

Лекція №6

Ключ на біполярному транзисторі, його режими та характеристики.

Мета лекції: вивчити режими функціонування біполярного транзисторного ключа та його властивості.

План лекції:

6.1 Вступ.

6.2 Статичні режими транзисторного ключа.

6.3 Перехідні процеси в транзисторному ключі.

6.1 Вступ.

Для комутації електронних кіл широко застосовуються біполярні транзистори типу р-п-р або п-р-п.

Найбільш вживаною є схема транзисторного ключа з спільним емітером (рис. 6.1). За такої схеми можливо передавати або не передавати вхідну напругу ($U_{вх}$) на вихід схеми ($U_{вих}$), тобто на навантаження, яке створюється слідуючою схемою.

Коло управління складається з джерела управляючої напруги $U_{упр}$, обмежуючого базового резистора $R_б$, переходу база-емітер транзистора.

Ключовий режим транзистора характеризується двома стаціонарними станами і перехідним процесом:

- 1) Стан в режимі відсічки.
- 2) Стан в режимі насичення.
- 3) Перехідний процес між двома станами.

6.2 Статичні режими транзисторного ключа.

Для отримання режиму відсічки (рисунок 6.1) необхідно виконати умову :

$$U_{BE} = U_{упр} - I_{КЗ} R_б < 0 \quad (6.1)$$

де $I_{КЗ}$ - зворотній струм колекторно-базового переходу транзистора.

$R_б$ - результуючий опір в колі бази, включаючи також опір джерела управляючого сигналу $U_{упр}$.

Для надійного закриття транзистора з урахуванням дестабілізуючих факторів закриваючу напругу U_{BE} вибирають - (-0,2 ... -0,6) В.

Колекторна напруга закритого транзистора.

$$U_{ВИХ} = U_{К} = U_{ВХ} - I_{КЗ} R_{К} \quad (6.2)$$

Зважаючи на малість $I_{КЗ} R_{Н}$ іноді можна вважати, що вся напруга $U_{ВХ}$ передається на вихід ($R_{Н}$ прямує до нескінченності), тобто $U_{ВИХ}$ приблизно дорівнює $U_{ВХ}$. Ключ знаходиться в замкненому стані.

Вихідний опір замкнутого ключа $R_{ВИХ}$ визначається паралельним з'єднанням опору транзистора для постійного струму $U_{ВХ}/I_{КЗ}$ та опором $R_{К}$. Так як $U_{ВХ} \gg I_{КЗ} R_{К}$, то $R_{ВИХ}$ приблизно дорівнює $R_{К}$.

В розімкнутому стані ключа (напруга на вихіді транзистора близька до 0) транзистор повинен бути в режимі насичення. Для цього відкриваюча напруга управління $U_{упр}$ повинна бути такою, щоб базовий струм $I_{Б1}$ був більше струму бази при насиченні $I_{БН}$.

Глибина насичення характеризується коефіцієнтом насичення

$$S = I_{Б1} / I_{БН} > 1 \quad (6.3)$$

Колекторний струм в режимі насичення :

