

## РОЗДІЛ 6 МЕТОДИ АНАЛІЗУ СТАНУ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

### 6.1 Загальні відомості і класифікація нелінійних елементів

Раніше розглядалися лінійні кола, що містили тільки лінійні елементи, для яких залежність між напругами, струмами, зарядами, магнітними потоками (потокозчепленнями) виражають лінійними функціями, що виглядають так:

$$u = R \cdot i, \quad \psi = L \cdot i, \quad q = C \cdot u. \quad (6.1)$$

Нелінійні електричні (далі – НЕ) кола містять принаймні один нелінійний елемент (далі – *НЕ*), який не може бути описаний за допомогою постійних коефіцієнтів.

У цьому разі залежність (6.1) має вигляд:

$$u = f\left(i, \frac{di}{dt}\right), \quad \psi = f\left(i, \frac{di}{dt}\right), \quad q = f\left(u, \frac{du}{dt}\right), \quad (6.2)$$

тобто загалом спостерігається залежність не тільки від змінної, але й від швидкості її зміни. Якщо ж ми розглядаємо кола постійного струму, то залежності (6.2) – це нелінійна вольт-амперна характеристика (далі – ВАХ)  $u = f(i)$ , вебер-амперна характеристика  $\psi = f(i)$  і кулон-вольтна характеристика  $q = f(u)$ .

Нелінійні елементи поділяють на нелінійні опори, нелінійні індуктивності та ємності. При постійних струмах як нелінійні можуть розглядатися тільки кола з резистивними елементами, ВАХ яких не є прямою.

Поділяються нелінійні елементи на дві групи.

1. Некеровані *НЕ* (лампа розжарювання, електрична дуга, нелінійні напівпровідникові опори, баретер, тиритові та вілітові опори). Вони мають одну симетричну ВАХ (ВАХ лампи розжарювання на рисунку 6.1) або несиметричну ВАХ (ВАХ діоду на рисунку 6.2).

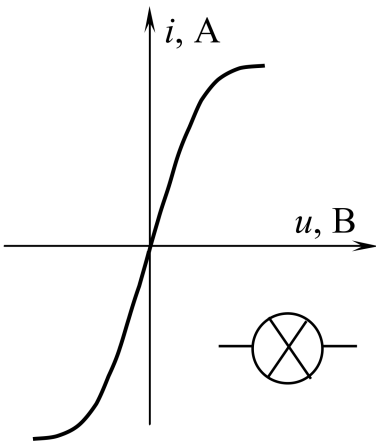


Рисунок 6.1 – ВАХ ЛН

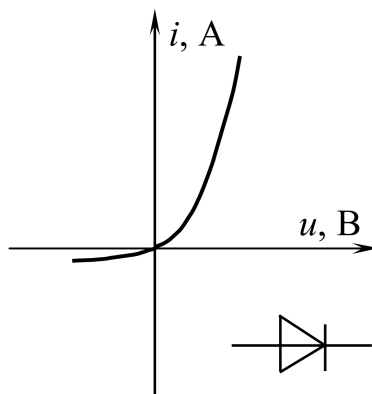


Рисунок 6.2 – ВАХ діоду

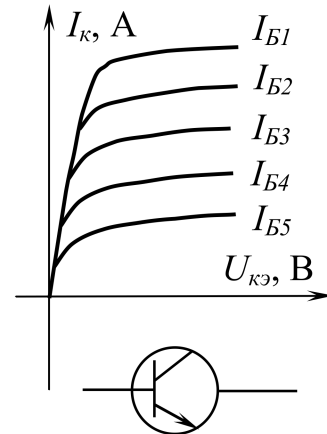
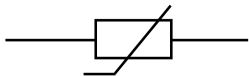


Рисунок 6.3 – ВАХ керованого *НЕ*

2. Керовані *HE* (транзистори, тиристори) мають декілька ВАХ (сім'я ВАХ), тобто окрім основного кола, також є керуюче коло, напруга або струм якого є керуючими для ВАХ основного кола (див. рис. 6.3 – вихідні статичні ВАХ біполярного транзистора для схеми із спільним емітером).

Узагальнене позначення нелінійного елемента на схемах – 

## 6.2 Загальна характеристика методів розрахунку нелінійних електричних кіл постійного струму

З методів, які розглядалися раніше, для розрахунку нелінійних кіл постійного струму застосовують:

- метод двох вузлів;
- заміну декількох паралельно з'єднаних віток однією еквівалентною;
- метод еквівалентного генератора.

Для проведення розрахунку, зазвичай, графічного, повинні бути відомі ВАХ нелінійних елементів, що входять у схему.

### 6.3 Послідовне з'єднання нелінійних елементів

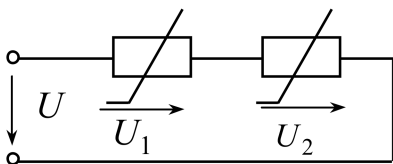


Рисунок 6.4 – Послідовне з'єднання *HE*

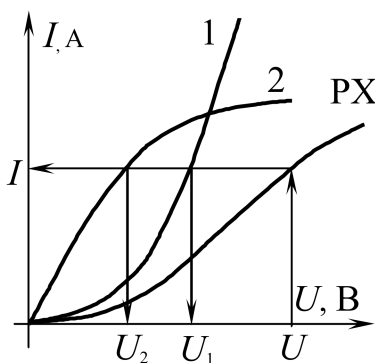


Рисунок 6.5 – Результуюча ВАХ (PX)

Розрахунок (схема на рисунку 6.4) базується на другому законі Кірхгофа:  $U = U_1 + U_2$ . Один із параметрів, а саме напруга на вході кола  $U$  або струм  $I$ , повинен бути заданим для визначення струму  $I$  (або напруги  $U$ ), а також напруг на елементах  $U_1$  і  $U_2$ . Оскільки з'єднання послідовне, то загальним параметром є струм. Довільно задаємося різними значеннями струму і додаємо напруги на нелінійних елементах при кожному певному значенні струму, тобто будуюмо результуючу ВАХ (PX) – (рис. 6.5).

