

# **ОСНОВИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

## **Модуль 3. Схеми радіоелектроніки**

### **Лекція №4 Операційний підсилювач**

Викладач:

Кан.-фіз. мат. наук, доцент КЯФ

Єрмоленко Руслан Вікторович



# План лекції

- Операційний підсилювач
- Схеми на основі операційного підсилювача з негативним зворотнім зв'язком :
  - Неінвертуючий підсилювач
  - Інвертуючий підсилювач
  - Повторювач
  - Інвертуючий суматор
  - Схеми сумування -віднімання
  - Логарифмічні та антилогарифмічні схеми
- Схеми на основі операційного підсилювача з позитивним зворотнім зв'язком:
  - Компаратор
  - Тригер Шмітта

# Література

- Исаков.Ю.А., Платонов А.П. Основы промышленной электроники. К.:Техніка, 1976., гл.9, п.1-2, гл.10, п.1-3.
- И.П. Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., Энергия, 1977. гл.11, п.11-1, 11-2, гл.12, п.12-1...12-3, гл.13, гл.14, п.14-1...14-3
- Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. Изд. 2-е. гл.5, п.13, гл.6, п.8. М.: Радио и связь, 1985., гл.11, п.1-4, гл.10, п.1-5.
- Москатов Е.А. Электронная техника. Таганрог, 2004, ст.81-84.



## КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ КАФЕДРА

НАВЧАННЯ

НАУКОВА РОБОТА

МІЖНАРОДНІ ЗВ'ЯЗКИ

СПІВРОБІТНИКИ

### ПІЗНАВАЙ

Студенту

Абітурієнту

Випускникам

Юним фізикам



Єрмоленко Руслан Вікторович

кандидат фіз.-мат. наук.

E-mail: ndef@univ.kiev.ua

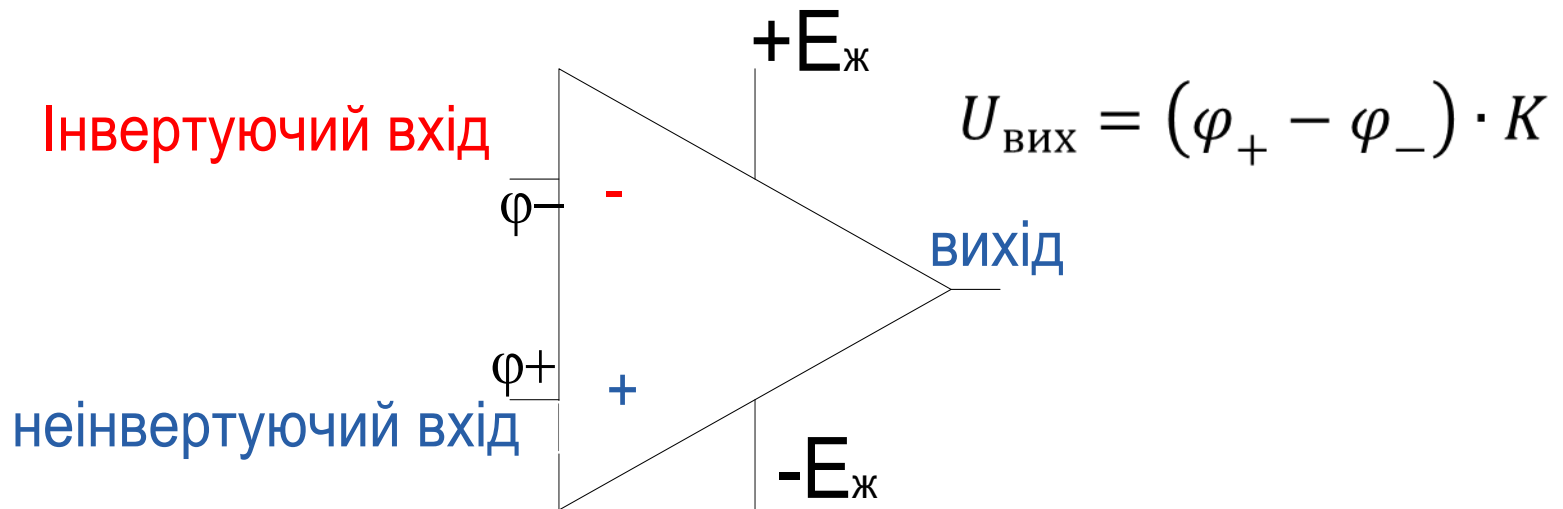
тел. роб.: +380(044)5213217

Лекційні матеріали з курсу "Основи сучасної електроніки (модуль 3, 2 курс)"

Лекційні матеріали з курсу "Основи мікропроцесорної техніки"

# Операційний підсилювач

- **Операційний підсилювач** — підсилювач постійного струму з диференціальним входом, що має високий коефіцієнт підсилення.



# Блок-схема ОП

Інверт. вхід

Диф.  
підсилювач

Підсилювач  
напруги

Підсилювач  
потужності

Вихід

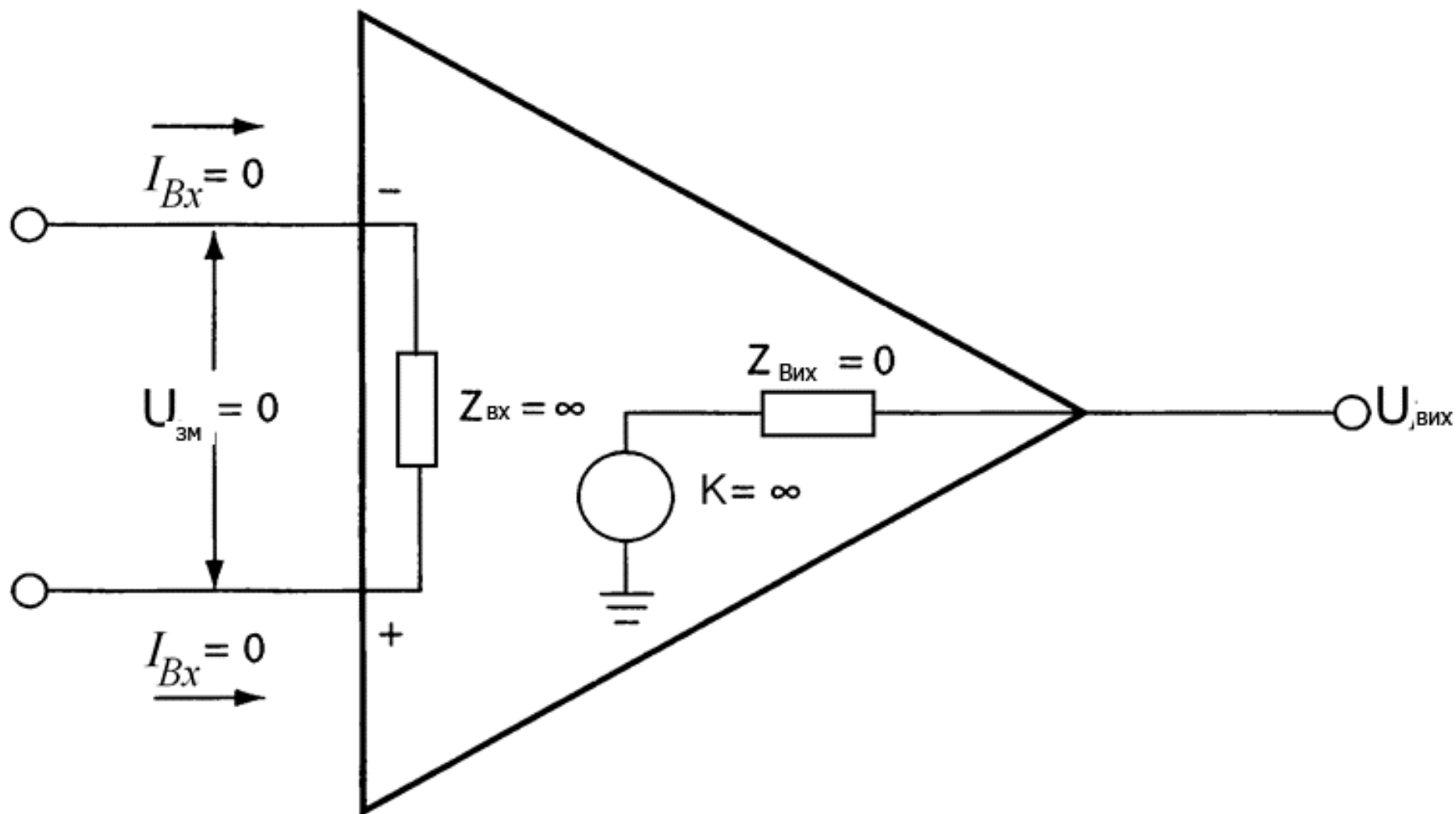
Не інверт. вхід

*Операційним підсилювачем* називають багатокаскадний диференціальний підсилювач постійного струму, який має в діапазоні частот до кількох десятків кілогерц коефіцієнт підсилення більший за  $10^5$  і за своїми властивостями наближається до «ідеального» підсилювача.

