

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

### Дослідження електронних ключів

#### Теоретичні відомості

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 керування (найчастіше, це логічна одиниця) переходять в замкнутий або розімкнений стан. При відкритті (замиканні) ключа його внутрішній опір зменшується до значень  $R_{\text{відкр.}} = 0,3 \dots 300 \text{ Ом}$  в ключах на біполярних транзисторах (БТ) і до значень  $0,0003 \text{ Ом}$  в кращих ключах на польових транзисторах (ПТ). При цьому, в закритому стані вони мають опір близько  $50 \dots 500 \text{ кОм}$  для діодних ключів і ключів на БТ, і від  $1$  до  $10 \text{ МОм}$  для ключів на ПТ. У кращих ключах на ПТ з ізольованим затвором опір розімкненого ключа може досягати  $10^{12} \text{ Ом}$  при використанні транзисторів з ізольованим затвором.

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

Розглянемо транзисторні ключові схеми на біполярних транзисторах типів *n-p-n* та *p-n-p* (рис. 1).

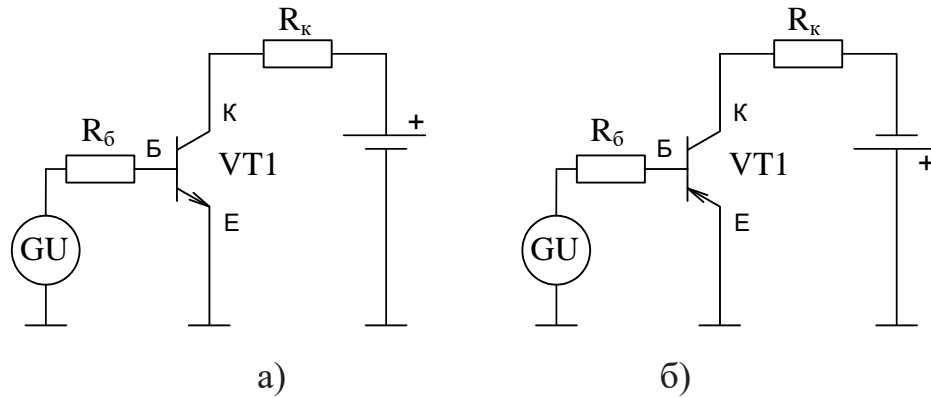


Рисунок 1 – Схеми включення біполярних транзисторів *n-p-n* (а) та *p-n-p* (б) типу

В імпульсних пристроях використовуються всі основні схеми включення транзистора – ЗЕ (загальний емітер), ЗБ (загальна база) та ЗК (загальний колектор).

На рис. 2,а наведено сімейство типових вихідних характеристик і вхідну характеристику біполярного транзистора *n-p-n* (рис. 2,б).

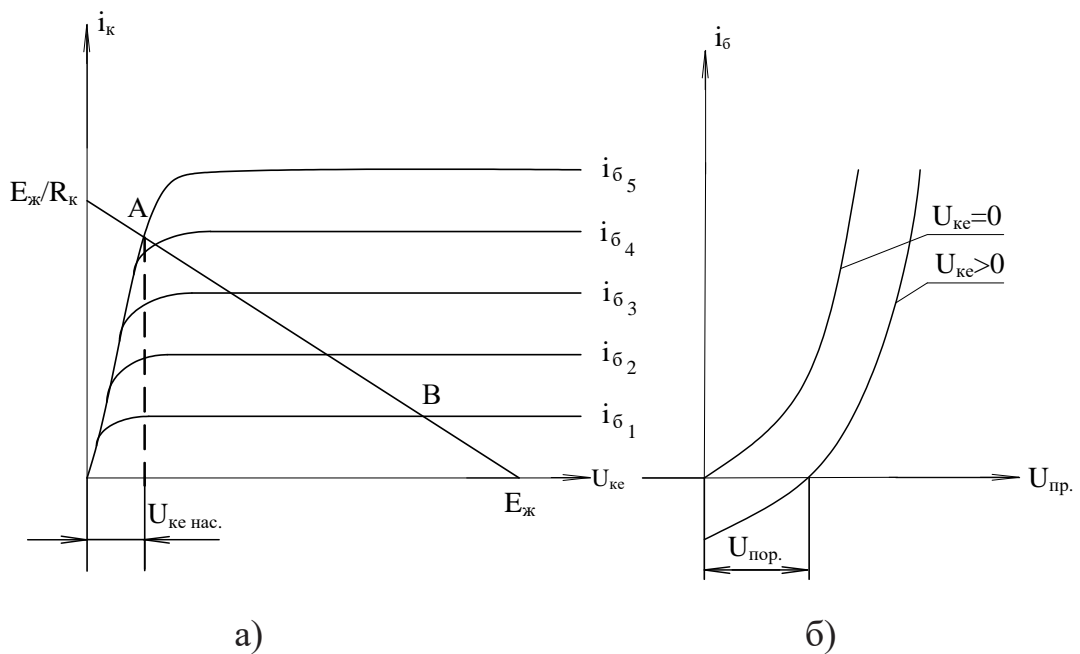


Рисунок 2 – Вихідна (а) та вхідна (б) характеристики біполярних транзисторів

Вихідні статистичні характеристики показують залежність струму колектора від струму бази і напруги між колектором та емітером транзистора

$i_k = f(U_k, i_b)$ . На цьому ж рисунку нанесена навантажувальна пряма АВ, котра відповідає рівнянню Кірхгофа для схеми ЗЕ:

$$E_{\text{ж}} = i_k R_k + |U_k|,$$

де  $E_{\text{ж}}$  – напруга джерела живлення,  $i_k$  – струм колектора,  $R_k$  – опір колекторного резистора.

Координати  $(i_k, U_k)$  точок перетину навантажувальної прямої з вихідними характеристиками транзистора визначають режими схеми. На рис. 2,б приведено вхідні характеристики транзистора  $i_b = f(U_{\text{бе}}, U_k)$ . Розглянемо докладніше включення насиченого транзисторного ключа за схемою ЗЕ (рис. 3).

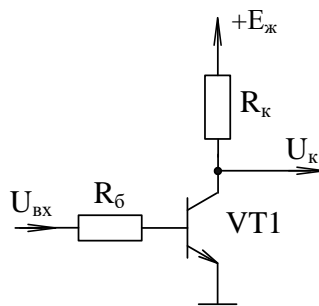


Рисунок 3 – Принципова схема насиченого транзисторного ключа

Ключ працює таким чином. Поки вхідна напруга  $U_{\text{вх}} < U_{\text{пор}}$ , де  $U_{\text{пор}}$  – порогова напруга відкриття транзистора, транзистор закритий і струм через перехід колектор-емітер ( $i_k$ ) не протікає. Коли вхідна напруга стає більше порогової  $U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}$ , транзистор відкривається і струм бази стає більше нуля (рис. 2,б). Щоб транзистор відкрився повністю, в базу потрібно ввести велику кількість неосновних носіїв заряду, на що потрібен певний час.

При зменшенні вхідного сигналу до величини менше  $U_{\text{пор}}$ , транзистор закривається (ключ закривається). При закритті транзистора потрібен час для виводу з бази неосновних носіїв заряду. Через це відбувається запізнювання між моментом подачі вхідного сигналу і моментом відкриття (закриття) транзистора.

## Статичні режими ключа

Розрізняють наступні режими роботи транзисторного ключа:

- режим включення – транзистор працює або в області насичення, або в активній області (рис.4,а);
- режим виключення – транзистор закритий (рис. 4,б).

На рис.4 позначення  $r_{ке}$  відповідає опору переходу колектор-емітер повністю відкритого транзистора.

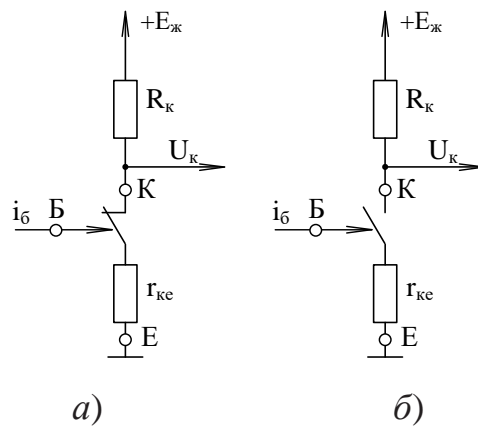


Рисунок 4 – Умовне позначення відкритого (а) та закритого (б) транзисторного ключа

### 2.1 Режим закриття

Транзистор буде закритим, якщо  $U_{бе} \leq 0$  і  $U_{бк} \leq 0$ . Якщо зворотна напруга  $U_{бе} = (3 \dots 5)\varphi_{т}$ , де  $\varphi_{т}$  – температурний потенціал, що дорівнює  $\varphi_{т} = 0,026$  В при  $T=20$  °С для германієвих транзисторів і  $\varphi_{т\text{ кр}} \approx 0,05$  В для кремнієвих, то цей режим називається режимом глибокої відсічки.

