

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА**

Студент групи ЕІс3-71к

Р. С. Жук

Науковий керівник,  
викладач,

А. В. Марусенко

Конотоп 2021

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної кваліфікаційної роботи є дослідження характеристик електронного ключа.

Мета роботи полягає у вивченні принципів дії, конструкції, видів, застосуванні та дослідження характеристик електронного ключа, аналізу областей і специфіки використання.

Одним з найбільш фундаментальних застосувань транзистора є використання його для управління потоком потужності до іншої частини схеми - використання його як електронного ключа. Управляючи ним в режимі відсічення або насичення, транзистор може створити двійковий ефект включення або виключення ключа.

Транзисторні ключі є критично важливими елементами електроніки, їх використовують для створення логічних затворів, які продовжують створювати мікроконтролери, мікропроцесори та інші інтегральні схеми.

Діодні ключі - це тип напівпровідникових діодів. Вони спеціально розроблені та виготовлені для "включення" та "вимкнення" на ланцюзі. Як випливає з назви, мова йде про діод з функцією перемикачання. Цей діод має продуктивність пропускаючого струму (ON), коли напруга подається в прямому напрямку, і зупиняючого (OFF) струму, коли напруга подається в зворотному напрямку. Порівняно з іншими діодами, час зворотного відновлення ( $t_{rr}$ ) є коротким. В основному використовуються в електронних комп'ютерах, імпульсах та комутаційних схемах.

Робота викладена на 30 сторінках, у тому числі включає 14 рисунків, список цитованої літератури із 25 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ТРАНЗИСТОРНИЙ КЛЮЧ, ЗАБОРОНЕНА ОБЛАСТЬ, ЕЛЕКТРОННИЙ КЛЮЧ НА ОСНОВІ ДІОДА, ПЕРЕМИКАЧАННЯ.

## ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1 ЕЛЕКТРОННІ КЛЮЧІ ЯК ЕЛЕМЕНТ ЕЛЕКТРОНІКИ</b> .....	5
1.1 Принцип дії електронного ключа.....	5
1.2 Розрахунок ключової схеми.....	6
1.3 Транзисторні ключі.....	9
<b>РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ НА ТРАНЗИСТОРАХ</b> .....	11
2.1 Області роботи транзисторного ключа .....	11
2.2 Граничні характеристика відрізаної області .....	13
2.3 Характеристики області насиченості .....	14
2.4 Застосування транзисторних ключів .....	16
2.5 Транзисторний ключ Дарлінгтона .....	18
<b>РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОННІ КЛЮЧІ НА ОСНОВІ ДІОДІВ</b> .....	22
3.1 Принцип роботи діодного ключа .....	22
3.2 Часова характеристика перемикання діодного ключа .....	24
3.3 Характеристика концентрації носія .....	24
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	28
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	29

## ВСТУП

Одним з основних елементів імпульсної та цифрової технології є ключовий пристрій. Ключові пристрої (ключі) служать для комутації (комутації) ланцюгів навантаження під впливом зовнішніх сигналів управління. Ключі включаються як окремі елементи в складні пристрої - тригери, мультивібратори тощо. Ключ може бути як у закритому, так і у відкритому стані. У закритому стані (ключ включений) опір ключа невеликий, через нього протікає великий струм і вся напруга джерела розподіляється на резистор  $R$  [1].

Вихідна напруга і вихід дорівнює нулю. У відкритому стані (ключ вимкнений) опір ключа нескінченно великий, тому струм через нього практично не протікає. Вихідна напруга та вихід дорівнює  $E$ . Тому при перемиканні ключа на виході створюються падіння напруги з амплітудою  $U_m = U$ .

Залежно від типу елемента, що використовується для комутації, ключові пристрої поділяються на:

- механічні;
- електромеханічні;
- електронні.

Прикладом механічного ключа є звичайний вимикач. Електромагнітне реле виконує функції електромеханічного ключа, який під впливом електричного керуючого сигналу здійснює комутаційні контакти.

Для побудови електронних ключів використовуються діоди, транзистори, електронні лампи тощо. Залежно від того, який пристрій використовується, виділяють діодні, транзисторні, лампові тощо.

При створенні транзисторних перемикачів використовуються біполярні або польові транзистори [2].

## РОЗДІЛ 1

### ЕЛЕКТРОННІ КЛЮЧІ ЯК ЕЛЕМЕНТ ЕЛЕКТРОНІКИ

#### 1.1 Принцип дії електронного ключа.

В якості основного прикладу розглянемо транзисторний перемикач, що використовує кремнієвий транзистор типу р-п-р. Такі ключі є одним з основних елементів інтегральних схем, вони також можуть бути реалізовані на дискретних елементах. Перехід на тип транзисторів п-р-п. Це зводиться лише до зміни полярності джерел живлення (у випадках, коли такий перехід пов'язаний із зміною ланцюга, вони обговорюються додатково) [2].

Найпоширенішим є транзисторний ключ за схемою із загальним емітером. Транзисторний перемикач може перебувати в одному з двох станів: OFF, коли транзистор закритий і перемикач відкритий, і ON, у цьому випадку транзистор відкритий і перемикач закритий.

Керування ключем здійснюється шляхом подачі на його вхід керуючої напруги. Стан увімкнення відповідає низькому позитивному вхідному рівню, а  $v = U_0$ . Увімкнений стан забезпечується високим позитивним вхідним рівнем, а  $v = 1$ .

Клавіша утримується в одному із станів, тоді як відповідний рівень сигналу зберігається на вході. Резистор  $R$  обмежує струм бази, джерело напруги колектора. Ключовий транзистор описаний із використанням сімейства вхідних та вихідних характеристик.

Особливістю вхідних характеристик кремнієвого транзистора є наявність досить великого порогу розблокування. Коли напруга на базі менше порога розблокування, транзистор завжди закритий.

Для аналізу роботи ключа на лінію навантаження застосовується сімейство вихідних характеристик, що відповідає певному опору резистора  $R_k$  та осям координат, що перетинаються в точках. При зміні базового струму робоча точка

рухається по цій прямій, визначаючи струм колектора, напругу між колектором і емітером і режим роботи транзистора в кожен момент часу [3].

## 1.2 Розрахунок ключової схеми

Ключовий каскад характеризується використанням транзистора у двох станах: насичення та відсікання. З станом насичення все ясно транзистор жорстко з'єднаний зі схемою і зовнішні фактори не впливають на нього. Що відбувається в стані відсікання транзистора, коли його база від'єднана від ланцюга, вони кажуть, що вона "зависла в повітрі". Оскільки ми постійно оточені електрикою, можуть виникати перешкоди у вигляді базових вихідних блукаючих струмів, а в транзисторі в результаті його роботи можуть бути внутрішні струми. У цьому випадку транзистор не буде повністю закритий, тому про всяк випадок між базою і емітером транзистора включається опір  $R_{BE}$ , який підібраний таким чином, щоб під час роботи падіння напруги на ньому не становило менше 0,6 проти . Це приймається приблизно в 10 разів більше базового опору. Приклад використання транзистора в ключовому режимі зображено на рис. 1.1.

Далі наведено приклад, який часто використовується при підключенні ключового каскаду до виходу мікросхем, де стандартна вихідна напруга становить +5 В.