Під «ідеальним» розуміють такий підсилювач, який має:

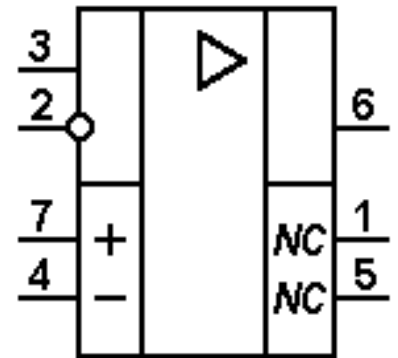
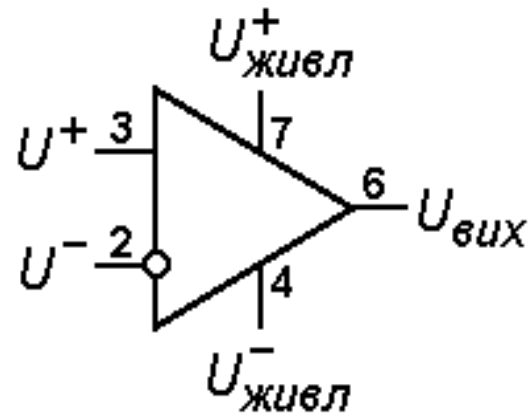
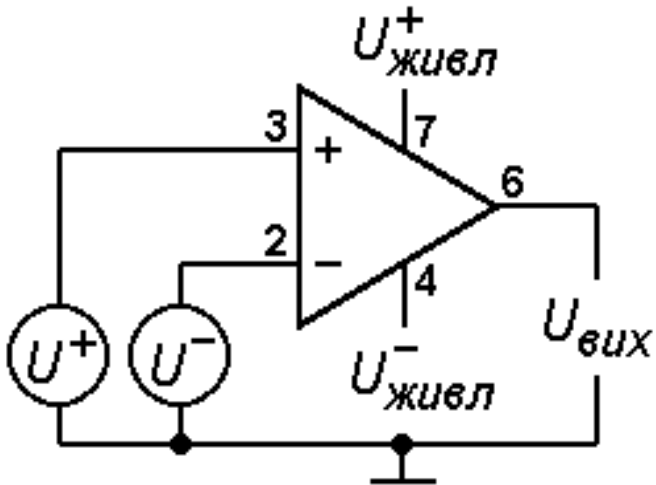
- 1) нескінченний коефіцієнт підсилення за напругою диференціального входного сигналу ( $K \rightarrow \infty$ );
- 2) нескінченний входний імпеданс ( $Z_{вх} \rightarrow \infty$ );
- 3) нульовий вихідний імпеданс ( $Z_{вих} = 0$ );
- 4) рівну нулеві напругу на виході ( $U_{вих} = 0$ ) при рівності напруг на вході ( $U_{вх1} = U_{вх2}$ );
- 5) нескінченний діапазон робочих частот.

# Еквівалентна схема

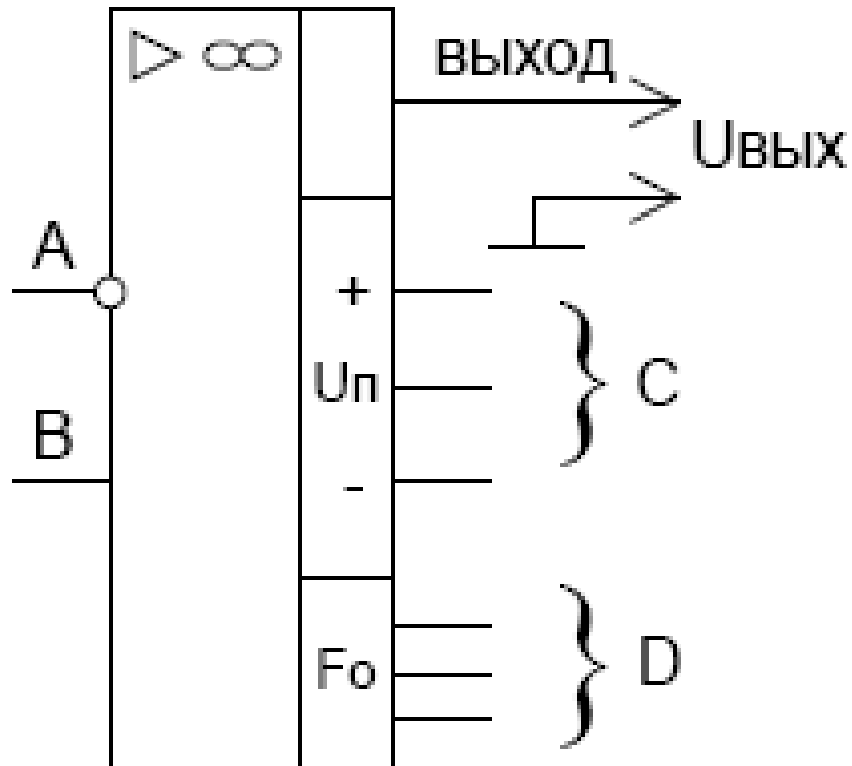




# Варіанти позначення



# Схема ОП К553УД2



A, B – інвертований та не інвертований входи

C – живлення

D – схеми корекції

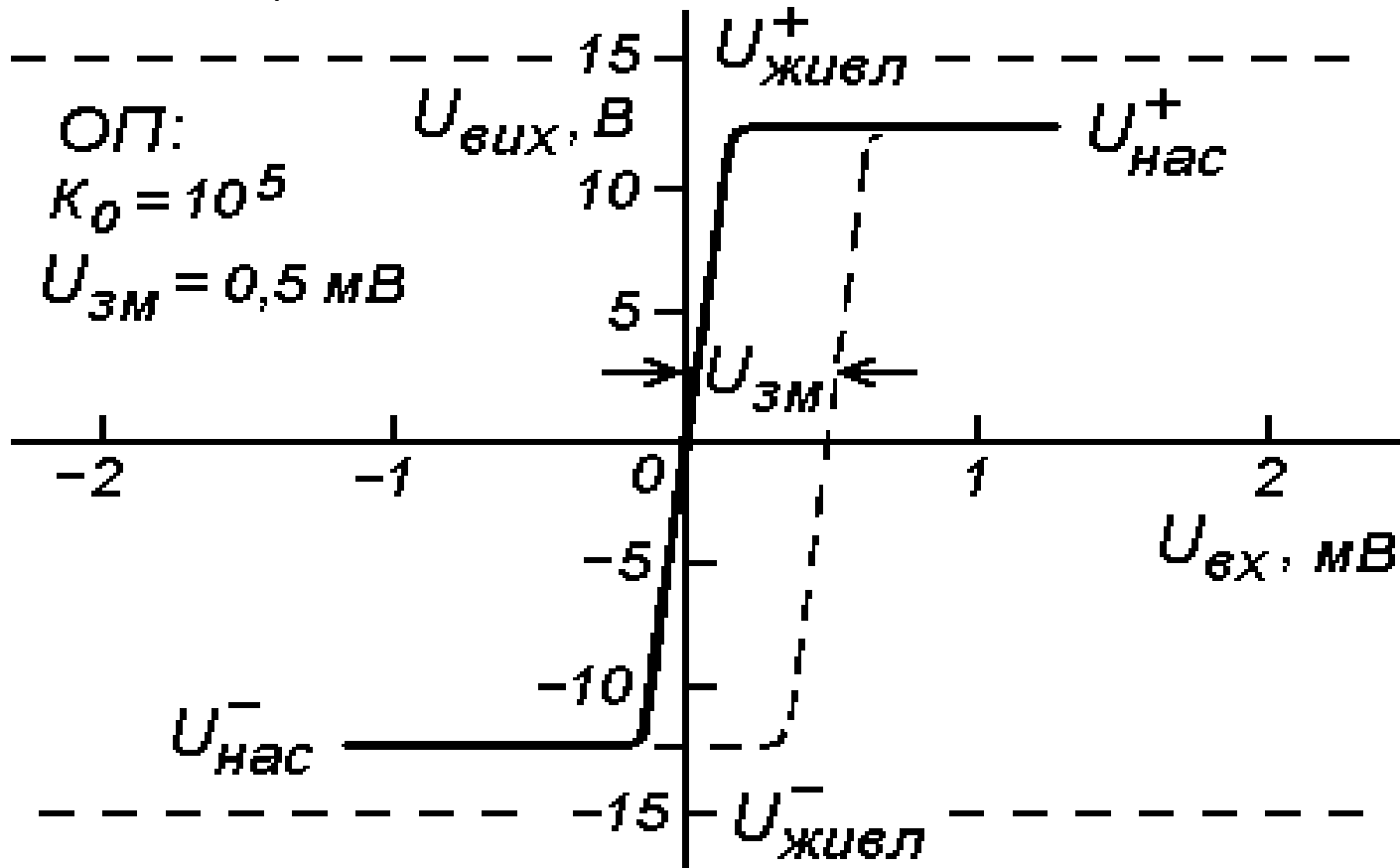
# Залежність вихідної напруги ОП від вхідної