Розглянемо окремий випадок, коли послідовно з'єднані активний опір і нелінійний елемент. Тоді немає необхідності будувати результуючу характеристику, отже,  $I = f(U_{HC} + I \cdot R)$ .

У цьому разі розглядають рівняння в режимі холостого ходу ( $I = 0, U_{HЭ} = E$ ) і в режимі короткого замикання ( $U_{HЭ} = 0, I = \frac{E}{R}$ ). Потім будують пряму, що сполучає ці точки та перетинає ВАХ нелінійного елемента – рисунок 6.6, а ( $n$  – точка, визначає значення струму  $I$ ).

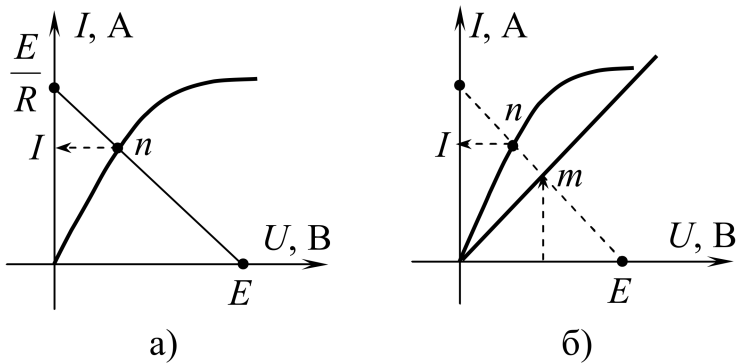


Рисунок 6.6 – Окремі випадки графічного розрахунку послідовного з'єднання

Можна застосувати також такий спосіб (рис. 6.6, б):

- побудувати ВАХ лінійного елемента за двома точками;
- відкласти за осями напруг значення  $EPC$   $E$ ;
- із середини величини  $E$  відновити перпендикуляр до його перетину з ВАХ лінійного елемента (точка  $m$ );

- провести допоміжну пряму через точки  $E$  і  $m$ , яка перетне ВАХ нелінійного елемента ( $n$  – шукана точка, що визначає значення струму  $I$ ).

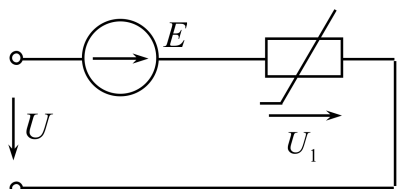


Рис. 6.7 – Послідовне з'єднання  $EPC$  та  $HE$

Якщо з  $HE$  послідовно включено джерело постійної  $EPC$  (рис. 6.7), то для отримання характеристики  $I = f(U)$  необхідно змістити ВАХ нелінійного елемента  $I = f(U_1)$  на величину  $E$  вліво при вказаному на рисунку 6.7 напрямі  $EPC$  (рис. 6.8).

Отже, здійснюємо перехід до схеми на рисунку 6.9 у такий спосіб:

$$U_1 - U = E \Rightarrow U = U_1 - E. \quad (6.3)$$

#### 6.4 Паралельне з'єднання нелінійних елементів

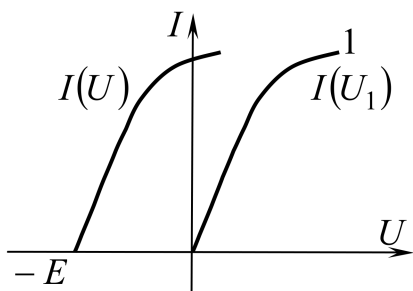
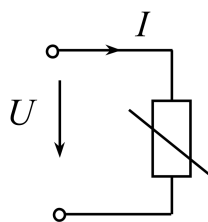


Рисунок 6.8 – Зміщення ВАХ

Рисунок 6.9 – Еквівалентна схема



При паралельному з'єднанні елементів (рис. 6.10) загальним параметром є напруга. Тому результуючу ВАХ ( $U = f(I_1 + I_2)$ ) будують за першим законом Кірхгофа, а саме  $I = I_1 + I_2$  – рисунок 6.11. Якщо була задана напруга  $U$ , а струми в паралельних вітках невідомі, то за напругою на вході кола  $U$  за ВАХ нелінійних елементів визначають струми  $I_1, I_2$ , а потім за першим законом Кірхгофа – загальний струм  $I = I_1 + I_2$ .

