

Паралельний обмежувач на діодах *знизу* на приблизно нульовому рівні відрізняється напрямом підключення діода, а для обмеження на довільних рівнях схеми доповнюються джерелами напруги $U_{оп}$, полярність яких вибирають так, щоб діоди були закриті при $E_{вх} = 0$.

4 ТРАНЗИСТОРНІ НАСИЧЕНІ КЛЮЧІ

4.1 Призначення транзисторних ключів

Електронні ключі (ЕК) використовують в імпульсній техніці і цифровій техніці для комутації сигналів в різних електричних колах. Найчастіше ключові схеми виконують на транзисторах, діодах або тиристорах. Розрізняють два види ключів:

- транзисторні насичені ключі;
- аналогові ключі.

Для передачі або відключення аналогових сигналів в радіоелектронній апаратурі застосовують електронні аналогові ключі, які при подачі сигналу управління (найчастіше, це логічна одиниця) переходять в замкнутий або розімкнений стан. При замиканні ключа його внутрішній опір зменшується до значень $R_{замкн.} = 300 \dots 0,3$ Ом в ключах на біполярних транзисторах (БТ) і до значень $0,0003$ Ом в кращих ключах на польових транзисторах (ПТ). При цьому, в закритому стані вони мають опір близько $R_{розімкн.} = 50 \dots 500$ кОм для діодних ключів і ключів на БТ, і від 1 до 10 МОм для ключів на ПТ. У кращих ключах на ПТ з ізольованим затвором опір розімкненого ключа може досягати 10^{12} Ом при використанні транзисторів з ізольованим затвором.

Транзисторні насичені ключі використовуються для формування імпульсних сигналів різної амплітуди, для перетворення рівнів імпульсних сигналів і управління різними пристроями (наприклад, електромагнітними реле або світлодіодними індикаторами).

4.2 Лінійні моделі транзисторів в режимі великого сигналу

На відміну від режиму малого сигналу, де відхилення від робочої точки за постійним струмом не перевищує 20...30%, у режимі великого сигналу транзистор переходить із зони відсічення через активну область у режимі насичення та навпаки. Як правило, в імпульсній техніці транзистор працює в двох протилежних станах: у режимі відсічення (транзистор закритий) і в режимі насичення (транзистор відкритий і насичений). Коефіцієнт передачі транзистора в цих режимах менше одиниці, тобто він не має підсилювальних властивостей.

Крім того, при переключенні з одного режиму в другий та навпаки транзистор знаходиться в активному режимі, час переключення складає одиниці мікросекунд. У перехідному (активному) режимі коефіцієнт передачі транзистора набагато більше одиниці. У режимі великого сигналу характеристики транзистора нелінійні і принцип накладення не може бути застосований.

Для аналізу схем із транзисторами, що працюють у режимах великого сигналу, застосовують методи аналізу нелінійних схем. В інженерній практиці знайшов широке застосування метод апроксимації нелінійної ВАХ **кусочно-лінійними функціями**.

Сутність методу: для окремих областей (відсічення, насичення, перехідна область) виконується апроксимація нелінійних ВАХ кусочно-лінійними функціями. У кожній області, на основі апроксимуючих функцій, ВАХ представляються рядом Тейлора. На основі обговореної лінійної апроксимації всіма похідними, починаючи з другої, можна зневажити (ряд обмежить двома доданками $a + b \cdot x$), постійну складову необхідно враховувати.

На підставі отриманих рівнянь для кожної з областей, з урахуванням постійних складових, синтезують електричну модель транзистора. При цьому моделі виходять лінійними, для всіх трьох областей, однак різні. Широко застосовують моделі транзисторів у системі h -параметрів.

Розглянемо апроксимацію вхідних і вихідних характеристик біполярного

транзистора (схема з СЕ) і польового транзистора (з індукованим каналом). На рис.4. 1 представлені вихідні характеристики біполярного транзистора.

