

ЛЕКЦІЯ (24.03.2020) НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

План заняття:

1. Випрямні діоди
2. Імпульсні діоди
3. Напівпровідникові стабілітрони
4. Варикапи
5. Тунельні діоди

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним *p-n* переходом і двома выводами.

По функціональному призначенню діоди діляться на випрямні, імпульсні, стабілітрони (опорні), варикапи, тунельні, фотодіоди, світлодіоди та ін.

Більшість напівпровідникових діодів виконують на основі несиметричних *p-n* переходів. Низькоомну область діодів називають емітером, а високоомну – базою.

У реальних діодах пряма й зворотна гілки ВАХ відрізняються від ідеальної характеристики *p-n* переходу. При зворотному включенні діода тепловий струм I_0 становить лише частину зворотного струму діода. При прямому включенні істотний вплив на хід ВАХ виявляє спадання напруги на опір бази діода, яке починає проявлятися вже при 2...10 мА.

При практичному використанні діодів виділяти складові, які спотворюють ідеальну ВАХ не прийнятно. Замість цього в якості одного з основних параметрів діода використовують зворотний струм ($I_{зв}$). Оскільки $I_{зв}$ змінюється в широких межах від зразка до зразка в паспортних даних на кожний вид діода вказується його максимально припустиме значення.

Для інженерних розрахунків зворотного струму, залежно від температури навколишнього середовища, можна користуватися спрощеним виразом:

$$I_{зв}(T) \approx I_{зв}(T_0) 2^{\frac{\Delta T}{T^*}},$$

де $I_{зв}(T_0)$ – зворотний струм при температурі T_0 ;

$$\Delta T = T - T_0;$$

T^* – прирощення температури, при якому зворотний струм подвоюється;

$T^* \approx 8...10^\circ\text{C}$ – для германія;

$T^* \approx 6...7^\circ\text{C}$ – для кремнію;

Падіння напруги на діоді при прямому включенні можна знайти з виразу:

$$U = \left[\varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \right] + I \cdot r_{\bar{6}} \approx \varphi_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \rightarrow \text{для малих струмів } I$$

де I – струм, що протікає через діод;

I_0 – зворотний тепловий струм;

r_6 – омичний опір бази;
 ϕ_T – температурний потенціал.

Випрямні діоди

Випрямні діоди це діоди, які призначені для перетворення змінного струму в постійний, до швидкодії, ємності p - n переходу й стабільності параметрів до яких не пред'являють спеціальних вимог.

Для випрямних діодів характерно, що вони мають малі опори в провідному стані й дозволяють пропускати більші струми. Бар'єрна ємність їх через велику площу p - n переходу велика й досягає значень десятків мікрофарад.

Основні параметри випрямних діодів:

1. *Максимально припустима зворотна напруга* ($U_{зв. max}$) – значення напруги, прикладеної у зворотному напрямку, яку діод може витримати протягом тривалого часу без порушення його працездатності (десятки – тисячі В для діодів малої потужності);

2. *Середній випрямлений струм* ($I_{вип. ср}$) – середнє за період значення струму, що протікає через діод в однонапівперіодному випрямлячі з активним навантаженням (сотні мА – десятки А);

3. *Імпульсний прями́й струм* ($I_{пр. i}$) – пікове значення імпульсу струму при заданій максимальній тривалості, скважності й форми імпульсу;

4. *Середній зворотний струм* ($I_{зв. ср}$) – середнє за період значення зворотного струму (частки мкА – одиниці мА);

5. *Середня пряма напруга* ($U_{пр. ср}$) – середня за період пряма напруга при заданому середньому значенні прямого струму (частки В);

6. *Середня потужність, що розсіюється* ($P_{ср}$) – середня за період потужність, що розсіюється діодом при протіканні струму (сотні мВт – десятки й більш Вт);

7. *Диференціальний опір діода* (r_d) – відношення прирощення напруги на діоді до малого прирощення струму, що його викликало (одиниці – сотні Ом).

При розробці випрямних схем може виникнути необхідність одержати випрямлений струм, що перевищує гранично-припустиме значення для одного діода. У цьому випадку застосовують паралельне включення однотипних діодів рис.11.1.

