

## Лекція 6. Ключові схеми управління електричними колами

Ключі в основному призначені для замикання та розмикання електричних кіл, а також для переключення струму з одного кола в інше. Ключі бувають аналоговими та дискретними.

1

### 6.1 Розгалужувальні з'єднання

Розгалужувальне з'єднання (РЗ) є аналоговим перемикачем і призначене для переключення струму з одного кола в інше, тобто є аналоговим ключем. Два діоди можуть бути з'єднанням послідовним (рис. 6.1 а), паралельним (рис. 6.1,б) та розгалужувальним (рис. 6.1 в).

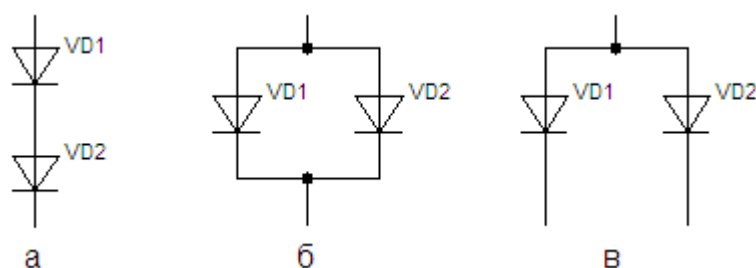


Рисунок 6.1 – З'єднання діодів: а – послідовне; б – паралельне; в - розгалужувальне

Розгалужувальне з'єднання (РЗ) є плавним перемикачем струму з одного кола VD1 в інше VD2 і навпаки (рис. 6.2). Для здійснення цього перемикання РЗ має живитися незмінним струмом  $I_0 = \text{const}$ .

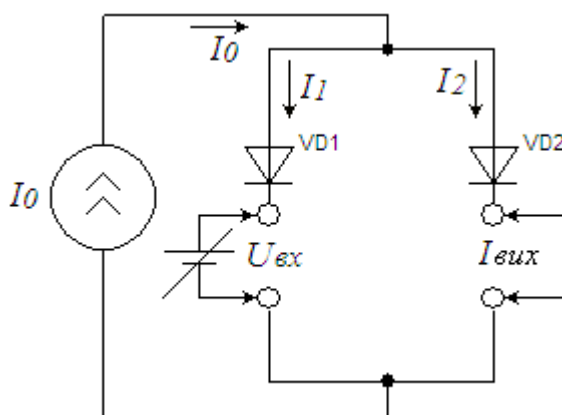


Рисунок 6.2 – Симетричне розгалужувальне з'єднання

Розгалужувальне з'єднання працює наступним чином.

За законом Кірхгофа сума струмів його кіл є величиною сталою:

$$I_1 + I_2 = I_0 = \text{const.} \quad (6.1)$$

У початковому стані ( $U_{\text{вх}} = 0$ ) струми кіл однакові

$$I_1 = I_2 = \frac{I_0}{2}. \quad (6.2)$$

За наявності вхідної напруги ( $U_{\text{вх}} > 0$ ) діод VD1 зміщується у зворотному напрямі, а VD2 - у прямому. Тому VD1 закривається, зменшуючи  $I_1$ , а VD2 відкривається, на стільки ж збільшуючи  $I_2$  (рис. 6.3). Якщо змінити полярність ( $U_{\text{вх}} < 0$ ), то діод VD1 буде під прямою напругою, а VD2 - під зворотною, через що  $I_1$  збільшується, а  $I_2$  зменшується. Так здійснюється переключення струму з одного кола в інше.

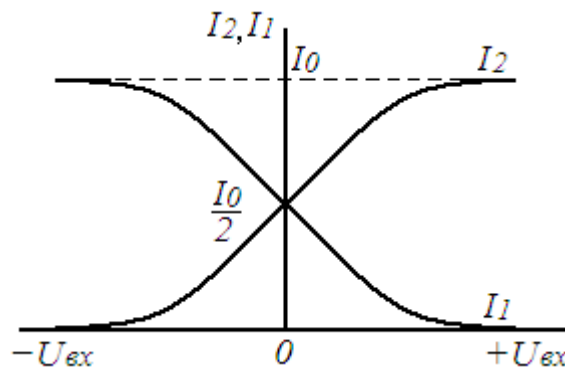


Рисунок 6.3 – ВАХ симетричного розгалужувального з'єднання

РЗ бувають симетричними (рис. 6.2) та несиметричними (рис. 6.4).

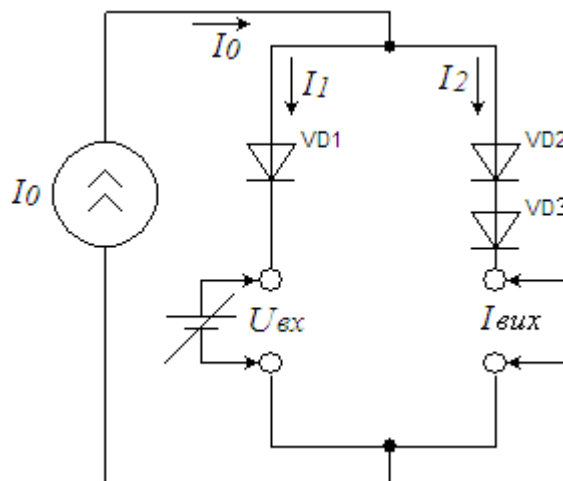


Рисунок 6.4 – Несиметричне розгалужувальне з'єднання

Несиметричність створює третій діод VD3. Через нього точка перекомутації  $I_0/2$  зсувається праворуч від напруги  $U_{вх} = 0$  (рис. 6.5). Зсув точки перекомутації  $I_0/2$  пояснюється тим, що доки  $U_{вх}$  не перевищить подвійну пряму напругу на двох діодах VD2 та VD3 ( $U_{вх} > 2U_{пр}$ ), діод VD1 і розгалужувальне з'єднання у цілому не керуються. Врешті несиметричне РЗ діє таким самим чином, як і симетричне.

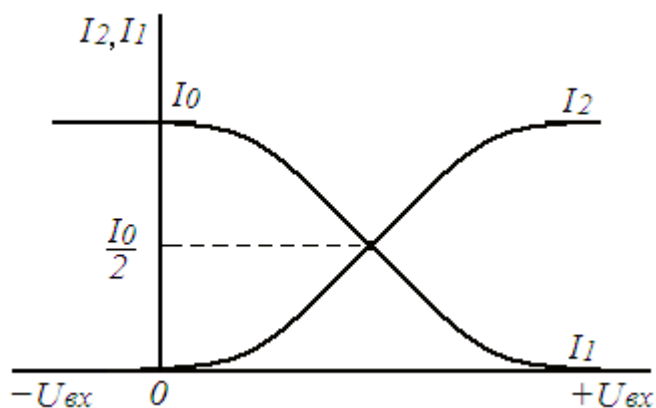


Рисунок 6.5 – ВАХ несиметричного розгалужувального з'єднання

З діаграм, які наведені на рисунку 6.6, видно, що симетричне РЗ сприймає скільки завгодно слабкий сигнал (рис. 6.6 а), бо за будь-якої амплітуди  $U_{мвх1}$  є змінення струмів  $\Delta I > 0$ , а несиметричне РЗ на ту ж саму амплітуду  $U_{мвх1}$  не реагує, тобто  $\Delta I = 0$  (рис. 6.6 б).

