

Лекція 2. Діодні схеми аналогової схемотехніки

Електроніка базується в основному на використанні напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, тиристорів і інтегральних мікросхем (ІМС).

У напівпровідникових приладах використовується властивість односторонньої провідності р-n переходів. Електронно-дірковим називають такий р-n перехід, який утворений двома областями напівпровідника з різними типами провідності: електронною (n) і дірковою (p). Отримують р-n перехід за допомогою дифузії або епітаксії.

2.1 Схеми включення діодів

Напівпровідниковим діодом називають прилад з одним р-n переходом, який має два виводи: анод А і катод К (рис. 2.1).

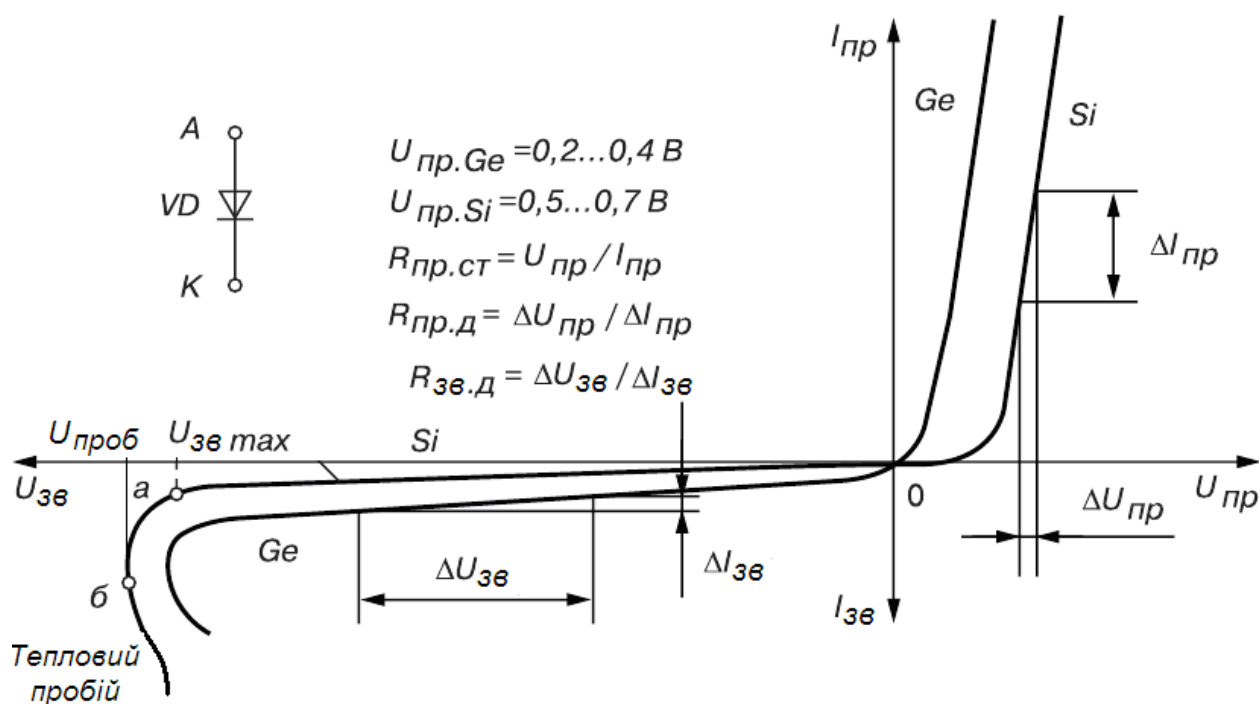


Рисунок 2.1 – Вольтамперна характеристика діода

При підключенні до р-n переходу прямої напруги $U_{пр}$ опір р-n переходу $R_{пр}$ знижується, а струм $I_{пр}$ зростає. При зворотній напрузі $U_{зв}$ зворотний струм $I_{зв}$ неосновних носіїв заряду виявляється в багато сотень або тисяч разів менше прямого струму. При напрузі $U > U_{зв.макс}$ (точка **а** на вольтамперній

характеристиці (ВАХ) діода (рис. 2.1)) починається лавиноподібний процес наростання зворотного струму $I_{зв}$, відповідний електричному пробою p-n переходу, який переходить (якщо не обмежити струм) в безповоротний тепловий пробій (після точки **б** на рисунку 2.1).

На рисунку 2.2 наведена структура p-n переходу та розподіл електричного потенціалу (ϕ) на його довжині x .

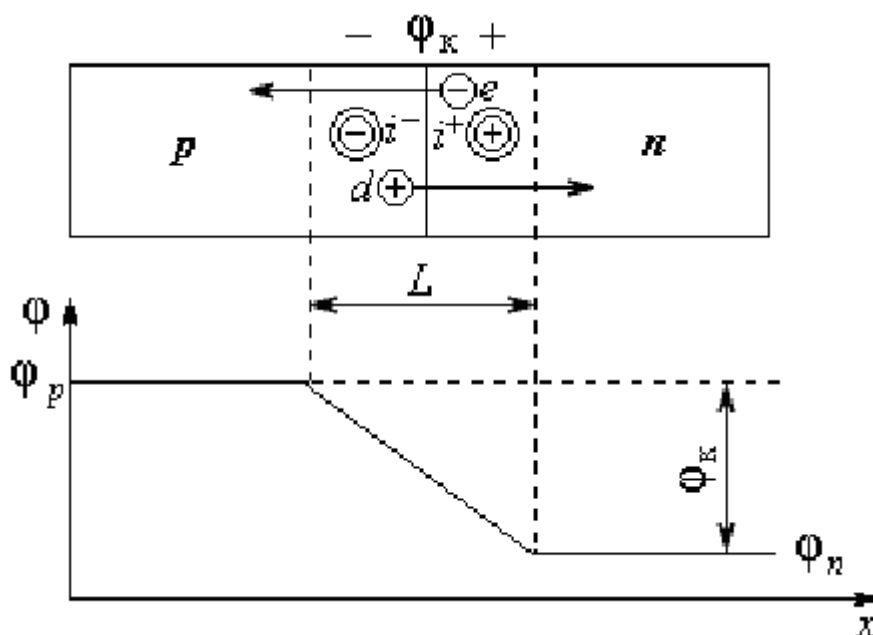


Рисунок 2.2 – Структура та потенціальна діаграма p-n переходу

Цей розподіл зумовлений тим, що при металургійному контакті p- та n-напівпровідників починається дифузія основних носіїв заряду, а саме електронів e з n-напівпровідника та дірок d з p-напівпровідника. При цьому кожний електрон, покидаючи n-шар, залишає один нерухомий позитивно заряджений іон i^+ , а кожна дірка - негативно заряджений іон i^- .

Наслідком є те, що в приповерхневих шарах p- та n-областей залишаються нерухомі іони i^+ та i^- . Тому на ширині p-n переходу L з'являються області з концентрацією електричних протилежних зарядів, які зумовлюють контактну різницю потенціалів ϕ_K . Вона чинить гальмуючу дію для дифундуючих електронів e та дірок d і тому припиняє дифузію.

Таким чином, при завершенні дифузії на ширині L p-n переходу виникає потенціальний бар'єр ϕ_K для основних носіїв заряду, якими є електрони в

n- та дірки в p-напівпровідниках. Величина контактної різниці потенціалів становить для p-n переходів з германію $\varphi_k = 0,35$ В та з кремнію $\varphi_k = 0,7$ В. (Оскільки сьогодні германієві діоди не випускаються, далі йдеться тільки про діоди з кремнію).

Якщо від p- і n-шарів зробити металеві виводи, то одержимо напівпровідниковий діод (рис. 2.3).

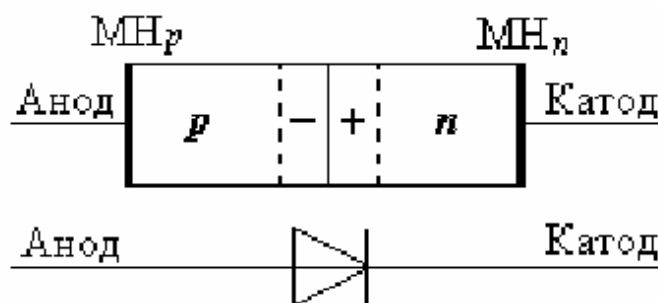


Рисунок 2.3 – Структура та умовне графічне позначення діода

Контакти метал-напівпровідник МНр та МНn виконують омичними, тобто не випрямними. Тому їхні поля не обмінюються енергією з носіями зарядів і при подальшому розгляданні роботи діода на цих контактах можна не зупинятися.