### 2.2 Режим відкриття

Емітерний перехід зміщується в прямому напрямі і через його електроди протікають прямі струми. Розрізняють активну область і область насичення ввімкненого транзистора.

У активній області емітерний перехід зміщений в прямому напрямі, а колекторний – в зворотному, тобто  $U_{бe} > 0$  і  $U_{бк} < 0$ .

Для схеми з ЗЕ

$$i_k = \beta i_b + (\beta + 1)I_{к0},$$

де  $\beta$  – статичний коефіцієнт передачі струму в схемі з ЗЕ;  $I_{к0}$  – тепловий струм колектора при обриві емітера або некерований струм колектора.

Для схеми з ЗБ

$$i_k = \alpha i_b + I_{к0},$$

де  $\alpha = \beta/(1+\beta)$ .

Таким чином, в активній області струм колектора лінійно залежить від керуючого струму бази (струму емітера для схеми з ЗБ). В області насичення обидва переходи транзистора зміщені в прямому напрямі. Струми насичення колектора і бази визначаються співвідношеннями

$$i_{кн} = \frac{E_{ж} - |U_{кн}|}{R_k},$$

$$i_{б.н.мін} = \frac{i_{кн}}{\beta},$$

де  $i_{б.н.мін}$  – мінімальний струм насичення бази.

Напруга  $U_{кн}$  зменшується із зростанням  $\beta$  і складає приблизно декілька сотень мілівольт. Напруга насичення бази  $U_{бн}$  складає 0,2...0,4 В для германієвих транзисторів і 0,7...1,1 В для кремнієвих (як правило для малопотужних транзисторів вона складає 0,7 В). Форма сигналу на вході і виході транзисторного

ключа наведена на рис. 5. Напряга на переході колектор-емітер відкритого транзистора називається напругою насичення і позначається  $U_{ке.нас.}$  або  $U_{кн.}$

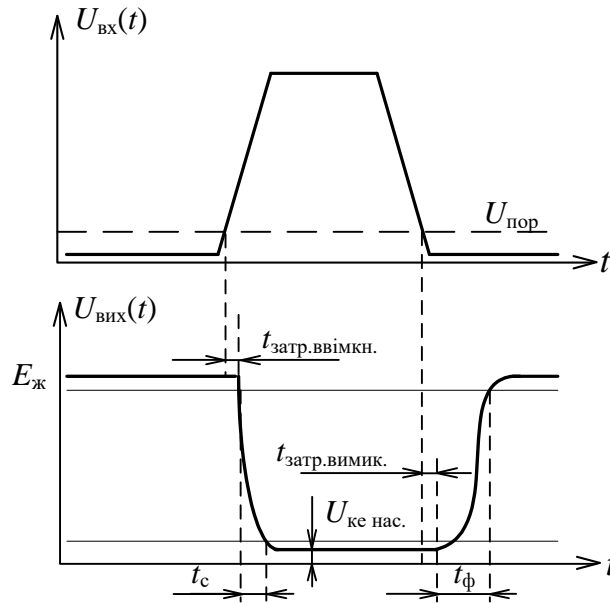


Рисунок 5 – Сигнал на вході та виході транзисторного ключа

Підвищити швидкодію ключа можна збільшивши струм бази більше, ніж  $i_{б.н.мін.}$ . Це пояснюється тим, що чим більше струм  $i_b$ , тим швидше транзистор переходить у відкритий стан, і тим швидше відбувається зростання фронту імпульсу колекторного струму. Але при значному збільшенні струму бази зростає ступінь насичення транзистора, а це збільшує тривалість перехідних процесів при закритті транзистора і, крім того, помітно збільшується потужність, що розсіюється у вхідному колі. Тому слід шукати компроміс по мірі насичення транзистора і швидкості відкривання ключа.

Ступінь насичення транзистора показує у скільки разів реальний струм бази більше того мінімального значення струму бази, який необхідний для забезпечення режиму насичення транзистора.

В режимі насичення струм колектора не залежить від струму бази. Навіть якщо збільшити струм бази, струм колектора не збільшується. Для оцінки ступеня насичення вводиться параметр  $q_{нас.}$

$$q_{\text{нас.}} = \frac{i_{\text{б}}}{i_{\text{б.нас.мін}}} = \frac{(U_{\text{вх}} - U_{\text{бс}}) / R_{\text{б}}}{E_{\text{ж}} / R_{\text{к}}}$$

На межі насичення  $q_{\text{нас}}=1$ , тобто  $i_{\text{б}}=i_{\text{б.н.мін}}$ . Із збільшенням  $q_{\text{нас}}$  збільшується навантажувальна здатність ключа (тобто до виходу ключа можна підключити коло, що має менший опір), зменшуються впливи дестабілізуючих чинників на вихідні параметри ключа. Проте збільшення  $q_{\text{нас}}$  приводить до збільшення часу закриття, тобто погіршення швидкодії ключа, як було зазначено вище.

У зв'язку з великим діапазоном зміни значень  $\beta$  у різних екземплярів транзисторів умови насичення повинні виконуватися для транзисторів з мінімальними значеннями  $\beta$ , приведеними в довіднику. Тоді ключ буде працювати в режимі насичення при використанні транзистора з будь-яким значенням статичного коефіцієнта підсилення по струму  $\beta$ .

У режимі відкриття виконуються умови  $U_{\text{бс}} > 0$  і  $U_{\text{бк}} > 0$ . Процес відкриття та закриття транзистора відбувається із затримкою  $t_{\text{затр.відкр.}}$  і  $t_{\text{затр.закр.}}$ . Час затримки пояснюється тим, що для введення в базу і виводу з бази неосновних носіїв заряду необхідний час (рис.5).

Інакше це можна пояснити таким чином. Вхідна ємність транзистора з резистором у колі бази утворюють інтегруюче коло. Щоб транзистор відкрився необхідно зарядити ємність до напруги, приблизно рівної 0,7 В (для кремнієвих транзисторів), а для цього потрібен час. Чим більше струм заряду (менше значення опору резистора у колі бази) тим швидше заряджається конденсатор.

Це добре видно з осцилограм сигналів, наведених на рис. 6.

На рис. 6 наведена модель трьох ключів у схемі з ЗЕ з різним ступенем насичення  $q_{\text{нас}}$ , а також осцилограми сигналів на базах (верхній осцилограф) та колекторах (нижній осцилограф) транзисторів. Для ключа на транзисторі Q1  $q_{\text{нас}}=1$ , для Q2 –  $q_{\text{нас}}=2,5$ , а для Q3 –  $q_{\text{нас}}=5$ . Аналіз осцилограм показує, що збільшення ступеню насичення призводить до зростання швидкості перемикання ключа.

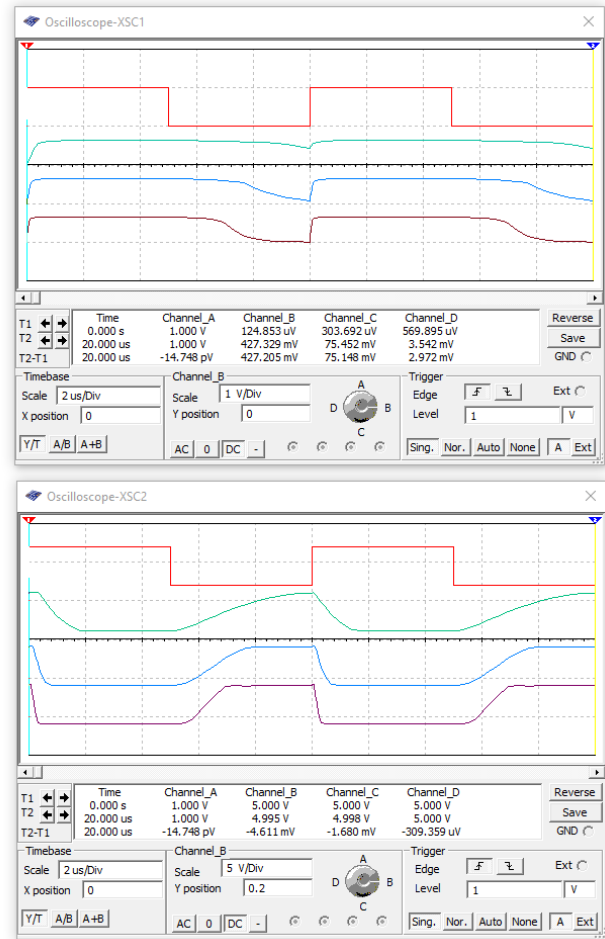
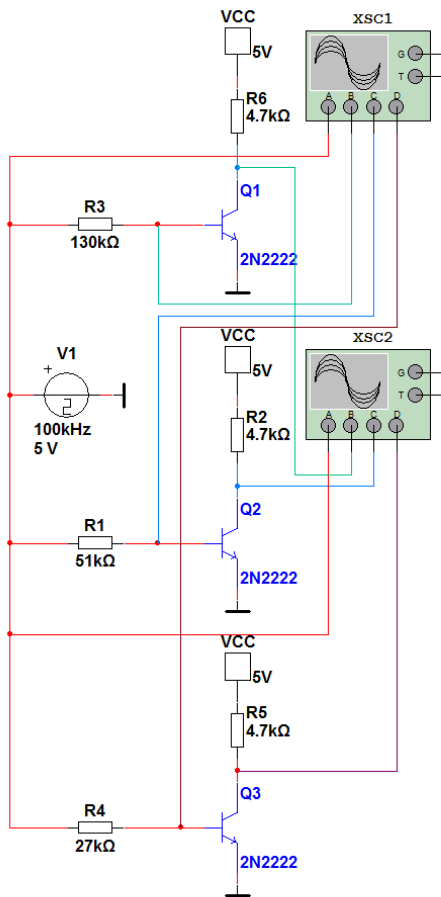


Рисунок 6 – Модель та часові діаграми сигналів транзисторних ключів з різним ступенем насичення

### 3 Способи прискорення перемикання ключа

Як було сказано вище, процес відкриття і закриття транзистора відбувається з деякою затримкою  $t_{затр}$ . Розглянемо способи зменшення цього часу. Перший спосіб полягає в прискоренні введення і виведення неосновних носіїв заряду, а другий – в зменшенні ступеня насичення транзистора.