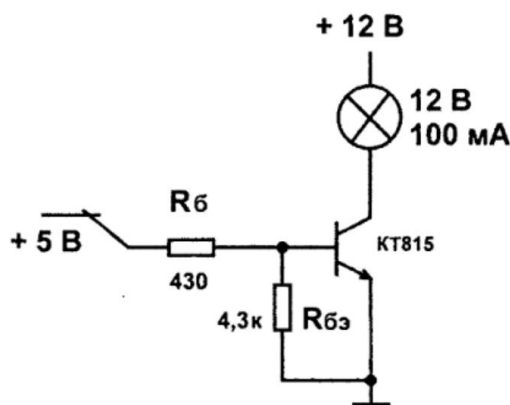


Рис. 1.1. Приклад використання транзистора в ключовому режимі [3]

Для опису схеми перетворення та складання її математичної моделі гілка з ключем замінюється активним опором  $R(t)$ , характер зміни часу, який визначається добутком опору ключа у відкритому стані (великий за величиною, але остаточний) за СФ, змінюючись від нуля до одиниці в моменти перемикання ключа [4].

Для зменшення введених помилок пристрої відбору проб і накопичувачі повинні мати невеликий прямий потік сигналу в режимі зберігання, низький рівень перешкод перемикання, аналогові керовані клавіші не повинні мати залишкової напруги, значні струми витоку у відкритому стані, опір ключа в закритому стані повинна бути мінімальною, полярність комутованого сигналу - будь-якою.

Кількість знаків коефіцієнта поділу визначається можливим діапазоном резисторів, оскільки щоб залишкові параметри клавіш не впливали, нижчий опір повинен становити 1–2 на порядок більше, ніж опір закритого ключа  $g_k$ , а більший опір повинен бути на 2-3 порядки менше, ніж опір відкритого ключа  $R_k$ .

Вхідна напруга  $U$  підключена до навантаження за допомогою імпульсів управління, які переводять транзистори  $T_1$  і  $T_n$  в режим глибокого насичення. Опір ключа різко падає, і напруга  $U$  надходить на вихід схеми. При ретельному підборі транзисторів комутатор може перемикати дуже малі сигнали з похибкою близько 20 мкВ в певному діапазоні температур [5].

Зворотній струм відкритого симетричного ключа дорівнює половині різниці зворотних струмів транзисторів. Опір замкненого ключа на германієвих транзисторах становить близько 10 Ом, на кремнію - 30 Ом. При використанні кремнієвих транзисторів зворотний струм комутатора не перевищує 0,1 мкА, а германію - 5 мкА.

Коли ключ  $K$  закритий, його опір визначається опором контакту переходу; коли ключ  $K$  відкритий, його опір визначається опором ізоляції ланцюга. На практиці опір замкнутого ключа дорівнює нулю, а відкритого - нескінченності.

Насправді опір ключа не може різко змінюватися від нуля до нескінченності, оскільки великі напруги між контактами ключа спричинять електричну іскру або електричну дугу між ними. Крім того, кожна котушка має розподілену ємність між оборотами, подібно до того, як є ємність між розбіжними контактами ключа.

Отже, процес перемикання відбувається за скінченний проміжок часу  $A_t$ , протягом якого швидкий процес переходу від моменту початку до моменту закінчення перемикання завершується. Цей перехідний процес, залежно від співвідношення параметрів, може бути аперіодичним або коливальним з дуже високою частотою, а різниця енергій  $W_M(-0) - W_M(0)$  витрачається в опорах ланцюга, зокрема в опорах між ключем контактів, або для випромінювання при дуже висока частота. Цей процес, який відбувається під час  $A_t$ , не розглядається в ідеалізації, зазначеній вище. Але якщо ми розглянемо це, тоді будуть справедливими фізичні умови перемикання, постійність струмів в котушках і напруг на конденсаторах, а також сталість енергій, що зберігаються в котушках і конденсаторах.

У схемі ЦАП із використанням транзисторних генераторів струму перемикання струму може відбуватися в колекторній ланцюзі. У цьому випадку опір ключа не вносить помітної помилки через високий опір ланцюга. Однак витoki заблокованого ключа можуть призвести до значних помилок. Загальний витік усіх заблокованих ключів не повинен перевищувати половини струму найменш значущого біта.

Наприклад, нелінійність опору ключа у відкритому стані та його залежність від температури можна послабити шляхом послідовного підключення резистора до ключа, опір якого набагато більше опору ключа. Опір польових транзисторів у відкритому стані зазвичай коливається від 50 до 200 Ом. Включення резистора з опором 2-5 кОм послідовно з транзистором практично виключає помилку, спричинену нелінійністю та температурною залежністю опору ключа.



Замикання ключа призводить до швидкого розряду конденсатора. Швидкість розряду залежить від опору ключа в закритому стані. Прямий шлях пилоподібної напруги в цьому ланцюзі формується при розімкненому вимикачі, а зворотний при замиканні вимикача. Таким чином, для реалізації цього принципу генератор повинен містити зарядний або розрядний пристрій, який інтегрує конденсатор і ключ [3].

У дельта-сигма-перетворювачах резистор і стабілізоване джерело опорної напруги також можуть використовуватися для формування імпульсів струму, оскільки точка підсумовування фактично знаходиться під потенціалом землі. У цьому випадку потрібно переконатися, що опір замкненого ключа менше опору резистора і зміни опору ключа не спричинять дрейфу.

### 1.3 Транзисторні ключі

Транзисторні ключі виконуються на біполярних або польових транзисторах. У свою чергу, клавiші на польових транзисторах поділяються на MOS-ключі та клавiші на польових транзисторах з керованим  $rg$ -переходом.

Ключі на біполярних транзисторах поділяються на насичені та ненасичені. При аналізі транзисторних ключів розглядаються два режими - статичний і динамічний.

У статичному режимі аналізується закритий і відкритий стан ключа. У закритому стані ключа на його вході знаходиться рівень низької напруги (логічний нульовий сигнал), при якому обидва переходи зміщуються в протилежному напрямку (режим відсікання). При цьому струм колектора визначається лише тепловим струмом [6]

При використанні ключа в логічних інтегральних схемах, в яких зазвичай використовуються транзистори типу n-p-n, блокуюча напруга є позитивною, і в цьому випадку існує лише "умовне" блокування транзистора, коли його емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, однак рівень напруги, що діє на його вході, менше порогового рівня близько 0,6 В, а струм колектора

транзистора відносно невеликий, тобто лише кілька відсотків струму відкритого транзистора.

У розімкнутому стані ключа на його вході високий рівень напруги (сигнал логічного блоку). У цьому випадку можливі два режими роботи відкритого транзистора - робота в лінійній області вихідної характеристики або в області насичення.

В активній області емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний - у протилежному, тоді як для кремнієвих транзисторів напруга на емітерному переході становить приблизно 0,7 В, а струм колектора майже лінійно залежить від струму бази .

В області насичення обидва переходи транзистора зміщені в прямому напрямку, і зміна струму бази не призводить до зміни струму колектора. Для кремнієвих ІС-транзисторів напруга на зміщеному вперед рп-переході становить близько 0,8 В, для германію - 0,2 ... 0,4 В.

Насиченість ключа досягається збільшенням струму бази. Однак при певному значенні, яке називається базовим струмом насичення, подальше збільшення базового струму практично не призводить до збільшення струму насичення колектора, тоді як напруга колектора (з урахуванням навантаження колектора) становить кілька десятків або сотні мілівольт (в ІС близько 0,1 ... 0,2 В) [7].

Недоліками ненасиченого транзисторного перемикача є наступні:

- падіння напруги на відкритому ключі більше, ніж у насиченому режимі (близько 0,5 В);
- імунітет погіршується, що пояснюється більшим вхідним імпедансом у відкритому стані, внаслідок чого різні перешкоди, наприклад, стрибки напруги живлення, призводять до змін напруги на транзисторі;
- температурна стабільність ненасиченого ключа набагато гірша, ніж у насиченого.