$$U_{вих} = K_0 (U^+ - U^- + U_{зм}) + K_{синф} U_{синф}$$

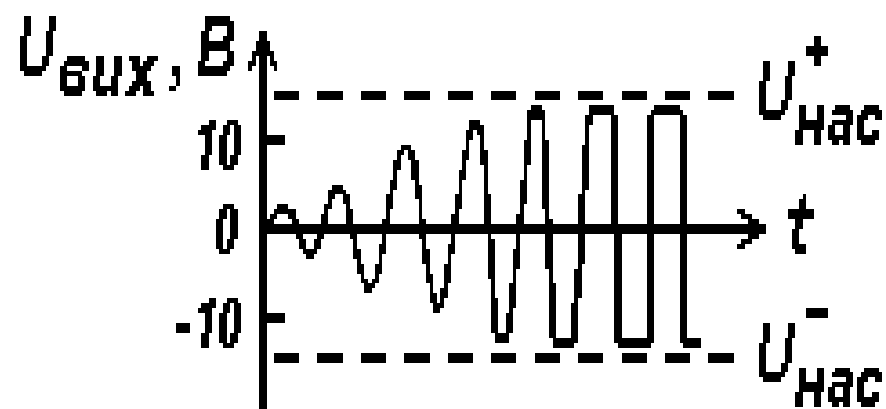
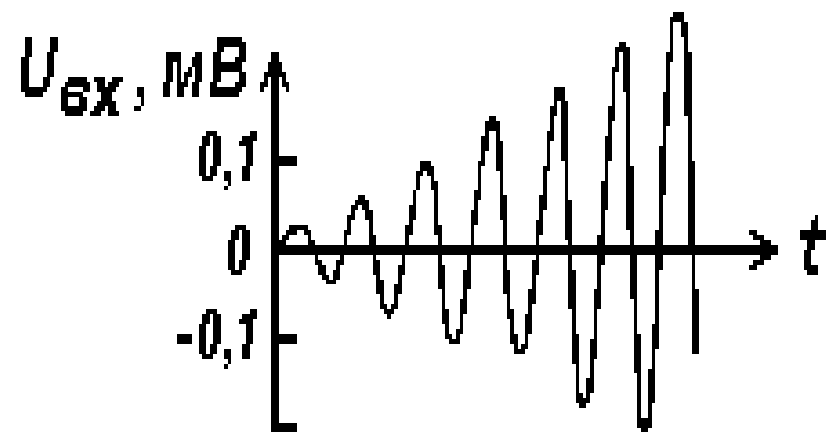
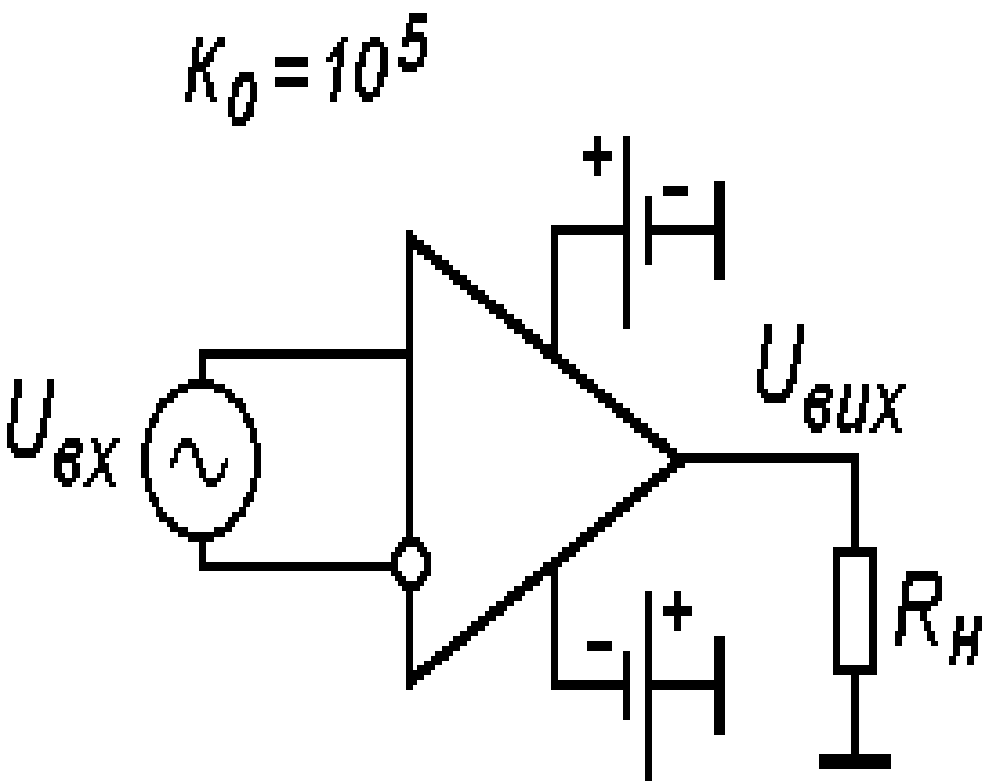
$K_{синф}$  – коефіцієнт передачі синфазного сигналу

$U_{синф} = (U^+ + U^-)/2$  – синфазна вхідна напруга.

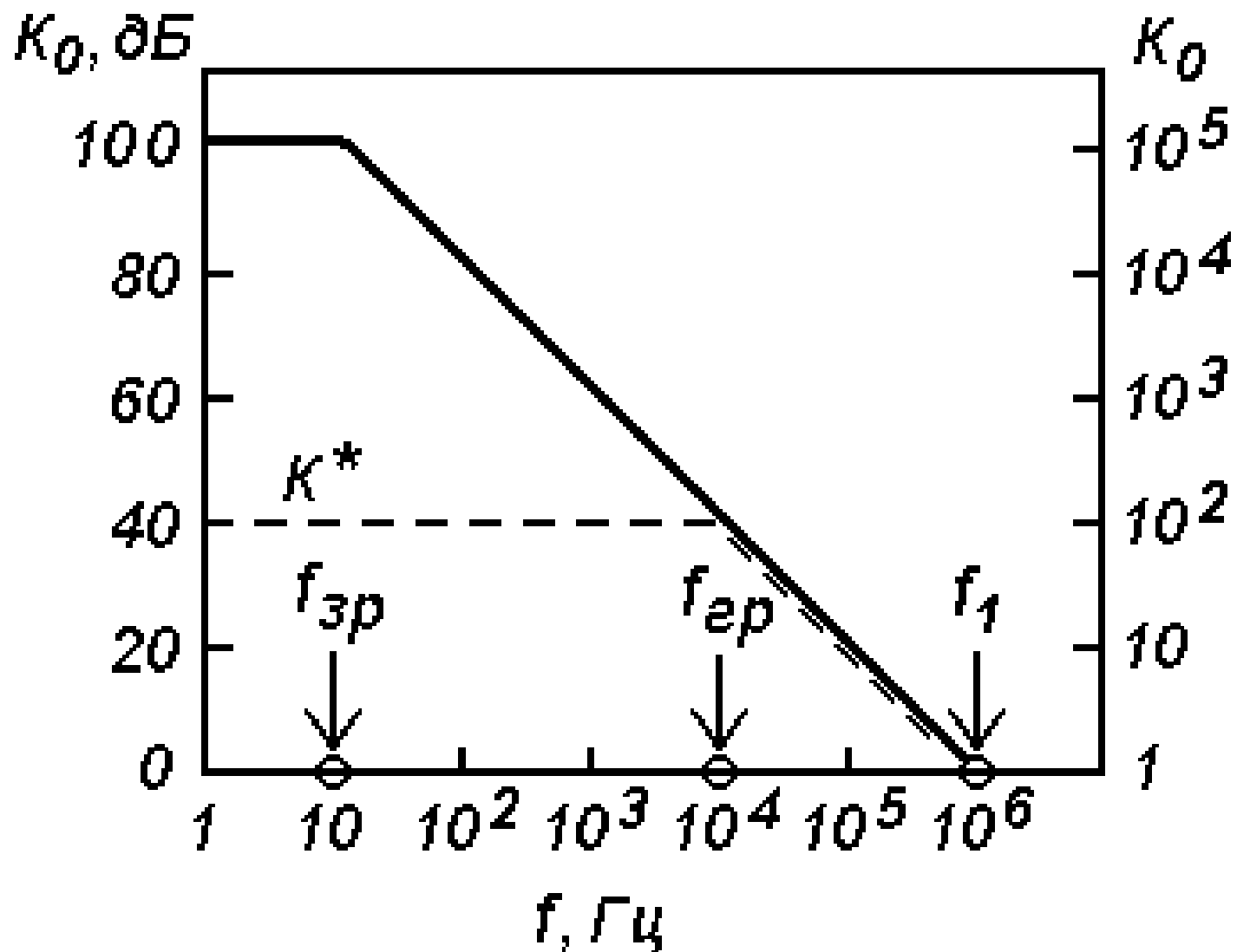
Як правило,  $K_{синф}$  зростає при зростанні частоти сигналу.



# Реакція ОП на синусоїдний сигнал, що наростає з часом



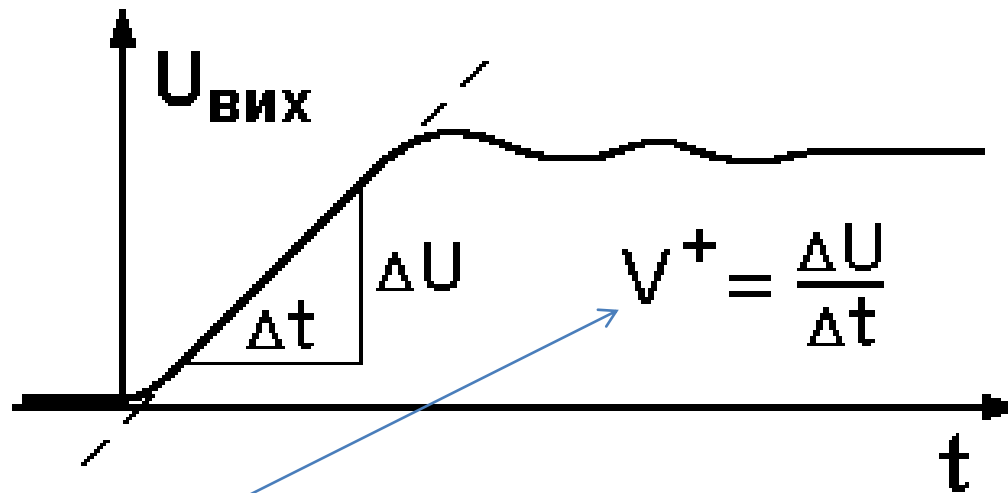
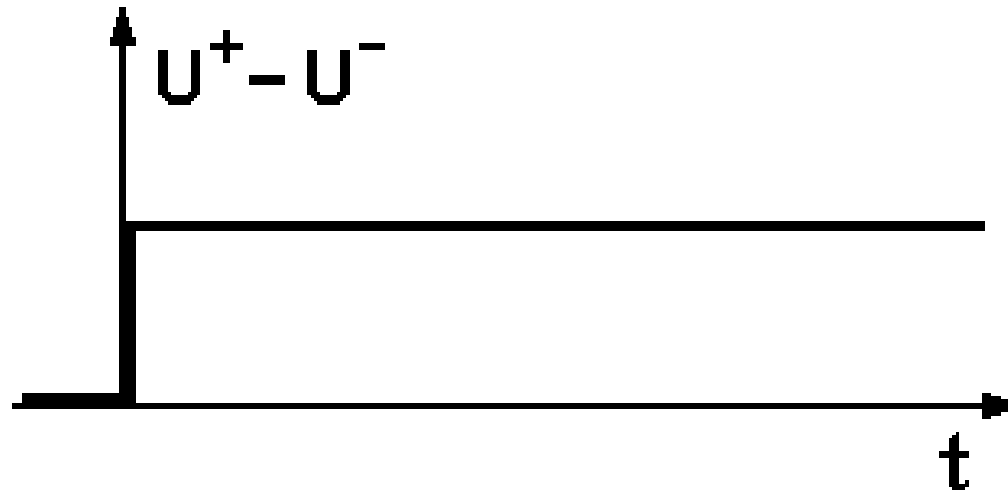
# АЧХ ОП з частотною корекцією