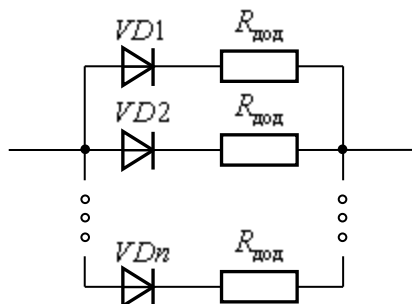


Рис.11.1. Паралельне включення однотипних діодів

Для вирівнювання струмів, що протікають через діоди, послідовно з діодами включаються додаткові резистори ($R_{\text{доп}}$) порядку декілька Ом. Це дозволяє штучно зрівняти прямі опори діодів.

У високовольтних колах часто використовується послідовне включення діодів рис.11.2. При такому включенні зворотна напруга розподіляється між усіма діодами.

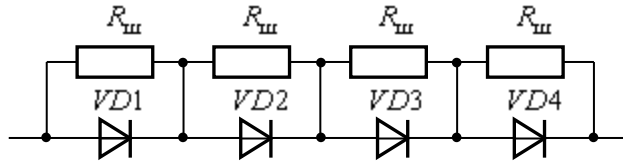


Рис.11.2. Послідовне включення однотипних діодів

Для забезпечення надійної роботи діодів паралельно кожному з них необхідно включити резистор (порядку 100 кОм) для вирівнювання зворотних опорів. У цьому випадку напруги на всіх діодах будуть рівними.

Імпульсні діоди

Імпульсні діоди призначені для роботи у швидкодіючих імпульсних схемах з часом перемикачання менш 1 мкс. Вони характеризуються малим часом перехідних процесів і від випрямних діодів відрізняються малими ємностями $p-n$ переходів. Зменшення ємності досягається за рахунок зменшення площі $p-n$ переходу, тому припустимі потужності розсіювання в цих діодах невеликі (30...40 мВт).

Схема включення й осцилограми вхідної напруги й струму наведені на рис.11.3.

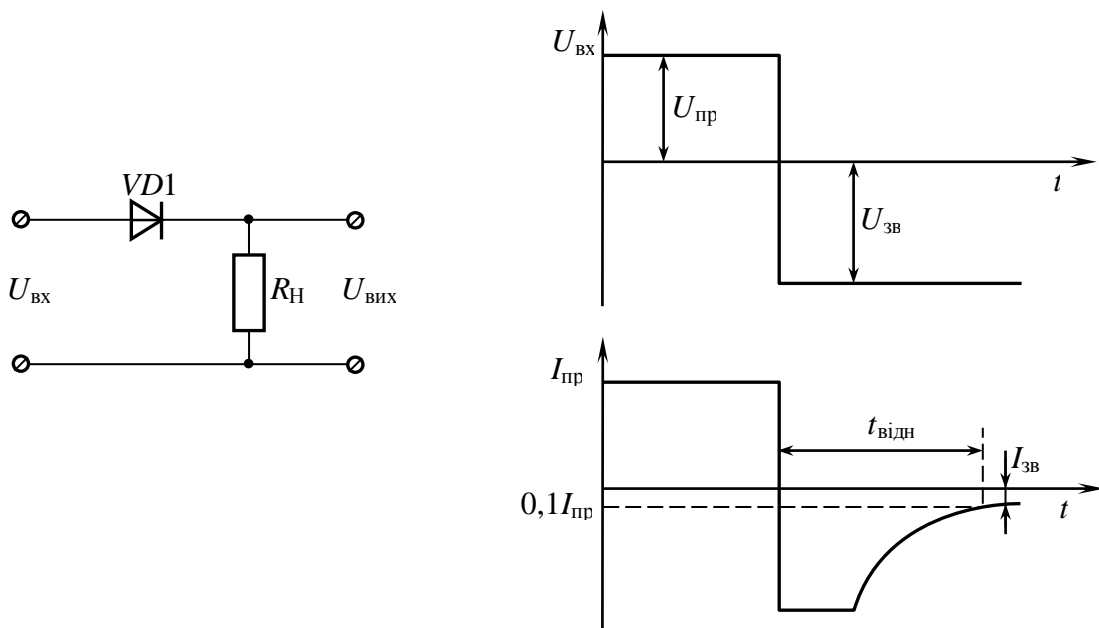


Рис.11.3. Схема включення й осцилограми вхідної напруги й струму

Основні параметри імпульсних діодів:

1. *Загальна ємність діода* (C_d) – ємність між виводами при заданих напрузі зсуву й частоті (частки пФ – декілька пФ);
2. *Максимальна імпульсна пряма напруга* ($U_{пр.і.маx}$);
3. *Максимально припустимий імпульсний струм* ($I_{пр.і.маx}$);
4. *Час встановленої прямої напруги діода* ($t_{вст}$) – інтервал часу з моменту подачі імпульсу прямого струму на діод до досягнення заданого значення прямої напруги на ньому;
5. *Час відновлення зворотного опору діода* ($t_{відн}$) – інтервал часу, що пройшов з моменту проходження струму через нуль до моменту, коли зворотний струм досягає заданого значення (порядку $0,1 I_{пр}$, де $I_{пр}$ – струм при прямому включенні).

Наявність часу відновлення обумовлено зарядом, накопиченим у базі діода при інжекції. Для запирання діода цей заряд повинен бути "ліквідований" за рахунок рекомбінацій і зворотного переходу неосновних носіїв в емітер.

Напівпровідникові стабілітрони

Напівпровідникові стабілітрони призначені для стабілізації напруг. Їхня робота заснована на використанні явища електричного пробою $p-n$ переходу при включенні діода у зворотному напрямку. У порівнянні з випрямними діодами стабілітрон має досить низьку регламентовану напруга пробою й може підтримувати цю напругу на постійному рівні при значній зміні зворотного струму.

Матеріали, що використовуються для створення $p-n$ переходу стабілітронів, мають високу концентрацію домішок. Тому напруженість електричного поля в $p-n$ переході значно вища, ніж у звичайних діодів. При відносно невеликих зворотних напругах у $p-n$ переході виникає сильне електричне поле, що викликає електричний пробій. У цьому режимі нагрівання діода не носить лавинообразного характеру. Тому електричний пробій не переходить у тепловий.

Механізм пробою може бути лавинним, тунельним або змішаним. Незважаючи на схожі результати дії, ці механізми різні, хоча й присутні в будь-якому стабілітроні спільно, але переважає тільки один з них. У стабілітронів до напруги 5,6 В переважає тунельний пробій з негативним температурним коефіцієнтом, вище 5,6 В домінує лавинний пробій з позитивним температурним коефіцієнтом. При напрузі 5,6 В обидва ефекти врівноважуються, тому вибір такої напруги є оптимальним рішенням для обладнань із широким температурним діапазоном застосування.

На рис.11.4,б наведено ВАХ стабілітрона КС510А при різних температурах.

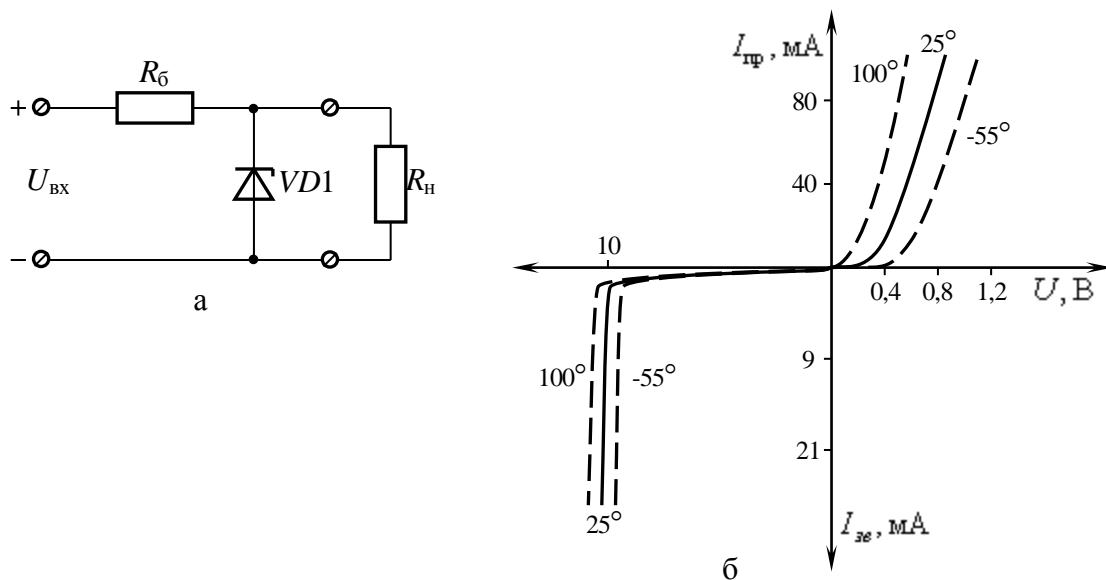


Рис.11.4. Стабілітрон КС510А: а – схема включення; б – ВАХ при різних температурах