Область відсічення (1) розташована між характеристиками $I_{\bar{b}} = 0$ і $I_{\bar{b}} = -I_{к0}$ з відповідними значеннями струмів колектора $I_{к поч}$ і $I_{к0}$. Область насичення (3) відповідає мінімальним значенням напруги U_{KE} . Опір транзистора в режимі насичення $R_{KE нас}$ визначається тангенсом кута нахилу лінії 3, тобто $tg\beta$. Між ними знаходиться область активного режиму – 2. На вхідних характеристиках транзистора (рис. 4.2) також зазначені ці три основні області.

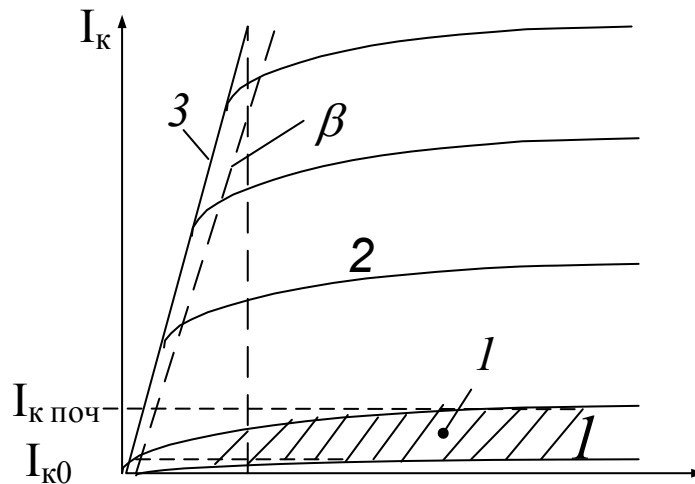


Рис. 4.1. Вихідні характеристики біполярного транзистора

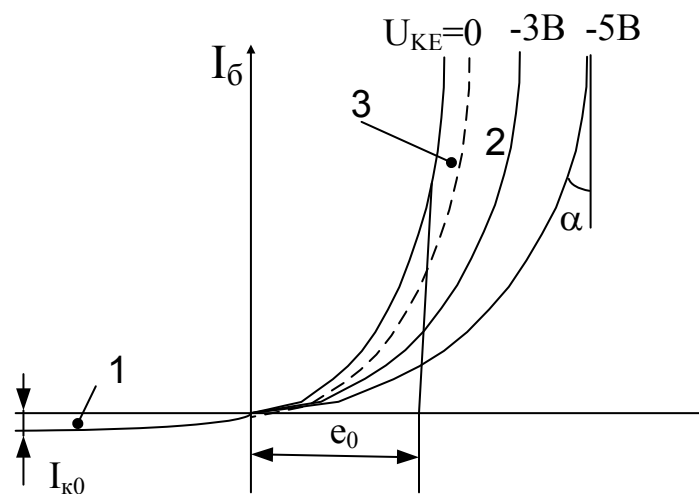


Рис. 4.2. Вхідні характеристики біполярного транзистора

Лінійна апроксимація вхідних і вихідних характеристик біполярного транзистора з указівкою характерних областей наведена на рис. 4.3.