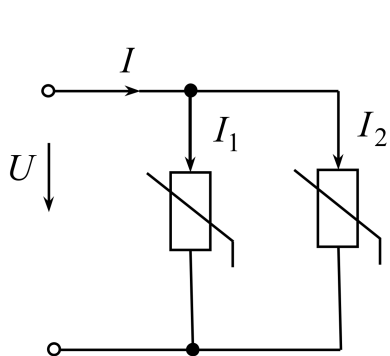


Рисунок 6.10 – Паралельне з'єднання HE

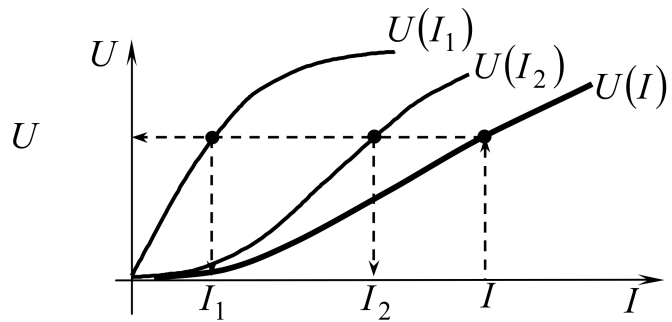


Рисунок 6.11 – Результуюча ВАХ  $U(I)$

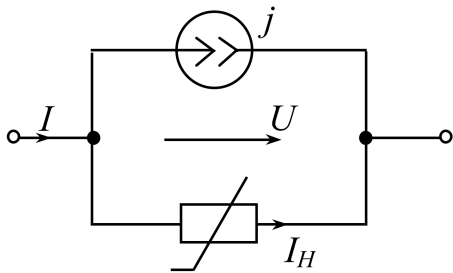


Рисунок 6.12 – Паралельне з'єднання HE та джерела  $j$

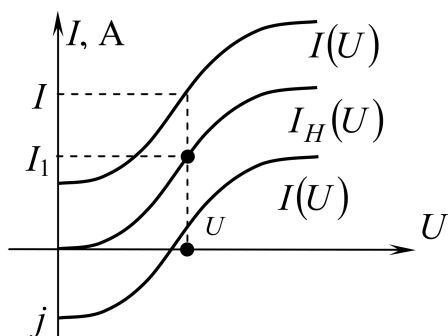


Рисунок 6.13 – Результуюча ВАХ  $I(U)$

Розглянемо окремий випадок – паралельно з нелінійним елементом включено джерело постійного струму  $j$ . У цьому випадку ВАХ ділянки кола, яке містить нелінійний елемент і джерело струму, знаходять зсувом характеристики нелінійного елемента  $I_H(U)$  на величину струму джерела  $j$  у бік додатних (для схеми на рисунку 6.12) або від'ємних значень струму залежно від полярності джерела струму  $j$  – дивись графіки на рисунку 6.13:

$$I = I_H + j, \quad (6.4)$$

$$I = I_H - j. \quad (6.5)$$

### 6.5 Змішане (послідовно-паралельне) з'єднання нелінійних елементів

Для схеми на рисунку 6.14, а після заміни двох паралельно з'єднаних нелінійних елементів «2» і «3» одним еквівалентним нелінійним опором «2 – 3» одержуємо послідовне з'єднання елементів «1» і «2 – 3» (схема на рисунку 6.14, б). При цьому повинна бути побудована результуюча ВАХ умовного HE «2 – 3».

Подальший розрахунок схеми на рисунку 6.14, б, якщо задана напруга  $U$ , проводимо так:

– будуємо результуючу ВАХ послідовно з'єднаних елементів «1» і «2 – 3» (тобто отримуємо схему рисунка 6.14, в);

– визначаємо струм  $I_1$ , а також напругу  $U_1$  на першому HE і напругу на паралельних вітках  $U_{23}$ ;

– за напругою  $U_{23}$  і заданим ВАХ елементів «2» і «3» визначаємо струми в паралельних вітках  $I_2$  і  $I_3$ ;

– за першим законом Кірхгофа визначаємо струм  $I = I_1 + I_2$ .

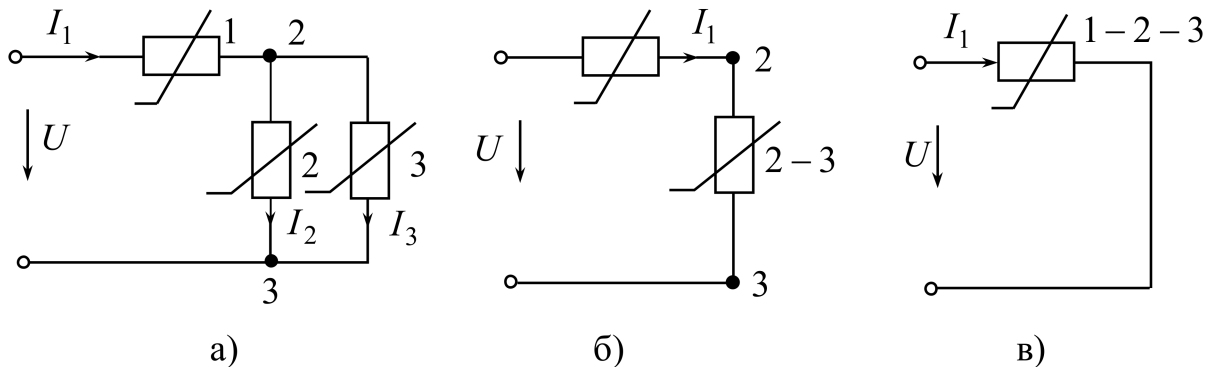


Рисунок 6.14 – Графічний розрахунок змішаного НЕ

### 6.6 Розрахунок нелінійного кола з двома вузлами

Для схеми на рисунку 6.15 задані значення  $E_1, E_2, E_3$  і ВАХ усіх НЕ.

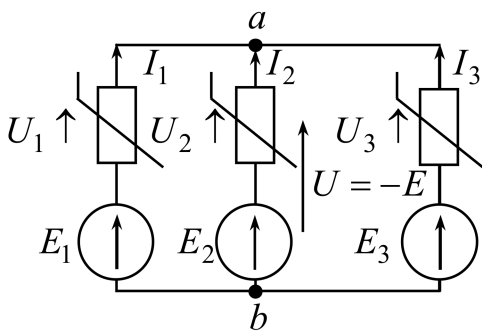


Рисунок 6.15 – Схема з двома вузлами

Потрібно визначити  $I_1, I_2, I_3$ .

Існує два способи вирішення:

- 1) графічний;
- 2) чисельний.

*Графічний* складається з декількох етапів та потребує значної точності виконання побудов.

*Чисельний* метод дає можливість вирішити задачу при побудові тільки одного графіка, а саме графіка залежності  $U_{ab} = f(\sum I)$ .

Розглянемо порядок розрахунку.

1. Довільно задаємося значеннями напруги  $U_{ab} = E^I; E^{II}; \dots$

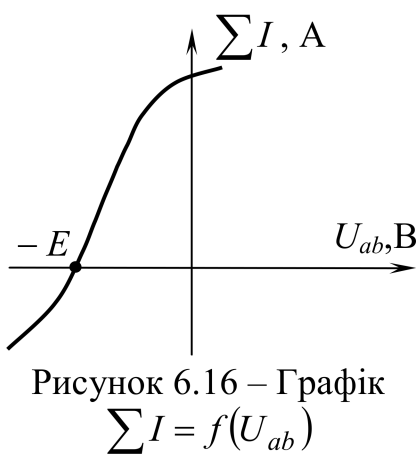


Рисунок 6.16 – Графік  $\sum I = f(U_{ab})$

2. Знаходимо значення напруг  $U_1, U_2, U_3$  на НЕ при певному довільному значенні  $U_{ab}$  за формулами

$$U_1 = E_1 - E^I; U_2 = E_2 - E^I; U_3 = E_3 - E^I.$$

3. Визначаємо значення струмів  $I_1 \div I_3$  за ВАХ НЕ.