Основні параметри стабілітрона і їх типові значення:

1. *Напруга стабілізації* ($U_{ст}$) – спадання напруги на стабілітроні при протіканні заданого струму стабілізації (декілька В – десятки В);
2. *Максимально припустимий струм стабілізації* ($I_{ст.маx}$) – найбільший струм стабілізації, при якому напруга стабілізації перебуває в заданих межах, а температура переходу не перевищує припустимої (декілька мА – декілька А);
3. *Мінімально припустимий струм стабілізації* ($I_{ст.мін}$) – найменший струм через стабілітрон, при якому напруга стабілізації перебуває в заданих межах (частки – десятки мА);
4. *Диференціальний опір стабілітрона* ($r_{диф}$), – відношення прирощення напруги стабілізації на стабілітроні до малого прирощення струму, що його викликало. Диференціальний опір стабілітрона визначається при заданому значенні струму на ділянці пробою як:

$$r_{диф} = \frac{\partial U_{ст}}{\partial I_{ст}}, \quad (\text{частки Ом} - \text{тисячі Ом})$$

5. *Температурний коефіцієнт напруги стабілізації* ($\alpha_{ст}$) – відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни температури навколишнього середовища при постійному струмі стабілізації ($\alpha_{ст}$ – тисячні частки відсотка).

$$\alpha_{ст} = \frac{1}{U_{ст}} \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta T} \cdot 100\%, \quad (\text{при } I_{ст} - \text{const})$$

Оскільки стабілітрон працює при зворотному включенні, режим пробою не пов'язаний з інжекцією неосновних носіїв. Тому в стабілітроні інерційні явища, пов'язані з нагромадженням і розсмоктуванням носіїв, при переході з

області пробою в область запирання й назад практично відсутні. Це дозволяє використовувати їх в імпульсних схемах в якості фіксаторів рівнів і обмежувачів.

Включення стабілітрона в схему стабілізації напруги показано на рис.11.4,а. При збільшенні напруги джерела струм у колі зростає, а падіння напруги на стабілітроні й на навантаженні залишається незмінним. При зрості струму через стабілітрон росте й падіння напруги на опорі R_6 . Інакше кажучи, майже все збільшення напруги живлення падає на опорі R_6 , а вихідна напруга залишається незмінною за рахунок характеристики зворотної гілки стабілітрона.

За II Законом Кірхгофа

$$U_{\text{п}} = U_{R_6} + U_{\text{ст}} \Rightarrow U_{\text{п}} = R_6 I + U_{\text{ст}} \Rightarrow U_{\text{п}} = R_6 I_{\text{ст}} + I_{\text{н}} + U_{\text{ст}}.$$

Параметри кола стабілізації обирають так, що б задовольнити наступні нерівності:

$$\begin{cases} I_{\text{ст. min}} \leq \frac{U_{\text{п min}} - U_{\text{ст}}}{R_6} - I_{\text{н max}}; \\ I_{\text{ст. max}} \geq \frac{U_{\text{п max}} - U_{\text{ст}}}{R_6} - I_{\text{н min}}; \end{cases}$$

де $U_{\text{п max}}$ і $U_{\text{п min}}$ – максимальна й мінімальна напруги джерела живлення;
 $I_{\text{н max}}$ и $I_{\text{н min}}$ – максимальний і мінімальний струм навантаження.

Якщо нерівності не задовольняються, то реалізувати параметричний стабілізатор напруги, що має задані параметри, не можна й необхідно застосовувати більш складні технічні рішення.

У схемі найпростішого стабілізатора (рис.11.5,а) змінна напруга обмежується на рівні напруги стабілізації стабілітрона $U_{\text{ст}}$. У результаті цього на виході отримується напруга трапецеїдальної форми. При зміні величини вхідної напруги амплітуда вихідної напруги залишається постійною, а діюче значення змінюється незначно (за рахунок деяких змін площі трапецій).