Принцип дії діода полягає у створенні власної одnobічної електропровідності.

Основна схема включення діода VD на прямиї напрузі наведена на рисунку 2.4 а.

Вона має обов'язково містити послідовно включений опір R. У випрямлячах R - це опір навантаження, яке живиться випрямленою напругою, а в інших схемах це якийсь резистор. За відсутності опорю R струм діода може необмежено зрости, що приведе до перегорання діода.

Вхідна напруга $U_{вх}$ за законом Кірхгофа розподіляється між діодом VD та опором R:

$$U_{вх} = U_{пр} + U_R \quad (2.1)$$

Як впливає з рисунка 2.4 б, напруга $U_{пр}$ на діоді при зазначеній полярності спрямована проти контактної різниці потенціалів φ_k . Така напруга на

діоді називається прямою. Пряма напруга $U_{пр}$ діє назустріч ϕ_k (рис. 2.4 б) і тому зменшує потенційний бар'єр на ширині L р-п переходу від ϕ_k до $(\phi_k - U_{пр})$. Тоді виникає дифузія основних носіїв заряду через р-п перехід, створюючи саме тим прямий струм $I_{пр}$ (рис. 2.4 б).

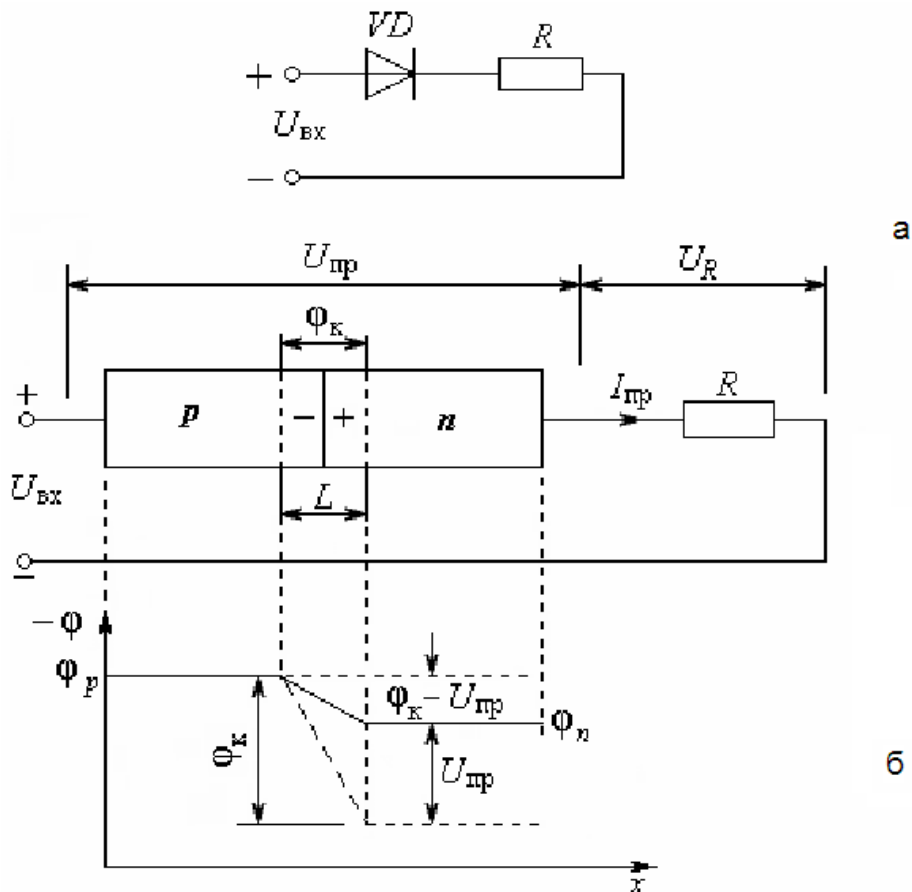


Рисунок 2.4 – Схема включення діода при прямій напрузі (а) та потенційна діаграма (б)

Оскільки концентрація основних носіїв (електронів в n- та дірок в р-напівпровідниках) висока, то прямий струм $I_{пр}$ може бути необмежено великим.

Пряма напруга $U_{пр}$ не може бути більше за контактну різницю потенціалів $\phi_k = 0,7$ В. Це пояснюється тим, що при зростанні прямого струму $I_{пр}$ р-п перехід збагачується рухомими носіями заряду (електронами та дірками), через що його опір зменшується і пряма напруга $U_{пр}$ збільшується непомітно і не може перевищувати 0,7 В, тобто завжди залишається відносно малою.

З формули (2.1) видно, що при прямій напрузі до опору навантаження R прикладена напруга

$$U_R = U_{\text{вх}} - U_{\text{пр}} \quad (2.1)$$

тобто вся вхідна напруга $U_{\text{вх}}$ за винятком $U_{\text{пр}} = 0,7 \text{ В}$.

Якщо змінити полярність вхідної напруги на протилежну від прямої, то діод VD буде під зворотною напругою (рис. 2.5). Зворотна напруга $U_{\text{зв}}$ прикладена до діода згідно з контактною різницею потенціалів ϕ_K (рис. 2.5 б) і тому збільшує потенційний бар'єр на ширині L р-п переходу від ϕ_K до $(\phi_K + U_{\text{зв}})$. Тому дифузія основних носіїв заряду неможлива. Прямий струм не протікає $I_{\text{пр}} = 0$.

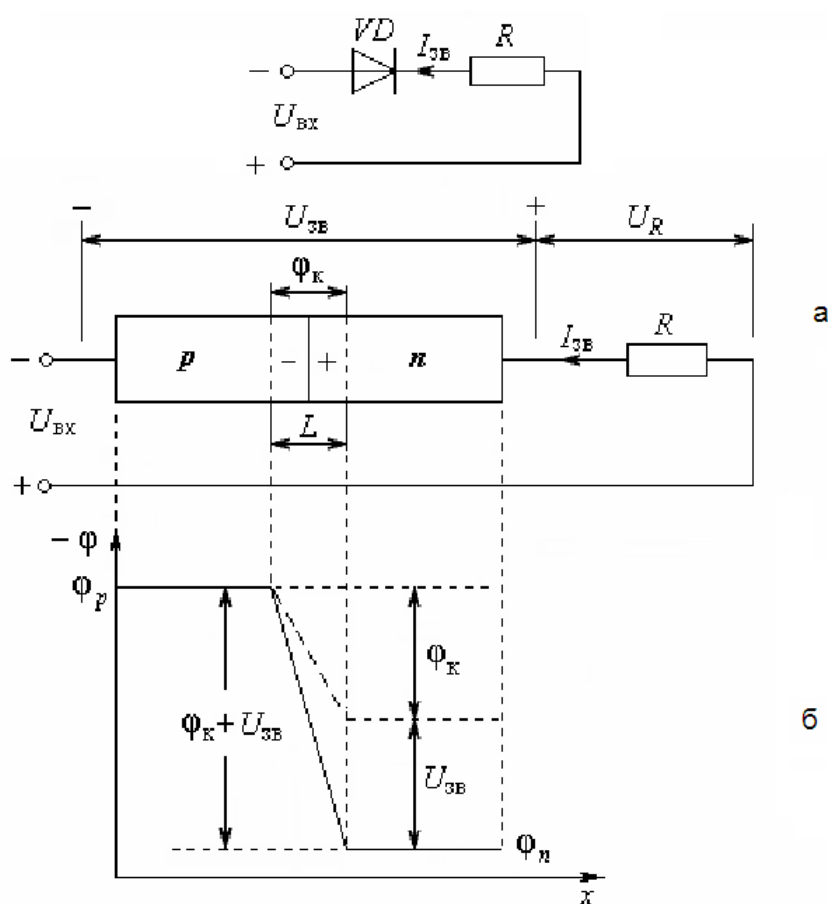


Рисунок 2.5 – Схема включення діода при зворотній напрузі (а) та потенційна діаграма (б)

Зворотна напруга разом з ϕ_K створює в р-п переході прискорювальне поле для неосновних носіїв заряду (електронів у р- та дірок у n- напівпровідниках). Рухом лише цих носіїв і створюється зворотний струм $I_{\text{зв}}$. Оскільки

концентрація неосновних носіїв дуже мала, то зворотний струм $I_{зв}$ є також нехтовно малим.

Зворотна напруга на відміну від прямої збіднює р-n перехід рухомими носіями заряду, через що опір р-n переходу великий і тому зворотна напруга може бути скільки завгодно великою в межах допустимих параметрів.

Таким чином, діод у прямому напрямі пропускає великий прямий струм, а в зворотному - дуже малий зворотний: $I_{пр} \gg I_{зв}$, тобто має практично однобічну електропровідність.