Для зменшення часу, необхідного для насичення бази неосновними носіями заряду (або виводу з бази неосновних носіїв заряду), необхідно паралельно базовому резистору підключити додатковий конденсатор  $C_{дод}$  (рис. 7).



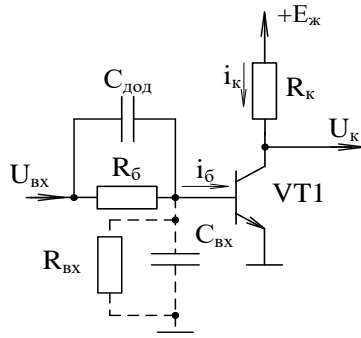


Рисунок 7 – Транзисторний ключ з прискорювальним конденсатором

Це призведе до того, що базовий струм утворюється двома складовими:

- перша складова визначається струмом, що протікає через базовий резистор і вхідну ємність транзистора  $C_{\text{вх}}$  (інтегруюче коло);
- друга складова визначається струмом, що протікає через конденсатор  $C_{\text{доп}}$  і вхідний опір транзистора  $R_{\text{вх}}$  (диференціююче коло).

Струми підсумовуються на вхідному опорі транзистора і процеси заряду та розряду вхідної ємності прискорюються. Скорочення часу відкриття здійснюється завдяки збільшенню відкриваючого струму бази при подачі позитивного перепаду сигналу на вхід транзистора. Щоб прискорити розсмоктування неосновних носіїв необхідно подати в базу струм зворотного знаку у момент негативного перепаду вхідної сигналу. Ці процеси реалізуються завдяки наявності диференціюючого кола, що складається з  $C_{\text{доп}}$  і  $R_{\text{вх}}$  і ілюструються осцилограмами на рис. 8.

Порівнюючи осцилограми на базі ключа без  $C_{\text{доп}}$  (зелена на верхньому осцилографі) та з ємністю (зелена на нижньому осцилографі) можна зробити висновок, що швидкість зміни сигналу на базі транзистора з  $C_{\text{доп}}$  набагато вища ніж без неї. Як наслідок і напруга на колекторі змінюється набагато швидше.

Для того, щоб **зменшити ступінь насичення** бази транзистора неосновними носіями заряду використовують діоди (найчастіше діоди Шотткі, у яких падіння напруги у прямому напрямку  $U_{\text{пр}} \leq 0,5 \text{ В}$  і малий час перемикування), включаючи їх у зворотному напрямі між базою і колектором, як показано на рис. 9.

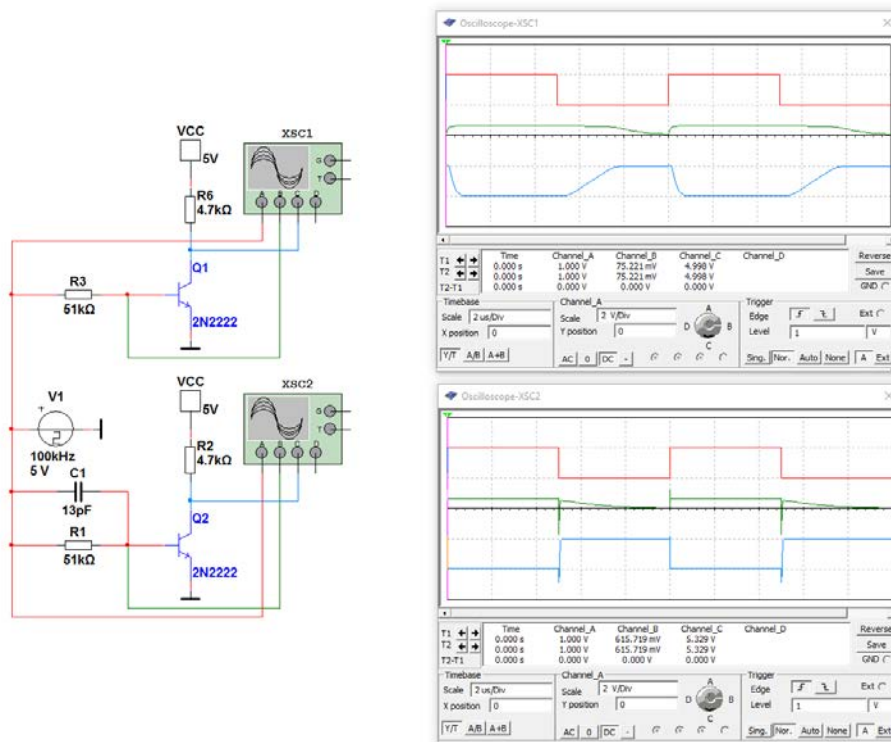


Рисунок 8 – Моделі ключів без і з прискорювальним конденсатором та осцилограми сигналів на базах та колекторах транзисторів

За наявності VD1 ( $U_{\text{бeнас.}} = U_{\text{прVD1}} + U_{\text{кeнас.}}$ ) зайві заряди будуть перетікати з бази через відкритий перехід колектор-емітер на загальний провід. Оскільки падіння напруги на діоді складає  $U_{\text{прVD1}} \leq 0,5 \text{ В}$ , а напруга  $U_{\text{кeнас.}} \leq 0,1 \text{ В}$ , то максимальна напруга на базі транзистора не перевищуватиме 0,6 В. При відсутності діода величина сигналу  $U_{\text{бe}}$  може досягати 1...1,1 В. Отже підключення діода зменшує ступінь насичення транзистора і, як наслідок, час його вимкнення.

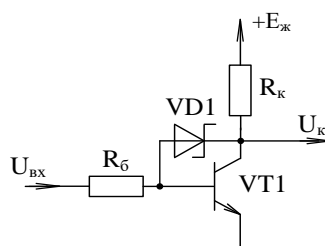


Рисунок 9 – Схема ключа з діодним обмежувачем ступеню насичення транзистора

Ефективність використання обмежувачого діода ілюструє рис. 10.

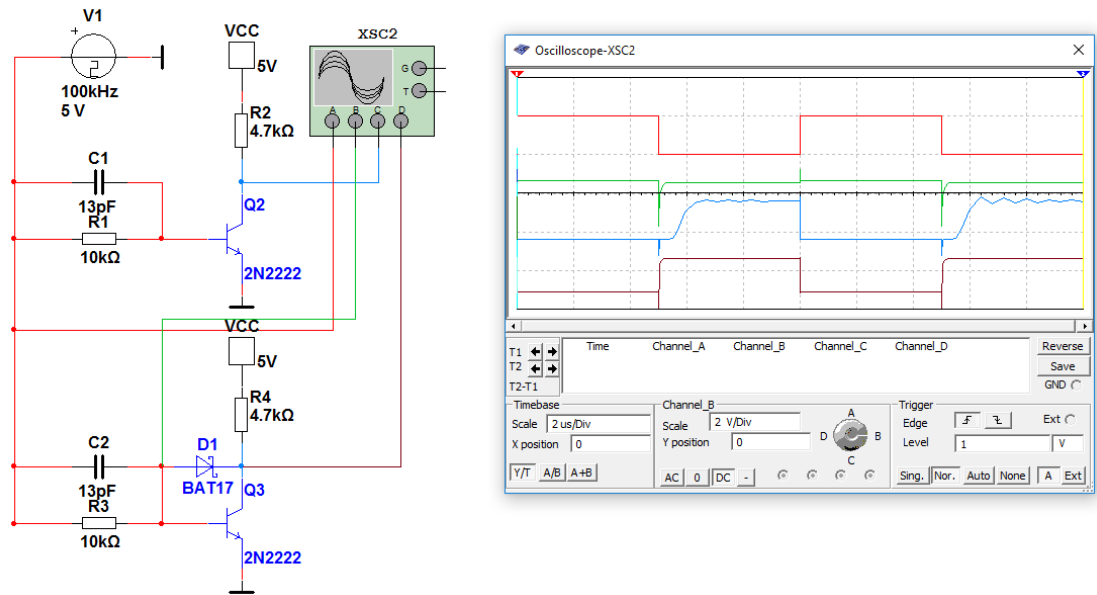


Рисунок 10 – Моделі ключів з прискорювальним конденсатором без обмежувачого діода і з діодом та осцилограми сигналів у різних точках

Порівнюючи осцилограми сигналів на виході ключів можна зробити висновок про те, що використання діода для обмеження ступеня насичення може бути досить ефективним (нижня осцилограма на рис. 10).