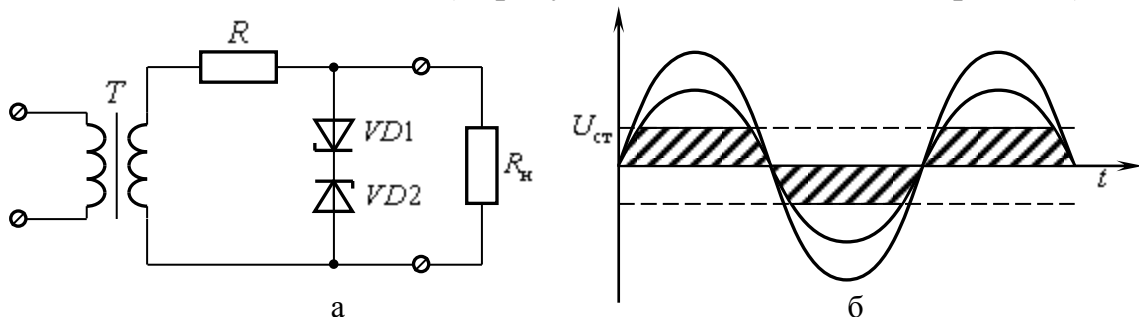


Рис.11.5. Схема найпростішого стабілізатора змінної напруги

Варикапи

Варикап – це напівпровідниковий прилад, призначений для використання в якості керованої електричною напругою ємності. Умовне графічне позначення варикапа презентовано на рис.11.6.



Рис.11.6. Умовне позначення варикапа

Варикап працює при зворотній напрузі, прикладеної до *p-n* переходу. Його ємність змінюється в широких межах, а його значення визначається з виразу:

$$C_B U = C_B 0 \left(\frac{U_K}{U_K + U} \right)^{\frac{1}{n}},$$

де $C_B(0)$ – ємність при нульовій напрузі на діоді;

U_K – значення контактного потенціалу;

U – прикладена зворотна напруга;

$n = 2$ – для різких переходів;

$n = 3$ – для плавних переходів.

Основні параметри варикапів і їх основні значення:

1. *Номинальна ємність* (C_H) – ємність між виводами варикапа при номінальній напрузі зсуву (звичайно $U_{зс} = 4$ В, C_H – десятки – сотні нФ);

2. *Коефіцієнт перекриття ємності* (K_C) – відношення максимальної ємності варикапа до мінімальної (кілька одиниць, кілька десятків одиниць);

3. *Опір втрат* ($r_{вт}$) – сумарний активний опір варикапа;

4. *Добротність варикапа* (Q_B) – відношення реактивного опору варикапа на заданій частоті до опору втрат при заданому значенні ємності (десятки – сотні одиниць);

5. *Максимально допустима напруга* (U_{max}) – максимальне миттєве значення змінної напруги, що забезпечує задану надійність при тривалій роботі;

6. *Температурний коефіцієнт ємності варикапа* (α_C) – відношення відносної зміни ємності до абсолютної зміни температури навколишнього середовища ($2 \cdot 10^{-4} \dots 6 \cdot 10^{-4}$ 1/К)

$$\alpha_C = \frac{\Delta C}{C \cdot \Delta T}.$$

В якості прикладу (рис. 11.7) показано включення варикапа в коло резонансного *LC* – контуру. Конденсатор *C* необхідний для виключення попадання постійної напруги *U* у вхідне коло. Його ємність вибирають

достатньо великою. Резистор також беруть достатньо великим, так щоб уведення кола подачі напруги не приводило до істотного зниження добротності варикапа.

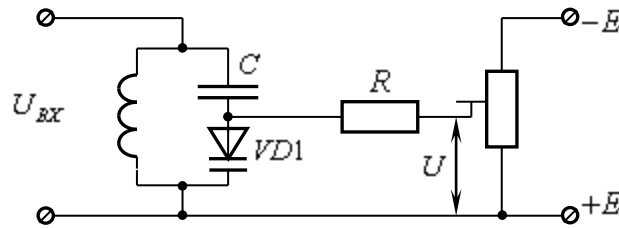


Рис.11.7. Схема резонансного LC – контуру з варикапом

Одержати варикап з добротністю, що помітно перевищує добротність контурної котушки, непросто. Це пояснюється тим, що у варикапі, як і в будь-якому діоді, послідовно з $p-n$ переходом завжди включено опір базової області напівпровідника, а паралельно – еквівалентний опір, який обумовлений зворотним струмом через перехід.

