

# **ОСНОВИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

## **Модуль 3. Схеми радіоелектроніки**

### **Лекція №2**

Викладач:  
Кан.-фіз. мат. наук, доцент КЯФ

Єрмоленко Руслан Вікторович

# План лекції

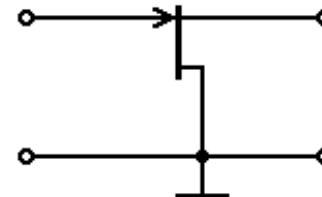
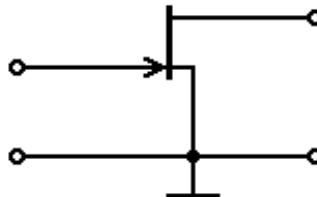
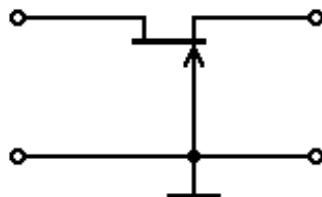
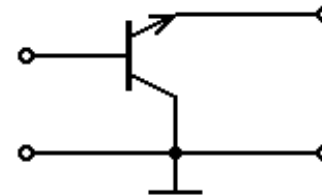
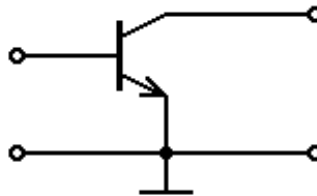
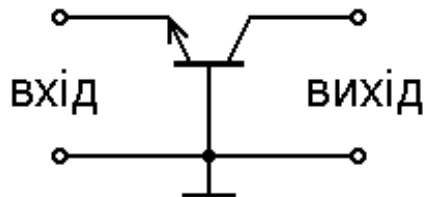
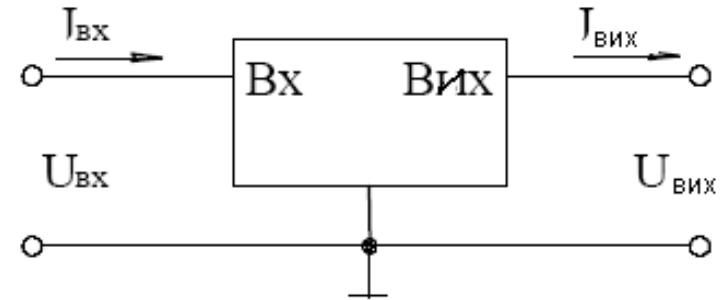
- Схеми підсилювачів із спільною базою, спільним емітером.
- Створення робочої точки транзистора.
- Способи термостабілізації підсилювача
- Емітерний повторювач.
- Витоковий повторювачі.
- Підсилювач потужності – однотактний, двотактний.
- Підсилювач постійного струму.

# Література

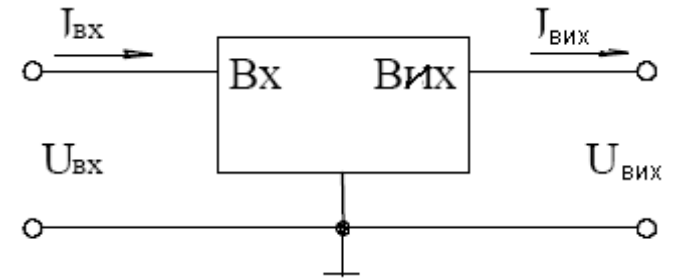
- Исаков.Ю.А., Платонов А.П. Основы промышленной электроники. К.:Техніка, 1976., гл.8, п.1-4.
- И.П. Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., Энергия, 1977. гл.9, п.9-1, 9-2.
- Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. Изд. 2-е. гл.5, п.13, гл.6, п.8. М.: Радио и связь, 1985., гл.5,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

# Схеми включення транзисторів

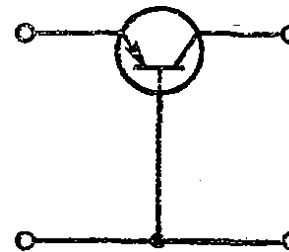
- Транзистор в схемах включення можна розглядати як активний чотириполіусник.
- Оскільки транзистор має тільки три виводи (емітер, базу, колектор), то в схемі чотириполіусника один з виводів є спільним для входу і виходу.



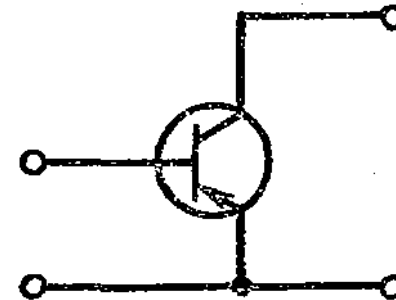
# Схеми підсилювачів із спільною базою, спільним емітером, спільним колектором



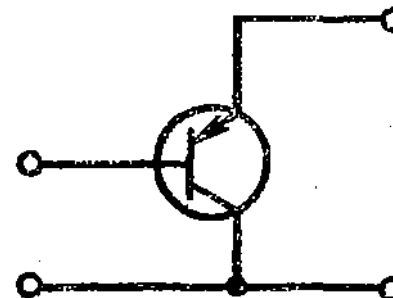
з загальною базою (ЗБ)

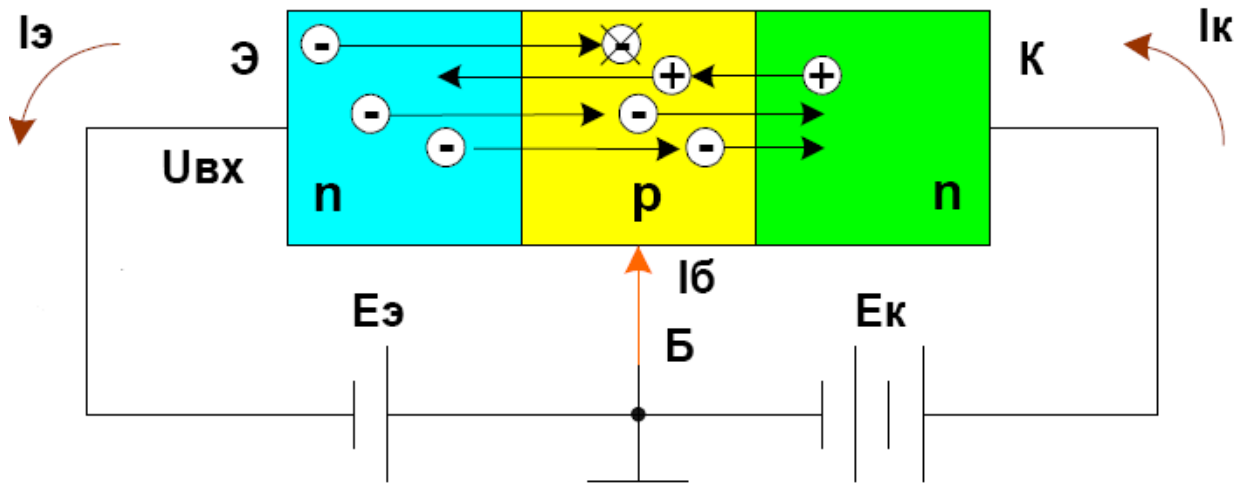


загальним емітером (ЗЕ)



загальним колектором (ЗК)





**Активний режим.** Емітерний p-n перехід відкритий. Колекторний p-n перехід закритий. Емітерний струм має дві компоненти – діркову та електронну. Ефективність емітера характеризує коефіцієнт інжекції:

$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_E}, \quad (0.999) \quad I_{En} - \text{емітерний струм електронів}$$

$$I_E = I_{En} + I_{Ep} \quad I_{Ep} - \text{емітерний струм дірок}$$

Ступінь рекомбінації електронів характеризує коефіцієнт переходу носіїв заряду :

$$\delta = \frac{I_{Kn}}{I_{En}} \quad , \text{ де } I_{Kn} - \text{колекторний струм електронів}$$

$$\delta \cdot \gamma = \frac{I_{Kn}}{I_E} \approx \frac{I_K}{I_E} = \alpha_0$$

статичний коефіцієнт передачі  
(підсилення) струму емітера  
( $\alpha_0 = 0.99\text{--}0.995$ )

$$\alpha = \left. \frac{\partial I_K}{\partial I_E} \right|_{I_K, U_{KB}}$$

динамічний коефіцієнт передачі  
(підсилення) струму емітера

Основне співвідношення струмів в транзисторі:

$$I_E = I_K + I_B$$

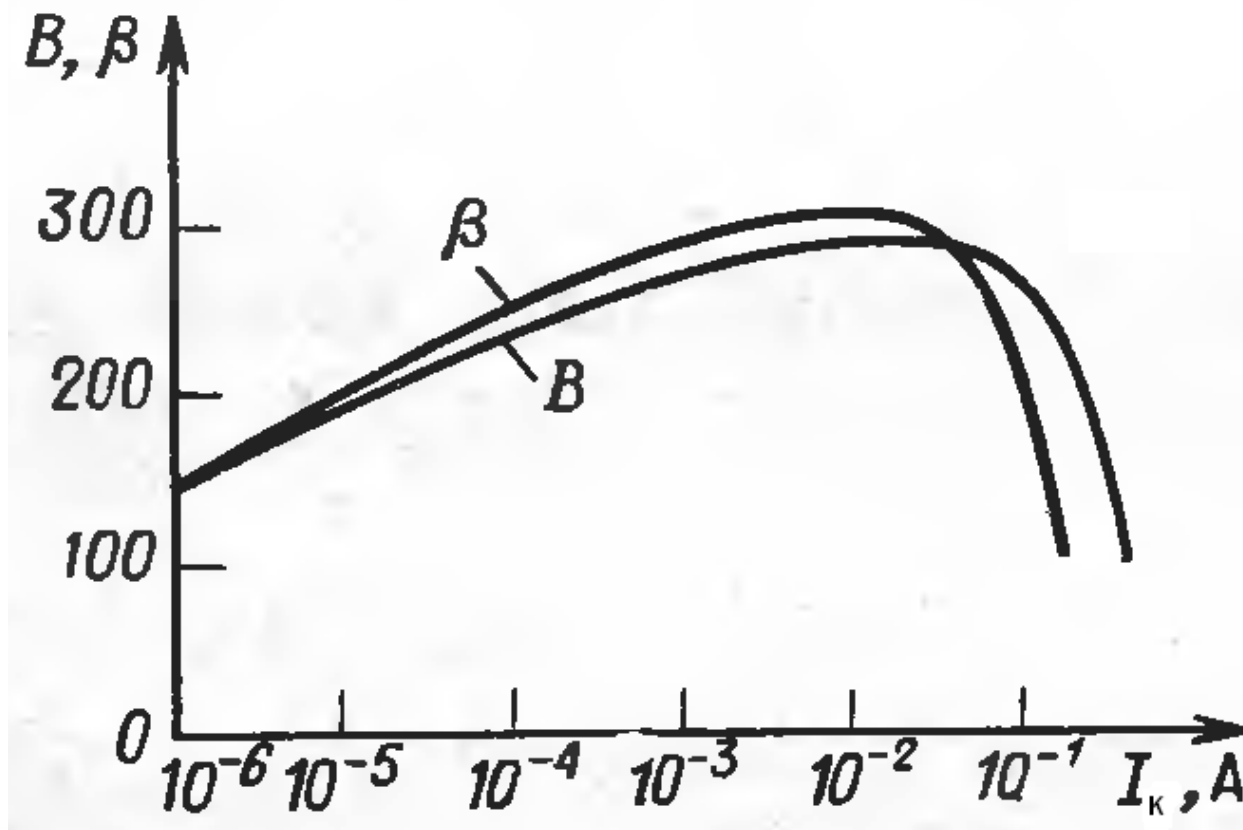
$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B = \beta I_B$$

$\beta$  – статичний коефіцієнт підсилення струму бази

Динамічний коефіцієнт підсилення струму бази:

$$\beta = \left. \frac{\partial I_K}{\partial I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}}$$

## Типові залежності статичного та динамічного коефіцієнтів підсилення струму





# Загальна база

Коефіцієнт підсилення струму

$$K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}} = \alpha < 1$$

Коефіцієнт підсилення напруги

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вх}} > 1$$

Коефіцієнт підсилення потужності

$$K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = K_I \cdot K_U$$

Вхідний опір

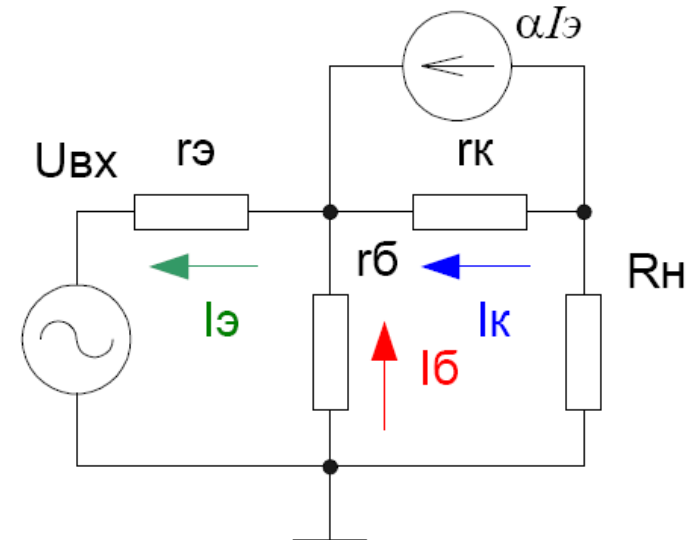
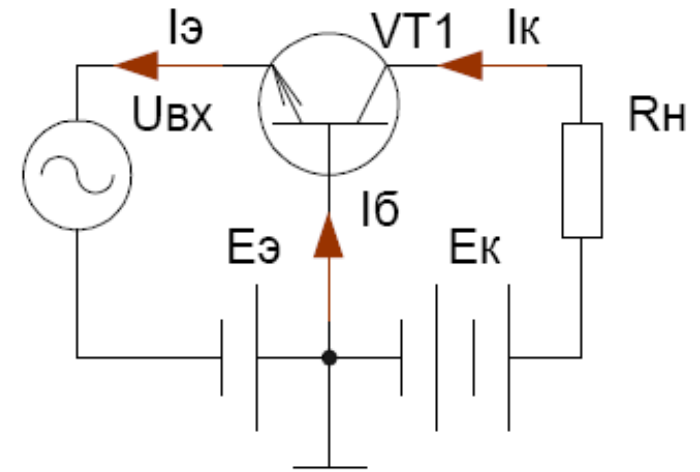
$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} \approx r_E + \frac{1}{\beta} r_B (n \cdot 10 \text{ Ом})$$