суцільна лінія – ОП без зворотного зв'язку

пунктирна – ОП зі зворотним зв'язком

# Перехідна характеристика ОП

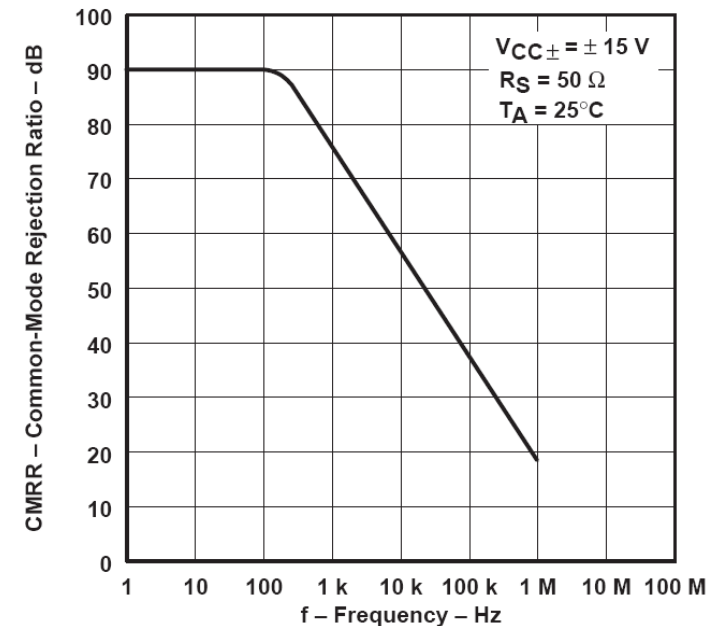
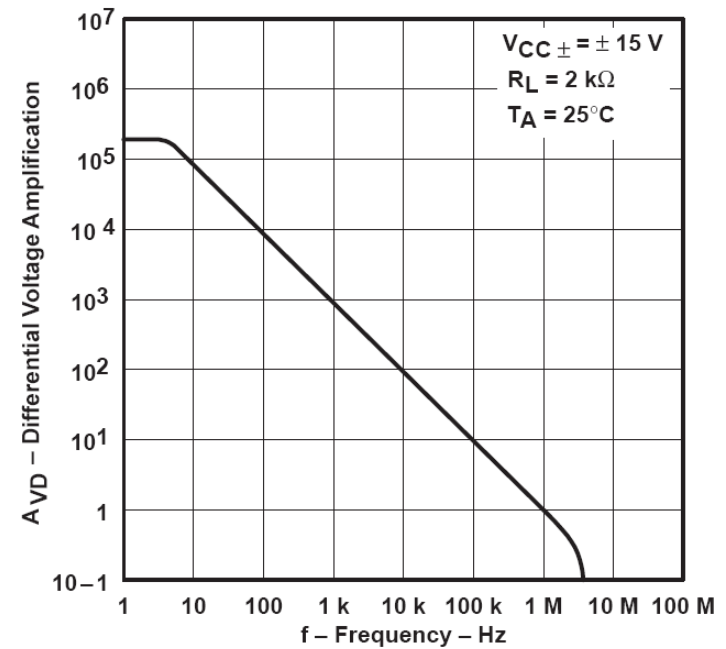


Швидкість наростання вихідної напруги

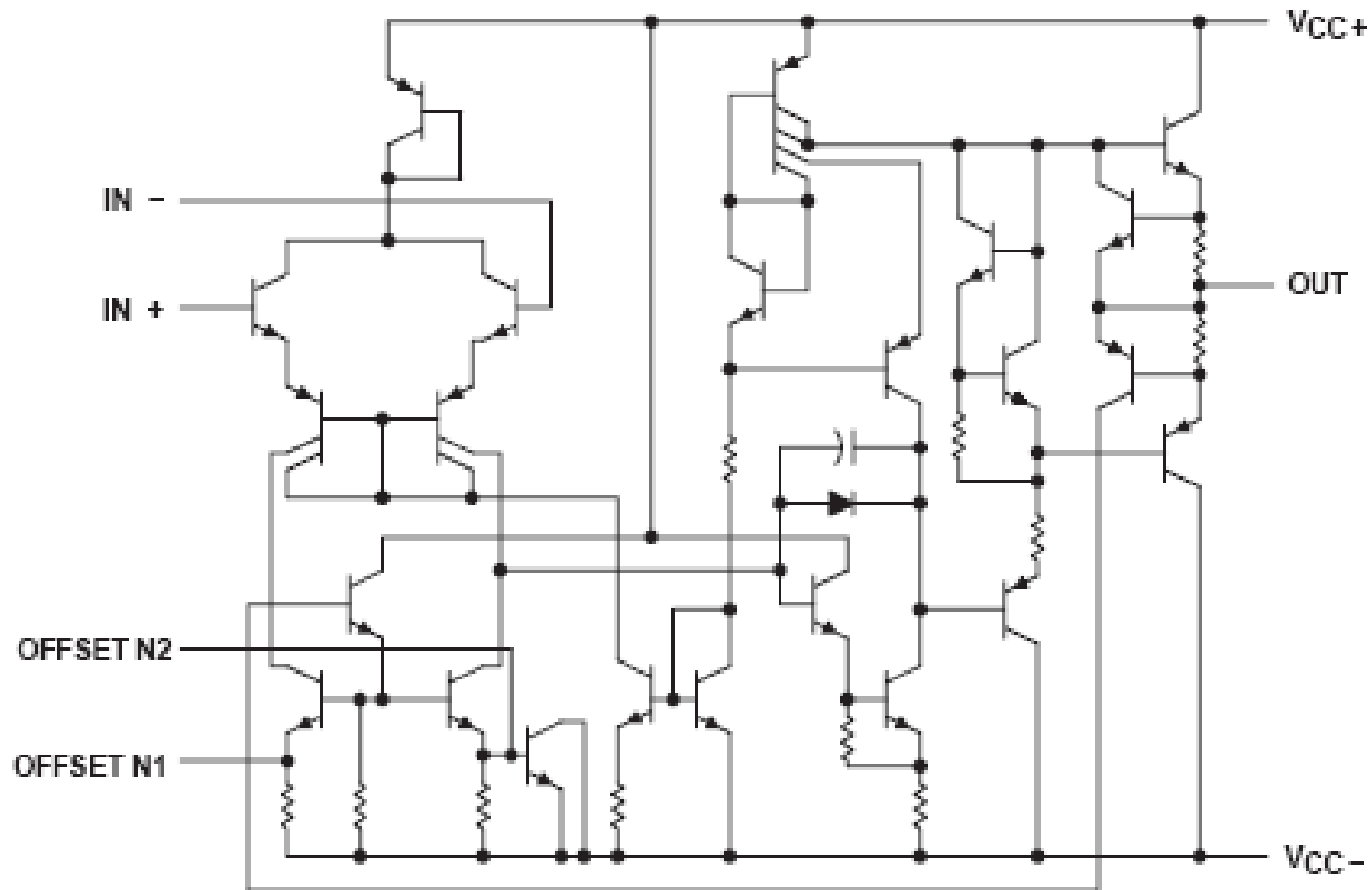
# Операційні підсилювачі

Основні параметри ОП  
( $\mu A747$ ):

- ✓ Напруга ДЖ ( $\pm 15$  В)
- ✓ Коефіцієнт підсилення ( $K = 250000$ )
- ✓ Вхідний опір (200 кОм)
- ✓ Вихідний опір (75 Ом)
- ✓ Струм живлення (1.7 мА)
- ✓ Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу (90 дБ)
- ✓ Швидкість наростання вихідної напруги (0,5 В/мкс)