Тунельні діоди

Тунельні діоди – це напівпровідникові прилади, на ВАХ яких є ділянка з негативним диференціальним опором (рис.11.8,б). Наявність цієї ділянки є наслідком прояву тунельного ефекту.

Важлива перевага тунельних діодів полягає в дуже високій робочій частоті (до 10^{11} Гц).

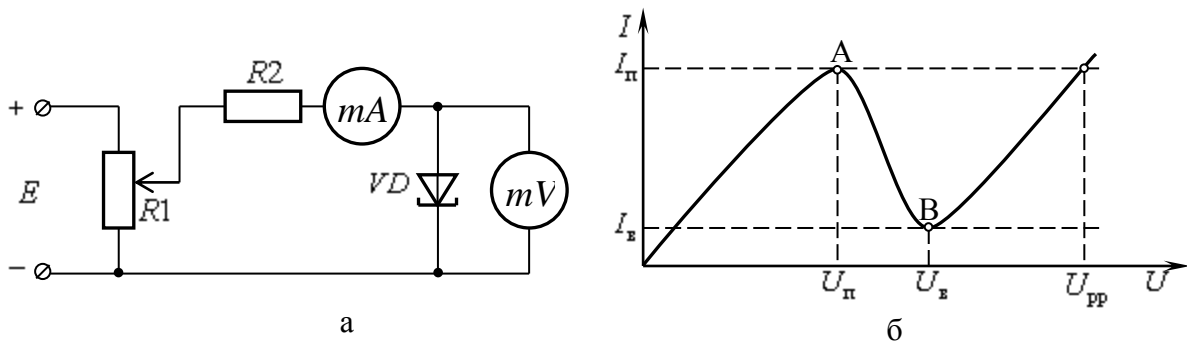


Рис.11.8. Тунельний діод: а – схема включення; б – ВАХ

Температурний діапазон роботи тунельних діодів вищий, ніж в інших напівпровідникових приладах, а споживана потужність дуже маленька.

Особливості тунельних діодів пояснюються особливостями тунельного переходу електронів.

За призначенням тунельні діоди поділяються на підсилювальні, генераторні, ті що й перемикаються.

У схемі, що перемикається (рис.11.9) при негативній напрузі сигналу

напруга на діоді буде дорівнювати U_1 , а при позитивній U_3 , причому $U_3 \gg U_1$. Це дозволяє розглядати тунельний діод як прилад із двома стійкими станами.

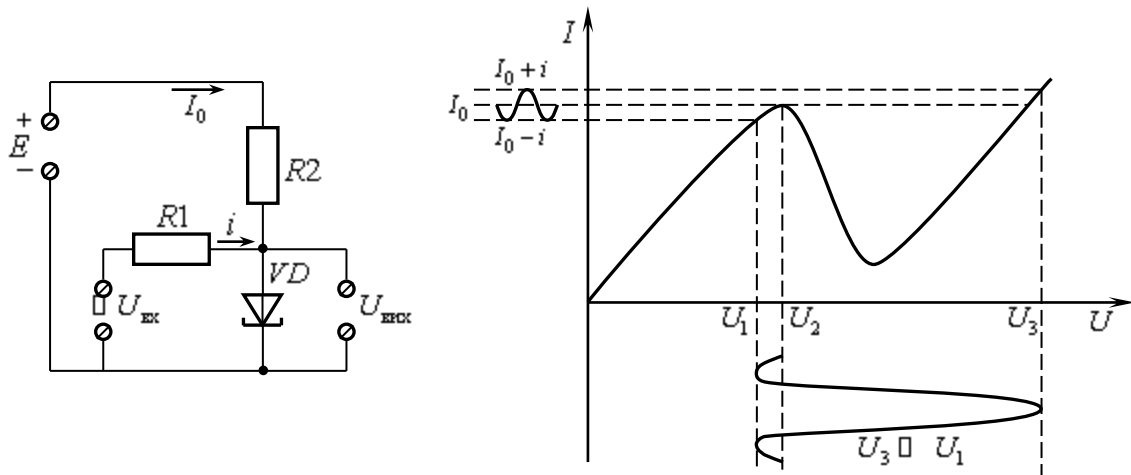


Рис.11.9. Робота тунельного діода в схемі, що перемикається