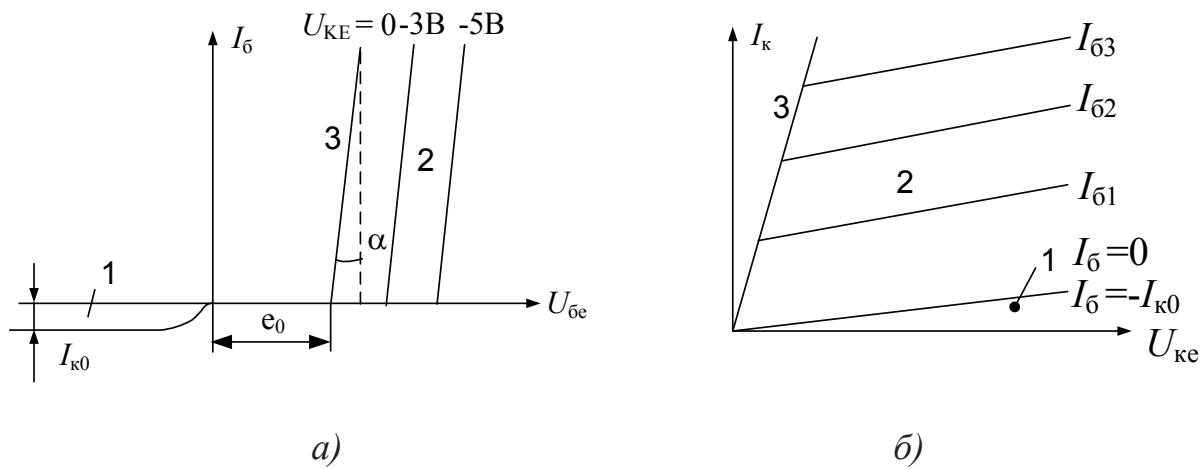


Рис. 4.3. Апроксимація вхідних (а) і вихідних (б) характеристик біполярного транзистора

Характеристики польового транзистора з індукованим каналом, аналогічні розглянутим і їх апроксимація для трьох областей (рис. 4.4) аналогічна.

Установимо значення струмів колектора для транзисторів, що знаходяться в області відсічення. Для схеми з спільною базою при $I_E = 0$ між базою і колектором протікає зворотний (тепловий) струм величиною $I_{\text{к0}}$ (рис. 4.5,а). Для схеми з спільним емітером для забезпечення $I_{\text{б}} = 0$ необхідно через перехід емітер-база пропускати струм $I_{\text{к0}}$ (рис. 4.5,б). При цьому струм колектора буде $I_{\text{к поч}} = I_{\text{к0}} \cdot h_{21E}$, тобто в h_{21E} разів більше, ніж для схеми з спільною базою. Зменшити струм $I_{\text{к поч}}$ до величини $I_{\text{к0}}$ можна шляхом запирання транзистора потенціалом відсічення на базу, пропускаючи струм з бази в емітер величиною $I_{\text{к0}}$, у результаті чого $I_E = 0$, а $I_{\text{к}} = I_{\text{к0}}$ (рис. 4.5, в).

Електрична модель транзистора для області активного режиму (2) була розглянута вище.

Модель транзистора в області відсічення ($I_E = 0$), що забезпечується подачею позитивного потенціалу на базу відносно емітера (спільної шини) має вигляд, представлений на рис. 4.6.

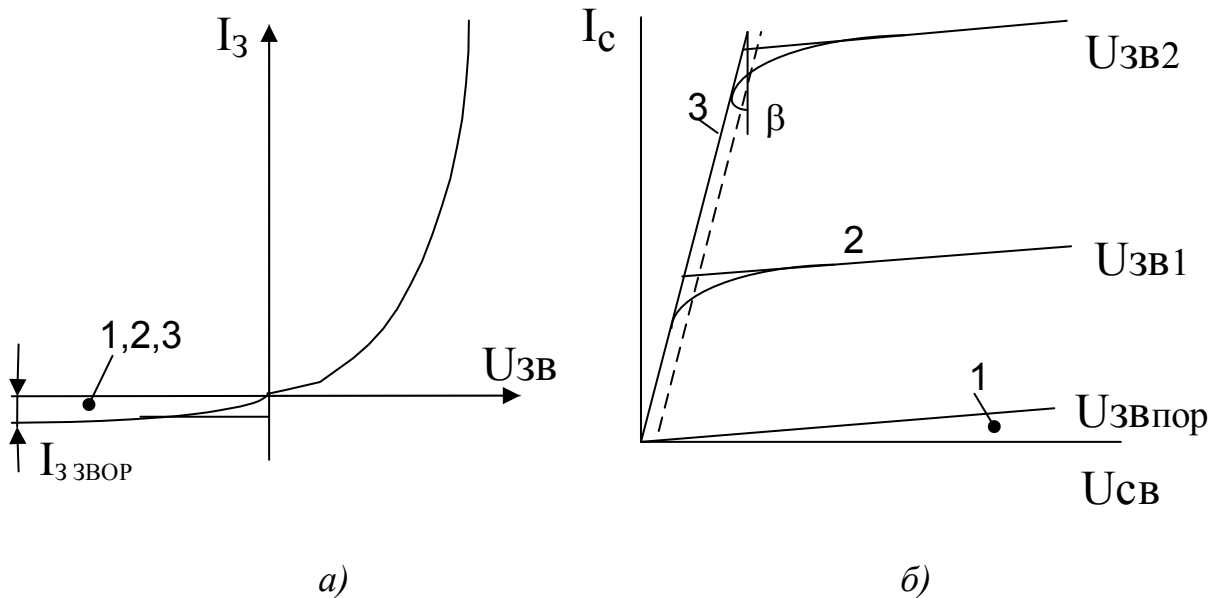


Рис. 4.4. Вхідні (а) і вихідні (б) характеристики польового транзистора з індукованим каналом

