

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
«Основи електрики та електроніки, електричні вимірювання та їх  
стандартизація»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт  
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

**за темою № 18 - Польові транзистори. Тиристори. ІМС**

**Кременчук 2023**

### **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

### **СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

### **ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

### **Рецензенти:**

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

### **План лекції:**

1. Уніполярні (польові) транзистори. Загальні відомості
2. Польові транзистори з керуючим р-n переходом
3. Польові транзистори з ізольованим затвором (МДН-транзистори).
4. Біполярні транзистори з ізольованим затвором (БТІЗ).
5. Перемикаючі напівпровідникові прилади (тиристори).
6. Інтегральні мікросхеми.

### **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

#### **Допоміжна:**

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

## Текст лекції

### 1. Уніполярні (польові) транзистори. Загальні відомості

До класу уніполярних належать транзистори, принцип дії яких ґрунтується на використанні носіїв заряду лише одного знаку (електронів або дірок). Керування струмом в силовому колі уніполярних транзисторів здійснюється зміною під впливом електричного поля провідності каналу, через який протікає струм. Тому уніполярні транзистори ще називаються польовими (ПТ).

Розрізняють ПТ з керуючим *p-n* переходом (із затвором у вигляді *p-n* переходу) та з ізолюваним затвором. Останні, в свою чергу, поділяються на ПТ із вбудованим каналом та з індукованим каналом. ПТ з ізолюваним затвором належать до різновиду МДН-транзисторів: конструкція «метал - діелектрик - НП». Якщо як діелектрик використовують оксид кремнію: конструкція «метал - оксид - НП», ПТ називають відповідно МОН-транзистором.

Характерною рисою ПТ є великий вхідний опір ( $10^8 \dots 10^{14}$  Ом).

### 2. Польові транзистори з керуючим *p-n* переходом

Конструкція та принцип дії ПТ з керуючим *p-n* переходом пояснюється на моделі, наведеній на рис. 1.

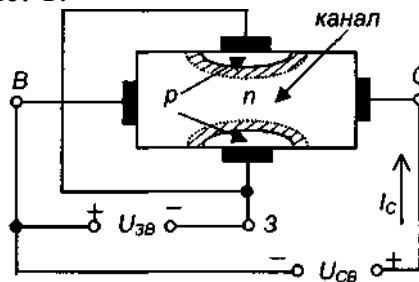


Рисунок 1 – ПТ з керуючим *p-n* переходом

У такого ПТ канал протікання струму являє собою шар НП, наприклад, *n*-типу, вміщений між двома *p-n* переходами. Електрод, від якого починають рух носії заряду (у даному разі - електрони), називається витоком *B*, а електрод, до якого вони рухаються - стоком *C*.

НП шари *p*-типу, що створюють із *n*-шаром два *p-n* переходи, виконані з більш високою концентрацією основних носіїв, ніж *n*-шар. Обидва *p*-шари електрично з'єднані і мають зовнішній електрод, що називається затвором *З*.

Вихідна напруга підмикається між стоком і витоком ( $U_{CB}$ ), а вхідна напруга (керуюча) - між витоком та затвором ( $U_{ЗВ}$ ), причому на затвор подається зворотна щодо витоку напруга.

Принцип дії такого ПТ полягає у тому, що зі змінами вхідної напруги  $U_{ЗВ}$  змінюється ширина *p-n* переходів, що являють собою ділянки НП, збіднені носіями зарядів (запірний шар). Оскільки *p*-шар має більшу концентрацію домішки, зміна ширини *p-n* переходів відбувається, головним чином, за рахунок більш високоомного *n*-шару. При цьому змінюється

переріз струмопровідного каналу, а отже і його провідність і відповідно вихідний струм  $I_c$  приладу.

Особливість цього транзистора полягає у тому, що на провідність каналу впливає як керуюча напруга  $U_{зв}$ , так і напруга  $U_{св}$ .



Рисунок 2 – Умовні позначення ПТ з керуючим р-п переходом: а) з каналом n-типу, б) з каналом р-типу

Роботу таких транзисторів пояснюють сім'ї ВАХ двох видів: стокові і стік-затворні.