Вихідний опір

$$R_{вих} \approx r_K$$

n – порядок величини

Переваги: хороші температурні та частотні властивості

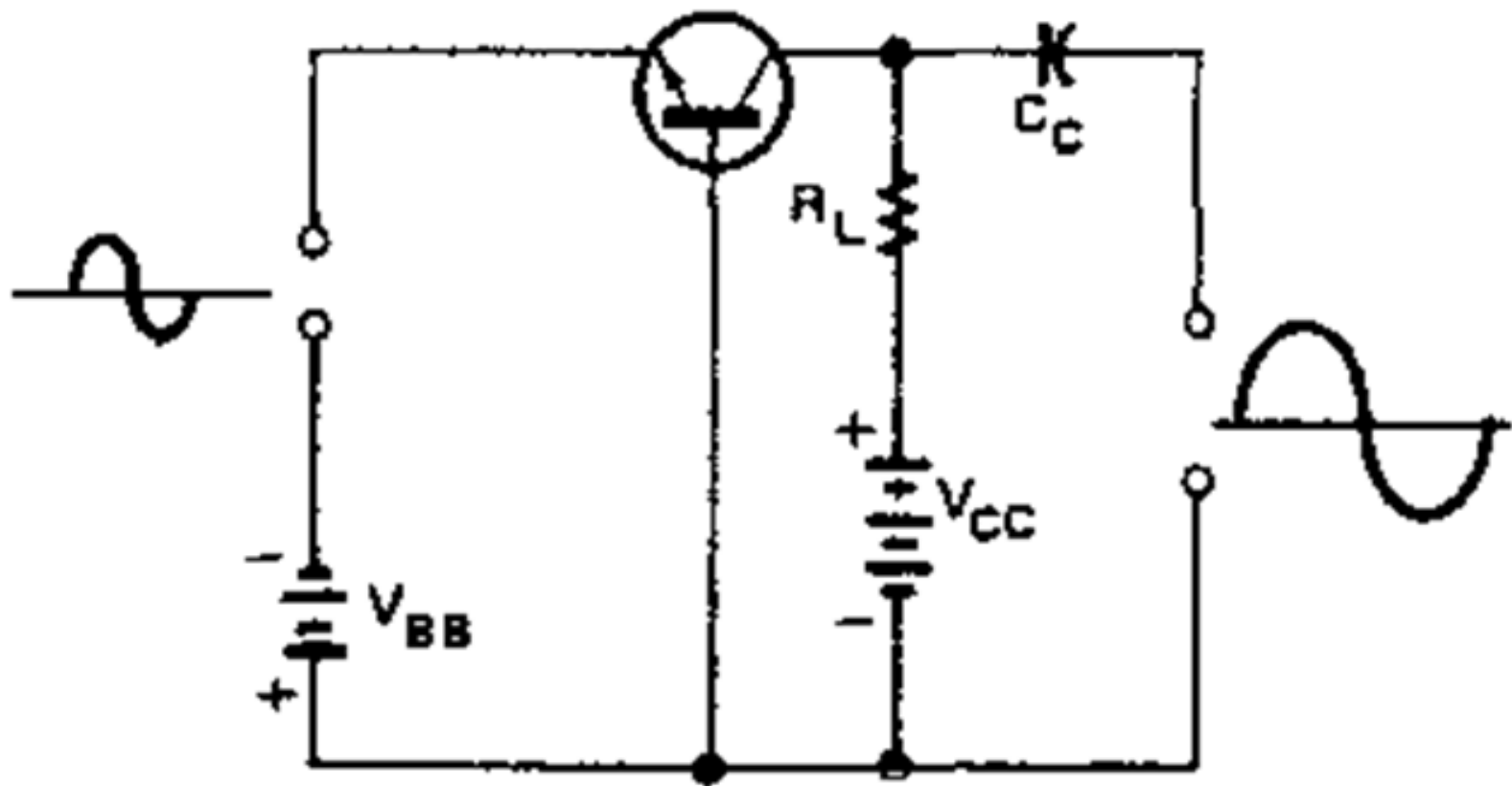


$$rэ = n \cdot 10 \text{ Ом}$$

$$rб = n \cdot 100 \text{ Ом}$$

$$rк = n \cdot (10 \div 100) \text{ кОм}$$

# Загальна база



# Загальний емітер

Коефіцієнт підсилення струму

$$K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}} = \beta \gg 1$$

Коефіцієнт підсилення напруги

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \beta \frac{R_H}{R_{вх}} > 1$$

Коефіцієнт підсилення потужності

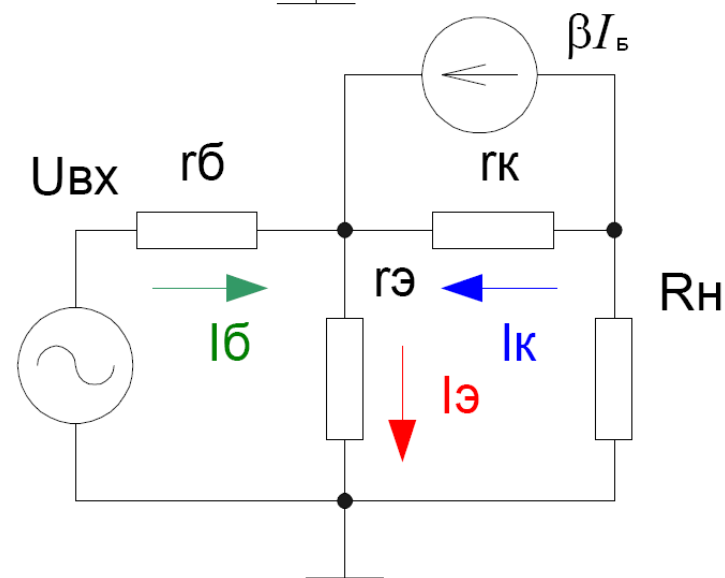
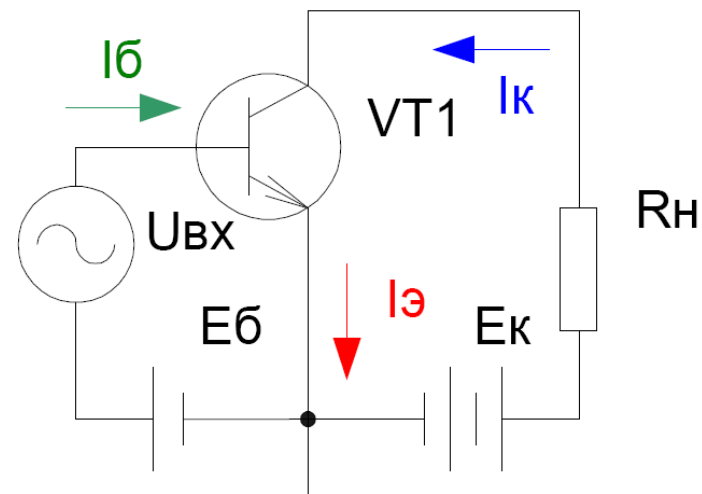
$$K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \beta^2 \frac{R_H}{R_{вх}} \gg 1$$

Вхідний опір

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = r_B + (1 + \beta)r_E (n * 10 \div 100 \text{ Ом})$$

Вихідний опір

$$R_{вих} \approx r_K$$

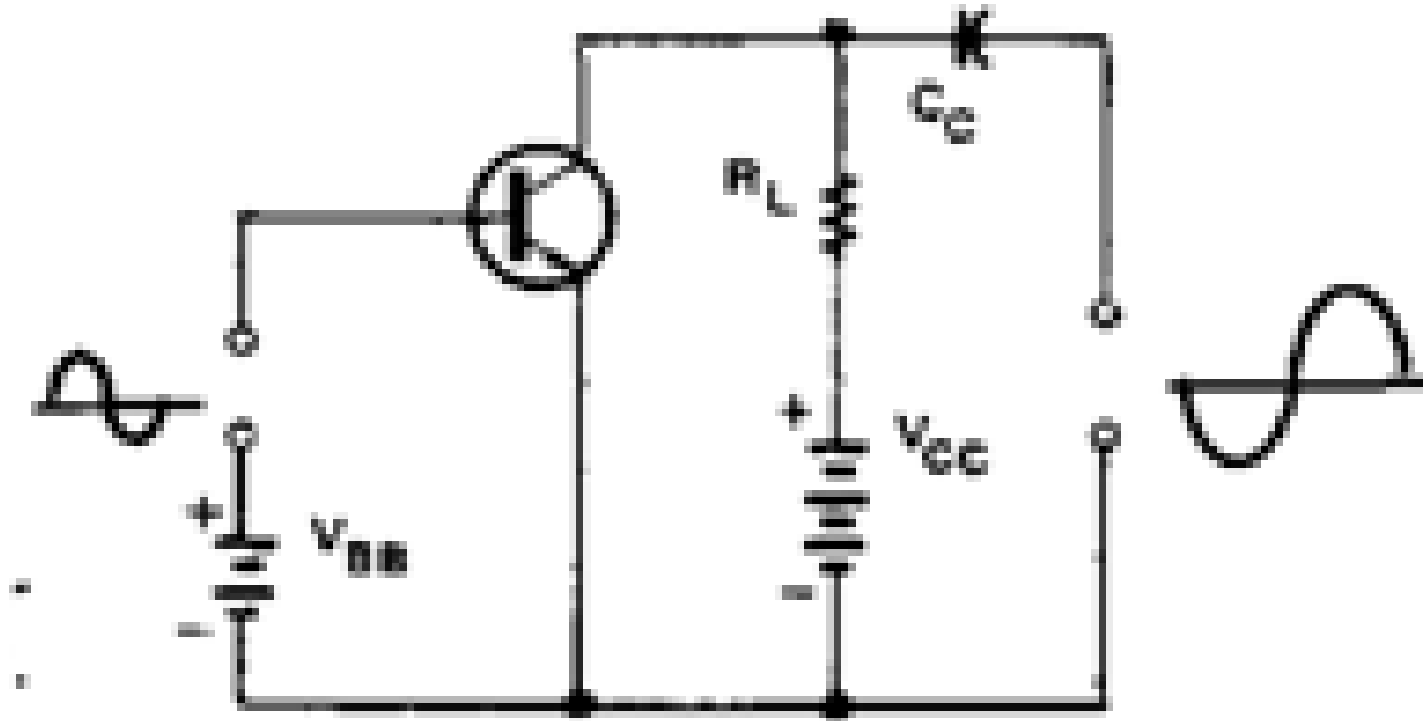


$$rэ = n \cdot 10 \text{ Ом}$$

$$rб = n \cdot 100 \text{ Ом}$$

$$rк = n \cdot (10 \div 100) \text{ кОм}$$

# Загальний емітер



# Загальний колектор

Коефіцієнт підсилення струму (вхідний струм бази, вихідний – струм емітера)

$$K_I = \frac{1}{1 - \alpha} \gg 1$$

Коефіцієнт підсилення напруги (сильний негативний зворотній зв'язок по напрузі)

$$K_U = \frac{U_H}{U_H + U_{be}} < 1$$

Коефіцієнт підсилення потужності

$$K_P = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = K_I \cdot K_U$$

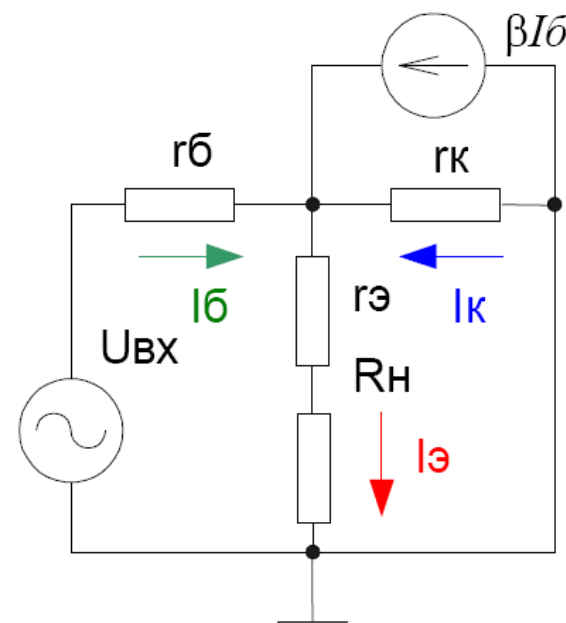
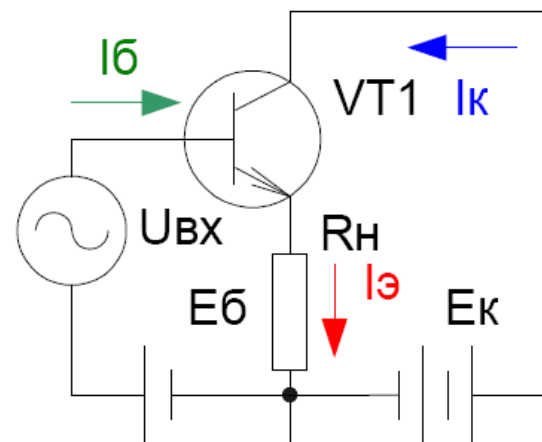
Вхідний опір