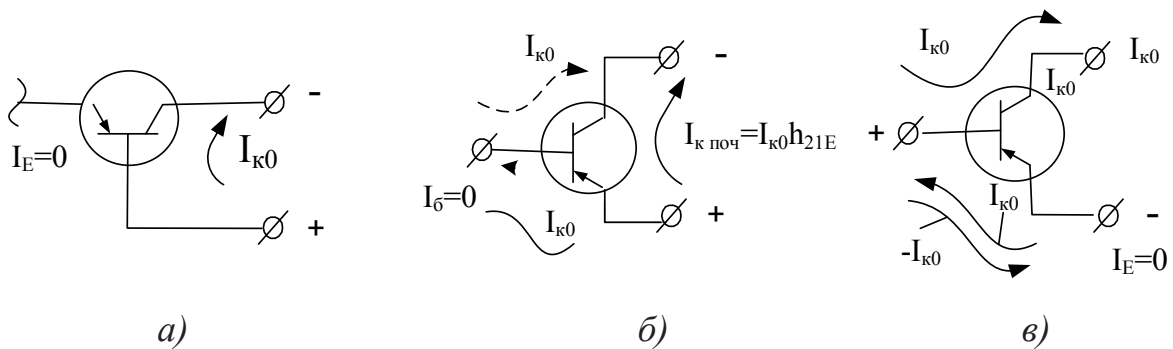


Рис. 4.5. Струми колекторів в області відсічення

Для області насичення (3), модель транзистора має вигляд (рис. 4.7), де e_0 визначається при апроксимації вхідної характеристики. При цьому $e_0 = U_{BE\text{ нас}} \approx 0,2 \div 0,5B$, $h_{11E} = tg\alpha$ (рис.3.31), $R_{к\text{ нас}} = tg\beta$ (рис. 4.1).

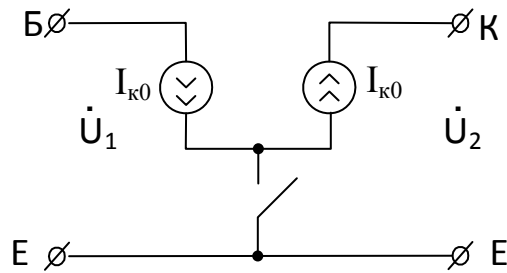


Рис. 4.6. Електрична модель транзистора для області відсікання (1)

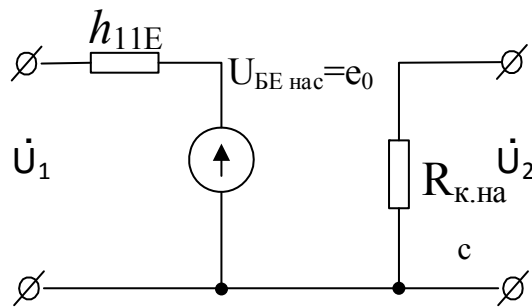


Рис. 4.7. Електрична модель транзистора в області насичення (3)

Модель транзистора в області відсікання являє собою розрив емітера відносно до базово-колекторного проміжку, через який протікає струм $I_{к0}$. Для цього режиму необхідно подати на базу транзистора потенціал відсічення відносно емітера.

Модель транзистора в режимі насичення являє собою практично замкнуті електроди – база, колектор і емітер, тому що $R_{к нас} \approx (1 \div 10) \text{ Ом}$; $e_0 \approx (0,2 \div 0,5) \text{ В}$; $h_{11E} \approx (10 \div 100) \text{ Ом}$. Для забезпечення режиму насичення транзистора необхідно подати струм у базу, який перевищує струм бази насичення.