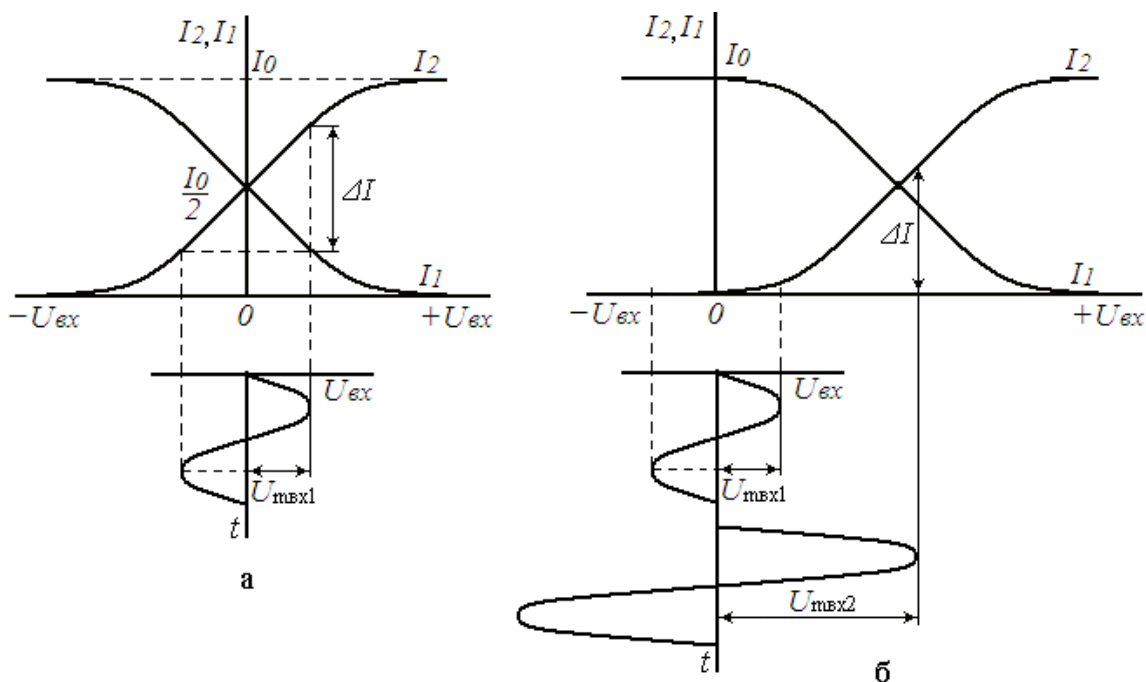


Рисунок 6.6 – Діаграми роботи розгалужувального з'єднання

Щоб з'явилося змінення струмів  $\Delta I > 0$ , необхідне збільшення амплітуди вхідної напруги до  $U_{\text{мвх}2}$ .

Таким чином, симетричне РЗ слід використовувати в аналогових схемах, зокрема в підсилювачах, де сигнали слабкі, а несиметричне - в цифрових схемах, де сигнали тільки сильні.

Оскільки несиметричне РЗ не сприймає малі напруги, то воно забезпечує досить високу завадостійкість цифрових схем.

## 6.2 Ключі на біполярних транзисторах

Ключі призначені для обробки цифрових сигналів.

Цифровий сигнал - дискретний або квантований, містить лише дискретні рівні.

Найбільш розповсюдженим є двійковий сигнал. Він складається лише з двох рівнів напруги, струму, частоти або фази, які кодуються символами "0" та "1". Найчастіше використовують двійкову напругу (рис. 6.7), де 0 - її низький рівень, який є логічним нулем "0", а 1 - високий рівень, який є логічною одиницею "1".

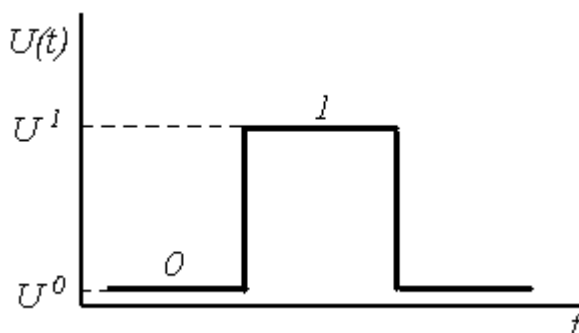


Рисунок 6.7 – Двійковий сигнал

Ці рівні обробляє транзисторний ключ в якому біполярний транзистор працює в ключовому режимі, який складається з режиму насичення та режиму відсікання.

У режимі насичення транзистор повністю відкритий, тобто пропускає колекторний струм, а в режимі відсікання транзистор повністю закритий, тобто колекторний струм практично відсутній.

Таким чином, транзистор у схемі ключа відіграє роль металевих контактів: у відкритому стані він замикає коло “колектор-емітер”, а у закритому стані розриває його.

Транзисторний ключ (рис. 6.8) є подільником напруги  $E_{KE}$ , верхнім плечем якого є опір резистора навантаження  $R_K$ , а нижнім - транзистор VT.

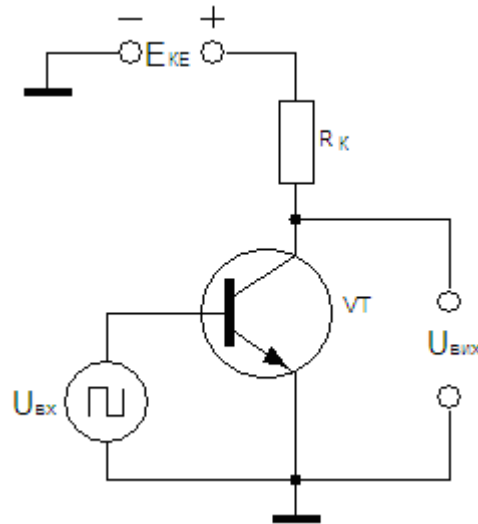


Рисунок 6.8 – Транзисторний ключ

Вихідна напруга ключа становить

$$U_{\text{вих}} = E_{KE} \frac{R_{VT}}{R_K + R_{VT}}, \quad (6.3)$$

де  $R_{VT}$  - опір ділянки колектор - емітер транзистора VT.

У відкритому стані транзистора VT його опір нехтовно малий:  $R_{VT} \ll R_K$ , через що з (6.3) одержуємо  $U_{\text{вих}} \approx 0$ . Така напруга є логічним нулем:

$$U^0 \approx 0. \quad (6.4)$$

У закритому стані транзистора VT його опір великий:  $R_{VT} \gg R_K$ , через що з (6.3) одержуємо  $U_{\text{вих}} \approx E_{KE}$ . Така напруга є логічною одиницею:

$$U^1 \approx E_K \quad (6.5)$$

Принципова схема ключа на біполярному транзисторі наведена на рисунку 6.9.