$$I_{КН} = (U_{ВХ} - U_{КН}) / R_{К} \approx U_{ВХ} / R_{К} \quad (6.4)$$

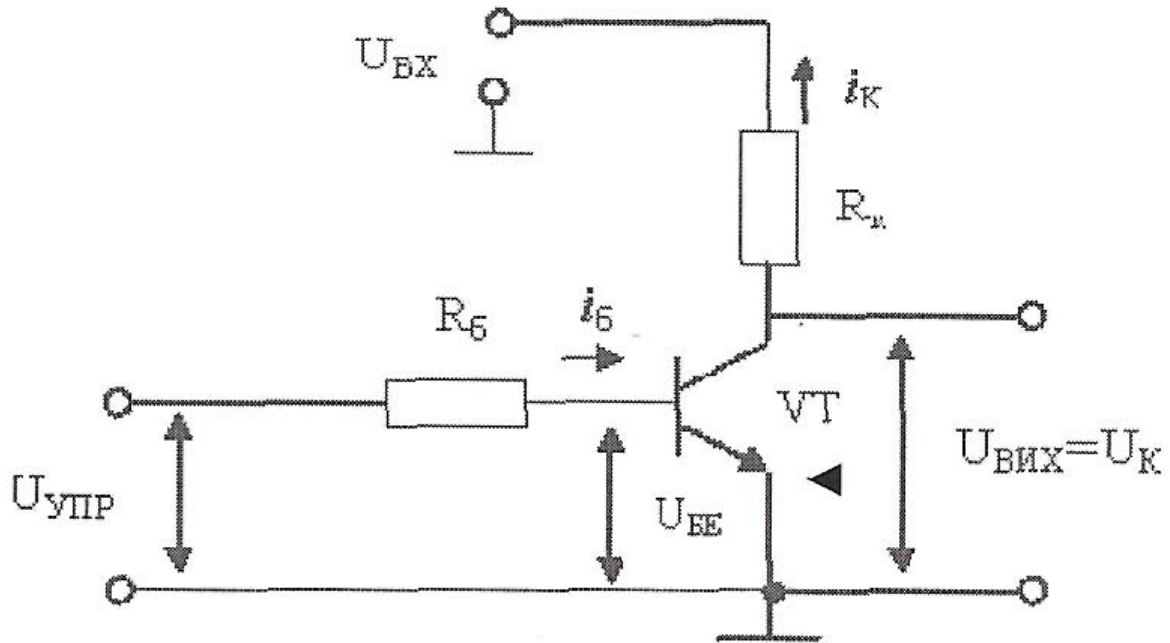


Рис. 6.1. Біполярний транзистор в ключовому режимі.

При струмі бази $I_{Б} = I_{БН}$ можна вважати, що транзистор працює в активному режимі і звідси випливає (при $I_{БН} \gg I_{К0}$)

$$I_{КН} \approx h_{21} I_{БН} \quad (6.5)$$

Із співвідношень (6.3, 6.4, 6.5) можна визначити величину базового струму, необхідну для отримання надійного режиму насичення транзистора

$$I_{Б1} = S I_{БН} = S I_{КН} / h_{21} = S U_{ВХ} / h_{21} R_{К} \quad (6.6)$$

де h_{21} - коефіцієнт підсилення струму в схемі зі спільним емітером.

В залежності від амплітуди очікуваних імпульсів завад та розкиду параметрів транзистора величину S вибирають в межах від 1,2 до 2.

У зв'язку з залежністю h_{21} від температури та значним розкидом його значення для різних транзисторів умова (6.3) повинна бути виконана при мінімальному значенні $h_{21\text{мін}}$.

Необхідне значення $I_{Б1}$ забезпечується відповідним вибором величини відкриваючої напруги управління $U_{упр}$ та опору $R_{Б}$.

З рис. 6.1 випливає, що

$$I_{Б1} = U_{упр} / (R_{Б} + r_{ВХ}) \quad (6.7)$$

де $r_{ВХ}$ - вхідний опір насиченого транзистора .

Для зменшення впливу нестабільної величини $r_{ВХ}$ на значення струму $I_{Б1}$ необхідно, щоб $R_{Б} \gg r_{ВХ}$.

Опір насиченого транзистора $r_{н} = U_{ВИХ} / I_{КН}$ малий порівняно з $R_{К}$ і тому вихідний опір ключової схеми в цьому режимі $R_{ВИХ} \approx r_{н}$.

При перемиканні транзистора з режиму відсічки в режим насичення створюється перепад напруги на колекторі :

$$\Delta U_{ВИХ} = U_{ВХ} - I_{К0} R_{К} \approx U_{ВХ} \quad (6.8)$$

Вихідна напруга при цьому залежить від струму колектора та статичних характеристик транзистора.

Наведені співвідношення дають можливість розрахувати статичний режим ключової схеми.

6.3 Перехідні процеси в транзисторному ключі.