Співвідношення між прямими та зворотними напругами й струмами діода відбиває його ВАХ (рис. 2.1), рівнянням якої є вираз

$$I = I_0 \left(\exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right) \quad (2.2)$$

де I - струм діода (прямий або зворотний); U - напруга на діоді (пряма $U_{пр} > 0$ зі знаком "+", зворотна $U_{зв} < 0$ зі знаком "-"); I_0 - зворотний струм діода при достатньо великій зворотній напрузі ($U_{зв} \gg \varphi_T$); φ_T - температурний потенціал (при кімнатній температурі $T = 300 \text{ K}^\circ$ він становить $\varphi_T = 25 \text{ мВ}$).

2.2 Вплив температури на струми діода

Однією з особливостей роботи напівпровідникових приладів є суттєва залежність їхніх струмів від температури. Це явище в деяких випадках може бути як корисним, так і шкідливим. Наприклад, для напівпровідникових термометрів температурна залежність струму є основою їхньої роботи, а для приймально-підсилювальної апаратури ця залежність є вкрай шкідливою.

Як видно з рисунка 2.6, при збільшенні температури T зростають і зворотний I_0 , і прямий $I_{пр}$ струми.

Зворотний струм I_0 зростає тому, що з підвищенням температури збільшується концентрація неосновних носіїв заряду через теплову іонізацію власних атомів.

При прямому струмі з підвищенням температури зменшується контактна різниця потенціалів ϕ_k . Через це знижується потенційний бар'єр для основних носіїв заряду, що викликає зростання прямого струму $I_{пр}$.

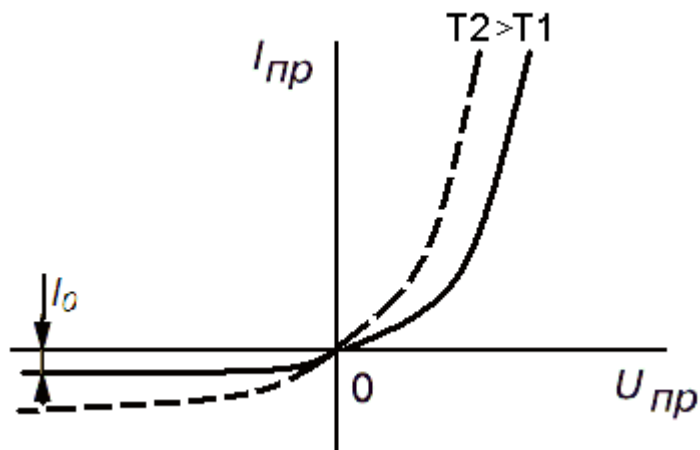


Рисунок 2.6 – Залежність струмів діода від температури

Залежність зворотного (теплого) струму р-п переходу від температури описується співвідношенням

$$I_0(T) = I_0(T_0) \cdot e^{\alpha \Delta T}, \quad (2.3)$$

де $I_0(T)$ - зворотний струм за будь-якої температури T ; $I_0(T_0)$ - зворотний струм на початковій температурі $T_0 = 300$ К; $\Delta T = (T - T_0)$ - змінення температури; α - температурний коефіцієнт, який залежить від матеріалу напівпровідника. Для германієвих діодів $\alpha_{Ge} = 0,13$ К⁻¹, а для кремнієвих діодів $\alpha_{Si} = 0,09$ К⁻¹.

З наведених співвідношень видно, що абсолютне температурне змінення зворотного струму в кремнієвих діодах майже на порядок менше, ніж в германієвих. Тому застосування германієвих діодів у нових розробках апаратури заборонене, і промисловістю вони зараз не випускаються.

Прямий струм, як видно з формул (2.2) і (2.3), як і зворотний, також змінюється приблизно вдвічі на кожні 10 °С змінення температури.

2.3 Пробій діодів

Діод пробивається тільки зворотною напругою. Коли зворотна напруга перевищує певне пробивне значення $U_{\text{проб}}$ (рис. 2.1), зворотний струм діода починає різко зростати. Це явище називається пробоем діода.

Пробіи бувають оборотними та необоротними. При оборотному пробі діод відновлює всі свої параметри після зняття пробивних напруг. Необоротний пробій губить діод.

Розрізняють два основних види пробую: тепловий та електричний.

Тепловий пробій є необоротним. Щодо електричного пробую, то він є оборотним і може бути використаним.

Тепловий пробій розвивається під зворотною напругою і виникає через перегрів p-n переходу наступним чином.

Потужність, яка виділяється на p-n переході становить

$$P_{p-n} = U_{зв} \cdot I_{зв} \quad (2.4)$$

На ВАХ діода (рис. 2.1) в режимі теплового пробую видно, що в пробитому діоді необмежено зростає зворотний струм $I_{зв}$. З (2.4) видно, що чим вище зворотна напруга $U_{зв}$, тим більша потужність виділяється на p-n переході і тим сильніше він розігрівається. Тому зростає концентрація рухомих носіїв заряду через теплову іонізацію власних атомів, внаслідок чого збільшується зворотний струм $I_{зв}$. Додатково зростає потужність P_{p-n} , що викликає ще більший розігрів p-n переходу і т. д. Зворотний струм $I_{зв}$, а за ним і потужність P_{p-n} , необмежено зростають, через що діод перегорає. Отже, тепловий пробій необоротний і є згубним для діода. Щоб уникнути теплового пробую, слід обмежувати зворотну напругу. В деяких типах діодів передбачене установлення їх на радіатори для охолодження.

Електричний пробій, як і тепловий, розвивається під зворотною напругою. Однак, на відміну від теплового, електричний пробій є оборотним, тобто після зняття пробивної напруги діод відновлює всі свої параметри. Електричний пробій буває двох типів: лавинний та тунельний.

Лавинний пробій розвивається наступним чином.

При малій зворотній напрузі, яка менша за пробивну ($U_{зв} < U_{проб}$), швидкість електронів недостатня для іонізації атомів на ширині р-п переходу. Через це рухомих носіїв заряду в р-п переході практично немає, і зворотний струм відсутній (рис. 2.7)

З підвищенням зворотної напруги зростає швидкість електронів у р-п переході. Коли зворотна напруга перевищить пробивну ($U_{зв} < U_{проб}$), то швидкість електронів в р-п переході досягає такої величини, що вони починають іонізувати власні атоми.

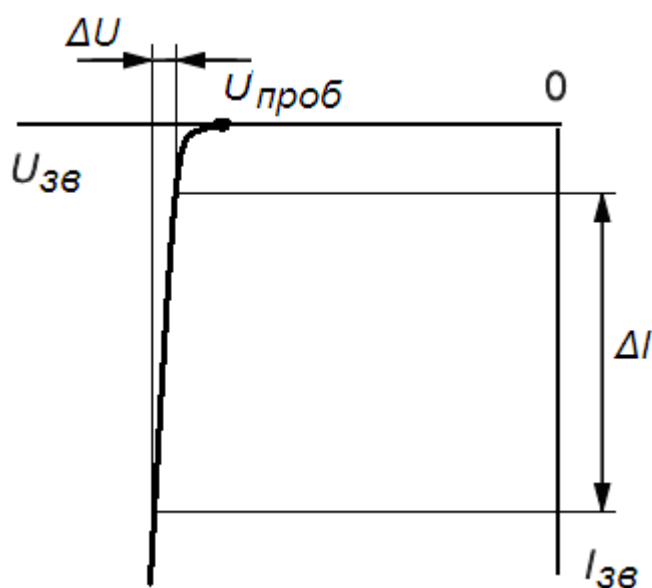


Рисунок 2.7 – ВАХ діода з електричним пробоем

З'являються електрони в зоні провідності, через що виникає зворотний струм. Ці електрони у свою чергу беруть участь в іонізації атомів і т. д. Концентрація електронів у зоні провідності збільшується лавиноподібно, через що зворотний струм необмежено зростає.

Тунельний пробій розвивається за великої напруженості електричного поля в р-п переході (від 200 кВ/см). При цьому електрони переходять з валентної зони в зону провідності без витрати енергії (тунельний ефект). При цьому р-п перехід збагачується електронами, через що його ширина зменшується. Напруженість в р-п переході ще більше зростає, що викликає ще більшу кількість електронів, які тунельно потрапляють в зону провідності. Тому

зворотний струм зростає необмежено. ВАХ діода з тунельним пробоем та ж сама, що й з лавинним (рис. 2.7).

З рисунка 2.7 видно, що велика зміна струму ΔI супроводжується малою зміною напруги ΔU , тобто зворотна напруга на діоді з електричним пробоем залишається стабільною. Тому електричний пробій можна застосовувати для стабілізації напруги.