Стокові (вихідні) характеристики, наведені на рис. 3.10, показують залежність струму стоку від напруги стік-витік за фіксованої напруги затвор-витік:

$$I_c = f(U_{св}) \Big|_{U_{зв} = \text{const.}}$$

На ділянці 1 (0а) маємо значну залежність  $I_c$  від вихідної напруги  $U_{св}$ . Це неробоча ділянка для випадку використання приладу як підсилюючого елемента. Тут його використовують як керований резистор.

На ділянці 2 (ав) залежність вихідного струму від вихідної напруги мала. Це робоча ділянка у режимі підсилення.

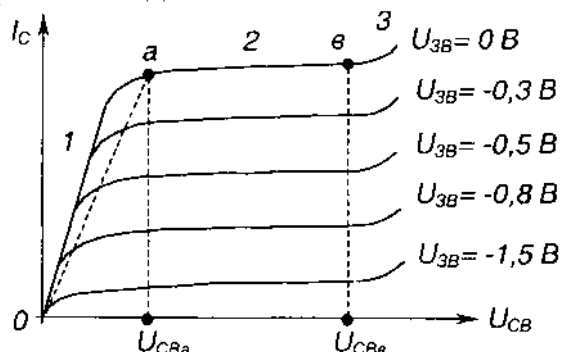


Рисунок 3 – Стокові ВАХ ПТ з керуючим р-п переходом

Ділянка 3 відповідає пробією приладу.

Точці *a* відповідає змикання *p-n* переходів (напруга  $U_{сва}$ ). Причому, чим вища напруга  $U_{зв}$  (абсолютна величина), тим швидше змикаються *p-n* переходи.

Напруга на затворі, за якою струм вихідного кола  $I_c = 0$ , називається напругою запирання або напругою відтинання  $U_{зв0}$ . Числове значення  $U_{зв0}$  дорівнює  $U_{св}$  у точці *a* ВАХ транзистора.

Стік-затворні (передаточні) ВАХ відображають залежність струму стоку від напруги затвор-витік за фіксованої напруги стік-витік:

$$I_c = f(U_{зв}) \Big|_{U_{св} = \text{const.}}$$

Передаточна ВАХ зображена на рис. 4.

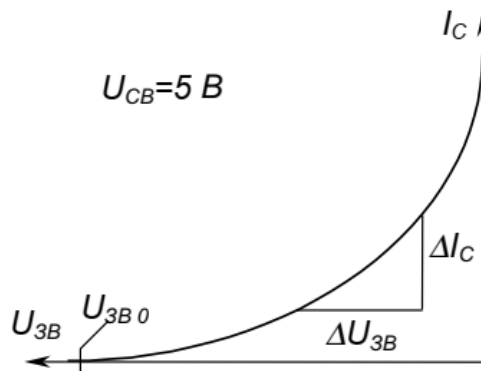


Рисунок 4 – Передаточна ВАХ ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом

### 3. Польові транзистори з ізольованим затвором (МДН-транзистори)

У МДН-транзисторів затвор ізольований від каналу шаром діелектрика. Тому МДН-транзистори належать до класу ПТ з ізольованим затвором. Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір цих транзисторів ( $10^{12} \dots 10^{14}$  Ом).

Частіше як діелектрик використовують оксид кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), і тоді ПТ називають МОН-транзистором (метал - оксид - НП). Такі транзистори бувають із вбудованим та індукованим каналами. Останні більш розповсюджені.

Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом  $n$ -тип у зображена на рис. 5.

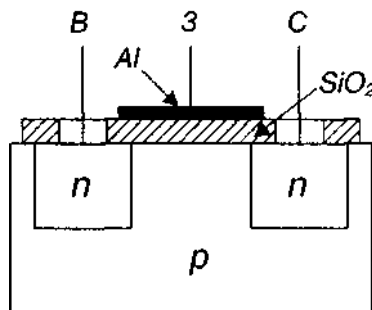


Рисунок 5 - Конструкція МОН- транзистора з індукованим каналом

При  $U_{3B} = 0$  або від'ємному,  $I_C = 0$  (два  $p$ - $n$  переходи увімкнені зустрічно). При позитивній напрузі на затворі відносно витоку поверхневий шар на межі НП із діелектриком збагачується електронами, що притягуються з глибини  $p$ -шару до затвору: виникає явище інверсії НП у примежовій зоні, коли  $p$ -шар стає  $n$ -шаром. Таким чином, між зонами  $n$ -шарів наводиться (індукується) канал, по якому може протікати струм від стоку до витоку.

