

## Лекція 5. Силові прилади аналогової схемотехніки

### 5.1 Основні особливості і класифікація тиристорів

Тиристор - напівпровідниковий прилад із двома стійкими статичними станами, який має три або більш р-п переходів і може бути переключений із закритого стану у відкритий та навпаки.

З погляду застосування тиристор – це напівпровідниковий ключ, тобто прилад, основне призначення якого складається в замиканні та розмиканні кола навантаження за допомогою зовнішніх сигналів.

Аналогічно транзисторному ключу тиристор має два статичних стани: закритий, або стан низької провідності, і відкритий, або стан високої провідності. У кожному із двох статичних станів тиристор може перебувати як за-вгодно довго. Перехід з одного стану в другий відбувається відносно швидко під впливом короткочасного зовнішнього сигналу.

Тиристори класифікують по наступним ознаках: по кількості виводів, по виду вихідної ВАХ, по способах вимикання та керування і по інших ознаках.

По кількості виводів розрізняють:

- діодні тиристори (диністори), які мають тільки два виводи (анод і катод);
- тріодні тиристори, які мають три виводи (два основних і один управління): анод, катод і електрод управління;
- чотирьохелектродні (тетродні) тиристори, які мають чотири виводи (два вхідних і два вихідних), і т.д.

По виду вихідної ВАХ розрізняють:

- тиристори, які не проводять у зворотному напрямку;
- тиристори, які проводять у зворотному напрямку (тиристори зі зворотною провідністю, або тиристори - діоди);
- симетричні (двохпровідні тиристори, симістори або тріаки), які можуть переключатися у відкритий стан в обидва напрямки

По способу вимкнення виділяють тиристри, які вимикаються тільки у вихідному анодному колі та тиристри які вимикаються по вхідному колу управління.

По способу управління розрізняють тиристри, фототиристри і опто-тиристри. Перші керуються (відмикаються) зовнішнім електричним сигналом по електроду управління. Фототиристор керується зовнішнім оптичним сигналом, оптотиристор – внутрішнім оптичним сигналом (випромінювач та фототиристор складають в оптотиристорі єдину конструкцію).

## 5.2 Двохелектродний тиристор (диністор)

Діодний некерований тиристор називають диністором. Диністор являє собою двополосну чотирьохшарову p-n-p-n структуру (рис. 5.1 а). Електрод, який забезпечує електричний зв'язок із зовнішньою n-областю, називається катодом, а з зовнішньою p-областю анодом. Розглянуту структуру диністора можна представити, як два біполярних транзистора p<sub>1</sub>-n<sub>1</sub>-p<sub>2</sub> та n<sub>1</sub>-p<sub>2</sub>-n<sub>2</sub> (VT1 і VT2), у яких області n<sub>1</sub> і p<sub>2</sub> умовно розділені (рис. 5.1).

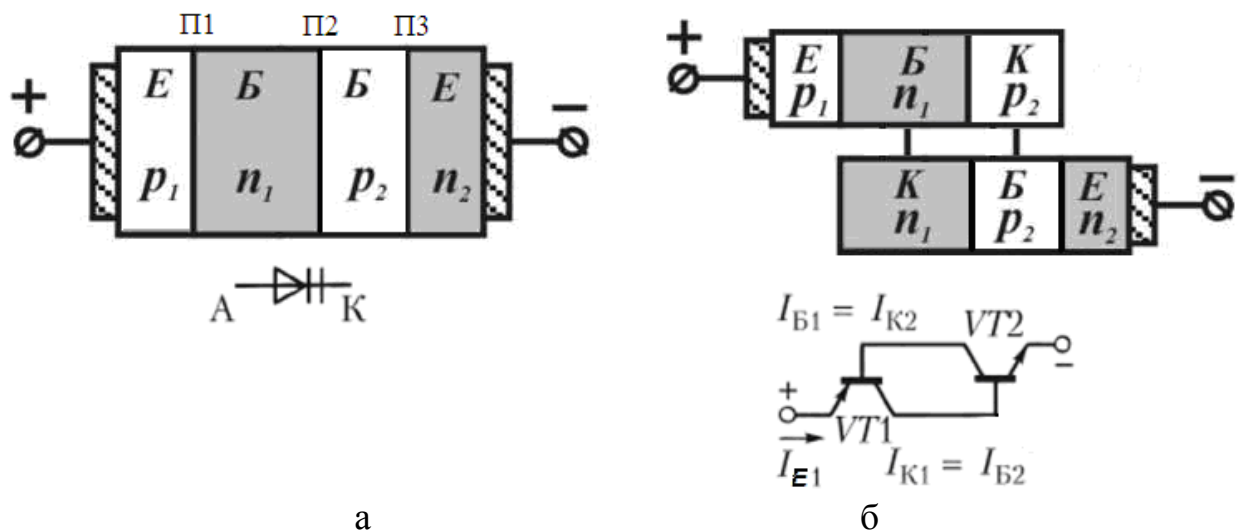


Рисунок 5.1- Структура диністора (а), та її представлення у вигляді двох транзисторів (б)

