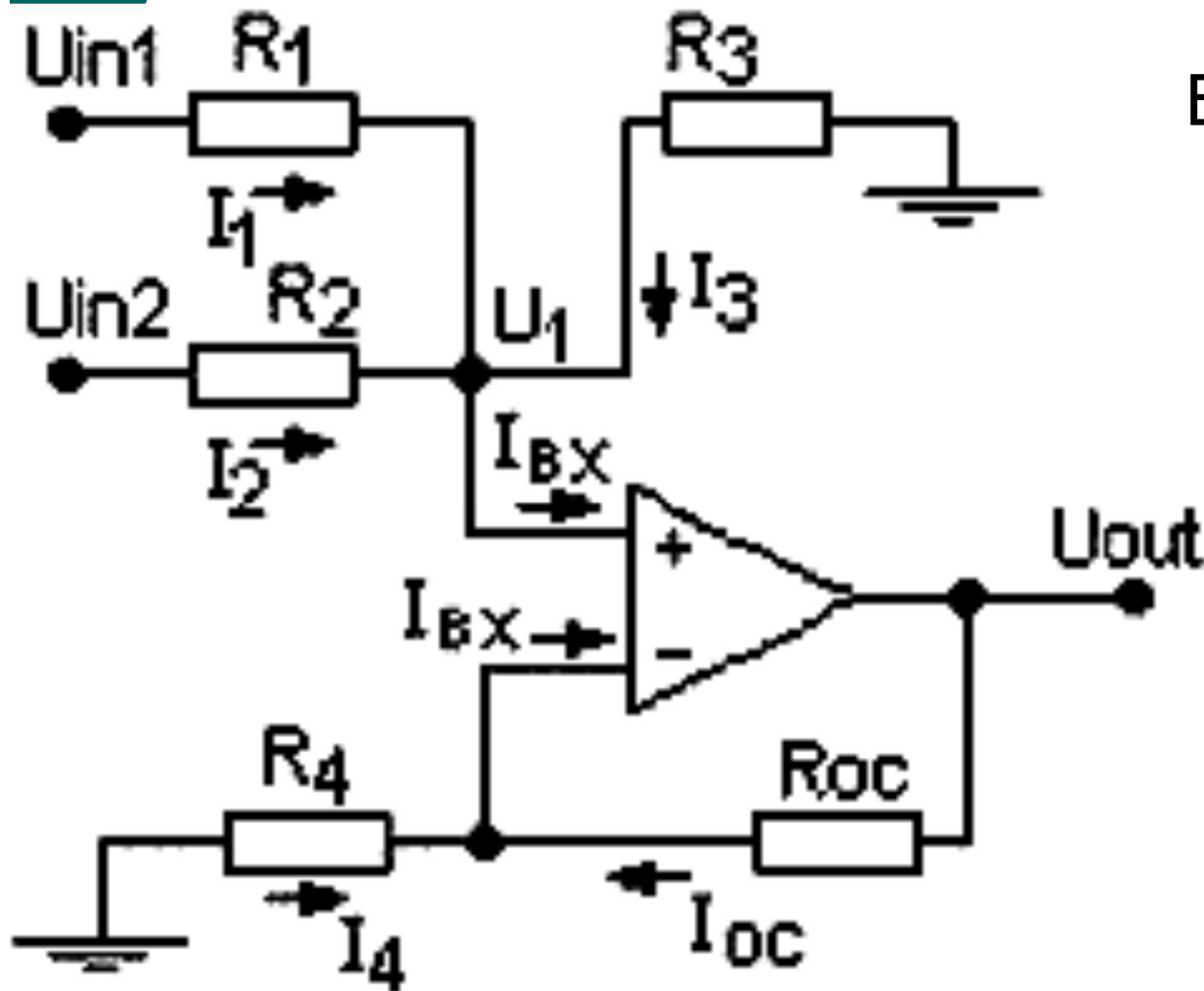
$$V_- = V_+ = 0$$

$$(0 - V_{in})/R_1 = (V_{out} - 0)/R_2$$

$$-V_{in}/R_1 = V_{out}/R_2$$

$$V_{out}/V_{in} = -R_2/R_1$$

## Неинвертирующий сумматор



Если

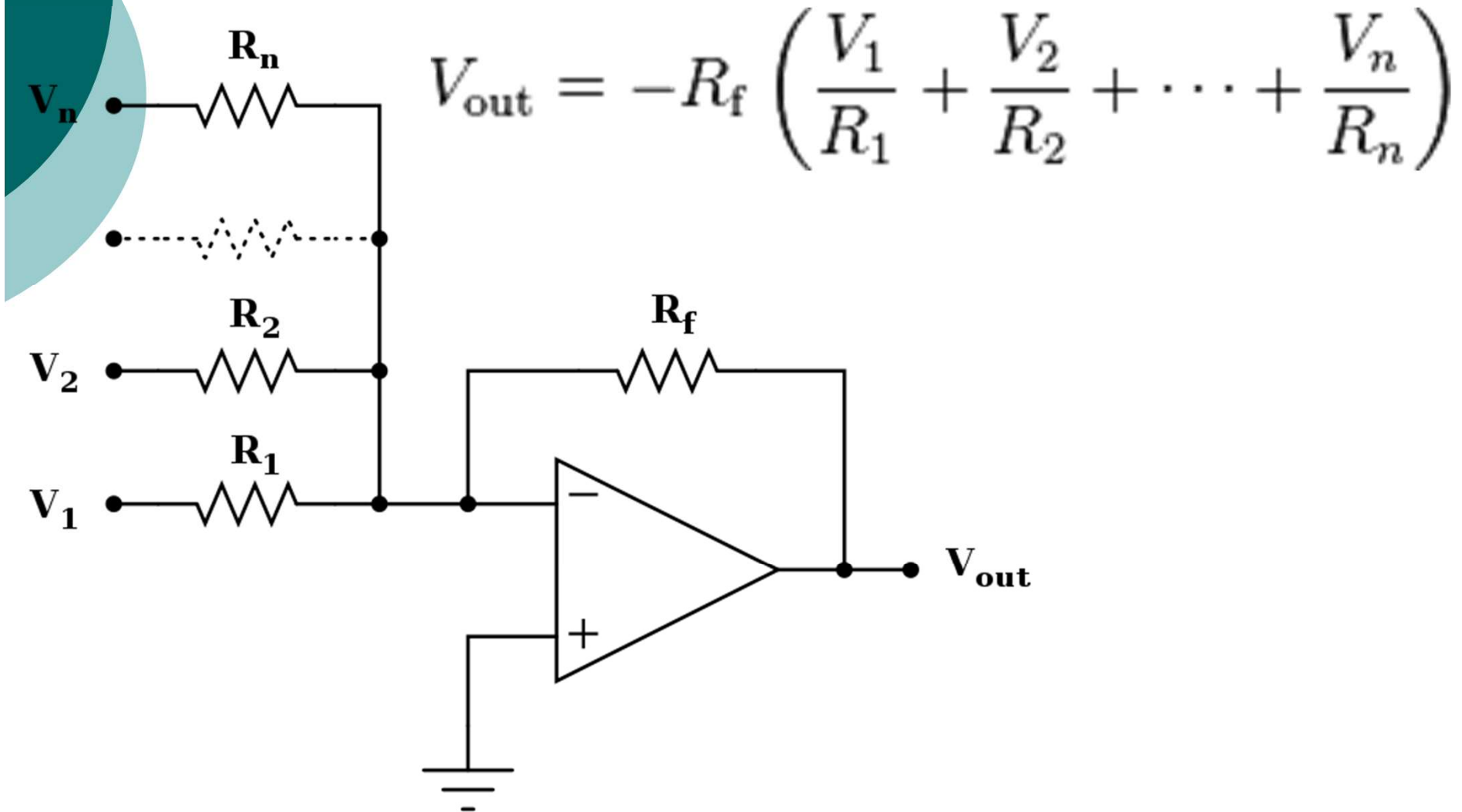
$$\frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_{oc}}{R_4}$$

