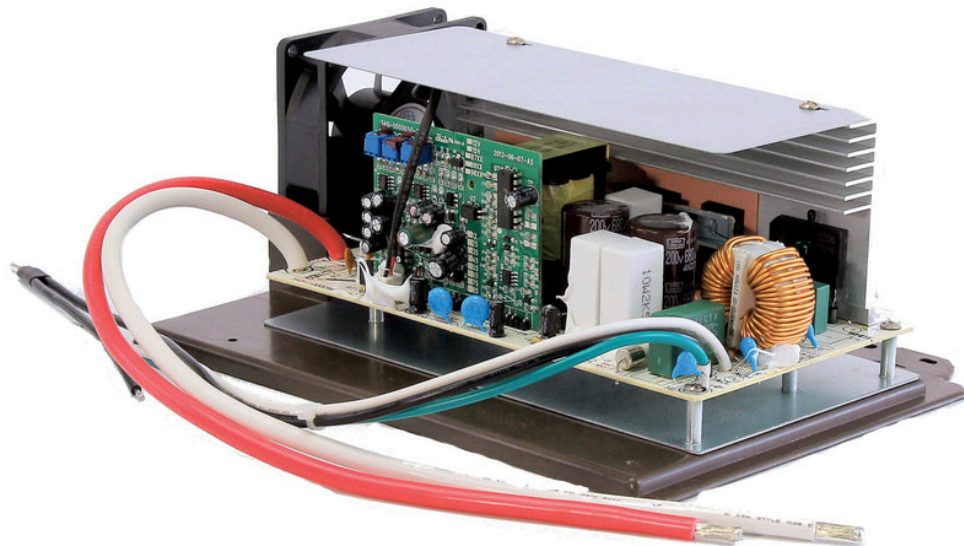


**Методичні вказівки**  
**до виконання лабораторної роботи**  
**на тему: «Силові напівпровідникові ключі в**  
**перетворювальній техніці»**  
**з дисципліни «Силова електроніка і перетворювальна техніка»**  
**для студентів спеціальності**  
**«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки**  
**до виконання лабораторної роботи**  
**на тему: «Силові напівпровідникові ключі в**  
**перетворювальній техніці»**  
**з дисципліни «Силова електроніка і перетворювальна техніка»**  
**для студентів спеціальності**  
**«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Вінниця  
ВНТУ  
2025

Рекомендовано до видання Радою з якості освіти Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 21.06. 2024 р.)

Рецензенти:

**О. Є. Рубаненко**, кандидат технічних наук, доцент

**Ю. Г. Ведміцький**, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи на тему: «Силові напівпровідникові ключі в перетворювальній техніці» з дисципліни «Силова електроніка і перетворювальна техніка» для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад: А. М. Коваль, О. А. Жуков. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 53 с.)

У методичних вказівках викладено підходи проектування, моделювання та експериментальних досліджень силових електронних пристроїв. Наведено основні теоретичні відомості про напівпровідникові діоди, тиристори SCR, силові біполярні транзистори (Power BJT), силові польові транзистори (Power MOSFET), силові біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT).

Призначені для студентів спеціальності «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка».

## Зміст

ВСТУП.....	4
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
1.1 Загальні відомості про напівпровідникові ключі.....	5
1.2 Напівпровідникові діоди .....	7
1.3 Тиристори.....	10
1.4 Силові біполярні транзистори (Power BJT – Power Bipolar Junction Transistors).....	14
1.5 Силові польові транзистори (Power MOSFET – Power metal–oxide–semiconductor field-effect transistor) .....	18
1.6 Біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT – Insulated-gate bipolar transistor).....	23
1.7 Методика оцінювання втрат в напівпровідникових ключах .....	28
2 ПРОГРАМА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ.....	31
Література .....	46
Додаток А Протокол виконання лабораторної роботи .....	47

## Вступ

Методичні вказівки призначені для проведення лабораторних робіт з дисципліни «Силова електроніка і перетворювальна техніка» студентами спеціальності 141 «Електроенергетика електротехніка та електромеханіка».

В лабораторній роботі висвітлені питання моделювання та експериментального дослідження силових електронних пристроїв на базі напівпровідникових діодів, тиристорів SCR, силових біполярних транзисторів (Power BJT), силових польових транзисторів (Power MOSFET), силових біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT). Для дослідження електронних схем використовуються сучасні програмний продукт Micro-Cap, який дозволяє здійснити моделювання пристроїв, отримати відповідні графіки і порівняти їх з теоретичними положеннями.

Наведено основні теоретичні відомості про електронні компоненти, які використовуються в лабораторній роботі, наведені їх характеристики та діаграми роботи. Це дозволяє студенту швидко підготуватись до лабораторного заняття без використання додаткової літератури. До кожного завдання лабораторної роботи наведено приклад виконання з достатніми поясненнями відносно теоретичної та практичної частини. Також викладач в залежності від кількості годин, що відводиться на лабораторні заняття та рівня підготовки студентів, може, при необхідності, дати додаткові завдання або навпаки зменшити об'єм роботи. При підготовці до лабораторних робіт студентам пропонується вивчити теоретичний матеріал, що стосується теми заняття, та здійснити моделювання запропонованих схем, на занятті обговорити результати моделювання, незрозумілі моменти чи помилки, допущені в ході комп'ютерного моделювання, а час, що залишився, присвятити експериментальному дослідженню силових електронних пристроїв.

Приведено основні дані про відповідні елементи необхідні для побудови схем дослідження запропонованих пристроїв. Разом із самостійними випробуваннями передбачається аналіз отриманих результатів та порівняння їх з теоретичними положеннями і моделюванням.

# 1 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

## 1.1 Загальні відомості про напівпровідникові ключі

Силова електроніка - це галузь електроніки, що займається перетворенням та керуванням електричною енергією. Вона включає в себе дослідження, розробку, конструювання та застосування електронних пристроїв і систем для перетворення, керування та регулювання електричної енергії.

Силова електроніка займається перетворенням електричних сигналів різних напруг, струмів, частот та форм, що дозволяє ефективно управляти енергетичними процесами. Вона застосовується у багатьох галузях, таких як електроенергетика, промисловість, транспорт, електромобілі, альтернативна енергетика, сонячні панелі, вітрові турбіни та багато іншого.

Силові електронні пристрої, такі як випрямлячі, перетворювачі постійної напруги, інвертори, регулятори напруги та струму, дозволяють ефективно керувати енергією. Висока енергоефективність та точне регулювання забезпечується використанням силових напівпровідникових ключів - напівпровідникових приладів, що мають два стійких стани: увімкнений та вимкнений. Ввімкнення та вимкнення напівпровідникових ключів відбувається за допомогою системи керування, яка формує відповідний сигнал на керуючому виводі ключа, або відбувається природня комутація внаслідок певних процесів, що відбуваються у силовому колі.

Силові напівпровідникові ключі зазвичай базуються на напівпровідникових матеріалах, таких як кремній (Si), германій, нітрид галію (GaN) або карбід кремнію (SiC). Сучасні силові напівпровідникові ключі здатні переключати великі струми та напруги, забезпечуючи швидке перемикання та відносно невеликі втрати енергії, що дозволяє досягати високої енергоефективності пристроїв перетворювальної техніки.

Ідеалізований варіант силового ключа у відкритому стані має нескінченно малий опір, тобто він поводить себе у колі, як провідник, а у закритому – нескінченно великий, тобто його можна схарактеризувати, як розрив. Процес переходу ідеалізованого ключа з одного стану в інший відбувається миттєво. В такому випадку в ключах немає втрат енергії ні у стійких станах, ні у процесі перемикання.

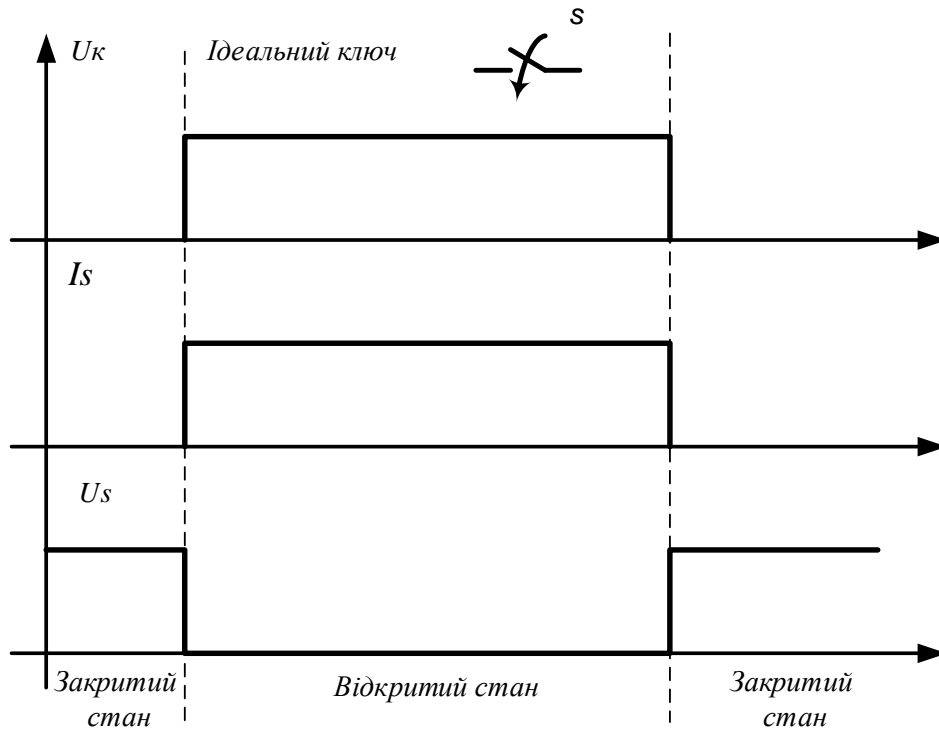


Рисунок 1 – Часові діаграми перемикання ідеального ключа

В реальних напівпровідникових ключах під час їх роботи у пристроях перетворювальної техніки виникають втрати різного типу. Основні види втрат включають:

1. Втрати провідності (conduction losses): Ці втрати виникають під час проходження струму через включений напівпровідниковий ключ. Вони залежать від опору ключа і струму, що проходить через нього. Чим більший опір ключа або струм, тим більші провідні втрати.
2. Втрати у закритому стані напівпровідникових ключів або втрати безпровідності (non-conduction losses). Вони можуть бути пов'язані з наявністю незначного струму витік, або певного струму стікання (leakage current) через керуючу структуру, що також може призводити до втрат енергії.
3. Втрати перемикання (switching losses): Ці втрати виникають під час процесу перемикання (включення або виключення) напівпровідникового ключа. Вони включають в себе втрати на часі затримки, коливання напруги та струму під час перемикання, а також втрати на часі насичення та насичення при зміні стану ключа.
4. Втрати комутації (snubber losses): Ці втрати виникають внаслідок високочастотних перехідних явищ, таких як ефект паразитної ємності і індуктивності, які впливають на напругу та струм під час комутації ключа. Їх можна зменшити застосуванням додаткових елементів, таких як снабберні діоди або конденсатори.
5. Втрати керування (gate drive losses): Ці втрати виникають під час керування роботою ключа, зокрема під час зарядки та розрядки

ємностей керування. Це пов'язано з енергією, яка витрачається на керуючих сигналах для включення та виключення ключа.

Величина втрат в напівпровідникових ключах залежить від їх типу, режиму роботи, величини струму та напруги, швидкості перемикавання і інших факторів. Основними з перерахованих видів втрат є втрати провідності та втрати на перемикавання, які разом складають більш ніж 90 % сумарних втрат ключа. Їх обов'язково необхідно враховувати при проектуванні силових перетворювальних систем для вибору засобів відведення тепла (радіаторів з природнім або примусовим охолодженням) від напівпровідникових ключів аби уникнути їх перегріву та виходу з ладу через тепловий пробій.

## 1.2 Напівпровідникові діоди

Напівпровідникові діоди - це електронні прилади, що складаються з двох напівпровідникових областей, які мають різний тип провідності (р-тип та n-тип), з'єднаних разом в так званий р-n перехід та мають два виводи. Вивід зі сторони прошарку р-типу має назву анод, а зі сторони прошарку n-типу – катод. На рис. 2 подано структурну схему, умовне позначення та вольтамперну статичну характеристику напівпровідникового діода.

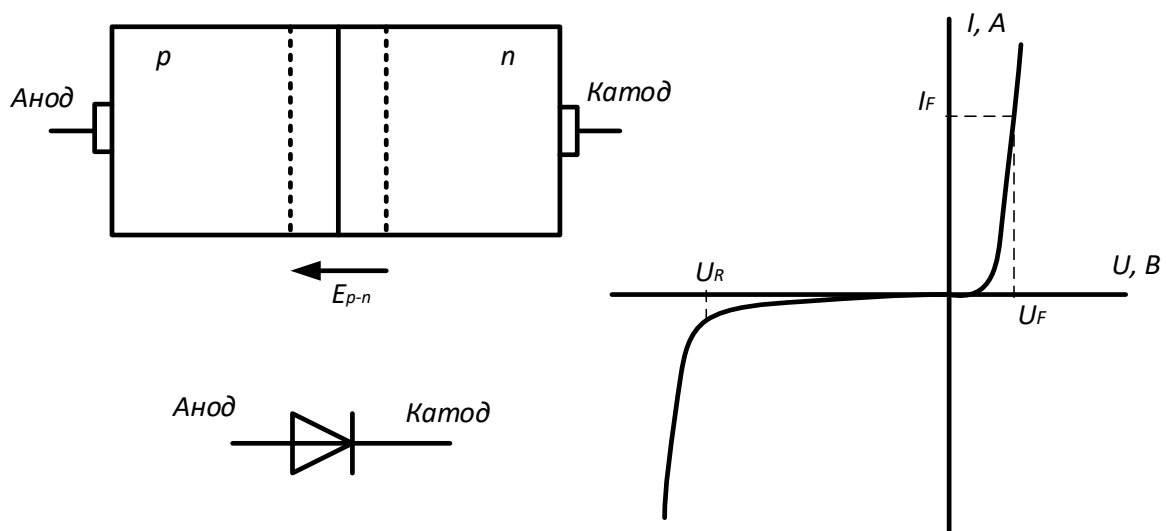


Рисунок 2 – Структурна схема, умовне позначення та статична вольтамперна характеристика напівпровідникового діода

Принцип дії діода засновано на взаємодії основних зарядів р та n прошарків та явищах які відбувається на межі їх дотику, де утворюється потенційний бар'єр. Упускаючи складні процеси, що відбуваються в напівпровіднику, пояснення роботи діода дає його вольтамперна характеристика. При додатній напрузі між анодом та катодом відбувається зниження потенційного бар'єру і, як наслідок, насичення носіями заряду прошарків. В такому разі діод знаходиться у відкритому стані й пропускає



електричний струм  $I_F$ , який характеризується невеликим спадом напруги  $U_F$ . При від'ємній напрузі потенційний бар'єр на межі прошарків збільшується, що перешкоджає переміщенню носіїв. Таким чином діод буде у закритому стані, для якого характерним є дуже незначний струм утічки в діапазоні напруги від нуля до певного значення лавинного пробоя  $U_R$ . Це значення є максимально допустимим значенням зворотної напруги діода.

Отже, умовою включення діода є пряма напруга на ньому, тобто потенціал анода більший за потенціал катода, а умовою його вимкнення – зміна полярності анодної напруги, тобто потенціал катода більший за потенціал анода.

Природня комутація напівпровідникових діодів визначає його основну галузь застосування – це випрямлення змінного струму, тобто перетворення змінної напруги на постійну. Діоди, що призначені для виконання цієї задачі називають випрямним діодом. Одною з основних вимог до нього є низьке падіння напруги у відкритому стані, що зменшує втрати провідності ключів у таких пристроях.

В ідеалізованій моделі діода перехід з одного стану в інший відбувається миттєво. В реальних приладах комутація відбувається дещо складніше, що пояснюють часові діаграми, подані на рис. 3.

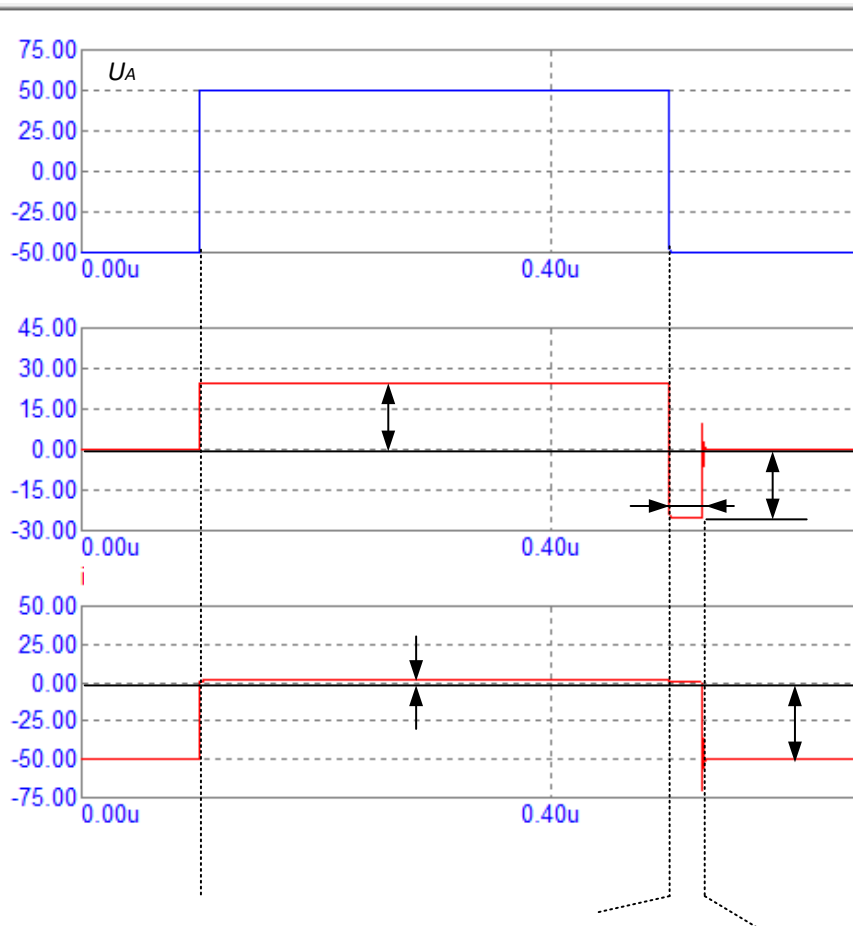


Рисунок 3 – Часові діаграми перемикання випрямного діода

У верхній системі координат подана зміна анодної напруги, яка по чергово набуває від'ємного або додатнього значення. За від'ємної напруги діод знаходиться у вимкненому стані й струм через нього не протікає (друга система координат), а між його анодом та діодом прикладається напруга  $U_R$  (третя система координат). При зміні напруги на додатню діод переходить у відкритий стан, при чому це відбувається майже миттєво. У відкритому стані через діод протікає певний прямий струм (forward current)  $I_F$  й викликає невеликий спад прямої напруги (forward voltage)  $U_F$ .

При зміні полярності анодної напруги на від'ємну діод внаслідок того, що у його прошарках ще певний час залишаються вільні носії заряду, не вимикається одразу, а знаходиться у провідному стані ще певний проміжок часу. Протягом цього часу через діод протікає зворотній струм (reverse recovery current)  $I_R$ , який обмежується виключно зовнішнім колом, і у разі перевищення певного максимального значення діод виходить з ладу. Цей процес називається зворотнім відновленням діода, а проміжок часу, протягом якого він відбувається, відповідно має назву – час зворотнього відновлення діода (reverse recovery time)  $t_R$ . Після завершення вказаного процесу діод переходить до закритого стану, описаного на початку.

Врахування явища зворотнього відновлення діода є надзвичайно важливим при розробці імпульсних пристроїв перетворювальної техніки, у яких діод працює в парі з транзисторним ключем. Внаслідок досить тривалого відновлення можуть виникати інтервали часу, коли через транзисторно-діодну пару протікатиме нічим необмежений наскрізний струм, що призводить до виходу з ладу усього пристрою. Випрямні діоди, здебільшого, мають досить значний час зворотнього відновлення, що унеможлиблює їх використання у сучасних силових перетворювачах, заснованих на імпульсному принципі дії.

Значно менший час зворотнього відновлення мають діоди Шотткі, принцип дії яких засновано на переході метал-напівпровідник. Вони також володіють меншим значенням спаду прямої напруги. Однак діоди Шотткі на звичайній кремнієвій основі можуть бути виготовлені на незначні класи напруг (до 100 В) та невеликі струми (до 10 А). Це тривалий час практично унеможливлювало їх використання у силовій електроніці. Але з винайденням та вдосконаленням карбід-кремнієвої технології напівпровідників (SiC) діоди Шотткі почали виготовляти на класи напруг більше 1000В та значні струми (більше 100 А). Не зважаючи на вищу ціну вони швидко займають позиції в перетворювальній техніці, оскільки вони дозволяють значно збільшити енергоефективність силових перетворювачів та внаслідок збільшення частоти перемикування ключів зменшити їх масогабаритні розміри.