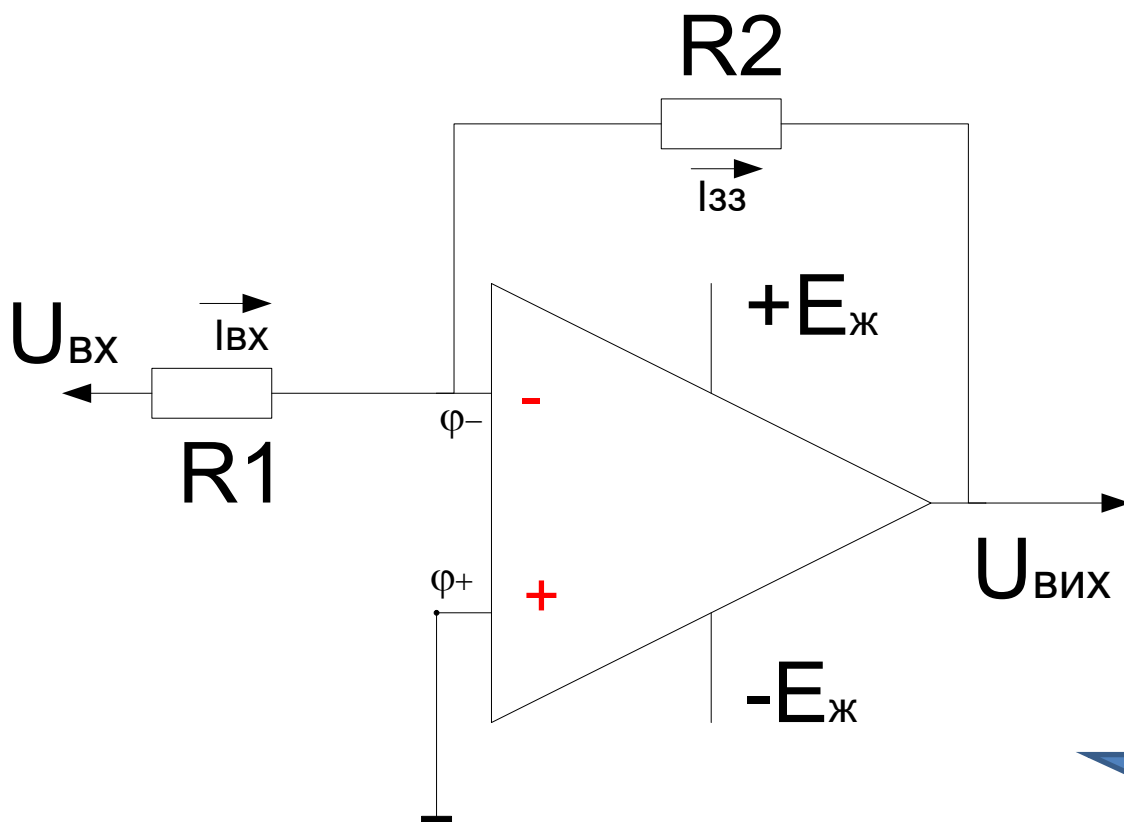
# $\mu$ A747





**ОП в схемах з негативним  
зворотнім зв'язком**

# Інвертуючий підсилювач



$$(\varphi_+ - \varphi_-) = \frac{U_{VИX}}{K}$$

$$U_{VИX} \leq 15 \text{ В} , K > 10^5$$

$$(\varphi_+ - \varphi_-) < 150 \text{ мкВ}$$

$$I_{BX} = \frac{U_{BX}}{R_1}$$

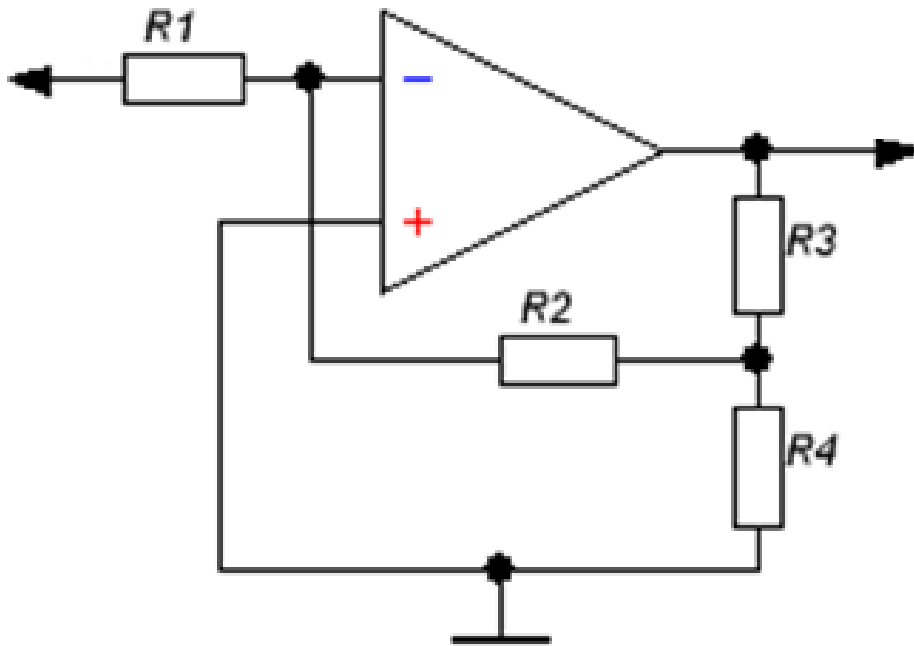
$$I_{33} = \frac{-U_{VИX}}{R_2}$$

$$I_{BX} \cong I_{33}$$



$$K_{\text{інв.під.}} = \frac{U_{VИX}}{U_{BX}} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

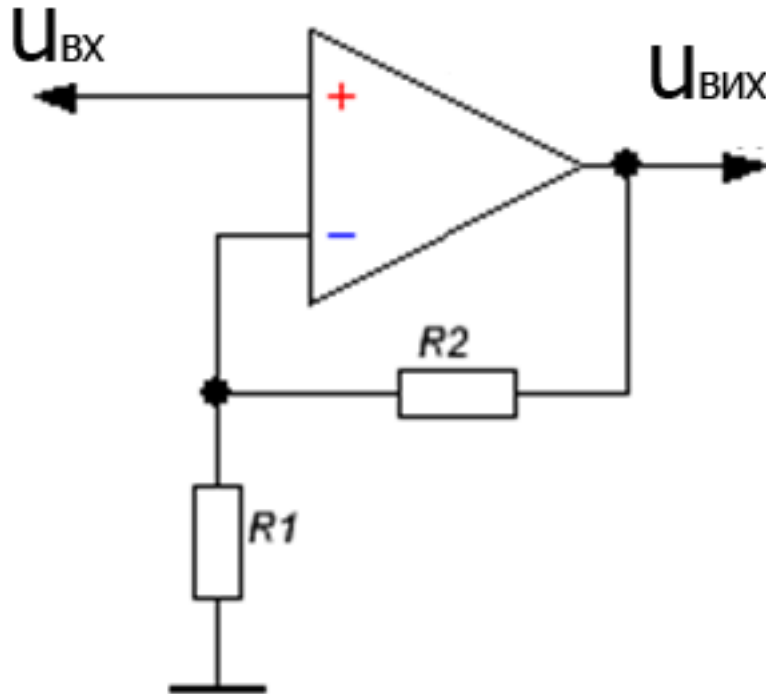
# Інвертуючий підсилювач з підвищеним входним опором



$$K = - \frac{R2(R3 + R4)}{R1 \cdot R4}$$

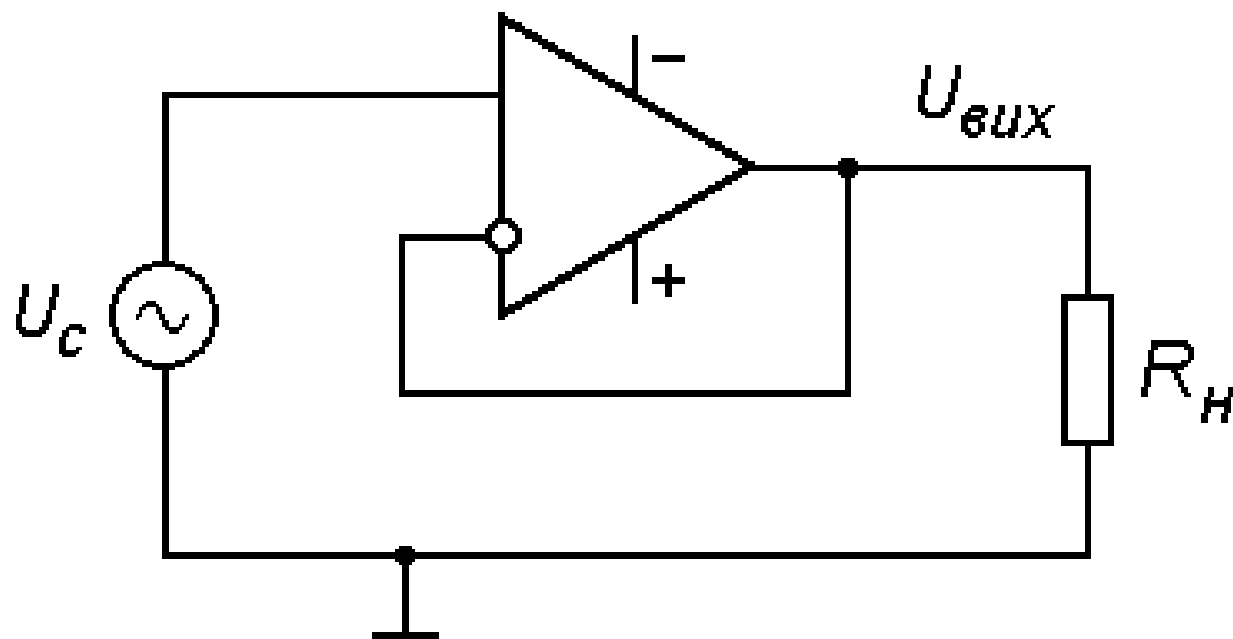
при тому ж коефіцієнті підсилення опір R1 можна збільшити, а значить і підвищити входний опір підсилювача