Зовнішня напруга на такий прилад подається мінусом на крайню область з n-типом електропровідності та плюсом на крайню область з p-типом

електропровідності. Крайні р-n переходи включені в прямому напрямку, тому їх називають переходами емітера; середній р-n перехід включений у зворотному напрямку, тому його називають колекторним. Відповідно, у такому приладі існують дві області емітерів (n- і р- емітери) та дві базові (р- і n- бази). Більша частина зовнішньої напруги падає на колекторному переході, тому ділянка III вольт-амперної характеристики диністора аналогічна зворотній гілці вольт-амперної характеристики діода (рис. 5.2).

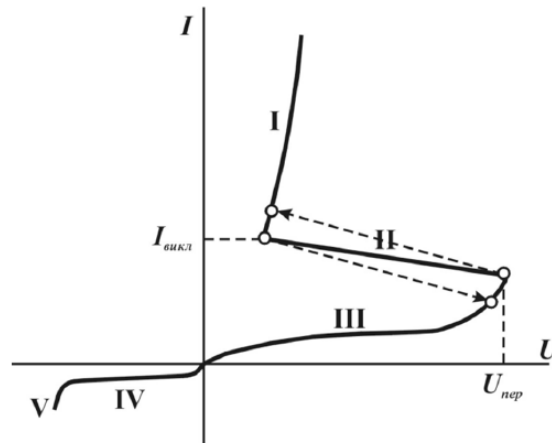


Рисунок 5.2 - Вольт-амперна характеристика диністора

Зі збільшенням напруги, прикладеної до диністора, збільшується пряма напруга і на переходах емітера. Електрони інжекції з n-емітера в р-базу, дифундують до р-n переходу колектора, проходять колекторний перехід і потрапляють у n-базу. Подальшому проходженню електронів за тиристорною структурою перешкоджає невеликий потенційний бар'єр лівого переходу емітера. Тому частина електронів, виявившись у потенційній ямі n-бази, утворює надлишковий негативний заряд, який, знижуючи висоту потенційного бар'єра лівого переходу емітера, викликає збільшення інжекції дірок з р-емітера в n-базу. Дірки інжекції дифундують до р-n переходу колектора, проходять через цей перехід і потрапляють у р-базу. Подальшому їхньому просуванню за тиристорною структурою перешкоджає невеликий потенційний бар'єр правого переходу емітера. Отже, у р-базі відбувається накопичування надлишкового позитивного заряду, що обумовлює збільшення інжекції електронів з n-емітера. У результаті накопичування надлишкового позитивного

заряду в р-базі та негативного в n-базі при напрузі на тиристорі  $U_{пер}$  (напруга переключення) відбувається різке збільшення струму, який проходить через тиристор, та одночасне зменшення спадання напруги на тиристорі. Тому ділянка I вольт-амперної характеристики тиристора аналогічна прямій гілці вольт-амперної характеристики р-n переходу (рис. 5.2). У режимі відповідному цій ділянці, напруга на колекторному переході виявляється прямою через великий заряд, накопичений в базах.

Таким чином, диністор може знаходитися в двох станах: у вимкненому, або закритому, який характеризується великим спаданням напруги на тиристорі та проходженням малих струмів через нього, тобто великим опором; та у ввімкненому, або відкритому, котрий характеризується малим спаданням напруги на тиристорі та проходженням великих струмів через нього, тобто малим опором.

У відкритому стані диністор знаходиться доти, поки за рахунок минаючого струму підтримуються надлишкові заряди в базах, необхідні для зниження висоти потенційного бар'єра колекторного переходу до величини, яка відповідає прямому його включенню. Якщо ж струм через диністор зменшити до деякої визначеної величини ( $I_{вукл}$ ), то в результаті рекомбінації та розсмоктування надлишкові заряди в базах зменшаться, р-n перехід колектора виявиться ввімкнутим у зворотному напрямку, відбудеться перерозподіл спадань напруги на р-n переходах тиристорної структури, зменшиться інжекція з емітерів і диністор перейде в закритий стан (рис. 5.2).