$$U_{out} = K_1 U_{in1} + K_2 U_{in2}$$

$$K_1 = R_3 / R_1$$

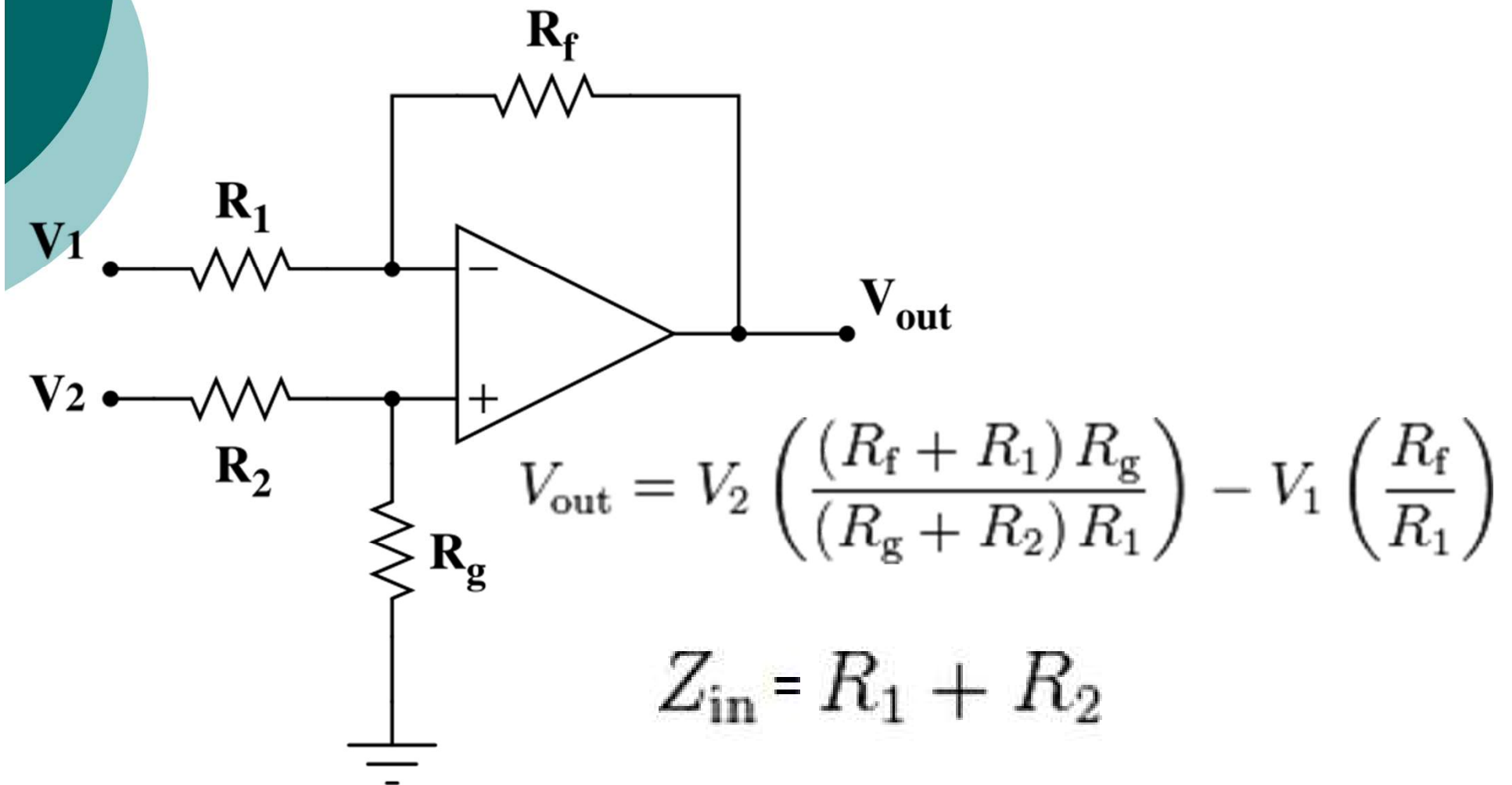
$$K_2 = R_3 / R_2$$

# Инвертирующий сумматор

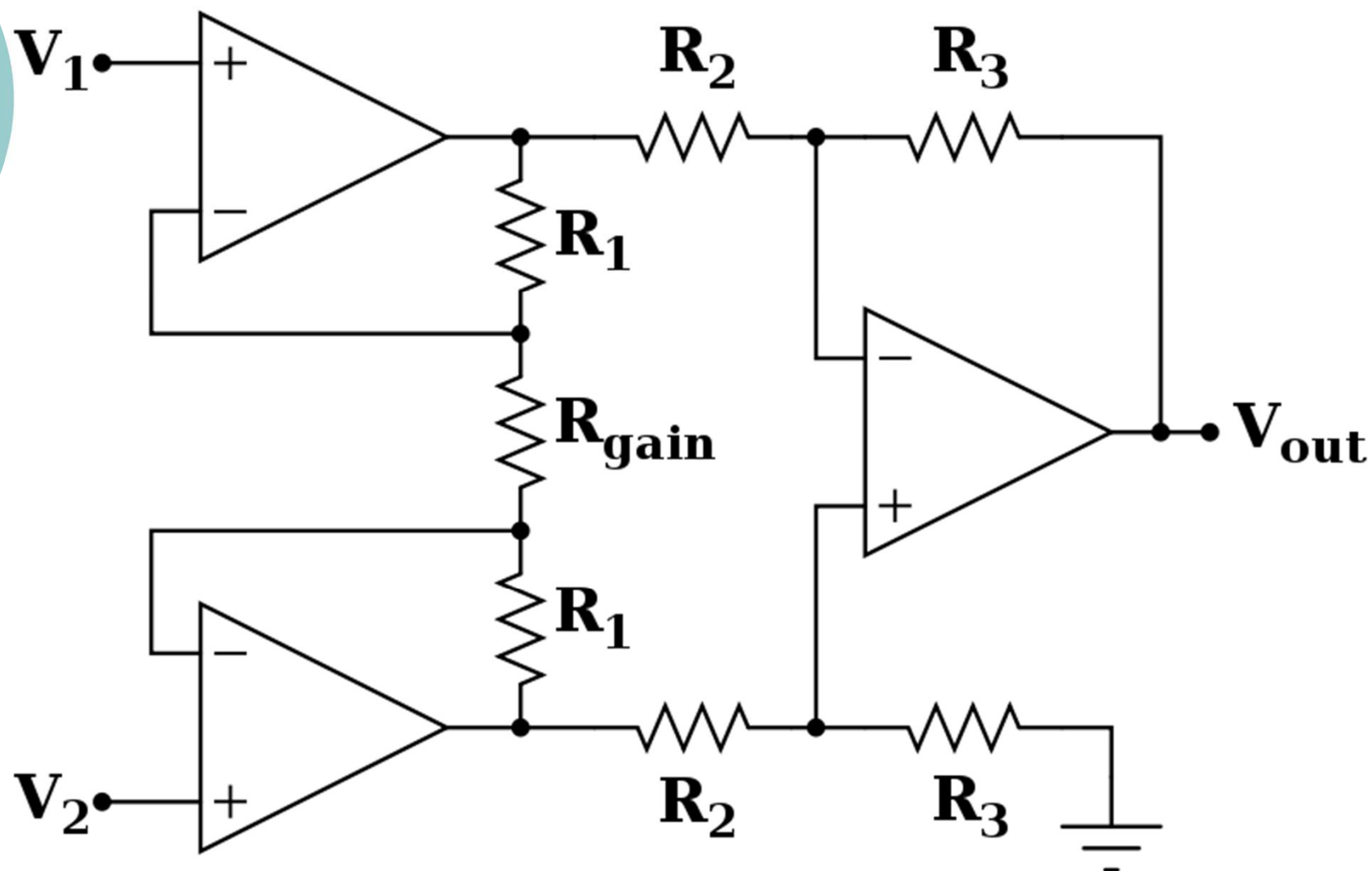