При наявності струму стоку, як і у транзистора з керуючим  $p$ - $n$  переходом, за рахунок розподілення по довжині каналу падіння напруги від нуля до  $U_{CB}$ , канал ( $p$ - $n$  перехід між з'єднаними каналом зонами  $n$  та зоною  $p$ ) звужується у напрямку стоку. За деякого значення напруги  $U_{CB}$  канал перекривається так, що подальше збільшення струму стоку не відбувається. Вихідні ВАХ ПТ з ізольованим затвором подібні до ВАХ ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом.

Умовні позначення МДН-транзисторів наведені нарис. 4.3.

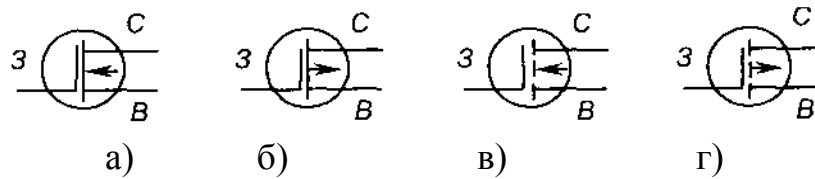


Рисунок 6 - Умовні позначення МДН-транзисторів з каналами: вбудованим n-типу (а); вбудованим р-типу (б); індукованим n-типу (в); індукованим р-типу (г)

У ПТ з вбудованим каналом зони n-типу з'єднано перетинкою - тонким шаром n-типу. В результаті канал під дією напруги  $U_{зв}$  може як розширюватись, так і звужуватись (до повного змикання) залежно від знаку  $U_{зв}$ .

ПТ широко використовують як дискретні компоненти електронних пристроїв, а також у складі інтегральних мікросхем.

#### 4. Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (БТІЗ)

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (БТІЗ, англійською: *IGBT- insulated gate bipolar transistor*) інтенсивно використовуються як силові прилади, витісняючи у багатьох застосуваннях тиристори.

Структура, умовне позначення та еквівалентна схема БТІЗ наведені на рис. 7.

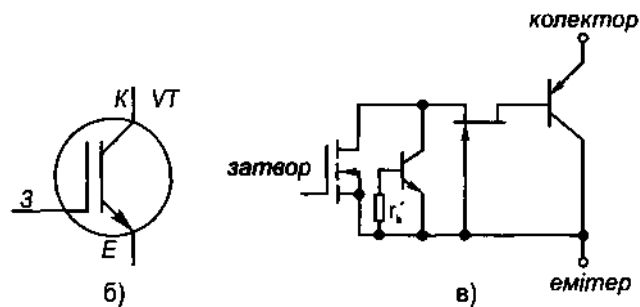


Рисунок 7 - Структура (а), умовне позначення (б) та еквівалентна схема (в) БТІЗ

БТІЗ поєднує властивості МОН-транзистора щодо керування з властивостями біполярного транзистора у силовому колі.

Ці транзистори виконуються на напруги до 1200 В при частоті до 100 кГц та силі струму до 2000 А.

#### 5. Перемикаючі напівпровідникові прилади (тиристори)

Тиристор (від грецького *thyra* - двері + резистор) - це напівпровідниковий прилад, що має багат шарову структуру і ВАХ якого має ділянку з негативним опором. Його використовують як перемикач струму.

Тиристори бувають двоелектродні (або діодні) - диністори та триелектродні (або тріодні) - триністори.

### Триністор (керований діод)

Диністори не знайшли широкого розповсюдження.

Тиристор - це чотиришаровий перемикаючий прилад, у якого від однієї з базових зон зроблено вивід - керуючий електрод.

Структура та умовне позначення триністора (надалі - тиристор) наведені на рис. 8.

Подаючи між керуючим електродом та катодом пряму напругу на  $p$ - $n$  перехід, що працює у прямому напрямку, можна регулювати значення напруги вмикання  $U_{вм}$ . Цю головну властивість тиристора демонструє його ВАХ, наведена на рис. 9.