#### 4 Транзисторні ключі в схемі з ЗБ

Основна особливість транзисторного ключа ЗБ полягає в тому, що керуючим струмом є струм емітера  $i_e$ . На рис. 11 показані схеми транзисторного ключа ЗБ з транзисторами різної типу.

Розглянемо принцип роботи транзисторного ключа ЗБ з транзистором  $n-p-n$  типу (рис. 11,а). Якщо  $U_{\text{вх}} \leq U_{\text{пор}}$ , то транзистор VT1 закритий, а якщо  $|U_{\text{вх}}| \geq |U_{\text{пор}}|$ , то транзистор відкритий. При відкритті транзистора VT1 через перехід колектор-емітер протікає струм, на резисторі  $R_k$  падає напруга і як наслідок на виході напруга зменшується. При закритті транзистора VT1 струм

через перехід колектор-емітер не протікає і як наслідок напруга на виході дорівнює напрузі живлення  $U_{ж}$ . Залежно від співвідношення  $R_{к}$  і  $R_{е}$  можна отримати різну амплітуду вихідного сигналу.

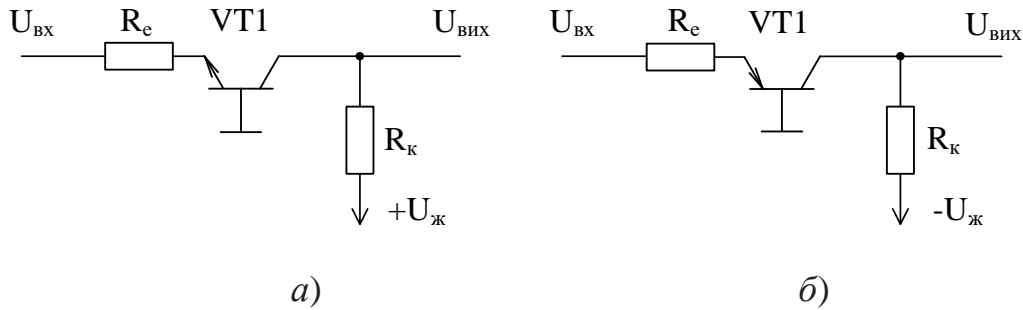


Рисунок 11 – Принципова схема транзисторного ключа ЗБ з транзистором  $n-p-n$  (а) та  $p-n-p$  (б) типу

Якщо припустити, що  $R_{к} \gg R_{е}$  і  $U_{вих} = 0$  для відкритого транзистора VT1, то на рис. 12 наведені часові діаграми роботи транзисторного ключа у схемі з ЗБ з транзистором  $n-p-n$  типу, а на рис. 13 –  $p-n-p$  типу.

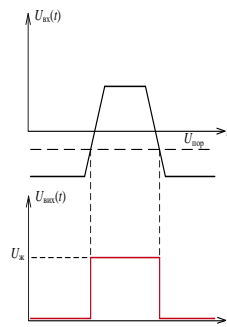


Рисунок 12 – Часові діаграми роботи транзисторного ключа ЗБ з транзистором типу  $n-p-n$

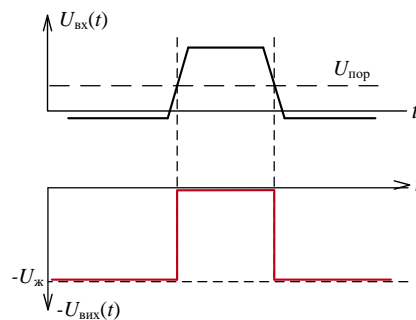


Рисунок 13 – Часові діаграми роботи транзисторного ключа ЗБ з транзистором

типу  $p-n-p$

Для транзисторного ключа із загальною базою характерні дві властивості:

- фаза вхідного і вихідного сигналу співпадає;
- полярність вхідного і вихідного сигналу протилежні.

## 5 Транзисторні ключі на польових транзисторах

Польовий транзистор – уніполярний напівпровідниковий прилад, струм в якому обумовлений тільки вільними основними носіями в провідному каналі між двома електродами – витоком і стоком. Провідність каналу модулюється поперечним (перпендикулярним напрямку струму) електричним полем, що створюється за допомогою керуючого електрода – затвора. Розрізняють два класи польових транзисторів: з керуючим  $p-n$ -переходом і з ізольованим затвором. Польові транзистори з ізольованим затвором, у свою чергу, поділяються на МДН-транзистори (транзистор із структурою метал – діелектрик – напівпровідник) з вбудованим провідним каналом і МДН-транзистори з індукованим каналом.

На рис. 14 показані приклади принципів схем ключів на МДН-транзисторах.

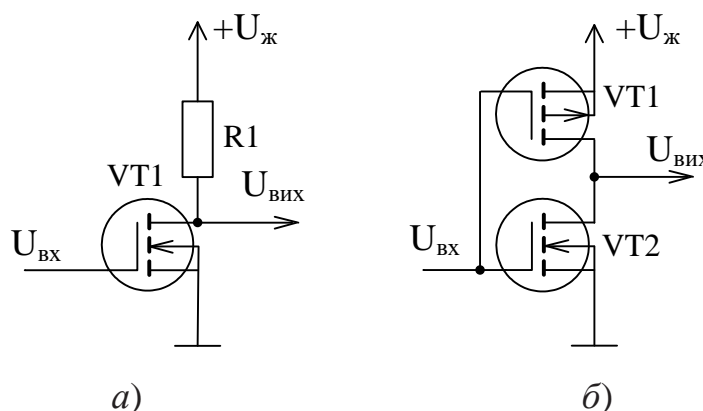


Рисунок 14 – Принципові схеми ключів на МДН-транзисторах з лінійним резистором в навантаженні (а) та з МДН-транзистором в навантаженні (б)

## 6 Моделювання роботи ключів за допомогою програми NI Multisim

За допомогою програми NI Multisim змоделюємо роботу ключів при різних способах прискорення перемикання ключа. Для цього дослідимо принципові схеми транзисторного ключа з прискорювальним конденсатором та з діодним обмежувачем ступеня насичення транзистора.

Для того, щоб створити потрібну модель, необхідно розмістити елементи схеми на робочому аркуші. Для розміщення елемента досить клацнути лівою кнопкою “миші” на піктограмі потрібної бібліотеки або через меню Place/Component вибрати необхідний елемент. За замовчуванням панель компонентів відображається у вікні програми. При підключенні джерел живлення слід врахувати, що джерело позитивної напруги +5 В позначається як VCC, а від’ємної напруги -5 В як VEE.

Для того, щоб побачити результати моделювання, необхідно скористатися осцилографом. Для розміщення осцилографа досить клацнути лівою кнопкою “миші” на піктограмі осцилографа на панелі приладів.

Розглянемо дослідження транзисторного ключа в схемі з загальним емітером з використанням прискорювального конденсатора та з діодним обмежувачем ступеня насичення транзистора (рис. 15), з використанням моделі, яка міститься в файлі 02\_zagal\_emiter.ms10. У цій моделі транзистор підключений за схемою з загальним емітером (ЗЕ).

Розрахуємо номінали резисторів для ступеня насичення  $q_{\text{нас}}=1$ . Для транзисторного ключа в схемі з ЗЕ  $i_k \approx \beta \cdot i_b$ , звідси випливає, що  $i_b \geq i_{k_{\text{max}}} / \beta$ .

Попередньо обираємо транзистор 2N3501 для використання у моделі ключа. Щоб знайти значення коефіцієнта  $\beta$ , який у h-параметрах Multisim позначається як hFE, достатньо при виборі транзистора з бібліотеки елементів натиснути на кнопку Detail Report і у вікні що відкриється (рис. 15) знайти параметри hFE(min) і hFE(max). З рис. 15 видно, що hFE(min) = 20, а hFE(max) = 300.

Транзистор 2N3501 має статичний коефіцієнт передачі струму  $\beta_{\max} = 20 \dots 300$ .