# Вычитатель

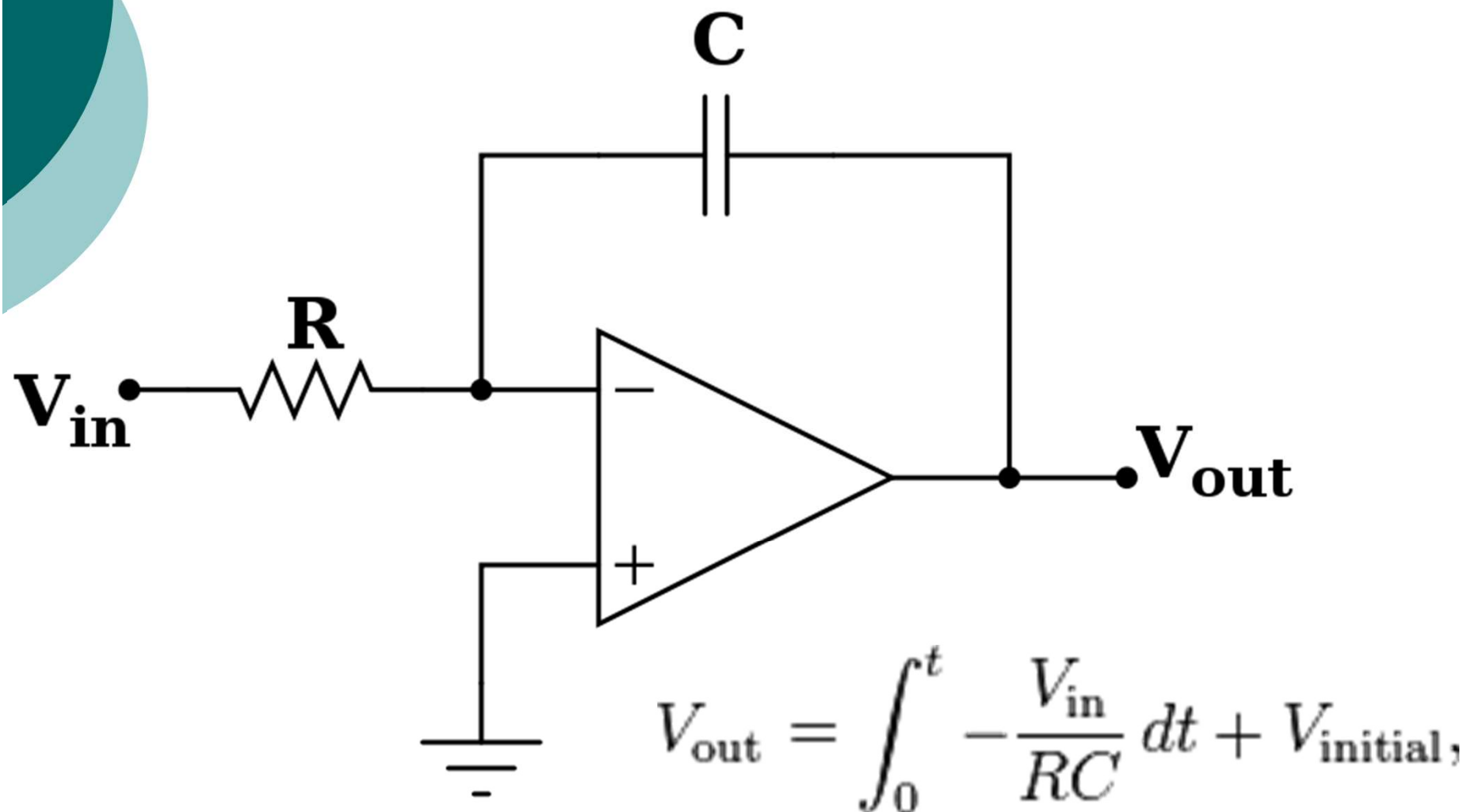


# Вычитатель с высоким $Z_{in}$ (инструментальный усилитель)



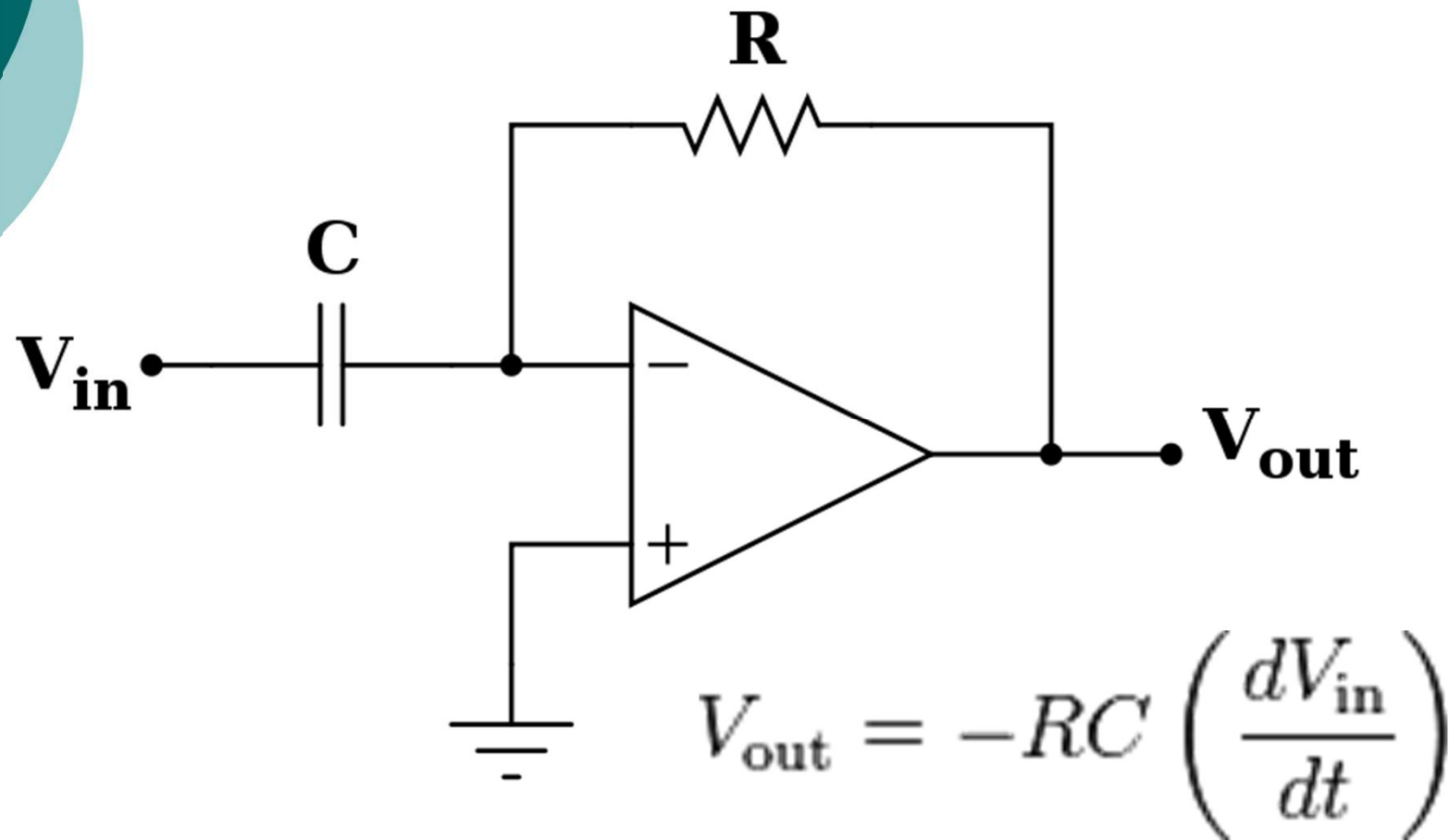
# Интегратор

---



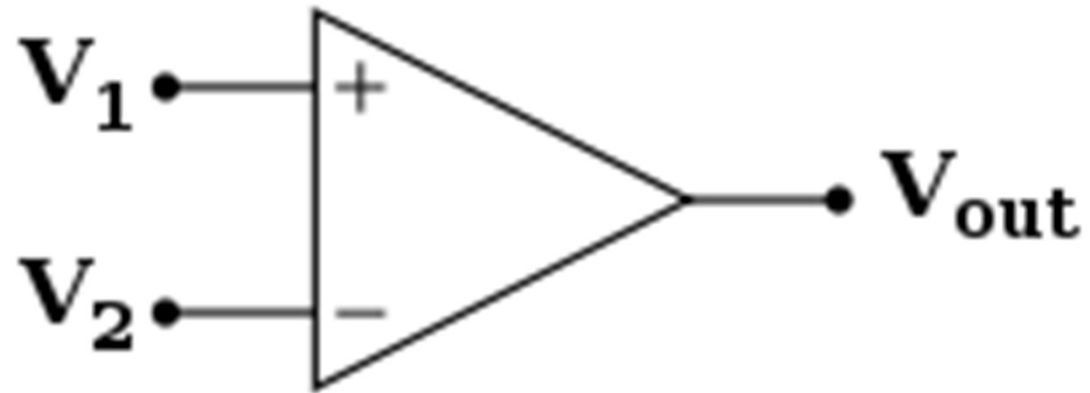