4. Будуємо графік залежності  $\sum I = f(U_{ab})$ .

Шукане (дійсне) значення для схеми на рисунку 6.15 значення  $U_{ab} = E$  відповідає точці  $\sum I = 0$ .

5. Визначаємо напруги на нелінійних елементах початкової схеми  $U_1, U_2, U_3$  за формулами

$$U_1 = E_1 - U_{ab}, U_2 = E_2 - U_{ab}, U_3 = E_3 - U_{ab}.$$

6. За ВАХ кожного нелінійного елемента визначаємо струми  $I_1, I_2, I_3$ .

Розрахунок, який зручно вести за допомогою таблиці, проводимо до тих пір, доки величина суми струмів  $\sum I$  не змінить знак.

Таблиця 6.1 – Зведена таблиця розрахунку чисельним методом

$U_{ab} = E$	$U_1 = E_1 - E$	$I_1$	$U_2 = E_2 - E$	$I_2$	$U_3 = E_3 - E$	$I_3$	$\sum I$
$U_{ab} = E'$							
$U_{ab} = E''$							
...							

### 6.7 Розрахунок нелінійних кіл методом еквівалентного генератора

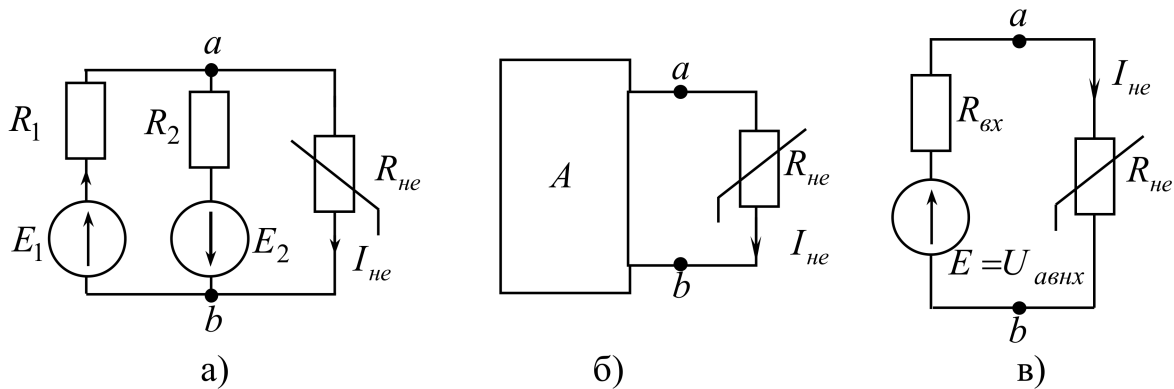


Рисунок 6.17 – Розрахунок методом еквівалентного генератора

Якщо в складному електричному колі (рис. 6.17, а) є тільки одна вітка, що містить  $HE$  (його ВАХ відома), то визначення струму в ній зручно виконувати методом еквівалентного генератора. З цією метою виділяємо вітку з  $HE$ , а всю решту частину схеми розглядаємо як активний двополюсник (рис. 6.17, б). Для еквівалентної схеми рисунку 6.17, в знаходимо так звану напругу неробочого ходу:  $U_{нх} = E_1 - I_{нх} \cdot R_1$ , (6.7)

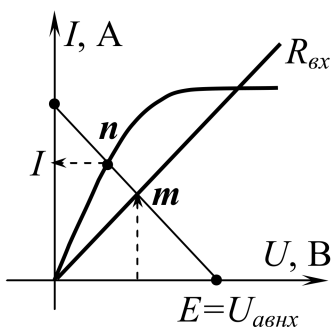


Рисунок 6.18 –  
Графічне визначення  $I$

де  $I_{нх} = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2}$  – струм неробочого ходу, якщо в схемі рисунку 6.17, а вилучити  $R_{не}$ .

Також знаходимо так званий вхідний опір  $R_{вх} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$  (на схемі рисунку 6.17, а вилучаємо  $R_{не}$  та закорочуємо всі  $EPC$ ).

За значенням опору  $R_{вх}$  будуємо його лінійну характеристику, а струм  $HE$  визначаємо графічним способом (рис. 6.18).

## 6.8 Статичний і диференційний опори

Властивості  $HE$  можуть бути описані за допомогою його ВАХ, а також статичними і диференційними опорами.

Статичний опір ( $R_{cm}$ ) характеризує поведінку  $HE$  в режимі постійного струму. При переході від однієї точки ВАХ до іншої величина  $R_{cm}$  змінюється.

Під *статичним* опором нелінійного елемента розуміють відношення напруги на нелінійному елементі до струму в ньому в будь-якій точці ВАХ цього елемента (рис. 6.20):

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (6.8)$$

де  $m_R = \frac{m_U}{m_i}$  – масштаб за опором.  $\beta_1$

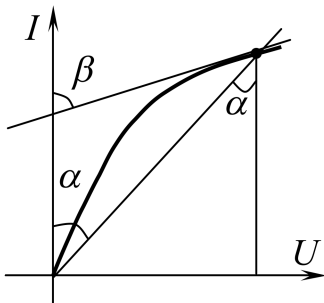


Рисунок 6.25 –  
Визначення  $R_{cm}$  та  $R_D$

Під диференційним опором ( $R_D$ ) розуміють величину  $R_D = \frac{dU}{dI}$ , (6.9)

яка характеризує нелінійний елемент при малих відхиленнях від певної точки нелінійної характеристики (рис. 6.25).

$$\text{З рисунку 6.25 видно, що } R_D = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (6.10)$$

Отже, величина  $R_D$  пропорційна тангенсу кута, який утворений дотичною до ВАХ у певній точці й віссю струму  $I$ .

При послідовному з'єднанні декількох  $HE$  диференційний опір результуючої характеристики при будь-якому струмі дорівнює сумі диференційних опорів  $HE$  при цьому самому струмі.

