

## Лекція № 8

### ПРИЛАДИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

**Тиристор** - це напівпровідниковий прилад, що має чотирьохшарову р-п-р-п структуру з трьома послідовними р-п переходами, що характеризується двома стійкими станами в прямому напрямі і замикаючими властивостями в протилежному напрямі. ВАХ тиристора має ділянку з негативним опором, який використовується для перемикування.

Розвиток напівпровідникової електроніки зумовив появу великої групи приладів з чотиришаровою структурою п-р-п-р-тиристорів, які знайшли широке застосування в різних галузях техніки. Це пояснюється високими відмінностями характеристик цих приладів: малими габаритами та масою, швидкодією, високою експлуатаційною надійністю, великим терміном служби, широким діапазоном температур, можливістю імпульсного керування тощо.

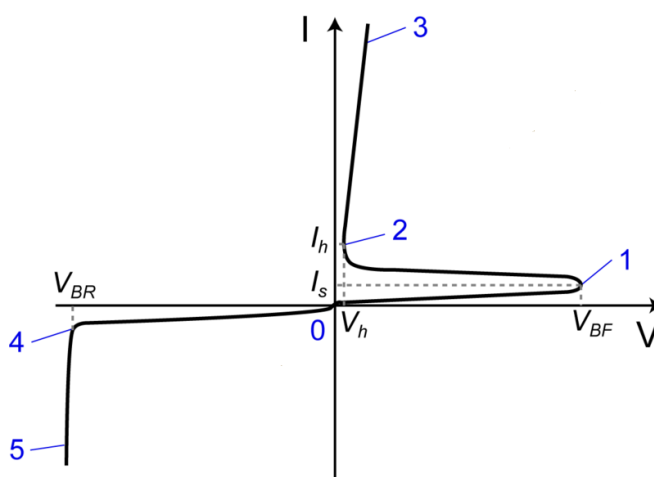


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика тиристора

Типова ВАХ тиристора, що проводить в одному напрямку (з керуючими електродами або без них), наведена на (рис. 1.1).

Між точками 0 і 1 знаходиться ділянка, що відповідає високому опору приладу - пряме замикання. В точці 1 відбувається включення тиристора. Між точками 1 і 2 знаходиться ділянка з негативним диференціальним опором. Ділянка між точками 2 і 3 відповідає відкритому стану (прямий провідності). У точці 2 через прилад протікає мінімальний струм  $I_h$ . Ділянка між 0 і 4 описує режим зворотного замикання приладу. Ділянка між 4 і 5 - режим зворотного пробую.

Вольт-амперна характеристика симетричних тиристорів відрізняється від наведеної на (рис.1.1) тим, що крива в третій чверті графіка повторює ділянки 0-3 симетрично відносно початку координат.

## 1.2 Класифікація тиристорів

*За видом вихідної ВАХ* тиристори поділяють на типи: тиристори, що не проводять струм у зворотному напрямі; тиристори, що проводять струм у зворотному напрямі (тиристори із зворотною провідністю або тиристоридіоди); симетричні (двохпровідні тиристори, симістори), які можуть перемикатися у відкритий стан в обох напрямках.

*За способом ввімкнення* виділяють тиристори, які вмикаються тільки у вихідному анодному колі, і тиристори, які вмикаються за допомогою вхідного керуючого кола (вмикаючі тиристори).

*За способом керування* тиристори поділяють на: тиристори з керуючим електродом; оптотиристори; магнітотиристори та фототиристори. Тиристори з керуючим електродом відкриваються зовнішнім електричним сигналом, оптотиристори - внутрішнім оптичним сигналом (випромінювач та фототиристор складають в оптотиристорі єдину конструкцію) [3, 11], магнітотиристори – зовнішнім магнітним полем, фототиристори - зовнішнім оптичним сигналом.

Крім тиристорів, які закриваються, розроблена широка гамма тиристорів різних типів, що відрізняються швидкодією, процесами керування, напрямком струмів в провідному стані і т.д. Серед них слід відзначити такі типи: тиристор-діод, який еквівалентний тиристору з зустрічно-паралельно включеним діодом (рис.1.2 а); діодний тиристор (диністор), що переходить у провідний стан при перевищенні певного рівня напруги, прикладеної між А і С (рис. 1.2 б); тиристор що замикається (рис.1. 2 в); симетричний тиристор або симістор, який еквівалентний двом зустрічно-паралельно включеним тиристорам (рис. 1.2 г); швидкодіючий інверторний тиристор (час вимкнення 5-50 мкс); тиристор з польовим управлінням по керуючому електроду, наприклад, на основі комбінації МОП-транзистора з тиристором; оптотиристор, керований світловим потоком.

