

**Тема:** Нелінійні електричні кола постійного струму. Нелінійні елементи електричних кіл постійного струму, їх вольт-амперні характеристики. Поняття про статичний і динамічний опори нелінійного елемента. Графічний розрахунок нелінійних електричних кіл постійного струму при послідовному, паралельному і мішаному з'єднанні елементів.

1. Загальні відомості про нелінійні кола
2. Нелінійні елементи
3. Статистичний та диференціальний опори
4. Заміна нелінійного елемента лінійним опором та ЕРС
5. Розрахунок режиму нелінійних резистивних кіл

### *1. Загальні відомості про нелінійні кола*

Електричне коло називається нелінійним, якщо воно містить хоча б один нелінійний елемент.

Нелінійні кола широко використовуються в електротехніці, автоматичці, радіоелектроніці та інших галузях. Аналіз процесів у нелінійних електричних колах значно складніший, ніж у лінійних.

Нелінійні елементи поділяються на нелінійні резистори, нелінійні котушки, нелінійні конденсатори.

Нелінійні кола мають ряд властивостей, що дозволяє створити пристрої автоматичного керування, пристрої для автоматичного перетворення електромагнітної енергії, швидкодійні обчислювальні машини, пристрої для здійснення електричних вимірів та передачі інформації тощо.

Нелінійні кола містять нелінійні елементи, характеристики яких залежать нелінійно від струму та напруги і можуть бути як симетричними, так і несиметричними. Отже, нелінійні елементи надають електричним колам властивості, що недосяжні у лінійних.

Пристрої, до складу яких входять нелінійні елементи, виконують такі основні функції:

- підсилення вихідного електричного сигналу;
- випрямлення – процес перетворення змінної напруги на пульсуючу;
- стабілізація напруги – підтримування середнього значення вихідної напруги при змінах вхідної напруги, опору навантаження або температури у певних межах;
- генерування коливань;
- множення та ділення частоти;
- гетеродинування – зміщення спектра вхідного сигналу вздовж осі частот без зміни виду його спектральної функції;
- модуляція – процес, коли один із параметрів модульованого коливання змінюється за законом керувального сигналу низької частоти;
- детектування – процес перетворення модульованого сигналу на низькочастотне коливання, форма якого відтворює керувальний сигнал;
- тригерний ефект – ефект стрибкоподібної зміни вихідної величини при незначній зміні вхідної величини;
- формування різних імпульсів.

У техніці широке застосування знайшли пристрої, що використовують нелінійні елементи. До таких пристроїв належать: підсилювачі електричних сигналів, обмежувачі напруги, випрямлячі, генератори коливань, інвертори, модулятори, демодулятори, запам'ятовуючі пристрої, перетворювачі частоти, ферорезонансні стабілізатори, магнітні підсилювачі та багато інших.

Процеси у нелінійних електричних колах описуються нелійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями, що складені на основі першого та другого законів Кірхгофа. Зазначимо, що метод накладання до таких кіл у загальному випадку не застосовується.

### *2. Нелінійні елементи*

До найпростіших нелінійних елементів належать: нелінійна ємність, нелінійна індуктивність та нелінійний опір.

При постійних струмах розглядаються електричні кола тільки з нелійними та лійними резисторами, оскільки ємність у такому колі являє собою розрив кола у місці її вмикання, а індуктивність – коротке замикання ділянки кола.

Характеристики нелінійних елементів одержують експериментально та задаються графіками (таблицями) чи наближеними аналітичними виразами.

Електричні властивості нелінійних резистивних елементів характеризуються вольт-амперними характеристиками (ВАХ). За ступенем симетрії щодо осі координат ВАХ поділяються на симетричні (рис. 5.1 а) та несиметричні (рис. 5.1 б).

Значення струму в нелінійному елементі із симетричною характеристикою щодо початку координат не залежить від полярності прикладеної напруги, а опір такого елемента, не залежить від напрямку струму через елемент. У несиметричних нелінійних елементів гілки ВАХ мають різну форму для протилежних напрямків струму і напруги. Це означає, що напруги, однакові за абсолютним значенням, але спрямовані протилежно, спричиняють проходження через елементи різних за значенням струмів.

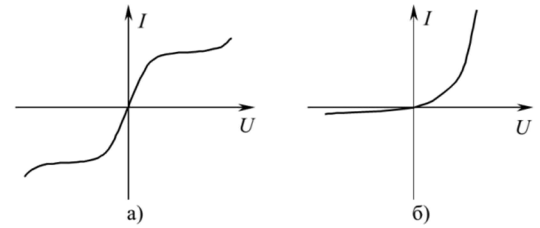


Рисунок 5.1 – Характеристики нелінійних елементів

**Нелінійною індуктивністю** характеризується котушка, яка намотана на замкненому феромагнітному осердді. Вебер-амперна характеристика нелінійної котушки (рис. 5.2) у масштабі повністю повторює характеристики намагнічування феромагнітного матеріалу осердя, параметри якої залежать від попередньої фази процесу та напрямку магнітного поля. Вебер-амперна характеристика нелінійної індуктивності не має точного аналітичного виразу. Рівняння для характеристики можна отримати, лише скориставшись апроксимацією на окремих відрізках.

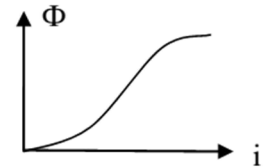


Рисунок 5.2

**Нелінійна ємність** – це ємність ідеалізованого конденсатора, значення якої залежить від прикладеної напруги чи напруженості електричного поля (рис. 5.3, кулон-вольтна характеристика).