$$R_{вх} = r_B + (1 + \beta)(r_E + R_H)$$

$(n * 10 \div 100 \text{ кОм})$

Вихідний опір

$$R_{вих} = r_B + r_E$$

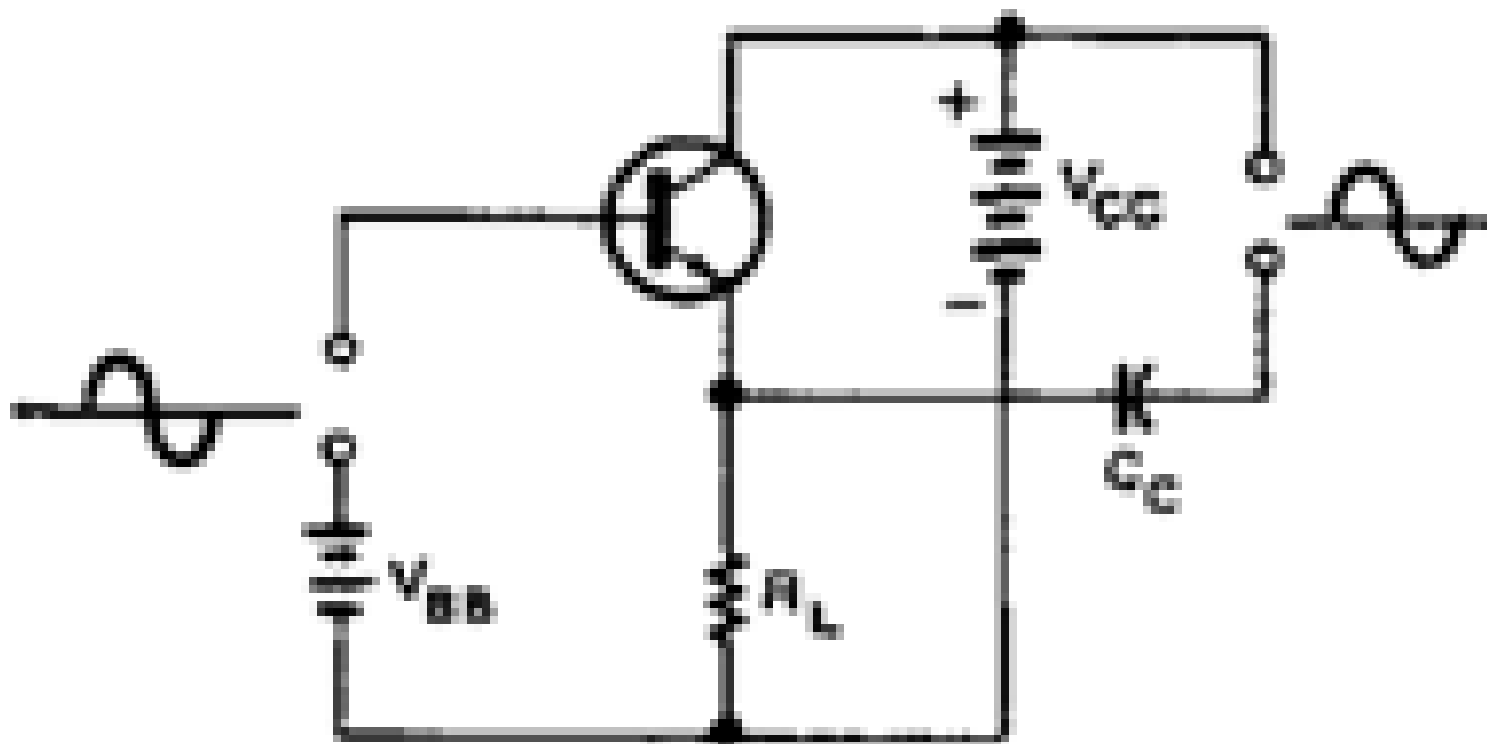


$$rэ = n \cdot 10 \text{ Ом}$$

$$rб = n \cdot 100 \text{ Ом}$$

$$rк = n \cdot (10 \div 100) \text{ кОм}$$







# Загальний колектор



# Характеристики різних схем

Тип включення	Вхідний опір	Вихідний опір	Підсилення по напрузі	Підсилення по струму	Підсилення по потужності
Загальна база	Низький	Високий	Велике	$< 1$	Середнє
Загальний емітер	Середній	Середній	Середнє	Середнє	Велике
Загальний колектор	високий	низький	$< 1$	середнє	середнє

# Зміна фази сигналу

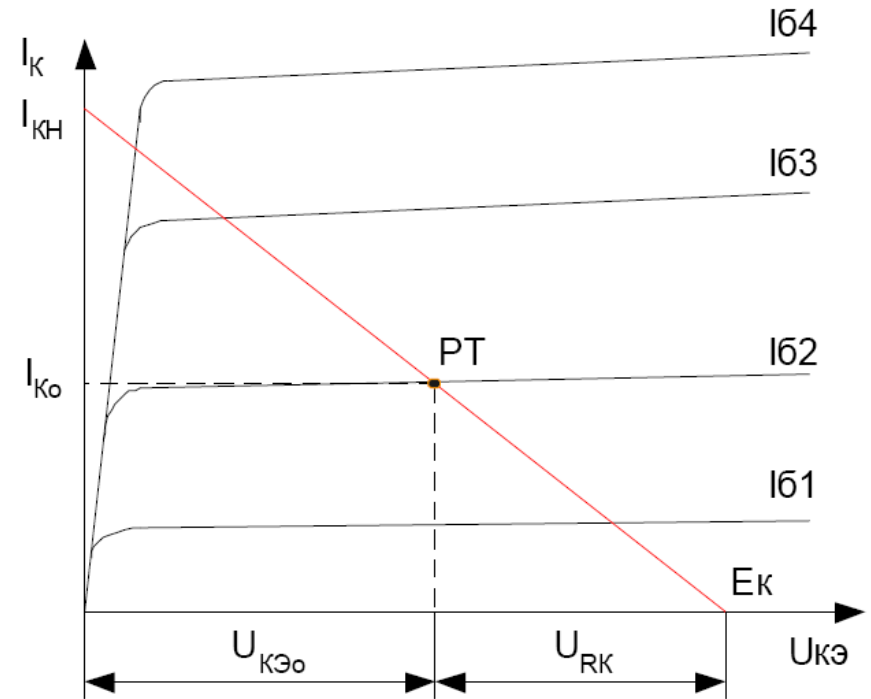
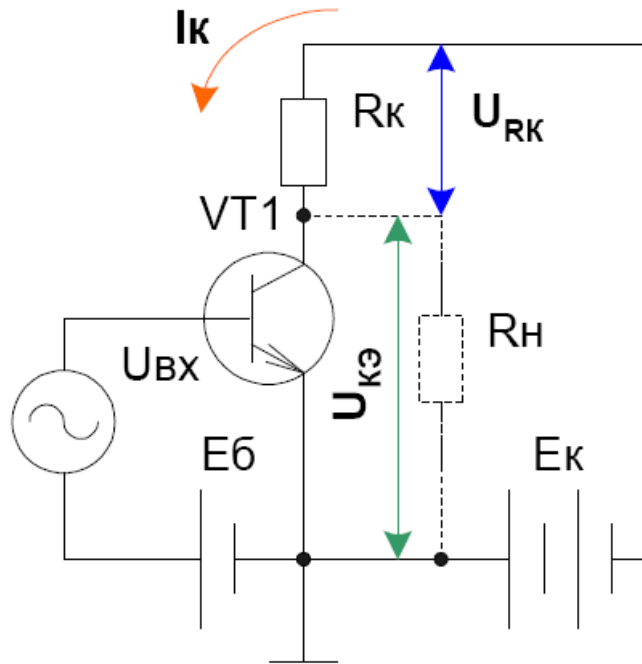
Тип усилителя	Форма входного сигнала	Форма выходного сигнала
Общая база		
Общий эмиттер		
Общий коллектор		



# Створення робочої точки транзистора

# Режим роботи транзистора

Для нормального функціонування підсилювача потрібно задати деякі *початкові умови* його роботи (початкові значення напруг і струмів за відсутності вхідного сигналу).



$$E_K = U_{RK} + U_{КЭ}$$

$$U_{RK} = I_K \cdot R_K$$

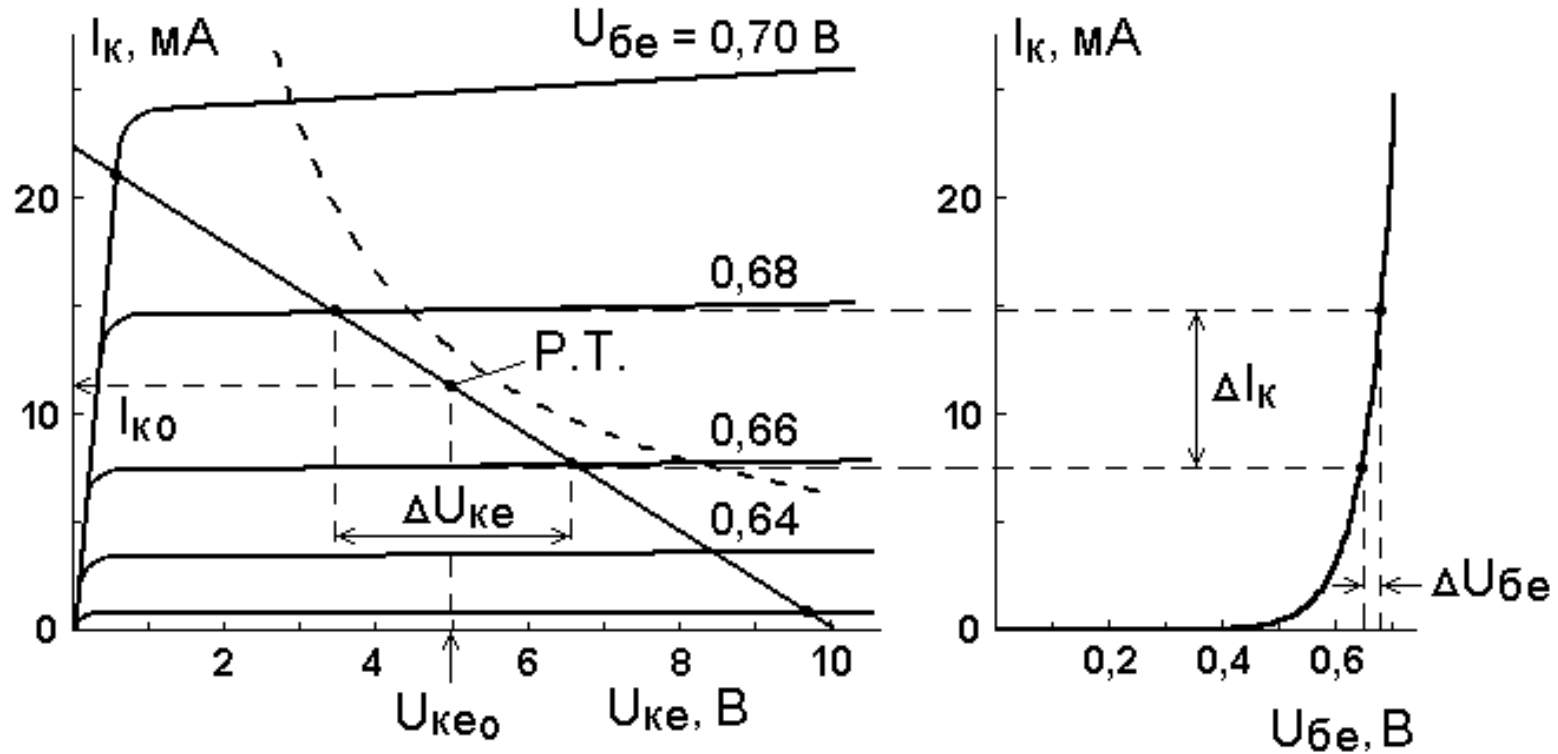
$$E_K = U_{КЭ} + I_K \cdot R_K$$

Червона лінія – вихідна динамічна характеристика

$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K - \text{рівняння динамічного режиму роботи транзистора}$$

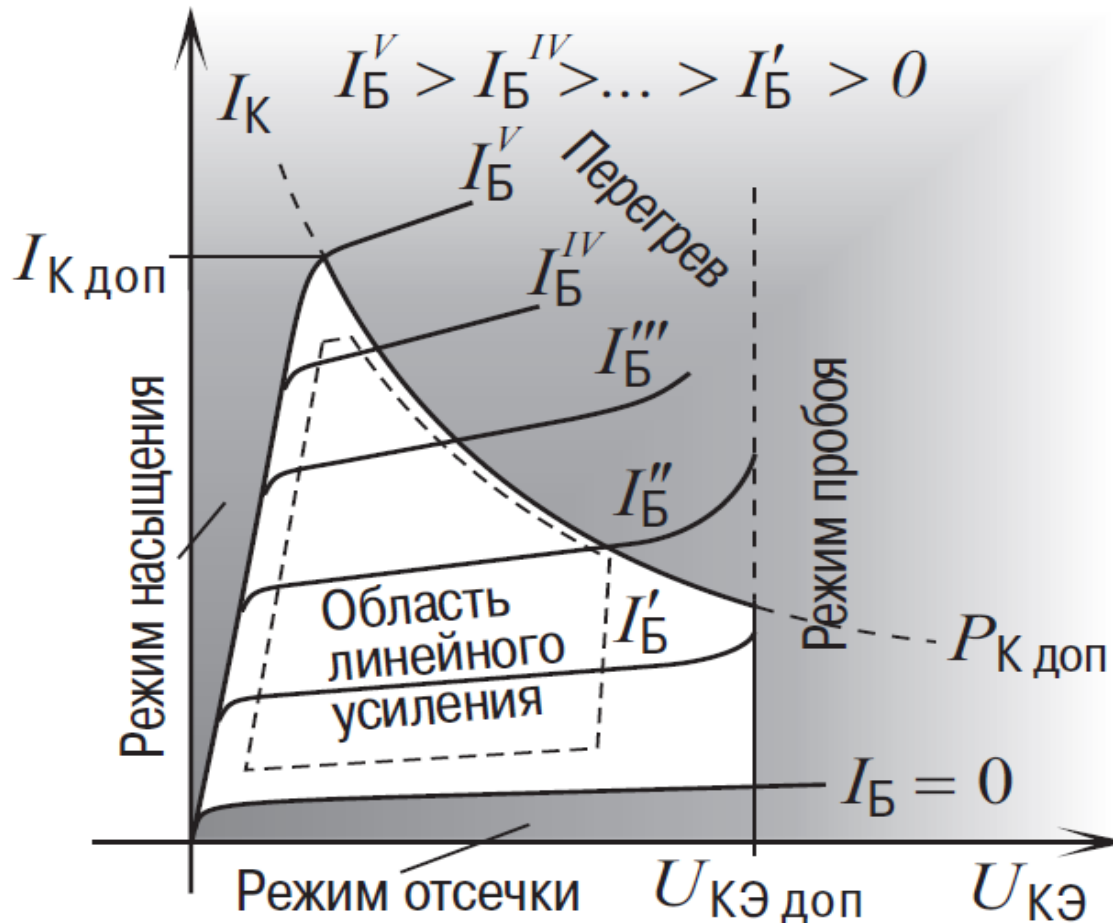
# Режим роботи транзистора

Для нормального функціонування підсилювача потрібно задати деякі *початкові умови* його роботи (початкові значення напруг і струмів за відсутності вхідного сигналу).



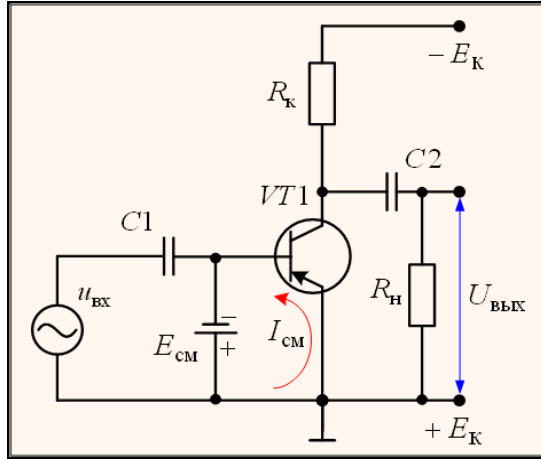
# Множина вихідних характеристик біполярного транзистора, ввімкненого по схемі з СЕ

**Робоча точка** – це точка на площині вихідних (або інших) характеристик підсилюючого пристрою, яка пов'язує поточні значення напруг і струмів в ньому.