## 6.9 Заміна нелінійного елемента лінійним опором і ЕРС

Припустимо, діапазон роботи за напругою  $HE$  в колі на рисунку 6.26, а не виходить за межі такої ділянки його ВАХ, яка з певною мірою наближення може бути замінена прямою лінією (рис. 6.26, б). Будучи продовженою, ця пряма перетинає вісь абсцис у точці  $E_1$  або в точці  $E_2$ . Тоді  $HE$  може бути замінений джерелом постійної ЕРС і лінійним опором  $R_{D1} = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta_1$  (або  $R_{D2} = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta_2$ ), що дорівнює диференційному опору  $HE$  на прямолінійній ділянці. Після заміни коло (рис. 6.26, в або рис. 6.26, г) розглядають як лінійне.

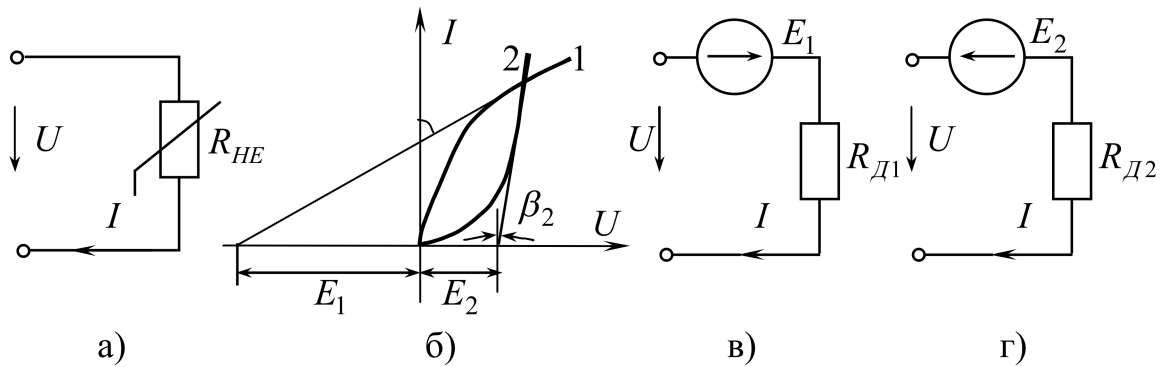


Рисунок 6.26 – Еквівалентна заміна  $HE$  лінійним елементом та  $EPC$

### 6.10 Практичне застосування нелінійних елементів постійного струму

Нелінійні елементи у низці випадків додають електричним колам властивості принципово недосяжні в лінійних колах, такі, наприклад, як стабілізація струму, стабілізація напруги, посилення постійного струму та інші.

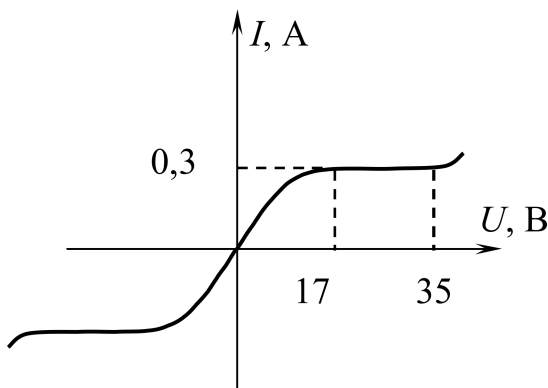


Рисунок 6.27 – ВАХ баретера 0,3\_Б\_17-35

виконаною зі сталевого дроту. Дріт знаходиться у скляній колбі, яка заповнена воднем при тиску 80 мм. рт. ст.

ВАХ баретера зображена на рисунку 6.27 і в певному діапазоні зміни напруги майже горизонтальна. Баретер застосовували для стабілізації струму розжарювання електронних ламп при зміні напруги живлення.

Приклад маркіровки цього пристрою – 0,3 Б 17-35:

0,3 – струм (А), який баретер здатний підтримувати постійним;

17-35 – ділянка зміни напруги (В) на ділянці баретування.

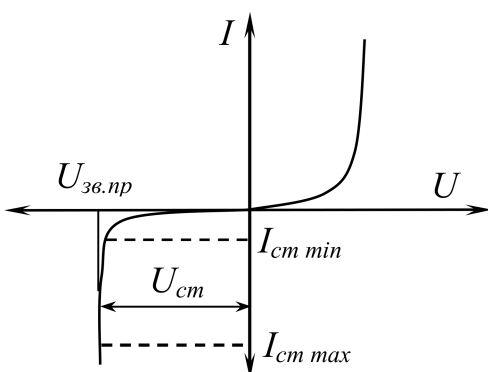


Рисунок 6.28 – ВАХ стабілітрону

2. Стабілізатор напруги (стабілітрон) – пристрій, напруга на виході якого підтримується постійною при зміні опору навантаження  $R_H$  або величини напруги на вході пристрою.

Коли зворотна напруга  $U_{зв}$  (ВАХ пристрою зображена на рисунку 6.28) на стабілітроні досягає величини напруги пробую  $U_{зв.пр}$ .



у пристрої відбувається лавинний пробій електронно-діркового р-п переходу. При цьому зворотний струм різко зростає при майже незмінній зворотній напрузі. Зворотний струм не повинен перевищувати струм  $I_{cm\max}$ , щоб стан електричного пробою не приводив до виходу з ладу пристрою.

Параметри стабілітрона:

–  $U_{cm}$  – напруга стабілізації;

–  $I_{cm\min}$  – мінімальний струм, за якого пристрій гарантовано знаходиться в режимі стабілізації;

–  $I_{cm\max}$  – максимально допустимий струм через прилад.

3. Підсилювач постійного струму – пристрій, величина приросту напруги на виході якого значно більше величини приросту напруги на вході. До складу підсилювача входять так звані активні (нелінійні) елементи – біполярні і польові транзистори.