ДС (VT1) - джерело сигналу;

$U_{\text{вх}}$  та  $U_{\text{вих}}$  - відповідно вхідна та вихідна напруги;

$E_{KE}$  - напруга живлення;

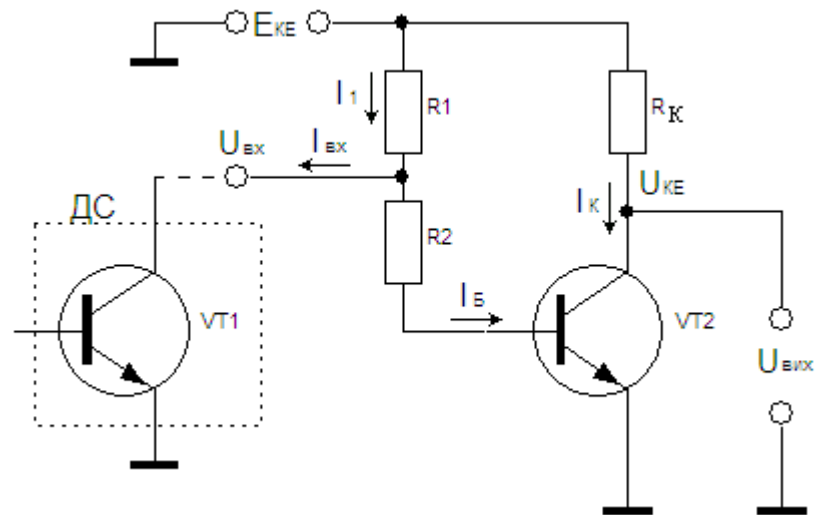


Рисунок 6.9 - Принципова схема транзисторного ключа

$I_{ВХ}$  - вхідний струм;

$I_{Б}$  та  $I_{К}$  - струми відповідно бази та колектора;

$R_{К}$  - опір навантаження;

$R_1$  та  $R_2$  - резистори в колі бази.

Джерелом сигналу ДС є транзистор VT1, який може знаходитись в одному з двох станів: або відкритому, або закритому. Він сумісно з резистором  $R_2$  створює несиметричне розгалужувальне з'єднання, причому  $R_2 \gg R_{VT}$ . Через це струм  $I_1$  може цілком відгалужуватись або в коло бази, створюючи струм  $I_{Б}$  і саме тим відкривати VT2, або у вхідне коло, створюючи  $I_{ВХ}$  і саме цим знеструмлюючи базу, тобто закривати VT2.

Щоб точніше виконувались співвідношення (6.4) та (6.5), транзистор ключа VT2 має працювати в ключовому режимі, який складається з режиму насичення РН та режиму відсікання РВ (рис. 6.10).

Критеріями режиму насичення є

$$U_{КЕ} < U_{БЕ}, \quad (6.6)$$

а режиму відсікання

$$I_{Б} < 0. \quad (6.7)$$

Знайдемо вихідну напругу VT2, яка за законом Кірхгофа становить

$$U_{ВЫХ} = E_{КЕ} - I_{К}R_{К}. \quad (6.8)$$

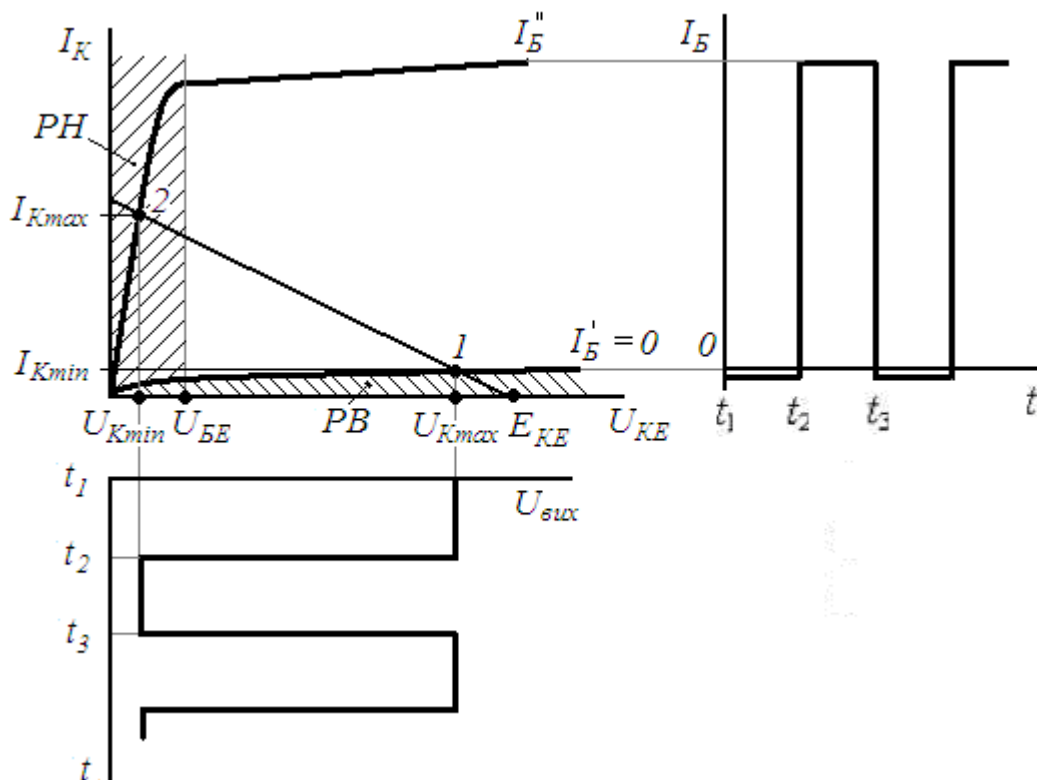


Рисунок 6.10 - Діаграма роботи транзисторного ключа

У початковому стані в інтервалі моментів  $t_1 < t < t_2$  транзистор VT1 (рис. 6.9) джерела сигналу ДС відкритий, через що  $U_{вх} = 0$ . Вхідний струм  $I_{вх}$  відгалужується в колектор VT1, і база VT2 знеструмлена (режим відсікання):  $I_B \approx 0$  (точка 1). Тому струм колектора  $I_K = \beta I_B$  також мінімальний  $I_{Kmin}$ . Підставляючи  $I_{Kmin}$  в (6.8), одержуємо

$$U_{KEmax} = E_{KE} - I_{Kmin} R_K \approx E_{KE}, \quad (6.9)$$

тобто при мінімальному (нульовому) струмі колектора  $I_{Kmin}$  падіння напруги  $I_{Kmin} R_K$  на опорі навантаження  $R_K$  мале і вихідна напруга максимальна (одична).

Коли VT1 закриється (інтервал моментів  $t_2 < t < t_3$ ), то вхідна напруга  $U_{вх}$  стане одичною. Вхідний струм  $I_{вх}$  не відгалужується, і база VT2 знаходиться під великим (одичним) струмом  $I_B$ , тобто в режимі насичення (точка 2). Тому струм колектора також великий  $I_{Kmax} \approx U_{KE}/R_K$ . Підставляючи останнє співвідношення в (6.8), одержуємо

$$U_{KEmin} = E_{KE} - I_{Kmax} R_K \approx 0, \quad (6.10)$$

тобто при максимальному (одичному) струмі колектора  $I_{Kmax}$  падіння на-

пруги  $I_{K\max}R_K$  на опорі навантаження  $R_K$  велике, і вихідна напруга мінімальна (нульова). Так на виході ключа створюються два рівні сигнали: нульовий і одиничний (з поворотом фази на  $180^\circ$ ).