Тиристорну структуру можна розглядати як два еквівалентних транзистора, з'єднаних між собою (рис. 5.1 б). Струм колектора цих транзисторів можна виразити через струми емітерів:

$$I_{П2} = \alpha_1 I_{П1} + \alpha_2 I_{П3} + I_{КБО},$$

де  $I_{П1}$ ,  $I_{П2}$  і  $I_{П3}$  - відповідно струми першого, другого та третього р-n переходів;  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  - коефіцієнти передачі постійних струмів емітера першого та другого еквівалентних транзисторів;  $I_{КБО}$  - зворотний струм колектора першого та другого транзисторів при струмах емітера, які дорівнюють нулю. Оче-

видно, що для двохелектродної структури

$$I_{П1}=I_{П2}=I_{П3}=I$$

Тоді

$$I = \frac{I_{КБО}}{1 - \bar{\alpha}},$$

де  $\bar{\alpha} = \alpha_1 + \alpha_2$  - сумарний коефіцієнт передачі струму.

Таким чином, переключення диністора у відкритий стан з різким збільшенням струму буде відбуватися за умови  $\bar{\alpha} = 1$ .

Коефіцієнт передачі струму емітера транзистора зростає зі збільшенням струму емітера в результаті зменшення рекомбінаційної складової струму емітера (зменшення впливу рекомбінації в р-п переході емітера) та появи електричного поля в базі транзистора. Коефіцієнт передачі струму емітера також зростає при збільшенні напруги на колекторі через зменшення товщини бази та збільшення коефіцієнта множення в колекторному переході. Усі ці процеси відбуваються й у тиристорній структурі при збільшенні прямої напруги.

Для диністора, який перебуває в стані, який відповідає перехідній ділянці вольт-амперної характеристики II, сумарний коефіцієнт передачі струму прагне зрости через збільшення минаючого струму. Але сумарний коефіцієнт передачі струму для перехідної ділянки вольт-амперної характеристики дорівнює одиниці. Подальше зростання сумарного коефіцієнта передачі струму досягається зменшенням напруги на колекторному переході і на всьому диністорі, тобто ослабленням ударної іонізації або зменшенням коефіцієнта множення носіїв.

У кремнієвих транзисторах залежність коефіцієнта передачі струму емітера від струму емітера виражена сильніше, ніж у германієвих транзисторах. Пояснюється це більшою шириною забороненої зони кремнію в порівнянні із шириною забороненої зони германія. Отже, у кремнієвому диністорі також більш сильна залежність сумарного коефіцієнта передачі струму, ніж у германієвому диністорі.

Перевагою кремнію як вихідного матеріалу для виготовлення диністорів у порівнянні з германієм є також менше значення струмів  $I_{к60}$ , що обумовлює меншу потужність, яка розсіюється в диністорі в закритому стані та підвищення значення напруги переключення  $U_{пер}$ . Тому диністори роблять тільки з кремнію.

Переключення диністора у відкритий стан відбувається при зростанні сумарного коефіцієнта передачі струму до одиниці. У той же час у кожній із транзисторних структур, які складають диністор, коефіцієнти передачі струму емітера можуть бути близькі до одиниці вже при малих напругах та струмах. Для зменшення початкових величин коефіцієнта передачі одну з баз диністора роблять досить товстою в порівнянні з дифузійною довжиною відповідних носіїв. Крім того, один з емітерних переходів виконують із шунтуванням об'ємним опором бази (рис. 5.3). Таке шунтування забезпечує малі значення коефіцієнта передачі струму при малих напругах на диністорі, тому що майже весь струм при цих умовах йде по опорі бази, минаючи лівий р-п перехід емітера. При великих напругах у зв'язку зі зменшенням опору р-п переходу лівого емітера майже весь струм буде проходити через р-п перехід емітера, минаючи опір бази, що зв'язано з інжекцією та накопиченням нерівноважних носіїв у відповідних базах, або приводить до різкого збільшення сумарного коефіцієнта передачі струму.

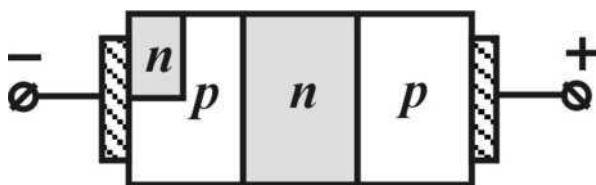


Рисунок 5.3 - Структура диністора з шунтуванням переходу емітера

Таким чином, шунтування переходу емітера диністора дає можливість одержати «жорстку» характеристику переключення диністора, тобто в зв'язку з більш різкою залежністю коефіцієнта передачі струму від напруги та від струму диністор буде переходити у відкритий стан щораз при тій самій напрузі переключення. При слабкій залежності коефіцієнта передачі струму від

напруги та від струму диністор може переходити у відкритий стан при трохи відмінних напругах на диністорі, тобто буде мати «м'яку» характеристику переключення.