### 6.11 Нелінійні електричні кола змінного струму.

Властивості нелінійних елементів при змінному струмі:

– при переході від однієї ділянки ВАХ до іншої статистичні й диференційні опори не залишаються постійними та загалом не дорівнюють один одному, але можуть співпадати в окремих точках і на окремих ділянках ВАХ;

– нелінійний елемент може мати несиметричну ВАХ, отже, опір нелінійного елемента залежить від знака прикладеної напруги (тобто нелінійний елемент має вентильні властивості);

Нелінійні елементи бувають інерційними та безінерційними.

Якщо залежність між миттєвими значеннями напруги і струму лінійна, а залежність між діючими струмом і напругою нелінійна, то це *інерційний* нелінійний елемент (лампа розжарювання, баретер, напівпровідникові термоопори). Теплові процеси, як відомо, інерційні, тому залежність  $i(u)$  лінійна, а нелінійність характеристик  $I(U)$  деяких нелінійних опорів обумовлена зміною їх опору

внаслідок нагрівання їх струмом (рис. 6.29).

У разі, коли обидві залежності  $i(u)$  і  $I(U)$  нелінійні – то це безінерційний елемент. *Безінерційний* НЕ має

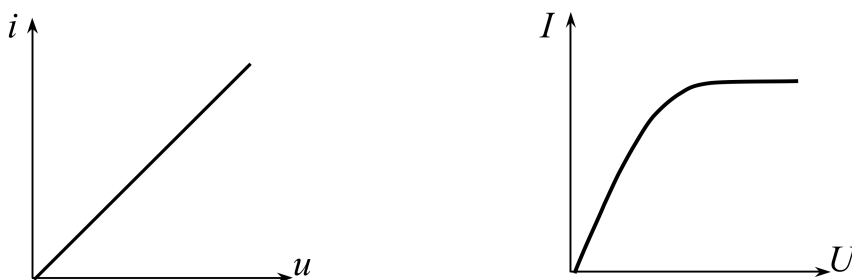


Рисунок 6.29 – ВАХ інерційних НЕ

здатність перетворювати спектр коливань, що впливають на нього. Тобто, якщо до

НЕ підвести синусоїдну напругу, то струм через нього буде несинусоїдний, і навпаки – при проходженні через НЕ синусоїдного струму напруга на ньому буде несинусоїдною.

### 6.12 Апроксимація нелінійних характеристик

Апроксимація, як відомо, це заміна заданої нелінійної характеристики аналітичною функцією, яка з певною точністю виражає задану залежність. Ця процедура дає змогу досліджувати процеси у нелінійному елементі аналітично. Оскільки нелінійні елементи не є абсолютно стабільними та залежать від різних зовнішніх чинників, то на практиці не прагнуть до особливо точної апроксимації характеристик.

Розглянемо три способи апроксимації:

1. Апроксимація ступеневим поліномом.

Якщо функція  $i(u)$  безперервна і має похідні  $i'(u_0)$ ,  $i''(u_0)$  тощо, де  $u_0$  – значення функції  $u(t)$  при  $t = 0$ , то вона може бути подана рядом Тейлора:

$$i(u) = i(u_0) + \frac{u-u_0}{1!} \cdot i'(u_0) + \frac{(u-u_0)^2}{2!} \cdot i''(u_0) + \frac{(u-u_0)^3}{3!} \cdot i'''(u_0) + \dots = a_0 + a_1 \cdot (u-u_0) + \quad (6.11)$$

$$+ a_2 \cdot (u-u_0)^2 + a_3 \cdot (u-u_0)^3 + \dots, \text{ де } a_0 = i(u_0); a_1 = \frac{i'(u_0)}{1!}, a_2 = \frac{i''(u_0)}{2!} \text{ і т.д.}$$

Якщо  $u_0 = 0$ , то функція  $i(u)$  відповідає ряду Маклорена:

$$i(u) = a_0 + a_1 \cdot u + a_2 \cdot u^2 + a_3 \cdot u^3 + a_4 \cdot u^4 + \dots \quad (6.12)$$

Розглянемо приклад.

На вхід кола, що містить тільки один нелінійний елемент, подана синусоїдна напруга  $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$ . ВАХ нелінійного елемента задана у вигляді

аналітичної функції:  $i = \left(1 + \frac{u}{a}\right)^{3/2}$ .

Потрібно знайти закон зміни струму в колі.

Оскільки  $u_0 = 0$ , скористаємося рядом Маклорена:

$$i(u) = \left[ i(0) + i'(0) \cdot u + \frac{i''(0)}{2!} \cdot u^2 + \frac{i'''(0)}{3!} \cdot u^3 + \dots \right]. \text{ Обмежимося трьома членами ряду.}$$

$$i(0) = 1; \quad i'(u) = \frac{3}{2} \cdot \left(1 + \frac{u}{a}\right)^{1/2} \cdot \frac{1}{a}; \quad i'(0) = \frac{3}{2 \cdot a}; \quad i''(u) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{a} \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(1 + \frac{u}{a}\right)^{-1/2} \cdot \frac{1}{a};$$

$$i''(0) = \frac{3}{4 \cdot a^2}. \text{ Отже,}$$

$$i(u) = 1 + \frac{3}{2 \cdot a} \cdot u + \frac{3}{4 \cdot a^2 \cdot 2!} \cdot u^2 = 1 + \overbrace{\frac{3}{2 \cdot a} \cdot U_m}^{I_m^{(1)}} \cdot \sin \omega \cdot t + \frac{3}{8 \cdot a^2} \cdot U_m^2 \cdot \sin^2 \omega t.$$

Скористаємося тригонометричним співвідношенням  $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega t)$

і отримаємо:

$$\begin{aligned} i(t) &= 1 + \overbrace{\frac{3}{2 \cdot a} \cdot U_m}^{I_m^{(1)}} \cdot \sin \omega t + \frac{3}{8 \cdot a^2} \cdot U_m^2 \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) \right) - \dots = 1 + \overbrace{\frac{3}{2 \cdot a} \cdot U_m}^{I_m^{(1)}} \cdot \sin \omega t + \\ &+ \frac{3}{8 \cdot a^2} \cdot U_m^2 \cdot \frac{1}{2} - \overbrace{\frac{3}{8 \cdot a^2} \cdot U_m^2 \cdot \frac{1}{2}}^{I_m^{(2)}} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) - \dots = \overbrace{\left( 1 + \frac{3}{16 \cdot a^2} \cdot U_m^2 \right)}^{I^{(0)}} + \overbrace{\frac{3}{2 \cdot a} \cdot U_m \cdot \sin \omega t}^{i^{(1)}} - \\ &- \overbrace{\frac{3}{16 \cdot a^2} \cdot U_m^2 \cdot \sin \left( 2 \omega t + 90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \right)}^{i^{(2)}} - \dots, \text{ А.} \end{aligned}$$