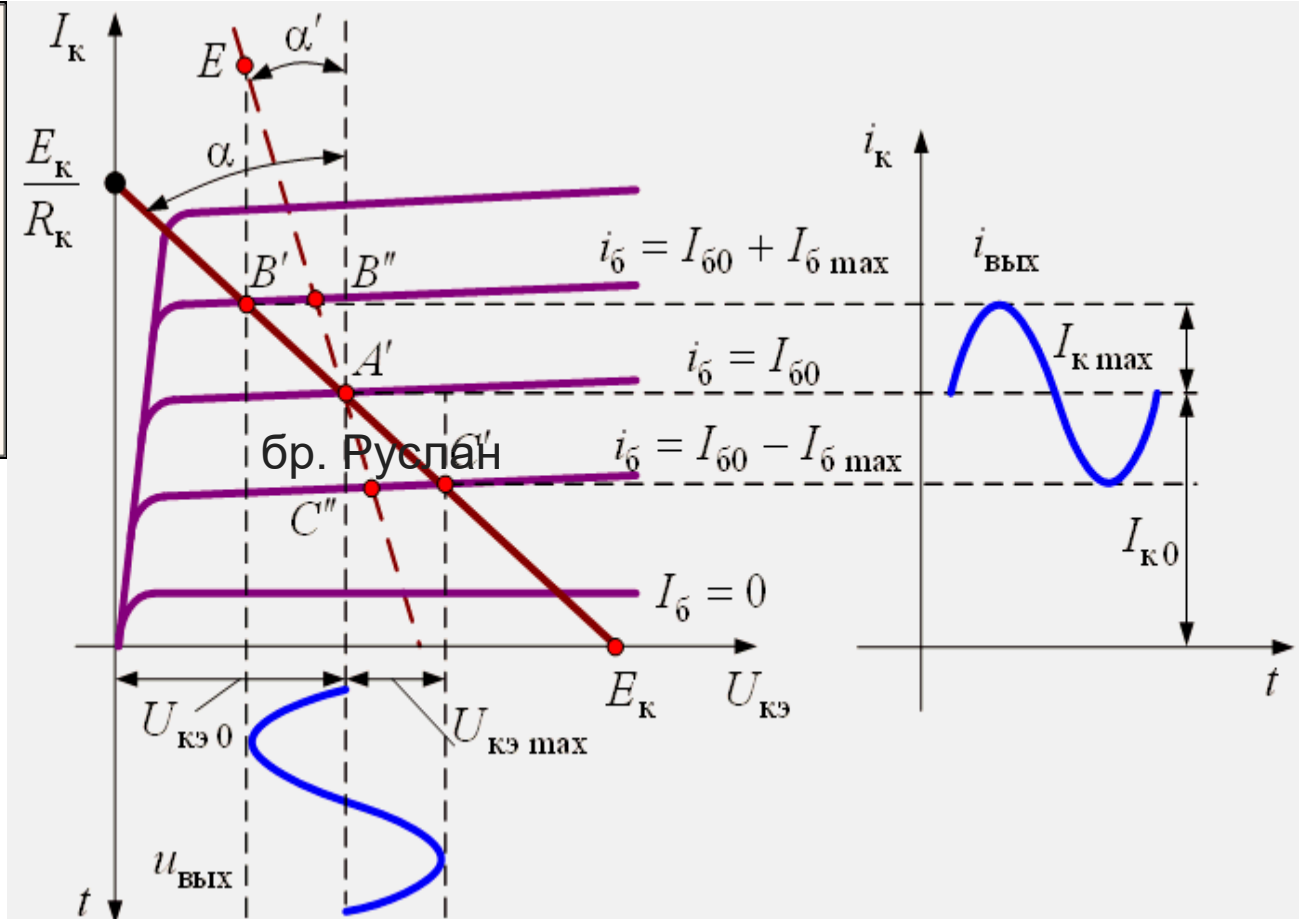


# Динамічний режим

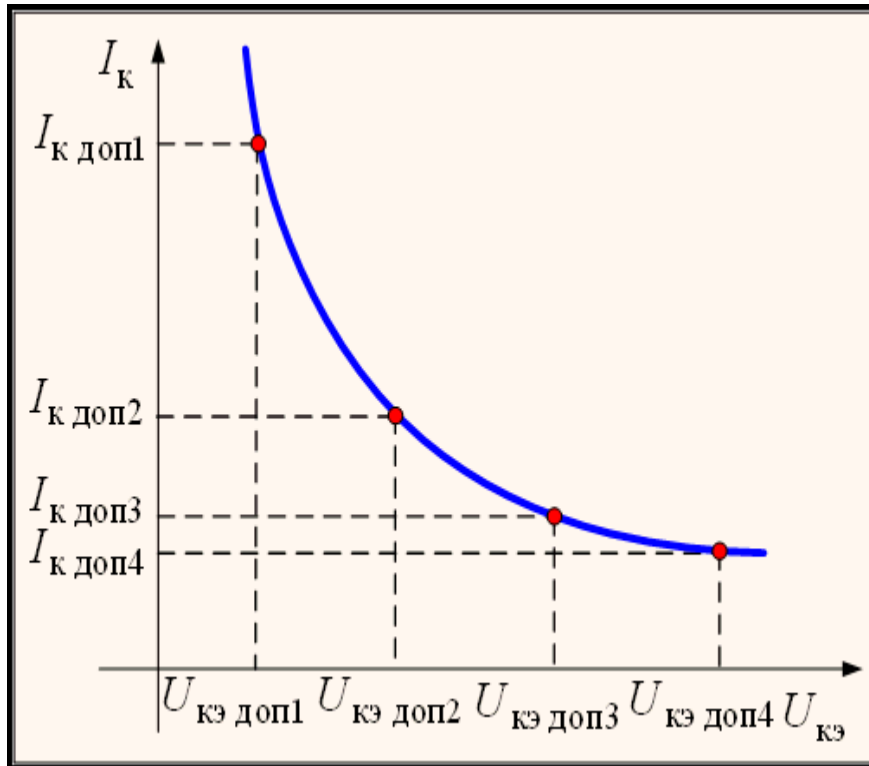


$$R'_H = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H},$$

$$\alpha' = \arctg R'_H,$$

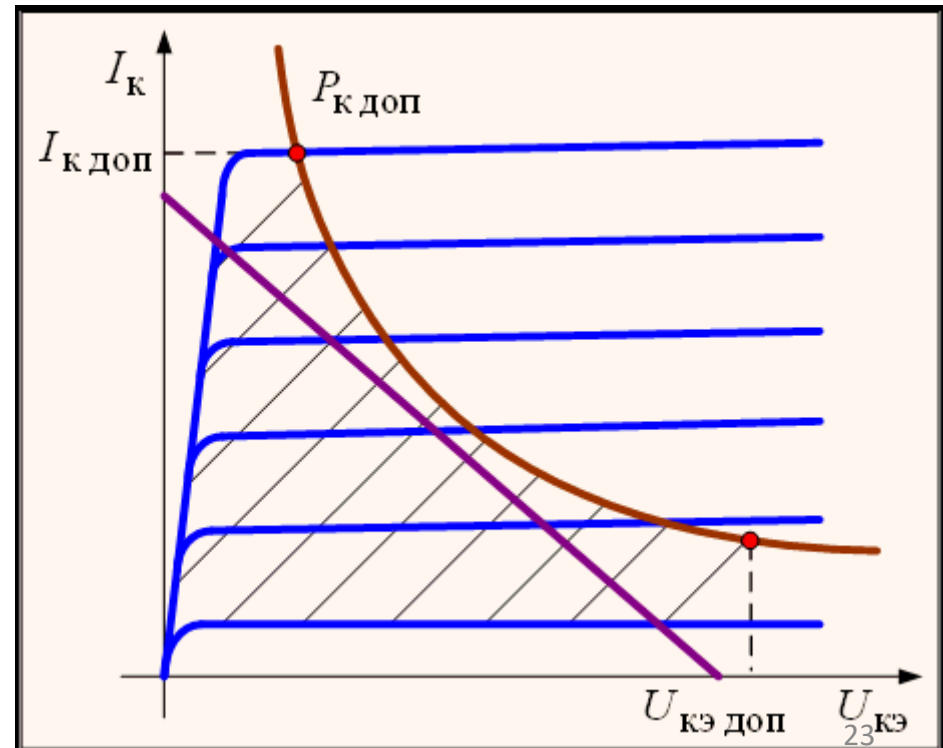


# Граничний режим



Гіпербола допустимих потужностей

$$I_{к доп1} = \frac{P_{к доп}}{U_{кз1}}, \quad I_{к доп2} = \frac{P_{к доп}}{U_{кз2}} \text{ и т. д.}$$



# Алгоритм визначення робочої точки

1. Розраховують величину напруги живлення  $E$  та тип транзистора.
2. Виходячи з довідкових даних та рекомендацій щодо розрахунку параметрів каскаду даного призначення, обирають величину  $R_k$  і будують навантажну пряму.
3. Обирають робочу точку, що відповідає робочому режиму каскаду.
4. Оцінюють величину струму бази  $I_b$  або напруги  $U_{be}$ , які потрібно задати, щоб забезпечити робочий режим каскаду.

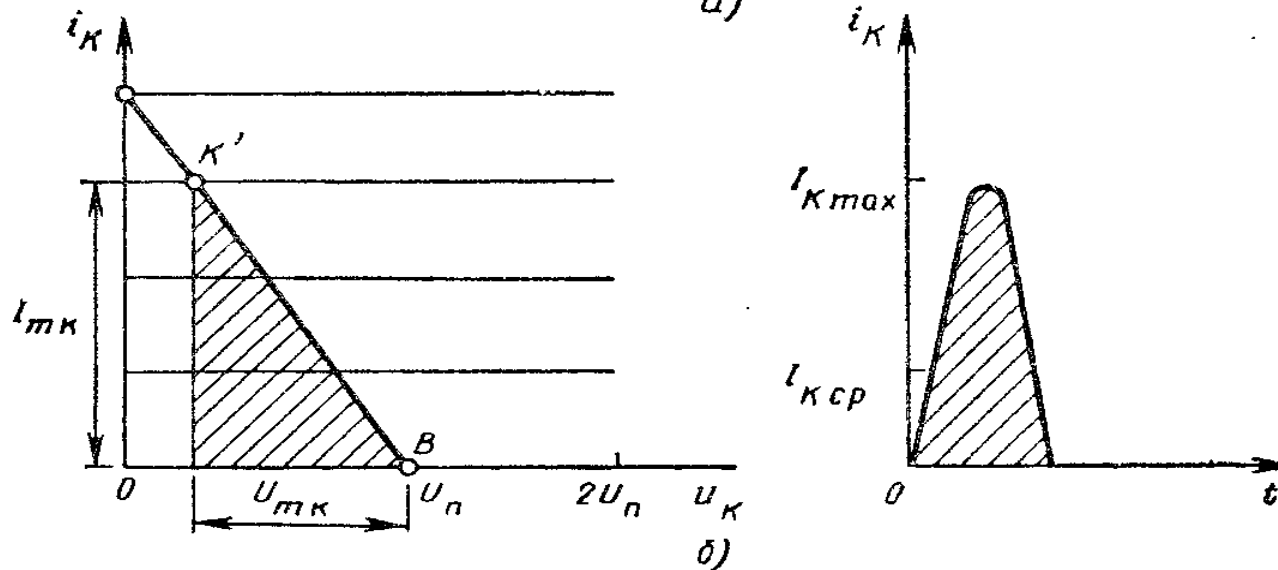
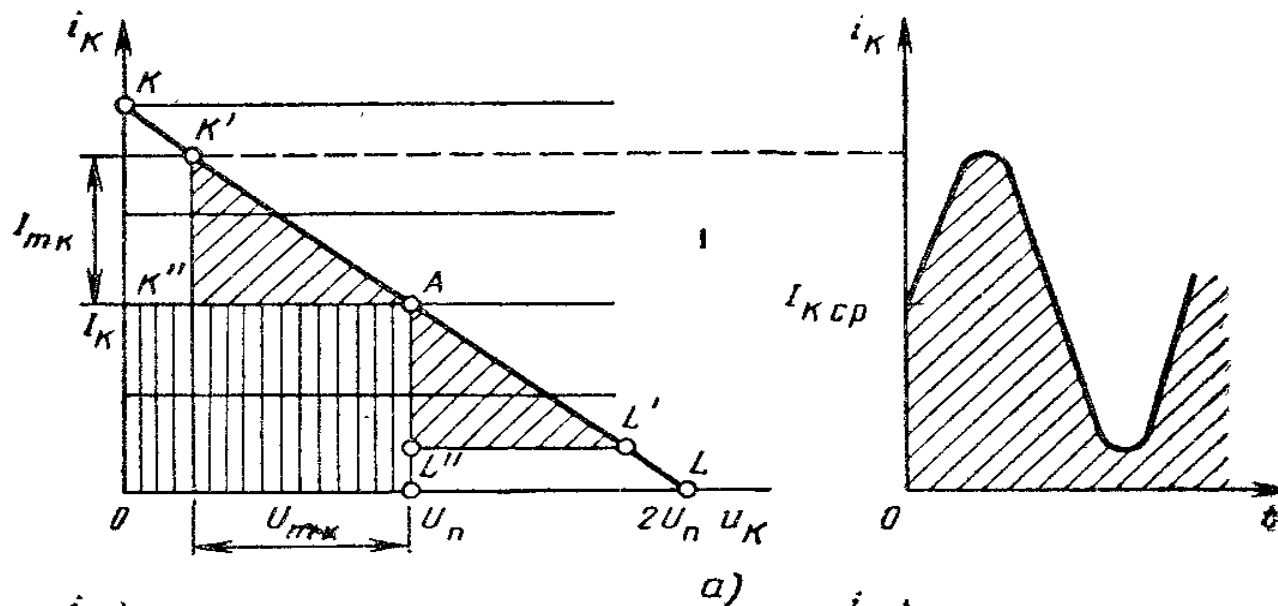


5. Розраховують елементи, необхідні для задання режиму за однією із заданих схем транзисторних каскадів.
  6. Перевіряють, чи не будуть перевищені гранично припустимі параметри транзистора та пасивних елементів (опорів, конденсаторів, котушок індуктивності) під час роботи каскаду в потрібному режимі.
- Навантаженням каскаду може бути не опір  $R_K$ , а коло, що містить реактивні елементи (конденсатори, котушки індуктивності), і замість опору навантаження  $R_K$  слід розглядати навантажний імпеданс:

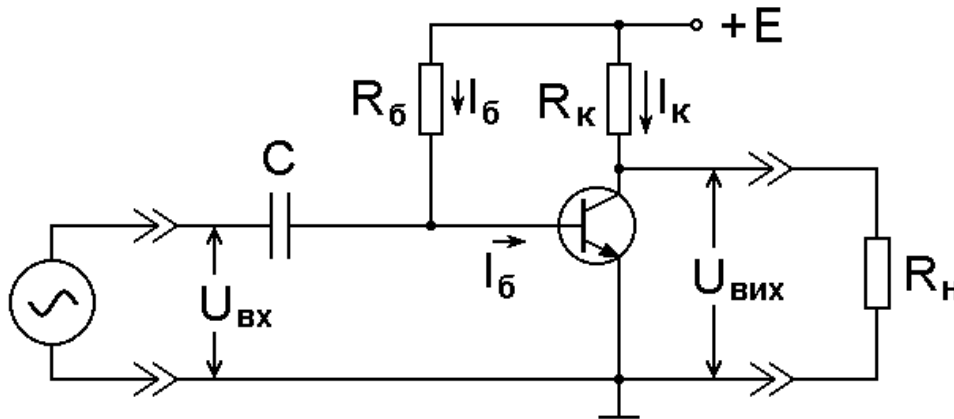
$$\tilde{U}_{вих} = E - \tilde{I} \tilde{Z}_H$$

$\tilde{Z}_H$  потрібно вибирати на частоті, що відповідає сигналу.