2.4 Випрямлячі

Найбільш розповсюдженою діодною схемою є випрямляч. Задачею випрямляча є перетворення вхідної двополярної напруги $U_{\text{вх}}$ у вихідну однополярну напругу або позитивну $U_{\text{вих1}}$ (рис. 2.6 а), або негативну $U_{\text{вих2}}$ (рис. 2.6 б).

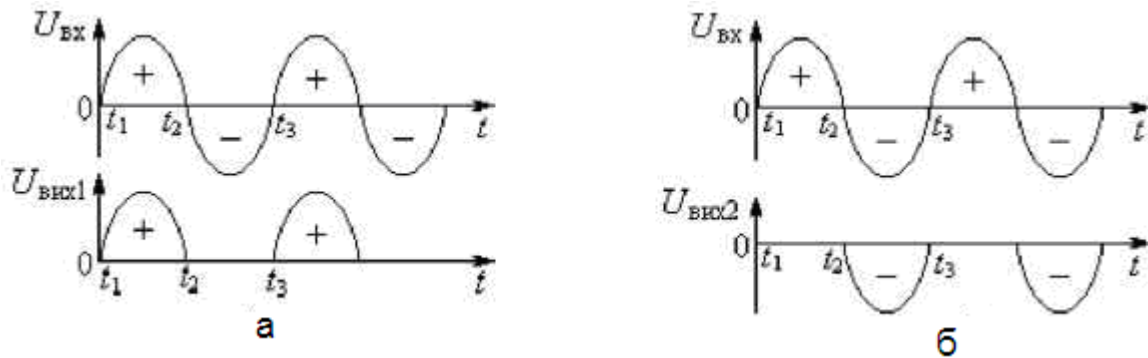


Рисунок 2.6 – Часова діаграма роботи однонапівперіодного випрямляча

Вхідна напруга $U_{\text{вх}}$, яка випрямляється, містить напівхвилі обох полярностей: позитивну (+) та негативну (-). Вихідна ж напруга $U_{\text{вих}}$ має тільки одну полярність: або позитивну $U_{\text{вих1}}$ (рис. 2.6 а) або негативну $U_{\text{вих2}}$ (рис. 2.6 б). Таке перетворення вхідної напруги здійснює схема випрямляча, яка наведена на рисунку 2.7.

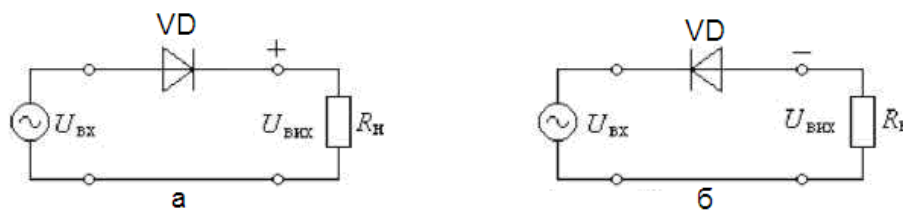


Рисунок 2.7 - Схема випрямляча: а – позитивної напруги; б – негативної напруги

Випрямляч є подільником напруги з вентиля VD у верхньому плечі та опору навантаження R_H у нижньому. Як видно з рисунка 2.7, щоб змінити полярність випрямленої напруги, треба переполюсувати включення вентиля VD.

Коефіцієнт передавання цієї схеми як подільника напруги становить

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_H}{R_{VD} + R_H}, \quad (2.1)$$

де R_{VD} - опір вентиля VD; R_H - опір навантаження.

З формули (2.1) видно, що для одержання, наприклад, позитивної випрямленої напруги коефіцієнт передавання K має бути

$$K=1, \quad (2.2)$$

в інтервалі моментів $t_1 < t < t_2$ та

$$K=0, \quad (2.3)$$

в інтервалі моментів $t_2 < t < t_3$ (рис. 2.6 а).

Для виконання умови (2.2) треба мати опір вентиля R_{VD} надто малим ($R_{VD} \ll R_H$), а для умови (2.3) - надто великим ($R_{VD} \gg R_H$).

Звідси випливає, що вольтамперна характеристика (ВАХ) ідеального вентиля (відкритий – закритий) повинна мати форму, яка наведена на рисунку 2.8.

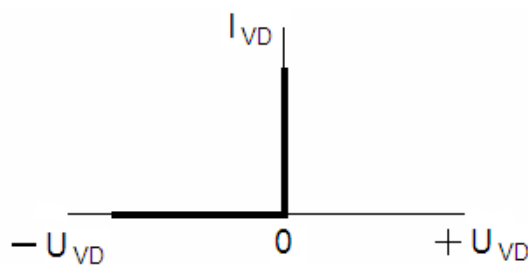


Рисунок 2.8 – ВАХ ідеального вентиля

Для однієї полярності напруги $+U_{VD}$ струм вентиля I_{VD} має бути необмежено великим при скільки завгодно малій напрузі $+U_{VD}$, а для протилежної ($-U_{VD}$) - дорівнювати нулю.

Наведена на рисунку 2.8 ВАХ ідеального вентиля до цього часу не реалізована, але є вентилях, ВАХ яких більш або менш наближається до ідеальної.

Це напівпровідникові діоди. Вони мають одnobічну електропровідність, тобто малий опір для однієї полярності напруги і великий - для протилежної.

Схема випрямляча з трансформаторним входом наведена на рисунку 2.8. Побудуємо потенційну діаграму випрямляча. Для цього знайдемо рівняння лінії навантаження.

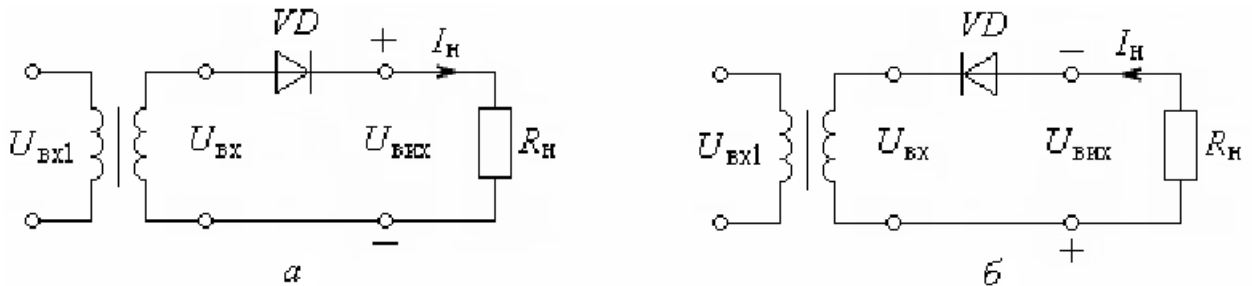


Рисунок 2.8 - Схема випрямляча з трансформаторним входом: а – для позитивної випрямленої напруги; б – для негативної випрямленої напруги

За законом Кірхгофа вхідна напруга $U_{вх}$, яку треба випрямити, розподіляється між діодом VD та опором навантаження R_n :

$$U_{вх} = U_{пр} + I_n R_n, \quad (2.4)$$

де $U_{пр}$ - пряма напруга на діоді VD ; $I_n = I_{пр}$ - струм навантаження (прямий струм діода). Після ділення (2.4) на R_n одержуємо

$$I_n = \frac{U_{вх}}{R_n} - \frac{U_{пр}}{R_n} \quad (2.5)$$

Співвідношення (2.5) є рівнянням лінії навантаження. Оскільки відносно $U_{пр}$ рівняння першого ступеню, то лінія навантаження є прямою і тому називається **навантажувальна пряма**. Лінія навантаження (рис. 2.9) будується по двох точках 1 і 2 перетину з осями координат $ВАХ$ діода.

Точка 1: підставляємо в (2.5) рівняння осі абсцис $I_{пр} = 0$, звідки одержуємо $U_{вх} = U_{пр}$ і відкладаємо $U_{пр} = U_{m\ вх}$, де $U_{m\ вх}$ - амплітуда вхідної напруги.

Точка 2: підставляємо в (2.5) рівняння осі ординат $U_{пр} = 0$, звідки одержуємо співвідношення $I_{пр} = \frac{U_{вх}}{R_n}$, в яке підставляємо $U_{вх} = U_{m\ вх}$.

Через точки 1 та 2 проводимо пряму, яка є лінією навантаження.