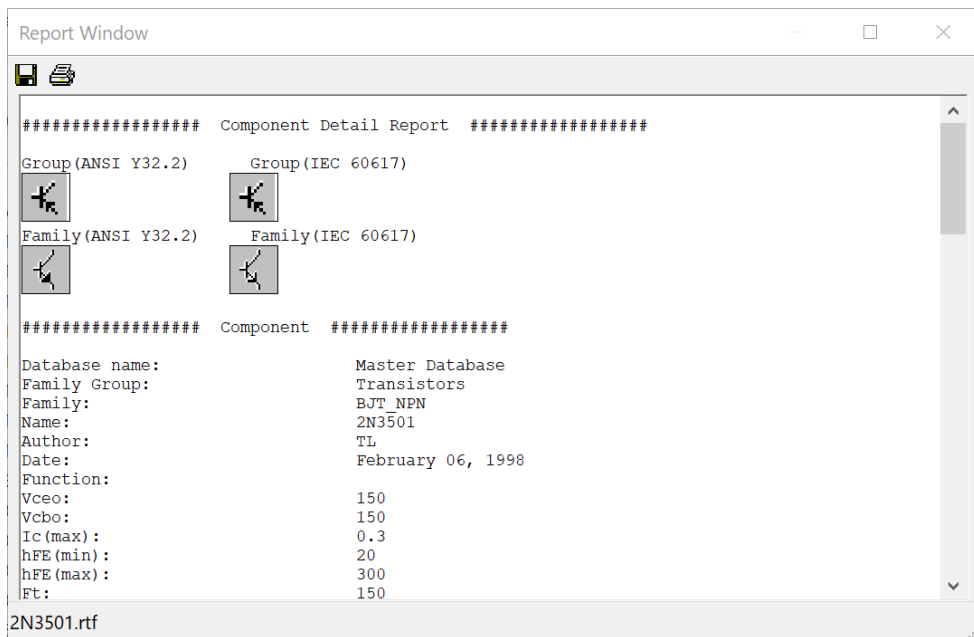


Рисунок 15 – Вікно параметрів транзистора 2N3501

Прийmemo значення опору колекторного резистора  $R_k = 2,7 \text{ кОм}$  і розрахуємо значення опору базового резистора. Падіння сигналу на переході колектор-емітер відкритого транзистора (зважаючи на його малу величину) будемо ігнорувати для спрощення розрахунків. Отримаємо

$$i_k = \frac{U_{\text{ж}}}{R_k} = \frac{5\text{В}}{4,7 \text{ кОм}} = 1,85 \text{ мА}$$

$$i_{\text{бmin}} \geq \frac{1,85 \text{ мА}}{300} = 6,2 \text{ мкА},$$

$$i_{\text{бmax}} \geq \frac{1,85 \text{ мА}}{20} = 92,5 \text{ мкА}.$$

Опір бази треба розраховувати з запасом по струму бази у 1,5... 2 рази більше за максимальний струм, розрахований на попередньому етапі. Як показали

досліди, такий запас по струму дозволяє впевнено досягти насичення транзисторного ключа. Розрахуємо значення опору  $R_6$  за формулою

$$R_6 \geq \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{бe}}}{2i_{\text{б,max}}} = \frac{(5 - 0,7) \text{ В}}{185 \cdot 10^{-6}} = 23,2 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Згідно з отриманими результатами приймаємо максимальне значення опору бази  $R_6 = 22 \text{ кОм}$  (найближчий номінал з ряду номінальних значень E24, що забезпечує необхідний струм).

Модель ключа з розрахованим значенням опору  $R_6$  наведена на рис. 16.

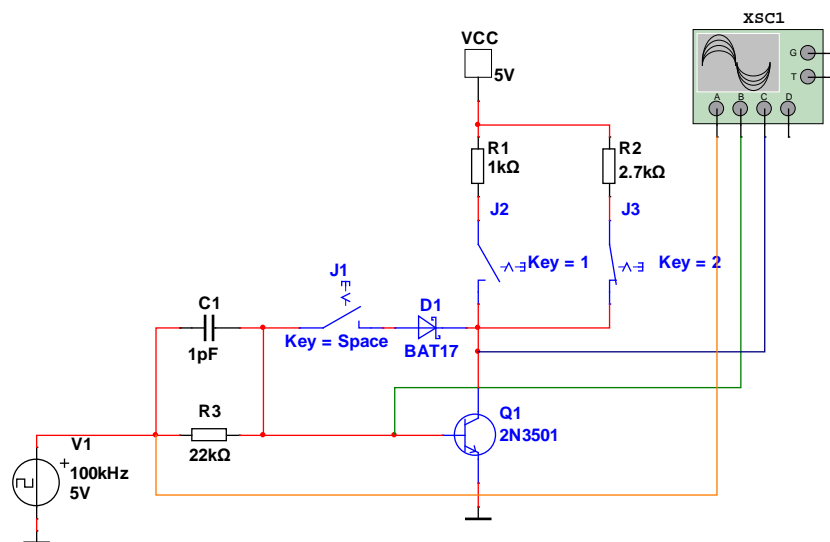


Рисунок 16 – Модель транзисторного ключа у схемі з загальним емітером (02\_zagal\_emiter.ms10)

Осцилограми сигналів на вході, на базі і на колекторі транзистора наведені на рис. 17.



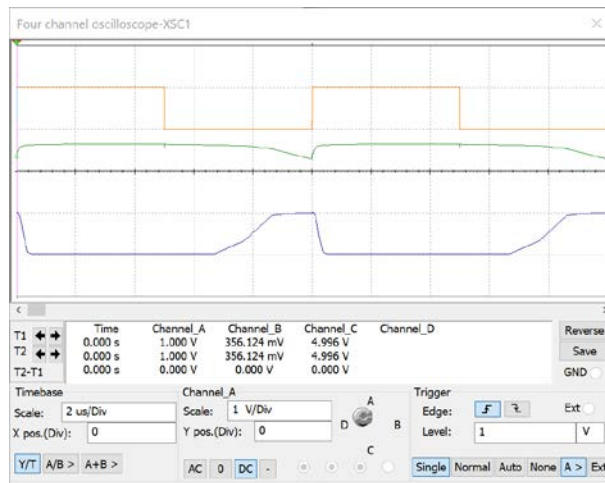


Рисунок 17 – Осцилограми сигналів на вході, на базі і на колекторі транзистора

Як впливає з рис. 17 імпульс на виході значно коротший за вхідний і формується зі значною затримкою у часі. Форма вихідного імпульсу не схожа на форму вхідного сигналу (у урахуванням інверсії фази вихідного сигналу по відношенню до вхідного).

Для покращення форми вихідного сигналу замкнемо перемикач J1. Результат підключення діоду Шоттки ілюструє рис. 18.

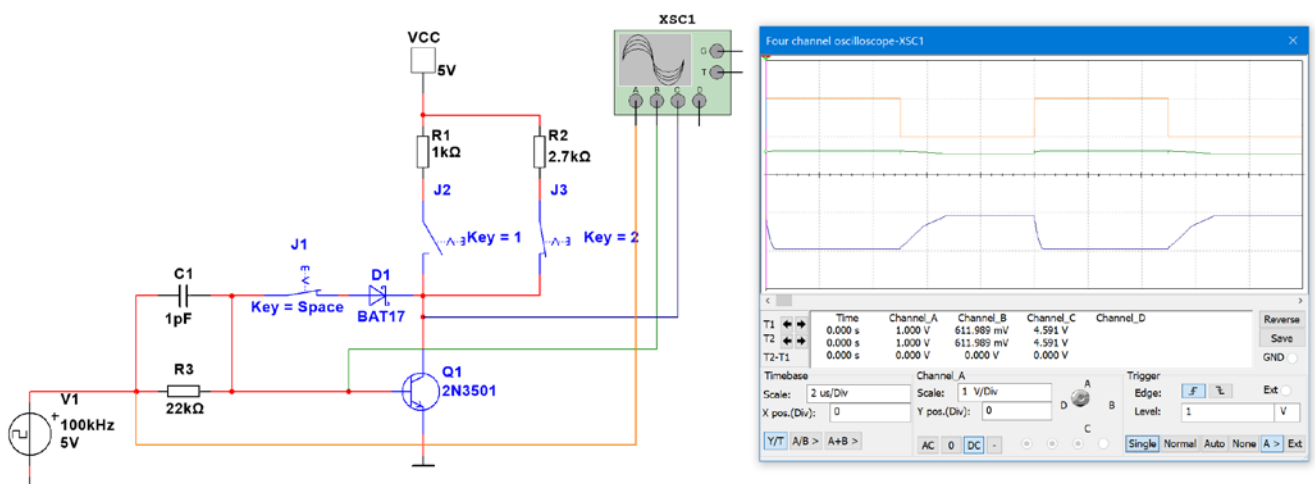


Рисунок 18 – Модель та осцилограми сигналів на вході, на базі і на колекторі транзистора при підключеному діоді Шоттки

Як впливає з рис. 18 час затримки формування фронту вихідного сигналу значно скоротився у порівнянні з моделлю з відключеним діодом.

Для перевірки впливу ємності конденсатора C1 на форму вихідного сигналу скористаємось аналізом Parameter Sweep. Задамо діапазон зміни ємності конденсатора C1 в діапазоні від 1 до 101 пФ.