## РОЗДІЛ 2

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОННИХ КЛЮЧІВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

#### 2.1 Области работы транзисторного ключа

Транзисторні ключі можуть використовуватися для ввімкнення або вимкнення пристрою постійного струму низької напруги (наприклад, світлодіодів) за допомогою транзистора в його насиченому або відключеному стані як показано на рис. 2.1.

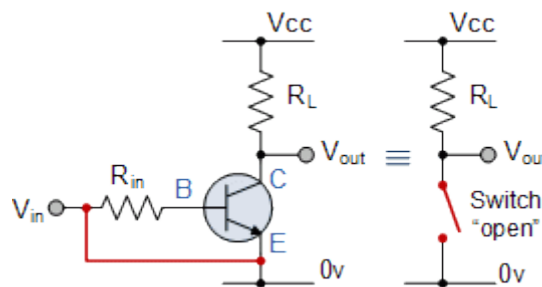


Рис.2.1. Відображення роботи транзисторного ключа [8]

При використанні в якості підсилювача сигналу змінного струму напруга зміщення базової напруги транзисторів подається таким чином, що воно завжди працює в межах своєї «активної» області, тобто використовується лінійна частина кривих вихідних характеристик.

Однак і біполярні транзистори типу NPN і PNP можуть бути змушені працювати як твердотільний перемикач типу «ON та OFF», зміщуючи базовий термінал транзисторів інакше, ніж для підсилювача сигналу.

Твердотільні ключі є однією з основних програм використання транзистора для перемикання виходу постійного струму в положення «УВІМК.» або «ВИМК.». Деякі вихідні пристрої, такі як світлодіоди, потребують лише декількох міліампер на логічному рівні напруги постійного струму, і тому можуть керуватися безпосередньо виходом логічного затвора.

Однак пристрої високої потужності, такі як двигуни, соленоїди або лампи, часто вимагають більшої потужності, ніж потужність, яку подають звичайні логічні затвори, тому використовуються транзисторні перемикачі.

Якщо в схемі використовується біполярний транзистор як перемикач, то зміщення транзистора, або NPN, або PNP, влаштоване для роботи транзистора з обох сторін [9].

Області роботи транзисторного перемикача відомі як насичення і зріз. Тоді це означає, що ми можемо ігнорувати діючі схеми зміщення точки Q і схеми дільника напруги, необхідні для підсилення, і використовувати транзистор як перемикач, рухаючи його вперед-назад між його “повністю вимкненим” (відсіканням) та “повністю ON” (насиченість), як показано на рис. 2.2.

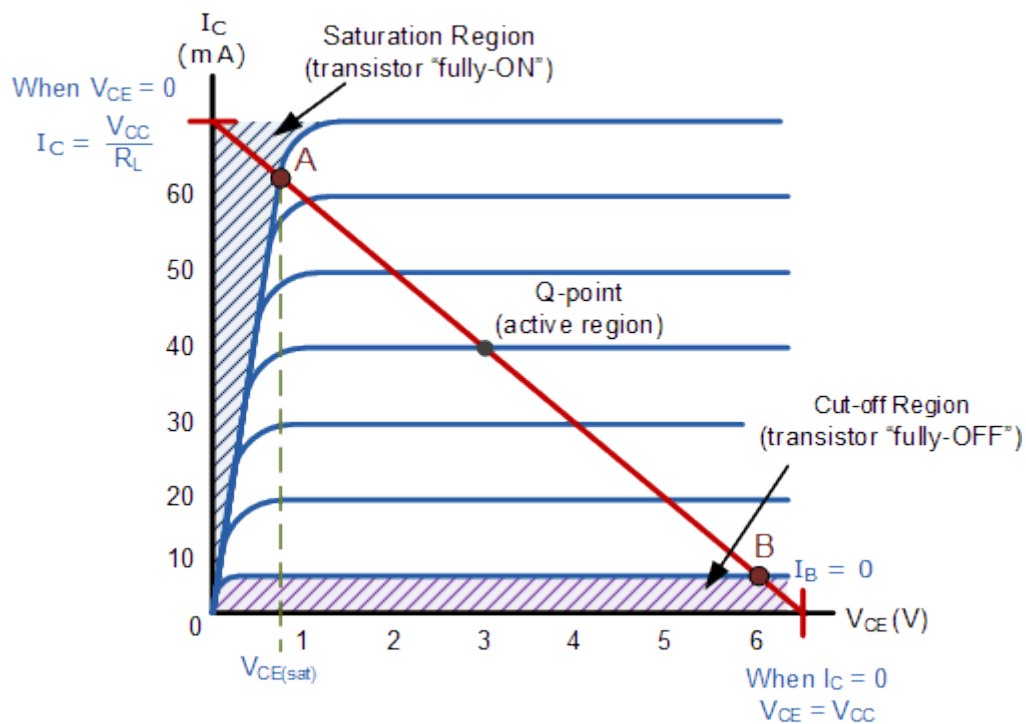


Рис. 2.2. Області що працюють в транзисторному ключі [9]

Рожева затінена область внизу кривих представляє область “відсікання”, а синя область ліворуч область “насичення” транзистора. Обидві ці транзисторні області визначаються як відрізна область та область насичення.

## 2.2 Граничні характеристика відрізаної області

Тут робочими умовами транзистора є нульовий вхідний базовий струм ( $I_B$ ), нульовий вихідний струм колектора ( $I_C$ ) і максимальна напруга колектора ( $V_{CE}$ ), що призводить до великого шару виснаження і відсутності струму, що протікає через пристрій. Тому транзистор вимикається «повністю вимкнено». На рис. 2.3. зображено транзистор в відрізаної області.

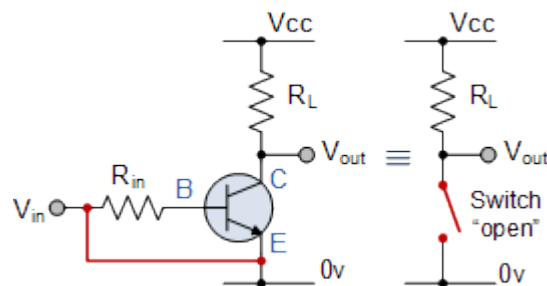


Рис. 2.3. Транзистор в відрізаної області в відкритому стані [10]

Граничні характеристики:

- вхід і основа заземлені (0В);
- напруга базового випромінювача  $V_{BE} < 0,7\text{В}$ ;
- базовий перехід випромінювач зміщений у зворотному напрямку;
- базовий перехід колектор має зворотний зсув;
- транзистор «повністю вимкнений» (область відсічення);
- не протікає струм колектора ( $I_C = 0$ );
- $V_{OUT} = V_{CE} = V_{CC} = "1"$ ;
- транзистор працює як відкритий.

Тоді ми можемо визначити “область відсічення” або “режим вимкнення” при використанні біполярного транзистора як перемикача як, обидва переходи зворотно зміщені,  $V_B < 0,7$  в та  $I_C = 0$ . Для транзистора PNP потенціал емітера повинен бути від’ємним щодо бази.

### 2.3 Характеристики області насиченості

Тут транзистор буде зміщений таким чином, що подається максимальна величина базового струму, в результаті чого максимальний струм колектора призводить до мінімального падіння напруги колекторного випромінювача, в результаті чого шар виснаження стає якомога меншим, а максимальний струм протікає через транзистор. Тому транзистор увімкнено "повністю увімкнено".