# Дифференциатор

---



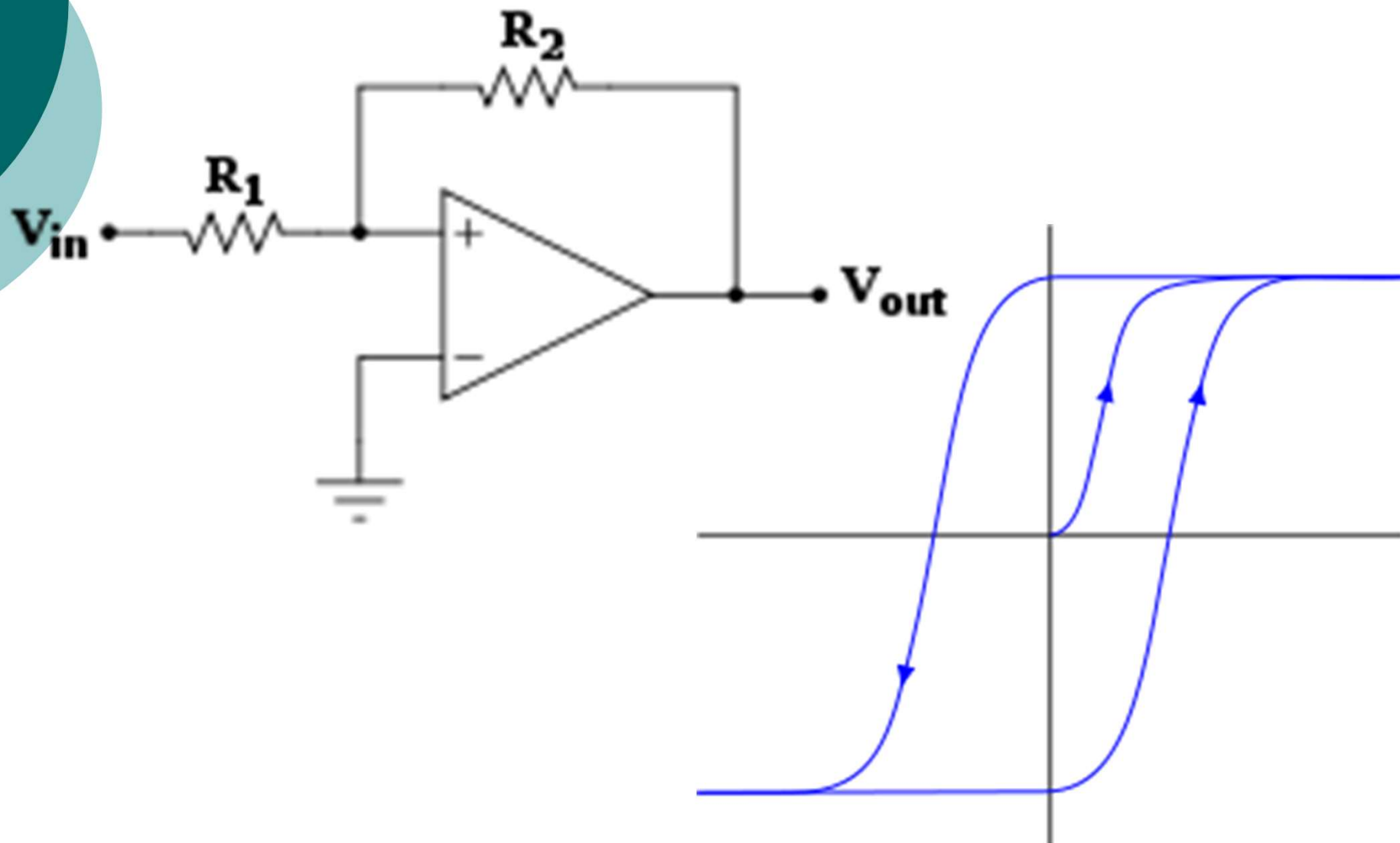
# Компаратор

---

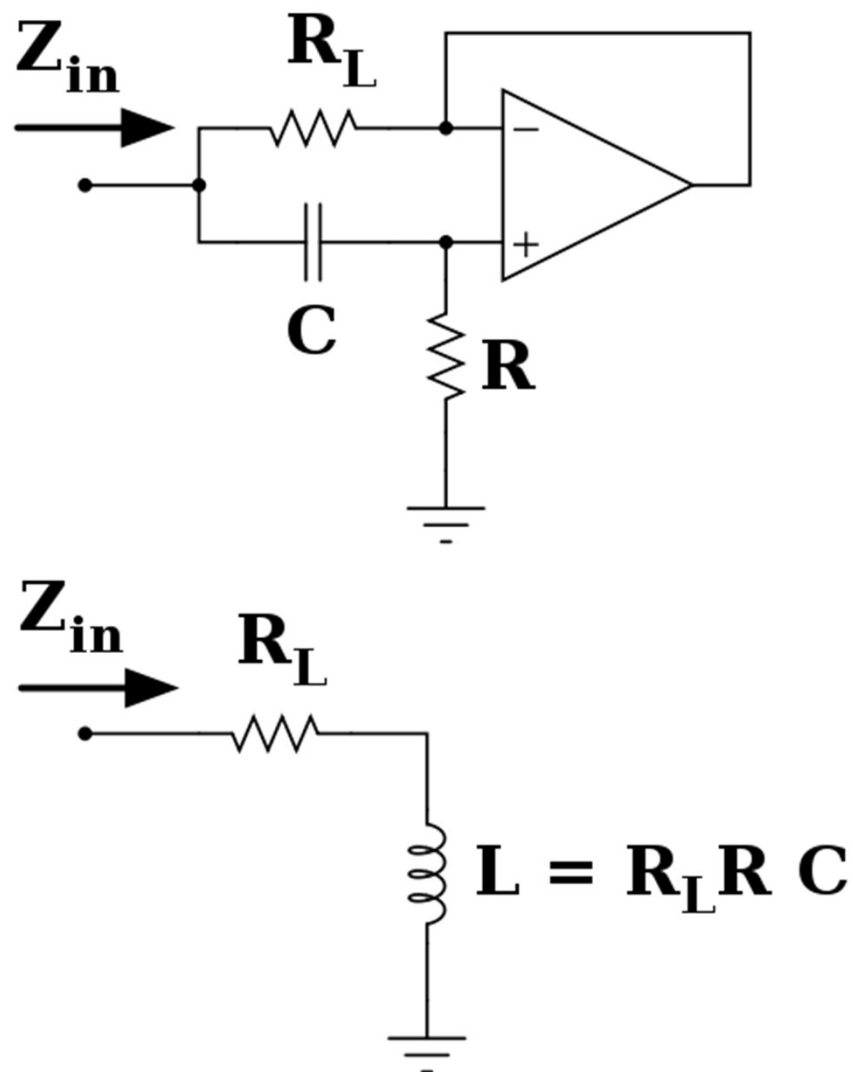


$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$