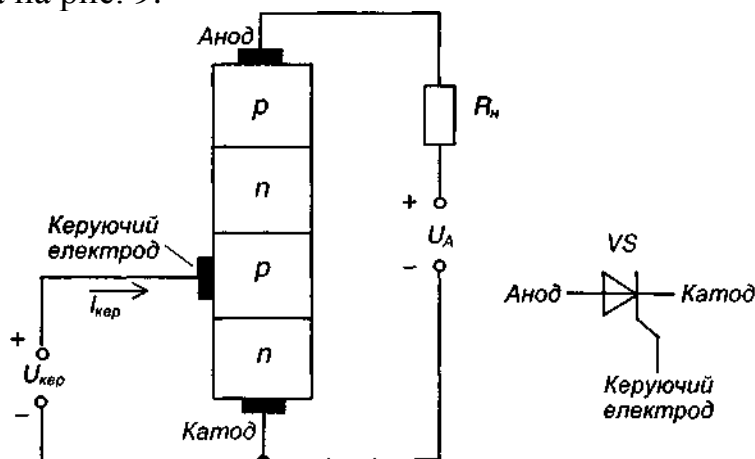


Рисунок 8 - Структура та умовне позначення тиристора

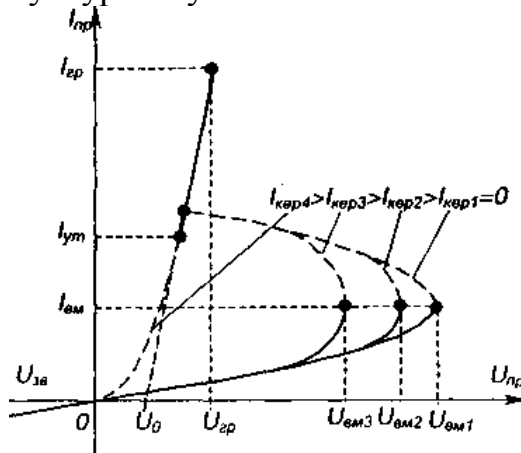


Рисунок 9 - ВАХ тиристора

Основні параметри тиристорів.

- струм вмикання  $I_{вм}$  ;
- струм утримання, становить (0,01 ... 0,7) А;
- порогова напруга  $U_0$ , сягає до 1 В.

### Спеціальні типи тиристорів

**Симістор** або симетричний тиристор - прилад, який є керованим як при позитивній, так і при негативній напрузі на ньому. ВАХ симістора та його умовне позначення наведено на рис. 10.

Прилад являє собою п'ятишарову структуру. Його параметри подібні до параметрів триністора.



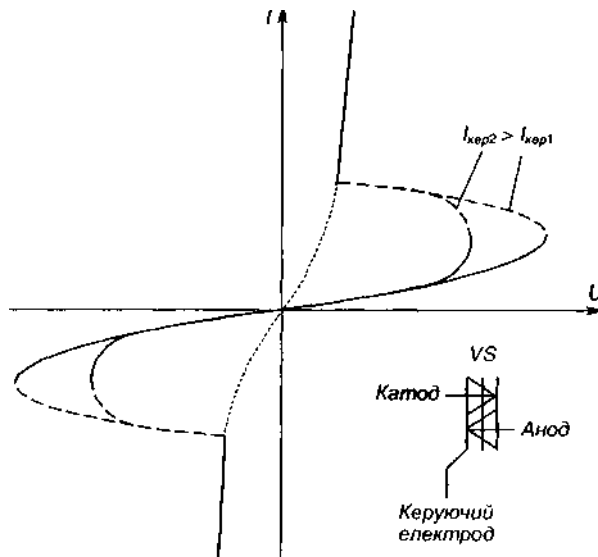


Рисунок 10 - ВАХ симістора та його умовне позначення

**Фототиристор** - прилад, що керується світловим потоком. Умовне позначення фототиристора наведене на рис. 11,а.

**Двоопераційний тиристор** - прилад, що не тільки вмикається, але й вимикається керуючим сигналом: вмикається як звичайний тиристор, а вимикається подачею в коло керування імпульсу від'ємної напруги. Умовне позначення двоопераційного тиристора наведене на рис. 11,б. Скорочена назва – GTO (Gate Turn-Off Thyristor).