Нехай в початковому стані транзистор знаходиться в режимі відсічки під дією вхідної закриваючої напруги $U_{\text{впр}} = E_1$. При появі на вході в момент часу $t=t_1$ перепаду відкриваючої напруги $U_{\text{впр}} = E_2$ емітерний перехід транзистора зміщується в прямому напрямку, а базовий струм стрибком досягає значення $I_{\text{б1}} = SI_{\text{БН}}$ (рисунок 6.2). Колекторний струм зростає за законом :

$$i_k(t) = h_{21}SI_{\text{БН}} \left(1 - e^{-t/\tau_\beta} \right),$$

де

$$\tau_\beta = h_{21}\tau_\alpha; \quad \tau_\alpha = 1/(2\pi f_\alpha);$$

f_α - гранична частота підсилення струму в схемі „спільна база”.

За час $t=t_\phi$ колекторний струм набуде значення

$$i_k(t) = I_{\text{КН}} = h_{21}I_{\text{БН}}$$

Тоді

$$h_{21}SI_{\text{БН}} \left(1 - e^{-\frac{t_\phi}{\tau_\beta}} \right) = h_{21}I_{\text{БН}}$$

$$h_{21}SI_{\text{БН}} - h_{21}SI_{\text{БН}} e^{-\frac{t_\phi}{\tau_\beta}} = h_{21}I_{\text{БН}}$$

$$h_{21}SI_{\text{БН}} e^{-\frac{t_\phi}{\tau_\beta}} = h_{21}SI_{\text{БН}} - h_{21}I_{\text{БН}}$$

$$e^{-\frac{t_\phi}{\tau_\beta}} = \frac{h_{21}SI_{\text{БН}} - h_{21}I_{\text{БН}}}{h_{21}SI_{\text{БН}}}$$

$$\frac{-t_\phi}{\tau_\beta} = \ln\left(\frac{h_{21}SI_{\text{БН}} - h_{21}I_{\text{БН}}}{h_{21}SI_{\text{БН}}}\right)$$

$$t_\phi = \tau_\beta \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{1}{S}}\right) \approx \tau_\beta \ln\left(1 + \frac{1}{S}\right) \approx \frac{\tau_\beta}{S}$$

Тобто можна розрахувати тривалість стадії вмикання ключа, як:

$$t_\phi \approx \frac{\tau_\beta}{S} \quad (6.10)$$

За час t_ϕ напруга $U_{\text{вих}}$ досягає значення $U_{\text{КН}}$ і, починаючи з моменту часу $t=t_2$, транзистор буде знаходитись в режимі насичення. Струми $i_{\text{б}}$, $i_{\text{е}}$ та $i_{\text{к}}$ залишаться практично незмінними, а в області бази відбувається накопичення надлишкового заряду неосновних носіїв за експоненційним законом з сталою часу $\tau_{\text{Н}}$. Повне накопичення заряду до рівня $I_{\text{б1}}\tau_{\text{Н}}$ відбудеться за час $3\tau_{\text{Н}}$, після чого транзистор опиниться в стаціонарному режимі.

В момент часу $t=t_3$ на вхід ключа подається закриваюча напруга, під дією якої базовий струм стає рівним $I_{\text{б2}}$. Процес розмикання ключа складається з стадії розсмоктування надлишкового заряду неосновних носіїв $t_{\text{роз}}$ та стадії закриття транзистора $t_{\text{с}}$.

Протягом стадії розсмоктування формується змінна струму $i_k(t)$ за експоненційним законом (точки А, В, С рисунок 6.2), при цьому виникає стрибок базового струму $I_{Б1} + I_{Б2}$, відповідно

$$i_k(t) = h_{21}(I_{Б1} + I_{Б2})(1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}}).$$