Перетин лінії навантаження з ВАХ дає робочу точку РТ, яка визначає режим діода, тобто всю сукупність напруг та струмів елементів схеми. Так, проти точок 1 і 2 позначена амплітуда вхідної напруги $U_{m\text{ вх}}$. Робоча точка РТ є межею між напругою на діоді $U_{m\text{ пр}}$ та напругою на R_H , тобто вихідною напругою $U_{m\text{ вих}}$.

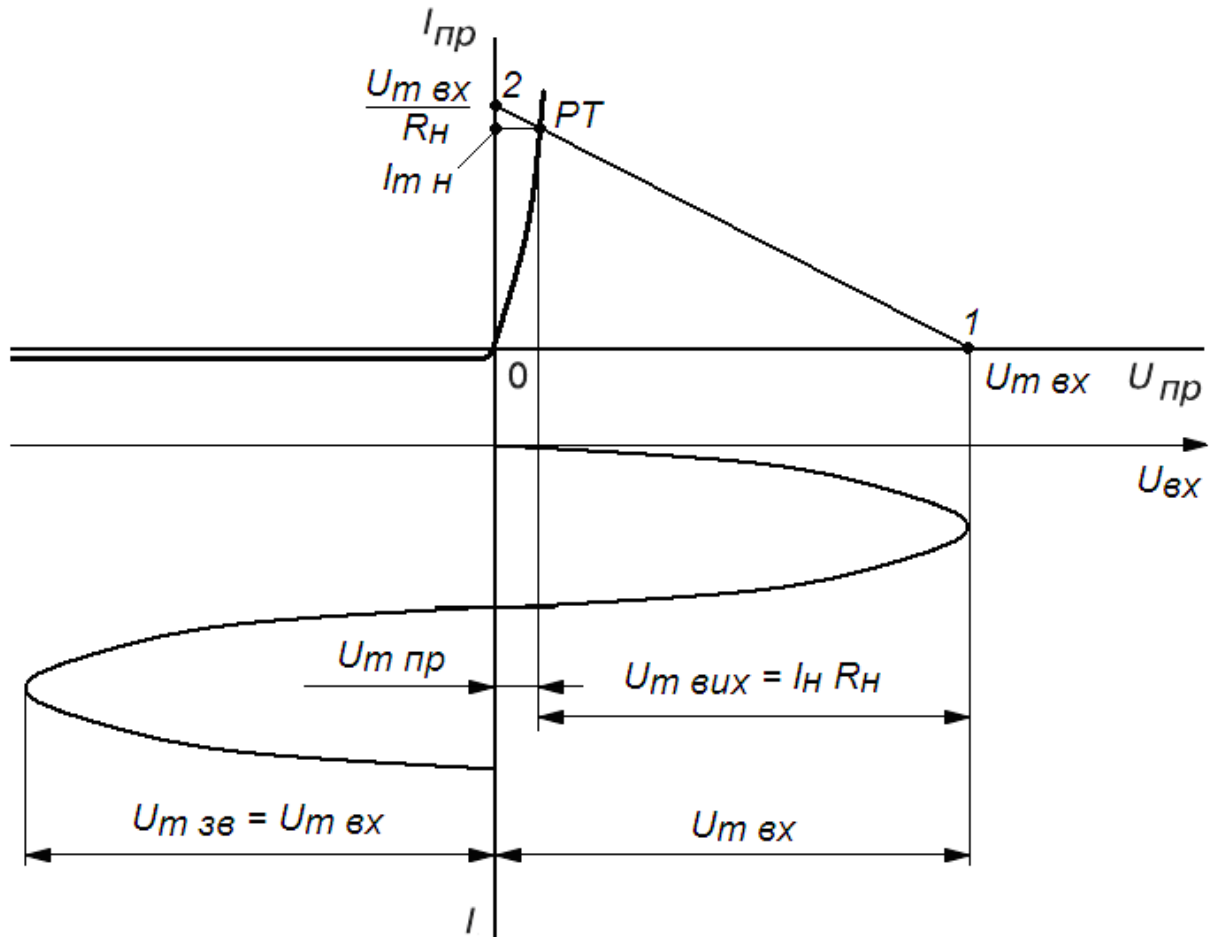


Рисунок 2.9 – Діаграма роботи однонапівперіодного випрямляча

З діаграми роботи випрямляча (рис. 2.9) видно принцип його дії. Вхідна напруга $U_{\text{вх}}$, яку треба випрямити, розподіляється між діодом VD та навантаженням R_H , тобто $U_{\text{вх}} = U_{\text{пр}} + U_{\text{вих}}$.

При позитивній напівхвилі, яка для діода є прямою напругою, на діоді падає нехтовно мала напруга $U_{m\text{ пр}} \ll U_{m\text{ вх}}$ і тому до навантаження R_H прикладена більша частина $U_{m\text{ вх}}$:

$$U_{m\text{ вих}} = U_{\text{вх}} - U_{m\text{ пр}} \approx U_{m\text{ вх}}. \quad (2.6)$$

Негативна напруга $U_{m\text{ вх}} = U_{m\text{ зв}}$ є для діода зворотною і тому практично цілком падає на діоді, не потрапляючи до виходу. Тому вихідна напруга близька до нуля:

$$U_{m\text{ вих}} = U_{m\text{ вх}} - U_{m\text{ зв}} \approx 0. \quad (2.7)$$

Так, діод VD пропускає до навантаження R_H напругу лише однієї полярності, тобто здійснює випрямлення.

При розрахунку випрямляча основними заданими параметрами є опір навантаження R_H та випрямлена напруга на ньому $U_{\text{вих}}$. Треба скласти схему випрямляча, вибрати тип діода, визначити амплітуди вхідної напруги, вхідного струму, прямої та зворотної напруг.

Тип діода вибирається за вхідним струмом $I_{\text{вх}}$ та зворотною напругою $U_{\text{зв}}$. У наведеній схемі

$$I_{\text{вх}} = I_H = \frac{U_{\text{вх}}}{R_H}. \quad (2.8)$$

Знайдений за формулою (2.8) струм I_H не повинен перевищувати номінальне значення струму $I_{\text{ном}}$ за довідником:

$$I_H \leq I_{\text{ном}}. \quad (2.9)$$

Оскільки вхідна напруга $U_{\text{вх}}$ розподіляється між опором навантаження R_H та діодом, то амплітуда вхідної напруги становить

$$U_{m\text{ вх}} = U_{m\text{ пр}} + U_{m\text{ вих}}, \quad (2.10)$$

де $U_{m\text{ пр}} \approx 0,7 \text{ В}$ - амплітуда прямої напруги на діоді.

Амплітуда вхідної напруги $U_{m\text{ вх}}$ не повинна перевищувати допустиму зворотну напругу $U_{\text{зв макс}}$, яка є паспортною величиною для кожного діода.

З 20% запасом зворотної напруги діод вибирають за критерієм

$$1,2U_{m\text{ вх}} \leq U_{\text{зв макс}}, \quad (2.11)$$

де $U_{m\text{ вх}}$ - амплітуда вхідної напруги.

Для остаточного визначення амплітуд прямої та зворотної напруг діода відлік відповідних струмів та напруг здійснюється через проекції РТ на осі координат.

Так, проекція РТ на вісь абсцис дає:

- амплітуду прямої напруги на діоді $U_{m\text{ пр}}$;
- амплітуду вихідної напруги (на опорі R_H): $U_{m\text{ вих}} = U_{m\text{ вх}} - U_{m\text{ пр}}$.

Проекція РТ на вісь ординат визначає амплітуду струму $I_{m\text{ н}}$.

Амплітуда $U_{m\text{ зв}}$ практично дорівнює $U_{m\text{ вх}}$ і цілком падає на діоді, через що вихідна напруга на опорі R_H дорівнює нулю.

Результати розрахунку віддзеркалює часова діаграма роботи, яка наведена на рисунку 2.10, де U_{VD} - напруга на діоді.