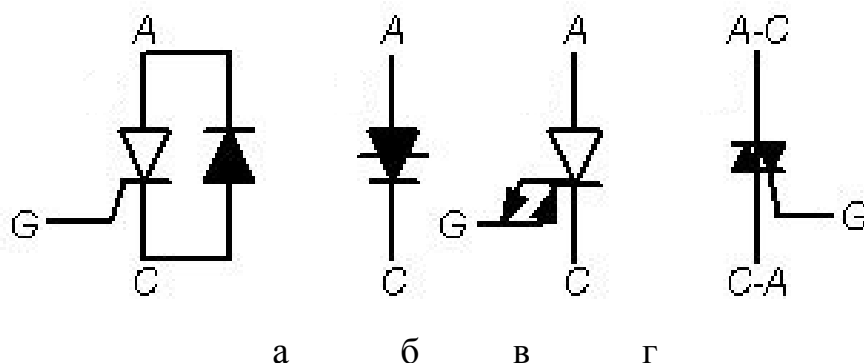


Рис. 1.2. Умовно-графічне позначення тиристорів:

- а – тиристор-діод;    б – діодний тиристор (диністор);  
в – тиристор що замикається;    г – симістор

## 1.2.1 Фізичні процеси в диністорі

Двоелектродний тиристор (диністор) - має два зовнішніх виводи. Він складається з чотирьох шарів кристала напівпровідника з почерговим типом електропровідності.

Диністор може знаходитися в двох станах:

закритому, який характеризується великим падінням напруги на диністорі та проходженням малих струмів через нього, тобто великим опором,

і відкритому яке характеризується малим падінням напруги на диністорі та проходженням великих струмів через нього, тобто малим опором.

У відкритому стані диністор перебуває до тих пір, поки за рахунок проходження струму підтримується кількість надлишкових зарядів у р-п переходах, необхідна для пониження висоти потенційного бар'єру до величини, що відповідає прямому включенню його. Якщо ж струм зменшити до деякої величини то в результаті рекомбінації і розсмоктування надлишкових зарядів відбудеться перерозподіл падінь напруг на р-п переходах диністорної структури і диністор перейде в закритий стан. При включенні диністора за схемою, наведеною на рис. 1.5, колекторний р-п перехід закритий, емітерні - відкриті. Опори відкритих переходів малі, тому майже вся напруга джерела живлення прикладена до колекторного переходу, що має високий опір. Через диністор протікає малий струм (ділянка 1 на рис. 1.6).

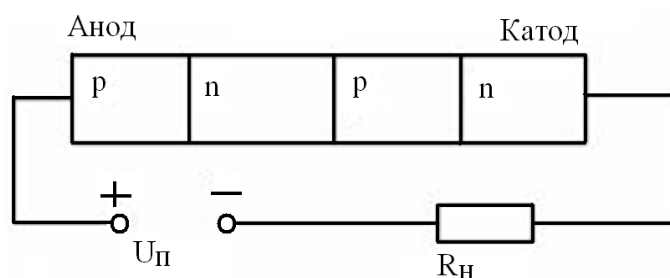


Рис. 1.5. Схема включення диністора

При збільшенні напруги джерела живлення, струм диністора збільшується незначно, поки напруга не наблизиться до деякого критичного значення, рівного напрузі включення  $U_{вкл}$ . При напрузі  $U_{вкл}$  в диністорі створюються умови для лавинного розмноження носіїв заряду в області колекторного переходу. Відбувається зворотній електричний пробій колекторного переходу (ділянка 2 на рис. 1.6) .