В обох режимах (насичення та відсікання) потужність, яка розсіюється колектором, нехтовно мала:

$$P_{K\text{нас}} = I_{K\max} U_{K\min}, \quad (6.11)$$

$$P_{K\text{відс}} = I_{K\min} U_{K\max}. \quad (6.12)$$

У режимі насичення  $P_{K\text{нас}} \rightarrow 0$  через малу напругу колектора  $U_{K\min} < 0,7$  В, а в режимі відсікання  $P_{K\text{відс}} \rightarrow 0$  через малий струм  $I_{K\min} \rightarrow 0$ . Тому в ключовому режимі на колекторі розсіюється нехтовно мала потужність, через що ККД ключа великий і досягає 90 - 95%.

### 6.3 Насичення ключа

В режимі насичення вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  практично не залежить від амплітуди вхідного сигналу через те, що струм  $I_{K\max}$  не залежить від струму бази  $I_B$ . Дійсно, струми бази  $I_B (S>1)$  та  $I_B (S=1)$  створюють практично один і саме той струм колектора  $I_{K\max}$  (рис. 6.11).

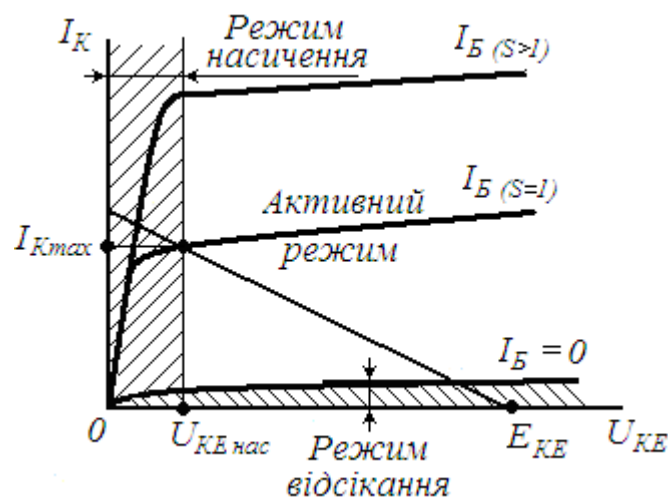


Рисунок 6.11 – Визначення коефіцієнта насичення

Змінення  $I_B$ , не викликаючи змін колекторного струму  $I_K$  та вихідної напруги  $U_{KE}$ , впливає на коефіцієнт насичення  $S$ , яким є відношення будь-



якого струму  $I_B$  до того струму бази  $I_{B(S=1)}$ , який розмежовує режими насичення, та активний:

$$S = \frac{I_B}{I_{B(S=1)}} \quad (6.13)$$

Знайдемо параметри, які визначають коефіцієнт насичення  $S$ , для чого виразимо  $I_{B(S=1)}$  через  $E_{KE}$  та  $R_K$ .

На резисторі  $R_K$  падає напруга  $E_{KE} - U_{Kнас}$ . Зважаючи на те, що  $U_{Kнас} \ll E_{KE}$ , а  $I_{Kmax} = \beta I_{B(S=1)}$ , маємо

$$S = \frac{\beta I_B R_K}{E_{KE}}. \quad (6.14)$$

При  $S < 1$  спостерігається активний режим, а при  $S > 1$  - режим насичення.

Чим більше струм бази  $I_B$ , тим вище коефіцієнт насичення  $S$ . Необхідний струм бази  $I_B$  забезпечується вибором опорів резисторів у колі бази  $R1$  та  $R2$  (рис. 6.9). Так, зменшення цих опорів підвищує  $I_B$  і саме тим збільшує  $S$ .

#### 6.4 Завадостійкість ключа

Коефіцієнт насичення  $S$  суттєво впливає на завадостійкість ключа, а саме: збільшення  $S$  підвищує завадостійкість. Це пояснює рисунок 6.12.

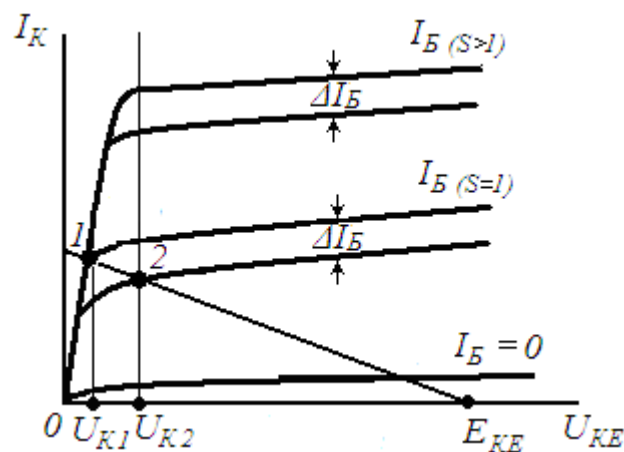


Рисунок 6.12 – Вплив насичення на завадостійкість ключа

Якщо струм бази становить  $I_B = I_{B(S=1)}$ , то коефіцієнт насичення  $S = 1$  і режим визначається точкою 1. Зменшення струму бази  $I_{B(S=1)}$  на  $\Delta I_B$  через дію

якоїсь завади виводить транзистор з режиму насичення в активний режим (точка 2). При цьому вихідна напруга ключа змінюється від  $U_{K1}$  до  $U_{K2}$ , тобто завада змінює вихідну напругу.

Коли ж струм бази  $I_B = I_{B(S>1)}$ , тобто  $S > 1$ , то зменшення струму  $I_{B(S>1)}$  на саме ту ж величину  $\Delta I_B$  не змінює місцеположення точки 1, через що вихідна напруга також не змінюється. Так, збільшення коефіцієнта насичення  $S$  підвищує завадостійкість ключа.

Проте не слід вважати, що підвищення  $S$  може бути нескінченним. Збільшення  $S$ , підвищує завадостійкість, але при цьому знижує швидкодію ключа. Тому вибір коефіцієнта насичення  $S$  має бути компромісним.

### 6.5 Швидкодія ключа

Оцінимо вплив коефіцієнта насичення  $S$  на тривалість перехідних процесів, тобто на швидкодію ключа.

На рисунку 6.13 наведена часова діаграма роботи транзисторного ключа, з якої видно наступне.