На рис. 2.4. зображено транзистор в області насиченості [10].

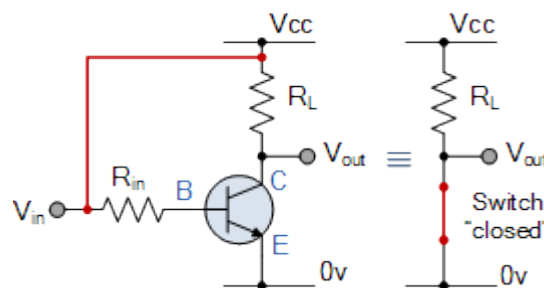


Рис. 2.4. Транзистор в області насиченості в відкритому стані [11]

Характеристики насиченості:

- вхід і база підключені до  $V_{CC}$ ;
- напруга базового випромінювача  $V_{BE} > 0,7V$ ;
- перехід базовий випромінювач зміщений вперед;
- перехід база-колектор зміщений вперед;
- транзистор «повністю увімкнений» (область насичення);
- максимальний струм колектора ( $I_C = V_{CC} / R_L$ );
- $V_{CE} = 0$  (ідеальна насиченість);
- $V_{OUT} = V_{CE} = "0"$ ;
- транзистор працює як «закритий вимикач».

Тоді можна визначити "область насичення" або "режим увімкнення" при використанні біполярного транзистора як перемикача як, обидва переходи вперед зміщені,  $V_B > 0,7V$  та  $I_C = \text{максимум}$ . Для транзистора PNP потенціал емітера повинен бути позитивним щодо бази.

Тоді транзистор працює як “однополюсний одноходовий” (SPST) твердотільний перемикач. При подачі нульового сигналу на основу транзистора він вимикається, діючи як розімкнений перемикач, і струм колектора нуля тече. При позитивному сигналі, поданому на базу транзистора, він вмикається, діючи як замкнутий перемикач, і максимальний струм ланцюга протікає через пристрій.

Найпростіший спосіб переключення помірного на великі обсяги живлення - це використання транзистора з вихідним колектором з відкритим колектором і висновок транзистора емітера, підключений безпосередньо до землі. При такому використанні транзистори з відкритим колекторним виходом можуть таким чином «опустити» напругу, що подається зовні, на землю, тим самим контролюючи будь-яке підключене навантаження [10].

Приклад транзистора NPN як перемикача, що використовується для роботи реле, наведено нижче. При індуктивних навантаженнях, таких як реле або соленоїди, по всьому навантаженню розміщується діод маховика, щоб розсіяти задню ЕРС, створювану індуктивним навантаженням, коли транзистор вимикається і виключає захист транзистора від пошкоджень. Якщо навантаження має дуже сильний струм або характер напруги, наприклад, двигуни, нагрівачі тощо, тоді струм навантаження можна контролювати за допомогою відповідного реле, як показано на рис. 2.5.

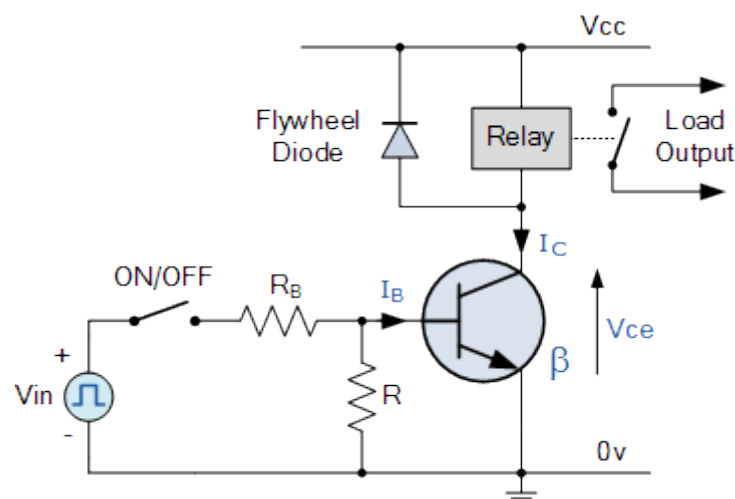


Рис. 2.5. Основна схема комутації транзисторів NPN [12]

Схема нагадує схему загального випромінювача, цього разу різниця полягає в тому, що для роботи транзистора як ключа транзистор повинен бути повністю вимкнений (відключений) або повністю увімкнений (насичений).

Ідеальний транзисторний ключ мав би нескінченний опір ланцюга між колектором та емітером, коли його вимкнено "повністю", в результаті чого через нього протікає нульовий струм і нульовий опір між колектором та емітером при включенні "повністю", що призводить до максимального струму струму.

На практиці, коли транзистор вимкнено, через транзистор протікають невеликі струми витоку, і коли він повністю увімкнений, пристрій має низьке значення опору, що спричиняє малу напругу насичення ( $V_{CE}$ ) на ньому. Незважаючи на те, що транзистор не є ідеальним перемикачем, як в області відсічення, так і для насичення потужність, що розсіюється транзистором, є мінімальною [13]

Щоб базовий струм протікав, вхід бази повинен бути більш позитивним, ніж емітер, збільшуючи його вище 0,7 Вольт, необхідних для кремнієвого пристрою. Змінюючи напругу базового випромінювача  $V_{BE}$ , струм бази також змінюється, що в свою чергу, контролює величину струму колектора, що протікає через транзистор, як було обговорено раніше.

Коли протікає максимальний струм колектора, транзистор називається насиченим. Значення базового резистора визначає, наскільки необхідна вхідна напруга та відповідний струм бази для повного увімкнення транзистора.

## **2.4 Застосування транзисторних ключів**

Транзисторні ключі використовуються для широкого спектру застосувань, таких як з'єднання пристроїв великого струму або високої напруги, таких як двигуни, реле або лампи, з низьковольтними цифровими мікросхемами або логічними затворами, такими як I, або АБО.



Тут вихідний сигнал від цифрового логічного затвора становить лише +5В, але пристрій, яким потрібно керувати, може вимагати живлення 12 або навіть 24 В. Або навантаженню, такому як двигун постійного струму, може знадобитися контроль швидкості за допомогою серії імпульсів (модуляція ширини імпульсу). Транзисторні ключі дозволяють робити це швидше і простіше, ніж із звичайними механічними перемикачами. На рис.2.6. зображено приклад такого використання.

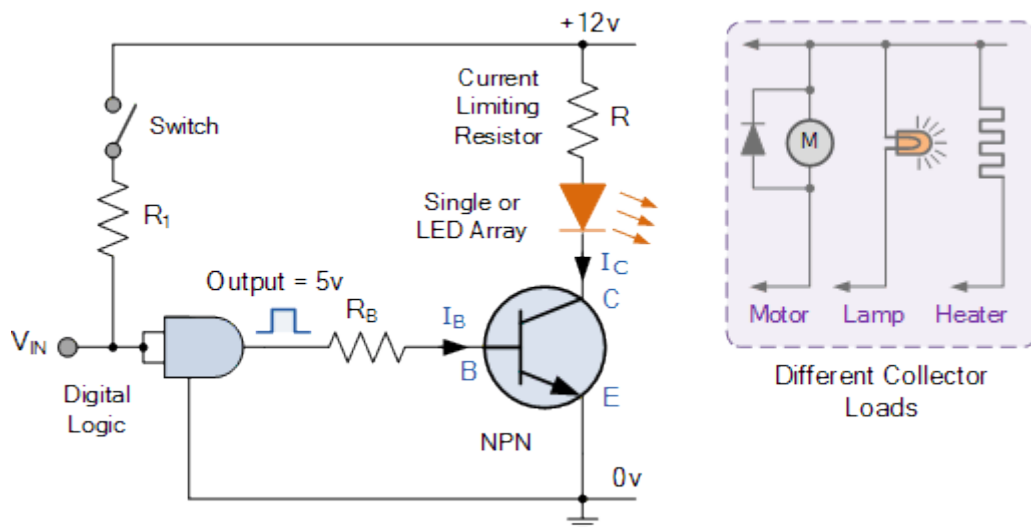


Рис.2.6. Цифровий логічний транзисторний перемикач [14]

Базовий резистор  $R_B$  необхідний для обмеження вихідного струму від логічного затвора.