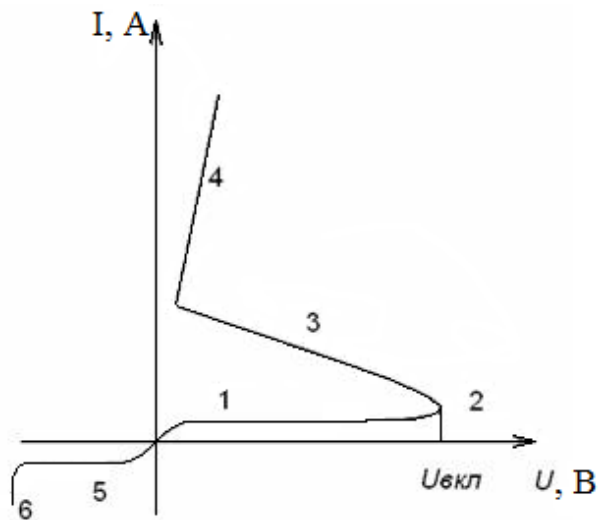


Рис. 1.6. Вольт-амперна характеристика диністора:

- 1 – зростання струму через р-n-переходи тиристора;
- 2- колекторний пробій;
- 3 – лавинообразне збільшення струму;
- 4 – робочий режим;
- 5 – зворотне ввімкнення;
- 6 – електричний пробій

У  $n$ -області колекторного переходу утворюється надмірна концентрація електронів, а в  $p$ -області - надмірна концентрація дірок. Зі збільшенням цих концентрацій знижуються потенційні бар'єри всіх переходів диністора. Зростає інжекція носіїв через емітерні переходи. Процес носить лавиноподібний характер і супроводжується перемиканням колекторного переходу у відкритий стан. Зростання струму відбувається одночасно зі зменшенням опорів усіх областей приладу. Тому збільшення струму через прилад супроводжується зменшенням напруги між анодом і катодом. На ВАХ цю ділянку позначено цифрою 3 (рис.1.6). Тут прилад має негативний диференціальний опір. Напруга на резисторі зростає і відбувається перемикання диністора [8].

Після переходу колекторного переходу у відкритий стан ВАХ має вигляд, що відповідає прямій гілці діода (ділянка 4 на рис. 1.6). Після перемикання напруга на диністорі знижується до 1 В. Якщо і далі збільшувати напругу джерела живлення або зменшувати опір резистора  $R$ , то буде спостерігатися зростання вихідного струму, як у звичайній схемі з діодом при прямому включенні.

При зменшенні напруги джерела живлення відновлюється високий опір колекторного переходу. Час відновлення опору цього переходу може становити десятки мікросекунд.

Принципових відмінностей між диністором і триністором немає, однак якщо включення диністора відбувається при досягненні між выводами анода і катода певної напруги, що залежить від типу даного диністора, то в триністорі напруга включення може бути спеціально знижена, шляхом подачі імпульсу

струму певної тривалості і величини на його керуючий електрод при позитивній різниці потенціалів між анодом і катодом. Конструктивно триністор відрізняється тільки наявністю керуючого електрода. Триністори є найбільш поширеними приладами з «тиристорної» сім'ї.

### 1.2.2 Принцип дії триністора

Трьохелектродний тиристор (триністор) - має три зовнішніх виводи. Переведення триністора із закритого стану у відкритий в електричному колі здійснюється зовнішньою дією на прилад. В тріодних тиристорах, використовуються найбільше, керування станом приладу здійснюється в колі третього - керуючого електрода.

**Триністор** – це чотирьохшарова структура типу  $p-n-p-n$  з трьома переходами (рис. 1.7), в якому  $p$ -шар виконує функцію аноду, а  $n$  - шар - катоду, а керуючий електрод зв'язаний із  $p$  - шаром структури. Напруга живлення подається на тиристор таким чином (рис. 1.8, а), що  $p_1 - n_1$  та  $p_2 - n_2$  відкриті, а перехід  $p_2 - n_1$  – закритий. Опір відкритих переходів малий, тому майже вся напруга живлення  $U_{np}$  прикладена до закритого переходу  $\Pi_2$ , який має великий опір. Звідси струм через тиристор дуже малий. При підвищенні напруги  $U_{np}$  струм тиристора збільшується до деякого критичного значення, яке дорівнює напрузі переключення  $U_{пер}$ . Після цього починається лавиноподібне збільшення струму через тиристор.