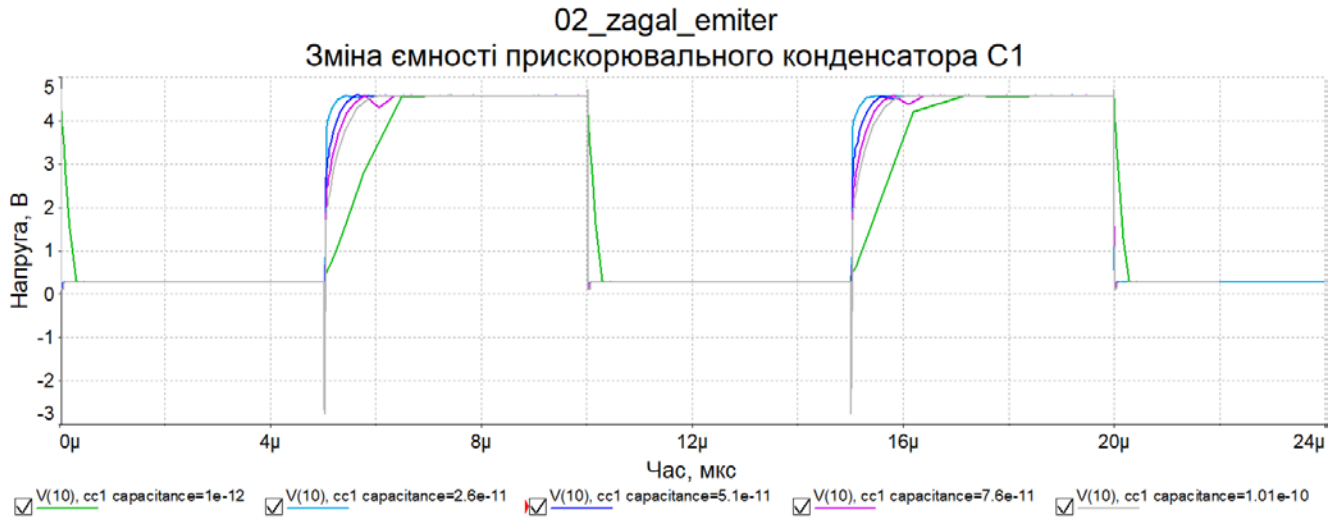


Рисунок 19 – Осцилограми вихідного сигналу при різних значеннях ємності прискорювального конденсатора

Як впливає з рис. 19 найкращий результат отримано при значенні ємності конденсатора  $C_1 = 26$  пФ. Але це значення може бути іншим для опору колектора 1 кОм. Перевіримо, як впливає значенні ємності конденсатора C1 на форму вихідного сигналу при опорі колекторного резистора 1 кОм. На рис. 20 наведено результати моделювання.

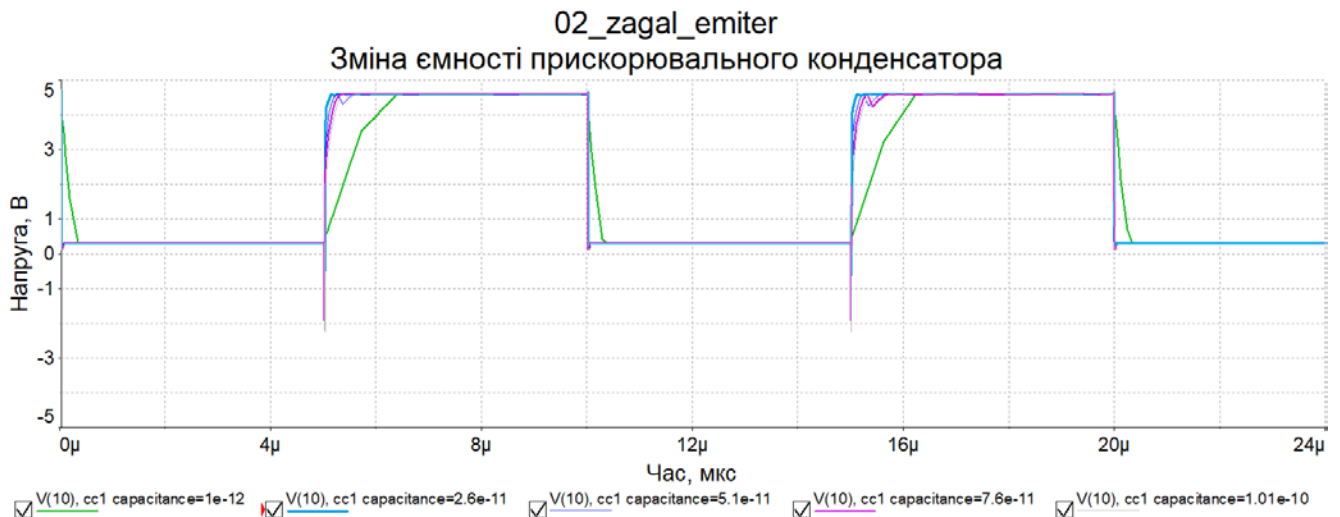
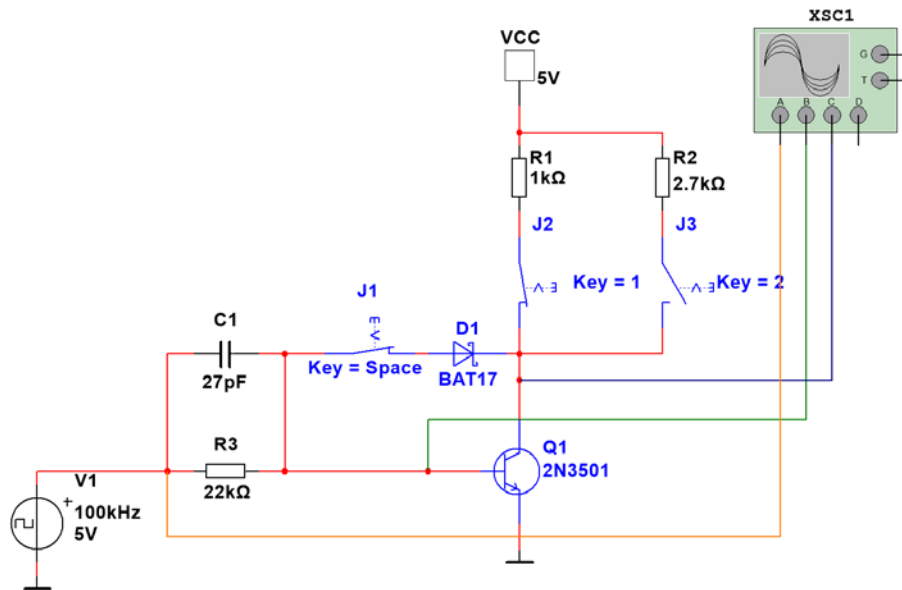


Рисунок 20 – Осцилограми вихідного сигналу при різних значеннях ємності прискорювального конденсатора і опорі колекторного резистора 1 кОм

Як і у випадку з пором колекторного резистора 2,7 кОм, найкращий результат отримано при ємності прискорювального конденсатора 26 пФ.

Аналогічно проведемо дослідження впливу опору базового резистора при підключеному діоді Шоттки та прискорювальному конденсаторі ємністю 27 пФ. Діапазон зміни опорів задамо від 1 до 20 кОм. На рис. 21 наведено результати цього вимірювання.



a)

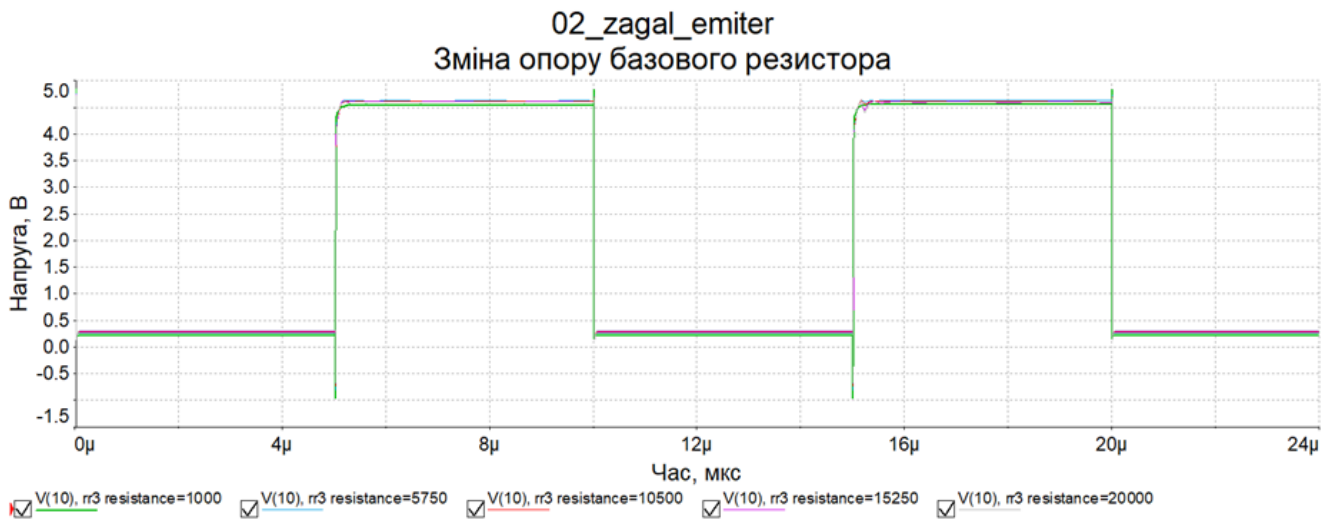


Рисунок 21 – Модель (а) та осцилограми вихідного сигналу при різних значеннях опору базового резистора і опорі колекторного резистора 1 кОм

Як впливає з рис. 21 при наявності прискорювального конденсатора і діода Шоттки опір базового резистора мало впливає на форму вихідного сигналу.