4.3 Розрахунки параметрів транзисторних ключів

Розглянемо методику розрахунку ключа в режимі насичення. Принципова схема ключа наведена на рис. 4.8. Для насичення ключа (рис. 4.8,а) необхідні позитивні вхідні імпульси визначеної амплітуди. У результаті розрахунків потрібно одержати

ти: тип транзистора, E_K , R_K , $R_B(E_I)$. Для негативних вхідних імпульсів застосовують транзистори типу p-n-p (рис. 4.8,б).

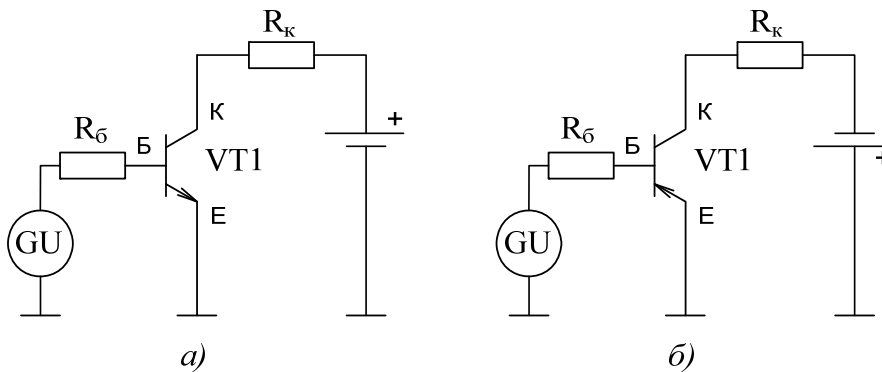


Рис. 4.8. Схеми включення біполярних транзисторів n-p-n (а) та p-n-p (б) провідності

Розрахунок схеми за постійним струмом традиційний, однак враховується вхідна характеристика транзистора в режимі насичення ($U_{KE} \approx 0$).

$$\begin{cases} E_K = U_{KE \text{ нас}} + I_K \cdot R_K; \\ U_{KE \text{ нас}} = I_K \cdot R_{K \text{ нас}}. \end{cases}$$

Навантажувальна лінія (1) будується по двох точках (Х.Х і К.З.) (рис.4.9).

$$\text{Х.Х.: } I_K = 0, U_{KE} = E_K.$$

$$\text{К.З.: } U_{KE} = 0, I_{К.З.} = \frac{E_K}{R_K}.$$

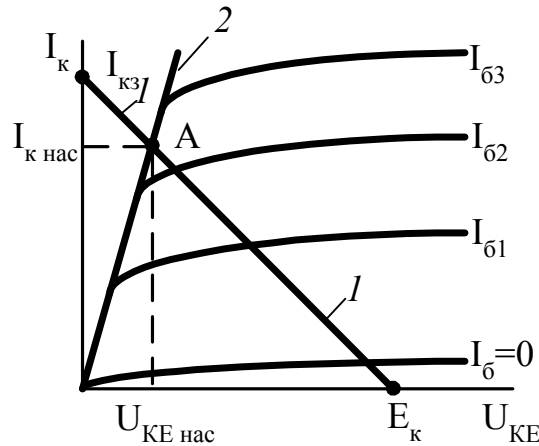


Рис. 4.9. Розрахунок ключа за постійним струмом

Перетинання навантажувальної прямої (1) з лінією насичення (2) – точка "А", що визначає режим насичення і його параметри $I_{K нас}$, $U_{KE нас}$ і $I_{B нас}$, у даному випадку це I_{B_3} (рис. 4.9). При проектуванні ключів струм колектора в режимі насичення звичайно заданий, що визначає вибір типу транзистора по припустимому струмі і положенню точки "А" (значить і струму $I_{к.з.}$). За значенням цього струму розраховують резистор R_K із формули $R_K = \frac{E_K}{I_{к.з.}}$.