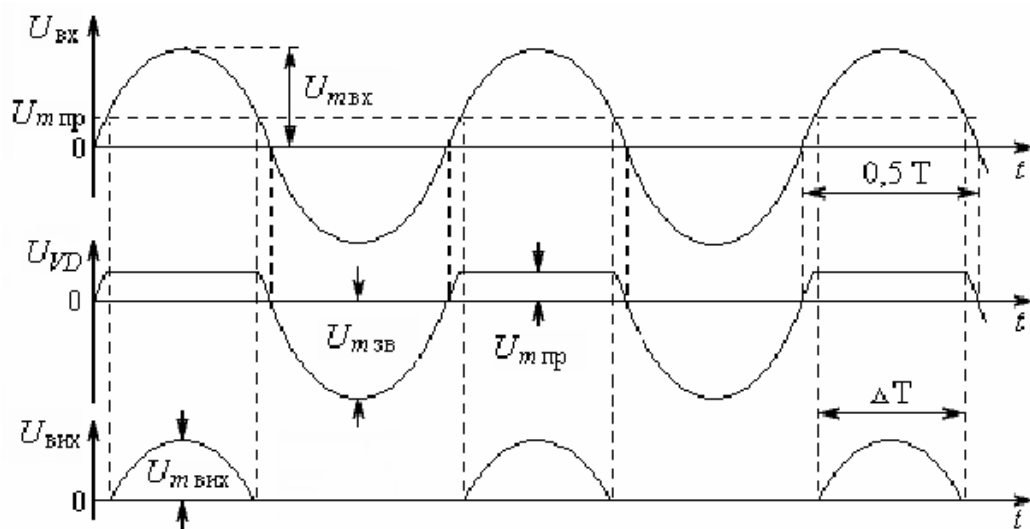


Рисунок 2.10 – Часова діаграма роботи випрямляча

Випрямлення досягається не за будь-якого опору навантаження R_H . Якщо опір R_H сумірний зі зворотним опором діода ($R_H \approx R_{зв}$), то зворотна напівхвиля буде лише розподілятися між R_H та $R_{зв}$, тобто частково виділиться не тільки на діоді, а й на опорі R_H і випрямлення не буде.

З рисунків 2.9 – 2.10 випливає, що амплітуда випрямленої напруги $U_{m\text{ вих}}$ менше вхідної $U_{m\text{ вх}}$ на величину прямої напруги $U_{m\text{ пр}}$ на діоді. Крім того, тривалість імпульсу ΔT вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ менша за напівперіод $0,5T$ вхідної $U_{\text{вх}}$.

Усе це зменшує середньоквадратичну вихідну напругу, через що зменшується коефіцієнт корисної дії (ККД). Чим менша випрямлена напруга, тим більше зменшується ККД. Так, при $U_{\text{вих}} = 10\text{ В}$ ККД дорівнює приблизно 93%, а при $U_{\text{вих}} = 5\text{ В}$ він становить 86%. Крім зниження ККД пряма напруга

на діоді розігріває його, через що погіршується температурний режим пристроїв. Тому в потужних випрямлячах треба охолоджувати діоди, що зумовлює збільшення вартості пристроїв та їхньої експлуатації.

Отже, пряма напруга на діоді для випрямляча є шкідливою. Тому зменшення прямої напруги на діоді є актуальною задачею.

Ідеальним для випрямляча має бути діод, пряма напруга якого дорівнює нулю: $U_{пр} = 0$. Такий діод ще не створений, але деяке зменшення прямої напруги досягнуто. Так, для зменшення прямої напруги німецький фізик Шотткі запропонував діод (рис. 2.11), який створений з переходу метал-напівпровідник (діод Шотткі).

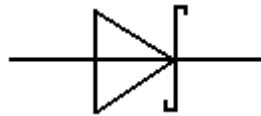


Рисунок 2.11 - Умовне графічне позначення діода Шотткі

Оскільки концентрація електронів у металі більша за напівпровідника, то пряма напруга на діоді менша і дорівнює 0,3 В. Крім того, на ширині переходу Шотткі менше накопичується електронів під прямою напругою. Тому для розсмоктування цього накопичення при зміні полярності напруги потрібний менший час, через що діоди Шотткі є набагато високочастотними.

2.5 Двонапівперіодне випрямлення

З діаграми роботи, яка наведена на рисунку 2.10, видно, що при однонапівперіодному випрямленні використовується напівхвиля лише однієї полярності: позитивна або негативна. Тоді половина часу, в якому діє напруга протилежної полярності, витрачається безкорисно.

Цей недолік усувається двонапівперіодним випрямленням, яке використовує обидві напівхвилі вхідної напруги (рис. 2.12).

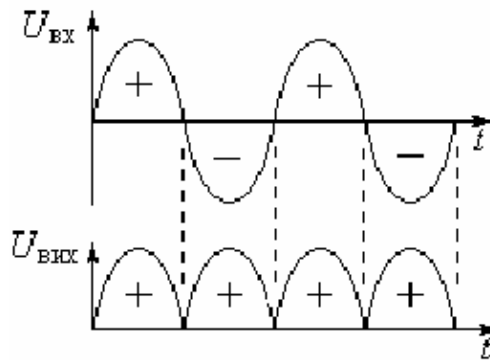


Рисунок 2.12 – Часова діаграма роботи двонапівперіодного випрямляча

Схема двонапівперіодного випрямляча (рис. 2.13) називається мостою. Струм протікає від полюса “+” (рис. 2.13 а) через діод VD3, R_H , діод VD2 до полюса “-”, створюючи на виході напругу $U_{ВИХ}$ позитивної полярності. Через напівперіод полярність $U_{ВХ}$ стане протилежною (показано в дужках). Тоді струм протікатиме від полюса “(+)” через VD4, R_H , VD1 до полюса “(-)”, причому, через R_H у тому ж напрямі, створюючи $U_{ВИХ}$ тієї ж полярності.

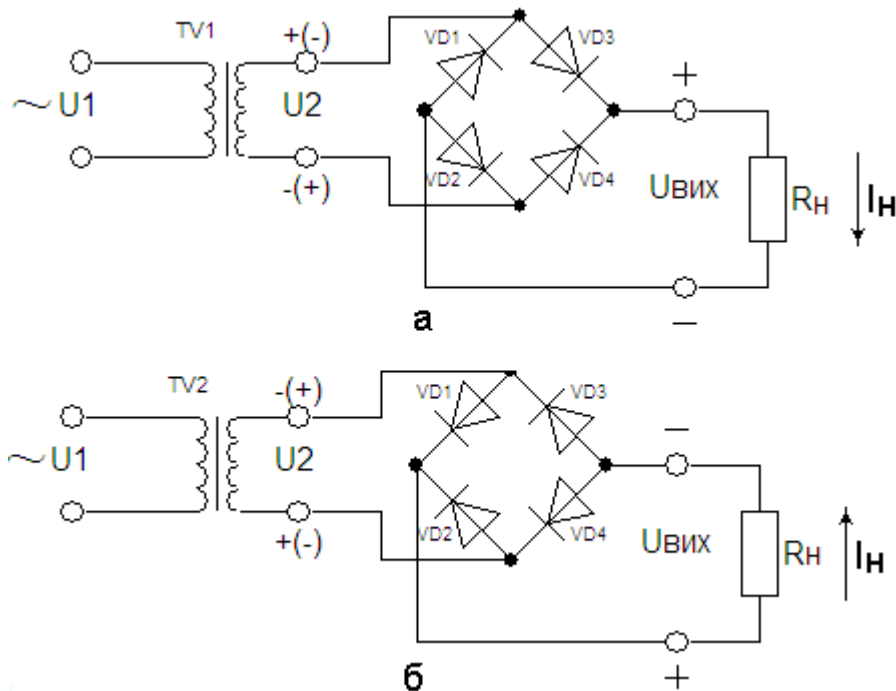


Рисунок 2.13 - Двонапівперіодний випрямляч: а – позитивної напруги; б – негативної напруги

Так використовуються обидві напівхвилі.

Оскільки зміна температури впливає на параметри діодів, параметри випрямляча теж змінюються. Так, з підвищенням температури вихідна напруга збільшується. Це пояснюється тим, що з підвищенням температури зменшується пряма напруга (рис. 2.6).

Оскільки вся пряма через діод напруга не перевищує 0,7 В, то температурна зміна вихідної напруги має порядок 0,1 В. Ця зміна невелика, але при малих випрямлених напругах її слід враховувати при розробці каскадів, які живить випрямляч.

2.6 Параметричні стабілізатори напруги

Стабілізатори напруги призначені для забезпечення незмінності вихідної напруги при зміні вхідної напруги, опору навантаження та наявності інших дестабілізуючих факторів.

На рисунку 2.14 наведена амплітудна характеристика $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ ідеального стабілізатора напруги. З цієї характеристики видно, що починаючи з вхідної напруги $U_{\text{вх}} = U_{0 \text{ ст}}$, її подальше зростання не викликає зміни вихідної напруги $U_{\text{вих}}$, тобто здійснюється стабілізація.