### 5.3 Трьохелектродний тиристор (триністор)

Щоб перевести тиристор у відкритий стан, необхідне накопичування надлишкового негативного заряду електронів у n-базі та надлишкового позитивному заряду дірок у р-базі. Здійснюється це шляхом збільшення рівня інжекції через переходи емітера при збільшенні напруги на тиристорі до величини напруги переключення. Однак той же самий ефект можна одержати, якщо в однієї з баз мається контакт (рис. 5.4 а), який називають електродом управління.

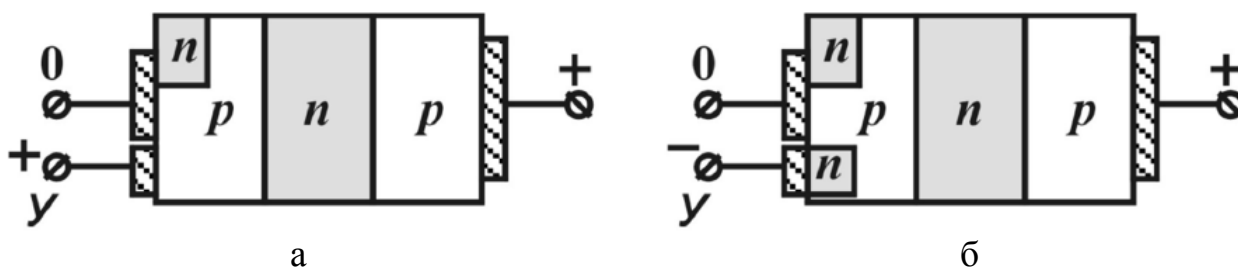


Рисунок 5.4 - Структура тріодних тиристорів з контактом без випрямлення - електродом управління (а), та із додатковою n-областю під електродом управління (б)

При подачі на управляючий електрод напруги такої полярності, щоб прилягаючий до цієї бази перехід емітера був ввімкнений у прямому напрямку, можна збільшити інжекцію з n-емітера, що приведе до накопичування надлишкових зарядів у базових областях тиристора і до переключення його у відкритий стан при загальній нарузі на тиристорі меншій ніж напруга переключення  $U_{пер}$ . Іншими словами, при подачі на електрод управління напруги можна змінювати струм емітера і регулювати значення коефіцієнта передачі струму емітера однієї з транзисторних структур, що обумовить збільшення сумарного коефіцієнта передачі всієї тиристорної структури та переключення

її у відкритий стан.

Тріодний тиристор (триністор) - це тиристор, який має два основні виводи анод і катод та один вивід управління. Для зручності управління тиристором відповідний електрод роблять у більш тонкій базі, тому що коефіцієнтом передачі струму емітера такої структури легше керувати, чим коефіцієнтом передачі транзистора з товстою базою. Контакт для управління можна зробити і з додатковим р-n переходом (рис. 5.4 б). При певній полярності напруги на управляючому електроді через додатковий перехід буде відбуватися інжекція неосновних носіїв та їхнє накопичування у відповідній базі, що також приведе до переключення тиристора у відкритий стан.

Вольт-амперна характеристика триністора (сімейство характеристик при різних струмах управління приладу) зображена на рисунку 5.5. Зворотна гілка ВАХ відповідає такій полярності напруги, коли до анода прикладається негативна відповідно катода напруга.