Можна використовувати PNP-транзистори як перемикач, різниця цього разу полягає в тому, що навантаження підключено до землі (0В), а транзистор PNP перемикає на нього живлення. Щоб увімкнути транзистор PNP, що працює як перемикач «ON», базовий термінал підключений до заземлення або нульових вольт (LOW), як показано на рис. 2.7.

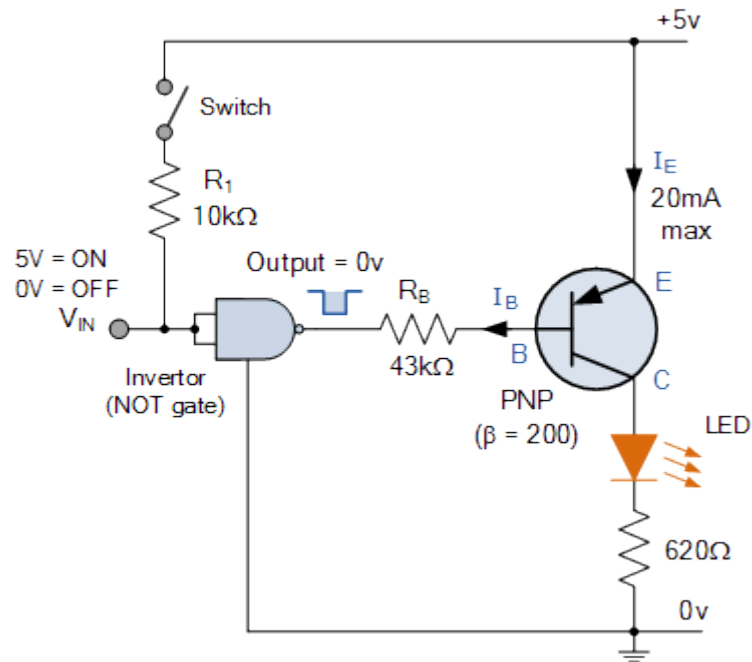


Рис. 2.7. Транзисторна комутаційна схема PNP [15]

Рівняння для розрахунку опору бази, струму колектора та напруги точно такі ж, як і для попереднього транзисторного перемикача NPN. Цього разу різниця полягає в тому, що ми перемикаємо потужність за допомогою транзистора PNP (джерело струму) замість того, щоб перемикати землю транзистором NPN (струм потоку) [14, 15].

## 2.5. Транзисторний ключ Дарлінгтона

Іноді коефіцієнт підсилення струму постійного струму біполярного транзистора занадто низький, щоб безпосередньо перемикати струм навантаження або напругу, тому використовуються багаторазові комутуючі транзистори [16]

Тут один невеликий вхідний транзистор використовується для увімкнення або вимкнення набагато більшого вихідного транзистора. Щоб максимізувати коефіцієнт посилення сигналу, два транзистори з'єднані в "додаткову конфігурацію посилення" або те, що частіше називають "конфігурацією

Дарлінгтона ", якщо коефіцієнт посилення є продуктом двох окремих транзисторів.

Транзистори Дарлінгтона просто містять два окремі біполярні транзистори типу NPN або PNP, з'єднані між собою, так що коефіцієнт посилення струму першого транзистора помножується на коефіцієнт посилення струму другого транзистора, щоб створити пристрій, який діє як один транзистор з дуже високим струмом коефіцієнт підсилення для набагато меншого базового струму.

Загальний коефіцієнт посилення струму, бета ( $\beta$ ) або значення  $h_{fe}$  пристрою Дарлінгтона, є добутком двох окремих коефіцієнтів посилення транзисторів і подається як:

$$\beta_{\text{TOTAL}} = \beta_1 \times \beta_2 \quad (2.1)$$

Отже, транзистори Дарлінгтона з дуже високими значеннями  $\beta$  і високими струмами колектора можливі порівняно з одним транзисторним ключем. Наприклад, якщо перший вхідний транзистор має коефіцієнт посилення струму 100, а другий комутуючий транзистор - коефіцієнт посилення 50, тоді загальний коефіцієнт посилення струму буде  $100 * 50 = 5000$ .

Так, наприклад, якщо наш струм навантаження зверху становить 200 мА, тоді базовий струм Дарлінгтона становить лише  $200\text{mA} / 5000 = 40\mu\text{A}$ . Величезне скорочення від попереднього 1 мА для одного транзистора.

Приклад двох основних типів конфігурацій транзисторів Дарлінгтона наведено на рис.2.8.

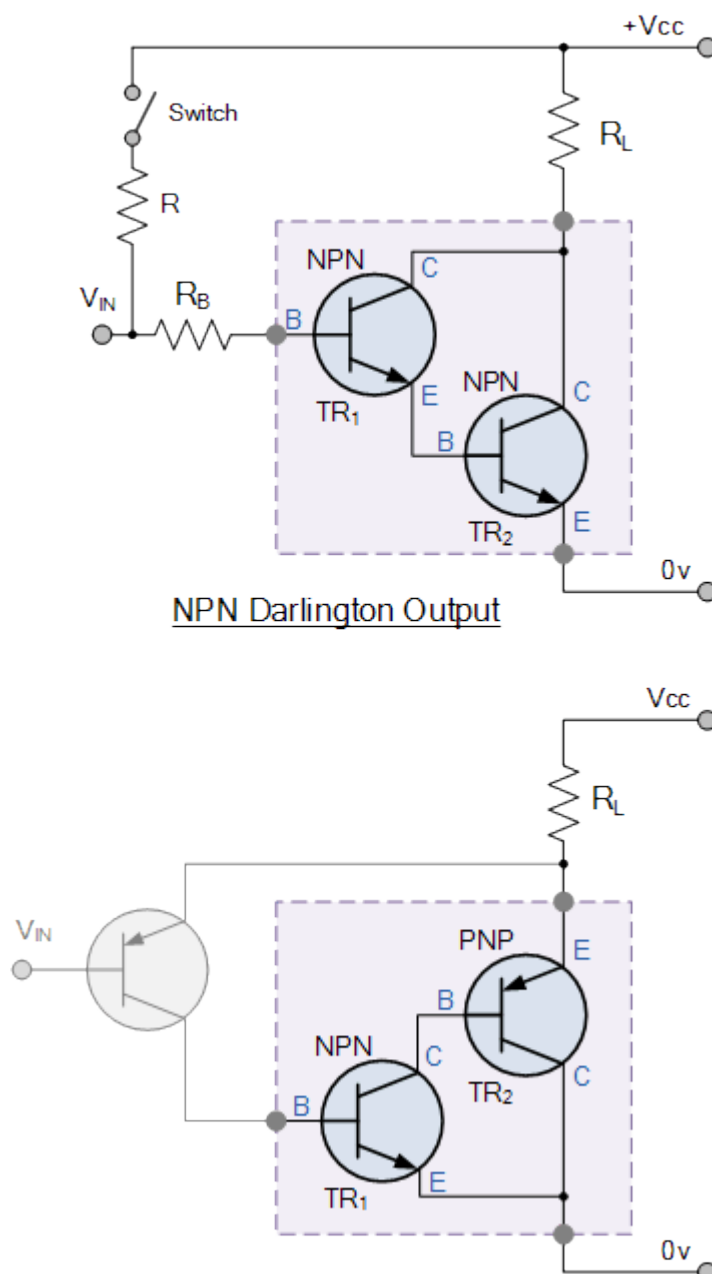


Рис.2.8. Транзисторні конфігурації Дарлінгтона [17]

Вищевказана конфігурація транзисторного перемикача NPN Дарлінгтона показує колектори двох транзисторів, з'єднаних разом з емітером першого транзистора, підключеним до базової клеми другого транзистора, отже, струм емітера першого транзистора стає базовим струмом другого транзисторного комутатора.