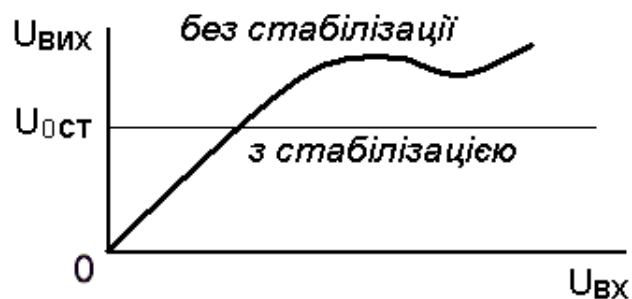


Рисунок 2.14 - Амплітудна характеристика ідеального параметричного стабілізатора

Зіставляючи цю характеристику з амплітудною характеристикою (рис. 2.15), переконуємось у тому, що стабілізатором може бути односторонній обмежувач зверху.

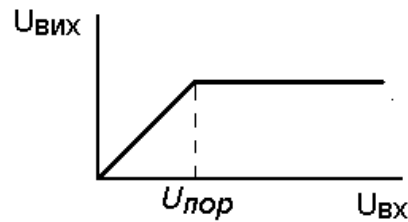


Рисунок 2.15 - Амплітудна характеристика ідеального амплітудного обмежувача зверху

Принципова схема параметричного стабілізатора, яка наведена на рисунку 2.16, є подільником входної напруги $U_{вх}$ з обмежувальним резистором $R_{обм}$ у верхньому плечі та стабілітроном VD у нижньому.

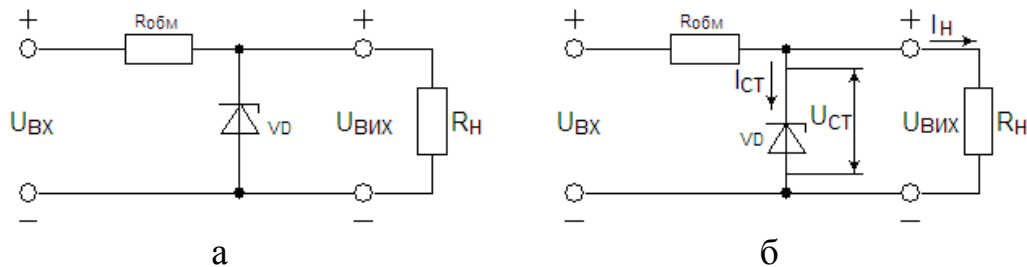


Рисунок 2.16 - Стабілізатор напруги: а - схема, б - параметри режиму

Стабілізація досягається тим, що надлишок входної напруги ($U_{вх} - U_{ст}$) гаситься на обмежувальному резисторі $R_{обм}$.

Оскільки стабілізатор є подільником, то при $I_{н} \ll I_{ст}$, тобто при великому опорі навантаження $R_{н}$, входна напруга розподіляється між його плечима за законом Кірхгофа і тому вихідна напруга становить

$$U_{вих} = U_{вх} - I_{ст} R_{обм} . \quad (2.12)$$

З (2.12) випливає, що єдиною можливістю стабілізувати вихідну напругу ($U_{вих} = \text{const}$) є збільшення струму $I_{ст}$ при підвищенні входної напруги $U_{вх} > U_{0ст}$. Тоді ідеальна ВАХ VD повинна мати вигляд (рис. 2.17), а саме: до якоїсь певної напруги на стабілітроні ($U_{ст} < U_{0ст}$) струм стабілітрона $I_{ст}$ відсутній. Тому, як слід з (2.12), $U_{вих} = U_{вх}$, тобто стабілізації немає.

Коли ж напруга на стабілітроні перевищить напругу стабілізації ($U_{ст} > U_{0ст}$), то з'являється струм стабілітрона $I_{ст}$, який викликає падіння надлишкової напруги $I_{ст}R_{обм}$ на резисторі $R_{обм}$, через що вихідна напруга $U_{вих}$ залишається незмінною.

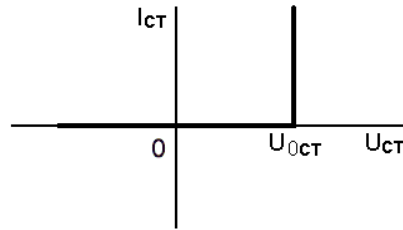


Рисунок 2.17 – ВАХ ідеального елемента стабілізації

2.7 Принцип дії та розрахунок стабілізатора

Для пояснення принципу дії стабілізатора знайдемо рівняння лінії навантаження. За законом Кірхгофа вхідна напруга $U_{вх}$ розподіляється між стабілітроном VD та $R_{обм}$ (рис. 2.16):

$$U_{вх} = U_{ст} + I_{ст} R_{обм} \quad (2.13)$$

$$I_{ст} = \frac{U_{вх}}{R_{обм}} - \frac{U_{ст}}{R_{обм}}, \quad (2.14)$$

де $U_{ст}$ - зворотна напруга на стабілітроні, яка і є вихідною.

Формула (2.14) є рівнянням лінії навантаження. Оскільки відносно $U_{ст}$ вираз (2.14) першого ступеню, то лінією навантаження є пряма, яка при вхідній напрузі $U_{вх} = U_{вх1}$ будується по двох точках 1 і 2 (рис. 2.18).

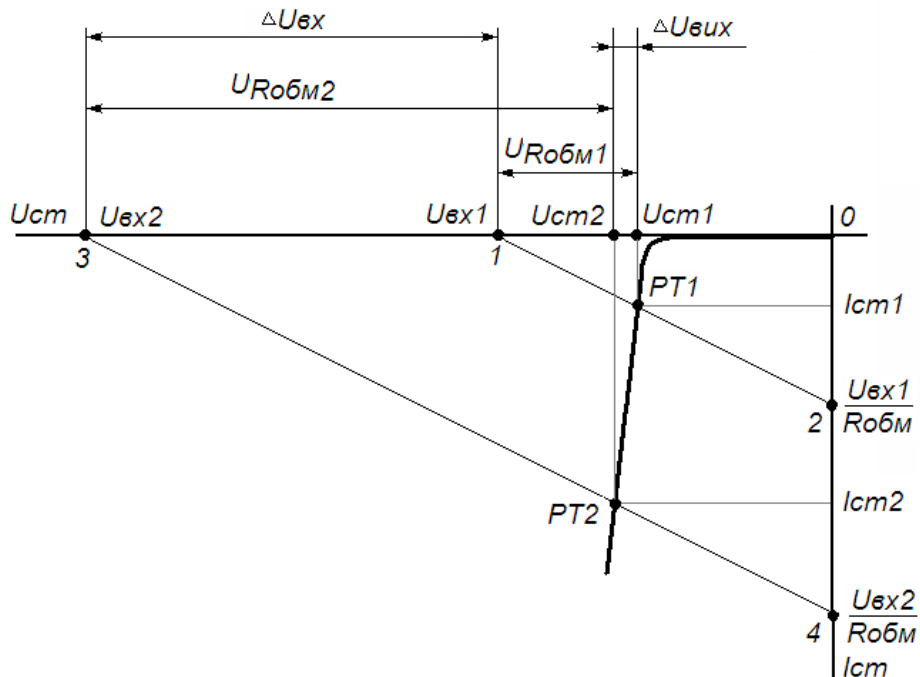


Рисунок 2.18 – Діаграма роботи стабілізатора

Точка 1: $I_{ст} = 0$ і тоді $U_{ст} = U_{вх1}$.

Точка 2: $U_{ст} = 0$ і тоді $I_{ст} = \frac{U_{вх1}}{R_{обм}}$.

Стабілізатор працює наступним чином.

Знайдемо зміну вихідної напруги при зміні вхідної. Нехай вхідна напруга зросла від $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$. Тоді лінія навантаження зміститься паралельно сама відносно себе (точки 3; 4). З рисунку 2.18 видно, що зміна вихідної напруги $\Delta U_{вих}$ набагато менша за зміну вхідної ($\Delta U_{вих} \ll \Delta U_{вх}$), тобто вихідна напруга є стабільною. Наявність стабілізації пояснюється наступним чином.

Вихідна напруга за законом Кірхгофа становить

$$U_{вих} = U_{вх} - I_{ст} R_{обм} \quad (2.15)$$

При малій вхідній напрузі $U_{вх} \frac{R_{н}}{R_{обм} + R_{н}} < U_{проб}$ стабілітрон VD не пробитий і тому його коло фактично розірване ($I_{ст} = 0$). Через це, як видно з (2.15), вихідна напруга повторює вхідну ($U_{вх} = U_{ст}$), тобто стабілізації немає.