# Триггер Шмитта

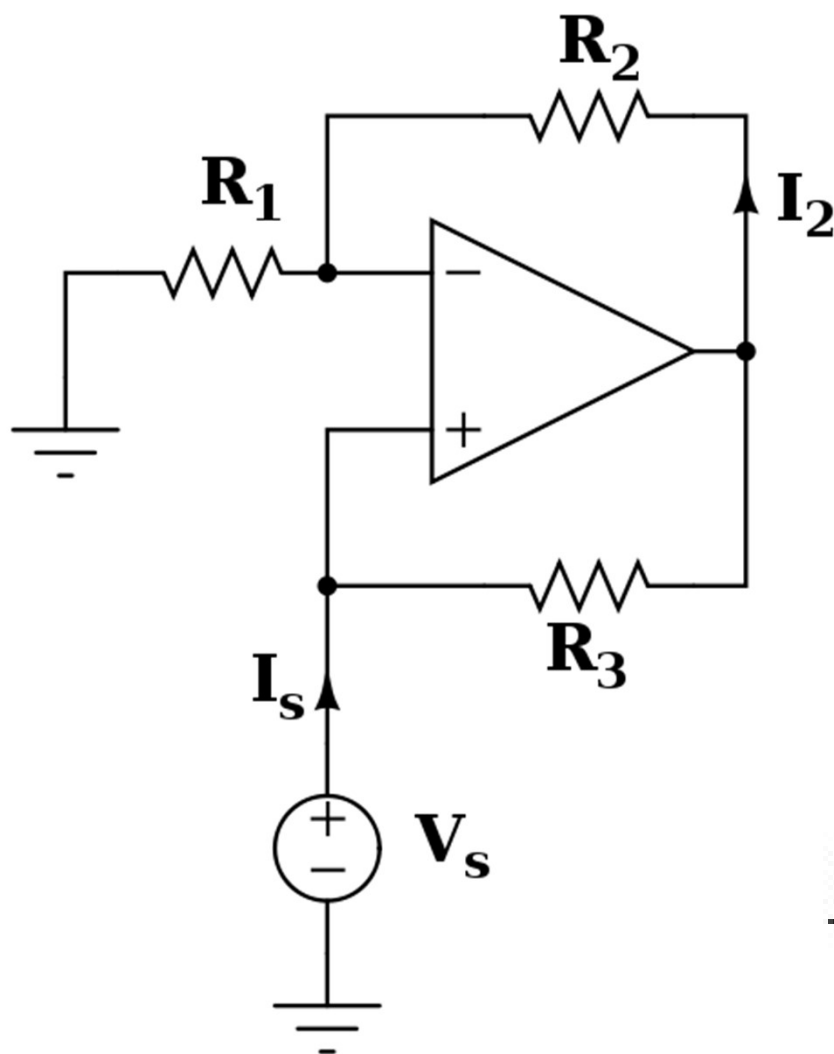


# Гиратор (имитатор индуктивности)



# Преобразователь отрицательного сопротивления

---

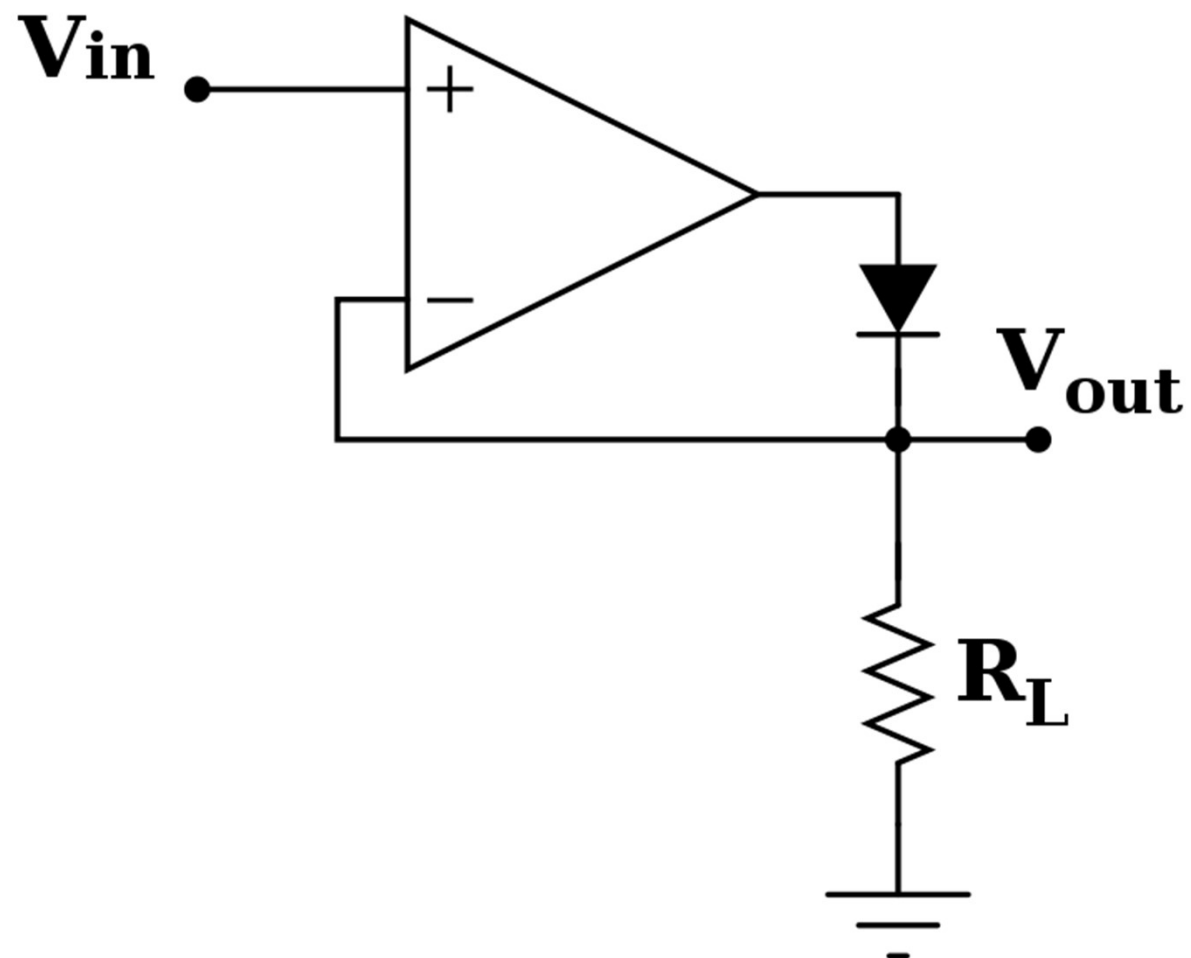