Перший або «вхідний» транзистор приймає вхідний сигнал на свою базу. Цей транзистор підсилює його звичайним способом і використовує для керування другими більшими «вихідними» транзисторами. Другий транзистор

знову посилює сигнал, що призводить до дуже великого коефіцієнта посилення струму. Однією з основних характеристик транзисторів Дарлінгтона є їх високий коефіцієнт посилення струму в порівнянні з одинарними біполярними транзисторами [18]

Окрім високих збільшених можливостей перемикання струму та напруги, ще однією перевагою «транзисторного перемикача Дарлінгтона» є його висока швидкість перемикання, що робить їх ідеальними для використання в схемах інвертора, освітлювальних ланцюгах та додатках управління двигуном постійного струму або крокових двигунів.

Однією різницею, яку слід враховувати при використанні транзисторів Дарлінгтона порівняно із звичайними одинарними біполярними типами при використанні транзистора як комутатора, є те, що вхідна напруга базового випромінювача ( $V_{BE}$ ) повинна бути вищою приблизно на 1,4В для кремнієвих пристроїв через послідовне підключення двох переходів PN.

Тоді для підведення підсумків при використанні транзистора як ключа застосовуються такі умови:

- транзисторні ключі можуть використовуватися для перемикання та управління лампами, реле або навіть двигунами;
- при використанні біполярного транзистора як ключа вони повинні бути або «повністю вимкнені», або «повністю ввімкнені»;
- транзистори, які повністю увімкнені, знаходяться в своїй області насичення;

## РОЗДІЛ 3

### ЕЛЕКТРОННІ КЛЮЧІ НА ОСНОВІ ДІОДІВ

#### 3.1 Принцип роботи діодного ключа

Значного збільшення ключових характеристик можна досягти лише при використанні діодів, що мають короткий час відновлення. Якщо використовувати низькочастотні діоди, в яких час поглинання заряду, накопиченого в основі, великий, тоді ефект від введення нелінійного зворотного зв'язку буде незначним. У цьому випадку діоди Шотткі незамінні. Вони мають короткий час відновлення (не більше 0,1 нс), низьку напругу вивільнення (близько 0,25 В) і невеликий опір у відкритому стані (близько 10 Ом). При використанні діодів Шотткі немає необхідності вводити додаткову напругу зміщення. Це пов'язано з тим, що діод розблоковується при меншій нарузі між колектором і базою, коли транзистор все ще знаходиться на межі активного режиму.

Діод - це два термінальних PN-переходи, які можуть бути використані в різних додатках. Одним з таких застосувань є електронний ключ. PN-перехід, коли зміщений вперед діє як розімкнутий ланцюг, а коли зворотний зміщений діє як розімкнутий.

Таким чином, зміна прямого і зворотного упереджених станів робить діод, електронним ключем, на передньому будучи ON і зворотне істота OFF стану.

На рис. 3.1 зображено зовнішній вигляд діода.



Рис.3.1. Напівпровідниковий діод [19]

Переваги електронних ключів над механічними:

- механічні ключі схильні до окислення металів, тоді як електричні – ні;
- механічні ключі мають рухомі контакти;
- вони більш схильні до напружень і навантажень, ніж електронні ключі;
- зношені та розірвані механічні ключі часто впливають на їх роботу;

Отже, електронний ключ корисніший за механічний.

Як тільки перевищується задана напруга, опір діода збільшується, роблячи діод зворотним упередженням, і він діє як розімкнений перемикач. Всякий раз, коли напруга нижче опорної напруги, опір діода зменшується, що робить діод упередженням, і він діє як замкнений вимикач.

Наступна схема рис. 3.2 пояснює діод, що діє як перемикач.

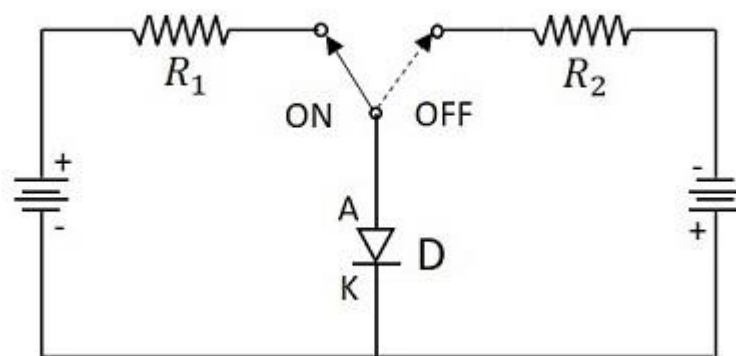


Рис.3.2. Діод в якості електронного ключа [20]

Комутаційний діод має PN-з'єднання, в якому P-область легується злегка, а N-область сильно легується. Вищезазначена схема символізує, що діод вмикається, коли позитивна напруга зміщує діод і вимикається, коли негативна напруга зміщує діод.

Оскільки прямий струм тече до тих пір, при раптовій зворотній напрузі зворотний струм протікає, наприклад, замість того, щоб негайно його вимкнути. Чим вище струм витоку, тим більші втрати. Потік зворотного струму, коли раптом діод зміщується з зворотним зсувом, іноді може створювати незначні коливання.

Цей стан є втратою, а отже, його слід мінімізувати. Для цього слід розуміти час перемикання діода.

### **3.2 Часова характеристика перемикання діодного ключа**

Змінюючи умови зміщення, діод піддається тимчасовій реакції. Реакція системи на будь-які раптові зміни з положення рівноваги називається перехідною реакцією. [21]

Раптова зміна з прямого на реверсний і з реверсного на вперед зміщення впливає на схему. Час, необхідний для реагування на такі раптові зміни, є важливим критерієм для визначення ефективності електричного вимикача.

Час, необхідний для відновлення стаціонарного стану діода, називається часом відновлення. Часовий інтервал, який приймає діод для переключення із зворотного зміщеного стану в зміщений стан, називається часом відновлення вперед. Часовий інтервал, який приймає діод для переключення із зміщеного вперед стану в зміщений, називається зворотним часом відновлення.

Щоб зрозуміти це чіткіше, спробуємо проаналізувати, що відбувається, коли напруга подається на комутуючий діод PN.

### **3.3. Характеристика концентрації носія**

Концентрація носія заряду меншості експоненційно зменшується, якщо дивитись подалі від місця переходу.

Коли подається напруга, внаслідок упередженого стану більшість несучих однієї сторони рухаються до іншої. Вони стають носіями меншості іншої сторони. Ця концентрація буде більшою на стику.

Наприклад, якщо враховувати N-тип, надлишок отворів, що потрапляє в N-тип після застосування прямого зміщення, додає до вже наявних незначних носіїв матеріалу N-типу.