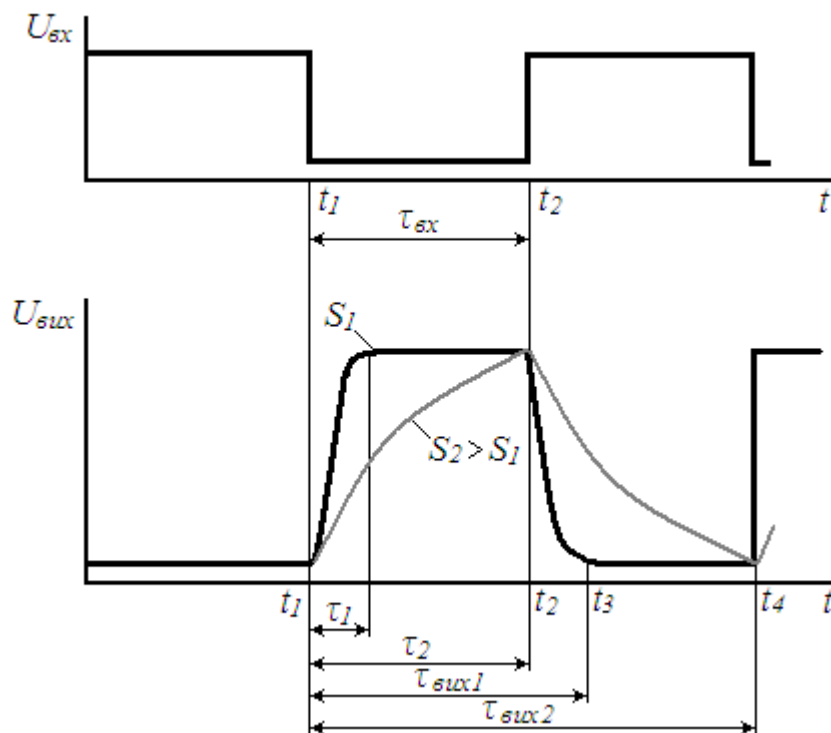


Рисунок 6.13 - Часова діаграма роботи транзисторного ключа

Якщо вхідний імпульс  $U_{\text{вх}}$  має нескінченно стрімкі фронти (їхня тривалість наближається до нуля), то в залежності від коефіцієнта насичення  $S$  тривалість фронтів вихідного імпульсу  $U_{\text{вих}}$  досягає  $\tau_1$  при  $S_1$  та  $\tau_2 > \tau_1$  при  $S_2 > S_1$ . Так підвищення насичення ключа затулює фронти, тобто знижує швидкодію.

11

Це пояснюється тим, що до моменту  $t_1$  рівень  $U_{\text{вх}}$  був високим, транзистор - відкритим і в його базі накопичились рухомі носії заряду. У момент  $t_1$  з поданням низького рівня  $U_{\text{вх}}$  транзистор мав закритися, але це станеться лише через час  $\tau_1$ , коли накопичений заряд зникне. Якщо коефіцієнт насичення збільшити до  $S_2$ , то концентрація накопичених зарядів у базі зросте і тому тривалість фронту затулюється аж до  $\tau_2$ .

У момент  $t_2$  рівень  $U_{\text{вх}}$  змінюється на високий і транзистор мав відкритися, але це станеться пізніше в момент  $t_3$  при  $S_1$ , або в момент  $t_4$  при  $S_2$ , коли в базі накопичаться рухомі носії заряду.

Отже, при тривалості  $\tau_{\text{вх}}$  вхідного імпульсу  $U_{\text{вх}}$ , вихідний імпульс  $U_{\text{вих}}$  розтягується до  $\tau_{\text{вих1}}$  при  $S = S_1$  і до  $\tau_{\text{вих2}}$  при  $S = S_2$ . Доки не зникне даний імпульс на виході, наступного вхідного імпульсу подавати не можна, тобто швидкодія ключа зменшується.

Таким чином, незважаючи на те, що збільшення коефіцієнта насичення підвищує завадостійкість, глибина насичення  $S$  має бути обмежена, бо стримує швидкодію. Тому на практиці  $S$  не перевищує 10.

## 6.6 Недоліки ключа на біполярному транзисторі

Першим недоліком є те, що біполярний транзистор ніколи не закривається до кінця. Через колекторний перехід закритого транзистора завжди протікає його тепловий струм  $\beta I_{\text{КБ0}}$ , який створює на опорі навантаження падіння напруги  $\beta I_{\text{КБ0}} R_{\text{К}}$ , через що вихідна одинична напруга  $U_{\text{Кмак}}$  не досягає напруги живлення  $E_{\text{КЕ}}$  на цю величину (рис. 6.10).

Другий недолік полягає в тому, що база і колектор мають гальванічний зв'язок через наявність струму  $\beta I_{\text{КБ0}}$ . Цей зв'язок зумовлює проникнення час-

тки вхідної напруги до виходу, що в прецизійних ключах викликає похибку.

Згаданих недоліків позбавлені ключі на польових транзисторах.

### 6.7 Ключі на польових транзисторах

Ключі на польових транзисторах, як і на біполярних, призначені для обробки цифрових сигналів. Ключ на польовому транзисторі, як і на біполярному, є подільником напруги, у верхньому плечі якого опір навантаження  $R_C$ , а в нижньому - транзистор VT (рис. 6.14).

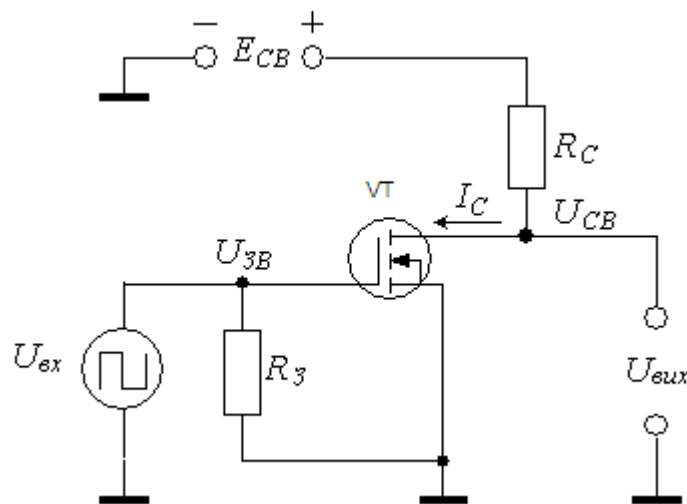


Рисунок 6.14 – Схема ключа на польовому транзисторі

$U_{вх}$  та  $U_{вих}$  - відповідно вхідна та вихідна напруги;

VT - польовий транзистор;

$E_{CB}$  - напруга живлення;

$U_{зв}$  - напруга “затвор-витік”;

$U_{св}$  - напруга “стік-витік”;

$I_C$  - струм стоку;

$R_C$  - опір навантаження;

$R_3$  - резистор у колі затвору.

Щоб уникнути недоліків за п. 6.6, транзистор VT вибирають з ізольованим затвором для гальванічної розв’язки між затвором та стоком.

Ключ на польовому транзисторі працює наступним чином.

Знайдемо вихідну напругу, яка за законом Кірхгофа становить

$$U_{\text{вих}} = E_{\text{СВ}} - I_{\text{С}}R_{\text{С}}. \quad (6.15)$$

З діаграми роботи ключа (рис. 6.15) видно наступне.

У початковому стані в інтервалі моментів  $t_0 - t_1$  вхідна напруга дорівнює нулю  $U_{\text{вх}} = 0$ , через що напруга затвору також нульова  $U_{\text{ЗВ}} = 0$ . Транзистор VT закритий, струм стоку відсутній. Підставляючи  $I_{\text{С}} = 0$  в (6.15), одержуємо  $U_{\text{вих}} = E_{\text{СВ}}$ .