Напівпровідникові діоди характеризуються такими основними параметрами, що приводяться в їх технічній документації та необхідні для проектування пристроїв перетворювальної техніки:

- Номінальний постійний струм у відкритому стані (Forward Current)  $I_F$  – середнє значення прямого струму діода;
- Максимально –допустимий прямий струм (Forward Current peak)  $I_{F(peak)}$  – пікове значення прямого струму, що протікатиме протягом дуже короткого обумовленого в технічній документації проміжку часу й не призведе до виходу з ладу діода;
- Спад напруги на діоді у відкритому стані (Forward Voltage)  $U_F$  – спад прямої напруги при протіканні через діод номінального постійного струму у відкритому стані;
- Номінальна напруга у закритому стані (Reverse Voltage)  $U_R$  – максимально допустима зворотна напруга на діоді;
- Максимально допустимий зворотній струм (Reverse Current)  $I_R$ ;
- Час зворотного відновлення (Reverse Recovery Time)  $t_R$ .

У технічній документації діодів вказують також й інші параметри, які визначають та уточнюють можливість застосування для різних прикладних задач.

### 1.3 Тиристори

Тиристором називають прилад з чотирма напівпровідниковими прошарками, що утворюють три р-п-переходи; і який тривалий час може знаходитись в одному із двох стійких станів — відкритому (ввімкненому) або закритому (вимкненому). Існують тришарові та п'ятишарові структури тиристорів, але це прилади спеціального призначення і в даній роботі вони не розглядаються.

Найбільше розповсюдження отримали так звані звичайні тиристори, або триністори SCR, з трьома вивідними електродами: анодом, катодом та керуючим електродом (КЕ) (див рис. 4).

На основі чотиришарових структур виготовляють також тиристори з двома електродами — анодом та катодом. Такий прилад називають диністором і він вмикається шляхом підвищення анодної напруги до певному рівня. Однак такі тиристори застосовуються вкрай рідко для виконання певних специфічних завдань.

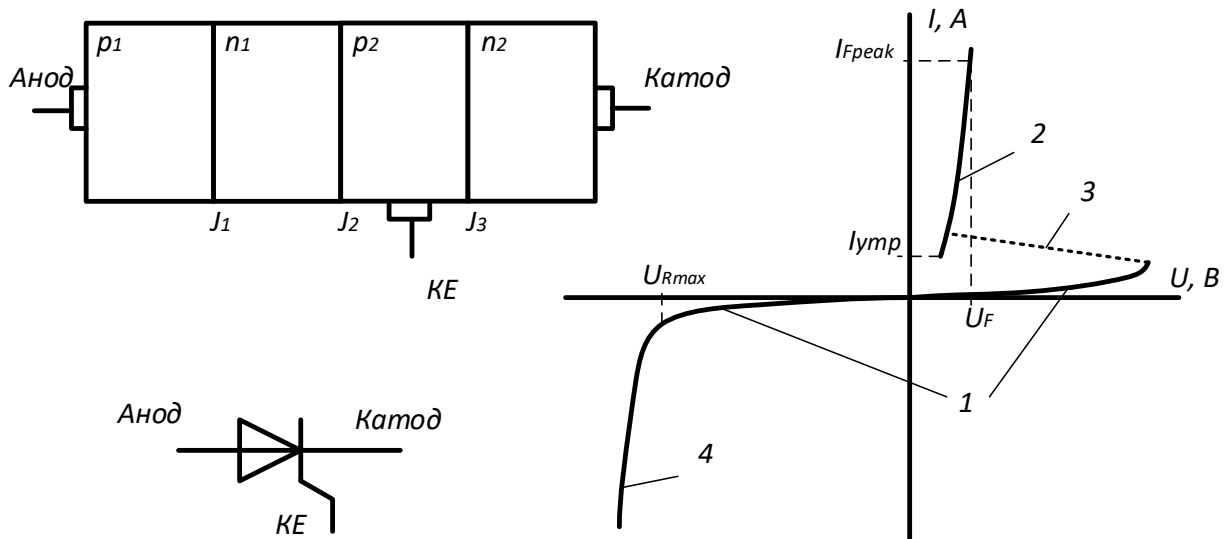


Рисунок 4 – Структурна схема, умовне позначення та статична вольтамперна характеристика тиристора SCR

Принцип роботи звичайного тиристора SCR (далі просто тиристор) пояснює його вольт-амперна характеристика (рис. 4, праворуч), яка має наступні ділянки:

1) ділянка закритого стану, для якої характерне протікання незначного струму утечки. Закритий стан тиристора, на відміну від діода, можливий як за від'ємного, так і додатного значення напруги між анодом та катодом;

2) ділянка відкритого стану, для якої характерно протікання прямого струму  $I_F$  в діапазоні від невеликого значення струму утримання  $I_{утр}$  до максимально допустимого  $I_{F peak}$  та невеликим спадом напруги  $U_F$ . ВАХ тиристора у відкритому стані повторює відповідну ділянку для діода;

3) ділянка включення тиристора, що характеризує швидкий лавиноподібний процес переходу тиристора від закритого до відкритого стану. Він відбувається при досягненні прямою напругою певного значення (диністорний режим) або при підключенні додаткового джерела напруги між керуючим електродом та катодом, що прямо зміщує р-n перехід J3;

4) ділянка електричного пробою при досягненні зворотної напруги на тиристорі певного значення  $U_{Rmax}$ , що визначає клас напруги використання тиристора.

Аналіз статичної характеристики тиристора дозволяє сформулювати умови його включення та виключення.

Для включення тиристора SCR потрібно виконання двох умов: пряма анодна напруга (потенціал аноду вищий за потенціал катоду) та пряме зміщення катодного р-n переходу, яке досягається підключенням додаткового джерела живлення між керуючим електродом та катодом з певною полярністю («+» – на KE, «-» – на катод), або, подачі частини

анодної напруги через обмежуючий опір до керуючого електроду. Якщо у тиристорі, який перебуває у відкритому стані, зняти напругу, що прямо зміщує р-n перехід, він залишиться відкритим. На практиці здебільшого застосовують включення тиристора, подачею короткочасного імпульсу на керуючий електрод тиристора, що перебуває під прямою анодною напругою.

Для вимкнення звичайного тиристора, подібно до діода, потрібно змінити полярність напруги між анодом та катодом (потенціал катода вищий за потенціал аноду) **або** вимкнення тиристора відбувається за рахунок зменшення струму менше певного мінімального значення струму утримання тиристора у відкритому стані  $I_{\text{упр}}$ . У тому чи іншому випадку тиристор вимикається зовнішніми чинниками. Вимкнути звичайний тиристор по колу керуючого електроду неможливо.

Роботу тиристора в динамічному режимі ілюструють часові діаграми перемикання тиристора, отримані за допомогою електронного моделювання за допомогою програмного застосунку MicroCap (Рис. 5). На вході кола діє напруга  $U_s$  прямокутної форми, яка протягом одного півперіода має додатне значення, а протягом другого – від'ємне. Джерело напруги керування  $U_k$  формує імпульси, що подаються до керуючого електроду тиристора VS. Тиристор переходить у ввімкнений стан, коли напруга  $U_s$  позитивна та подається імпульс на керуючий електрод. У відкритому стані через тиристор протікає прямий анодний струм  $I_F$ , який визначається співвідношенням між напругою джерела та опором навантаження  $R_n$  та спричинює незначне падіння напруги на тиристорі у відкритому стані  $U_F$ . Перехід до закритого стану тиристора відбувається при зміні полярності напруги живлення. У такому режимі між його анодом та катодом діє напруга джерела, яка може набувати як додатних, так і від'ємних значень. При переході з відкритого до закритого стану відбувається (подібно до діодів) зворотне відновлення тиристора.

Також з часових діаграм видно, що відсутність чи подача імпульсів на керуючий електрод тиристора не спричинює його ввімкнення, що підтверджує вище описане твердження про неможливість закриття тиристора SCR по колу керуючого електроду

Неповністю керовані, або звичайні тиристори — високонадійні прилади, котрі широко використовуються в електроенергетиці. Їх головне застосування визначається вимкненням зовнішніми чинниками анодного силового кола — безконтактні вимикачі для різноманітних електричних та електронних пристроїв, де на вході є джерело змінної напруги. Наприклад, вони використовуються в керованих випрямлячах, компенсаторах реактивної потужності, в регуляторах змінного струму, пристроях плавного пуску двигунів тощо. Сучасні тиристори здатні пропустити струм 4500 А та витримувати напругу 1000 В.

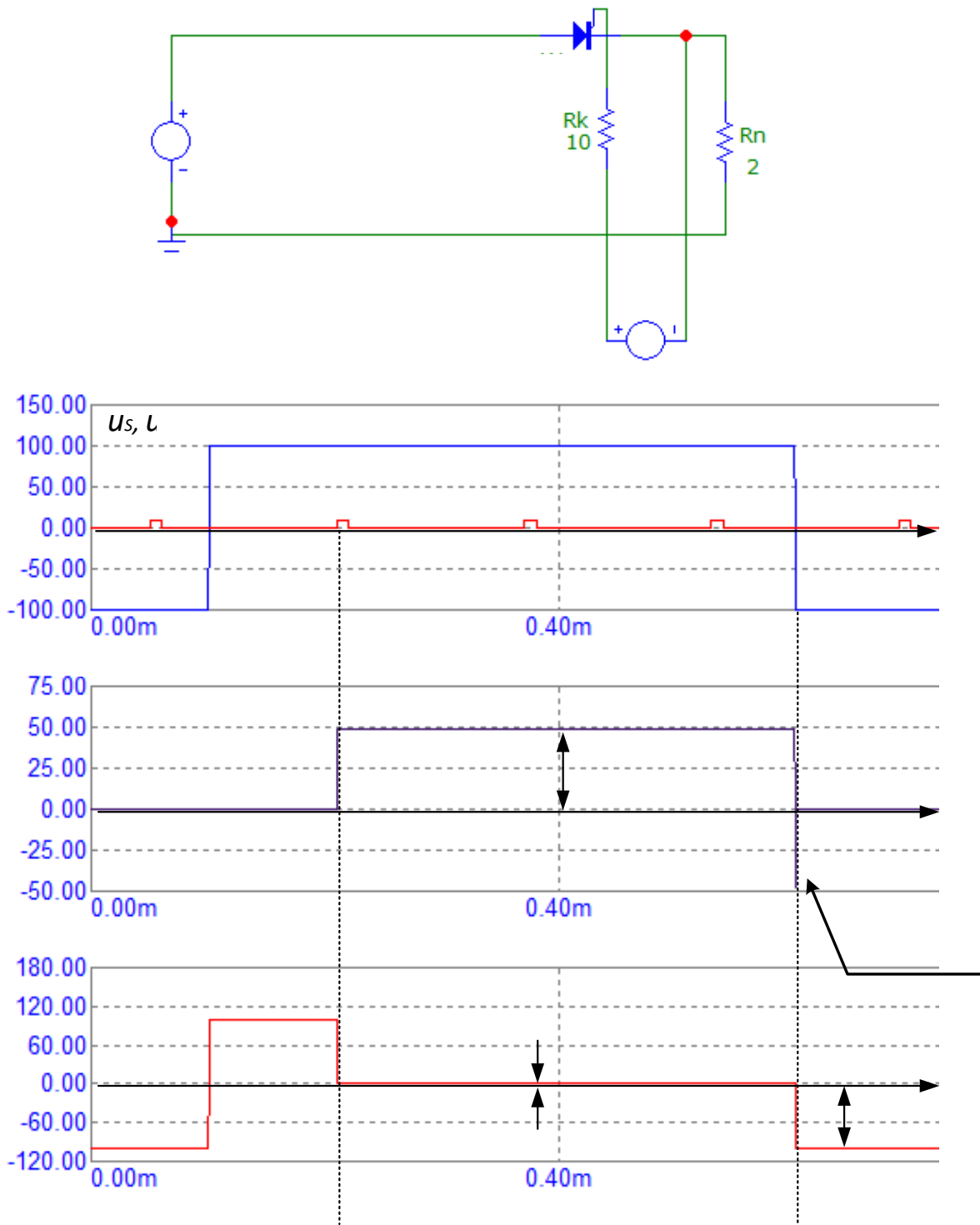


Рисунок 5 – Схема та часові діаграми перемикання тиристора

Існують також двоопераційні тиристори, тобто прилади які вмикаються і вимикаються по колу керуючого електрода.

На перший погляд, застосування двоопераційного тиристора більш раціональне, але воно стримується дуже низьким коефіцієнтом підсилення струму вимкнення. В кращих випадках, для вимкнення двоопераційного тиристора потрібен імпульс струму в колі керуючого електрода, який за

амплітудою лише в 5-6 разів менший від анодного. Для формування таких імпульсів потрібні спеціальні кола з використанням потужних транзисторів та накопичувальних елементів, що робить експлуатацію пристроїв на двоопераційних тиристорах в потужних та надпотужних пристроях економічно не вигідною. Також недоліком GTO є значний рівень спаду напруги у відкритому стані. Рівень цієї напруги складає 4 В, той же параметр для SCR складає 1,9 В.

Також незначне застосування GTO спричинюється значно більш досконалою групою повністю керованих ключів – транзисторів.

#### 1.4 Силові біполярні транзистори (Power BJT – Power Bipolar Junction Transistors)

Біполярний транзистор – це напівпровідниковий прилад, який складається з трьох прошарків напівпровідника, що утворюють два p-n переходи, які взаємодіють між собою. Біполярним транзистор названий, оскільки у ньому одночасно використовуються два носії заряду (електрони й дірки). В залежності від чергування областей напівпровідника біполярні транзистори можуть бути **p-n-p** (рис. 6, а) або **n-p-n** (рис. 6, б). Виводи транзисторів мають назви **емітер (emitter)**, **колектор (collector)** та **база (base)**.

Біполярний транзистор може мати декілька схем включення: зі спільною базою, зі спільним емітером та емітерний повторювач. Схема зі спільним емітером має найширше застосування, оскільки має підсилення за напругою та струмом. Принцип роботи біполярного транзистора пояснюють його сімейства вхідних та вихідних статичних вольтамперних характеристик, подані на рис. 7 для схеми зі спільним емітером.

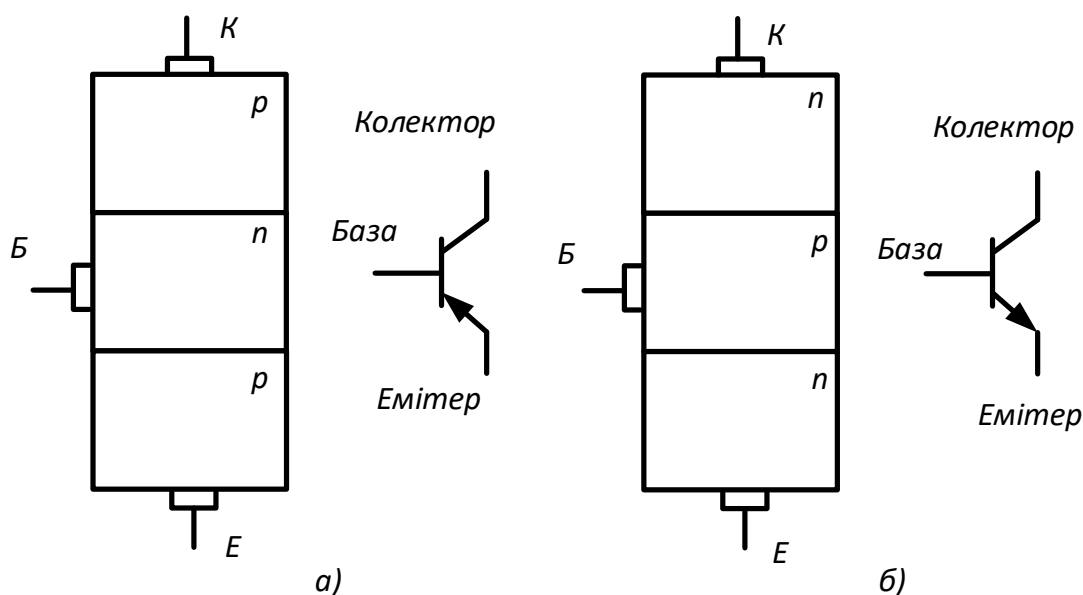


Рисунок 6 – Структурні схеми та умовні позначення біполярних транзисторів

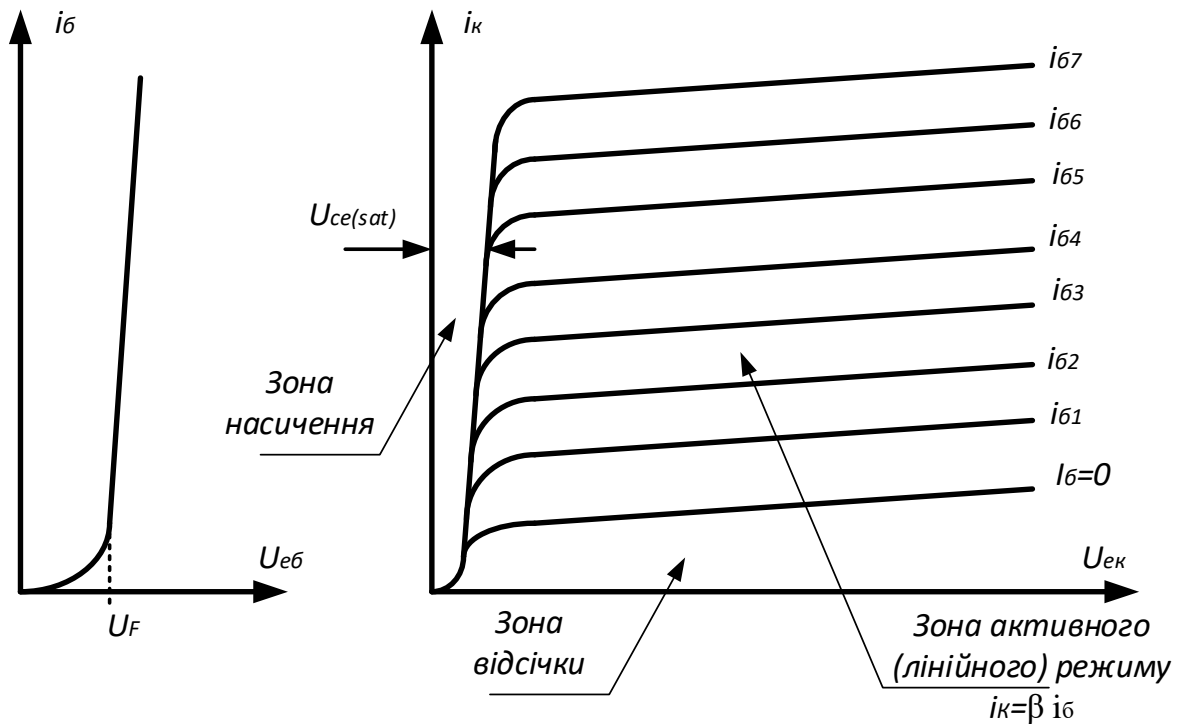


Рисунок 7 – Статичні характеристики біполярного транзистора

Вхідною характеристикою біполярного транзистора є залежність струму бази  $i_b$  від напруги між емітером та базою  $u_{eб}$ , що по суті є характеристикою прямо зміщеного р-п переходу. Вихідні характеристики для схеми зі спільним емітером утворює сімейство залежностей струму колектора  $i_k$  від напруги між емітером та колектором  $u_{ек}$  при різних значеннях струму бази. Із сімейства вихідних характеристик видно, що в залежності від струму бази транзистор може мати різне співвідношення між вихідною напругою та струмом, тобто мати різний керований струмом бази опір.

Таким чином біполярний транзистор це напівпровідниковий прилад, що може працювати в трьох режимах роботи: активний, насичення та відсічки. Активний (або лінійний) режим, що полягає у використанні транзистора у якості керованого опору, який залежить від струму бази, використовується у різних схемах для підсилення чи генерації сигналів певної форми, лінійних стабілізаторах тощо. В такому режимі у транзисторі розсіюється значна кількість енергії у вигляді тепла, що зменшує енергоефективність таких пристроїв. Тому вони використовуються здебільшого при перетворенні енергії незначної потужності.

Також із сімейства вихідних характеристик видно, що при зменшенні до нуля струму бази значно знижується і струм колектора, тобто транзистор закривається. Такий режим має назву відсічки. Відкритий стан має назву насичення, що досягається збільшенням струму бази, і він



характеризується невеликим спадом напруги між емітером та колектором в широкому діапазоні струму колектора.

Отже, аналіз статичних характеристик дає змогу зробити висновок, що біполярний транзистор можна використовувати у якості напівпровідникового ключа. Для його включення необхідно забезпечити протікання певного значення струму бази, прямо зміщуючи емітерний р-п перехід протягом усього часу увімкненого стану, а для його вимкнення – прибрати цей струм, зміщуючи р-п перехід у зворотному напрямку. Тобто біполярний транзистор є ключем, керованим струмом. Слід зазначити, що біполярний транзистор здатний пропускати струм лише в одному напрямку: для п-р-п – від колектора до емітера, а для р-п-р – навпаки (напрямок можливого протікання струму вказує стрілка в позначенні емітера біполярного транзистора).