**Оптронний тиристор** - це поєднання світлодіода та фототиристора в одному корпусі. Якщо через світлодіод пропускати струм (під дією  $U_{кер}$ ), він генеруватиме світловий потік, який, падаючи на структуру тиристора в зоні керуючого  $p-n$  переходу, призведе до генерації в НП вільних носіїв заряду. Ці носії під дією прикладеної до тиристора напруги створюють струм керування і тиристор вмикається. Головна перевага оптронних тиристорів (як і фототиристорів) - це відсутність гальванічного зв'язку між колом керування та силовим колом. Умовне позначення оптронного тиристора наведене на рис. 11,в.

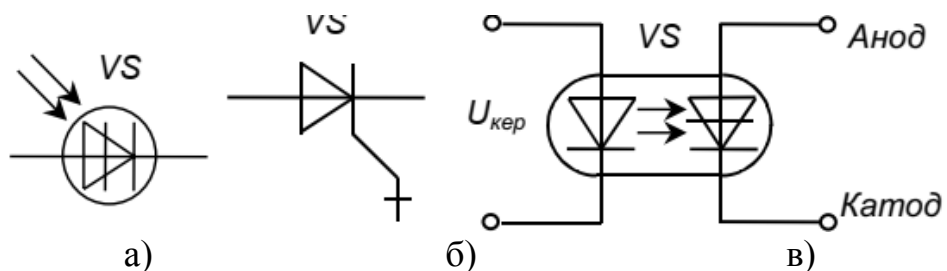


Рисунок 11 - Умовні позначення фототиристора (а), двоопераційного (б) та оптронного (в) тиристорів

Наявність у тиристорів внутрішнього додатного зворотного зв'язку (зона від'ємного опору на ВАХ) надає їм декілька важливих властивостей.

Тиристори мають дуже великий коефіцієнт підсилення за потужністю (десятки тисяч).

Порівняно з транзисторами, тиристори більш стійкі до перевантажень, але мають досить вузький діапазон робочих частот (до сотень герц).

## 6. Інтегральні мікросхеми

Інтегральна мікросхема (ІМС) - це електронний прилад із високою щільністю пакування електрично зв'язаних елементів, що виконує деяку функцію обробки або перетворення електричних сигналів і який, з точки зору конструктивно-технологічних та експлуатаційних вимог, є одним цілим.

Залежно від технології виробництва ІМС поділяють на:

- гібридні (виконуються на основі безкорпусних дискретних електронних приладів, що прикріплюються до ізоляційної основи, на яку нанесено плівкові елементи - резистори, конденсатори і т. п., а також з'єднуючі провідники);

- напівпровідникові (всі елементи виконуються на основі єдиного кристалу НП).

За складністю ІМС поділяють на чотири групи:

1- малий ступінь інтеграції (до 30 елементів у схемі);

2- середній ступінь інтеграції (30 ... 150 елементів);

3- великий ступінь інтеграції (150...1000 елементів);

4- надвеликий ступінь інтеграції (понад 1000 елементів).

Електронні пристрої на *гібридних ІМС* можуть мати щільність монтажу до 60...100 елементів на  $1\text{ см}^3$ . За такої щільності об'єм пристрою, що має  $10^7$  елементів, може складати 0,1...0,5  $\text{м}^3$ , а середній час безвідмовної роботи -  $10^3$ ... $10^4$  годин і більше.

Електронні пристрої на *напівпровідникових ІМС* можуть мати щільність монтажу до 500 елементів у  $1\text{ см}^3$  і цей параметр з року в рік зростає. Середній час безвідмовної роботи пристрою, що має  $10^7$ ... $10^{10}$  елементів, сягає  $10^3$ ... $10^4$  годин.

За призначенням усі ІМС поділяються на два класи:

1) лінійно-імпульсні (або аналогові);

2) логічні (або цифрові).

Параметри таких схем:

- рівень логічного нуля;
- рівень логічної одиниці;
- швидкодія.

*Основні переваги ІМС:*

- висока надійність;
- малі габарити і маса;
- незначна споживана потужність;
- невисока вартість;
- високий рівень швидкодії.

Недолік - невелика вихідна потужність (50...100 мВт).

Завдяки створенню мікропроцесорів стала можливою побудова функціонально різних електронних пристроїв на однотипних елементах. При цьому набір виконуваних функцій фактично залежить від програми, а не від схеми пристрою.