Тому треба провести дослідження впливу опору базового резистора при відключених елементах С1 (видаляємо С1 з моделі) та D1. Результати моделювання наведено на рис. 22.

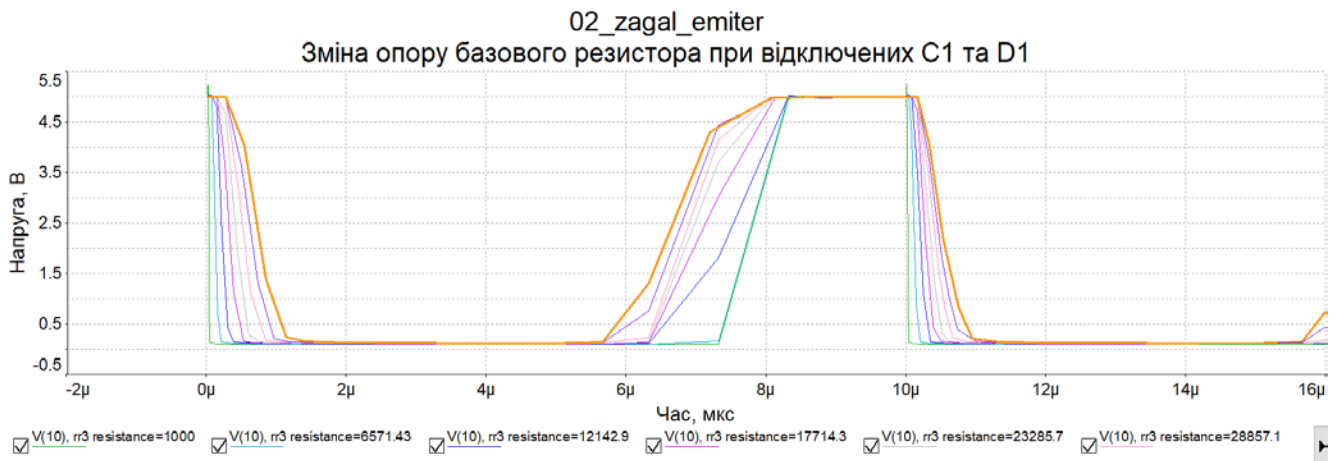


Рисунок 22 – Результати аналізу впливу опору базового резистора на форму вихідного сигналу

Найкращий результат отримано при опорі базового резистора 28,87 кОм. Задавшись опором базового резистора 30 кОм і провівши повторний пошук найкращого значення ємності конденсатора С1 внесемо корективи до моделі.

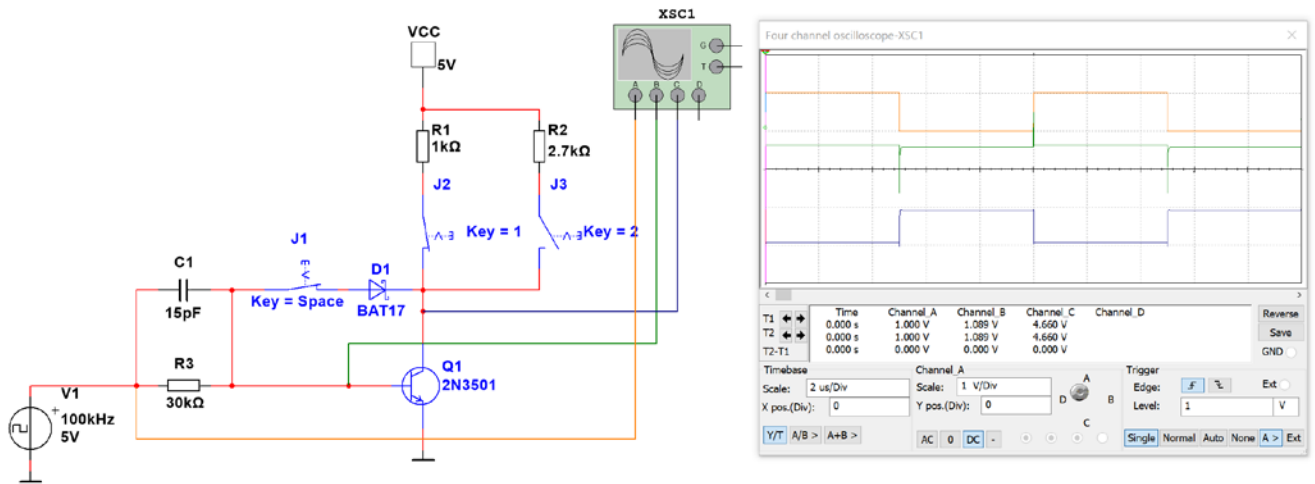


Рисунок 23 – Модель ключа з оптимізованими параметрами базового резистора та прискорювального конденсатора при опорі колектора 1 кОм

## 6 Мета роботи

Ознайомитися з принципом роботи електронних ключів, побудованих за різними схемами.

Принципові схеми моделей для дослідження ключів на біполярних транзисторах у схемі з загальним емітером наведені на рис. 24 і 25, з загальною базою – на рис. 26 та 27, а на МДН-транзисторах – на рис. 28.

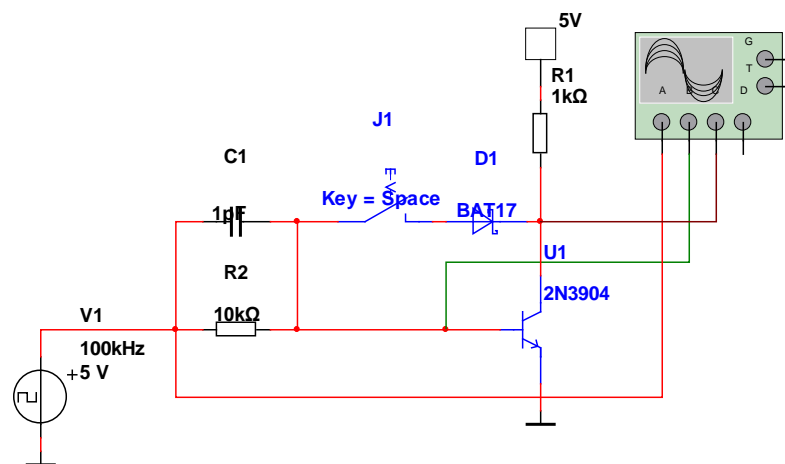


Рисунок 24 – Принципова схема моделі для дослідження електронних ключів, побудованих за схемою з 3Е (02\_zagal\_emiter\_npn.ms10) на транзисторах *n-p-n*

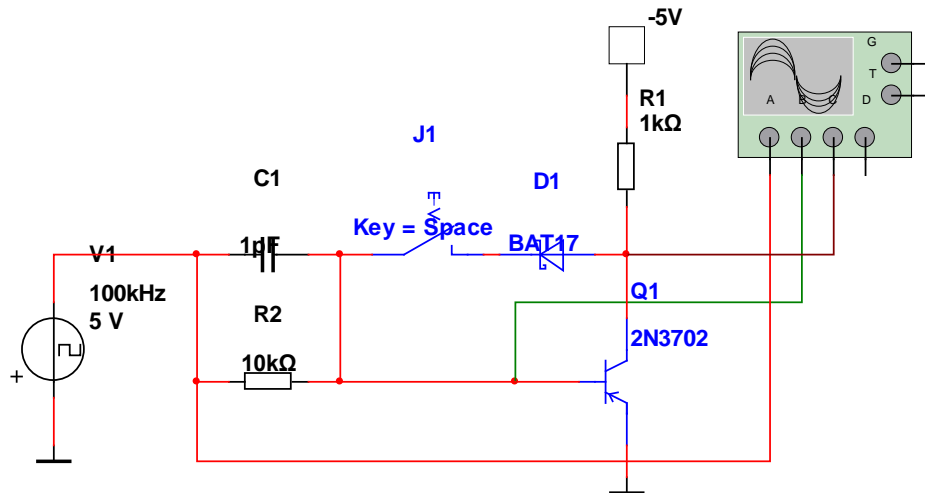


Рисунок 25 – Принципова схема моделі для дослідження електронних ключів, побудованих за схемою з 3Е (02\_zagal\_emiter\_pnp.ms10) на транзисторах *p-n-p*