Роботу біполярного транзистора в динамічному режимі пояснюють часові діаграми перемикання біполярного транзистора (рис. 9), ввімкненого у коло по схемі зі спільним емітером (рис. 8). На вході кола діє джерело напруги, що формує прямокутний сигнал з ідеальними фронтами. Після подачі імпульсу напруги керування струм бази зростає майже миттєво, але струм колектора певний час залишається незмінним внаслідок інерційності процесу насичення зарядів у базовому прошарку. Після певного інтервалу часу, який має назву **час затримки включення**  $t_{затр}$  (*delay time*  $t_d$ ) струм колектора починає наростати й протягом **часу наростання** (*rising time*  $t_r$ ) досягає усталеного значення, що визначається відношенням напруги живлення та опору колекторного кола. В практичних задачах час наростання – це проміжок часу, коли колекторний струм зростає від 10 до 90 % усталеного значення.

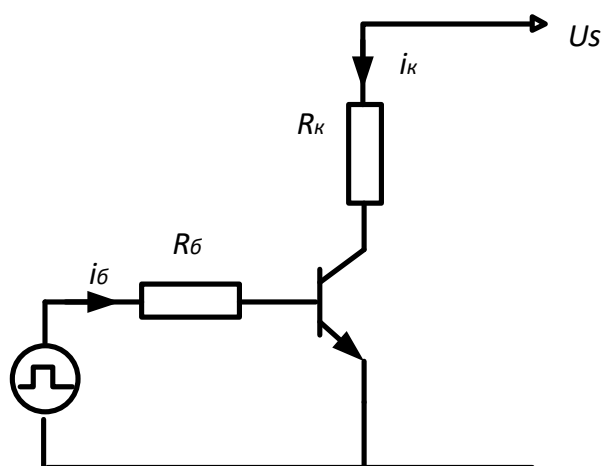


Рисунок 8 – Схема роботи біполярного транзистора в ключовому режимі

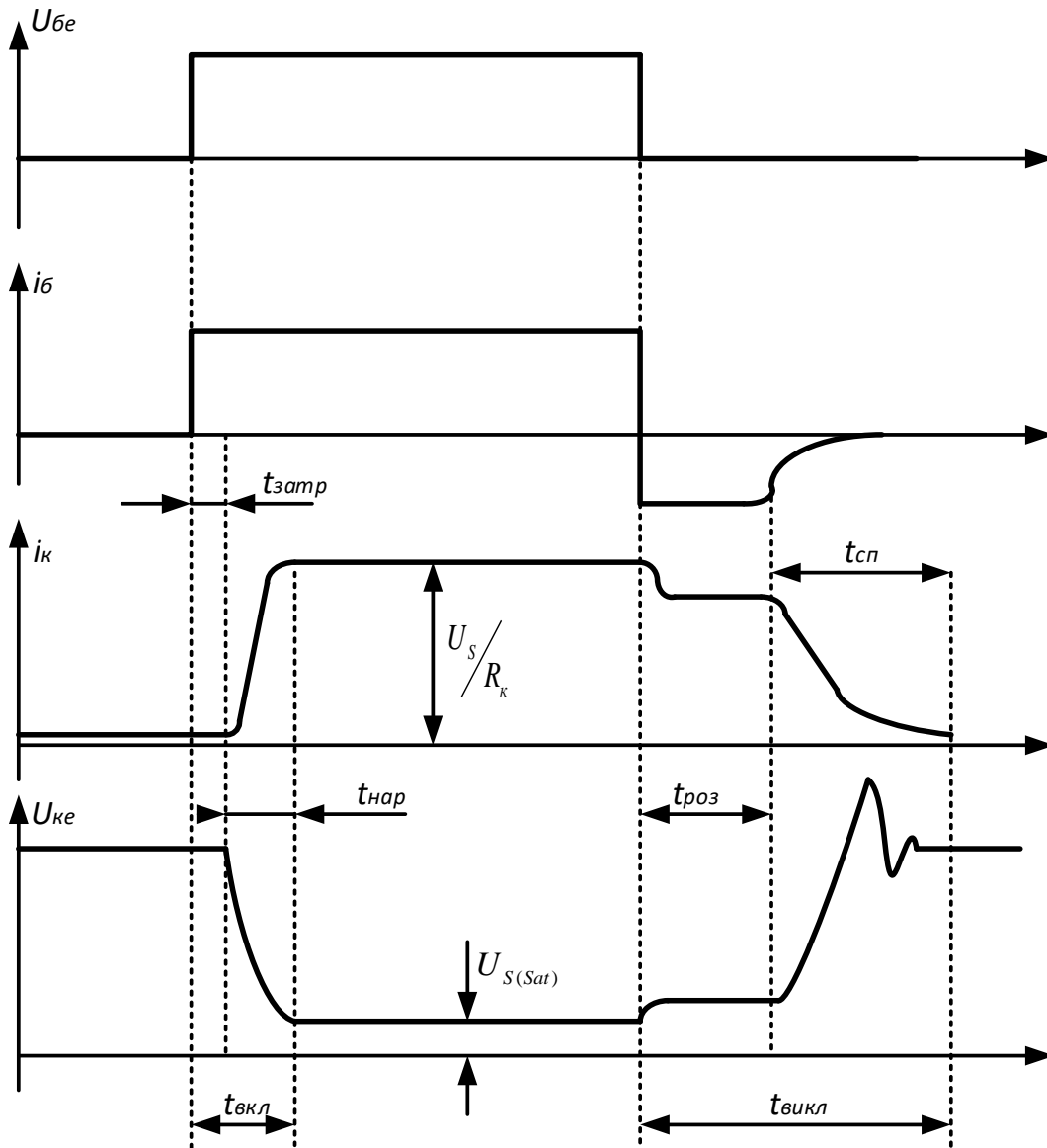


Рисунок 9 – Часові діаграми перемикання біполярного транзистора

Таким чином загальний час ввімкнення біполярного транзистора визначається:

$$t_{on} = t_d + t_r$$

У відкритому стані на транзисторі спадає незначна напруга насичення  $U_{S(Sat)}$ .

При вимкненні транзистора з його бази забирають (або подають від'ємну) напругу, внаслідок чого струм бази змінює свій напрямок. Протягом певного відрізка часу  $t_{роз}$  (*Storage time*  $t_s$ ) відбувається розсмоктування неосновних носіїв, наявних у базовому прошарку. Під час цього напруга колектор-емітер та струм колектора залишаються без суттєвих змін. Після цього процесу струми бази та колектора починають зменшуватись протягом *часу снаду*  $t_{сн}$  (*falling time*  $t_f$ ). Одночасно з цим зростає напруга емітер-колектор.

Загальний час вимкнення:

$$t_{off} = t_s + t_f$$

У більшості біполярних транзисторів цей проміжок, на відмінну від часу включення є достатньо тривалим. Наявність не нульових значень струму та напруги викликають значні втрати активної енергії у вигляді тепла, що є одним з основних недоліків біполярного транзистора та унеможлиблюють їх використання в області високих частот. Ще одним із недоліків є керування струмом, оскільки це вимагає досить складної та потужної системи керування. Однак вони здатні комутувати досить значні напруги (до 1500 В) та струми (до 1000А) і є, на відміну від тиристорів повністю керованими.

До оновлених експлуатаційних параметрів силових біполярних транзисторів належать:

- номінальний струм бази  $I_b$
- номінальне значення постійного струму колектора у відкритому стані  $I_k$ ;
- номінальне значення падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані (Collector–Emitter Saturation Voltage)  $U_{ke(sat)}$ ;
- номінальна напруга між колектором та емітером у закритому стані (Collector–Emitter Voltage)  $U_{ke0}$ ;
- час включення транзистора;
- час виключення транзистора.

### 1.5 Силові польові транзистори (Power MOSFET – Power metal–oxide–semiconductor field-effect transistor)

За історію розвитку напівпровідникової техніки створено велику кількість різновидів польових транзисторів, які поділяються на два основних типи: **JFET (Junction Field-Effect Transistor)** і **MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)** Їх принцип дії базується на контролі потоку носіїв заряду (електронів або дірок) через напівпровідниковий кристал за допомогою електричного поля (звідси і назва -польовий). Внутрішня структура сучасних польових транзисторів (є досить складною і має три виводи, що мають назви: *затвор (gate)*, *стік (drain)* та *вистік (source)*). На рис. 10 подано умовні позначення та внутрішню структуру MOSFET.

В JFET електричне поле, створене між затвором і витоком, контролює потік носіїв заряду в каналі напівпровідника.

У MOSFET, затвор розділений від каналу напівпровідника діелектричним шаром (оксидом). Прикладання напруги до затвора змінює заряди на металевому електроді, що відтягують носіїв заряду в канал і впливають на їхній потік від витоку до стоку.

У обох випадках зміна напруги на затворі змінює провідність каналу, що дозволяє керувати потоком струму між джерелом і стоком, що забезпечує основну функцію транзистора як підсилювача або перемикача.

Обидва типи польових транзисторів можуть мати канал n- або p-типу. В силовій електроніці для створення пристроїв перетворювальної техніки найбільш широке застосування знайшли польові транзистори MOSFET з каналом n-типу, тому далі буде розглядатись саме цей тип.

Управління MOSFET відбувається через затвор, який у нього ізольований від силового каналу шаром оксиду кремнію, внаслідок чого опір постійному струму кола керування дуже велике. Це значить, що MOSFET має нескінченний коефіцієнт підсилення за струмом, що якісно відрізняє його від біполярного транзистора.

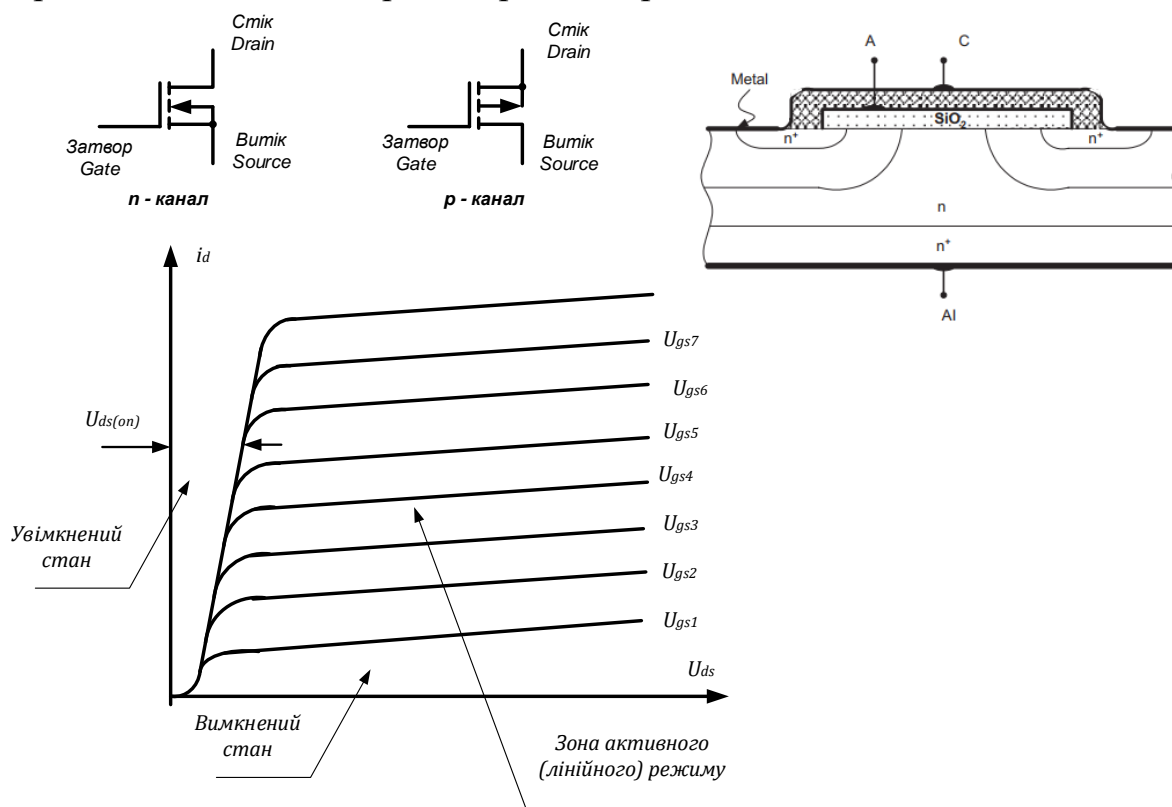


Рисунок 10 – Умовне позначення, структурна схема та статичні характеристики польового транзистора

У нижній частині рис. 10 подано сімейство вихідних статичних характеристик MOSFET, які є залежністю струму стоку  $i_d$  від напруги сток-виток  $U_{ds}$ , побудованих за певних значень напруги між затвором та витком. Статичні характеристики має, подібно до біполярного транзистора, зону активного (лінійного) режиму та два стани, характерні для електронного ключа: увімкнений (незначні опір та падіння напруги) та вимкнений (велике значення опору та незначне значення струму).

Таким чином зі збільшенням прикладеної напруги  $U_{ds}$  опір силового кола зменшується. Тобто опір MOSFET є керованим напругою, а не струмом, як у біполярного транзистора.

Це також є суттєвою його перевагою, оскільки для того, щоб перевести MOSFET з закритого у відкритий стан достатньо прикласти напругу між затвором та витком (це і є умовою ввімкнення польового

транзистора), а струм через затвор буде протікати лише протягом часу включення.

У ввімкненому стані до затвору прикладається постійна напруга, а струм з кола керування споживатись не буде, що дозволяє значно спростити та знизити потужність кола керування. У відкритому стані силове коло поводить себе як лінійний опір, значення якого  $R_{ds(on)}$  обов'язково приводиться в технічній документації транзистора.

Умовою вимкнення польового транзистора є зняття напруги затвор-витік або зміна її полярності. Останнє забезпечує швидше вимикання та дозволяє зменшити динамічні втрати.

Перед тим як розглянути явища, пов'язані з перемиканням MOSFET необхідно зауважити про наявність у нього паразитних параметрів, що виникають в ході їх виготовлення та які значно впливають на його динамічні властивості. Отже, у польових транзисторів присутні такі паразитні елементи та параметри:

1. **Інтегральний зворотно-паралельний діод (integral reverse p-n junction diode)** – виникає в ході виготовлення напівпровідникового приладу (рис. 11). Його час зворотного відновлення є досить значним, що значно обмежує використання таких приладів у двотактних схемах імпульсних силових перетворювачів. Іншими словами цей діод є досить повільним і при для його закриття необхідно витратити додаткову енергію, що призводить до перегріву транзистора. Світові виробники напівпровідникових приладів витрачають значні зусилля для покращення характеристик зворотного діода й постійно їх вдосконалюють.
2. **Паразитні ємності**, які виникають між виводами польового транзистора (рис. 12). Оскільки затвор є електродом, який утворює умовні конденсатори з ізольованими від нього стоком та витокком. Крім того у закритому стані виникає паразитна ємність між стоком та витокком. Усі ці ємності є реактивними елементами, що затягують перехідні процеси комутації MOSFET. Таким чином вони значно впливають на час включення та виключення польового транзистора, а, отже, й на його динамічні втрати. Аналіз цього впливу ускладнюється їх нелінійним характером.

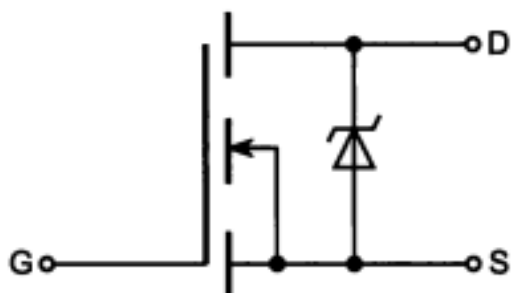


Рисунок 11

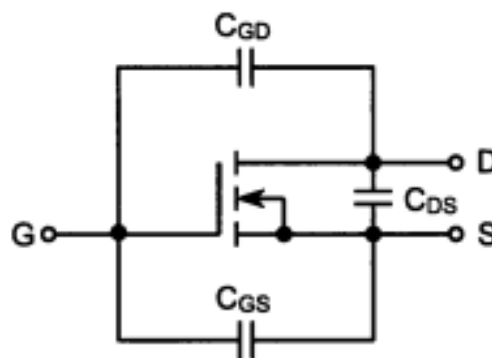


Рисунок 12

Роботу польового транзистора ввімкненого за схемою рис. 13 в динамічному режимі пояснюють часові діаграми, подані на рис. 14

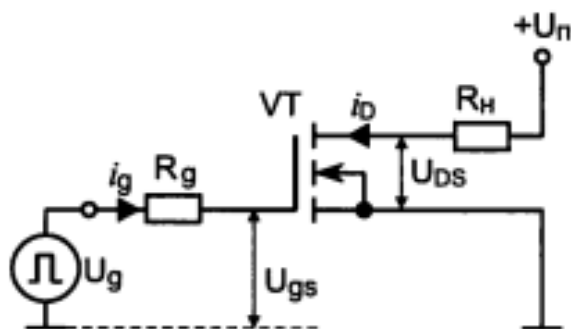


Рисунок 13 – Схема перемикання польового транзистора

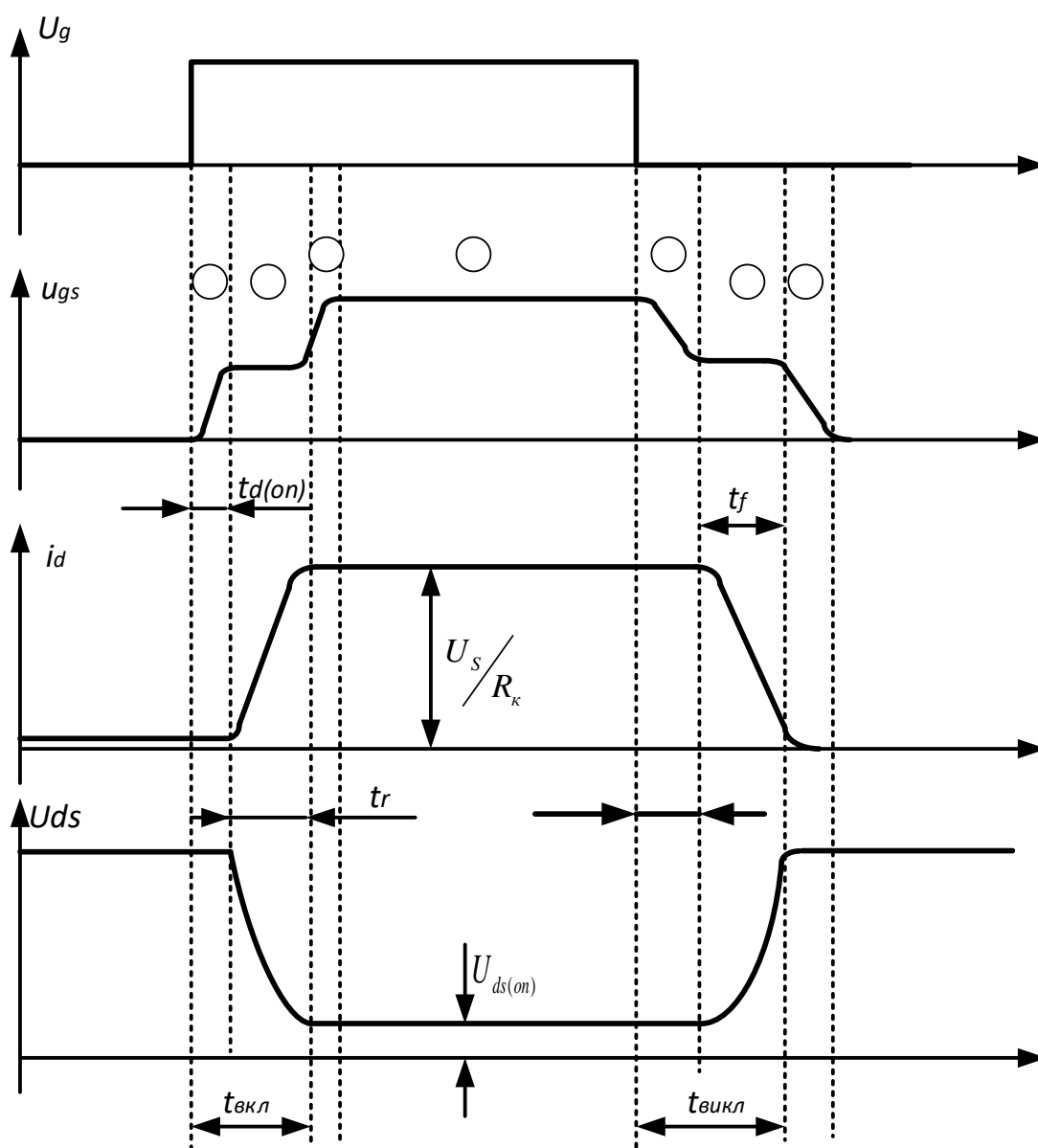


Рисунок 14 – Часові діаграми перемикання польового транзистора MOSFET

Напруга  $U_g$ , що формує послідовність прямокутних імпульсів, прикладається до затвору польового транзистора через певний невеликий затворний резистор  $R_g$ . При подачі прямокутного імпульсу від джерела  $U_g$  відбувається заряд ємності  $C_{gs}$  за експоненціальним законом зі сталою часу  $R_g C_{gs}$  (ділянка 1 на рис.14). Але транзистор протягом цього часу закритий і починає відкриватися лише при досягненні напругою  $U_{gs}$  певного порогового значення  $U_{gs(th)}$ , що складає для більшості транзисторів 2-5 В. Тобто відбувається затримка включення, інтервал часу якої має назву **час затримки включення (turn-on delay time)  $t_{d(on)}$** .