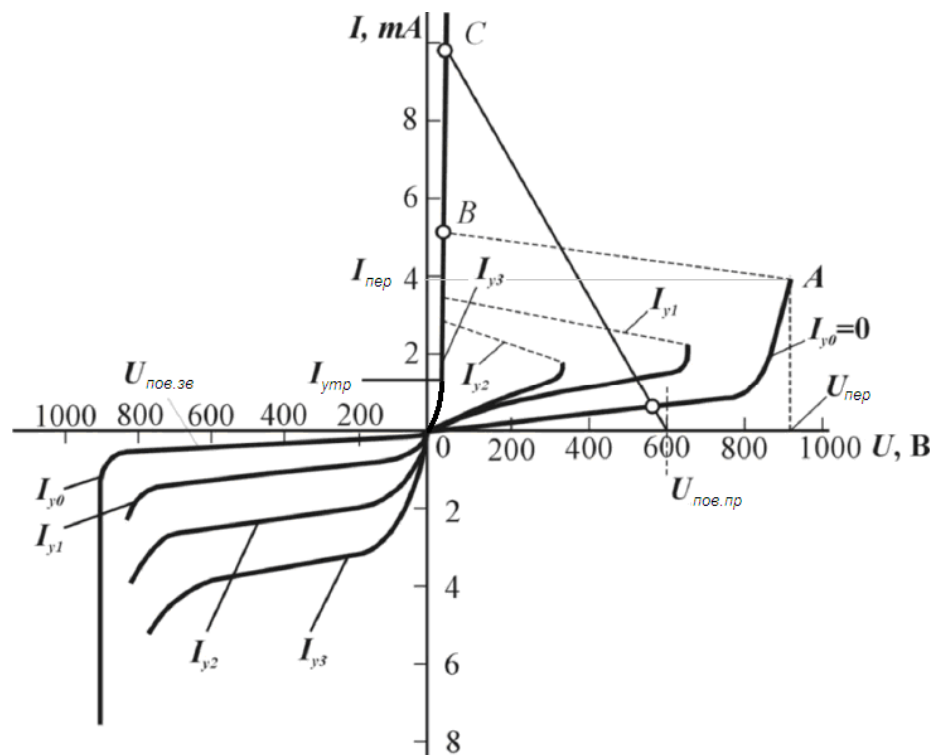


Рисунок 5.5 - Сімейство вольт-амперних характеристик тріодного тиристора

При розімкнутому колі керування або відсутності в ньому струму зворотна характеристика тиристора аналогічна зворотній характеристиці напів-



провідникового діода. У робочому діапазоні напруг від нуля до максимальної робочої, яка називається зворотною повторювальною напругою  $U_{повт.зв.мах}$  (складає кілька сотень вольт), через прилад протікає дуже малий, порядку часток міліампера, струм, тобто тиристор має дуже великий електричний опір. Якщо до електроду управління УЕ прикласти позитивну відносно катода напругу, то в колі керування буде протікати струм  $I_y$ , при цьому струм у зворотному напрямку збільшиться, хоча і незначно. В міру збільшення  $I_y$  зростає струм через тиристор. Сімейство зворотних характеристик тиристора (рис. 5.5) дуже схоже на сімейство вихідних характеристик транзистора, включеного за схемою із спільним емітером, але з малим коефіцієнтом передачі струму.

Пряма гілка тиристора при розімкнутому колі керування зображена в першому квадранті системи координат. Вона відповідає такій полярності напруги, коли до анода прикладена позитивна відносно катода напруга.

Робочим діапазоном, як і у випадку зворотної характеристики, є діапазон від нуля до максимальної прямої повторювальної напруги  $U_{повт.пр.мах}$ . Характеристика має три області. Перша область – від початку координат до точки  $A$  аналогічна зворотній гілці ВАХ р-п переходу. Друга від точки  $A$  до точки  $B$  – відповідає хитливому стану, коли тиристор навіть при незначному перевищенні напруги переключення  $U_{пер}$ , переходить у стан з малим опором (точка  $B$ ). Ця область зветься ділянкою з негативним диференціальним опором. На відміну від ділянки характеристики з позитивним опором, на якому збільшення струму супроводжується збільшенням напруги, на ділянці негативного диференціального опору збільшення струму відбувається при зниженні напруги. Третя область характеристики – від точки  $B$  до точки  $C$  область високої провідності або малого опору, вона аналогічна прямої гілці характеристики напівпровідникового діода. Цей стан називається також відкритим або провідним, а стан з високим опором - закритим або непровідним.

Якщо через коло управління пропустити струм  $I_y$ , то напруга переключення зменшується. Якщо збільшувати цей струм далі, то, починаючи з де-

якого значення (струмом управління-випрямлення), ділянка характеристики з негативним опором зникає, ВАХ спрямляється і стає схожою на пряму характеристику напівпровідникового діода. У результаті при струмі управління, який перевищує струм управління-випрямлення, прилад завжди має малий опір. Якщо урахувати, що робоча напруга вибирається менше максимальної напруги переключення  $U_{\text{пер}}$ , що досягається при  $I_y = 0$ , а струм управління, як правило, значно більше струму управління-випрямлення, то при відсутності струму управління тиристор знаходиться в закритому стані і пряма і зворотна гілки його статичної характеристики аналогічні зворотній характеристиці напівпровідникового діода.