Якщо вхідна напруга нульова, то вихідна напруга максимальна  $U_{\text{СВmax}}$  (точка 1), падіння напруги  $I_{\text{С}}R_{\text{С}}$  на опорі навантаження  $R_{\text{С}}$  дорівнює нулю.

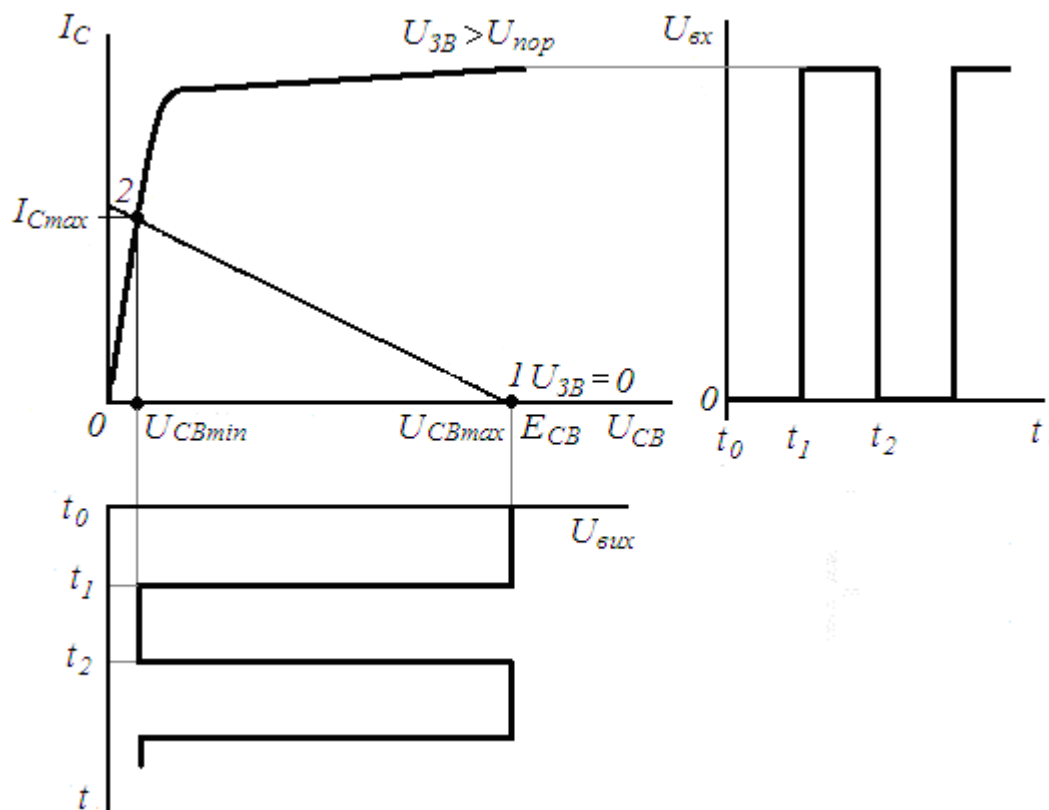


Рисунок 6.15 – Діаграма роботи ключа на польовому транзисторі

В інтервалі моментів  $t_1 - t_2$  вхідна напруга одинична і, якщо вона більше порога  $U_{\text{пор}}$ , то напруга затвору також перевищує поріг:  $U_{\text{ЗВ}} > U_{\text{пор}}$ , через що транзистор відкривається і з'являється максимальний струм стоку

$$I_{\text{Сmax}} \approx \frac{E_{\text{СВ}}}{R_{\text{С}}}.$$

Підставляючи останнє співвідношення в (6.15), одержуємо

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{СВmin}} = E_{\text{СВ}} - I_{\text{Сmax}}R_{\text{С}} \approx 0, \quad (6.16)$$

при одиничній вхідній напрузі струм стоку максимальний, через що падіння напруги  $I_{Cmax}R_C$  на опорі навантаження  $R_C$  велике, і вихідна напруга мінімальна (практично нульова).

На виході ключа створюються два рівня сигналу: одиничний і нульовий з поворотом фази на  $180^\circ$ .

У ключовому режимі на польовому транзисторі, як і на біполярному, розсіюється нехтовно мала енергія  $P_C = U_{CB}I_C$ . Коли струм  $I_{Cmax}$ , то напруга стоку мінімальна  $U_{CBmin}$ . Коли ж напруга стоку максимальна, то струм стоку  $I_C = 0$ .

МОН-транзистор має бути з індукованим каналом. Це пояснює його ВАХ прямого передавання (рис. 6.16), з якої видно, що напруга затвору  $U_{ЗВ}$  має поріг  $U_{пор}$ . Цей поріг забезпечує підвищену завадостійкість, так як напруга завади, яка менша за  $U_{пор}$ , не відкриває транзистор і не сприймається ключем.

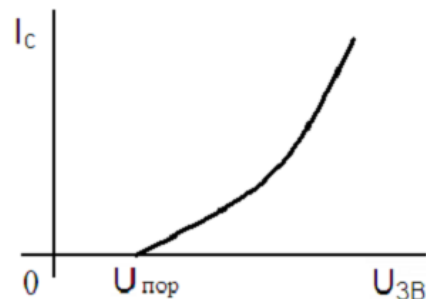


Рисунок 6.16 – ВАХ МОН-транзистора

Швидкодія ключа обмежується тривалістю перехідних процесів, які зумовлені міжелектродними ємностями та часом індукування (створення та усунення) каналу. Через це форма імпульсів має ті ж самі спотворення, що й в ключах на БТ, але час включення  $t_{вкл}$  та виключення  $t_{викл}$  (рис. 6.17) для МОН-транзисторів менші, бо немає накопичення носіїв заряду, як у базі БТ. Тому швидкодія ключів на МОН-транзисторах вища.

Переваги ключів на МОН-транзисторах:

- високий (практично нескінченний) вхідний опір не навантажує джерело сигналу;

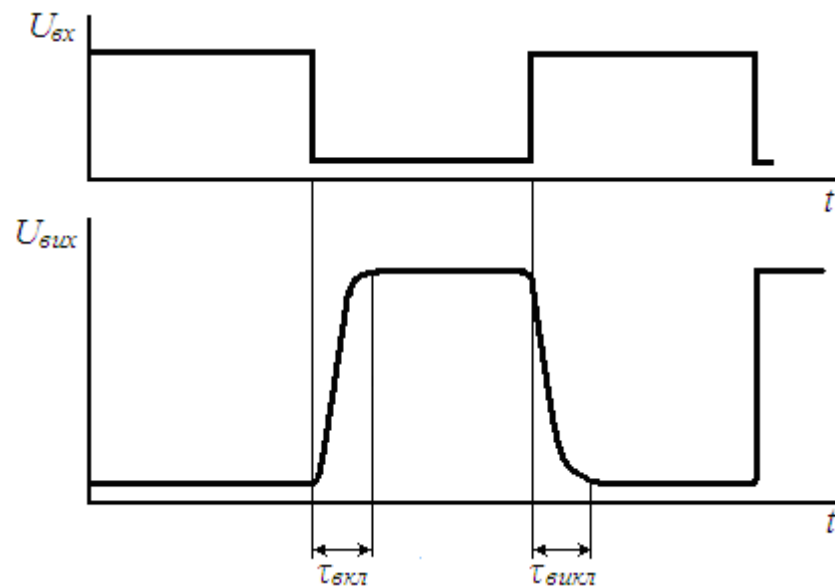


Рисунок 6.17 – Часова діаграма ключа на МОН-транзисторі

- повна гальванічна розв'язка вхідного та вихідного кіл;
- висока швидкодія через відсутність накопичування зарядів;
- висока економічність через можливість використання багатоомних опорів  $R_C$ ;
- простота через відсутність живлення вхідного кола (затвору).