При досягненні  $U_{gs}$  порогового значення транзистор починає відкриватись, опір між стоком та витокom знижується, що поступово під'єднує до ємності  $C_{gs}$  ємність  $C_{gd}$ , підсилена коефіцієнтом підсилення каскаду. Іншими словами, вхідна ємність, яку заряджає джерело напруги збільшується до значення:

$$C_{ex} = C_{gs} + (1 + k_n) \cdot C_{gd}, \quad (1)$$

де  $k_n = S \cdot R_n$ , а  $S$ , мА/В – крутизна вихідних характеристик транзистора.

Це явище має назву ефект Міллера й спричинює зростання вхідної ємності в 5-20 разів.

Воно призводить до сповільнення наростання напруги на ній (ділянка 2 рис. 14), а, отже й до сповільнення відкриття транзистора. Ця ділянка буде тривати до поки транзистор не відкриється й опір між стоком і витокom не сягне значення  $R_{ds(on)}$ . Протягом цього часу напруга  $U_{ds}$  буде знижуватись, а струм стоку  $I_d$  наростатиме. Тому цей інтервал часу носить назву **час наростання (rise time)  $t_r$** .

Після того, як транзистор повністю відкриється зворотний зв'язок обірветься і вхідна ємність знову стане рівною  $C_{gs}$  й почне заряджатись з тією самою сталою часу (ділянка 3 рис. 14). Після заряду ємності між затвором та стоком встановиться напруга джерела  $U_g$  й транзистор перейде в зону насичення (ділянка 4 рис.14).

Процес закриття відбувається у зворотному порядку (ділянки 5, 6, 7 на рис. 14). Після встановлення нульового значення напруги  $U_g$  на ділянці 5 відбувається поступове зменшення напруги  $U_{gs}$  до порогового значення. Цей інтервал часу має назву час затримки вимкнення (**turn-off delay time)  $t_{d(off)}$** . На ділянці 6 відбувається під дією ефекту Міллера відбувається поступове зниження струму стоку (**час спаду (fall time)  $t_f$** ) та підвищення напруги  $U_{ds}$ .

Таким чином вплив паразитних ємностей на швидкість перемикавання є визначальним. Хоча, варто зазначити, що тривалості включення та виключення MOSFET є найнижчими серед усіх типів транзисторів, що зумовлює та широке застосування в імпульсних пристроях перетворювальної техніки. Використання в якості ключів MOSFET

дозволяє перемикаати їх з високою частотою, що значно зменшує їх габаритні розміри та досягати високої енергоефективності.

До недоліків MOSFET відносять те, що значення опору у відкритому стані  $R_{ds(on)}$  є досить незначним і складає десятки мОм для приладів кремнієвої технології лише з допустимою напругою у закритому стані не більше 250-300 В. Зі збільшенням класу напруги збільшується і довжина каналу провідності, що призводить до збільшення опору відкритого стану, а отже, і втрати у відкритому стані. Такі властивості польових транзисторів тривалий час обмежували використання польових транзисторів пристроями незначної потужності. Однак винайдення та застосування карбід кремнієвої (SiC) технології напівпровідників для виготовлення польових транзисторів дозволило значно розширити діапазон робочих потужностей силових перетворювачів, створених на їх основі. Хоча значна ціна SiC MOSFET і є на сьогодні стримуючим фактором їх використання.

До основних параметрів польових транзисторів, що зазначаються у їх технічній документації є:

- максимально допустимий струм затвору польового транзистора  $I_{gmax}$  – у схемах керування обмежується опором  $R_g$ ;
- номінальний постійний струм стоку у відкритому стані  $I_d$ ;
- максимально-допустимий струм стоку у відкритому стані  $I_d(peak)$ ;
- опір між стоком та витокм у відкритому стані  $R_{ds(on)}$ ;
- максимально допустиме значення напруги між стоком та витокм у закритому стані  $U_{gs0}$ .
- час затримки включення  $t_{d(on)}$ ;
- час наростання  $t_r$ ;
- час затримки включення  $t_{d(off)}$ ;
- час спадання  $t_f$ .

## **1.6 Біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT – Insulated-gate bipolar transistor)**

Біполярний транзистор з ізольованим затвором був створений у результаті досліджень, проведених 80-х роках 20 століття, шляхом каскадного включення в одній структурі BJT та MOSFET. Метою цих досліджень було нівелювати основні недоліки біполярного (керування струмом) та польового (великий спад напруги у відкритому стані для потужних приладів) транзисторів, що гальмувало розвиток перетворювальної техніки.

IGBT є складним напівпровідниковим приладом, виготовленим в одній структурі та має три виводи затвор, колектор та емітер Рис. 15.

По суті цей тип транзистора є MOSFET у колі керування і BJT у силовому колі (рис 15, б). Це дозволило спростити схему і зменшити витрати керування у порівнянні з біполярними та дало змогу виготовити керовані напругою прилади на значно вищі класи напруг, ніж польові транзистори.



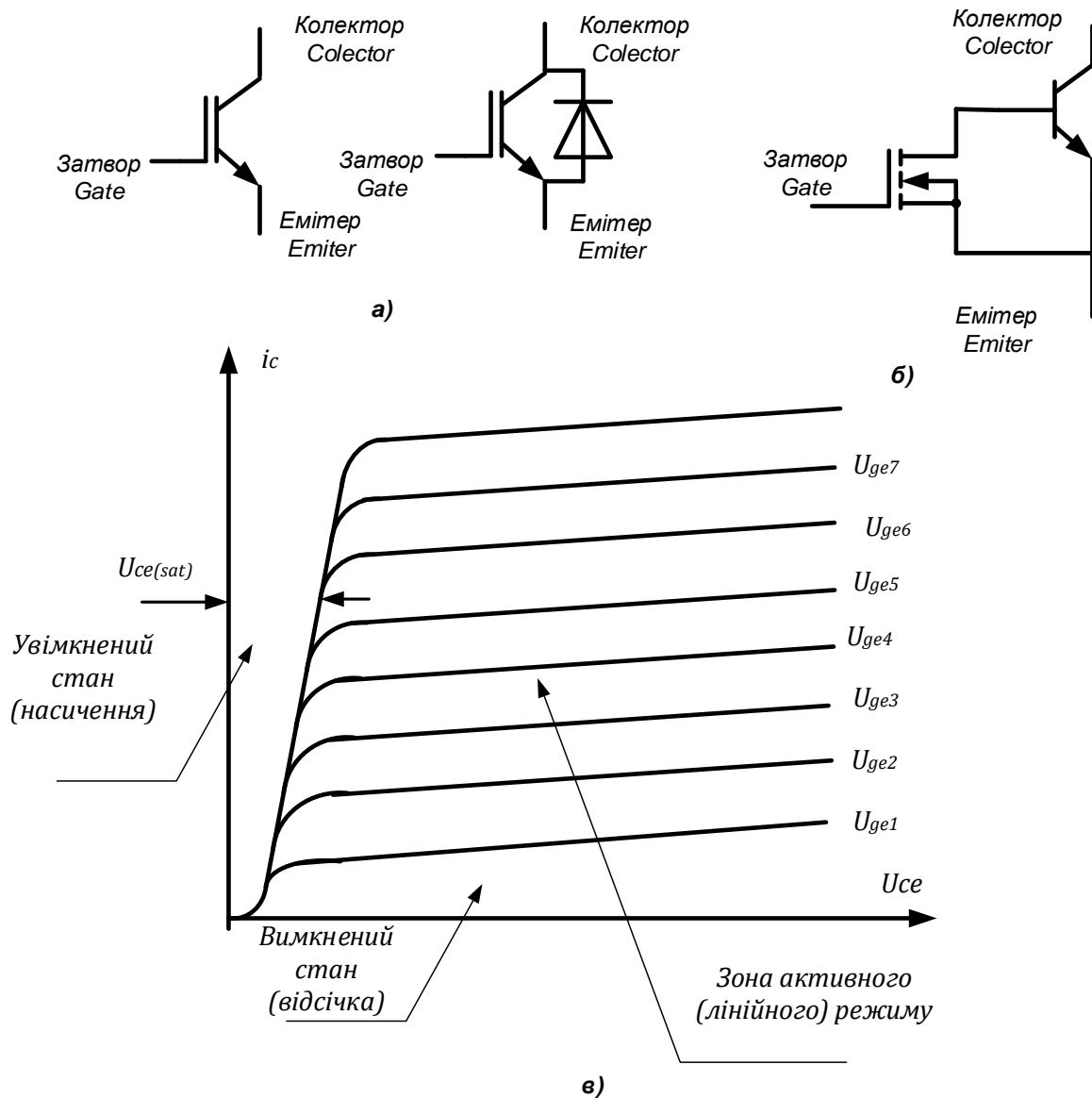


Рисунок 15 – Умовне позначення – а), структура – б) та статичні характеристики – в) IGBT

Але разом зі значними перевагами IGBT успадкував і недоліки обох типів транзисторів:

- наявність паразитних ємностей та зворотно-паралельного діода з обмеженими динамічними характеристиками (значний час зворотного відновлення) – від MOSFET;
- тривалий процес закриття, пов'язаний із розсмоктуванням неосновних носіїв заряду від ВJT.

Статичні характеристики IGBT, подані на рис. 15 в, пов'язують струм колектора  $I_c$  від напруги колектор-емітер  $U_{ce}$  та є подібними до аналогічних залежностей MOSFET. Вони також містять зону активного (лінійного) режиму, насичення (увімкнений стан) та відсічки (вимкнутий).

Аналіз статичних характеристик IGBT дозволяють сформулювати умови комутації у ключовому режимі:

- для включення потрібно подати й утримувати напругу між затвором та емітером  $U_{ge}$ ;
- для вимкнення необхідно прибрати напругу затвор-емітер або змінити її полярність.

У відкритому стані IGBT має аналогічні біполярному транзисторі властивості: незначне падіння напруги  $U_{ce(sat)}$  при широкому діапазоні значень струму колектора.

При роботі в ключовому режимі IGBT також мають деякі спільні властивості як з польовим, так і біполярним транзисторами. Їх ілюструють часові діаграми, подані на рис. 16.

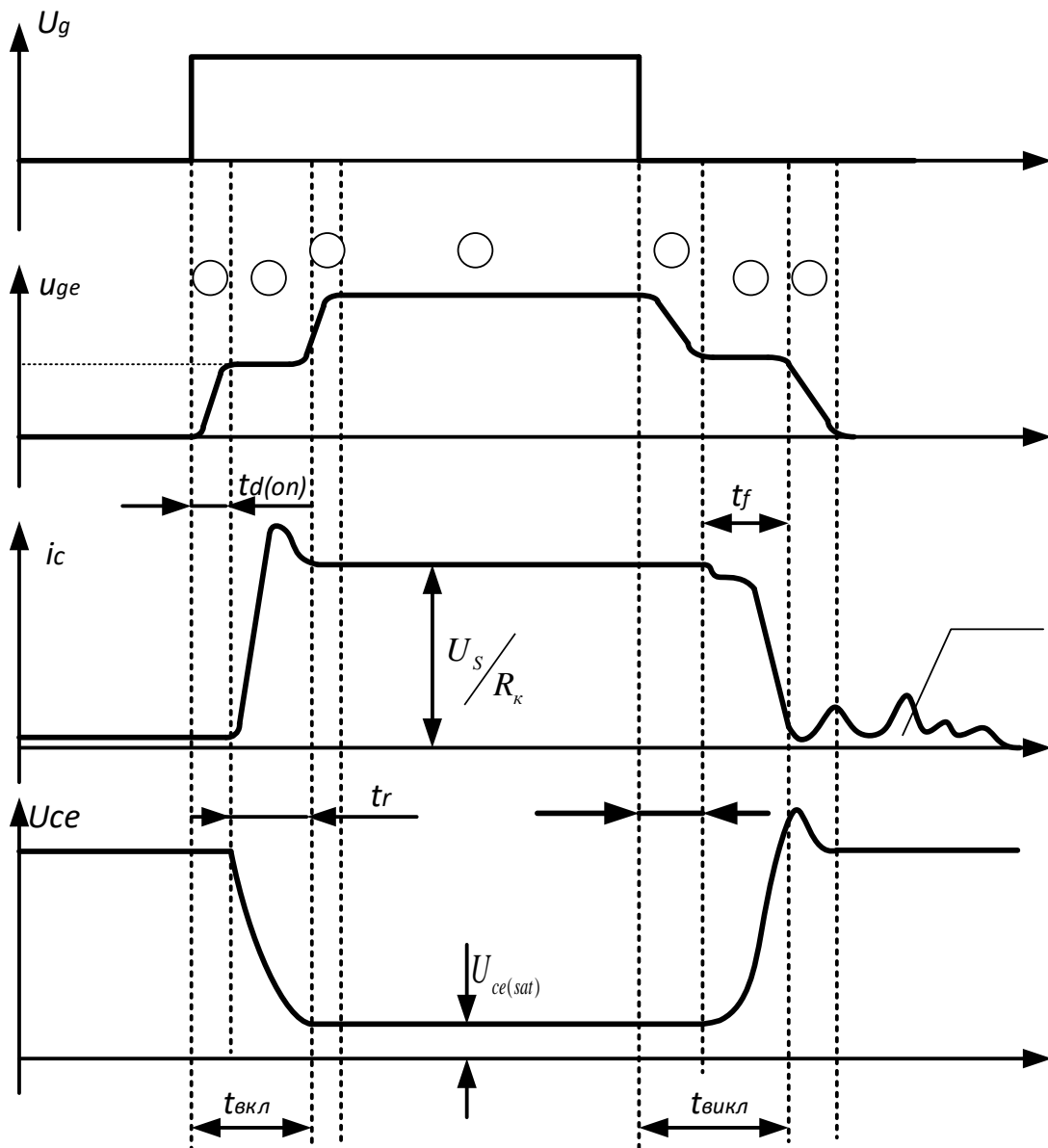


Рисунок 16 – Часові діаграми IGBT в ключовому режимі

Оскільки по входу IGBT є польовим транзистором з ізольованим затвором, то його комутація відбувається подібно до комутації MOSFET, детально описаної вище та має таку послідовність:

Ділянка 1. При подачі напруги керування на затвор через резистор  $R_g$  починає заряджатись паразитна ємність  $C_{ge}$ . При цьому струм колектора та напруга колектор-емітер залишаються незмінними протягом **часу затримки включення (turn-on delay time)  $t_{d(off)}$** .

Ділянка 2. При досягненні напруги  $U_{ge}$  певного значення  $U_{ge(th)}$  транзистор починає відкриватись, струм  $I_c$  зростає, а напруга  $U_{ce}$  зменшується, у той час, як напруга  $U_{ge}$  під дією ефекту Міллера, що значно збільшує вхідну ємність, залишається незмінною протягом **часу наростання (rise time)  $t_r$**  струму колектора.

Ділянка 3, на якій відбувається дозаряд вхідної ємності до напруги  $U_g$

Ділянка 4 відповідає відкритому стані транзистора, яка характеризується невеликим значенням напруги насичення  $U_{ce(sat)}$  IGBT.

Ділянка 5. Після того як напруга керування зменшується до нуля відбувається затримка вимкнення (**turn-off delay time)  $t_{d(off)}$**  внаслідок перезаряду ємності  $C_{ge}$ .

Ділянка 6, на якій відбувається наростання напруги  $U_{ce}$ , а струм колектора після невеликої затримки, пов'язаної з розсмоктуванням зарядів у базовому прошарку починає зменшуватись (**час спаду (fall time)  $t_f$** ). Але при цьому процес вимкнення не завершується

Ділянка 7. В базовому прошарку відбуваються складні внутрішні процеси рекомбінації носіїв заряду, що супроводжується неперіодичними коливаннями струму колектора. Цей процес має назву «струмового хвоста» й значним чином збільшує час та втрати енергії вимкнення. При чому цей процес продовжується деякий час і після того як напруга  $U_{ge}$  зменшиться до нуля.

Описані властивості IGBT в статичному та динамічному режимах зумовлюють їх застосування в перетворювальній техніці для перемикання великих струмів та напруг, однак значний час та втрати закриття обмежують частоту перемикання таких приладів.

Цей недолік є не таким важливим при побудові автономних інверторів та перетворювачів частоти, де замість силових дроселів використовують обмотки електричних машин, на які вони працюють, що мають значну індуктивність. Це дозволяє зменшити частоту перемикання ключів та не призводить до збільшення масогабаритних розмірів таких пристроїв.

До основних параметрів польових транзисторів, що зазначаються у їх технічній документації є:

- максимально допустимий струм затвору IGBT  $I_{gmax}$  – у схемах керування обмежується опором  $R_g$ ;

- номінальний постійний струм колектора (continuous collector current) у відкритому стані  $I_d$ ;
- максимально-допустимий струм колектора (peak collector current) у відкритому стані  $I_d(\text{peak})$ ;
- падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані  $U_{ce}(\text{sat})$ ;
- максимально допустиме значення напруги між колектором та емітером у закритому стані  $U_{ce0}$ .
- час затримки включення  $t_{d(\text{on})}$ ;
- час наростання  $t_r$ ;
- час затримки вимкнення  $t_{d(\text{off})}$ ;
- час спадання  $t_f$ .

Галузі застосування напівпровідникових ключів в залежності від робочих частот струмів та напруг ілюструє рис. 17

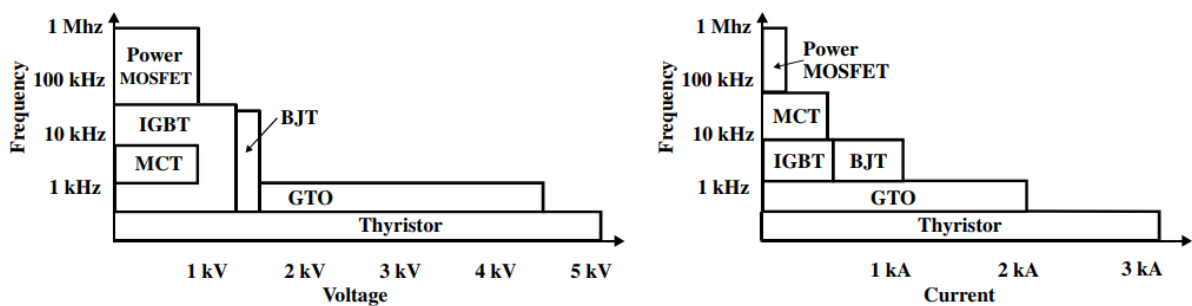


Рисунок 17 – Галузі застосування типів напівпровідникових ключів

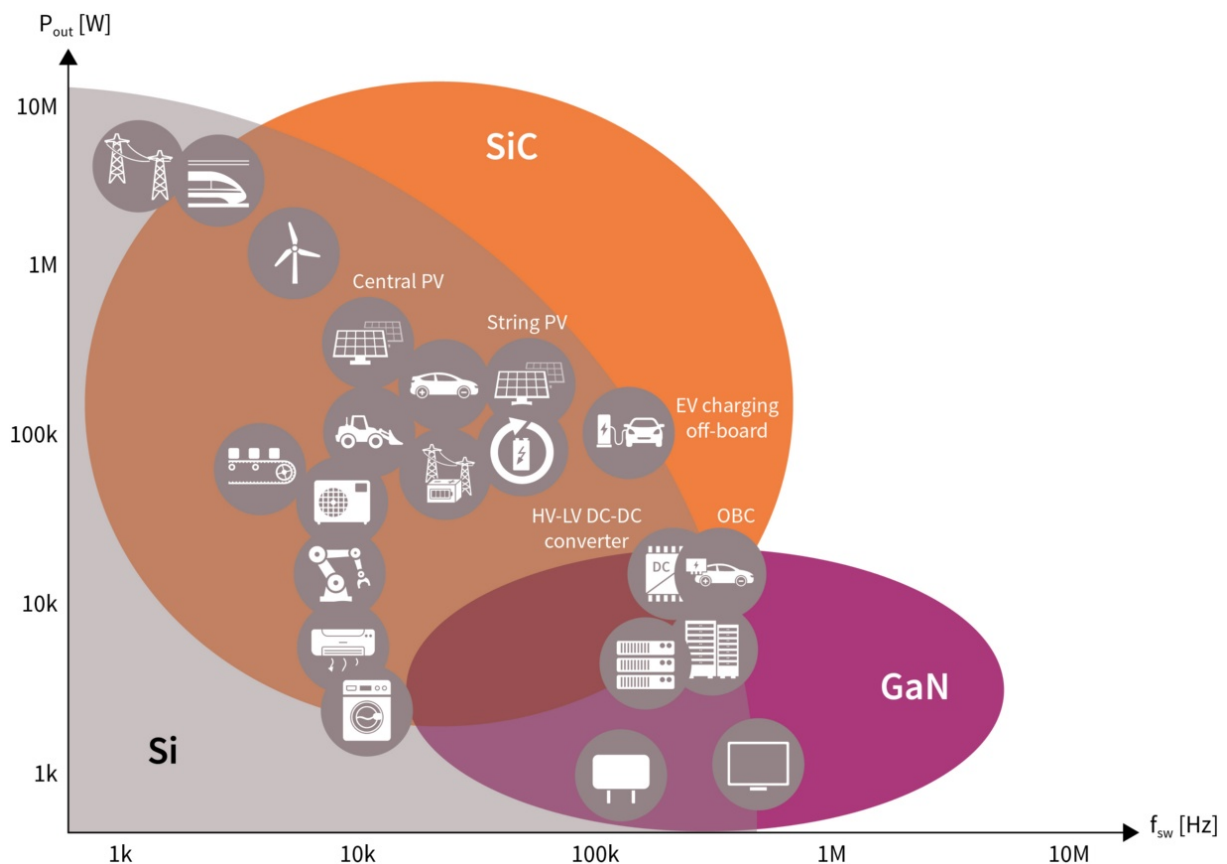


Рисунок 18 – Галузі застосування основних технологічних матеріалів напівпровідникових приладів

В останній час технології виготовлення напівпровідників знайшли суттєвий розвиток та охоплює три основних матеріали: кремній Si, карбід кремнію SiC та нітрид галію GaN. Сконструйовані на основі цих матеріалів напівпровідникові прилади не залежно від типу мають свої особливі властивості, переваги та недоліки, які зумовлюють їх галузі застосування. Приклад таких галузей подано у вигляді інфографіки на рис. 18 в залежності від робочої частоти та потужності.