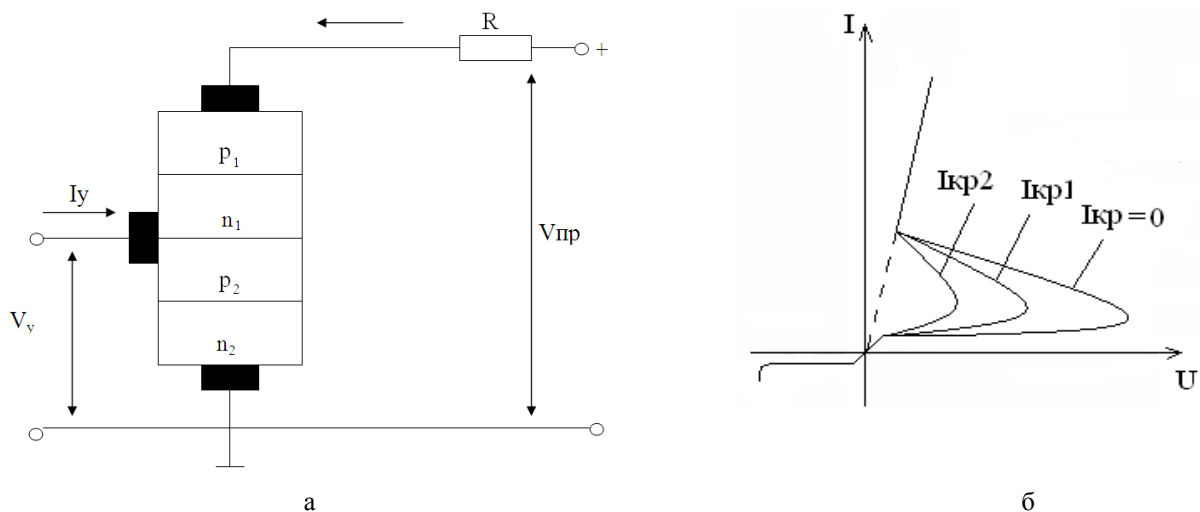


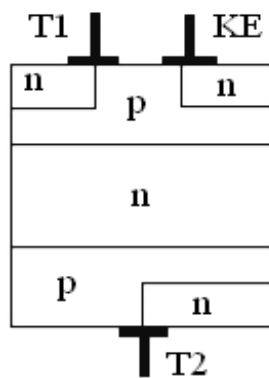
Рис. 1.8. Структурна схема (а) і вольт-амперна характеристика (б) триністора

Для зменшення напруги переключення на керуючий електрод подають напругу і струм керування що дозволяє тиристорі переключитися при меншій напрузі. Вольт-амперна характеристика для різних струмів керування показана на (рис. 1.8, б)

### 1.2.3 Принцип дії симістора

Симетричний тиристор (симістор або триак) має практично однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги. Симістор можна представити у вигляді двох тиристорів включених на зустріч один одному і шунтуючих один одного. Симістор можна зробити керованим, якщо з однією з областей з електропровідністю р-типу здійснити невідпрямляючий контакт з керуючим виводом.

Триак (симістор) - «двонаправлений триністор» (рис. 1.9 а). Особливістю триаків є здатність проводити струм як від анода до катода, так і в зворотному напрямі.



а

Рис. 1.9. Структура симістора

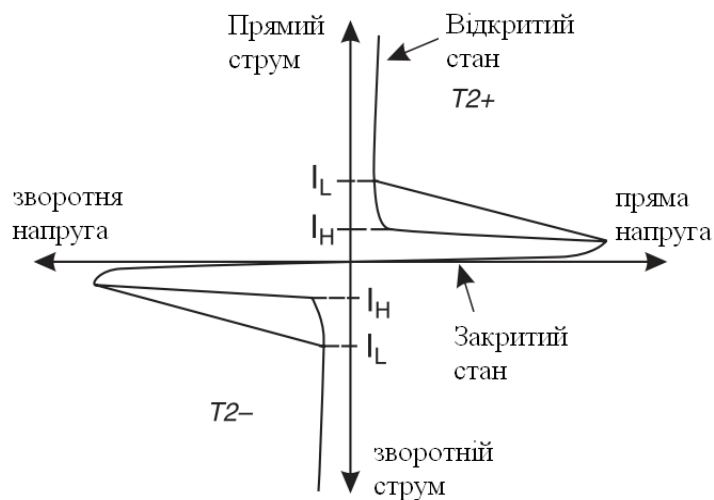


Рис. 1.10. Вольт-амперна характеристика симістора

## 1.4 Робочі параметри і характеристики тиристорів

Тиристори характеризуються параметрами:

1. Напруга живлення ( $U_{вкл}$ ) - це така напруга, при якій тиристор переходить у відкритий стан.
2. Імпульсна зворотна напруга ( $U_{зв..max}$ ) - це напруга, при якій настає електричний пробій.
3. Пряме падіння напруги на відкритому тиристорі ( $U_{np} = 0,5 - 1В$ ).
4. Час включення - це час, протягом якого відкривається тиристор.