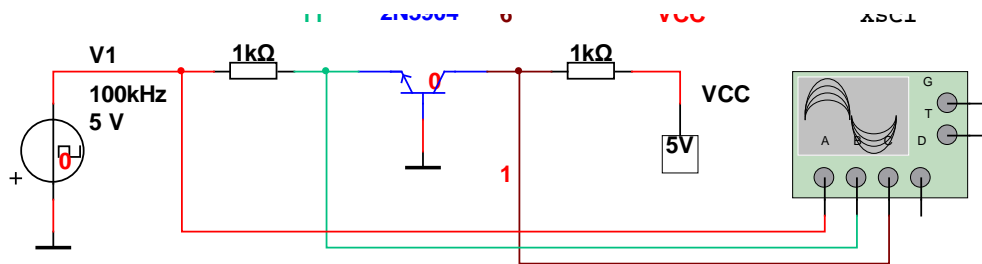


Рисунок 26 – Принципова схема моделі для дослідження електронних ключів, побудованих за схемою з 3Б (02\_zagal\_baza\_pnp.ms10) на транзисторах *n-p-n*

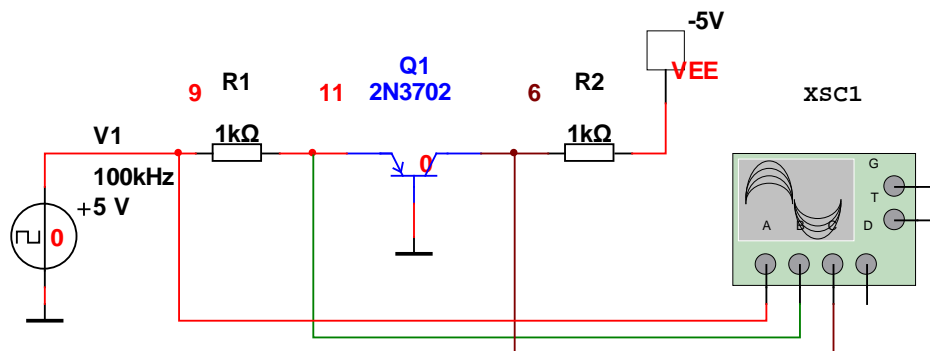


Рисунок 27 – Принципова схема моделі для дослідження електронних ключів, побудованих за схемою з 3Б (02\_zagal\_baza\_pnp.ms10) на транзисторах *p-n-p*

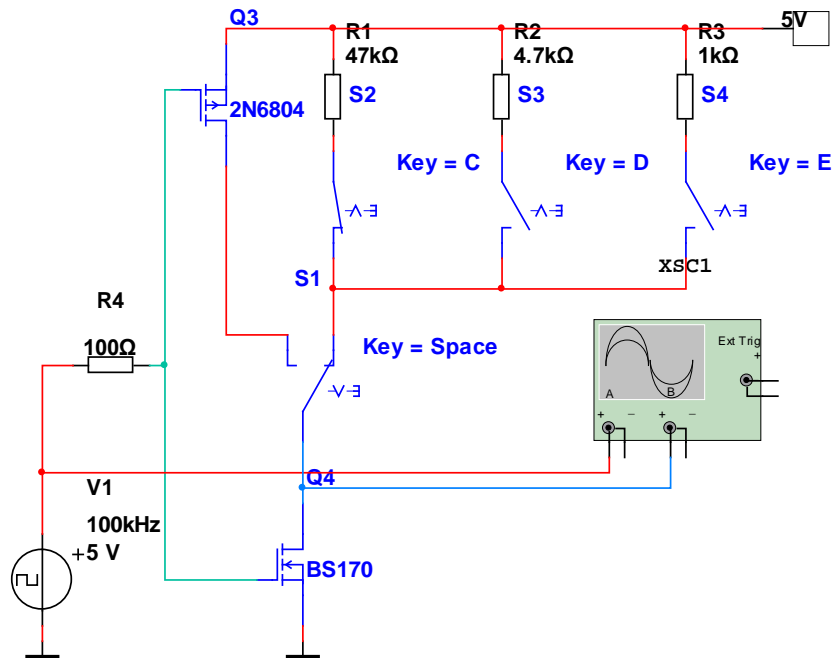


Рисунок 28 – Принципова схема моделі для дослідження електронних ключів, побудованих на МДН-транзисторах (02\_mdp\_tranz.ms10)

## 7 Домашнє завдання

1. Ознайомитись з прикладами вхідних та вихідних характеристик біполярного транзистора в розділі "Теоретичні відомості".
2. Вивчити принцип роботи електронних ключів.
3. Вивчити основні особливості електронних ключів, побудованих на біполярних транзисторах та способи прискорення їх перемикання.
4. Ознайомитись з методом аналізу Parameter Sweep.

## 8 Порядок виконання роботи

Варіанти завдання для досліджень наведені в "Додатку А".

1. Для вивчення принципу роботи електронних ключів, побудованих за схемою з загальним емітером (ЗЕ), дослідити модель, вказану у табл. 1.

Розрахувати опір резистора бази аналогічно з прикладом наведеним у пункті 6.

Провести аналіз впливу опору резистора  $R_3$  на форму вихідного сигналу за допомогою аналізу Parameter Sweep.

Задати діапазон зміни опору  $R_3$  від  $0,1 R_{зрозрах}$  до  $3R_{зрозрах}$  і кількість точок аналізу 10. Замінити опір резистора  $R_3$  на опір, що відповідає найкращій формі вихідного сигналу. Опір  $R_3$  повинен дорівнювати найближчому номінальному значенню з ряду E24 (ряди номінальних значень у Додатку Б). Навести результати аналізу на окремому рисунку.

Задати діапазон зміни ємності конденсатора  $C_1$  від 1 до 100 пФ і кількість точок аналізу 10. Замінити ємність конденсатора  $C_1$  на ємність, що відповідає найкращій формі вихідного сигналу. Ємність  $C_1$  повинна дорівнювати найближчому номінальному значенню з ряду E24 (ряди номінальних значень у "Додатку Б"). Навести результати аналізу на окремому рисунку.

Виміряти у модифікованій схемі осцилографом:

- амплітуду вихідного сигналу;
- тривалість фронту і спаду вихідного сигналу;
- затримку вихідного сигналу відносно вхідного.

Вимірянні результати записати у звіті і навести осцилограми сигналів у різних точках схеми. Пояснити отримані результати.

2. Для вивчення принципу роботи електронних ключів побудованих за схемою з загальною базою (ЗБ) дослідити модель, вказану у табл. 1.

Навести осцилограми вхідного і вихідного сигналів при  $R_1 = R_2$ . Виміряти тривалість фронту та спаду вихідного сигналу за допомогою осцилографа.

Провести вимірювання рівнів сигналів на вході та виході ключа за допомогою осцилографа:  $U_{вх.мін.}$ ,  $U_{вх.макс.}$ ,  $U_{вих.мін.}$ ,  $U_{вих.макс.}$ .

Аналогічні вимірювання рівнів сигналів провести при значенні опору  $R_1$   $0,2R_2$  і  $3R_2$ . Навести осцилограми сигналів для кожного з вимірювань. Пояснити отримані результати.



3. Для вивчення принципу роботи електронних ключів, побудованих на МДН-транзисторах, дослідити модель, наведену на рис. 26, яка міститься в файлі 02\_mdp\_tranz.ms10. Змінюючи положення перемикача S1, дослідити два варіанта схеми електронного ключа, побудованого на МДН-транзисторах. За допомогою перемикачів S2...S4 змінювати опір резистора в навантаженні транзисторного ключа. Для найкращої форми сигналу на виході ключа за допомогою осцилографа виміряти тривалість фронту та спаду вихідного сигналу. Пояснити отримані результати.

### **Контрольні запитання**

1. Які функції виконують електронні ключі?
2. Чи можна використати електронний ключ для зміни амплітуди вхідного сигналу?
3. Чи можна використати електронний ключ для зміни полярності сигналу на його виході по відношенню до полярності сигналу на його вході?
4. Які способи прискорення перемикачання ключа існують? Навести приклади принципових схем.
5. Які основні властивості транзисторного ключа в схемі з ЗБ?
6. Чи змінюється фаза сигналу у ключах з ЗЕ? Якщо змінюється, то наскільки?
7. Чи змінюється фаза сигналу у ключах з ЗБ? Якщо змінюється, то наскільки?
8. Чи вносить транзисторний ключ затримку у сигнал? Якщо вносить, то чому?

### **Звіт про виконання лабораторної роботи**

У звіті треба вказати результати вимірювань для тих варіантів схем, які задані в табл. А1. До звіту додати моделі ключів з загальною базою і з загальним емітером, отримані після оптимізації параметрів.

На основі контрольних запитань і результатів досліджень зробити короткі висновки.