Ці переваги забезпечили найширше розповсюдження ключів на МОН-транзисторах з індукованим каналом.

## 6.8 Ключі на тиристорах

Тиристор, умовне позначення якого наведене на рисунку 6.18 а, призначений для включення опору навантаження під напругу, коли вона досягне завданого порогу.

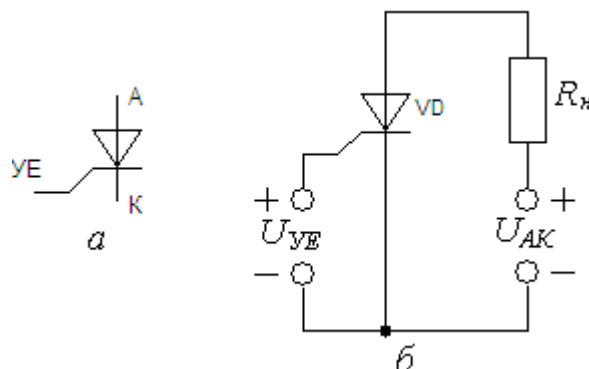


Рисунок 6.18 – Тиристор: а – умовне позначення; б – схема включення

Тиристри бувають двохелектродними, трьохелектродними та чотириелектродними. Найбільшого розповсюдження набули трьохелектродні тиристри. Трьохелектродний тиристор має три електроди: анод А, катод К та управляючий електрод.

Умовне позначення на основі діода вказує на те, що тиристор має вентильні властивості, тобто односторонню провідність і за своєю функцією є діодом.

Управляючий електрод визначає порогову напругу анода, під якою тиристор починає проводити струм. Отже, тиристор є керованим діодом.

Тиристри використовуються в керованих випрямлячах для регулювання випрямленої напруги, а також в інших регуляторах.

Розглянемо роботу ключа на тиристрі, схема якого наведена на рисунку 5.18 6. Робота ключа полягає в тому, що опір навантаження  $R_H$  включається під напругу  $U_{AK}$ , коли вона досягне заданого порогу.

Схема ключа з розгорненою структурою тиристора під напругою наведена на рисунку 6.19.

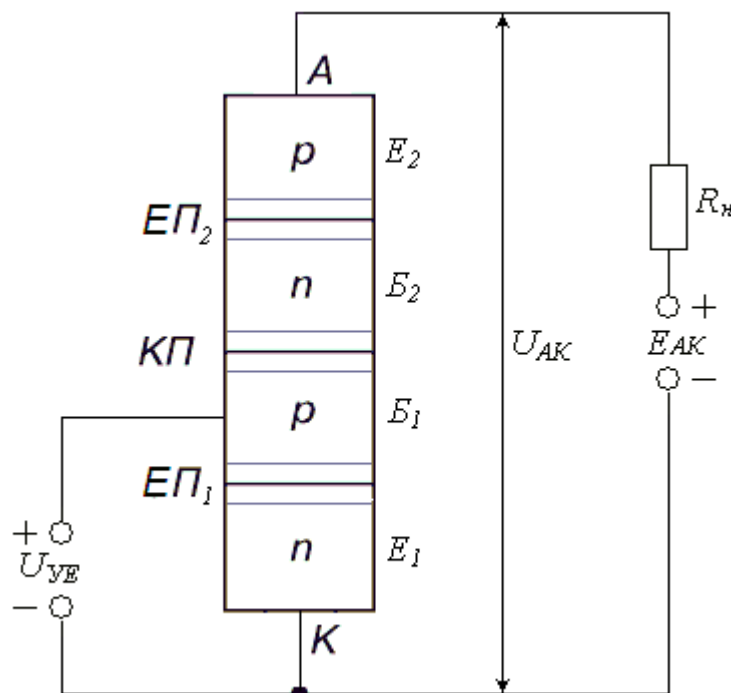


Рисунок 6.19 – Тиристор під напругами



Тиристор є чотиришаровою структурою р-п-р-п.

Крайні шари  $E_1$  та  $E_2$  називаються емітерами. Внутрішні шари  $B_1$  та  $B_2$  називаються базами. Між емітерами та базами створюються емітерні переходи  $EP_1$  та  $EP_2$ , а між базами створюється колекторний перехід  $KP$ . Ця термінологія зумовлена тим, що шари п-р-п та р-п-р створюють відповідні транзистори.

Структура тиристора (рис. 6.19) та його ВАХ (рис. 6.20) пояснюють функцію тиристорного ключа, яка полягає в тому, що навантаження  $R_H$  включається під напругу  $E_{AK}$ , коли вона досягне заданого порогу  $U_{вкл}$ .

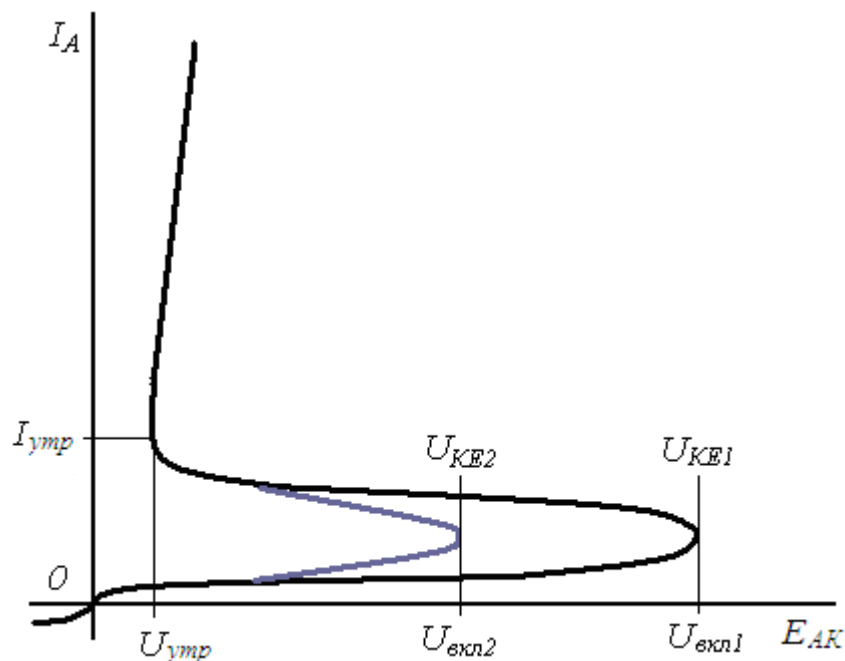


Рисунок 6.20 – ВАХ тиристора

Для розглядання принципу дії тиристора представимо його чотирьохшарову структуру р-п-р-п у вигляді двох послідовно з'єднаних транзисторів р-п-р та п-р-п (рис. 6.21).