Для розрахунку резистора $R_{б}$ скористаємося вхідною характеристикою транзистора в режимі насичення ($U_{KE} \approx 0$). Струм бази, зумовлений E_I і резистором $R_{б}$ повинний бути: $I_{б} \geq I_{б_3}$. Установимо положення точки "А" на вхідній характеристиці за значенням струму бази в точці "А" на вихідних характеристиках $I_{б_3}$ (рис. 4.10). Якщо E_I задано, то навантажувальна лінія до вхідних характеристик повинна перейти з точки Х.Х. (E_I) через точку "А" і визначити значення струму К.З. ($I_{б к.з.}$). Оскільки струм $I_{б к.з.} = E_I / R_{б}$, то звідси можна визначити значення резистора $R_{б}$ у вигляді $R_{б} = E_I / I_{б к.з.}$.

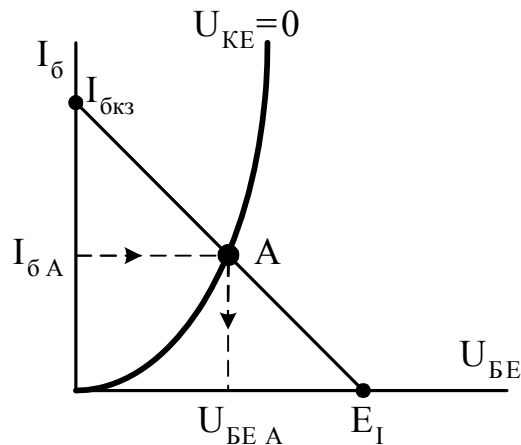


Рис. 4.10. Визначення положення робочої точки на вхідних характеристиках

Для прискорення процесу насичення ключа вводять поняття коефіцієнта насичення.

$$\text{Коефіцієнт насичення } S = \frac{I_b}{I_{b \text{ нас}}}, \quad I_{b \text{ нас}} = I_b A.$$

Рекомендоване значення коефіцієнта $S \cong 1,5 \div 2$, тому що зі збільшенням S зменшується час включення ключа, однак при цьому збільшується час вимикання.

Найпростіший розрахунок ключа.

$I_{k \text{ нас}}$ – (координата точки "А", і E_k , що задана споживачем. Наприклад:

$$I_{k \text{ нас}} = 0,1 \text{ А}; \quad E_k \approx 10 \text{ В}.$$

$$\text{Прийmemo, що } I_{k.z.} \cong I_{k \text{ нас}} \Rightarrow R_k = \frac{E_k}{I_{k \text{ нас}}} = \frac{10}{0,1} = 100 \text{ Ом};$$

і тоді, з урахуванням середнього коефіцієнту підсилення транзистора за струмом $h_{21E} \approx 50$, розрахуємо струм бази насичення:

$$I_{b \text{ нас}} = \frac{I_{k \text{ нас}}}{h_{21E}} = \frac{0,1}{50} \approx 2 \text{ мА}.$$

Прийmemo $S = 2$, тоді $I_{\bar{\sigma}} = S \cdot I_{\bar{\sigma} \text{ нас}} = 4 \text{ мА}$ і розрахуємо $R_{\bar{\sigma}}$ при заданому значенні амплітуди імпульсу, наприклад, при $E_I = 5 \text{ В}$, $U_{BE \text{ A}} \approx 0,4 \text{ В}$ одержимо

$$R_{\bar{\sigma}} = \frac{E_I - U_{BE \text{ A}}}{I_{\bar{\sigma} \text{ A}}} = \frac{5 - 0,4}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,1 \text{ кОм}.$$

Орієнтовні вимоги до транзистора:

$$U_{KE \text{ проб}} = 15 \div 20 \text{ В}; \quad I_{K \text{ max}} = 150 \div 200 \text{ мА}; \quad h_{21E} \approx 50.$$

Повна модель ключа для області насичення має вигляд (рис. 4.11):

При цьому $R_{K \text{ нас}} \ll R_K$, що забезпечує $U_{KE \text{ нас}} \approx 0$.