$$R_{\text{in}} = -R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

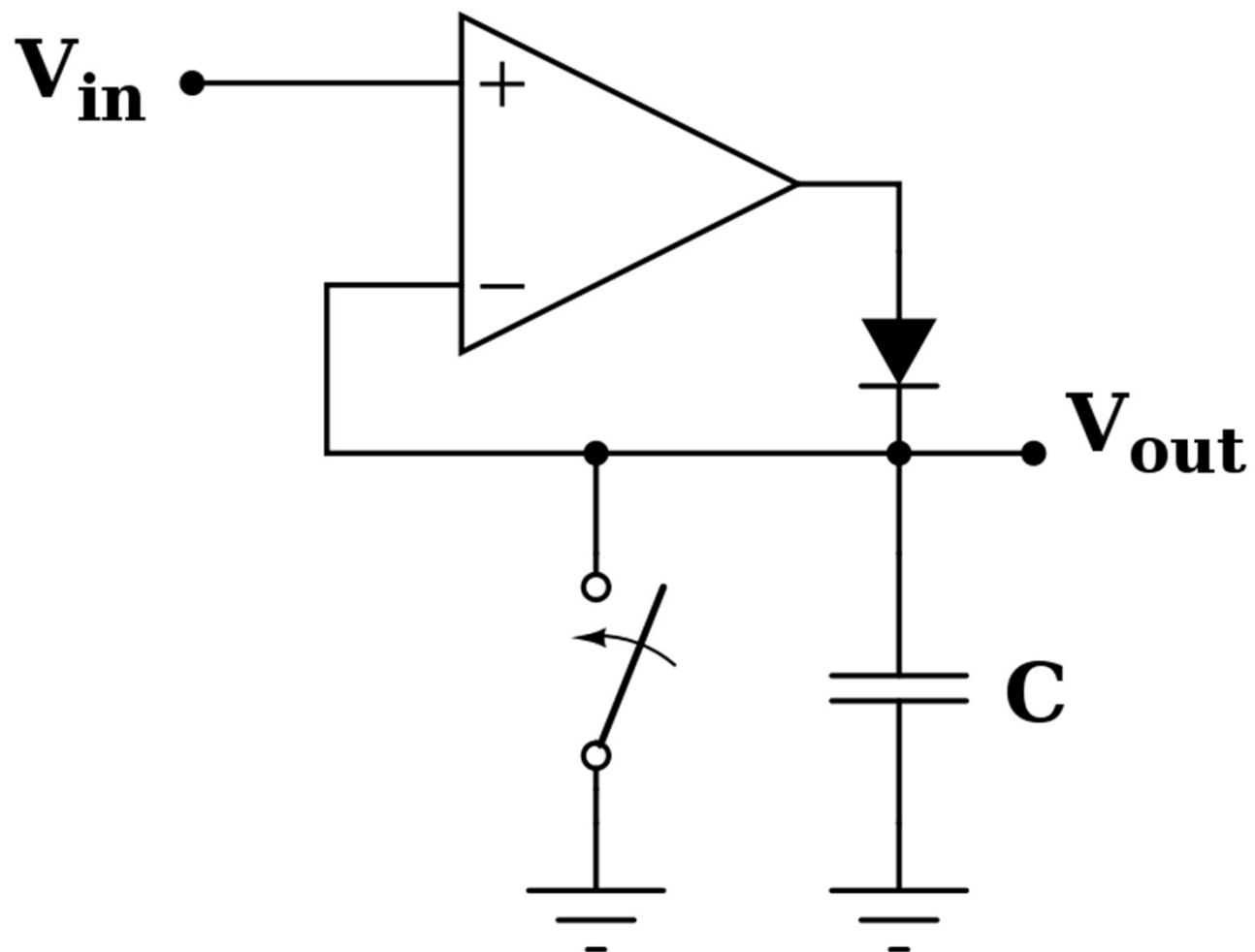


# Прецизионный выпрямитель

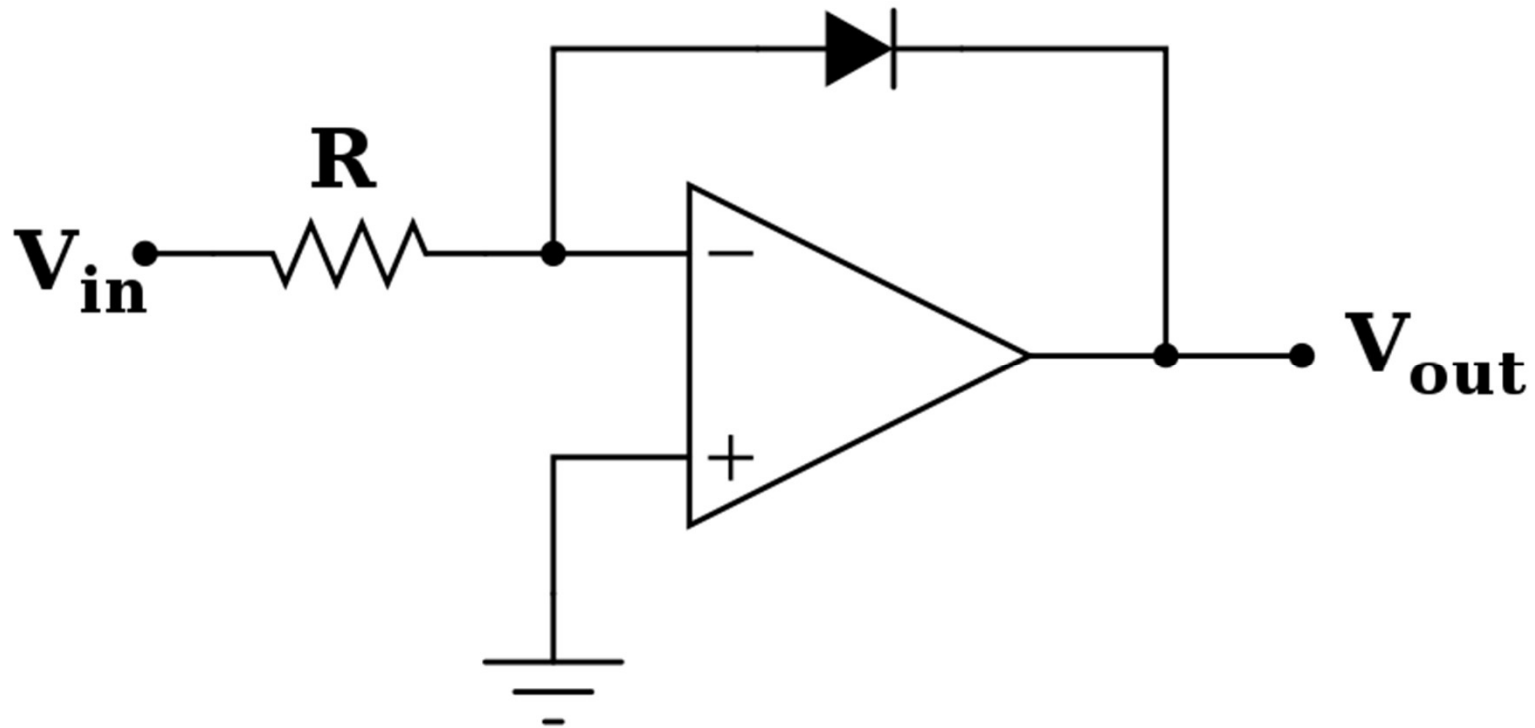
---