Особливістю тиристора, як і інших приладів, з негативним зворотним опором, є те, що він, переключений у стан з малим опором, буде знаходитися в цьому стані як завгодно довго навіть при знятті сигналу управління. Ця властивість дозволяє вмикати тиристор за допомогою коротких імпульсів струму і тим самим значно знизити витрати енергії на управління тиристором. Для того щоб вимкнути тиристор, тобто перевести його з провідного стану в закритий, необхідно шляхом зменшення напруги в колі навантаження знизити струм до деякого малого значення, який має порядок струму управління-випрямлення та називається струмом утримання.

Якщо джерелом напруги є генератор змінної напруги, переключення тиристора з провідного стану в непровідний відбувається практично при переході позитивної напруги через нуль. На рисунку 5.6 а, наведена схема однопівперіодного випрямляча на базі тиристора Т, який працює на активний опір навантаження  $R_n$ . Джерелом є генератор синусоїдальної ЕРС  $E_n$  (рис. 5.6 б), а управління здійснюється за допомогою генератора позитивних імпульсів ЕРС прямокутної форми  $E_y$  (рис. 5.6 в). У момент  $t$  і подачі імпульсу струму в коло управління амплітуда імпульсу струму  $I_y$  дорівнює частці від розподілу амплітуди імпульсу напруги генератора  $E_y$  на сумарний опір, який складається з внутрішнього опору генератора імпульсів напруги  $R_y$  та вхідного опору тиристора; через тиристор починає протікати струм синусоїдальної форми.

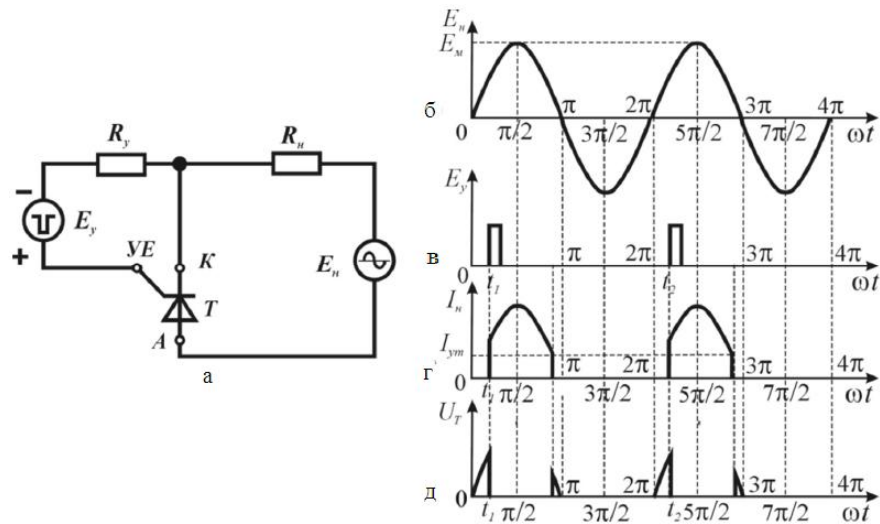


Рисунок 5.6 - Схема тиристорного однопівперіодного випрямляча (а), та осцилограми його струмів і напруг (б-д)

У момент часу, який приблизно дорівнює половині періоду, струм навантаження стає менше струму утримання, і тиристор переходить у замкнений стан. Так як в цей момент  $E_n \neq 0$ , то вся напруга прикладається до тиристора, викликаючи стрибок напруги на ньому (рис. 5.6 д). Таким чином, через навантаження протягом першого напівперіоду протікає струм, який має форму, наведену на рисунку 5.6 в, у інтервалі часу від нуля до  $\pi$ .

#### 5.4 Симетричні тиристори (симістори)

На відміну від триністора симістор проводить струм в обох напрямках. Його можна розглядати як трьохелектродний напівпровідниковий прилад, який може бути переключений із закритого стану у відкритий та навпаки, при будь-якій полярності напруги на основних електродах. При цьому переключення може здійснюватися при подачі сигналу управління на електрод управління (УЕ), а вимикання - шляхом зміни полярності напруги на основних електродах. На відміну від триністора для симістора не застосовані поняття катода і анода, тому основні електроди умовно позначаються СЕУ - силовий електрод з боку електрода управління, та СЕ – силовий електрод з боку основи приладу.

Сімейство ВАХ симістора наведено на рисунку 5.7. Слід зазначити, що

в залежності від конструкції напівпровідникової структури симістор по основному колу може включатися в провідний стан при подачі на УЕ або позитивної щодо електрода СЕУ напруги, або напруги обох (позитивної та негативної) полярностей. Порівняння ВАХ триністора та симістора показує, що їхні прямі гілки ідентичні. Це пояснюється особливістю напівпровідникової структури симістора, найпростіший варіант якої схематично зображений на рис. 5.8.