Під час упередженого стану вперед - носії меншості знаходяться ближче до розв'язки і менш віддалені від розв'язки. Графік рис.3.3. нижче пояснює це.

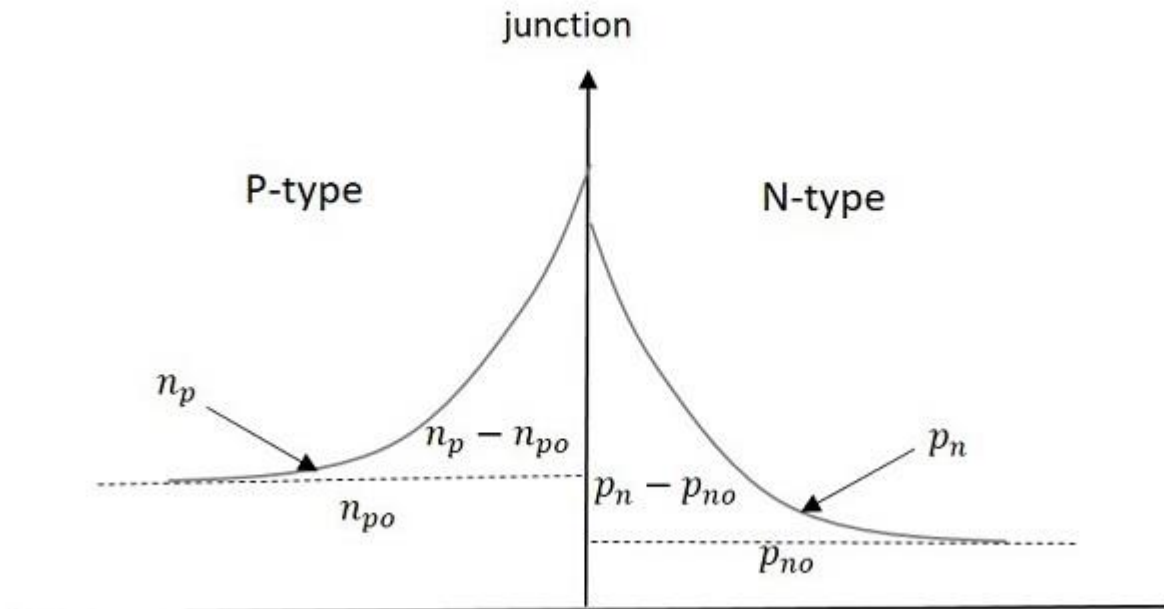


Рис. 3.3. Характеристика концентрації носіїв в діодному ключі [22]

Під час зворотного зміщення - більшість носіїв не проводять струм через перехід і, отже, не беруть участі в поточному стані. Комутаційний діод поводить себе як коротке замикання, наприклад, у зворотному напрямку.

Носії меншості перетнуть перехрестя і проведуть струм, який називається зворотним струмом насичення.

Наступний графік рис. 3.4. представляє стан під час зворотного зміщення.

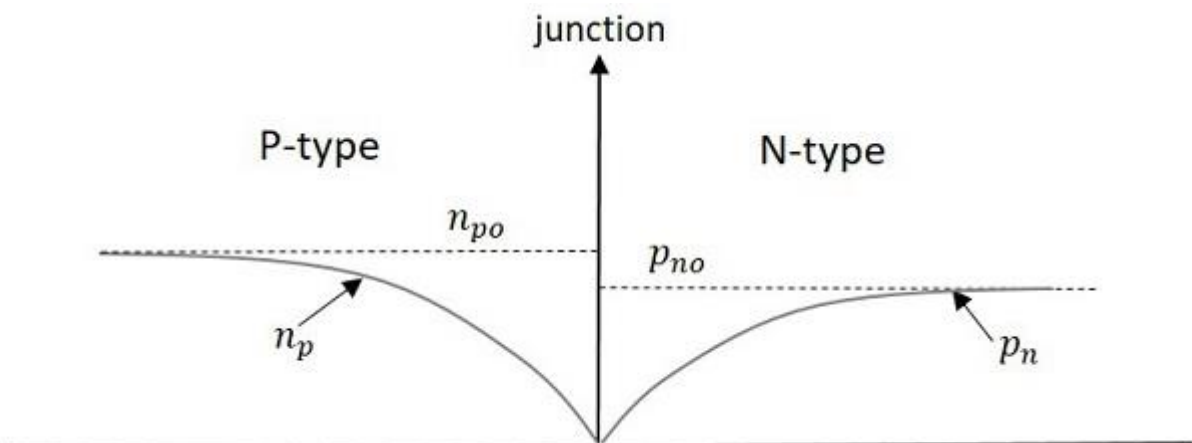


Рис.3.4. Характеристика зворотнього зміщення діодного ключа [23]

На рис.3.4 пунктирною лінією представлено значення рівноваги, а суцільні - фактичні значення. Оскільки сила струму, обумовлена незначними носіями заряду, є достатньо великою для проведення, ланцюг буде ввімкнено, поки цей надлишковий заряд не буде знятий.

Час, необхідний для зміни діода з прямого зміщення на зворотний, називається зворотним часом відновлення. На наступних графіках рис. 3.5. детально пояснюється час перемикання діодів.