# Пиковый детектор



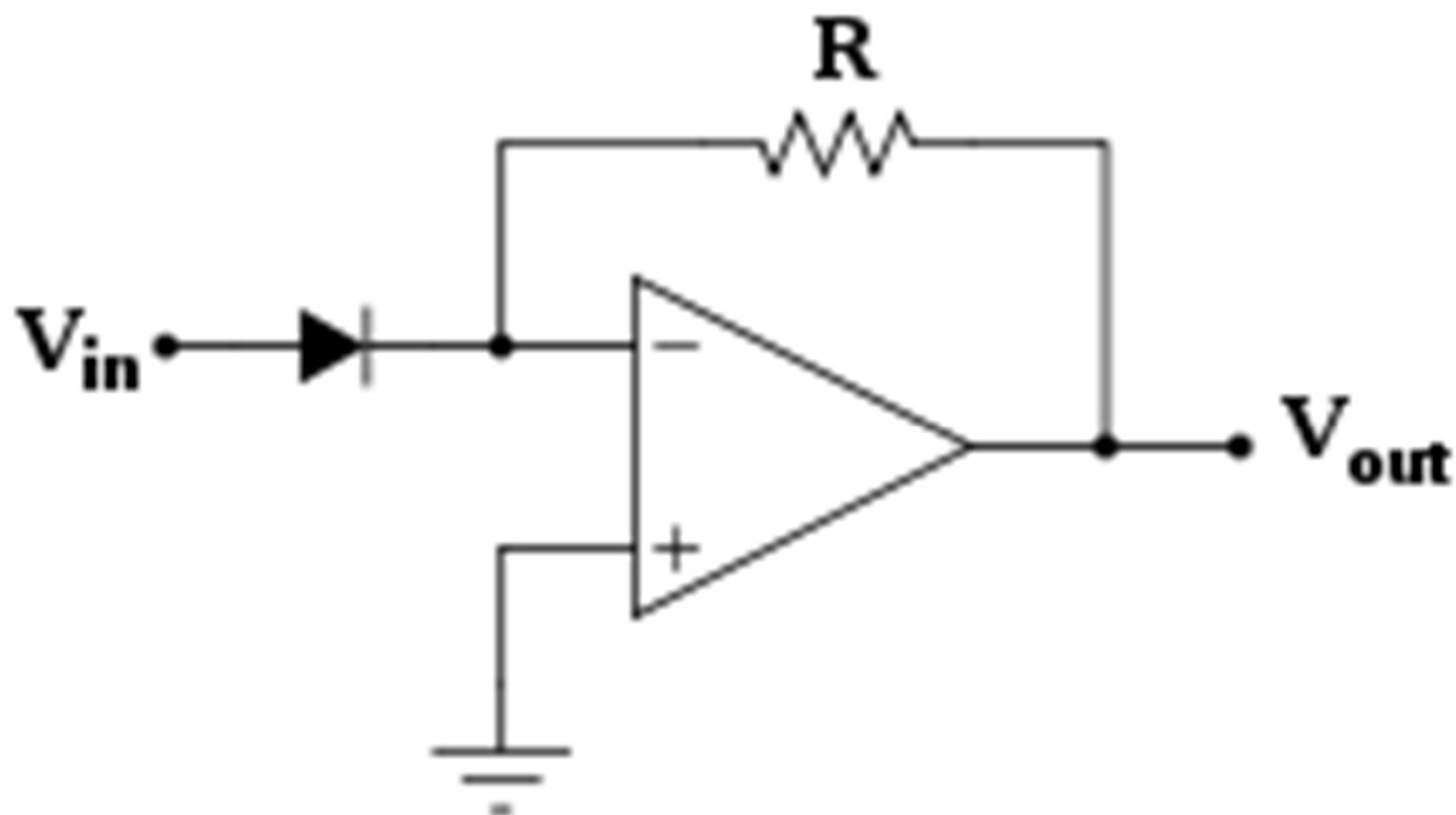
# Логарифмический усилитель



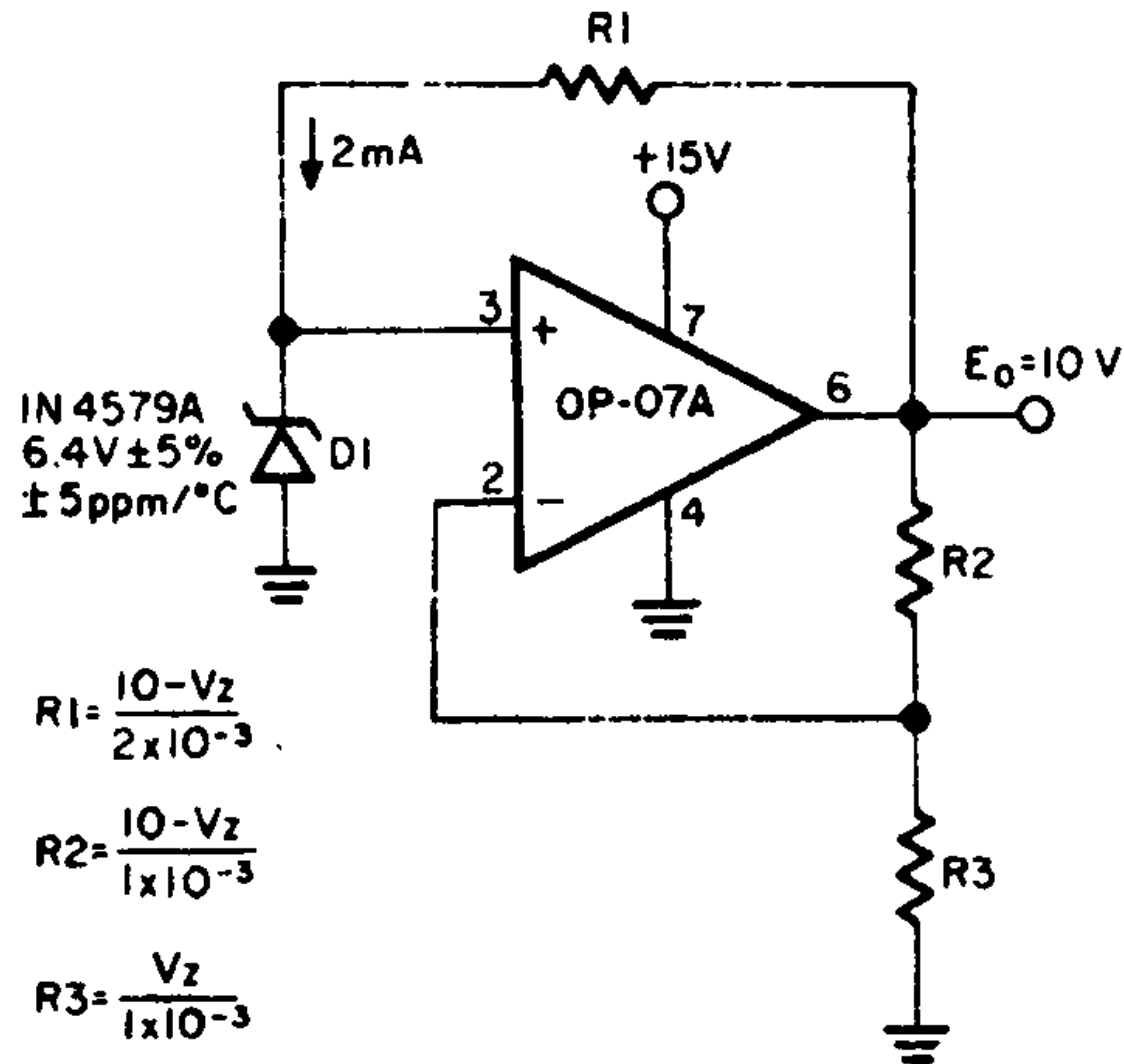
$$v_{out} = -V_{\gamma} \ln \left( \frac{v_{in}}{I_S \cdot R} \right)$$