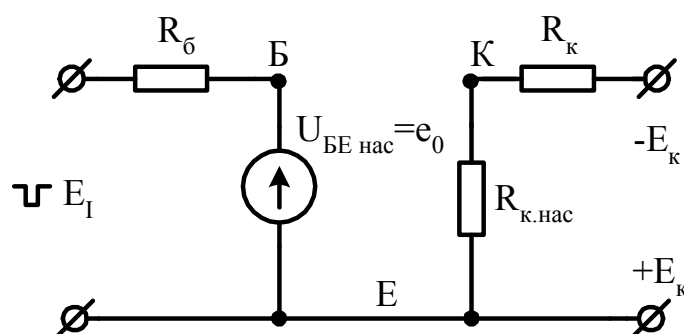


Рис. 4.11. Повна модель ключа для області насичення

при $I_{\bar{\sigma}} \geq I_{\bar{\sigma} \text{ нас}}$

Спрощена модель ключа має вигляд (рис. 4.12). У спрощеному варіанті можна вважати, що виводи транзистора К, Е і Б – мають однаковий потенціал.

Розрахунок ключа в режимі відсікання. Схема ключа і фрагменти розрахунку за постійним струмом наведені на рис. 4.12.

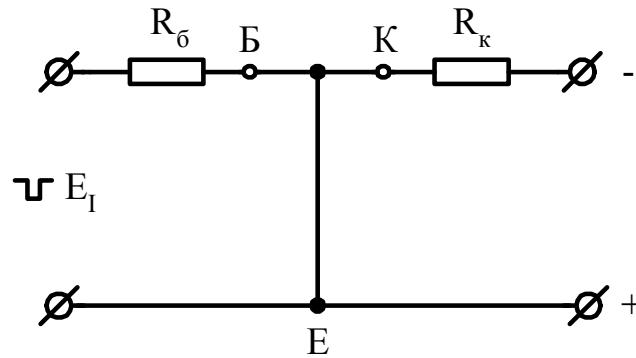
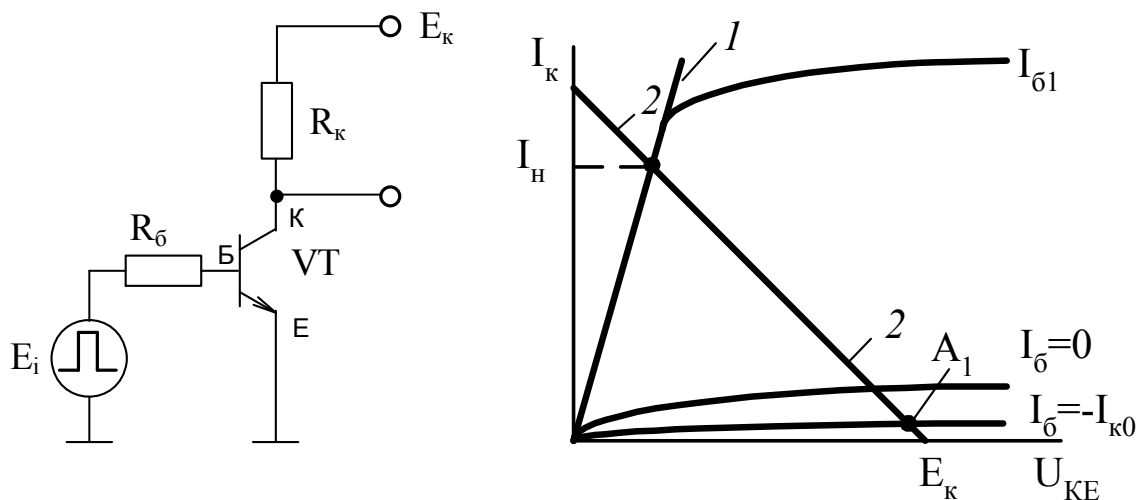
Рис. 3.40. Спрощена модель ключа при $I_{\bar{\sigma}} \geq I_{\bar{\sigma} \text{ нас}}$ 

Рис. 4.12. Схема ключа в режимі відсікання та елементи розрахунків за постійним струмом

На вхід схеми надходять позитивні імпульси, що замикають транзистор. Робоча точка A_1 для повного запирання транзистора повинна розташовуватися на самій нижній характеристиці ($I_{\bar{\sigma}} = -I_{к0}$). При цьому $U_{KE \text{ відс}} \approx -E_k$. Розрахунок режиму за постійним струмом аналогічний. Модель ключа в режимі відсічення наведена на рис. 4.13.