### **1.7 Методика оцінювання втрат в напівпровідникових ключах**

Вище було описано роботу в статичному та динамічному режимах напівпровідникових ключів різних типів, які мають свої особливості та характерні властивості, які визначають їх експлуатаційні параметри.

При розробці пристроїв перетворювальної техніки надзвичайно важливим є оцінювання втрат напівпровідникових ключів (статичних втрат та втрат на перемикання). Точна оцінка втрат майже завжди є неможливою внаслідок складних процесів комутації, описаних вище і на який чинять вплив різні фактори.

Тому постає задача визначення таких втрат по спрощеній моделі, яка хоч і не враховуватиме багатьох специфічних особливостей та матиме певну неточність, але дасть змогу визначення втрат, використовуючи обмежену кількість вхідних параметрів, які досить точно можна визначити експериментально, та нескладних математичних операцій.

На рис. 19 подана спрощена (лінеаризована) модель перемикання напівпровідникових ключів. Основним елементом ідеалізації цієї моделі на відміну від описаних вище процесів комутації реальних приладів є припущення, що струм та напруга ключа на ділянках наростання та спадання змінюються за лінійним законом.

В загальному вигляді робота моделі виглядає так. При подачі напруги керування на відкриття ключ після певної затримки починає відкриватись. Струм ключа при цьому лінійно наростає, а напруга лінійно спадає. Після цього ключ переходить у відкритий стан, що характеризується певним значенням робочого струму та падінням напруги на ньому.

Закриття відбувається подібно до відкриття. Після зняття напруги керування через певний проміжок часу затримки ключ починає закриватись, струм лінійно зменшується, а напруга лінійно зростає. Закритий стан характеризується значенням напруги на ключі та невеликим значенням струму витоку.

Миттєва потужність втрат є нерівномірними в ході циклу перемикань. Найменшою вона є у вимкненому стані та є незмінною в часі, так само, як і втрати відкритого стану, що мають зазвичай дещо вищі значення. У той час коли відбувається комутація ключа втрати є значно більшими, а миттєва потужність на цих інтервалах змінюється за параболічною залежністю з вершиною угорі.

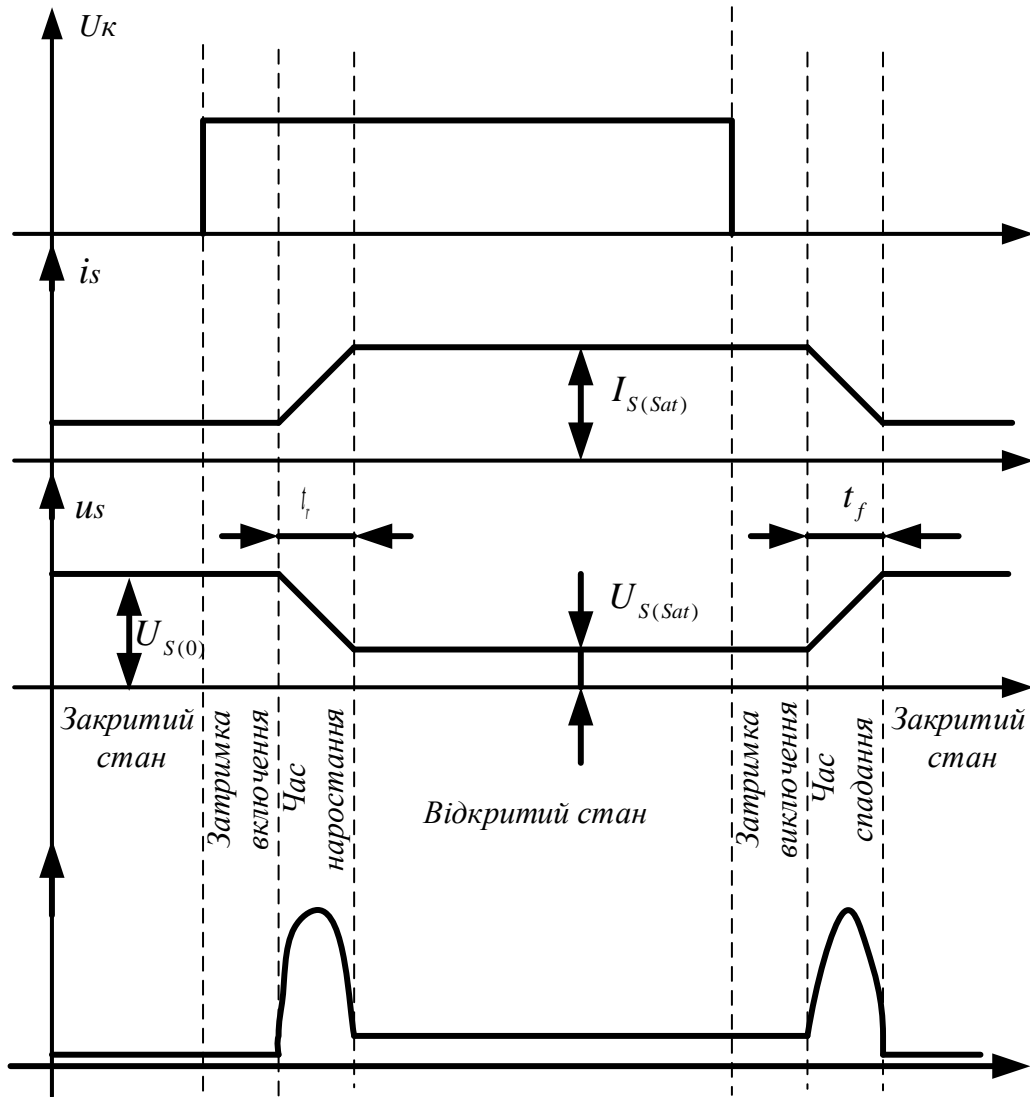


Рисунок 19 – Спрощена (лінеаризована) модель перемикання напівпровідникових ключів

Статичні втрати у відкритому стані визначаються за виразом:

$$P_{loss(Sat)} = I_{S(Sat)} \cdot U_{S(Sat)}, \quad (2)$$

де  $I_{S(Sat)}$  та  $U_{S(Sat)}$  - струм та напруга на ключі у відкритому стані.

Кількість втрат енергії за час включення визначається за виразом:

$$E_{loss(on)} = \frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} i_s \cdot u_s \cdot dt, \quad (3)$$

де  $i_s$  - миттєве значення струму,  $u_s$  - миттєве значення напруги ключа,  $t_r$  - час наростання струму ключа.

В реальних ключах струм  $i_s$  та напруга  $u_s$  змінюються за складними (в найпростішому випадку - експоненціальними) законами. Визначення основних параметрів та інтегрування добутку таких функцій є складною

математичною задачею та у випадку невірною визначення вхідних параметрів може призводити до надмірних похибок.

У спрощеній (лінеаризованій) моделі струм ключа можна записати як:

$$i_s = \frac{I_s(sat)}{t_r} t, \quad (4)$$

а напругу:

$$u_s = U_{s0} - \frac{U_{s0}}{t_r} t. \quad (5)$$

Підставивши рівняння (4) та (5) у (3) після певних перетворень отримано співвідношення для визначення втрат активної енергії при одному включенні ключа:

$$E_{loss(on)} = \frac{1}{6} I_{S(Sat)} \cdot U_{S(0)} \cdot t_r. \quad (7)$$

Аналогічно можна отримати вираз для визначення втрат при одному виключенні ключа:

$$E_{loss(off)} = \frac{1}{6} I_{S(Sat)} \cdot U_{S(0)} \cdot t_f, \quad (8)$$

де  $t_f$  – час спадання струму колектора.

Потужність втрат на перемикання визначається:

$$P_{loss(sw)} = (E_{loss(on)} + E_{loss(off)}) f_{sw}, \quad (9)$$

де  $f_{sw}$  – частота перемикання ключа в пристрої перетворювальної техніки.

Варто зазначити, що в практичних задачах  $t_r$  визначають як проміжок часу, за який струм зріс від 10 до 90 % свого усталеного значення у відкритому стані  $I_s(sat)$ , а  $t_f$  - як проміжок часу, за який струм зменшився від 90 до 10% вказаного значення.

Як видно з виразів (7-9) втрати на перемикання ключа залежать від часу, за який відбувається комутація, а також від значень струму та напруги, що комутуються. При зростанні останніх зростають і втрати, тому при розробці пристроїв перетворювальної техніки варто застосовувати схемотехнічні заходи до їх зменшення. Одним із таких заходів є використання резонансних явищ таким чином, щоб комутація відбувалась (в ідеалі) за нульових значень струмів та напруг. Коефіцієнт корисної дії пристроїв перетворювальної техніки заснованих на такому способі комутації може складати більше 99%.

## 2 ПРОГРАМА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

📖 Мета роботи: дослідити статичні та динамічні режими роботи основних силових напівпровідникових ключів перетворювальної техніки

### 1. Дослідження напівпровідникових діодів.

1.1 В середовищі MicroCap зберіть схему подану на рис. 2.1

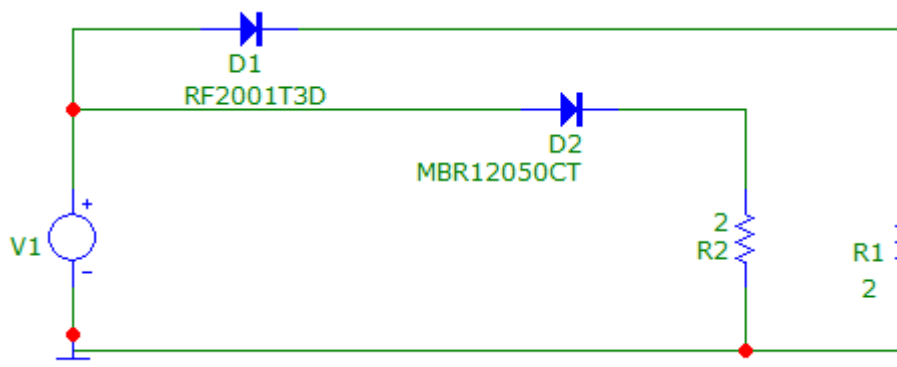


Рисунок 2.1 – Схема для досліджень напівпровідникових діодів

Для цього з табл. 2.1 виберіть для свого варіанту марку випрямного діода D1 та діода Шоткі D2, а також задайте значення опорів R1 та R2.

Таблиця 2.1 – Варіанти параметрів схеми

	Марка випрямного діода	Марка діода Шоткі	U <sub>max</sub> , В	R, Ом
1.	RF1601T2D	DMBR10L60CT	50	5
2.	BYM11-100	DMBR10H100CT	100	10
3.	BYM11-1000	DMBR20H150CTG	150	10
4.	BYM12-400	DMBR20H100CT	90	5
5.	BYT12P600	DMBR20L80CT	80	4
6.	RF2001T2D	DMBR20L60CT	60	3
7.	RF2001T3D	DMBRF30L60CT	50	2
8.	BYW51-200	DMBR30H60CTG	45	1,5
9.	BYT30P600	DMBR30H80CT	75	2,5
10.	BYT28-300	DMBR30H100CT	100	4
11.	BYT54M	DMBR30H150CTG	120	4
12.	BYV32-200	DMBRF30H150CTG	150	5
13.	BYW29-200	DMBR40H100WT	100	2,5
14.	BYW36	DMBR41H100CT	90	2
15.	BYW51-200	DMBR60H100CT	80	2
16.	RF2001T4S	DMBR60L45WTG	40	1



1.2 В діалоговому вікні, яке викликається подвійним натисканням клавіші миші на джерелі напруги (Voltage Source), задайте для свого варіанту значення  $U_{max}$  та інші параметри так, як показано на рис. 2.2

1.3 За допомогою аналізу перехідних процесів відобразіть часові діаграми роботи схеми для таких величин:

- напруга джерела напруги (Voltage Source);
- струми діодів D1 та D2;
- напруги діодів D1 та D2.

У вікні налаштування аналізу перехідних процесів задайте час моделювання (Maximum Run Time) - 2 мкс, та максимальний крок моделювання (Maximum Step Time) – 1 нс.

Приклад налаштування аналізу перехідних процесів подано на рис. 1.3.

Зробіть скріншот схеми та часових діаграм та подайте їх у протоколі до лабораторної роботи на рис. 1П.1 та 1П.2

1.4 За часовими діаграмами визначте:

- значення напруги на діодах у відкритому та закритому станах;
- значення струму діодів у відкритому та закритому станах;
- час зворотного відновлення діодів,

Результати занесіть до табл. 1П.1 протоколу (Додаток А).

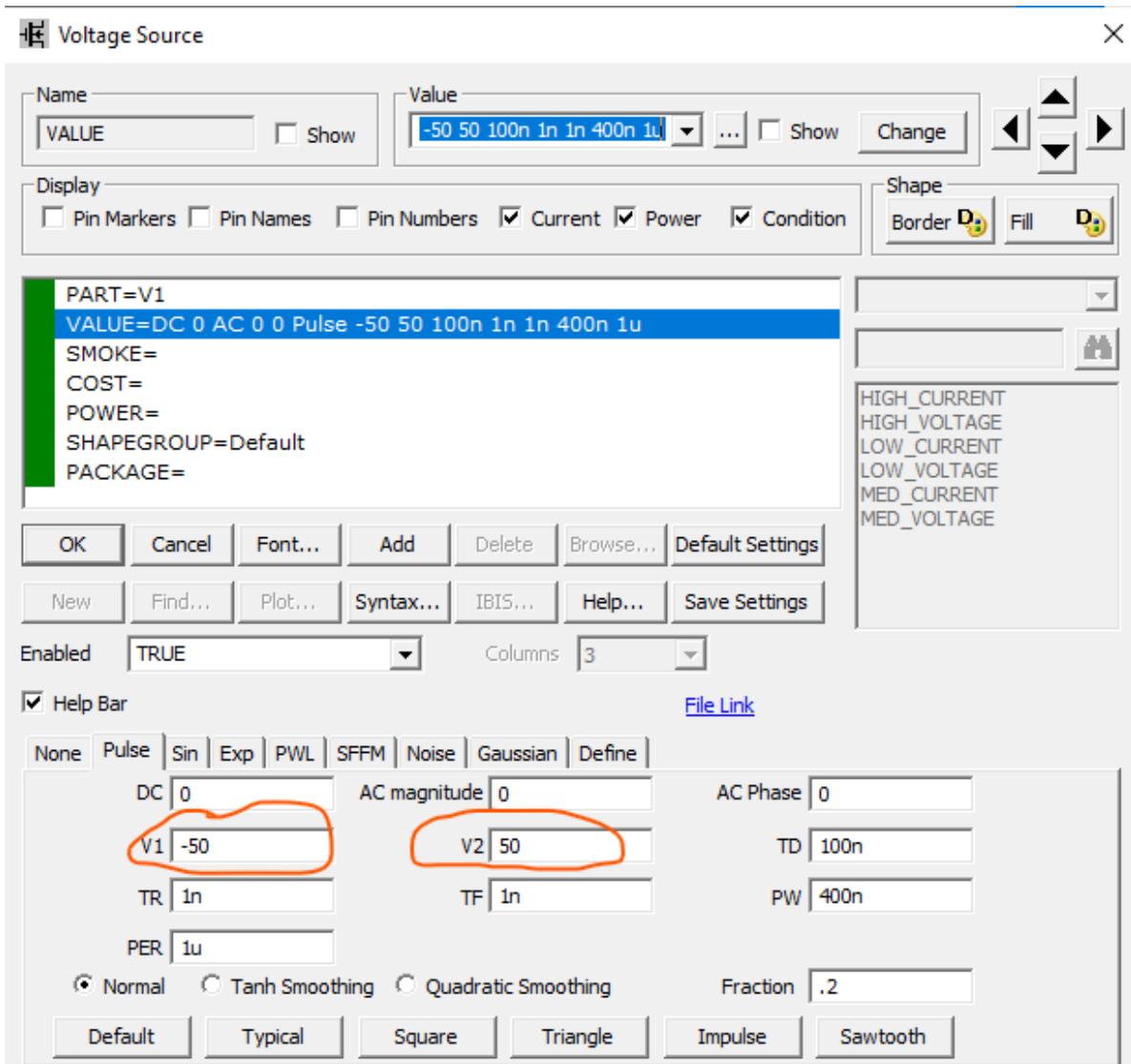


Рисунок 2.2 – Налаштування джерела напруги Voltage Source

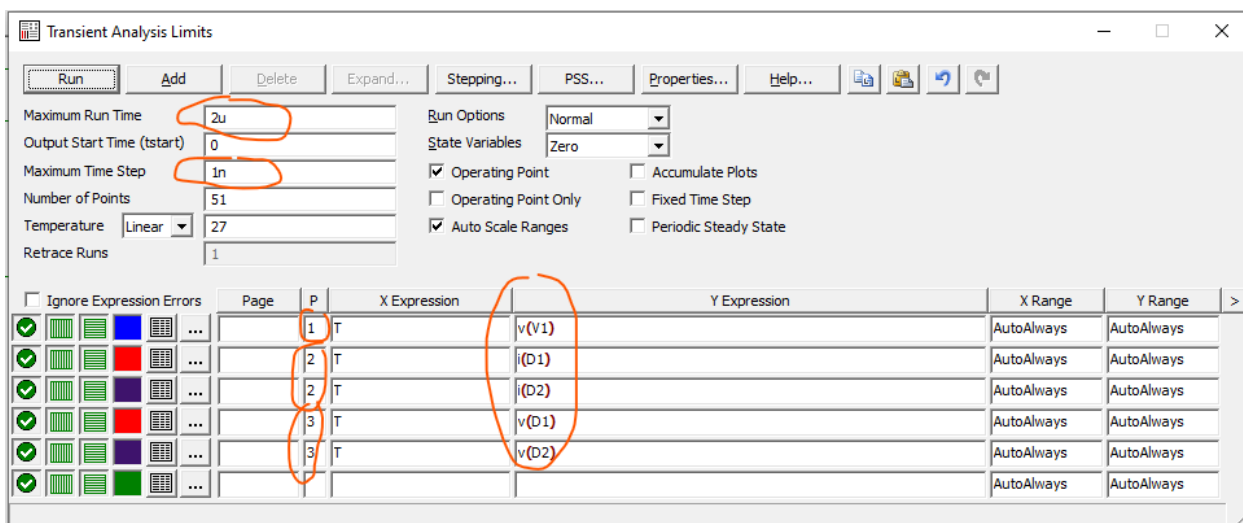


Рисунок 2.3 – Вікно налаштування аналізу перехідних процесів

## 2. Дослідження тиристора SCR

### 2.1 Зберіть схему подану на рис. 2.4

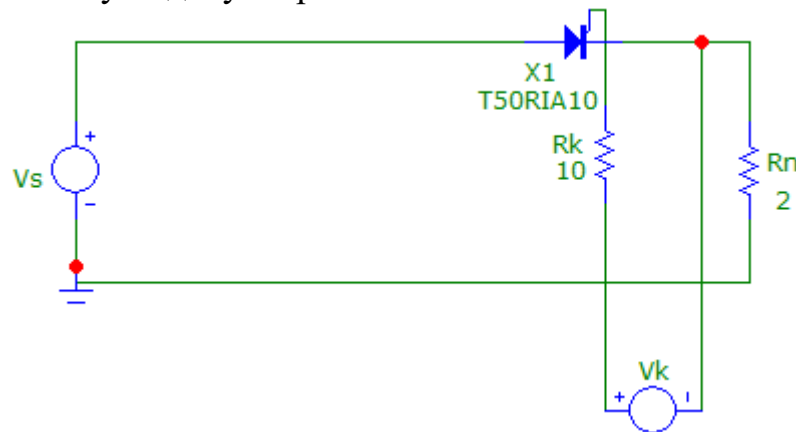


Рисунок 2.4 – Схема для досліджень тиристора SCR

Для цього розмістіть на робочому полі тиристор T50RIA10 з вкладок Analog Library/Thyristor/SCR/T-. Значення опору навантаження  $R_n$  візьміть для свого варіанту з табл. 1.1, а опору  $R_k$  задайте рівним 10 Ом.