# Экспоненциальный усилитель

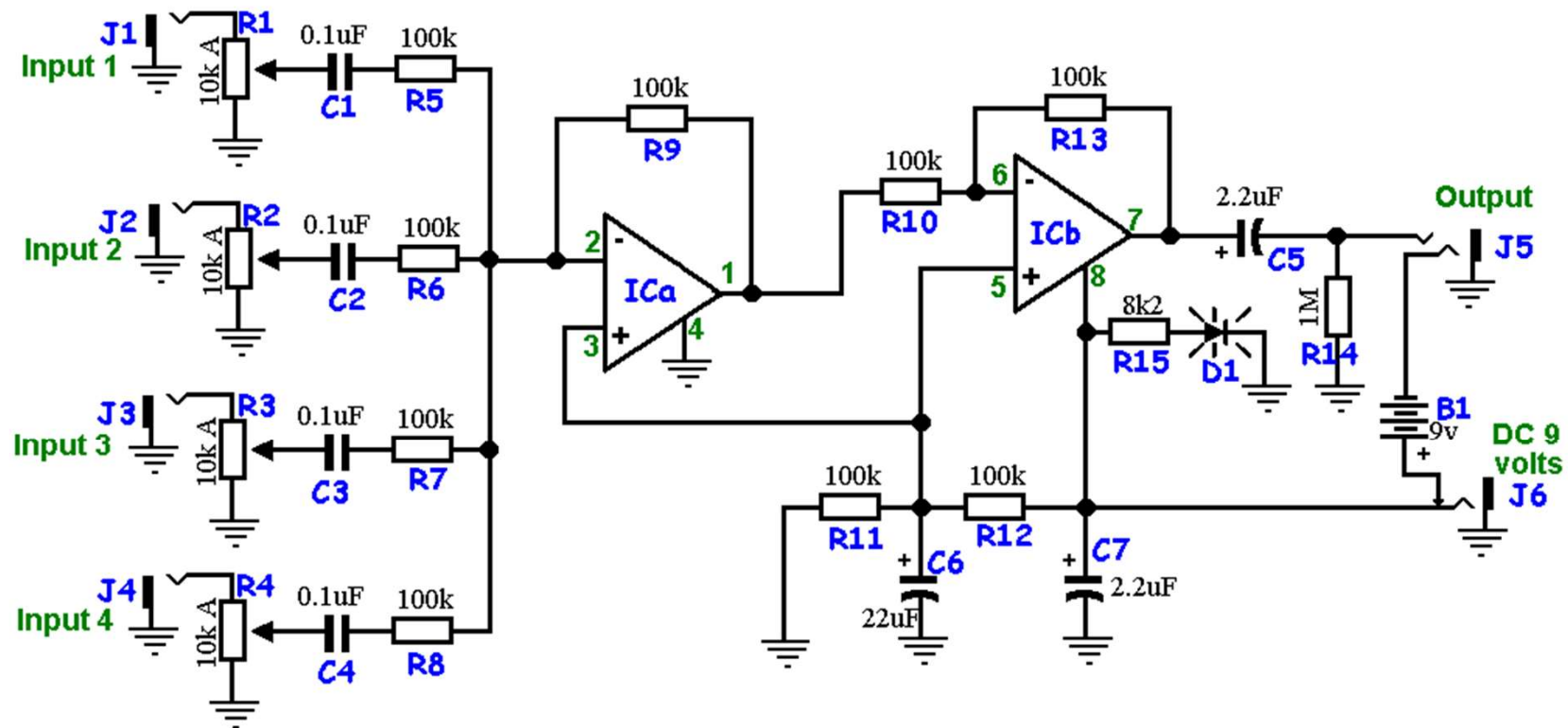
---



# Источник опорного напряжения

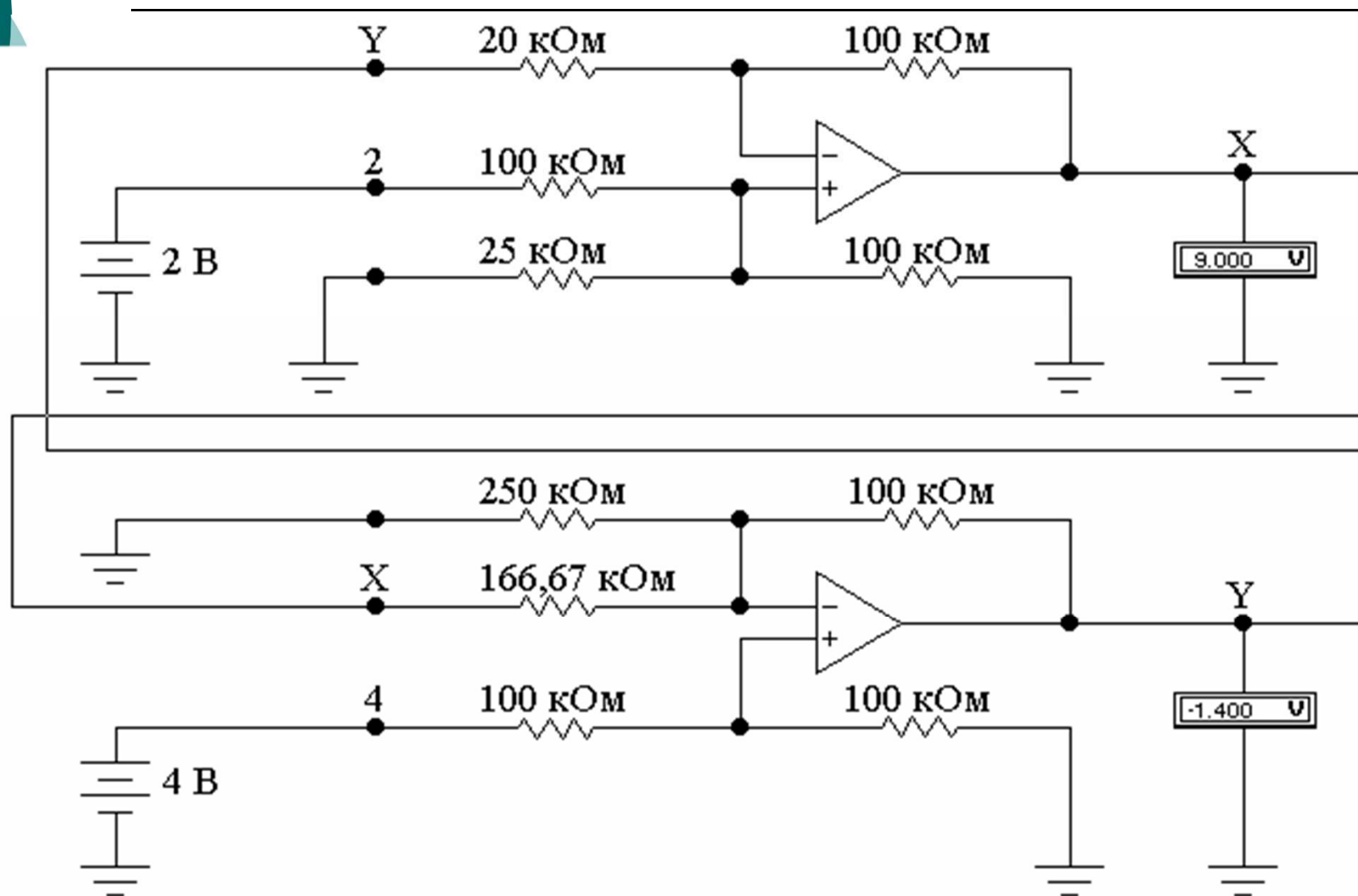


# Схема суммирования токов

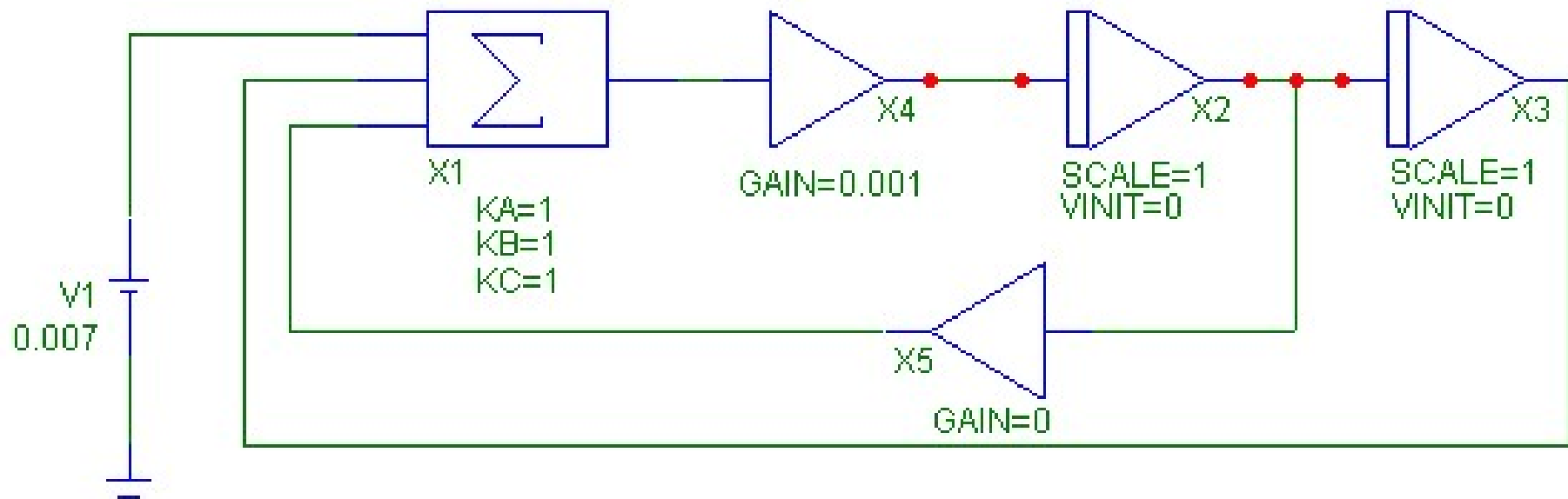


# Решение системы линейных уравнений

$$\begin{cases} 2X + 10Y = 4 \\ 3X + 5Y = 20 \end{cases}$$



# Решение дифференциальных уравнений





# Решение дифференциальных уравнений