# Неінвертуючий підсилювач



$$K_{\text{неінв.під.}} = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

# Повторювач напруги

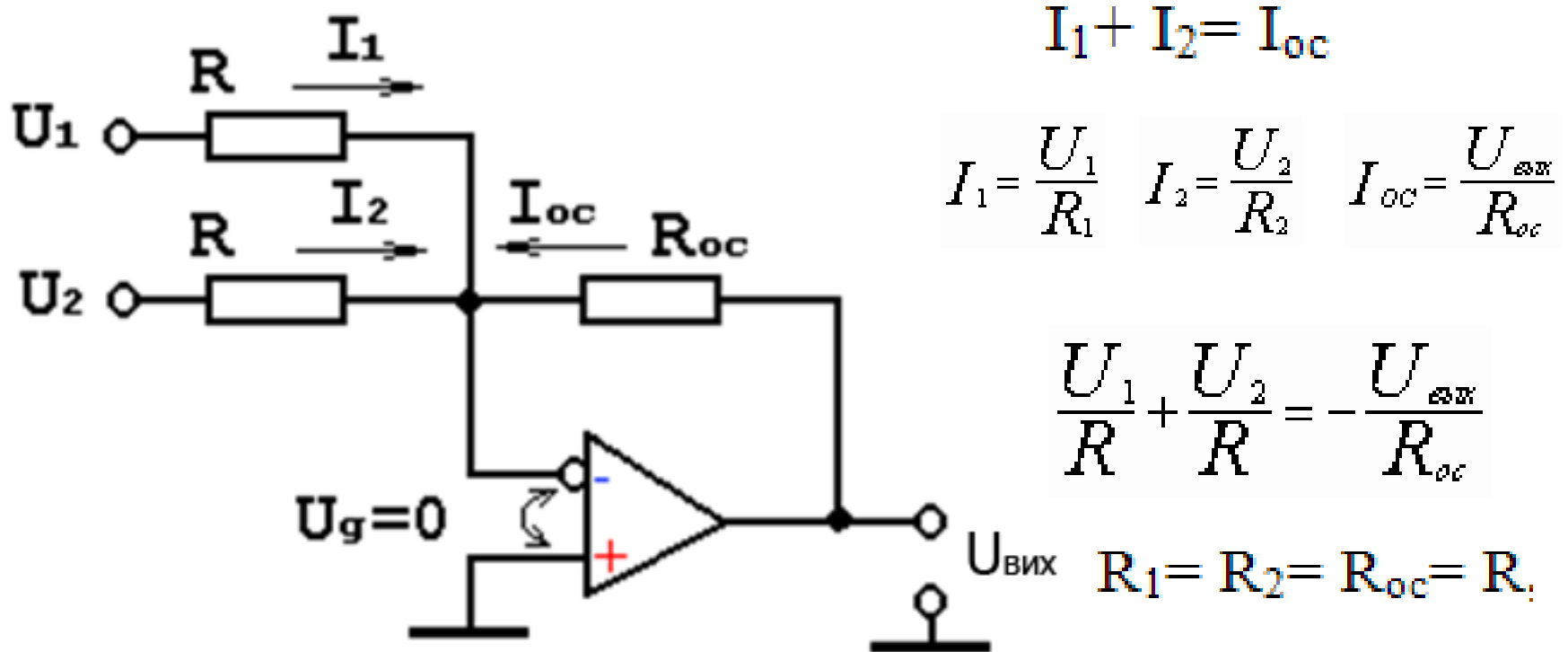


$$K' = 1 + R_2/R_1$$

При  $R_2=0$

$$K' \approx 1$$

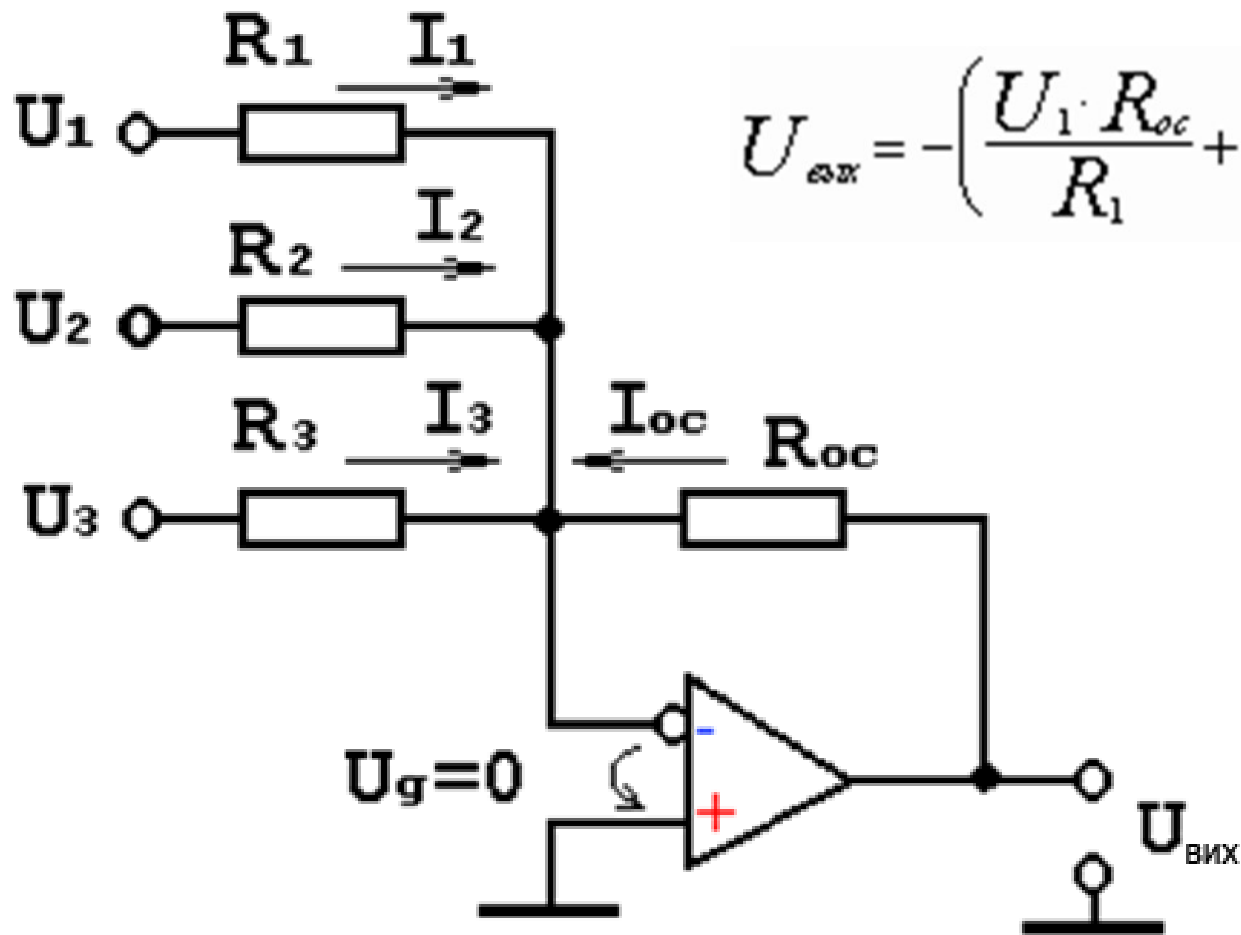
# Інвертуючий суматор



$$U_{\text{вих}} = - (U_1 + U_2 + \dots + U_n) ,$$

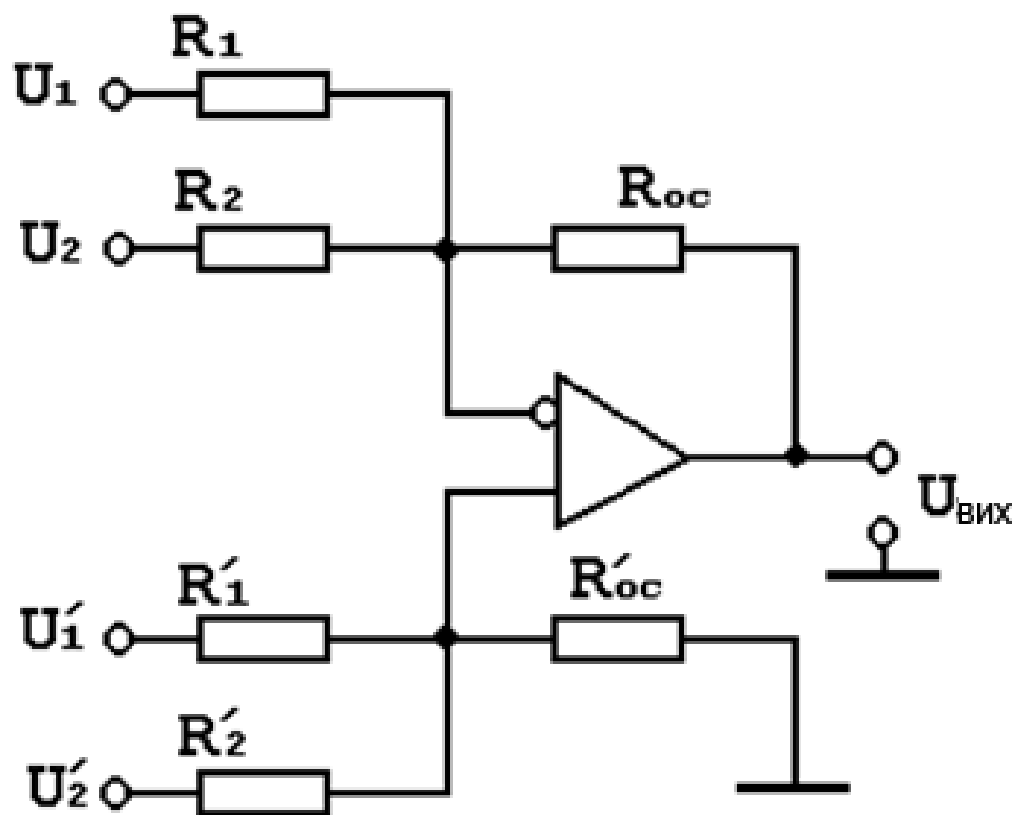
де  $n$  - число входів

# Схема сумування з масштабними коефіцієнтами



$$U_{вих} = - \left( \frac{U_1 \cdot R_{oc}}{R_1} + \frac{U_2 \cdot R_{oc}}{R_2} + \frac{U_3 \cdot R_{oc}}{R_3} \right)$$

# Схема сумування-віднімання

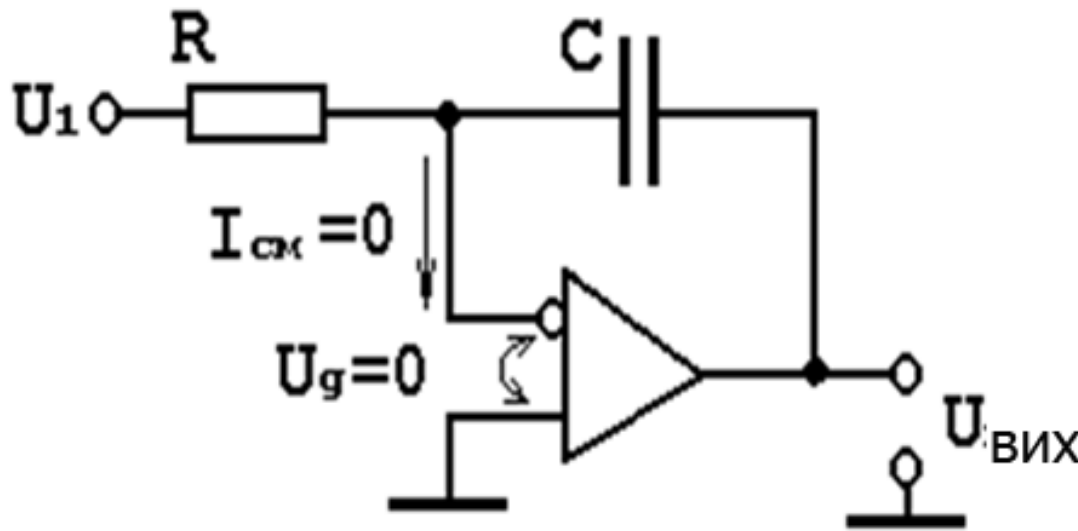


$$U_{вих} = -\left(\frac{U_1 \cdot R_{oc}}{R_1} + \frac{U_2 \cdot R_{oc}}{R_2} + \dots + \frac{U_m \cdot R_{oc}}{R_n}\right) + \left(\frac{U_{m+1} \cdot R'_{oc}}{R'_1} + \frac{U_{m+2} \cdot R'_{oc}}{R'_2} + \dots + \frac{U_{m+n} \cdot R'_{oc}}{R'_n}\right)$$



# Інтегратор

використовується для одержання вихідного сигналу, пропорційного інтегралу вхідної напруги.