2.2 Задайте для свого варіанту значення  $U_{max}$  джерела напруги живлення  $V_s$  та інші параметри так, як показано на рис. 1.5

2.3 Задайте значення параметрів джерела напруги керування  $V_k$  за прикладом рис. 2.6.

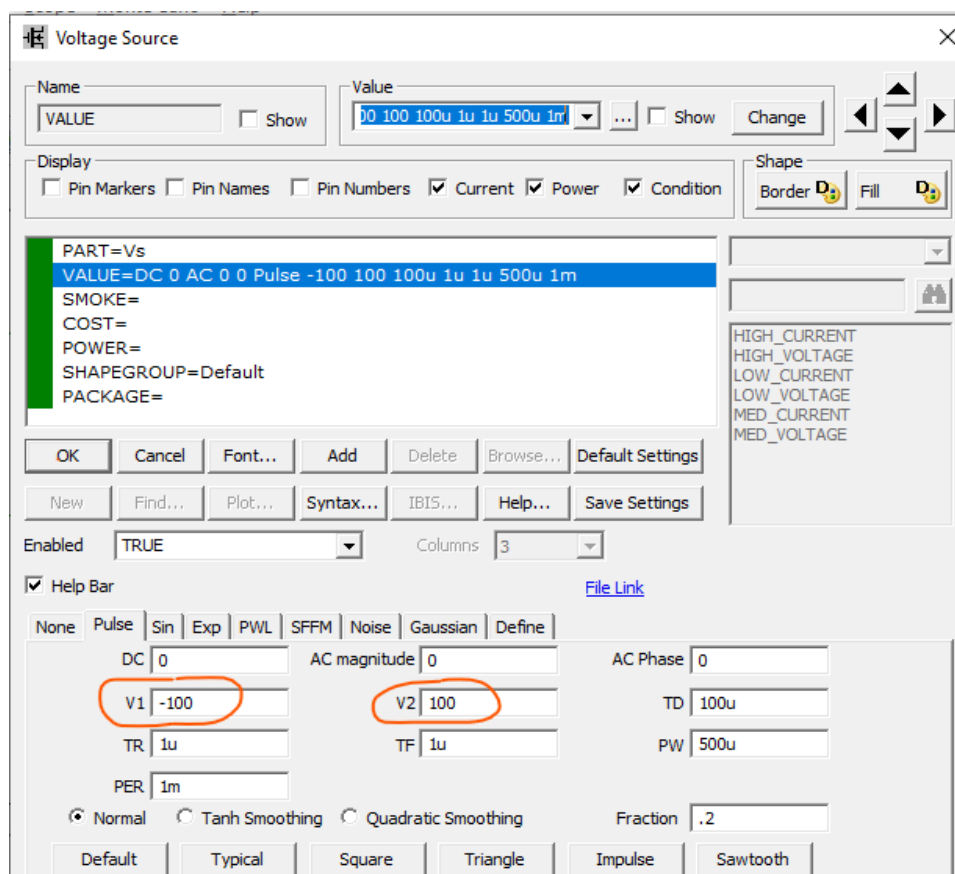


Рисунок 2.5 – Налаштування джерела напруги живлення  $V_s$

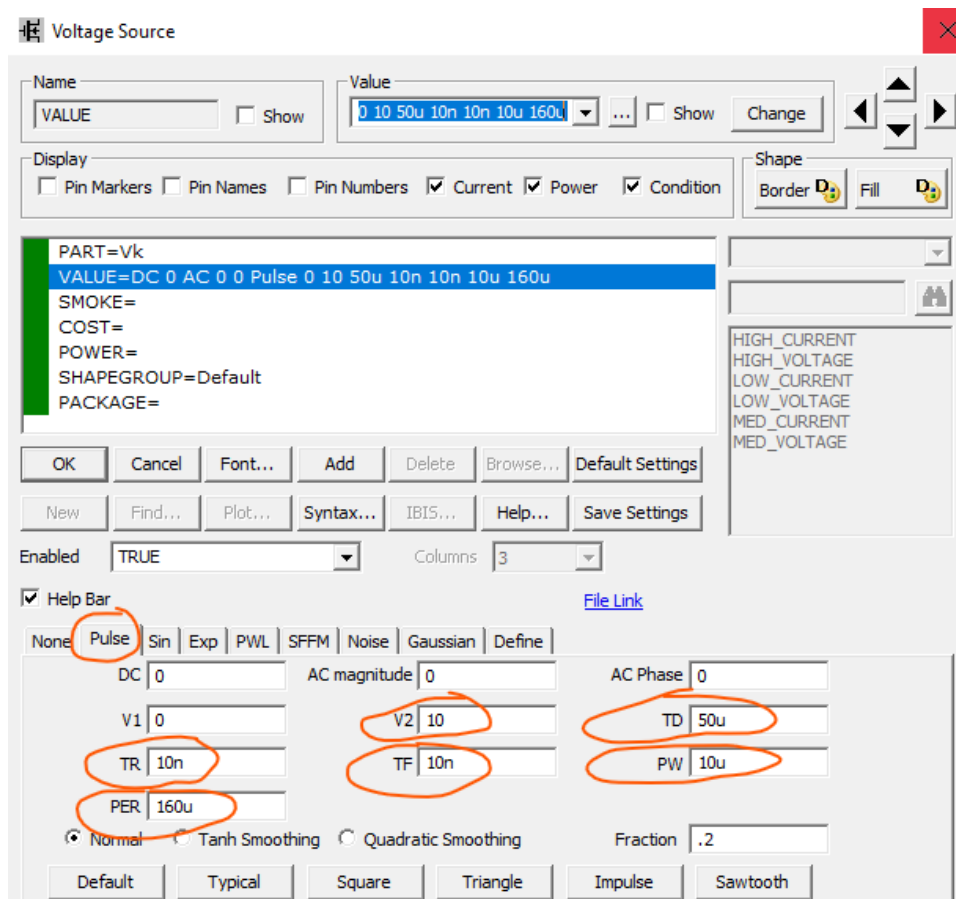


Рисунок 2.6 – Налаштування джерела напруги керування V<sub>k</sub>

2.4 За допомогою аналізу перехідних процесів відобразить часові діаграми роботи схеми для таких величин:

- напруги джерела напруги V<sub>s</sub>;
- напруги джерела напруги V<sub>k</sub>;
- струм тиристора;
- напруга на тиристорі.

У вікні налаштування аналізу перехідних процесів задайте час моделювання (Maximum Run Time) - 2 мс, та максимальний крок моделювання (Maximum Step Time) – 1 мкс.

Приклад налаштування аналізу перехідних процесів подано на рис. 2.7.

Зробіть скріншот схеми та часових діаграм та подайте їх у протоколі до лабораторної роботи на рис. 1П.3.

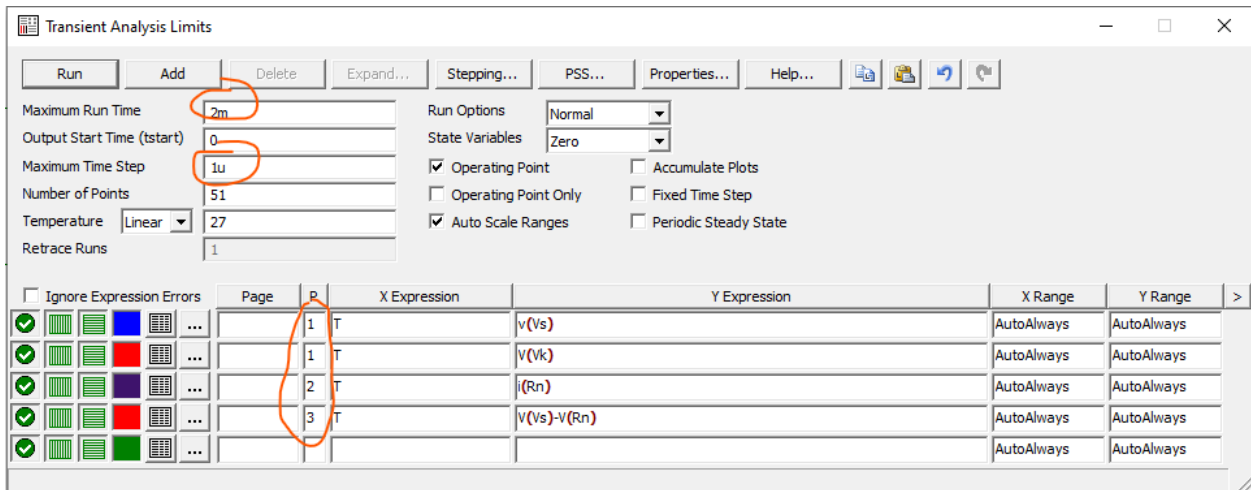


Рисунок 2.7 – Вікно налаштування аналізу перехідних процесів

### 3. Дослідження силових біполярних транзисторів (Power BJT)

#### 3.1 Зберіть схему подану на рис. 2.8

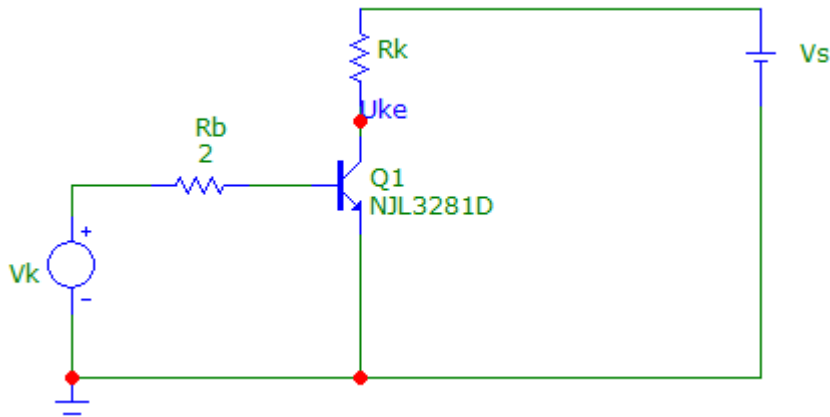


Рисунок 2.8 – Схема для досліджень тиристора SCR

Для цього розмістіть на робочому полі біполярний транзистор NPN та виберіть його марку, задайте значення опору колекторного кола  $R_k$  та напруги джерела живлення  $V_s$  у відповідності до варіанту з табл. 2.2., а значення опору  $R_b$  - рівним 2 Ом.

Таблиця 2.2 – Варіанти параметрів схеми

	Марка транзистора	$U_s$ , В	$R_k$ , Ом		Марка транзистора	$U_s$ , В	$R_k$ , Ом
1.	NJL3281D	150	10	9.	NJL3281D	200	10
2.	NJW0281G	150	12	10.	NJW0281G	200	20
3.	NJW3281G	150	15	11.	NJW3281G	200	12
4.	NJW21194G	150	20	12.	NJW21194G	200	16
5.	NJL3281D	100	5	13.	NJL3281D	175	12
6.	NJW0281G	100	4	14.	NJW0281G	175	25
7.	NJW3281G	100	6	15.	NJW3281G	175	20
8.	NJW21194G	100	3	16.	NJW21194G	175	10

### 3.2 Задайте значення параметрів джерела напруги керування V<sub>k</sub> за прикладом рис. 2.9.

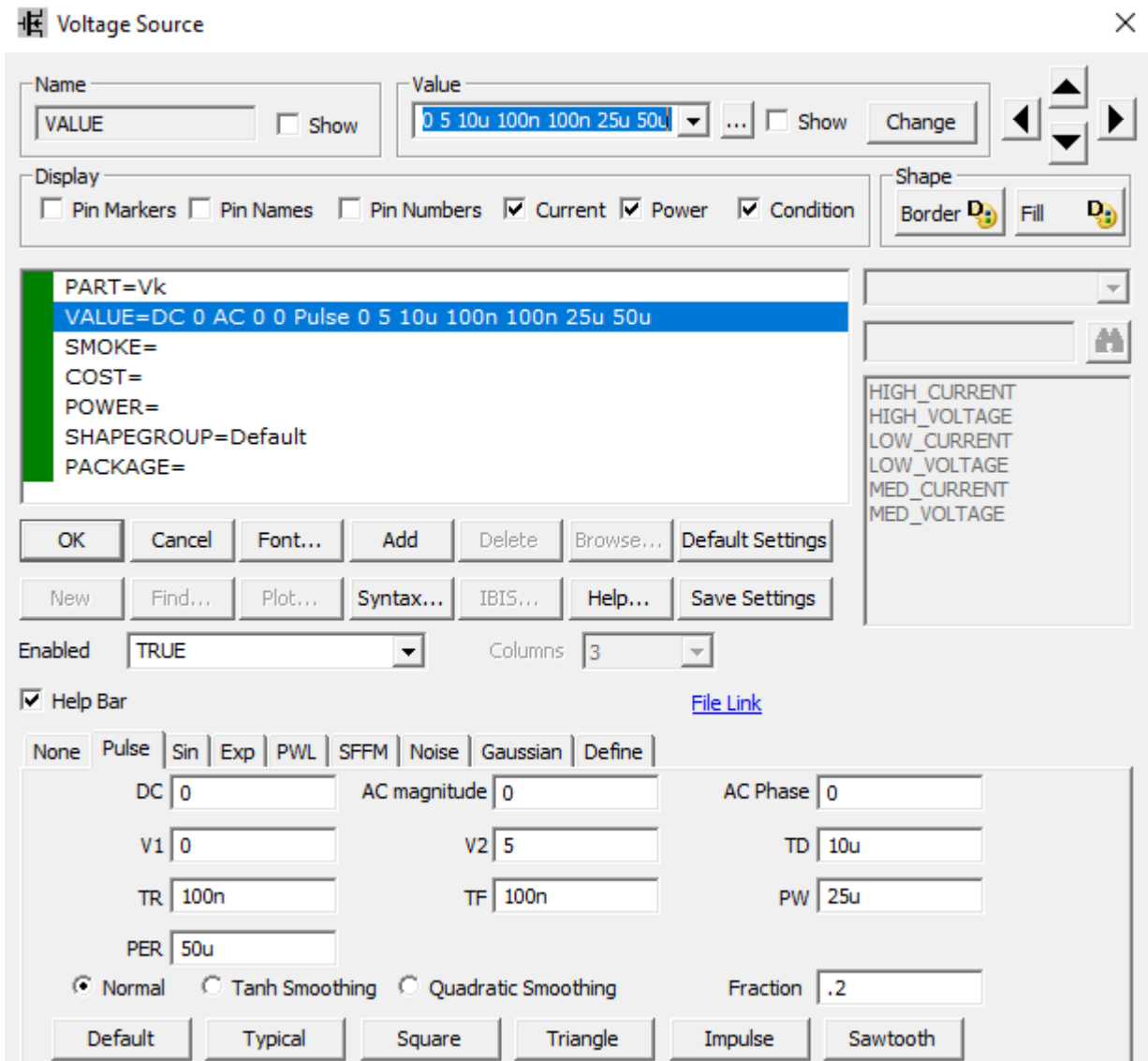


Рисунок 2.9 – Налаштування джерела напруги керування V<sub>k</sub>

### 3.3 За допомогою аналізу перехідних процесів відобразіть часові діаграми роботи схеми для таких величин:

- напруги джерела напруги V<sub>k</sub>;
- струм бази біполярного транзистора I<sub>b</sub>;
- струм колектора біполярного транзистора I<sub>c</sub>;
- напруга між колектором та емітером біполярного транзистора U<sub>се</sub>.

У вікні налаштування аналізу перехідних процесів задайте час моделювання (Maximum Run Time) - 100 мкс, та максимальний крок моделювання (Maximum Step Time) – 1 нс.

Приклад налаштування аналізу перехідних процесів подано на рис. 2.10.

Зробіть скріншот схеми та часових діаграм та подайте їх у протоколі до лабораторної роботи на рис. 1П.4.

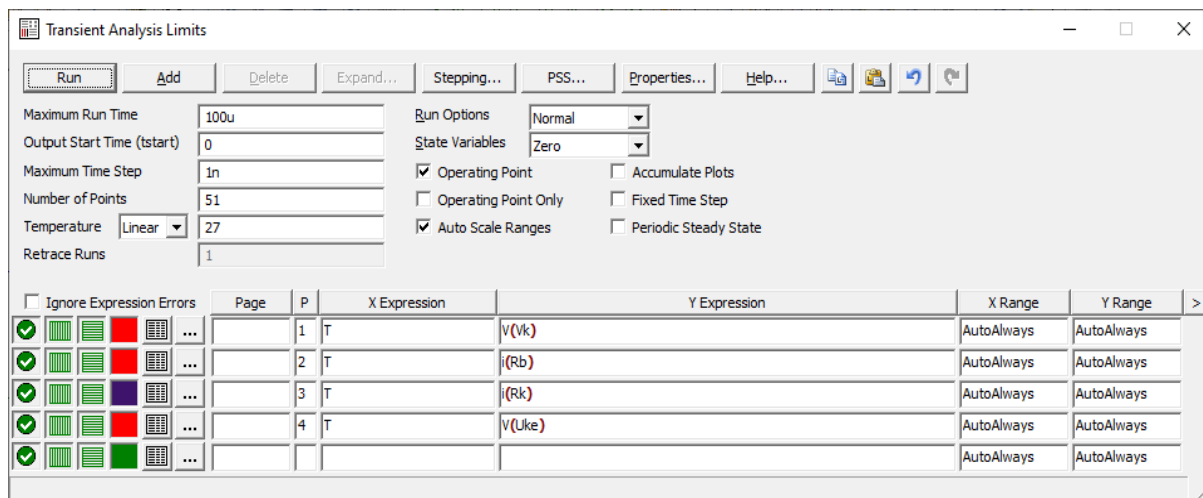


Рисунок 2.10 – Вікно налаштування аналізу перехідних процесів

3.4 З часових діаграм визначити:

- струм бази  $I_b$
- струм колектора у відкритому стані  $I_c(\text{sat})$ ;
- падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані (Collector–Emitter Saturation Voltage)  $U_{ce}(\text{sat})$ ;
- напругу між колектором та емітером у закритому стані (Collector–Emitter Voltage)  $U_{ce0}$ .
- час затримки включення польового транзистора;
- час включення польового транзистора;
- час затримки виключення польового транзистора
- час виключення польового транзистора.

Результати подати у табл. 1П.2 протоколу.

#### 4. Дослідження силових польових транзисторів Power MOSFET

##### 4.1 Зберіть схему подану на рис. 2.11

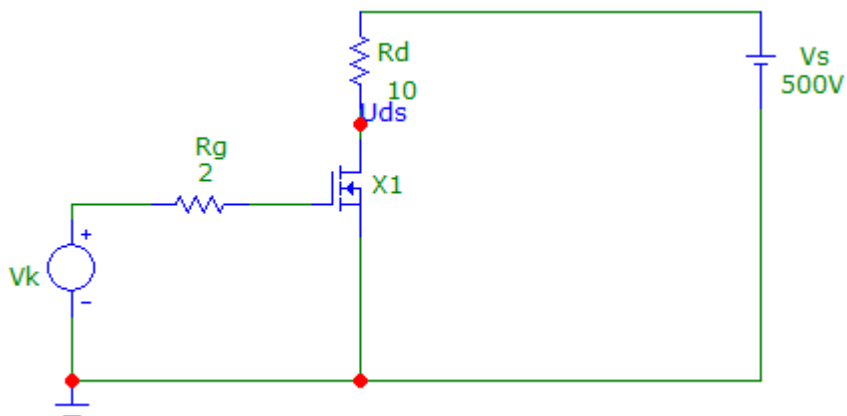


Рисунок 2.11 – Схема для досліджень силового польового транзистора MOSFET

Для цього розмістіть на робочому полі транзистор MOSFET (розташований у вкладці **Component / Ansglog Library / MOSFET / IRFA-**) та виберіть його марку, задайте значення опору кола стоку  $R_d$  та напруги джерела живлення  $V_s$  у відповідності до варіанту з табл. 1.3., а значення опору  $R_g$  - рівним 2 Ом.

4.2 Задайте значення параметрів джерела напруги керування  $V_k$  за прикладом рис. 2.12.