Для інтервалу троз

$$\begin{aligned} h_{21}I_{Б1} - I_{КН} &= h_{21}(I_{Б1} + I_{Б2})(1 - e^{-\frac{t}{\tau_H}}), \\ &\text{або} \\ t_{\text{роз}} &= \tau_H \ln \frac{h_{21}(I_{Б1} + I_{Б2})}{h_{21}(I_{Б1} + I_{Б2}) + I_{КН} - h_{21}I_{Б1}} \approx \tau_H \ln \frac{1}{1 - \frac{h_{21}I_{Б1} - I_{КН}}{h_{21}(I_{Б1} + I_{Б2})}} \approx \tau_H \ln \left(1 + \frac{h_{21}I_{Б1} - I_{КН}}{\Delta I_{\sigma}} \right) = \\ &= \tau_H \frac{I_{КН}}{\Delta I_{\sigma}} (S - 1), \end{aligned} \quad (6.11)$$

де $\Delta I_{\sigma} = I_{Б1} + I_{Б2}$.

Тривалість троз визначає затримку вимикання транзисторного ключа. Вона зменшується при збільшенні закриваючого струму $I_{Б2}$ та зменшенні коефіцієнта насичення S .

В момент закінчення стадії розсмоктування ($t=t_3$) транзистор входить в активний режим і починається процес його закриття під впливом стрибка струму $h_{21}I_{Б2}$. При цьому колекторний струм спадає за експоненційним законом зі сталою часу τ_{β} від початкового значення $I_{КН}$

$$i_k(t) = h_{21}I_{Б2}e^{-\frac{t}{\tau_{\beta}}} - (h_{21}I_{Б2} - I_{КН}) = h_{21}I_{Б2}(e^{-\frac{t}{\tau_{\beta}}} - 1) + I_{КН} \quad (6.12)$$

Починаючи з точки 3 до точки 4 колекторний струм спадає від $I_{КН}$ майже до нуля, тобто в точці 4

$$h_{21}I_{Б2}(e^{-\frac{t_c}{\tau_{\beta}}} - 1) + I_{КН} \approx 0 \quad (6.13)$$

Звідки

$$h_{21}I_{Б2}(1 - e^{-\frac{t_c}{\tau_{\beta}}}) \approx I_{КН}$$

і

$$\begin{aligned} h_{21}I_{Б2} - h_{21}I_{Б2}e^{-\frac{t_c}{\tau_{\beta}}} &\approx I_{КН} \\ e^{-\frac{t_c}{\tau_{\beta}}} &\approx \frac{h_{21}I_{Б2} - I_{КН}}{h_{21}I_{Б2}} \\ \frac{-t_c}{\tau_{\beta}} &\approx \ln \left(\frac{h_{21}I_{Б2} - I_{КН}}{h_{21}I_{Б2}} \right) \end{aligned}$$

Тривалість спаду імпульсу:

$$t_c \approx \tau_{\beta} \ln \left(\frac{h_{21}I_{Б2}}{I_{КН} + h_{21}I_{Б2}} \right) = \tau_{\beta} \ln \left(\frac{h_{21}I_{Б2}}{h_{21}I_{Б2} - h_{21}I_{БН}} \right) = \tau_{\beta} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{I_{БН}}{I_{Б2}}} \right) \approx \tau_{\beta} \ln \left(1 + \frac{I_{БН}}{I_{Б2}} \right) \approx \tau_{\beta} \frac{I_{БН}}{I_{Б2}}$$

Отже

$$t_c \approx \tau_{\beta} \frac{I_{БН}}{I_{Б2}}, \quad (6.14)$$

при умові, що $\frac{I_{BH}}{I_{B2}} \ll 1$

Колекторна напруга зменшується від U_{KH} до $(U_{BX} - I_{KO}R_K)$. На тривалість стадії t_ϕ та t_c впливає бар'єрна ємність колекторного переходу C_K та ємність навантаження C_H . Для врахування їхнього впливу в формулах (6.12) та (6.14) необхідно замінити τ_β тр на τ'_β :

$$\tau'_\beta = \tau_\beta + R_K C_\Sigma, \text{ де } C_\Sigma = h_{21} C_K + C_H$$

Наведені співвідношення дозволяють розрахувати параметри елементів схеми ключа на біполярному транзисторі, що працює в режимах відсічки та насичення.