Сучасні тиристори виготовляють на струми від 1 мА до 10 кА; на напруги від кількох В до декількох кВ; швидкість наростання прямого струму в них досягає  $10^9$  А/с, напруги -  $10^9$  В/с, час включення складає від декількох десятих часток до декількох десятків мкс, час вимикання - від декількох одиниць до декількох сотень мкс; ККД досягає 99%.



## 2. Стабілітрон

**Стабілітроном** називається напівпровідниковий діод, напруга на якому в області електричного пробою при зворотному включенні слабо залежить від струму в заданому діапазоні і який призначений для стабілізації напруги.

Стабілітрони працюють у режимі електричного пробою. Під дією сильного поля в області *p-n*-переходу зворотний струм різко зростає при малих змінах прикладеної напруги. Цю особливість ВАХ кремнієвого діода в області пробою (рис. 2.1, *a*) використовують для стабілізації напруги, а також фіксації напруг і струмів в схемах, звідси інша назва кремнієвих стабілітронів - опорні діоди.

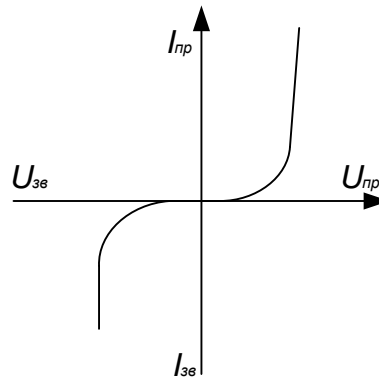


Рис. 2.1. ВАХ кремнієвого стабілітрона

**Пробієм  $p-n$  переходу** називається явище різкого збільшення зворотного струму діода при досягненні зворотною напругою деякого критичного значення.

Розрізняють наступні види пробію: електричний (тунельний і лавинний) та тепловий.

Тунельний і лавинний пробію обумовлені фізичними процесами, що відбуваються в  $p-n$  - переході в сильних електричних полях, а тепловий – процесами, обумовленими нагріванням  $p-n$  - переходу при протіканні через нього зворотного струму.

Електричний пробію є оборотним і робота напівпровідникових, приладів у режимі електричного пробію допускається. Тепловий пробію є необоротним, тобто напівпровідниковий прилад після теплового пробію виходить з ладу.

Як матеріал для напівпровідникових стабілітронів використовується кремній, тому що він має більш високу температурну стабільність порівняно з германієм.

На рис. 2.2 наведена ВАХ стабілітрона. Оскільки реальна ВАХ в області пробію має деякий нахил, то напруга стабілізації залежить від струму стабілізації  $I_{ст}$ . Максимальний струм стабілізації  $I_{ст.max}$  обмежений допустимою потужністю розсіяння  $P_{max}$  і можливістю переходу електричного пробію в тепловий, який є незворотнім.

В основному стабілітрони застосовуються для стабілізації напруги.

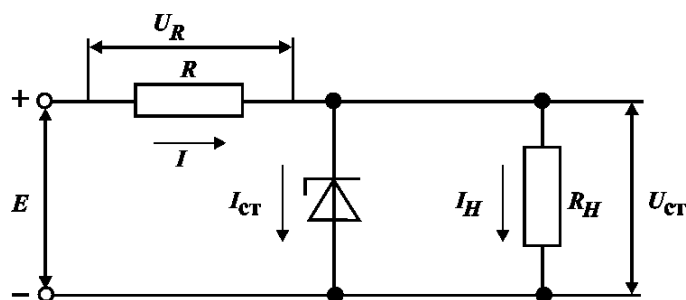


Рис. 2.2. Схема стабілізатора напруги



Для схеми, наведеної на рис. 2.2, справедливе рівняння:

$$I_{cm} = \frac{E}{R} - \frac{R + R_H}{RR_H} U_{cm}.$$

З фізичної точки зору принцип стабілізації напруги в даній схемі пояснюється наступним чином. Збільшення напруги джерела живлення на величину  $\Delta E$  призводить до збільшення загального струму в ланцюзі  $I = I_{CT} + I_H$ . Оскільки при зміні струму, що проходить через стабілітрон, напруга на ньому залишається практично незмінною і рівною напрузі стабілізації, то змінам струму навантаження  $I_H$  можна знехтувати. Збільшення напруги джерела живлення на величину  $\Delta E$  майже цілком відбудеться на обмеженому резисторі  $R$ . При зменшенні напруги джерела живлення на величину  $\Delta E$  загальний струм в ланцюзі зменшується, що призводить до зменшення струму, що проходить через стабілітрон. Якщо це зменшення не вийшло за межі стабілізації, то в цьому випадку при збереженні постійної напруги на навантаженні напруга на резисторі  $R$  зменшиться на величину  $\Delta E$ . Таким чином, наявність обмежувального резистора  $R$  в розглянутій найпростішій схемі стабілізатора напруги є принципово необхідною. Зміна опору навантаження при незмінній напрузі джерела живлення не призведе до зміни напруги на обмежувальному резисторі  $R$ , а викличе зміну струму, що проходить через стабілітрон.

Крім стабілізації постійної напруги, стабілітрони використовуються в стабілізаторах обмежувачами імпульсної напруги, в схемах випрямлення, в якості керованих ємностей, шумових генераторів і елементів міжкаскадних зв'язків у підсилювачах постійного струму та імпульсних пристроях.

### Параметри стабілітронів

1. **Напруга стабілізації** – номінальне значення напруги на стабілітроні при заданому зворотному струмі стабілітрона в області пробою. Напруга стабілізації, приблизно, дорівнює напрузі пробою. У стабілітронах напругою стабілізації до 7 В використовується тунельний пробій, а з напругою стабілізації більше 15 В - лавинний пробій.

В даний час розроблені стабілітрони на стабілізування напруги від одиниць вольт до сотень вольт.

2. **Диференціальне динамічний опір стабілітрон** –  $r_{cm}$

$$r_{cm} = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}}$$

Для тунельного пробою диференційна провідність  $p$ - $n$  переходу

$$r_{cmT} = B \frac{U_{cm}}{I_{cm}},$$

де  $B$  – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу.

Для лавинного пробою:

$$r_{cm \text{ Л}} = \frac{U_{cm}}{n \cdot MI_{cm}}$$

Величина диференційного опору залежить від напруги стабілізації. Мінімальне значення спостерігається у діодів з напругою стабілізації 7 .. 10 В. Це пояснюється тим, що в цій області діють обидва механізми пробою. При переході в область лавинного пробою, тобто при збільшенні, і в область тунельного пробою, тобто при зменшенні, диференційна провідність різко зростає).  $r_{cm}$  зменшується з ростом струму стабілітрона. Чим менше  $r_{cm}$ , тим вище ступінь стабілізації напруги.

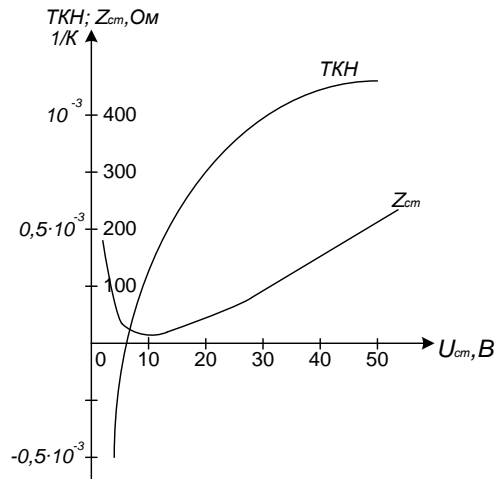


Рис.2.3. Характер залежності температурного коефіцієнта напруги стабілізації (ТКН) і динамічного опору від напруги стабілізації стабілітронів

3. **Опір постійному струму**  $R_{cm} = \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$  характеризує втрати в діоді у даній робочій точці.

4. **Критерій (коефіцієнт) якості стабілітрона Q** – відношення статичного опору до диференційного при даному струмі стабілізації:

$$Q = \frac{R_{cm}}{r_{cm}} = \frac{dI_{cm}}{dU_{cm}} \cdot \frac{U_{cm}}{I_{cm}}$$

Критерій якості на відміну від диференціального опору характеризує не просто нахил ВАХ, а і його відношення до величини напруги стабілізації.

Так як максимальним змінам струму повинні відповідати мінімальні зміни напруги, то величина Q для хороших стабілітронів повинна бути як можна більше. Для сучасних стабілітронів Q лежать у межах 20.. 100.