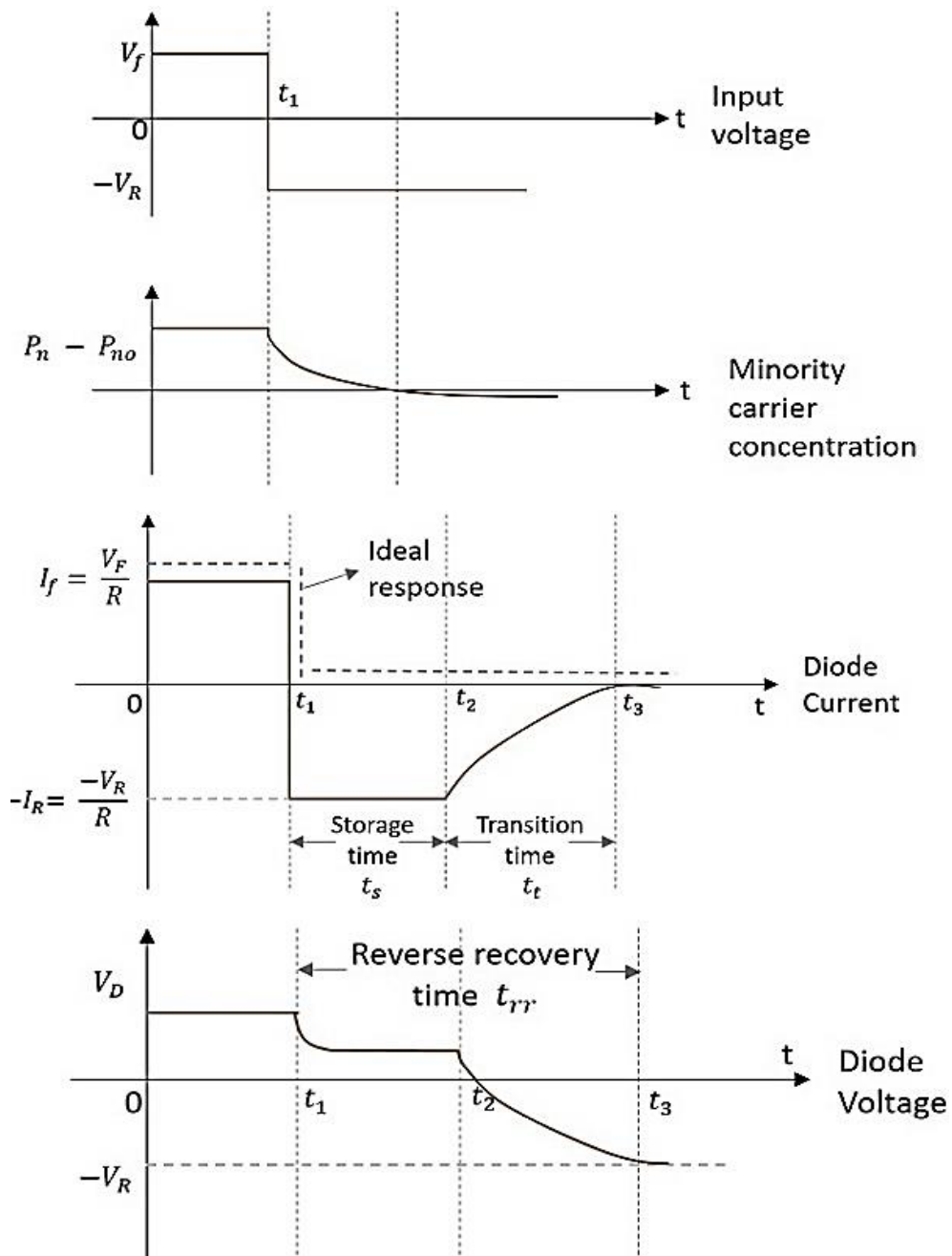


Рис.3.5. Часова характеристика діодного ключа [24]

З наведеного рис. 3.5 розглянемо графік струму діода.

Діод раптово переведений у вимкнений стан із стану увімк, він відомий як час зберігання.

Час зберігання - це час, необхідний для зняття надлишкової енергії міноритарного оператора. Негативний струм, що протікає від матеріалу типу N до P, має значну кількість під час зберігання.

Час переходу - це час, протягом якого діод повністю приходить в стан розімкнутої ланцюга. Після цього діод буде в стаціонарному стані з зворотним зміщенням.

Раніше діод знаходиться в стаціонарному стані зміщення вперед.

Тоді як для переходу в стан увімкнено з вимкнено, потрібно менше часу, що називається часом відновлення вперед. Зворотний час відновлення більше, ніж час відновлення вперед. Діод працює як кращий перемикач, якщо зменшити цей час зворотного відновлення [25]

Час зберігання - час, протягом якого діод залишається в стані провідності навіть у зворотно зміщеному стані, називається часом зберігання.

Час переходу - час, що минув при поверненні до стану непровідності, тобто зворотного зміщення стаціонарного стану, називається часом переходу.

Зворотний час відновлення - Час, необхідний для зміни діода з зміщення вперед на зворотне зміщення, називається зворотним часом відновлення .

Час відновлення вперед - час, необхідний для зміни діода із зворотного зміщення на зміщення вперед, називається часом відновлення вперед.

## ВИСНОВКИ

На даному етапі проведеної роботи при використанні транзистора як ключа можна зробити наступні висновки:

1. Транзисторні ключі можуть використовуватися для перемикання та управління лампами, реле або навіть двигунами. При використанні біполярного транзистора як ключа вони повинні бути або «повністю вимкнені», або «повністю увімкнені». Транзистори, які повністю увімкнені, знаходяться в своїй області насичення, а транзистори, які повністю «вимкнені», знаходяться в своїй відсічній області;

2. При використанні транзистора як ключа, малий базовий струм контролює набагато більший струм навантаження колектора. При використанні транзисторного ключа для індуктивних навантажень, таких як реле та соленоїди, використовується "маховик". Коли ж потрібно контролювати великі струми або напруги, можна використовувати транзистори Дарлінгтона.

3. На характеристики часу діодних ключів впливають такі фактори як: ємність діодів - ємність переходу PN змінюється залежно від умов зміщення; діодний опір - опір, який діод пропонує для зміни свого стану; концентрація допінгу - рівень легування діода впливає на час перемикання діода; ширина виснаження - чим вужча ширина шару виснаження, тим швидше буде перемикання. Стабілітрон має вузьку область виснаження, ніж лавинний діод, що робить перший кращим перемикачем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Garver, Robert V., "Microwave Control Devices," Artech House, Inc., Dedham, MA., 2006.
2. Mortenson, K.E., and Borrego, J.M., "Design Performance and Application of Microwave Semiconductor Control Components," Artech House, Inc, Dedham, MA, 2002.
3. Watson, H.A., "Microwave Semiconductor Devices and their Circuit Applications." McGraw Hill Book Co., New York, NY., 2009.
4. White, Joseph F., "Semiconductor Control," Artech House, Inc., Dedham, MA., 2007.
5. Caverly, R.H., Hiller, G., "Distortion in PIN Diode Control Circuits" IEEE Trans MIT, May 2007.
6. Hiller, G., Caverly, R.H., "Establishing Reverse Bias for PIN Diodes in High Power Switches," IEEE Trans MIT, Dec. 2000.
7. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, Wiley-Interscience, NY, 2001
8. Sze, S. M., Modern Semiconductor Device Physics, John Wiley & Sons, NY, 2008
9. The Forward Characteristic of Silicon Power Rectifiers at High Current Densities Herlet, A., Solid-State Electronics Vol. 11, No. 8, pp. 717-742, 2008
10. Notes on the Forward Characteristic of Power Rectifiers Spence, E. , Solid-State Electronics Vol. 11, No. 12 pp. 1119-1130, Dec. 2008
11. Microwave Semiconductor Engineering, White, J., F., pp. 62-66, J. F. White Publications, Inc., East Orleans, Massachusetts, 2005
12. Microsemi Corp.-Watertown·580 Pleasant St., Watertown, MA 02472·Tel. (617) 926-0404·Fax. (617) 924, 2008
13. Varactor Applications, Penfield, P., Jr., and Rafuse, R. P., The M. I. T. Press Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 2002

14. Microwave Semiconductor Engineering, White, J., F., pp. 43-45, J. F. White Publications, Inc., East Orleans, Massachusetts, 2005
15. Switching Processes in Diffused Rectifiers - I. Theory Benda, H., and Dannhauser, Solid-State Electronics Vol. 11, No. 1, pp. 1-12, Jan. 2008
16. Switching Processes in Diffused Rectifiers - II. Experiment Porst, A., and Schuster, K., Solid State Electronics Vol. 11, No. 1, pp. 13-24, Jan. 2008
17. W.E. Doherty, Jr and R. D. Joos, "PIN Diodes Offer High-Power HF-Band Switching", Microwaves & RF, Vol 32, No. 12, pp 119-128, December 2003
18. P.C. Basile et al, "Solid State Antenna Tuning", RCA Review, December 2001, pp. 752-769.
19. M. Caulton et al, "PIN Diodes for Low Frequency, High Power Switching Applications", IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, June 2002, pp 875-881.
20. Technical Correspondence Section, QST, Sept. 2004, pp 71-74
21. ARRL Handbook For Radio Amateurs, American Radio Relay League, Inc., Newington CT, 2001, p 19-8
22. Reference Data For Radio Engineers, H. W. Sams & Co., A Subsidiary of ITT, NY, 2009,
23. Digital Communications, Fundamentals and Applications, Bernard Sklar, Prentice Hall, 2008, Ch 7
24. Telecommunication Circuit Design, Patrick D. van der Puije, John Wiley & Sons, Inc., 2002, Ch.2
25. Telecommunication Transmision Handbook, Roger L. Freeman, John Wiley & Sons, 2001, Ch 4.