## 2. Апроксимація графоаналітичним методом трьох ординат.

Цим методом користуються, якщо ВАХ нелінійного елемента задана у вигляді графіка. За допомогою ВАХ нелінійного елемента  $i(u)$  і графіка прикладеної напруги  $u(\omega t)$  будемо графік  $i(\omega t)$ , який є функцією часу (рис. 6.30). Побудований графік  $i(\omega t)$  симетричний щодо осі абсцис, тому при розкладанні такої кривої у ряд Фур'є буде присутня нульова гармоніка і косинусні складові гармонік:  $i(\omega t) = I^{(0)} + I_m^{(1)} \cdot \cos \omega t + I_m^{(2)} \cdot \cos 2 \cdot \omega t + \dots$  (6.13)

Невідомі величини  $I^{(0)}$ ;  $I_m^{(1)}$ ;  $I_m^{(2)}$  знаходять за трьома ординатами характеристики  $i(\omega t)$ , які відповідають фазам прикладеної напруги (див. рис. 6.30).

$$\omega t = 0; \quad \omega t = \pi/2; \quad \omega t = \pi.$$

$$\text{Отже, якщо } \omega t = 0, \text{ то } i_1 = I^{(0)} + I_m^{(1)} + I_m^{(2)}; \quad (6.14)$$

$$\text{якщо } \omega t = \frac{\pi}{2}, \text{ то } i_2 = I^{(0)} - I_m^{(2)}; \quad (6.15)$$

$$\text{якщо } \omega t = \pi, \text{ то } i_3 = I^{(0)} - I_m^{(1)} + I_m^{(2)}; \quad (6.16)$$

де  $i_1$  – ордината точки, що позначена на графіку  $i(\omega t)$  цифрою «1»,

$i_2$  – ордината точки, що позначена на графіку  $i(\omega t)$  цифрою «2»,

$i_3$  – ордината точки, що позначена на графіку  $i(\omega t)$  цифрою «3».

Розв'язуючи спільно рівняння (6.14), (6.15) і (6.16) знаходимо  $I^{(0)}$ ;  $I_m^{(1)}$ ;  $I_m^{(2)}$ :

$$I^{(0)} = \frac{1}{4} \cdot [i_1 + i_3] + \frac{1}{2} \cdot i_2, \quad I_m^{(1)} = \frac{1}{2} \cdot [i_1 - i_3] + \frac{1}{2} \cdot i_2, \quad I_m^{(2)} = \frac{1}{4} \cdot [i_1 + i_3] - \frac{1}{2} \cdot i_2 \quad (6.17)$$

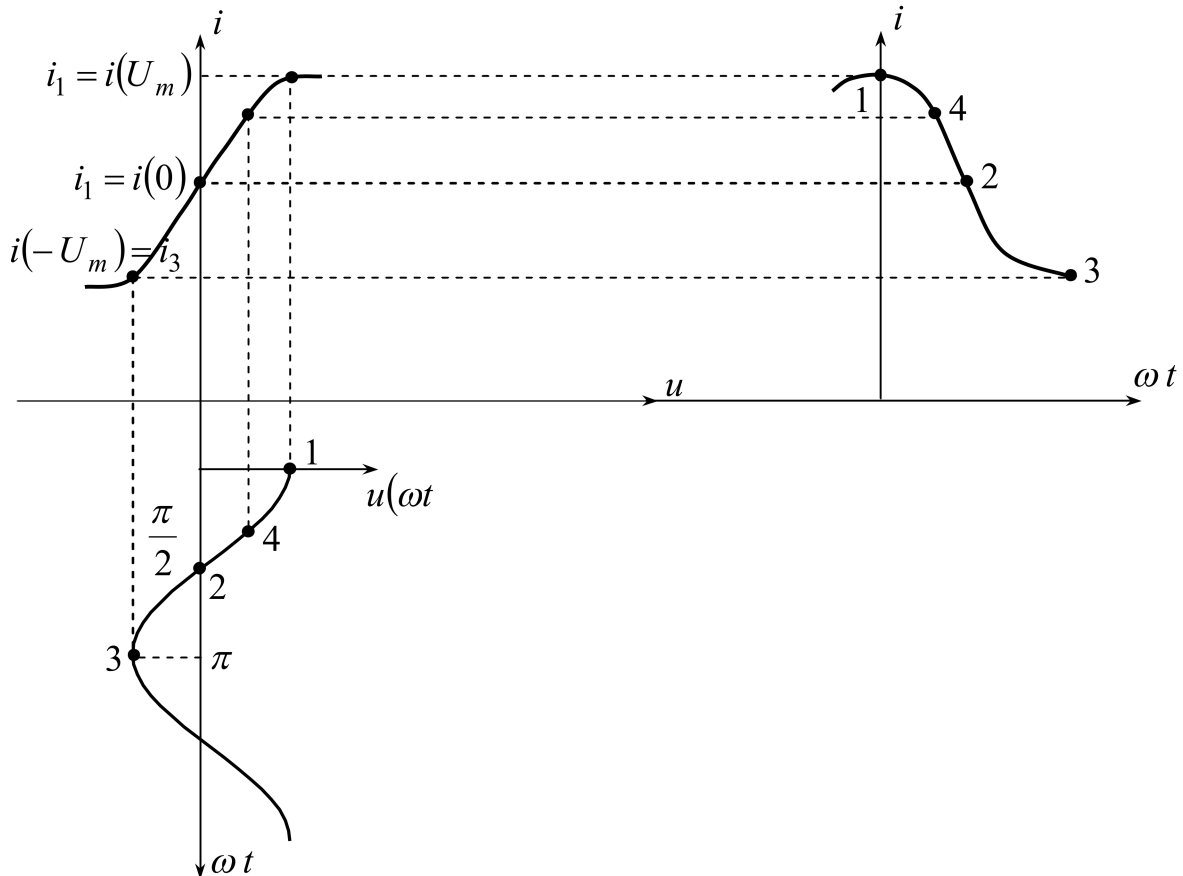


Рисунок 6.30 – Апроксимація графоаналітичним методом трьох ординат

### 3. Кусково-лінійна апроксимація.

Метод полягає у заміні заданої нелінійної характеристики ломаною прямою, яка має одну або декілька точок зламу. Така заміна дає змогу проводити розрахунок аналітично за допомогою лінійних рівнянь.