Розрахуємо амплітуду імпульсів (E_I), що надходять на вхід ключа і забезпечують запирання транзистора (точку A_1).

Відомий опис вхідної характеристики транзистора

$$I_{\bar{o}} = I_{\bar{o} \text{ нас}} \cdot \left(e^{\frac{-U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

де $I_{\bar{o} \text{ нас}}$ – значення струму бази при зворотному включенні вхідного переходу транзистора, у режимі відсікання $I_{\bar{o} \text{ нас}} = -I_{\kappa 0}$;

φ_T – тепловий потенціал (25мВ при нормальних умовах, $T=293^\circ\text{K}$).

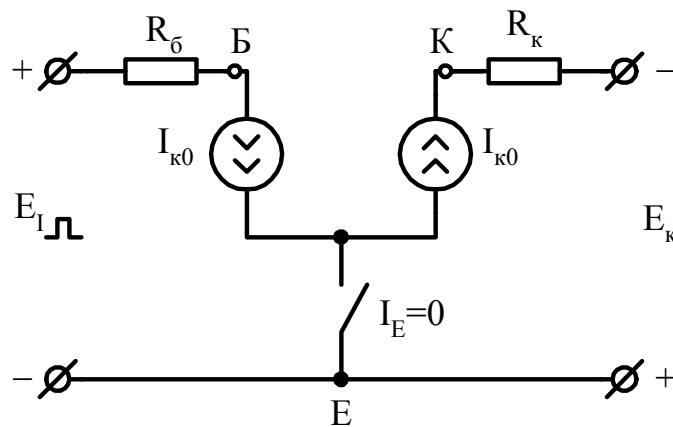


Рис. 4.13. Модель ключа в режимі відсікання

Тоді

$$I_{\bar{o}} = I_{\kappa 0} \cdot \left(e^{\frac{-U_{BE}}{\varphi_T}} - 1 \right).$$

Якщо $e^{\frac{-U_{BE}}{\varphi_T}} \ll 1$, то $I_{\bar{o}} = -I_{\kappa 0}$, що забезпечує роботу транзисторного ключа в точці

А₁. Для забезпечення $e^{\frac{-U_{BE}}{\varphi_T}} \ll 1$ необхідно, щоб $U_{BE} \approx 10\varphi_T = 250 \text{ мВ}$.

Знайдемо амплітуду вхідних імпульсів

$$E_I = U_{BE \text{ відс}_{max}} + I_{\kappa 0} \cdot R_{\bar{o}}.$$

Значення напруги $I_{к0} \cdot R_{б}$ – порядку десятків мілівольт, тому є запасом $E_I \approx (0,3 \div 0,5)$ В. Спрощена модель ключа являє собою розімкнуті колектор і емітер, при напрузі на базі $(0,3 \div 0,5)$ В.

4.4 Контрольні питання

1. Намалюйте RC-ланку і встановіть умови, при яких вона буде такою, що диференціює.

2. При яких умовах RC-ланка буде розділовою?

3. Назвіть основні джерела похибок в інтегруючих колах, напишіть формули для їхнього визначення.

4. Назвіть переваги інтеграторів на ОППС.

5. У чому перевага паралельних діодних обмежувачів відносно до послідовних? Назвіть основні недоліки діодних обмежувачів.

6. Наведіть повні і спрощені лінійні моделі транзисторів в областях насичення і відсічення. Які коефіцієнти передач транзистора в цих областях?

7. Наведіть методику розрахунку транзисторного ключа в режимі насичення, модель ключа, поясніть зміст коефіцієнта насичення S і його рекомендовані значення.

1. Викладіть методику розрахунку транзисторного ключа в режимі відсічення, наведіть модель ключа.

5 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

5.1 Системи числення

Система числення – це спосіб запису (зображення) чисел.

Системи числення, в яких ваговий коефіцієнт кожної цифри залежить від її положення у послідовності цифр, що зображає число, називаються позицій-