# Режим роботи А та Б



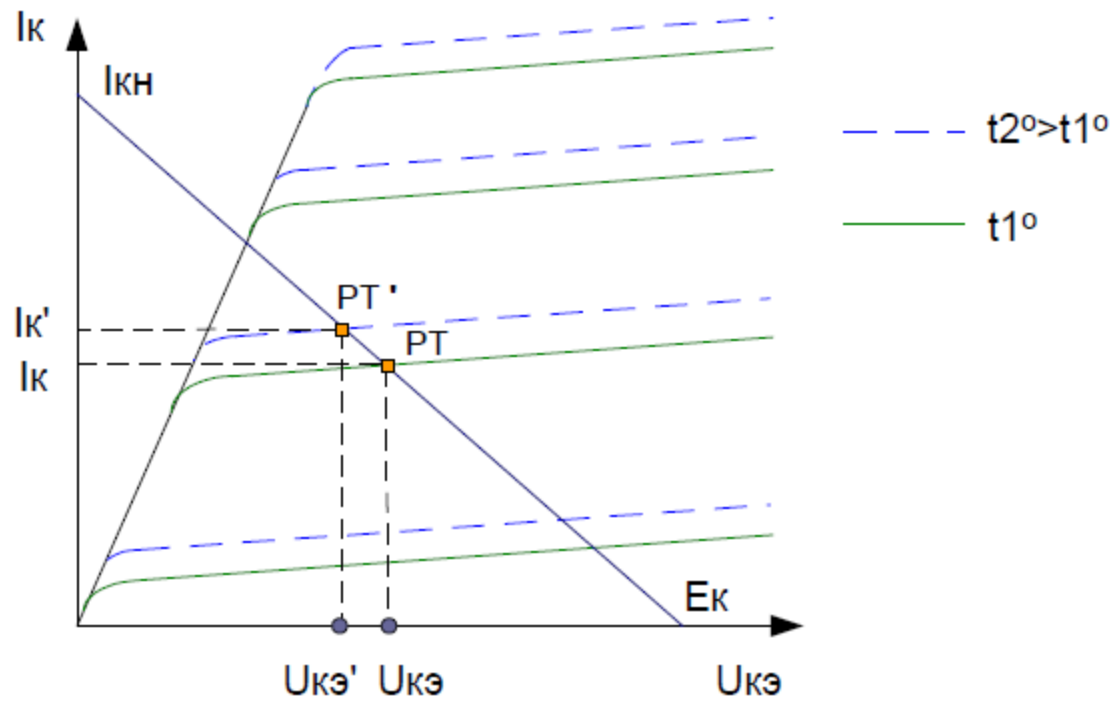
# Схема роботи підсилювального каскаду



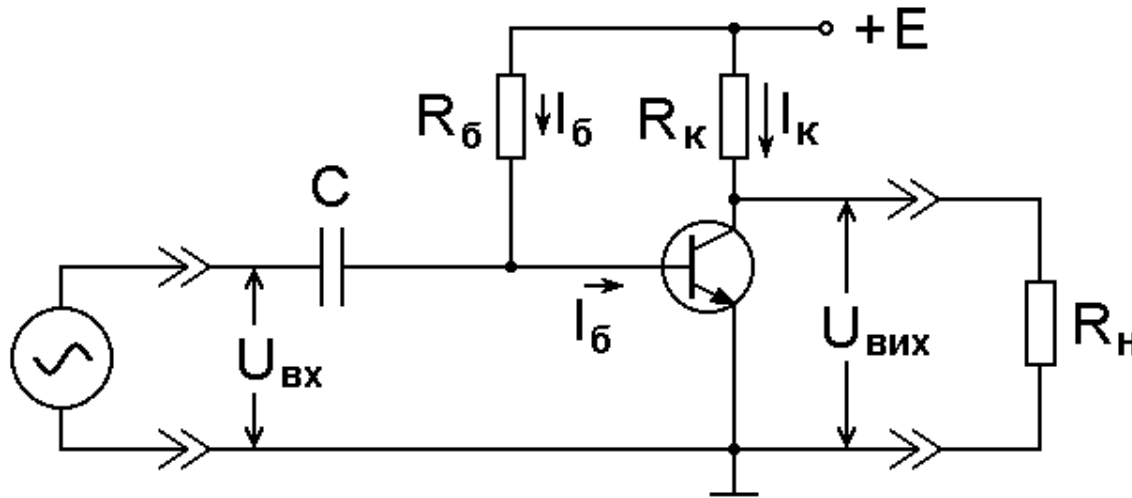
$$I_{\text{б}} R_{\text{б}} + U_{\text{бe}} = E \quad \Rightarrow \quad R_{\text{б}} = \frac{E - U_{\text{бe}}}{I_{\text{б}}} = \frac{E - U_{\text{бe}}}{I_{\text{к}}} \cdot \beta$$

$U_{\text{бe}} = 0,6\text{--}0,7$  В для кремнієвих і  $U_{\text{бe}} = 0,15\text{--}0,2$  В для германієвих транзисторів (для відкритого б-е переходу)

# Термостабілізація режиму роботи підсилювача



При нагріванні транзистора від 25 до 65 °С опір бази та закритого колекторного переходу змінюється на 15-20 %. Зворотній струм колектора збільшується в 2 рази при нагріванні на 10 °С



$$K_u = -\beta \cdot R_K / (r_{\text{б}} + \beta \cdot r_e) = -R_K / r_e$$

$r_{\text{б}}$  – об’ємний опір бази,  $r_e$  – диференціальний опір база - емітерного переходу

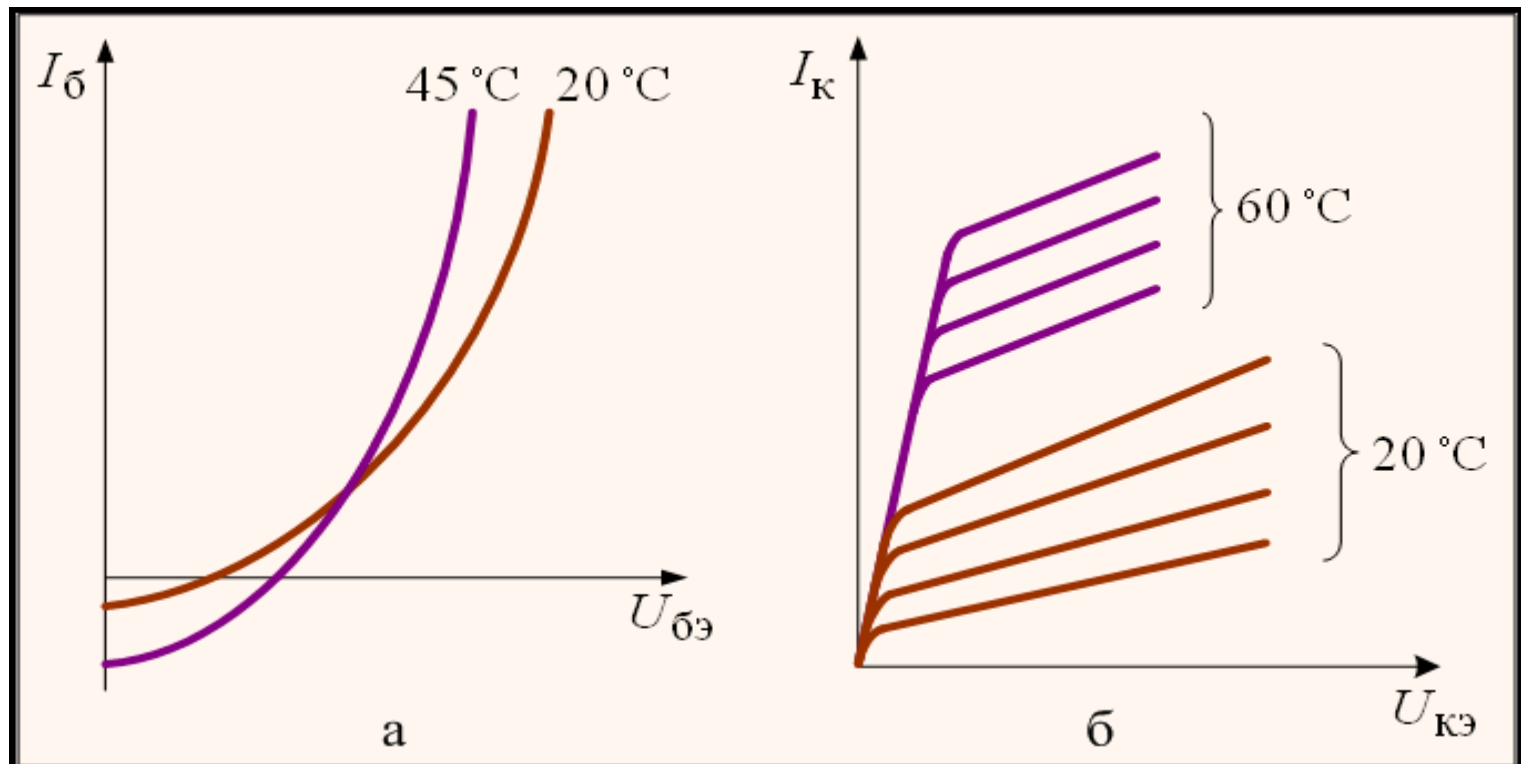
$$r_e \approx kT / (e \cdot I_K), \quad (\text{з рівняння Еберса - Мола})$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $e$  – заряд електрона,  $I_K$  – струм колектора.

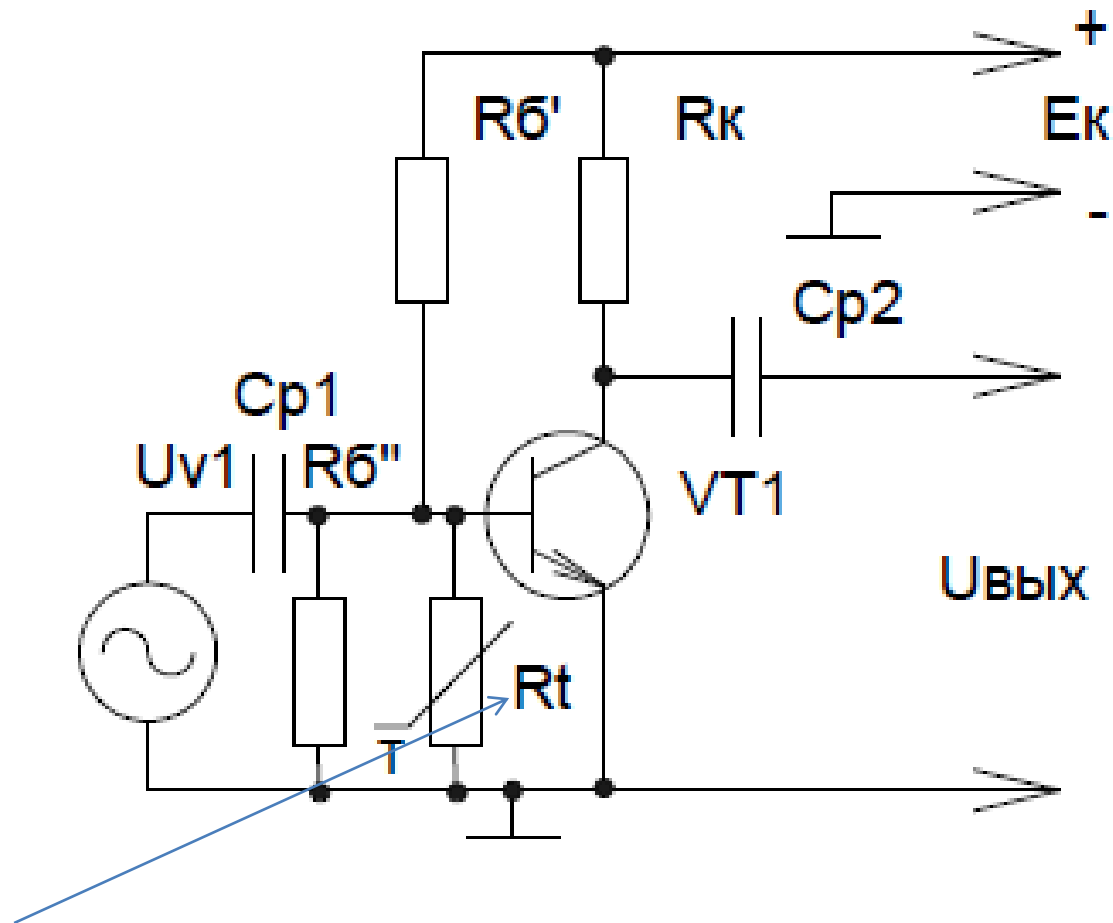
Величина  $kT/e$  для кімнатної температури дорівнює 25 мВ, так що  $r_e = 25 / I_K$  [Ом], де  $I_K$  виражений в мА

# Вплив температури на роботу підсилюючих каскадів

$$K_u = f(T)$$



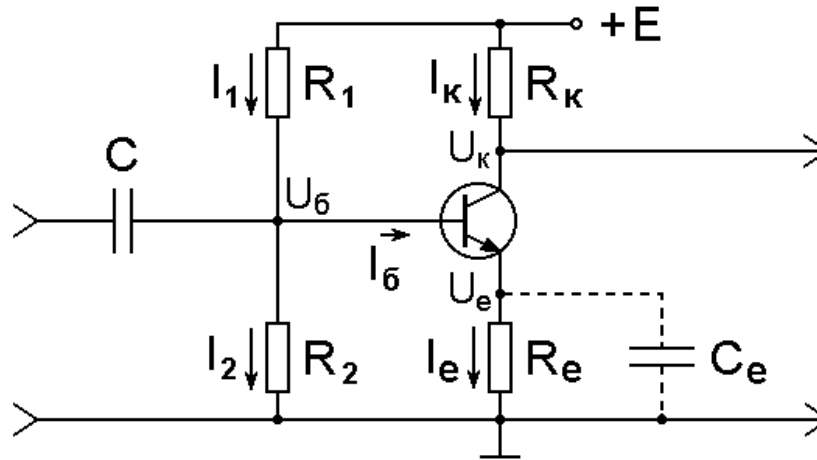
# Стабілізація за допомогою терморезистора



$R_t$  зменшується зі збільшенням температури, це призводить до зменшення  $U_{бе}$  і підзапирання емітерного переходу



# Схема емітерної стабілізації



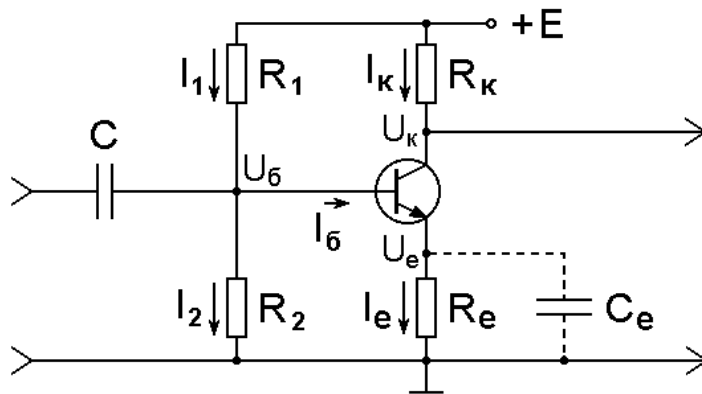
Напругу на базі визначає джерело  $E$  та подільник напруги  $R_1, R_2$ .