Якщо нелінійність характеристики незначна та задана ділянка роботи нелінійного опору, то така характеристика може бути замінена прямою без злому, а нелінійний елемент – джерелом постійної ЕРС і лінійним опором, рівним диференційному опору нелінійного елемента.

Розглянемо приклад.

Схему електричного кола показана на рисунку 6.31, ВАХ нелінійного елемента – на рисунку 6.32. Діапазон роботи нелінійного елемента за струмом такий:  $a < i(u) < b$ . До входу кола прикладена синусоїдна напруга  $e(t) = E_m \cdot \sin \omega t$ .

Проведемо заміну нелінійного елемента джерелом постійної ЕРС  $E$  і лінійним опором  $R_D$ , що дорівнює

$$R_D = m_R \cdot \operatorname{tg} \beta;$$

$$m_R = \frac{m_U}{m_I} \quad (\text{рис. 6.32}).$$

Складаємо схему заміщення яка наведена на рисунку 6.33.

За методом накладання визначаємо струми у схемі від дії

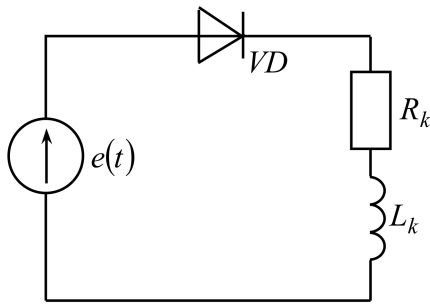


Рисунок 6.31 –  
Схема кола

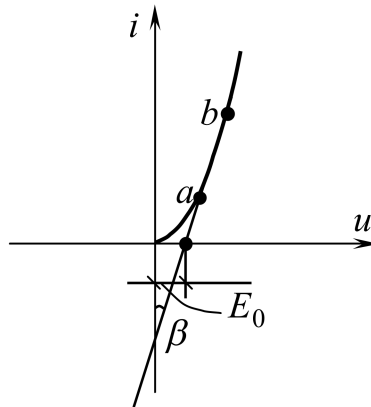


Рисунок 6.32 – ВАХ діоду

кожного джерела ЕРС. Потім підсумовуємо у вигляді функцій струми, знайдені на кожному етапі методу накладання і знаходимо несинусоїдний закон (ряд Фур'є) для струму.

$$\text{Від дії ЕРС } E^{(0)} \text{ струм дорівнює: } I' = I^{(0)} = \frac{E^{(0)}}{R_D + R_k}.$$

Від дії ЕРС  $e(t)$  комплексна амплітуда струму дорівнює:

$$\underline{I}_m^{//} = \frac{E_m}{\sqrt{(R_D + R_k)^2 + X_k^2}} \cdot e^{-j\varphi},$$

де  $\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{X_k}{R_D + R_k} \right)$  – кут зсуву фаз між ЕРС

та струмом  $i^{//}(t)$ ;

$X_k = \omega \cdot L_k$  – реактивний опір котушки;

$R_k, L_k$  – активний опір та індуктивність котушки відповідно.

Потрібно врахувати, що струм  $i^{//}(t)$  відстає від напруги  $e(t)$ , а струм  $I^{(0)}$  не співпадає зі струмом  $i(t)$  за напрямком.

Записуємо ряд Фур'є для струму:

$$i(t) = -I^{(0)} + i^{//}(t) = -\frac{E^{(0)}}{R_D + R_k} + \frac{E_m}{\sqrt{(R_D + R_k)^2 + X_k^2}} \cdot \sin \left( \omega \cdot t - \operatorname{arctg} \frac{X_k}{R_D + R_k} \right).$$

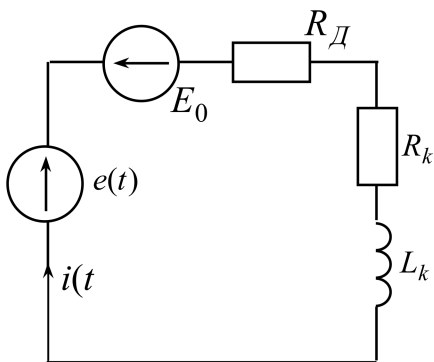


Рисунок 6.33 –  
Схема заміщення

### Контрольні питання до розділу

1. Наведіть основні властивості нелінійних електричних кіл постійного струму.
2. Поясніть застосування графоаналітичного методу розрахунку нелінійних електричних кіл постійного струму: при послідовному, при паралельному і змішаному з'єднанні елементів.
3. Поясніть порядок розрахунку нелінійного кола постійного струму з двома вузлами.
4. Дайте визначення статичного й диференційного опорів  $HE$ .
5. Поясніть, як проводять заміну  $HE$  лінійним опором і  $EPC$ .
6. Наведіть приклади практичного застосування  $HE$  постійного струму в електротехніці.
7. Наведіть деякі загальні властивості  $HE$  при змінному струмі.
8. Поясніть, як здійснюють апроксимацію нелінійних ВАХ графоаналітичним методом трьох ординат при розрахунку нелінійних кіл змінного струму.
9. Поясніть, як здійснюють апроксимацію нелінійних ВАХ ступеневим поліномом.
10. Поясніть, як здійснюють кусково-лінійну апроксимацію нелінійної ВАХ.