$$C = \frac{Q}{U}$$

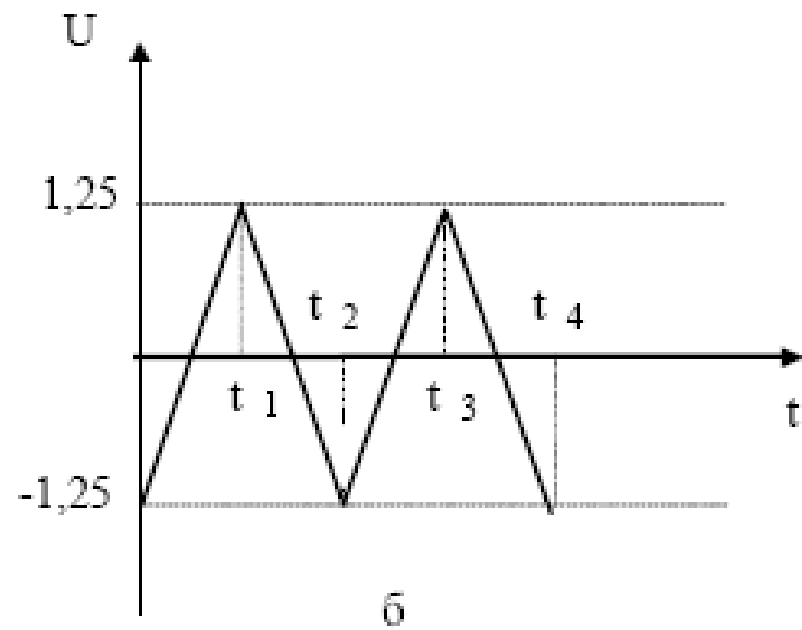
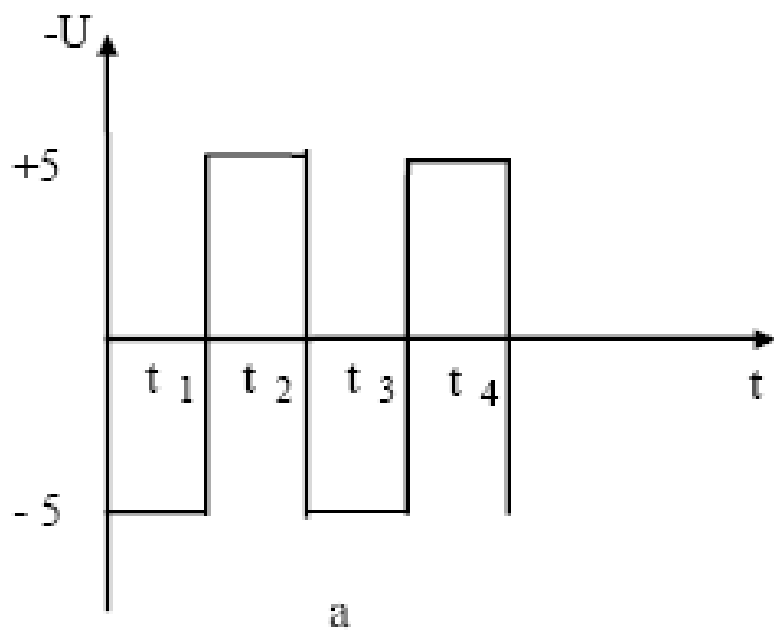
$$Q = CU$$

$$I_c = \frac{dQ}{dt} = \frac{CdU}{dt}$$

$$I_c = -\frac{CdU_{\text{вих}}}{dt} = \frac{U_1}{R} = I_r$$

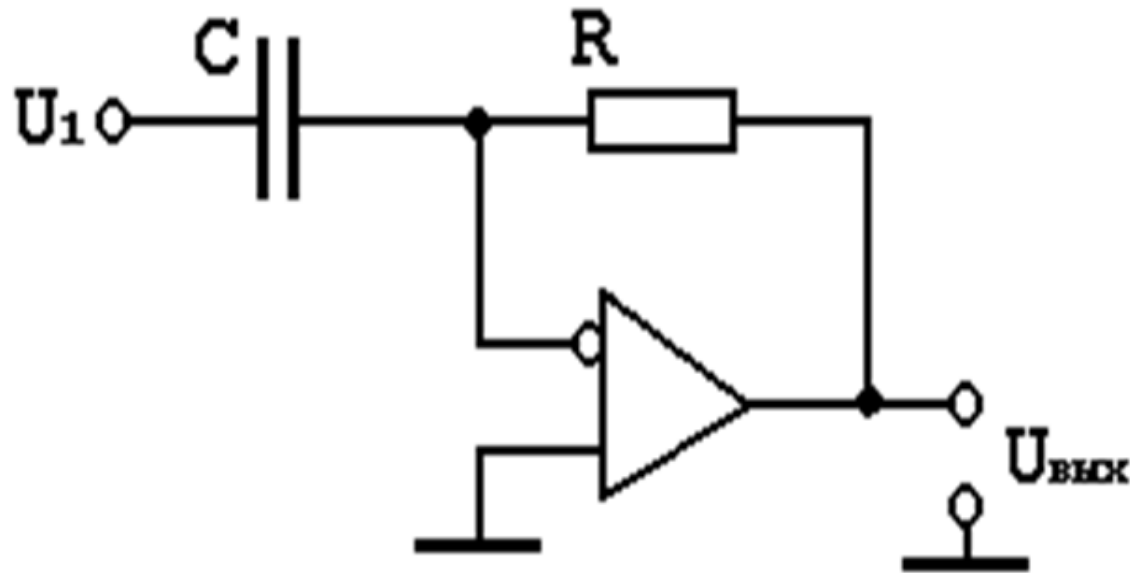
$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int U_1 dt$$

# Інтегратор



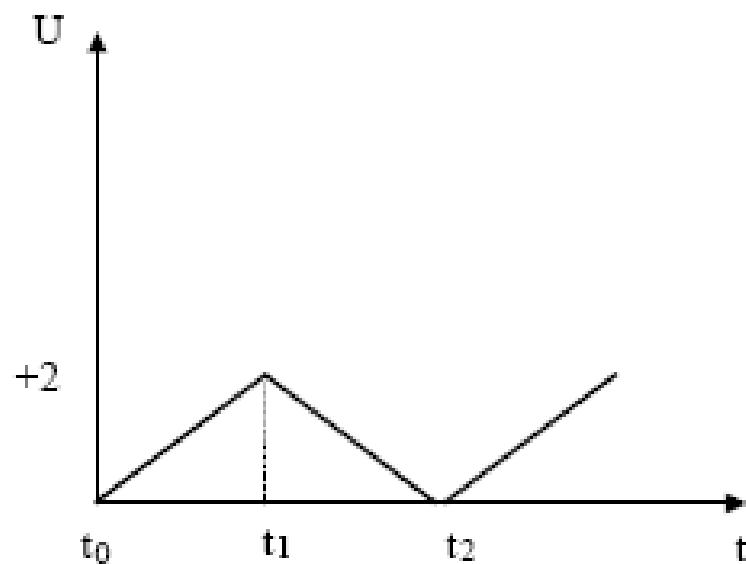
# Диференціатор

дозволяє одержати вихідну напругу, пропорційну швидкості зміни вхідної.

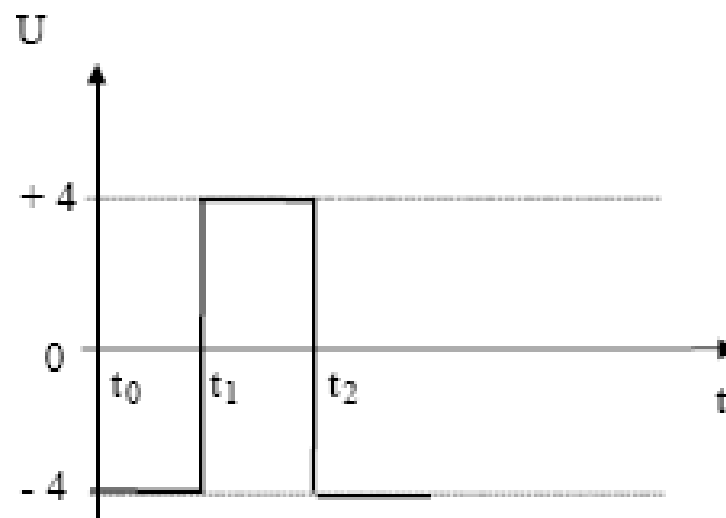


$$U_{\text{вых}} = -RC \cdot \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$$