Коли ж вхідна напруга велика $U_{вх} \frac{R_{н}}{R_{обм} + R_{н}} > U_{проб}$ то стабілітрон VD не пробивається. Виникає струм $I_{ст} > 0$:

$$I_{ст} = \frac{U_{вх} - U_{ст}}{R_{обм}} \quad (2.16)$$

створюючи падіння напруги $I_{ст} R_{обм}$ на обмежувальному резисторі $R_{обм}$. Чим вище вхідна напруга, тим більший струм $I_{ст}$ і, як наслідок, більше падіння напруги $I_{ст} R_{обм}$. Так надлишок вхідної напруги ($U_{вх} - U_{ст}$) падає на $R_{обм}$, залишаючи вихідну напругу $U_{вих}$ незмінною, тобто стабільною.

Ефективність дії стабілізатора оцінюється коефіцієнтом стабілізації, яким є відношення відносних змін вхідної та вихідної напруг:

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}}}{\frac{\Delta U_{вих}}{U_{вих}}} \quad (2.17)$$

Завжди $K_{ст} > 1$ і чим більше, тим стабільніше вихідна напруга. Стабілізація є при зміні не тільки $U_{вх}$, а й опору навантаження R_H . Дійсно, коли б не було стабілітрона, то вихідна напруга

$$U_{вих} = U_{вх} \frac{R_H}{R_{обм} + R_H} \quad (2.18)$$

при зменшенні R_H також зменшилася б.

За наявності ж стабілітрона зменшення R_H дещо знизить $U_{вих}$ (рис. 2.16), що спричинить різке зменшення струму стабілітрона $I_{ст}$. Через це зменшується падіння напруги $I_{ст}R_{обм}$ на обмежувальному резисторі і тому вихідна напруга (2.12) залишиться мало зниженою, тобто стабільною.

Стабілізатор напруги, схема якого наведена на рисунку 2.16, забезпечує стабілізацію, тобто певну сталість вихідної напруги $U_{вих}$.

Стабілітрони випускаються промисловістю на різні стандартні напруги. Оскільки вихідна напруга завжди дорівнює напрузі стабілізації стабілітрона, то для одержання іншої напруги $U_{вих}$ слід вибрати стабілітрон з іншою певною напругою стабілізації $U_{ст}$. Наприклад, стабілітрон КС191А з напругою стабілізації 9,1 В замінити стабілітроном КС156А з напругою стабілізації 5,6 В.

Для збільшення вихідної напруги можна використовувати послідовне з'єднання стабілітронів VD1 та VD2 (рис. 2.19 а) або стабілітрона VD3 і діода VD4 (рис. 2.19 б).

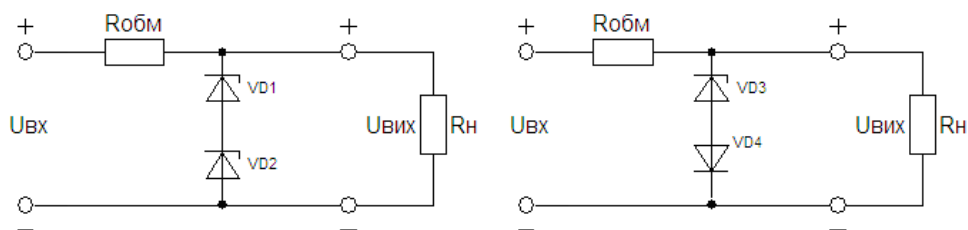


Рисунок 2.19 – Стабілізатор з підвищеною вихідною напругою: а – на стабілітронах; б – на стабілітроні і діоді

В схемі (рис. 2.19 а) вихідна напруга дорівнює сумі напруг стабілізації обох стабілітронів, а в схемі (рис. 2.19 б) - сумі напруги стабілізації стабілі-

трона VD3 та прямої напруги діода VD4. Для подальшого підвищення вихідної напруги слід збільшити кількість послідовно з'єднаних стабілітронів або стабілітронів і діодів.

Стабілізація здійснюється не за будь-якого опору навантаження R_H . Якщо опір R_H дуже малий, то подільник напруги з $R_{обм}$ та R_H зменшить вихідну напругу до того, що вона буде нижче напруги пробію ($U_{вих} < U_{проб}$), через що пробій стабілітрона стане неможливим.

Мінімальний опір навантаження R_{min} можна визначити з наступного співвідношення

$$U_{вх} \frac{R_{нmin}}{R_{обм} + R_{нmin}} \geq U_{ст.ном}, \quad (2.19)$$

де $U_{ст.ном} = \frac{U_{ст.маx} + U_{ст.мін}}{2}$ - номінальна напруга стабілізації.

Приймаючи в (2.19) рівність, визначаємо мінімальний опір навантаження, за якого стабілізація ще можлива:

$$R_{нmin} = \frac{U_{ст.ном}}{U_{вх} - U_{ст.ном}} R_{обм}. \quad (2.20)$$

Подальше зменшення опору R_H стабілізацію знищить.

Для зміни полярності вихідної напруги необхідно змінити полярність напруги на вході та переполюсувати включення стабілітрона так, щоб напруга на ньому зберігалася зворотною (рис. 2.20).

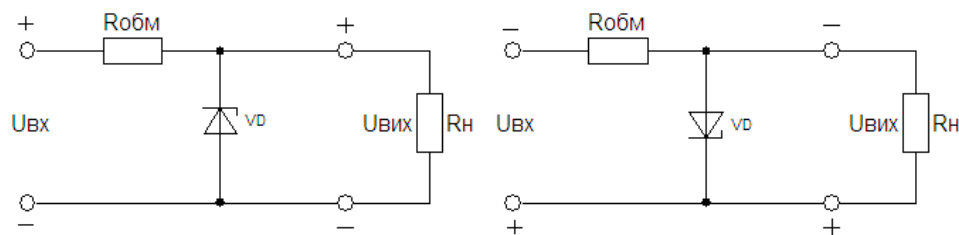


Рисунок 2.20 – Схеми стабілізаторів: а – для напруги позитивної полярності; б – для напруги негативної полярності

Для вихідної напруги будь-якої полярності (неполярних стабілізаторів) можна використати зустрічно-послідовне з'єднання однобічних стабілітронів (рис. 2.21 а) або двобічний стабілітрон (рис. 2.21 б).

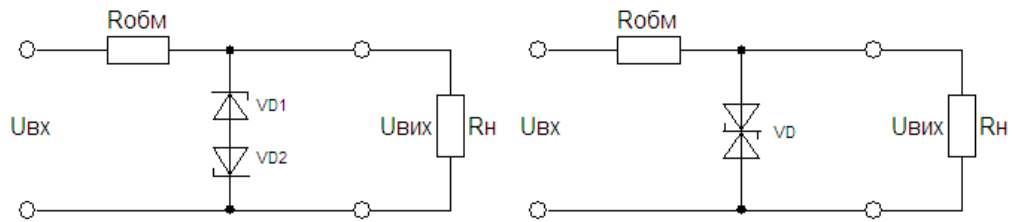


Рисунок 2.21 - Неполарний стабілізатор: а – на однобічних стабілітронах; б – на двобічному стабілітроні

Полярність вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ буде та сама, що й вхідної $U_{\text{вх}}$. За будь-якої полярності вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ один із стабілітронів VD1, VD2 буде під зворотною напругою, а інший - під прямою. Тому вихідна напруга буде складатися зі зворотної напруги одного стабілітрона і прямої напруги іншого стабілітрона:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{ст}} + U_{\text{пр}} \quad (2.22)$$

При створенні стабілізаторів проблемою є стабілізація низьких напруг 1 ... 2 В. На такі напруги стабілітронів немає. Максимальна напруга стабілізації існуючих стабілітронів становить 3,3 В (наприклад, стабілітрон КС133А).

Для стабілізації низьких напруг використовують стабістори. В них для стабілізації використовують пряму ділянку ВАХ р-п переходу. Тому схема стабілізатора на стабісторах та ж сама, що й на стабілітронах лише з тією відмінною, що замість стабілітрона включений стабістор VD під прямою напругою (рис. 2.22).

Оскільки напруга стабілізації стабістора не перевищує 0,7 В, то для стабілізації напруг більших за 0,7 В слід використовувати послідовне з'єднання кількох стабісторів.

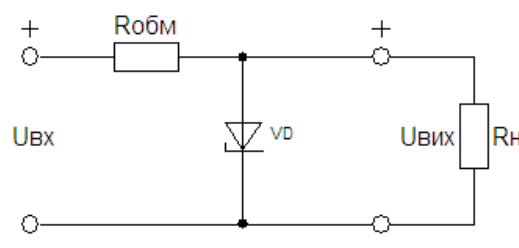


Рисунок 2.22 - Схема стабілізатора на стабісторі

Розрахунок стабілізатора зводиться до визначення опору обмежувального резистора $R_{обм}$. З (2.12) знаходимо

$$R_{обм} = \frac{U_{вх} - U_{вих}}{I_{ст}} \quad (2.23)$$