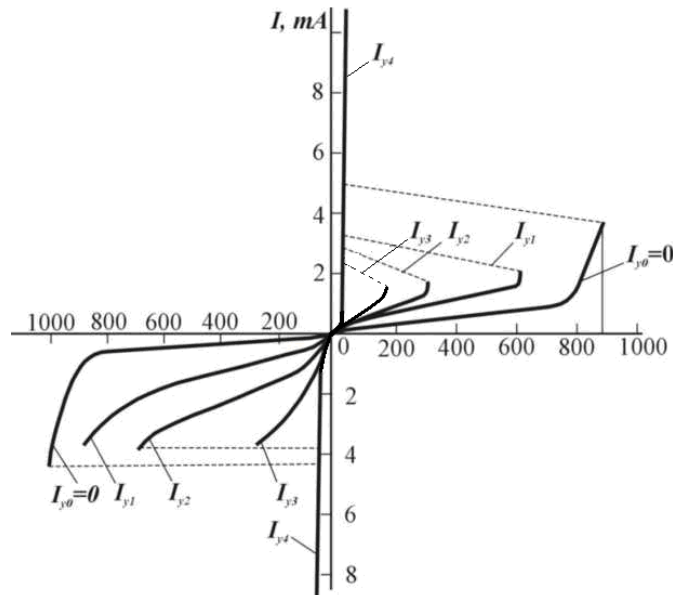


Рисунок 5.7- Сімейство вольт-амперних характеристик симістора

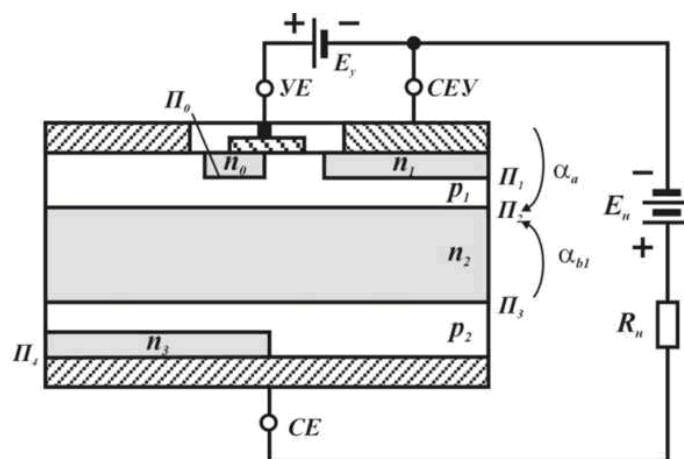


Рисунок 5.8 – Напівпровідникова структура симістора ввімкнена у прямому напрямку

Напівпровідникова структура являє собою пластину, у якій у процесі виготовлення приладу створені шари, які чергуються, з електропровідно-

ми р- і n-типів та контакти електроду управління та основних електродів. Напівпровідникова структура містить п'ять шарів р- і n -типів. Шар  $n_2$  – шар вихідного матеріалу, інші шари отримані в процесі виготовлення приладу. Верхній шар n-типу складається з двох ділянок: ділянки  $n_1$  під основним контактом та ділянки  $p_0$  під контактом електроду управління. Частина шару  $p_1$  знаходиться між шарами типів  $n_1$  та  $n_2$ , інша частина виходить під контакт верхнього основного електроду. Шар  $n_3$  виходить до нижнього основного контакту. Шар  $p_2$  частково знаходиться між шарами  $n_2$  і  $n_3$ , частково виходить під контакт нижнього основного електроду СЕ. Напівпровідникова структура в результаті має п'ять р-n переходів.

Переходи  $\Pi_0$ ,  $\Pi_1$  і  $\Pi_4$ , утворені шарами  $n_0$ ,  $n_1$  і  $n_3$  із шарами  $p_1$  і  $p_2$ , не відрізняються гарними характеристиками блокування.

Розглянемо вмикання симістора в прямому напрямку. Нехай спочатку до СЕУ прикладена негативна відносно СЕ напруга. У цьому випадку працює права половина структури, переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$  включені в прямому напрямку, а  $\Pi_4$  і  $\Pi_2$  – у зворотному. Неробоча ліва частина структури знаходиться у вимкненому стані, так як представляє для струму дуже великий опір. Права частина структури ввімкнена прямо, і поки знаходиться в закритому стані.

Тепер якщо до УЕ прикласти позитивну відносно СЕУ напругу, то р-n перехід  $\Pi_2$  ввімкнеться в прямому напрямку і переведе праву частину в провідний стан. Відповідно принцип дії симістора при роботі в прямому напрямку та позитивному сигналі управління аналогічні відповідним характеристикам триністора в прямому напрямку.