Таблиця 2.3 – Варіанти параметрів схеми

	Марка транзистора	$U_s$ , В	$R_k$ , Ом		Марка транзистора	$U_s$ , В	$R_k$ , Ом
1.	IRFP15N60L	400	30	9.	IRFP31N50L	360	12
2.	IRFP17N50L	450	35	10.	IRFP32N60K	600	20
3.	IRFP21N60L	500	20	11.	IRFP15N60L	500	40
4.	IRFP22N50A	350	20	12.	IRFP17N50L	400	30
5.	IRFP22N60K	500	25	13.	IRFP21N60L	300	15
6.	IRFP23N50L	300	20	14.	IRFP22N50A	250	12
7.	IRFP26N60L	450	20	15.	IRFP22N60K	200	10
8.	IRFP27N60L	480	20	16.	IRFP23N50L	320	16



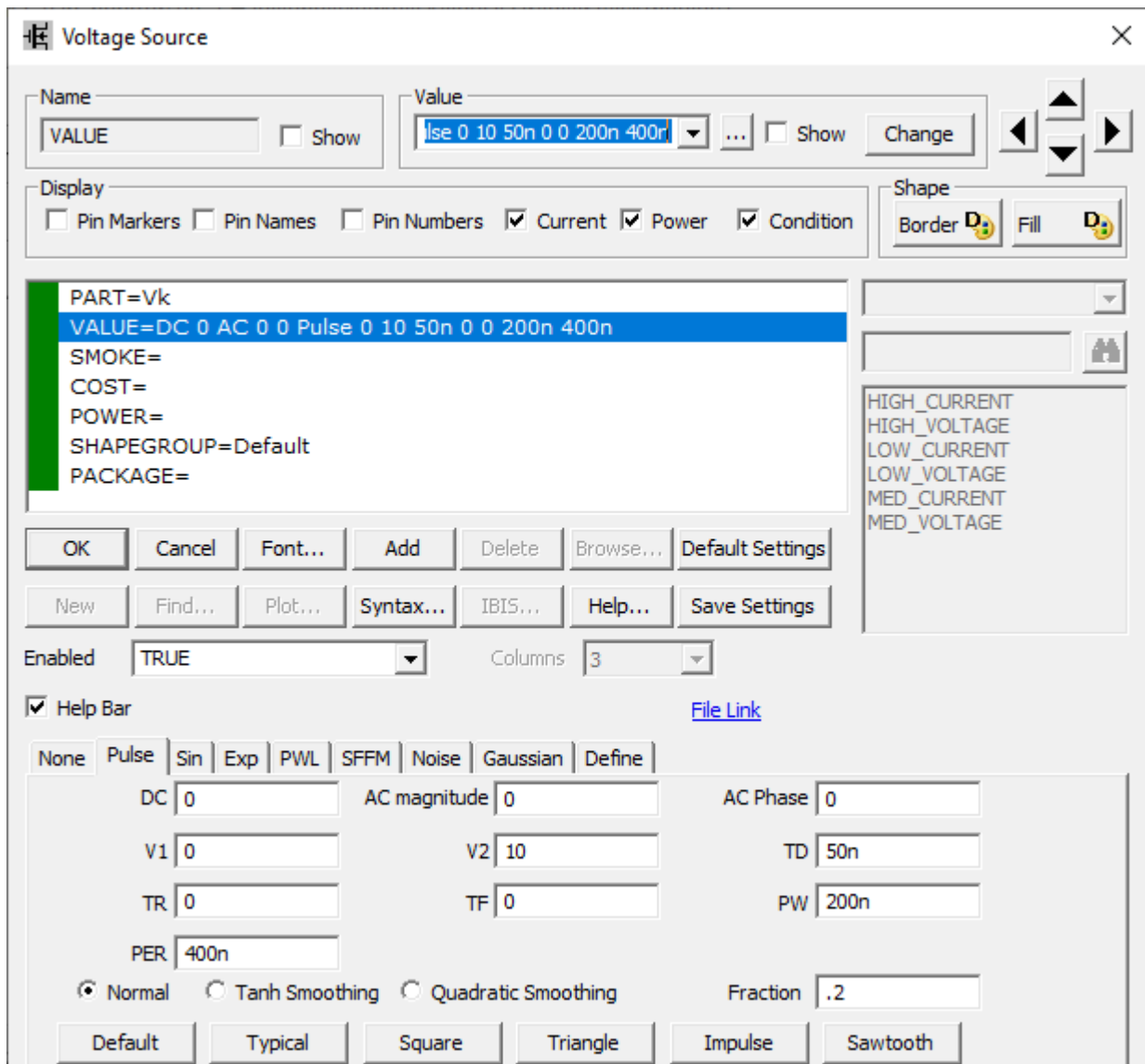


Рисунок 2.12 – Налаштування джерела напруги керування  $V_k$

4.3 За допомогою аналізу перехідних процесів відобразіть часові діаграми роботи схеми для таких величин:

- напруги джерела напруги керування  $V_k$ ;
- напруги на затворі транзистора  $V_g$
- струм затвору польового транзистора  $I_g$ ;
- струм стоку транзистора  $I_d$ ;
- напруга між стоком та витком польового транзистора  $U_{ds}$ .

У вікні налаштування аналізу перехідних процесів задайте час моделювання (Maximum Run Time) - 800 нс, та максимальний крок моделювання (Maximum Step Time) – 1 нс.

Приклад налаштування аналізу перехідних процесів подано на рис. 2.13.

Зробіть скріншот схеми та часових діаграм та подайте їх у протоколі до лабораторної роботи на рис. 1П.4.

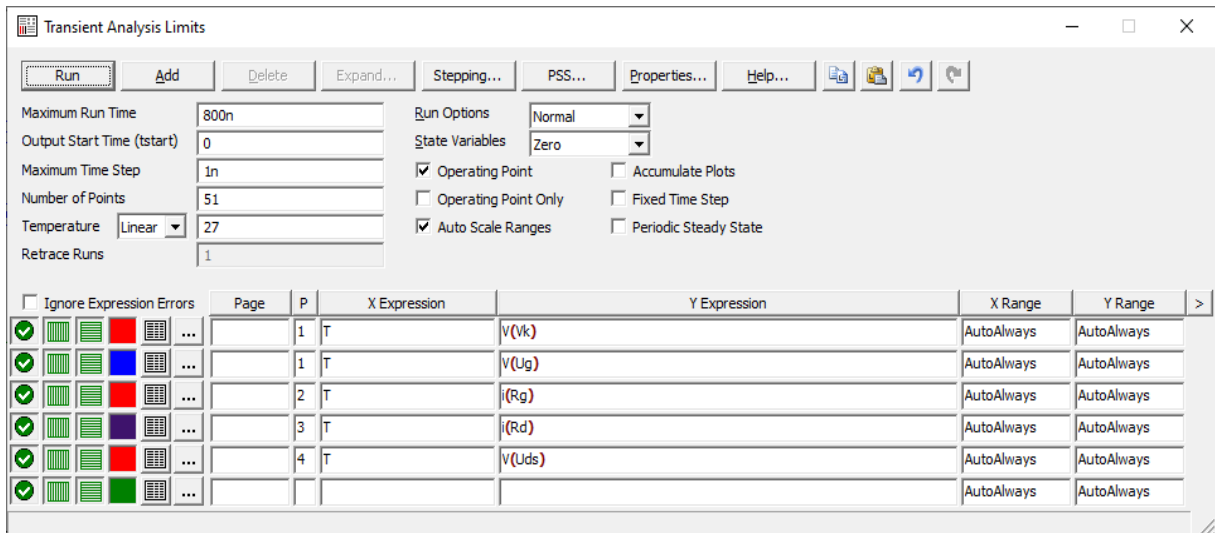


Рисунок 2.13 – Вікно налаштування аналізу перехідних процесів

### 3.4 З часових діаграм визначити:

- струм затвору польового транзистора  $I_g$ ;
- струм стоку у відкритому стані  $I_d$ ;
- падіння напруги між стоком та витокм у відкритому стані  $U_{ds}(\text{sat})$ ;
- напругу між стоком та витокм у відкритому стані  $U_{ds0}$ .
- час затримки включення польового транзистора;
- час включення польового транзистора;
- час затримки виключення польового транзистора
- час виключення польового транзистора.

Результати подати у табл. 1П.3 протоколу.

## 5. Дослідження силових біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT)

### 5.1 Зберіть схему подану на рис. 2.14

Для цього розмістіть на робочому полі транзистор IGBT (розташований у вкладці **Component / Analog Library / IGBT / IRGLC60KD1\_IR-**) та виберіть його марку, задайте значення опору кола стоку  $R_d$  та напруги джерела живлення  $V_s$  у відповідності до варіанту з табл. 1.4., а значення опору  $R_g$  - рівним 2 Ом.

### 5.2 Задайте значення параметрів джерела напруги керування $V_k$ за прикладом рис. 2.12.

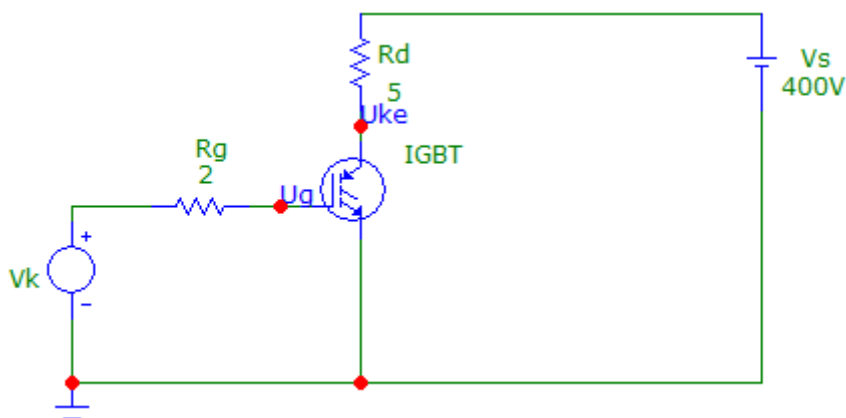


Рисунок 2.14 – Схема для досліджень IGBT

Таблиця 2.4 – Варіанти параметрів схеми

	Марка транзистора	Us, В	Rk, Ом		Марка транзистора	Us, В	Rk, Ом
1.	IRGP8B120KD	800	100	9.	IRGP8B120KD	600	80
2.	IRGP20B120UD	850	40	10.	IRGP20B120UD	540	30
3.	IRGP30B60KD	500	20	11.	IRGP30B60KD	360	18
4.	IRGP30B120KDE	750	25	12.	IRGP30B120KDE	600	20
5.	IRGP50B60PD1	450	10	13.	IRGP50B60PD1	300	6
6.	IRGPS40B120UD	700	20	14.	IRGPS40B120UD	600	15
7.	IRGPS60B120UD	650	20	15.	IRGPS60B120UD	800	15
8.	IRGB20B60	400	20	16.	IRGB20B60	500	25

5.3 За допомогою аналізу перехідних процесів відобразіть часові діаграми роботи схеми для таких величин:

- напруги джерела напруги керування  $V_k$ ;
- напруги на затворі транзистора  $V_g$
- струм затвору польового транзистора  $I_g$ ;
- струм колектора транзистора  $I_c$ ;
- напруга між колектором та емітером польового транзистора  $U_{ce}$ .

У вікні налаштування аналізу перехідних процесів задайте час моделювання (Maximum Run Time) - 4 мкс, та максимальний крок моделювання (Maximum Step Time) – 1 нс.

Приклад налаштування аналізу перехідних процесів подано на рис. 2.16.

Зробіть скріншот схеми та часових діаграм та подайте їх у протоколі до лабораторної роботи на рис. 1П.6.

З часових діаграм визначити:

- струм затвору польового транзистора  $I_g$ ;
- струм колектора у відкритому стані  $I_c$ ;
- падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані  $U_{ce} (sat)$ ;

- напругу між колектором та емітером у відкритому стані  $U_{ce0}$ .
- час затримки включення транзистора;
- час включення транзистора;
- час затримки виключення транзистора;
- час виключення транзистора.

Результати подати у табл. 1П.4 протоколу.

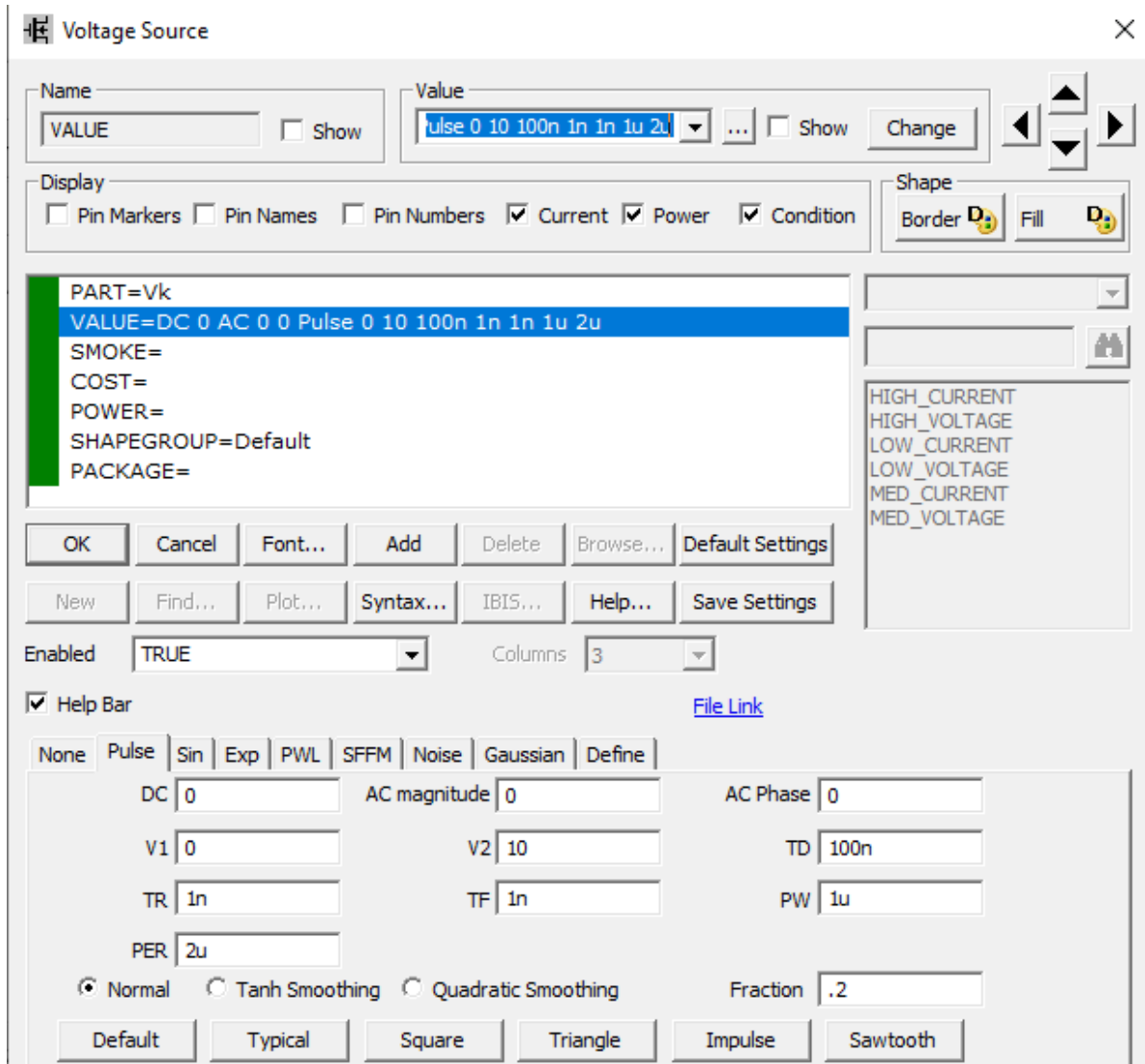


Рисунок 2.15 – Налаштування джерела напруги керування  $V_k$

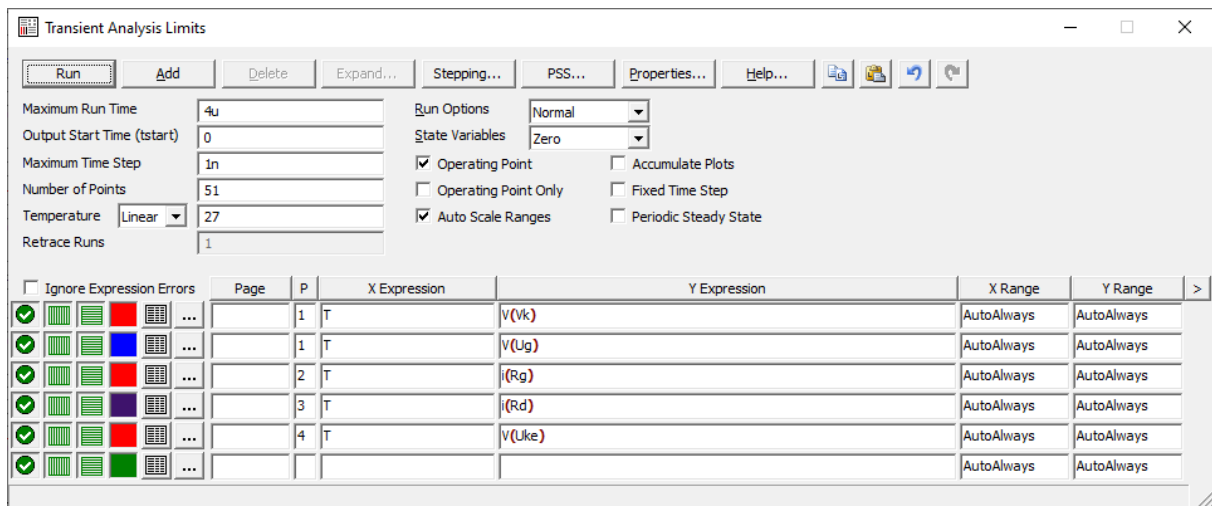


Рисунок 2.16 – Вікно налаштування аналізу перехідних процесів

## Обробка результатів дослідження

### 1. Дослідження напівпровідникових діодів

1.1 Для діодів свого варіанту виписати з технічної документації значення:

- номінального струму у відкритому стані (Forward Current)  $I_F$ ;
- падіння напруги на діоді у відкритому стані (Forward Voltage)  $U_F$ ;
- номінальної напруги у закритому стані (Reverse Voltage)  $U_R$ ;
- струме утечки діода у закритому стані (Reverse Current)  $I_R$
- час зворотного відновлення (Reverse Recovery Time)  $t_R$ .

1.2 Порівняти визначенні за часовими діаграмами значення падіння напруги на діоді у відкритому стані та час зворотного відновлення з паспортними даними.

1.3 За визначеними значеннями струму та напруги на діодах у відкритому стані обчислити втрати провідності (conduction losses) та втрати у закритому стані (non-conduction losses) напівпровідникових діодів.

2. Дослідження тиристора SCR. Проаналізуйте часові діаграми роботи тиристора та зробіть висновки щодо умов включення та виключення тиристора SCR.

3. Дослідження силових біполярних транзисторів:

3.1 Для біполярного транзистора свого варіанту виписати з технічної документації значення:

- номінального струму бази  $I_b$
- номінальне значення постійного струму колектора у відкритому стані  $I_c$ ;
- номінальне значення падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані (Collector–Emitter Saturation Voltage)  $U_{ce(sat)}$ ;
- номінальну напругу між колектором та емітером у закритому стані (Collector–Emitter Voltage)  $U_{ce0}$ .

3.2 Визначити втрати провідності та втрати на перемикання біполярного транзистора при частоті 20 кГц.

3.3 Порівняти дослідні та паспортні дані та зробити висновки до розділу.

4. Дослідження силових польових транзисторів:

4.1 Для польового транзистора свого варіанту виписати з технічної документації значення:

- номінальний струм затвору польового транзистора  $I_g$ ;
- номінальний постійний струм стоку у відкритому стані  $I_s$ ;
- падіння напруги між стоком та витокм у відкритому стані  $U_{ds}(\text{sat})$ ;
- номінальна напруга між між стоком та витокм у відкритому стані  $U_{ds0}$ .
- час затримки включення польового транзистора;
- час включення польового транзистора;
- час затримки виключення польового транзистора;
- час виключення польового транзистора.

Результати подати до табл 1П.3 протоколу.

4.2 Визначити втрати провідності та втрати на перемикання польового транзистора при частоті 20 кГц.

4.3 Порівняти дослідні та паспортні дані та зробити висновки до розділу.

5. Дослідження ізольованих транзисторів з ізольованим затвором:

5.1 Для транзистора IGBT свого варіанту виписати з технічної документації значення:

- номінальний струм затвору польового транзистора  $I_g$ ;
- номінальний постійний струм колектора у відкритому стані  $I_c$ ;
- падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані  $U_{ce}(\text{sat})$ ;
- номінальна напруга між колектором та емітером у відкритому стані  $U_{ce0}$ .
- час затримки включення польового транзистора;
- час включення польового транзистора;
- час затримки виключення транзистора;
- час виключення польового транзистора.

Результати подати до табл 1П.4 протоколу.

4.2 Визначити втрати провідності та втрати на перемикання польового транзистора при частоті 20 кГц.

4.3 Порівняти дослідні та паспортні дані та зробити висновки до розділу.