З рисунка 6.21 б та рисунка 6.21в видно, що п-колектор транзистора  $VT1$  підключений до п-бази  $VT2$ , а р-колектор  $VT2$  з'єднаний з р- базою  $VT1$ , тобто вихід одного транзистора з'єднаний з входом іншого. Таке з'єднання створює додатний зворотний зв'язок між еквівалентними підсилювачами на транзисторах  $VT1$  та  $VT2$ .

Розглянемо принцип дії ключа, який полягає в тому, що навантаження

$R_H$  включається під напругу живлення  $E_{AK}$ , коли вона досягне заданого порогу.

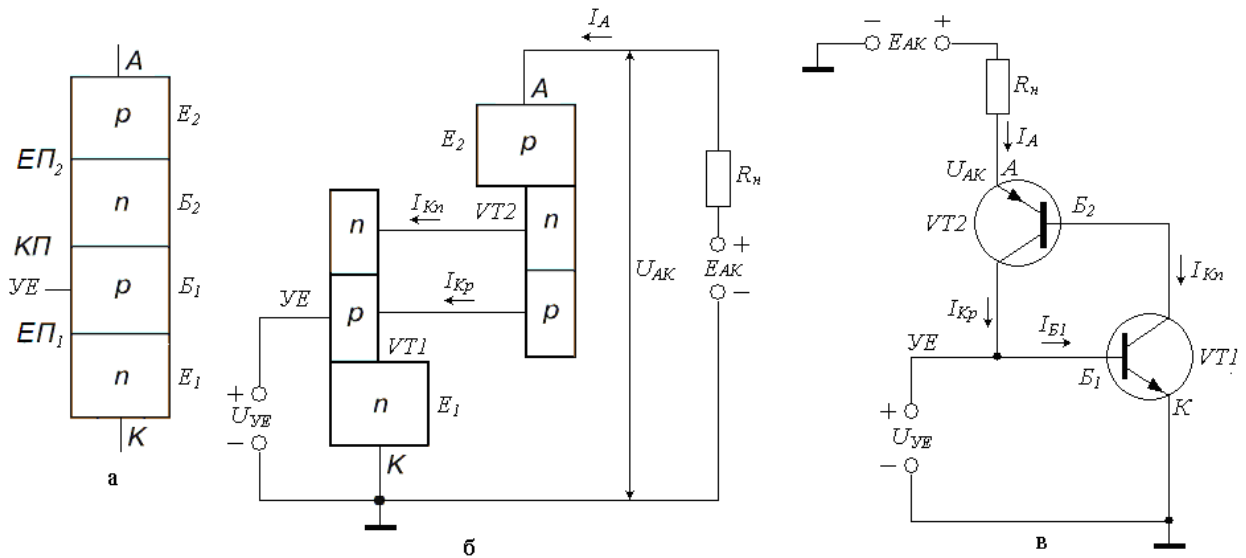


Рисунок 6.21 – Тиристор: а – фізична структура; б – еквівалентна структура; в – еквівалентна схема

Це здійснюється наступним чином.

За законом Кірхгофа для вихідного кола маємо

$$E_{AK} = U_{AK} + I_A R_H,$$

звідки напруга на опорі навантаження  $R_H$  становить

$$I_A R_H = E_{AK} - U_{AK}. \quad (6.17)$$

Емітерні переходи  $EP_1$  та  $EP_2$  знаходяться під прямими напругами, а колекторний перехід  $KP$  – під зворотною напругою.

У початковому стані за малої напруги  $E_{AK} < U_{вкл}$  вона майже повністю прикладена до  $KP$  і лише невеликою частиною - до  $EP_1$  та  $EP_2$ . Тому тиристор закритий:  $I_A = 0$ , через що  $I_A R_H = 0$ , тобто опір навантаження  $R_H$  знеструмлений, бо вся підведена напруга  $E_{AK}$  падає на колекторному переході:

$$E_{AK} = U_{AK}.$$

При підвищенні  $E_{AK}$  до  $U_{вкл1}$  (рис. 6.20) збільшуються прямі напруги на  $EP_1$  та  $EP_2$ , зменшуючи на них потенційні бар'єри. При певному зростанні прямої напруги, наприклад, на  $EP_1$ , з'являється струм бази  $I_{B1}$  (рис. 6.21 в). Він, підсилюючись транзистором  $VT1$  у  $\beta$  разів, створює колекторний струм

$I_{Кн} = \beta I_{Б1}$ , який є струмом бази  $B_2$  транзистора VT2. Струм  $I_{Кн}$ , підсилюючись транзистором VT2 також у  $\beta$  разів, створює колекторний струм  $I_{Кр} = \beta I_{Кн}$ , який є струмом бази  $B_1$  транзистора VT1, який знову підсилює його у  $\beta$  разів і т.д. З'являється анодний струм  $I_A = I_{Кн} + I_{Кр}$ , який, завдяки додатному зворотному зв'язку, сам себе підтримує.

19

Як тільки з'явиться анодний струм  $I_A = I_{Кн} + I_{Кр}$ , у колекторному переході відбувається ударна іонізація власних атомів, за якої колекторний перехід КП насичується рухомими носіями заряду, через що напруга на ньому зменшується. Тиристор переходить з режиму включення  $U_{вкл1}$  до режиму утримання, за якого  $U_{AK} \ll E_{AK}$ . Підставляючи останнє співвідношення в (6.17), одержуємо  $I_A R_H = E_{AK}$ , тобто практично вся напруга живлення  $E_{AK}$  прикладена до навантаження  $R_H$ . Так здійснюється включення навантаження  $R_H$  під напругу  $E_{AK}$ .

Для включення тиристора треба зменшити потенційний бар'єр хоча б на одному з емітерних переходів. Це здійснює напруга  $U_{УЕ}$  управляючого електрода УЕ. Напруга  $U_{УЕ}$  є прямою для ЕП<sub>1</sub> і тому чим вона більше, тим менше напруга включення  $U_{вкл}$  (рис. 6.20).

Таким чином, управляючий електрод призначений для устанавлення порогу включення тиристора. Управляти анодним струмом  $I_A$  він не може, бо після включення тиристора управляючий електрод втрачає свою дію і його напруга  $U_{УЕ}$  не впливає на анодний струм  $I_A$ . Тому, щоб виключити тиристор, треба зняти напруги управляючого електрода ( $U_{УЕ} = 0$ ) та анода ( $E_{AK} = 0$ ).

Для автоматичного виключення тиристора напруга  $E_{AK}$  має бути пульсуючою (рис. 6.22).



Рисунок 6.21 – Форма напруги живлення для автоматичного виключення тиристора

Тиристор включається, коли напруга  $E_{AK}$  досягне порога включення ( $E_{AK} > U_{вкл}$ ), а виключається, коли напруга живлення  $E_{AK}$  спаде до нуля:  $E_{AK} = 0$  в моменти  $t_0, t_1, t_2, \dots$ , якщо  $U_{KE} = 0$ .