В коло емітера введено опір  $R_e$ , значно менший за опір  $R_k$  ( $R_e \approx 0,1 R_k$ ).

$$U_{\text{б}} = U_{\text{бе}} + I_e R_e. \quad \text{Оскільки } I_k \approx I_e, \text{ то}$$

$$I_k = \frac{U_{\text{б}} - U_{\text{бе}}}{R_e}$$

# Схема емітерної стабілізації



$$I_{\kappa} = \frac{U_{\delta} - U_{\delta e}}{R_e}$$

Таким чином, струм колектора  $I_{\kappa}$  можна задати напругою на базі  $U_{\delta}$ .

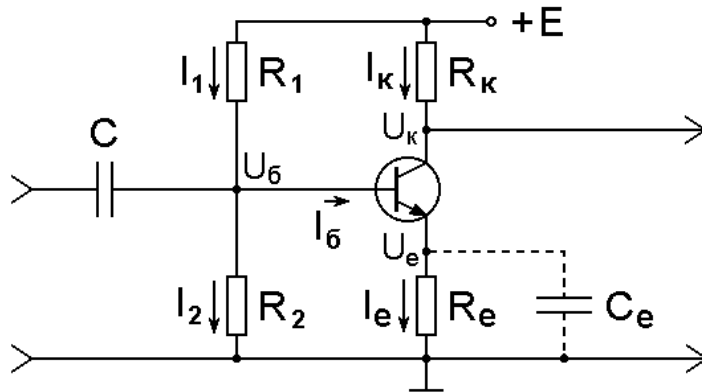
Якщо струм бази  $I_{\delta} \ll I_1, I_2 \longrightarrow I_1 \approx I_2 \approx I = E/(R_1 + R_2)$

$$U_{\delta} = E \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$



$$I_{\kappa} = \frac{E \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{\delta e}}{R_e}$$

# Схема емітерної стабілізації

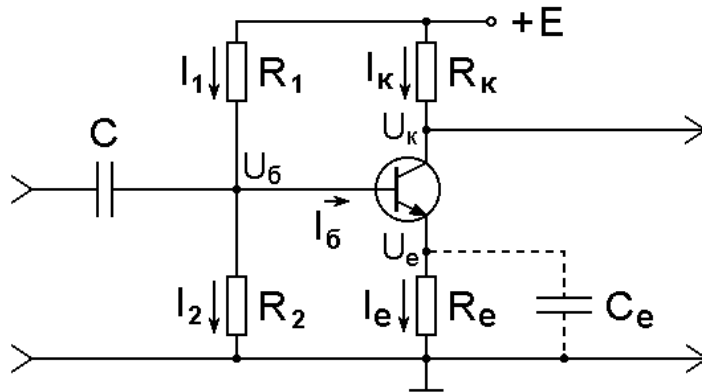


$$I_K = \frac{E \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{be}}{R_e}$$

робоча точка може бути встановлена шляхом підбору  $R_1$  і  $R_2$ .

$$U_{be} = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_K R_e$$

# Схема емітерної стабілізації

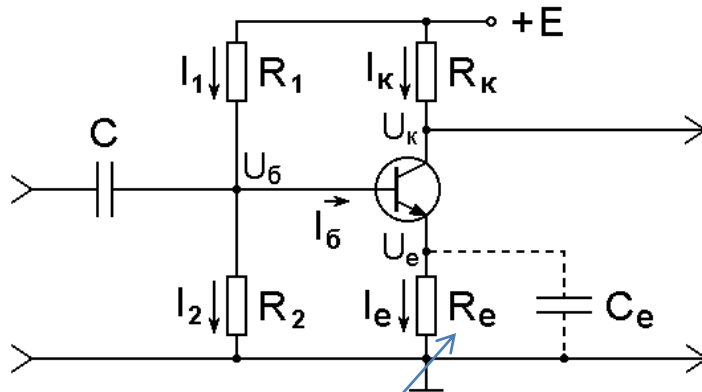


$$U_{be} = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_k R_e$$

Негативний зворотній зв'язок

Опір  $R_e$  виконує важливу функцію: він забезпечує негативний зворотній зв'язок і дозволяє *стабілізувати робочу точку* транзистора у підсилювальному каскаді.

# Схема емітерної стабілізації



Негативний зворотній зв'язок

$$U_{be} = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_k R_e$$

Опір  $R_e$  виконує важливу функцію: він забезпечує негативний зворотній зв'язок і *дозволяє стабілізувати робочу точку* транзистора у підсилювальному каскаді.

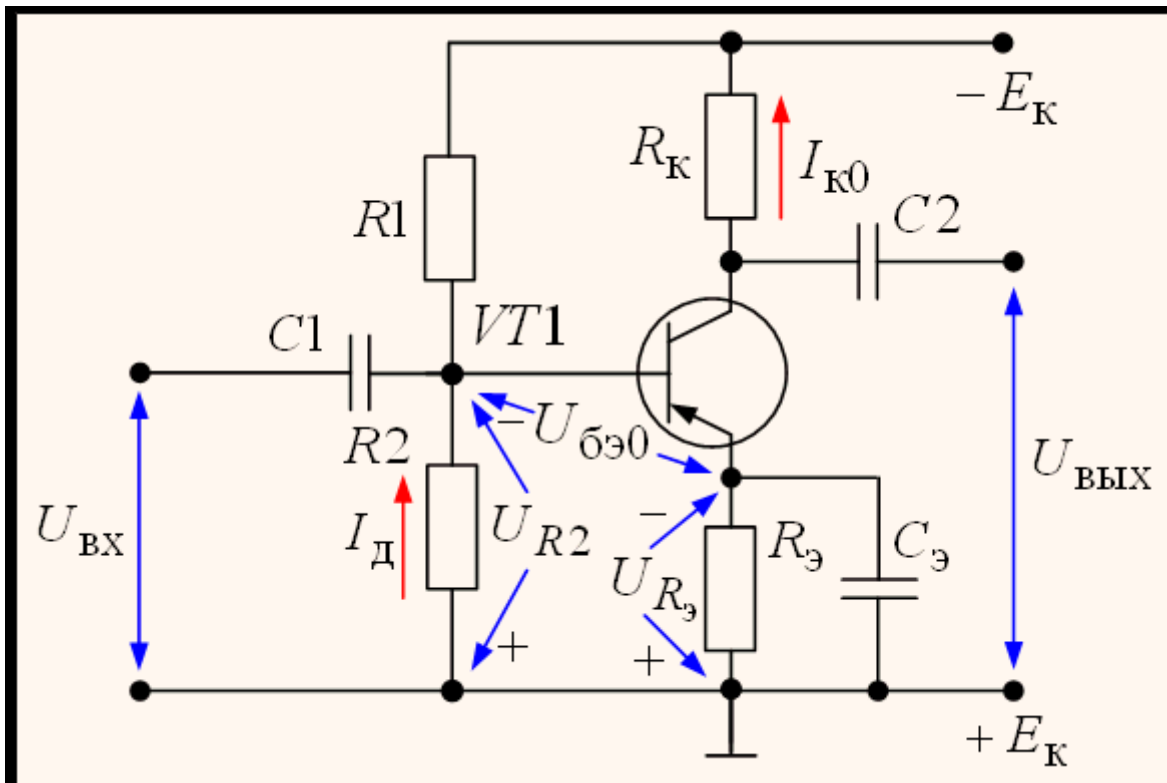
Ємність  $C$  розраховується з міркувань передачі без послаблення найбільш низькочастотної складової у вхідному сигналі.

(високочастотний фільтр, складений з конденсатора  $C$  і паралельно включених резисторів  $R_2$ ,  $R_1$  і  $\beta R_e$ .)

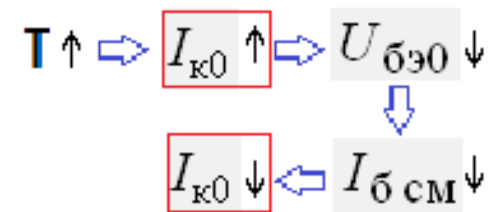
# Схема емітерної стабілізації

Напруга зміщення  
початкової робочої точки

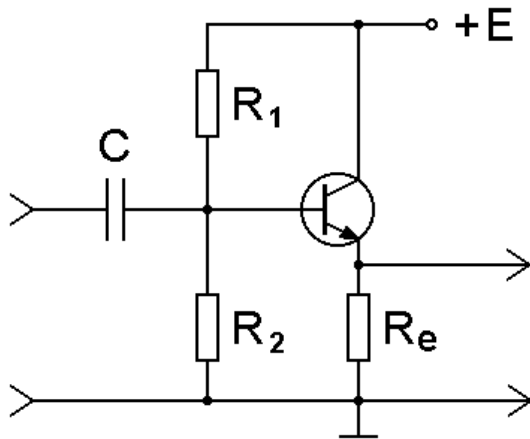
$$U_{бэ0} = U_{R2} - U_{R_3} = I_D R_2 - I_{к0} R_3$$



Від'ємний  
зворотній зв'язок



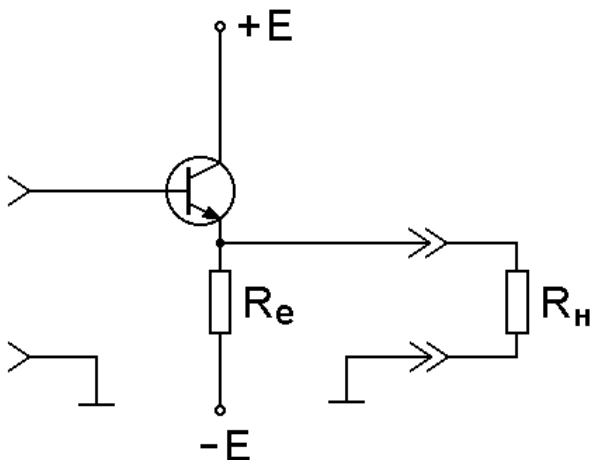
# Емітерний повторювач



$$K_u = 1 - r_e / R_e \longrightarrow 1$$

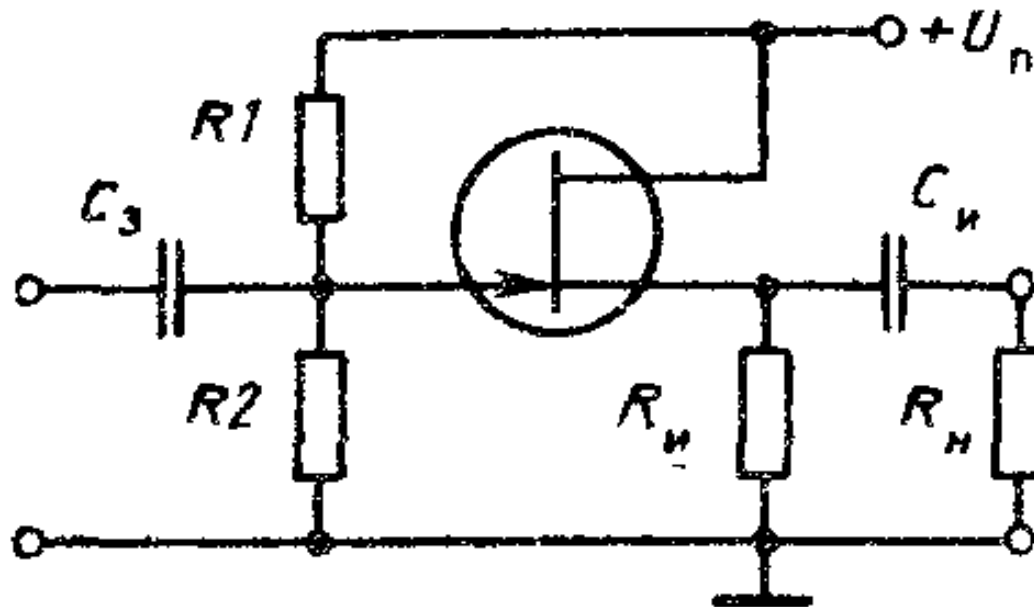
$R_e \gg r_e$

Емітерний повторювач на виході лише повторює вхідну напругу (без зміни фази) та дає підсилення по струму. (Схема зі спільним колектором)



Емітерний повторювач максимально спрощується, якщо використовувати джерело двополярної напруги. У цьому випадку відпадає потреба в подільнику  $R_1, R_2$ , оскільки при нульовому сигналі на вході вихідна напруга відрізняється від нуля лише на 0,6 В, чим нерідко можна знехтувати порівняно з напругою живлення.