## Література

1. Rashid M. Power electronics handbook : devices, circuits, and applications handbook. – Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. – 2017. – ISBN 978-0-12-382036-5
2. Електроніка і мікросхемотехніка. Силова електроніка. Том 4. Кн.1. Кн. 2 / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько, В. В. Ясинський. – Київ: «Каравела», 2013 р. – 640 с.
3. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Монографія / М. Я. Островерхов, В. І. Сенько, В. І. Чибеліс. – Київ, 2020. – 242 с.
4. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія / В. І. Сенько, К. В. Трубіцин, В. І. Чибеліс. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. – 300 с.
5. Силова електроніка в системах електропостачання. Практикум. Електронне мережне навчальне видання / С. П. Денисюк, Д. Г. Дерев'яно, Г. С. Белоха. – Київ, 2022. – Точка доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48138/1/Sylova.pdf>
6. Силова перетворювальна техніка. Конспект лекцій. Електронне мережне навчальне видання / В. І. Сенько, К. В. Трубіцин, В. І. Чибеліс. – Київ, 2022. – Точка доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48138/1/Sylova.pdf>
7. ТОЕ. Електромагнітне поле : підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. – 392 с.
8. ТОЕ. Задачі та приклади розрахунку лінійних електричних кіл : навч. посібник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук та ін. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. – 346 с.
9. ТОЕ. Методи розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл в прикладах та задачах : навч. посібник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук. – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 262 с.
10. ТОЕ. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола: підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, за ред. проф. Ю. О. Карпова. – Херсон : ОЛДІ- ПЛЮС, 2013. – 456 с.
11. ТОЕ. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник / Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, під ред. проф. Ю. О. Карпова. – Херсон : ОЛДІ- ПЛЮС, 2014. – 326 с.
12. Шпіка М. І. Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу: конспект лекцій для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка» / М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко. – Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. – 82 с.

**Додаток А**  
**Протокол виконання лабораторної роботи**  
**«СИЛОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ КЛЮЧІ В**  
**ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ»**

	Дата виконання:
Викладач:	Виконавці: 1. 2.
	Група:
	Бригада №
	Варіант №

**1. Дослідження напівпровідникових діодів**

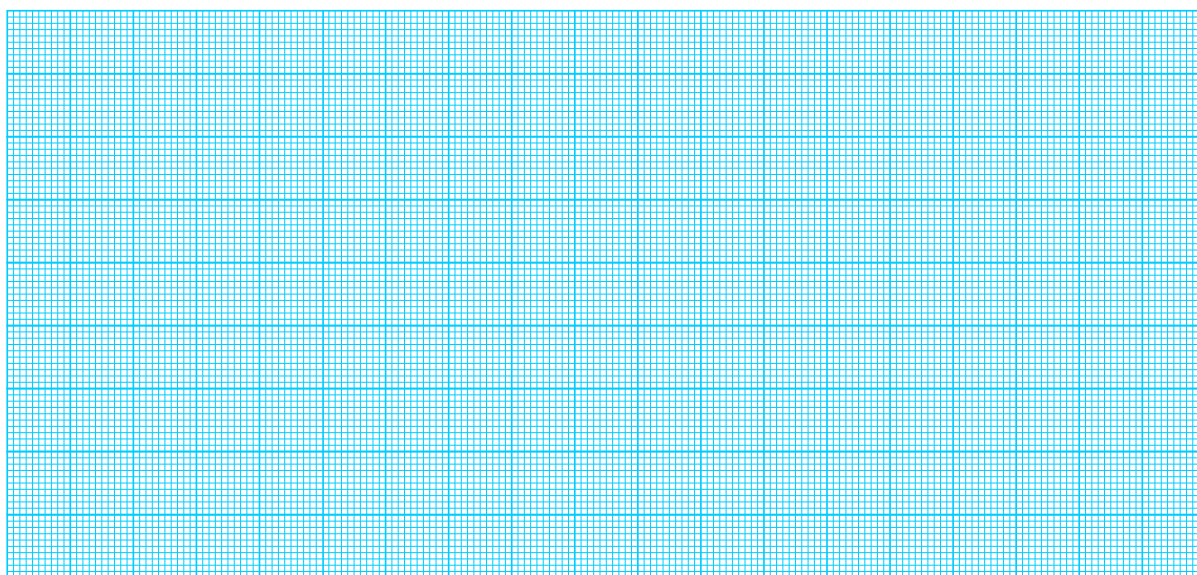


Рисунок 1П.1 – Схема моделі дослідження напівпровідникових діодів



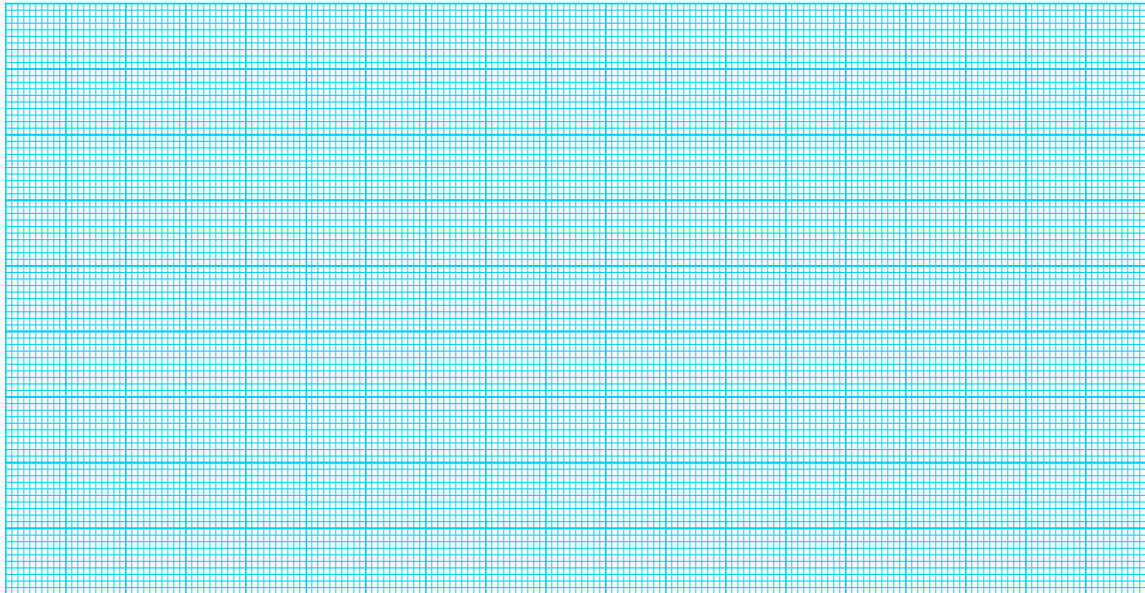


Рисунок 1П.2 – Часові діаграми перемикання напівпровідникових діодів

Таблиця 1П.1 – Основні параметри напівпровідникових діодів

	Од. вим.	Дослідні дані		Паспортні дані	
		Випрям- ний діод	Діод Шотткі	Випрям- ний діод	Діод Шотткі
Струм у відкритому стані (Forward Current) $I_F$	А				
Падіння напруги на діоді у відкритому стані (Forward Voltage) $U_F$	В				
Напруга у закритому стані (Reverse Voltage) $U_R$	В				
Струм утічки діода у закритому стані (Reverse Current) $I_R$	А				
Час зворотного відновлення (Reverse Recovery Time) $t_R$	нс				
Втрати провідності (conduction losses)	Вт				
Втрати у закритому стані (non-conduction losses)	Вт				

**Висновки:**

## 2. Дослідження тиристора SCR

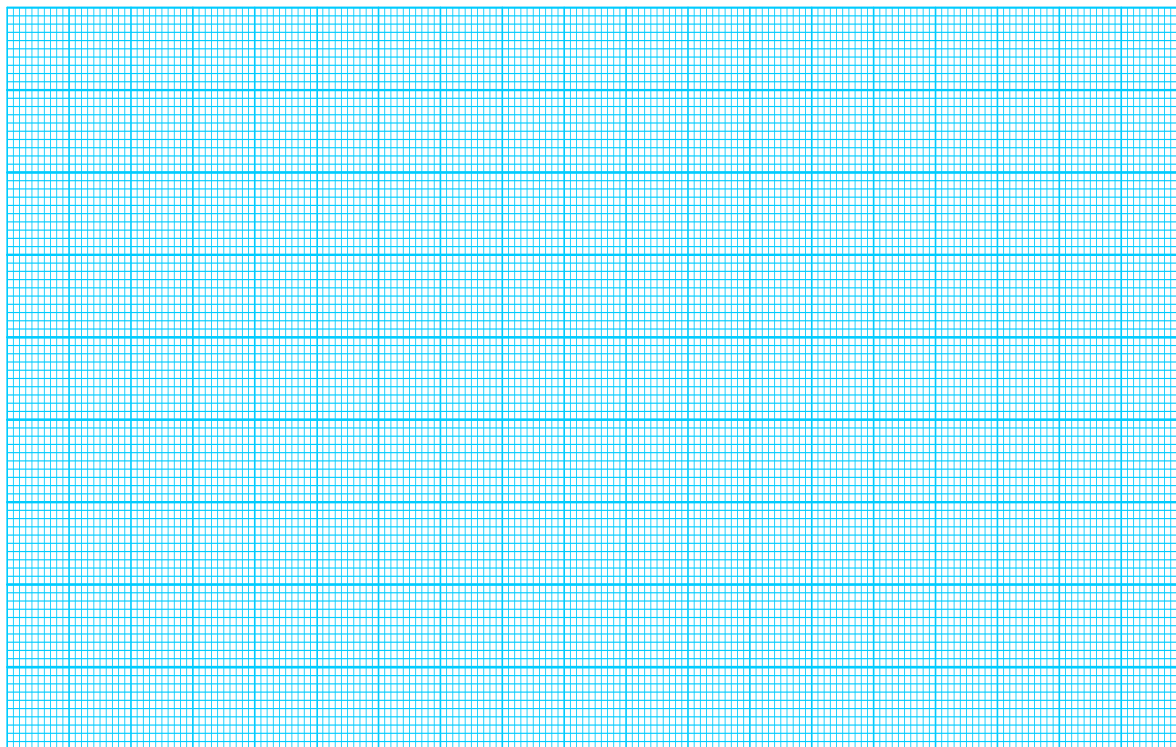


Рисунок 1П.3 – Схема та часові діаграми перемикання тиристора SCR

**Висновки:**

### 3. Дослідження силових біполярних транзисторів

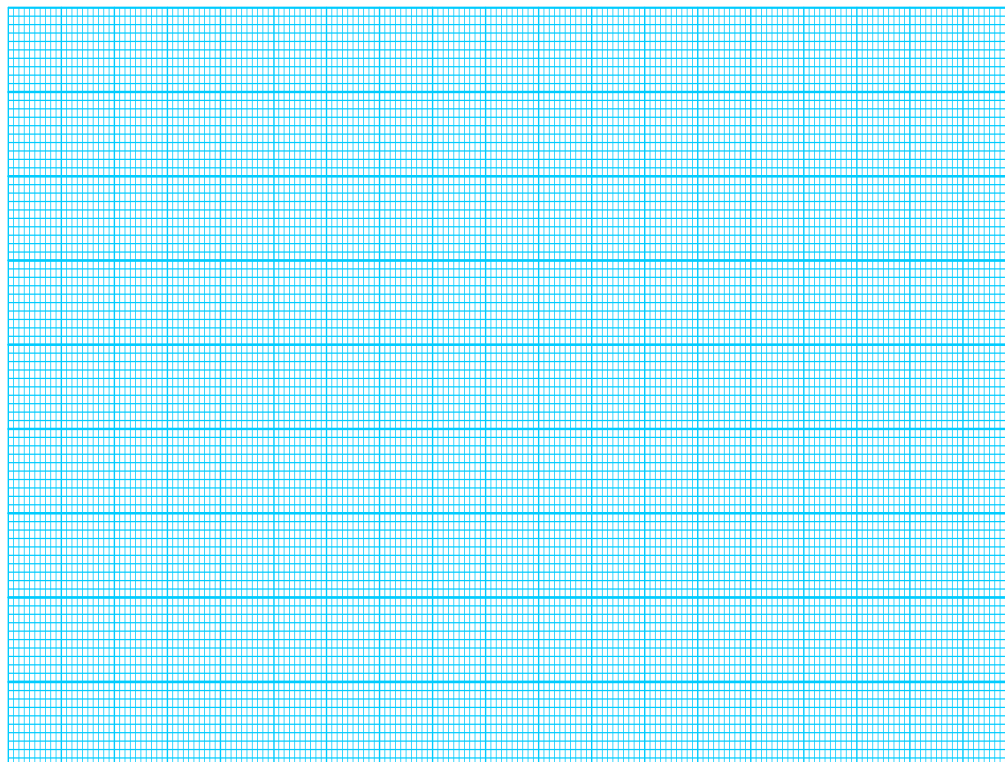


Рисунок 1П.4 – Схема та часові діаграми перемикання біполярного транзистора

Таблиця 1П.2 – Основні параметри біполярних транзисторів

	Од. вим.	Дослідні дані	Паспортні дані
<b>Марка транзистора</b>			
Струм бази $I_b$	А		
Струм колектора у відкритому стані $I_k$ ;	А		
Падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані (Collector–Emitter Saturation Voltage) $U_{ce(sat)}$ ;	В		
Напруга між колектором та емітером у закритому стані (Collector–Emitter Voltage) $U_{ce0}$ .	В		
Час затримки відкриття транзистора	нс		
Час відкриття транзистора	нс		
Час затримки закриття транзистора	нс		
Час закриття транзистора	нс		
Втрати провідності (conduction losses)	Вт		
Втрати на перемикання при частоті $f=20\text{кГц}$	Вт		

**Висновки:**

#### 4. Дослідження силових польових транзисторів

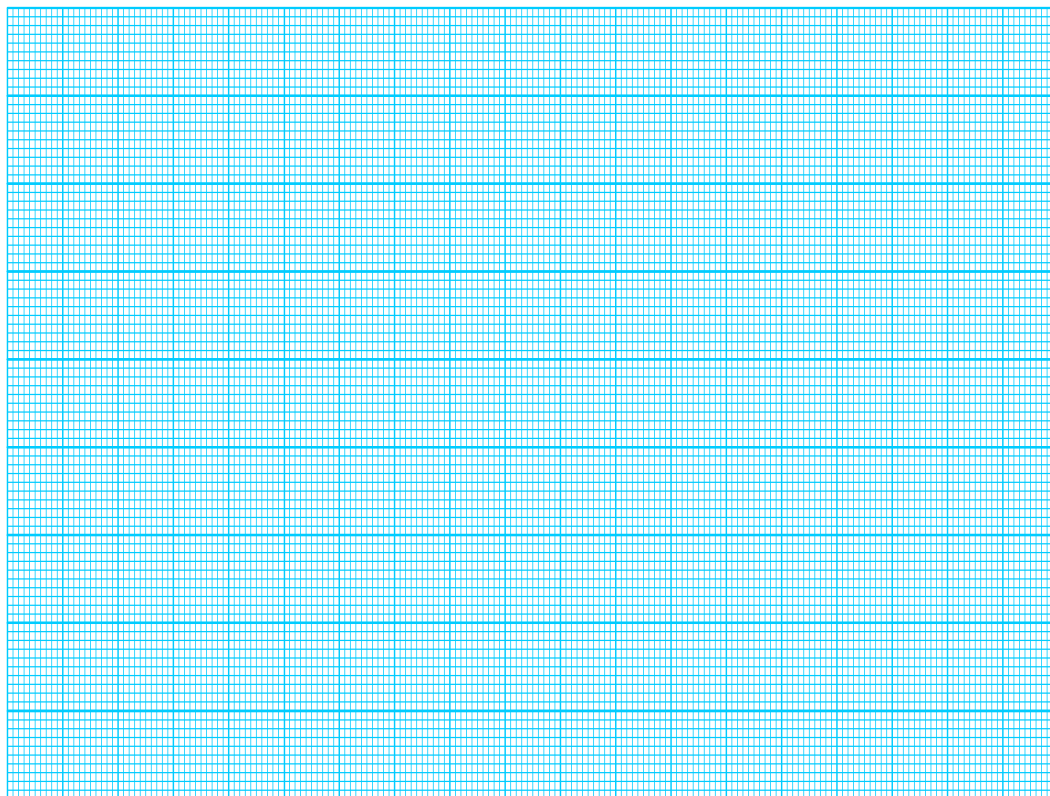


Рисунок 1П.5 – Схема та часові діаграми перемикання польового транзистора

Таблиця 1П.3 – Основні параметри польових транзисторів

	Од. вим.	Дослідні дані	Паспортні дані
<b>Марка транзистора:</b>			
струм затвору польового транзистора $I_g$ ;	А		
струм стоку у відкритому стані $I_d$ ;	А		
падіння напруги між стоком та витокком у відкритому стані $U_{ds} (sat)$ ;	В		
напругу між стоком та витокком у закритому стані $U_{ds0}$ .	В		
час затримки включення польового транзистора;	нс		
час включення польового транзистора	нс		
час затримки виключення польового транзистора;	нс		
час виключення польового транзистора	нс		
втрати провідності (conduction losses)	Вт		
втрати на перемикання при частоті $f=20кГц$	Вт		

**Висновки:**

## 5. Дослідження біполярних транзисторів з ізолюваним затвором IGBT

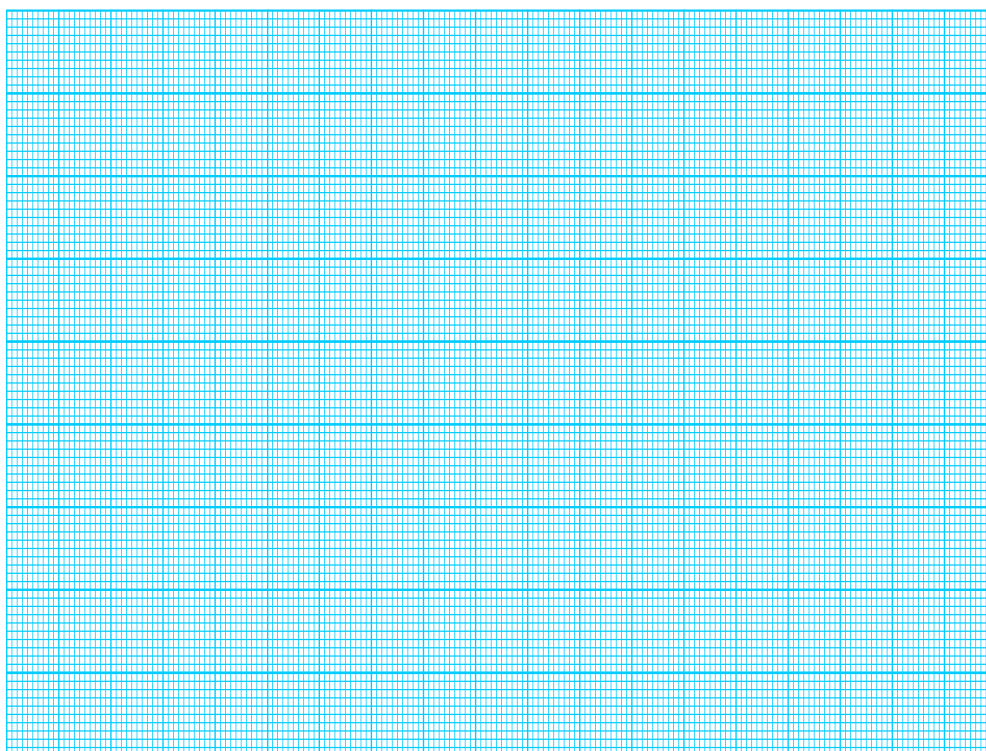


Рисунок 1П.5 – Схема та часові діаграми перемикання IGBT

Таблиця 1П.4 – Основні параметри IGBT

	Од. вим.	Дослідні дані	Паспортні дані
<b>Марка транзистора:</b>			
номінальний струм затвору польового транзистора $I_g$	А		
номінальний постійний струм колектора у відкритому стані $I_c$	А		
падіння напруги між колектором та емітером у відкритому стані $U_{ce(sat)}$	В		
номінальна напруга між колектором та емітером у закритому стані $U_{ce0}$	В		
час затримки включення польового транзистора	нс		
час включення польового транзистора	нс		
час затримки виключення транзистора	нс		
час виключення польового транзистора	нс		
втрати провідності (conduction losses)	Вт		
втрати на перемикання при частоті $f=20\text{кГц}$	Вт		

**Висновки:**

*Електронне навчальне видання*

**Андрій Миколайович Коваль  
Олексій Анатолійович Жуков**

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторної роботи  
на тему: «Силові напівпровідникові ключі в  
перетворювальній техніці»  
з дисципліни «Силова електроніка і перетворювальна  
техніка»  
для студентів спеціальності  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Рукопис оформив *А. Коваль*

Видається в авторській редакції

Оригінал-макет виготовлено в РВВ ВНТУ

Підписано до видання 16.01.2025 р.  
Гарнітура Times New Roman.  
Зам. № P2025-013

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
**press.vntu.edu.ua;**  
Email: [irvc.vntu@gmail.com](mailto:irvc.vntu@gmail.com)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК No 3516 від 01.07.2009 р.