# Диференціатор



a

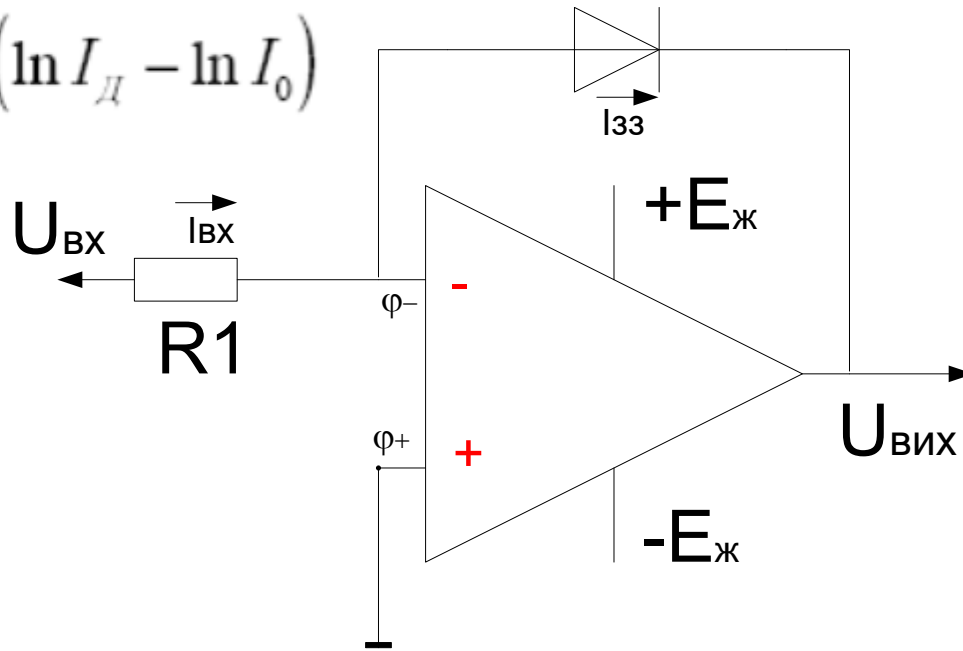


б

# Логарифмуючі схеми

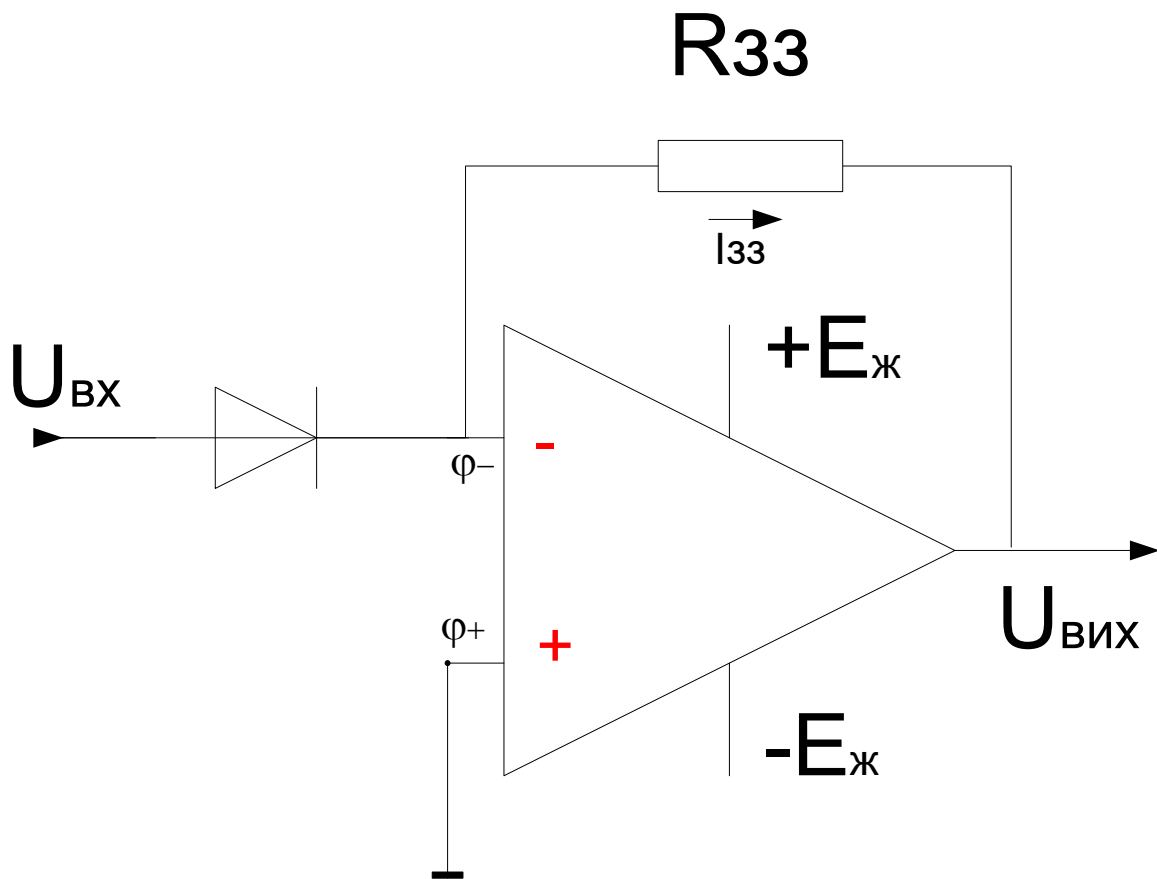
$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qU_D}{kT}} - 1 \right) \approx I_0 e^{\frac{qU_D}{kT}} \quad \ln I_D = \ln I_0 + \frac{qU_D}{kT}, \quad \ln I_D - \ln I_0 = \frac{qU_D}{kT}.$$

$$U_{\text{ВИХ}} = U_D = \frac{kT}{q} \cdot (\ln I_D - \ln I_0)$$



$$I_D = I_{R_1} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}, \quad U_{\text{ВИХ}} = \frac{kT}{q} \cdot \left( \ln \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} - \ln I_0 \right)$$

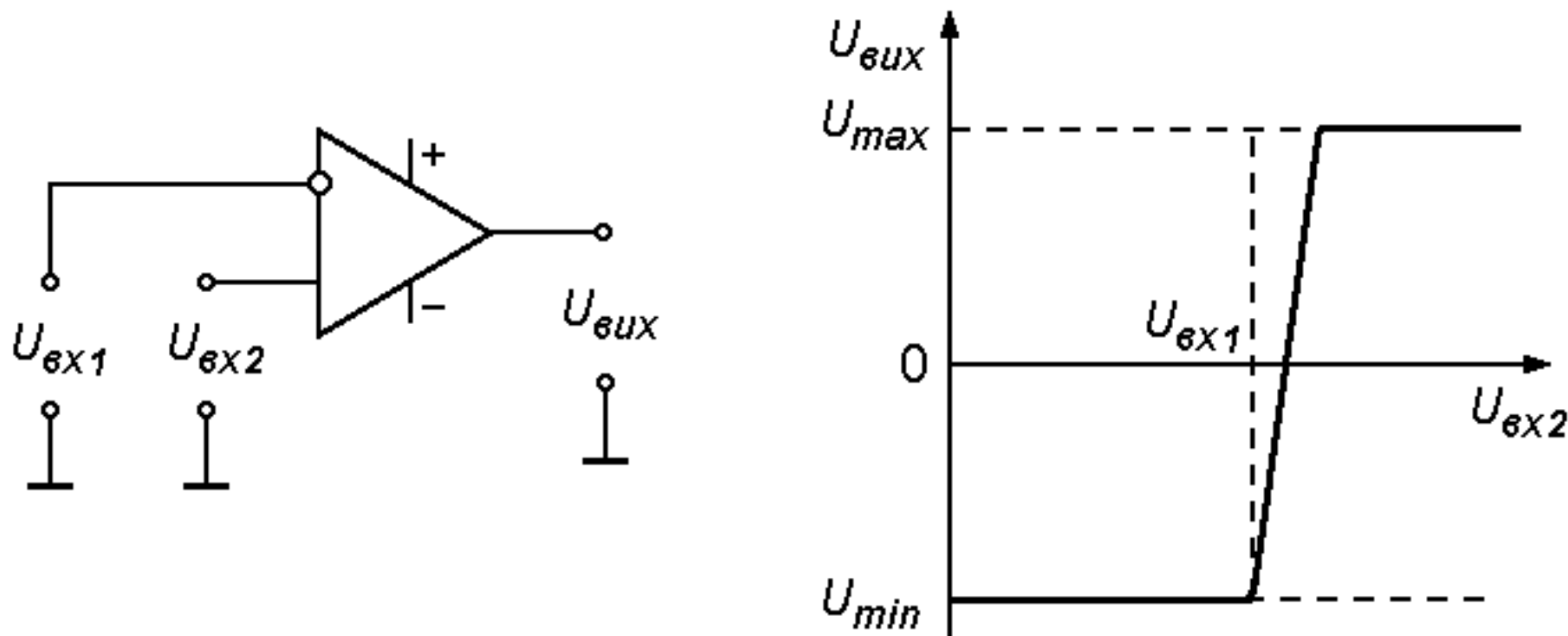
# Антилогарифмующая схема



$$U_{ВЫХ} = -R_{33} I_0 \exp\left(\frac{qU_{ВХ}}{kT}\right).$$

**ОП в схемах з позитивним  
зворотнім зв'язком**

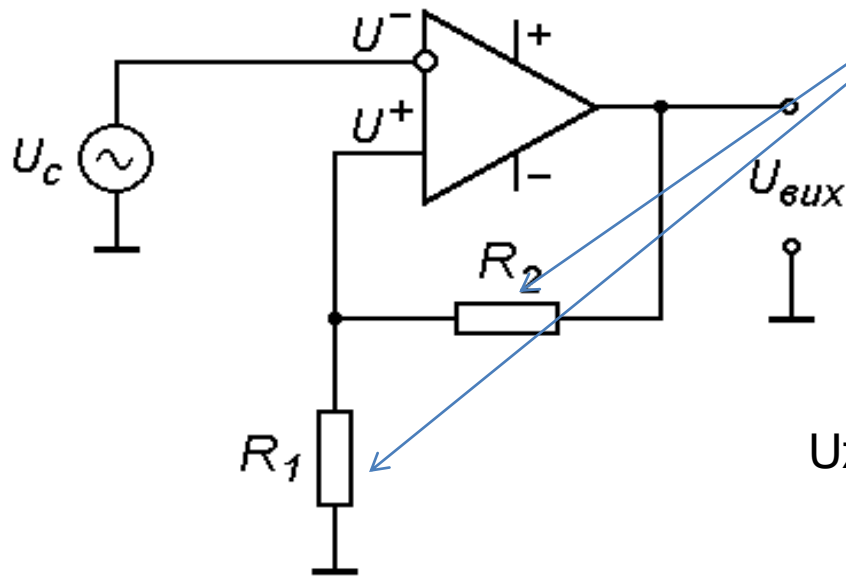
# Однопороговий компаратор



При зміні знаку різниці вхідних напруг (наприклад, коли напруга  $U_{вх2}$  стає більшою за  $U_{вх1}$ ) вихідна напруга стрибком змінюється від свого найменшого значення  $U_{min}$  (яке є ні чим ішим як напругою насичення ОП  $U_{нас}^-$ ) до  $U_{max}$  (напруги насичення  $U_{нас}^+$ ).



# Тригер Шміта



$$\beta = R_1 / (R_1 + R_2).$$

Якщо  $K_0 \cdot \beta > 1$ , то флуктуація сама себе підсилюватиме і амплітуда на виході зростатиме.

Ужив. = 12 В.  $R_1 = R_2$ .  $\beta = 0,5$

Подамо на інвертувальний вхід ОП зовнішній додатний сигнал  $U = U_c$

Поки напруга  $U_c$  на інвертувальному вході менша за +6 В, різниця напруг ( $U^+ - U$ ) залишається додатною, як і  $U_{вух}$ , яка зберігається рівною напрузі насичення.

Як тільки  $U$  перевищить величину  $U_{вукл} = U_{вух} \cdot \beta = +6$  В, підсилена операційним підсилювачем диференціальна напруга ( $U^+ - U$ ) почне зменшувати напругу на виході, а ланка позитивного зворотного зв'язку довершить лавиноподібний процес переходу  $U_{вух}$  в інший стабільний стан, який визначається величиною  $U_{вух} = U_{min} = -12$  В.

напруга на неінвертувальному вході також змінить свій знак і стане рівною  $U^+ = -6$  В.

# Тригер Шміта