# Витоковий повторювач



$$U_{\text{вх}} = U_{\text{зв}} + U_{\text{вих}},$$

$$U_{\text{вих}} = S U_{\text{зв}} R'_u,$$

$$R'_u = R_u \parallel R_n \parallel r_c.$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{зв}} + S R'_u U_{\text{зв}}.$$

$$K = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} = S R'_u / (1 + S R'_u) < 1$$

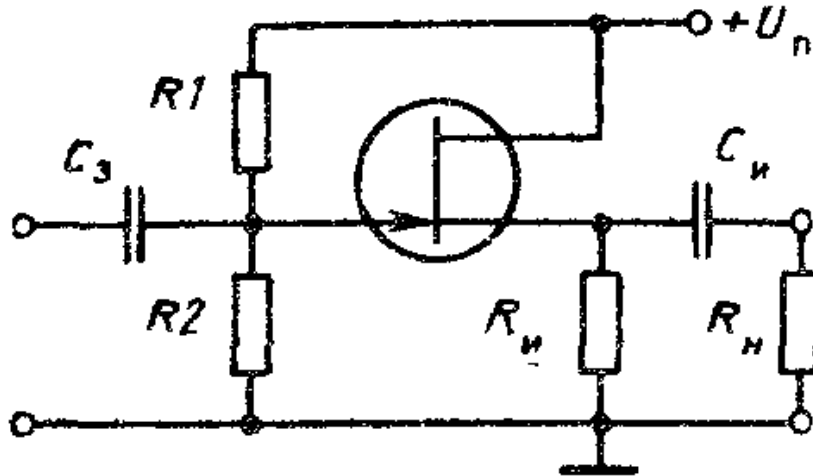
$$R_{\text{вих}} = U_{\text{вих}} / I_{\text{вих}} \approx 1/S.$$

$$R_{\text{вх}} = R_1 \parallel R_2.$$

$S = dl_c / dU_{\text{зв}}$  при  $U_{\text{св}} = \text{const}$  (крутизна)



# Витоковий повторювач



Коефіцієнт підсилення по напрузі близький до одиниці

Вихідна напруга по величині і фазі повторює вхідну

Високий вхідний опір і малий вихідний

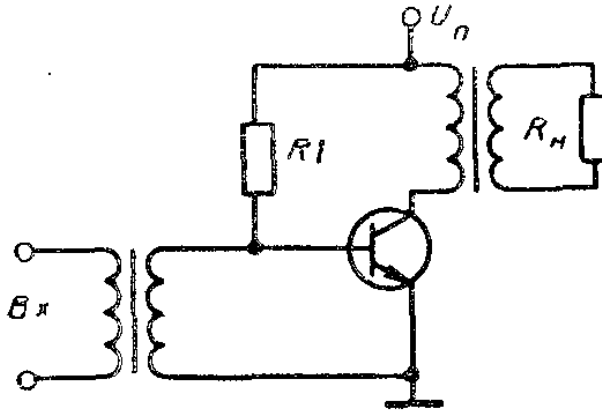
Живиться від однієї напруги

Польовий транзистор: більш температурно стабільний, створює менші шуми, висока стійкість до іонізуючого випромінювання

# Підсилювач потужності

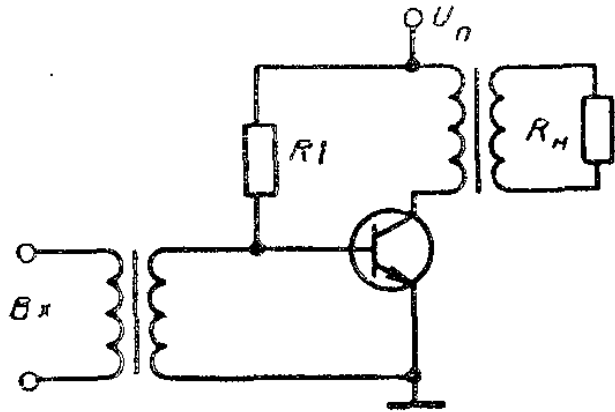
- **Однотактні підсилювачі** – підсилювальні каскади, які складаються з одного або декількох паралельно ввімкнених підсилюючих елементів, на вхід яких подають одну вхідну напругу і з виходу знімають одну вихідну напругу підсиленого сигналу
- Однотактні підсилювачі класифікуються за способом підключення навантаження: трансформаторні та безтрансформаторні
- Аперіодичні підсилювачі підсилюють широкополосні сигнали(підсилення звуків та відеосигналів)
- Резонансні підсилювачі підсилюють вузькополосні радіочастотні коливання

# Підсилювач потужності з трансформаторним включенням нагрзуки



- Обмотка має малий опір постійній складовій струму, тому при відсутності змінної складової вхідного сигналу в ній створюється мала напруга
- Змінна вхідна напруга створює змінну складову колекторного струму і магнітний потік в трансформаторі – > з'являється змінна ЕДС з частотою сигналу. Якщо трансформатор підвищувальний то можна отримати підсилення потужності

# ККД підсилювача потужності, режим А



Потужність від дж.  
Постійного струму

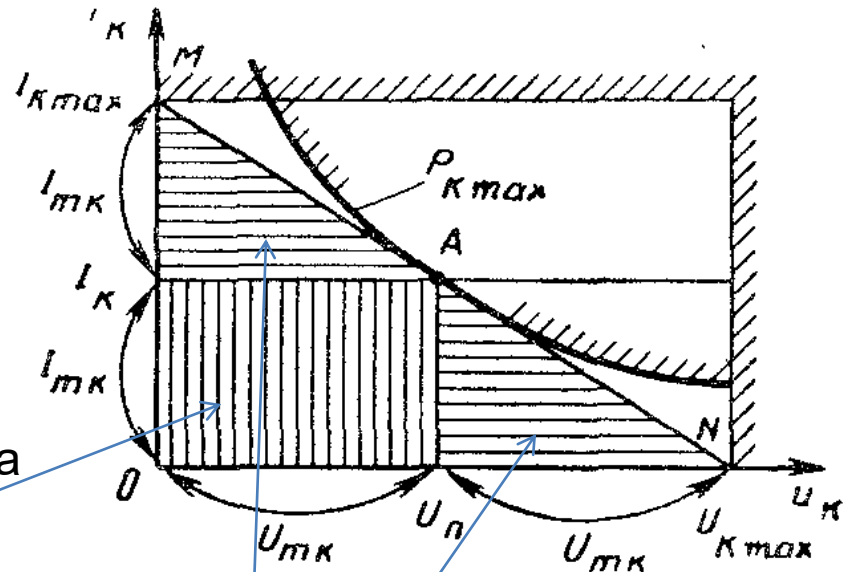
$$P_{\text{==}} = I_K U_n$$

Площа

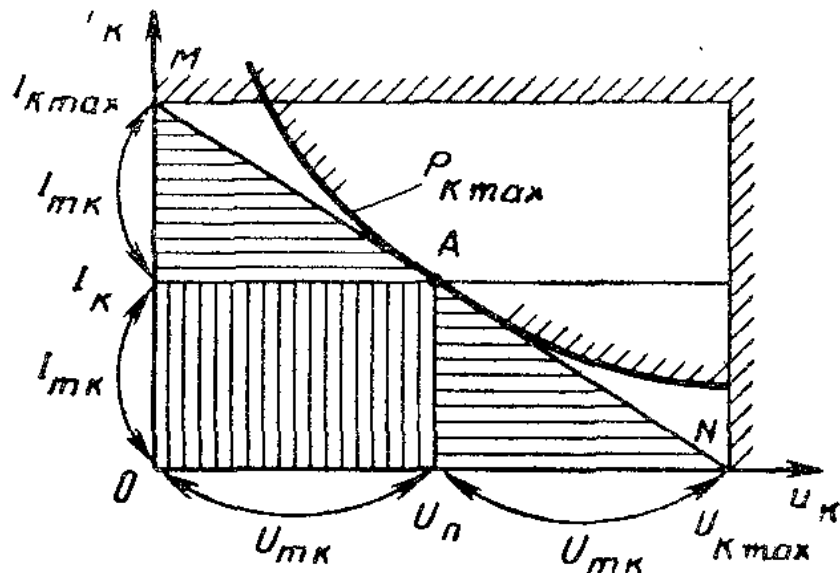
$$P_{\sim \text{max}} = 0,5 I_{\text{тк}} U_{\text{тк}}$$

Потужність  
змінного  
струму

$$\eta = P_{\sim} / P_{\text{==}} \quad \text{ККД}$$



# ККД підсилювача потужності, режим А



Якщо колекторна напруга та струм максимальні:

$$\eta_{\max} = P_{\sim \max} / P_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \frac{I_{mк}}{I_K} \frac{U_{mк}}{U_n}$$

$$I_{mк} = I_K$$

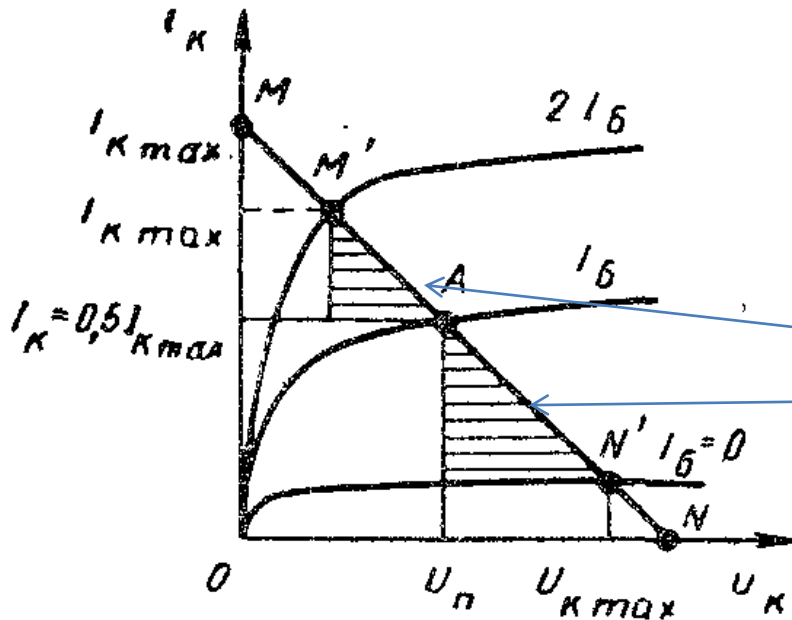
$$U_{mк} = U_n$$



$$\eta_{\max} = 0,5$$

При ідеальних  
характер.  
транзистора

# ККД підсилювача потужності, режим А

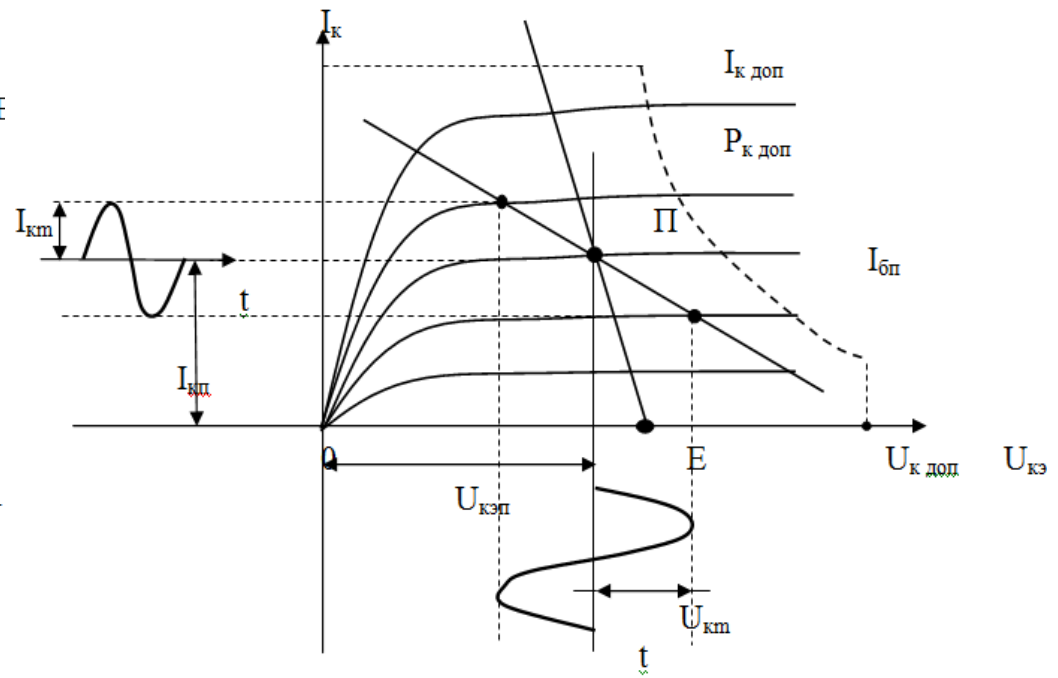
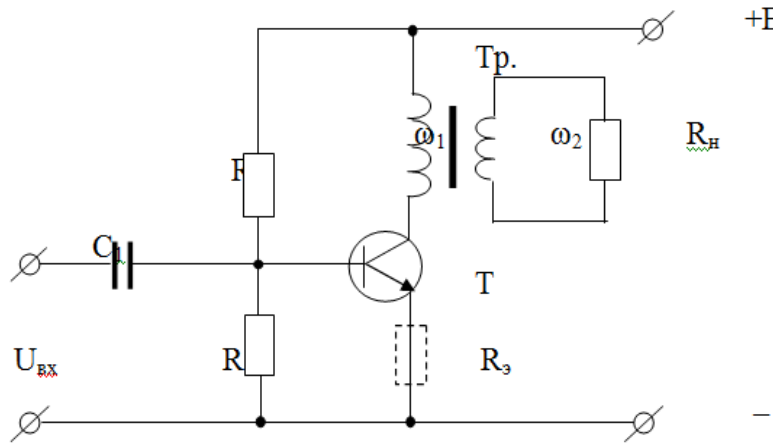


Зі збільшенням струму колектора зменшується коефіцієнт передачі струму  $h_{21\theta}$

Тому площі відрізняються.