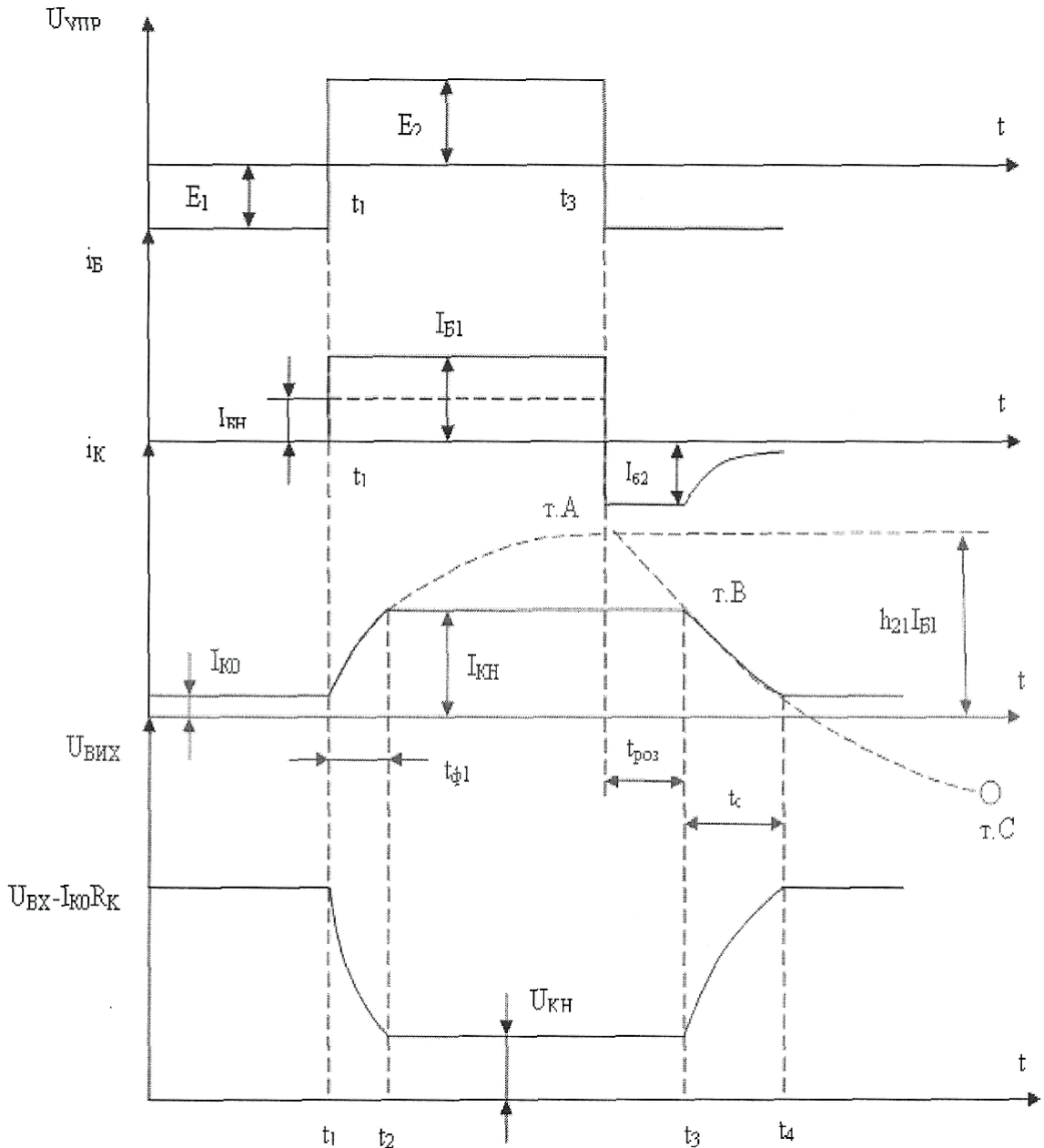


Рис.6.2. Перехідні процеси біполярного транзисторного ключа