5. **Температурний коефіцієнт напруги стабілізації - ТКН** – показує зміну напруги стабілізації від температури.

$$TKH = \frac{1}{U_{cm}} \cdot \frac{dU_{cm}}{dT} \cdot 100\%$$

Залежно від виду пробою стабілітрона ТКН може бути позитивним або негативним. Якщо пробій тунельний, то ТКН негативний, а якщо пробій лавинний, то ТКН позитивний. Характер зміни ТКН для стабілітронів з

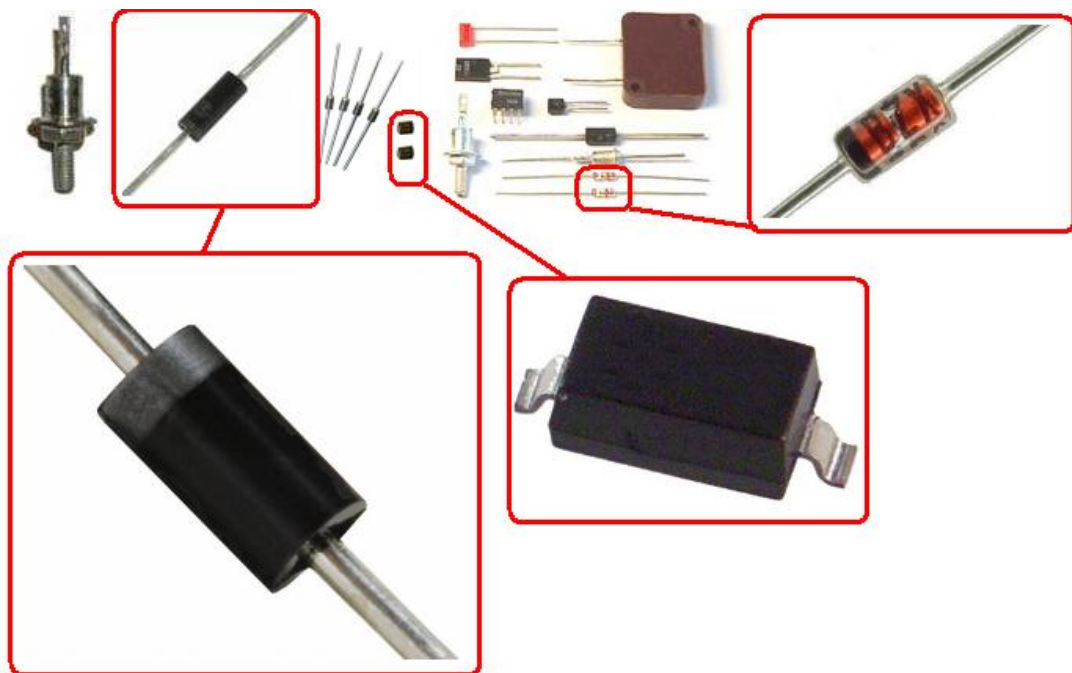
різною напругою пробою показаний на рис.2.3. Для зменшення ТКН використовується послідовне включення двох або декількох стабілітронів з ТКН з різним знаком. При позитивному ТКН послідовно зі стабілітронів можна включати  $p-n$  перехід в прямому напрямку. Такий спосіб компенсації використовується в прецизійних стабілітронах. У цих стабілітронах послідовно з основним  $p-n$  переходом у прямому напрямку включено два компенсуючих переходи. Прецизійні стабілітрони використовуються як еталонні джерела напруги (нормальних елементів) II класу. Такі стабілітрони мають ТКН  $0,01\%$  / град, у той час як у звичайних він становить  $0,05 - 0,09\%$  / град.

#### **6. Мінімальний ( $I_{cm\min}$ ) і максимальний ( $I_{cm\max}$ ) струми стабілізації.**

Мінімальний струм стабілізації обмежується шумами стабілітрону. При малих струмах пробій носить нестійкий характер, і ефективна напруга шумів на стабілітроні досягає декількох сотень мікрвольт. З ростом струму пробій переходить у стійкий стан і шуми зменшуються.

Максимальний струм стабілізації обмежується допустимою потужністю розсіювання стабілітрона. У сучасних стабілітронів він становить від десятків міліампер до десятків ампер.

Напівпровідникові стабілітрони крім основного призначення в даний час знаходять широке застосування для обмеження постійної та імпульсної напруги, в якості елементів міжкаскадного зв'язку в електронних схемах, як керовані ємності, шумові генератори і т.д.



**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**