При вмиканні симістора в зворотному напрямку, коли до СЕУ прикладена негативна відносно СЕ напруга, р-n переходи  $\Pi_2$  і  $\Pi_4$  ввімкнуті у зворотному, а р-n переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$  (рис. 5.9) - у прямому напрямках. У цьому випадку праву частину структури можна розглядати як структуру тиристора, включену в зворотному напрямку і яка не бере участь у процесі пропускання струму.

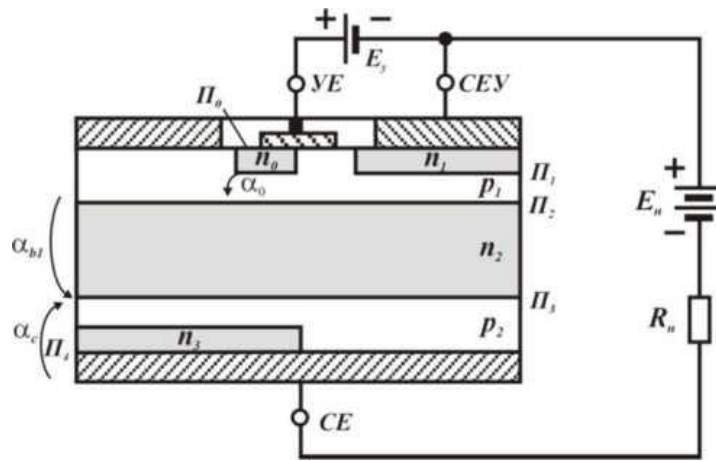


Рисунок 5.9- Напівпровідникова структура симістора ввімкненого в зворотному напрямку

Роботу приладу визначає ліва частина структури, яка представляє собою орієнтовану зворотно (у порівнянні зі структурою звичайного тиристора) р-п-р-п структуру, ввімкнену в прямому напрямку. Переключення її в провідний стан здійснюється шляхом подачі на УЕ негативної відносно СЕУ напруги. У цьому випадку перехід  $\Pi_0$  вмикається в прямому напрямку.

Симетричний тиристор як безконтактний ключ у колах змінного струму дозволяє комутувати значну потужність при малих утратах потужності на управління, при цьому відсутні підгоряння контактів, іскріння та перенапруги, характерні для контактних елементів.

Універсальність та простота симісторів роблять їх перспективними для великого класу пристроїв, зв'язаних з підключенням та регулюванням змінного струму. На основі симісторів виготовляються прості схеми регуляторів змінного струму при роботі в основному на активне навантаження, яке не містить реактивної складової. При такому навантаженні напруга та струм збігаються по фазі і струм навантаження невеликий.

При фазовому управлінні симістор вимикається імпульсом управління та підключає напругу мережі живлення до навантаження на визначену частину періоду (рис. 5.10), що дозволяє економно регулювати середнє значення потужності на навантаженні (наприклад, при живленні електричних ламп, нагрівальних приладів, електродвигунів і т.п.).

Регулювання потужності здійснюється шляхом зміни фазового кута  $\varphi$ , при якому відбувається відмикання ключа – симістора.

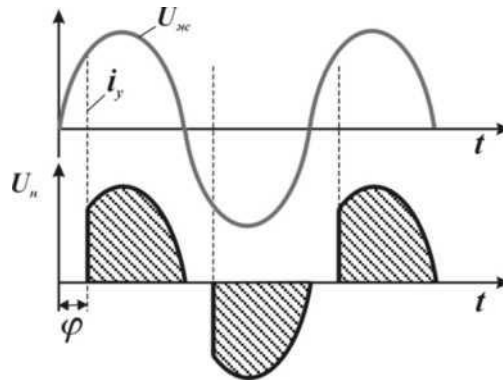


Рисунок 5.10- Застосування симістора у схемі фазового управління

У момент замикання або розмикання ключа при фазовому регулюванні через різку зміну струму виникають перенапруги  $i$ , як наслідок, радіоперешкоди, комутаційні перешкоди і т.п. Тому бажано відмикати та замикати ключ у момент, коли напруга живильної мережі проходить через нуль – так називається синхронна комутація або комутація при нульовій напрузі (особливо часто використовується при живленні електронагрівачів). При цьому потужність у навантаженні регулюється шляхом зміни відносини тривалості замкнутого стану ключа (симістор відкритий), коли до навантаження прикладається ціле число періодів мережі живлення, до тривалості його розімкнутого стану (симістор закритий). Комутаційні перешкоди в цьому випадку різко зменшуються.