$$I_{тк\max} < I_K$$

$$\text{ККД} < 50\%$$

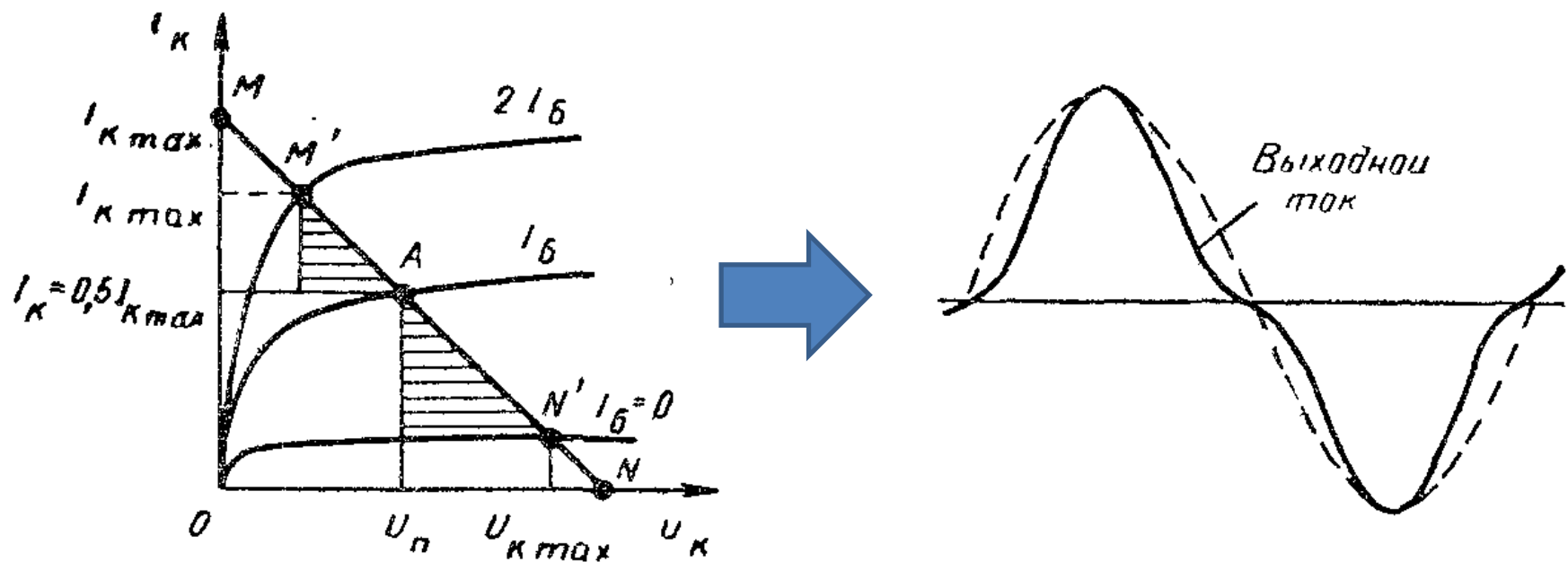


підсилювач працює в режимі А

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{км}} \cdot I_{\text{км}}}{2}, \quad P_{\text{и}} = E \cdot I_{\text{кп}} = U_{\text{кэп}} \cdot I_{\text{кп}},$$

КПД  $\eta_k = \frac{U_{\text{км}} \cdot I_{\text{км}}}{2U_{\text{кэп}} \cdot I_{\text{кп}}}$

макс КПД: 30-40%



Не лінійність приростів (відносно точки А) колекторного струму при збільшенні та зменшенні струму бази призводить до спотворення форми вихідного сигналу, тобто до утворення гармонік.

Коефіцієнт гармонік:

$$K_g = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{mk}^2} / I_{m1}$$



# Однотактний підсилювач потужності

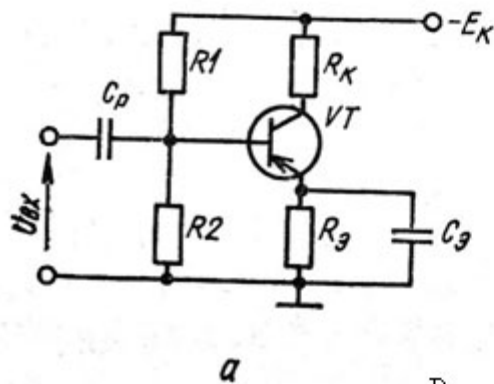
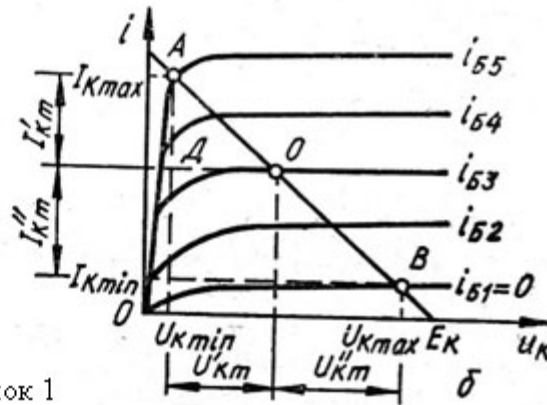


Рисунок 1



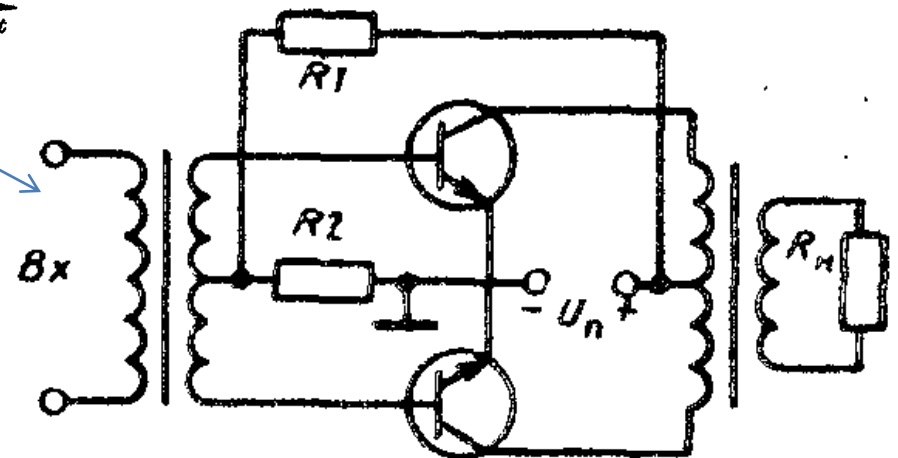
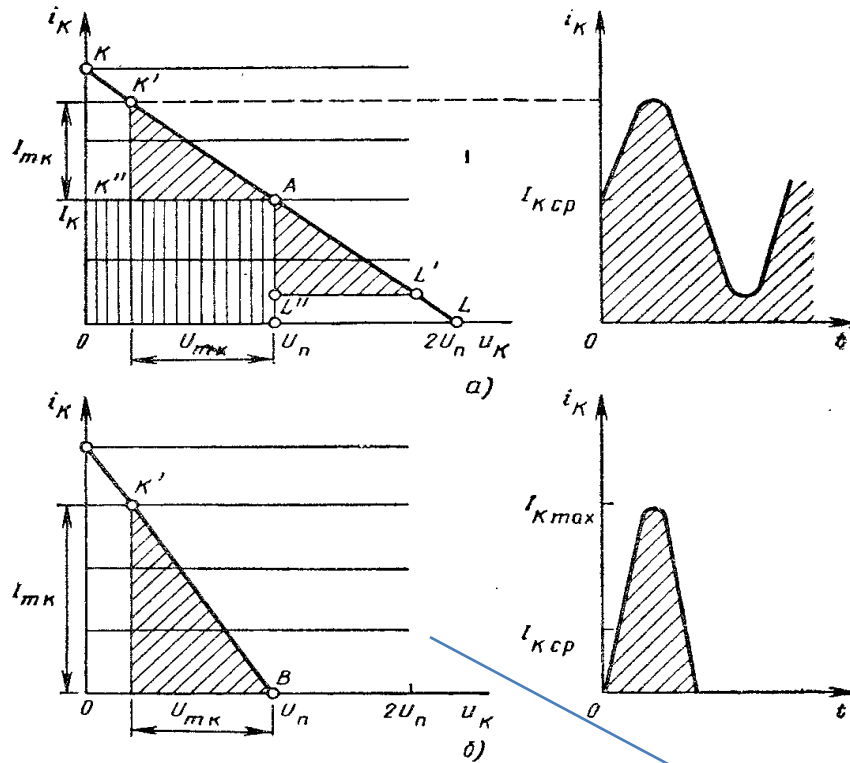
Максимальная амплитуда напряжения на коллекторе

$$U_{km} = (U_{kmax} - U_{kmin})/2.$$

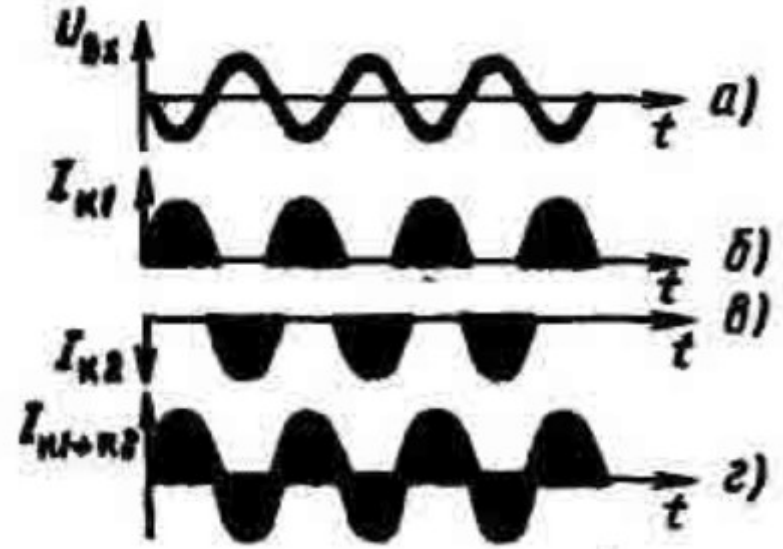
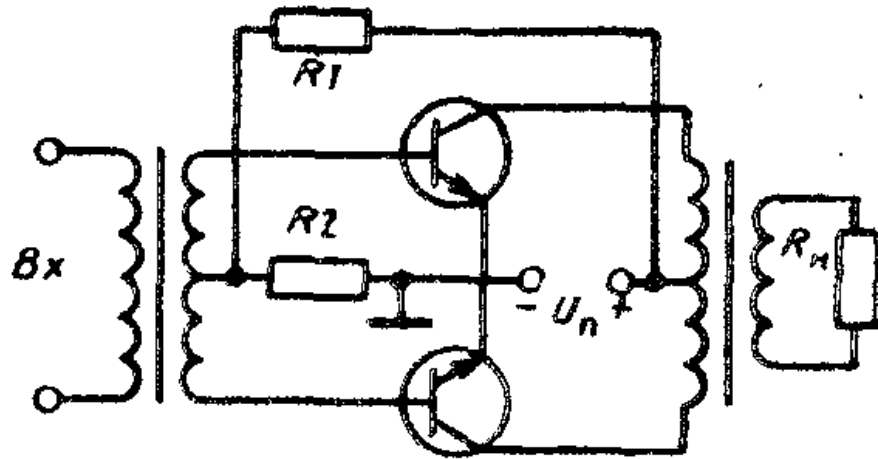
Амплитуда выходного тока  $I_{km} = I_{ok} - I_{kmin}$

- **Переваги:** простота; відсутність втрат потужності у вихідному пристрої, додаткових частотних і нелінійних спотворень; можливість підсилення сигналів в широкій полосі частот
- **Недоліки:** низький ККД; протікання через навантаження постійної складової струму живлення; наявність на навантаженні постійного потенціалу

# Двотактний трансформаторний підсилювач потужності (Режим В)



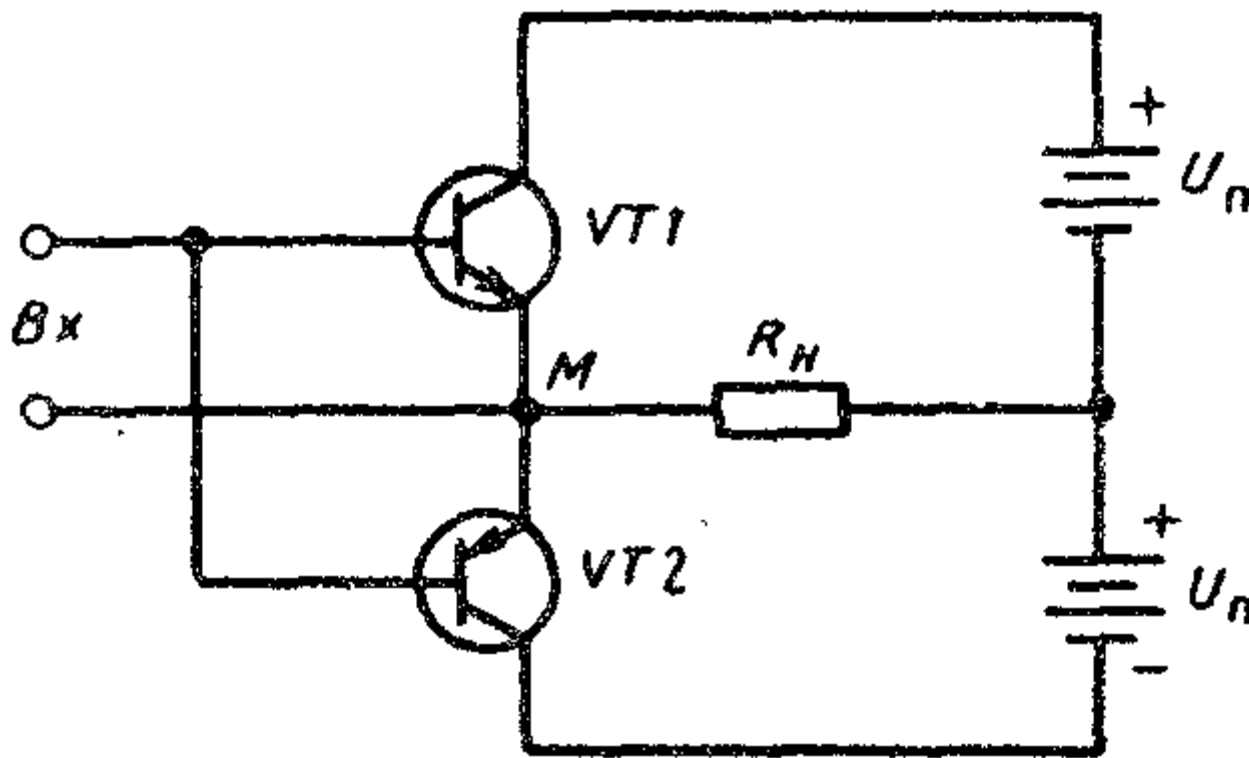
# Двотактний трансформаторний підсилювач потужності (Режим В)



Напруга на транзисторах змінюється в протифазі, при цьому транзистори працюють почерзі. В вихідному трансформаторі колекторні струми сумуються -> на виході потужніший сигнал в порівнянні з однотактним підсилювачем

$$\eta_{\max} = \pi/4 \quad \sim 78,5 \%$$

# Двотактний безтрансформаторний підсилювач потужності (Режим В)



Основна складність – підбір 2-х транзисторів з різними типами провідності та однаковими характеристиками