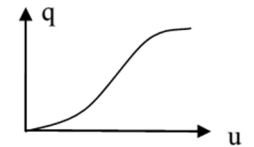


Рисунок 5.3

Нелінійною ємністю характеризуються конденсатори, простір між обкладками яких заповнений діелектриками з нелійними властивостями (сегнетоелектриками) та зворотно увімкнені р-п-переходи.

Властивості діелектрика можна характеризувати залежністю між електричним зміщенням і напруженістю електричного поля

Реальні нелінійні конденсатори, що мають між обкладками сегнетоелектрики, називають варикондами. Ємність такого конденсатора залежить від прикладеної напруги.

### 3. Статистичний та диференціальний опори

Для опису ВАХ нелінійних опорів використовують два параметри: статичний та диференціальний опори.

**Статичний опір нелінійного елемента** – це відношення постійної напруги на нелінійному елементі до струму в ньому

$$R_{ст} = U/I. \quad (5.1)$$

**Диференціальним опором** називається величина  $R_d = dU/dI$ , що характеризує нелінійний елемент при малих відхиленнях від точки нелінійної характеристики, що розглядається.

Диференційний опір визначає крутість характеристики у кожній точці, яку обчислюють частіше через малі прирости:

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (5.2)$$

У загальному випадку статичний та диференціальний опори не дорівнюють один одному, а збігаються лише для лінійних опорів.

### 4. Заміна нелінійного елемента лінійним опором та ЕРС

Припустимо, що область роботи нелінійного елемента не виходить за межі ділянки вольт-амперної характеристики, який наближено може бути замінений прямою лінією (рис. 5.5 а, крива 1). Якщо продовжити цю пряму, вона буде перетинати вісь абсцис у точці  $E_1$ . Тоді

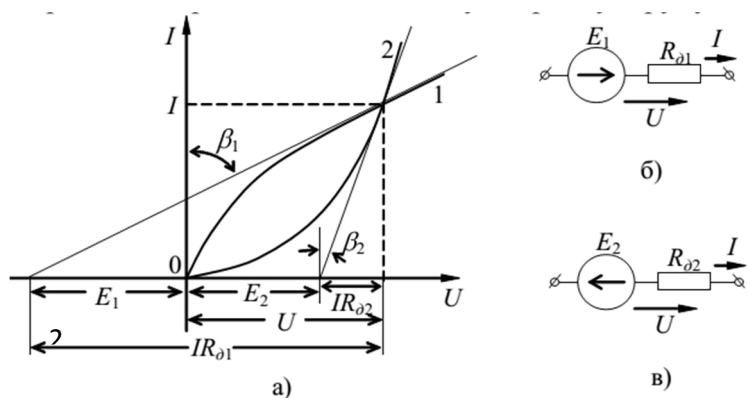


Рисунок 5.5

нелінійний елемент з кусочно-лінійною характеристикою може бути замінений джерелом постійної ЕРС  $E_1$  та лінійним опором  $R_{д1}$ , що дорівнює диференціальному опору нелінійного елемента на прямолінійній ділянці (рис. 5.5 б). Напрямок ЕРС джерела збігається з додатним напрямком струму.

На рис. 5.5в показаний інший випадок заміни нелінійного елемента лінійним опором  $R_{д2}$  та сталою ЕРС  $E_2$ , коли ЕРС джерела спрямована протилежно додатному напрямку струму.

Розрахунок нелінійних кіл при постійних струмах здійснюють частіше за все графічними методами.

### 5.1 Послідовне з'єднання

На рис. 5.6 а показано послідовне з'єднання двох нелінійних елементів, характеристики яких подані на рис. 5.6 б. Ці два нелінійні опори можна замінити одним з характеристикою  $I(U)$ , що зображена на рис. 5.6 б пунктирною лінією. Для цього потрібно задатися довільним значенням струму, додати відповідні їм абсциси характеристик заданих нелінійних елементів. Аналогічно може бути побудована підсумкова характеристика ділянки кола з декількома послідовно з'єднаними нелінійними елементами.

Одержана характеристика  $I(U)$  дозволяє безпосередньо знаходити для будь-якого значення ЕРС  $E$ , струм та напругу на нелінійному елементі.

При фіксованому значенні  $E$  струм та напруга можуть бути знайдені без побудови підсумкової характеристики. Рівняння напруг для кола  $U_1(I) + U_2(I) = E$  або  $U_1(I) = E - U_2(I)$ .

При деякому струмі  $I$  ліва частина останнього рівняння дорівнюватиме правій частині. Це і буде розв'язком нелінійного рівняння.

### 5.2 Паралельне з'єднання

На рис. 5.7 показано паралельне з'єднання двох нелінійних елементів, характеристики яких подані на рис. 5.8. Ці два нелінійні елементи можуть бути замінені одним з характеристикою  $I(U)$ , що зображена пунктирною лінією. Для цього, задаючись довільними значеннями напруги, додають відповідні ординати характеристик, що задані для нелінійного елемента.

Аналогічно може бути побудована результуюча характеристика кола при паралельному з'єднанні декількох нелінійних елементів.

### 5.3 Змішане з'єднання

Випадок змішаного з'єднання трьох нелінійних елементів зображений рис. 5.9 а. Після зам і ни двох паралельно з'єднаних нелінійних елементів одним еквівалентним схема зі змішаним з'єднанням зводиться до схеми послідовного сполучення двох нелінійних елементів, що розглядалася раніше. Графічна побудова для визначення струмів та напруг наведена на рис. 5.9 б.

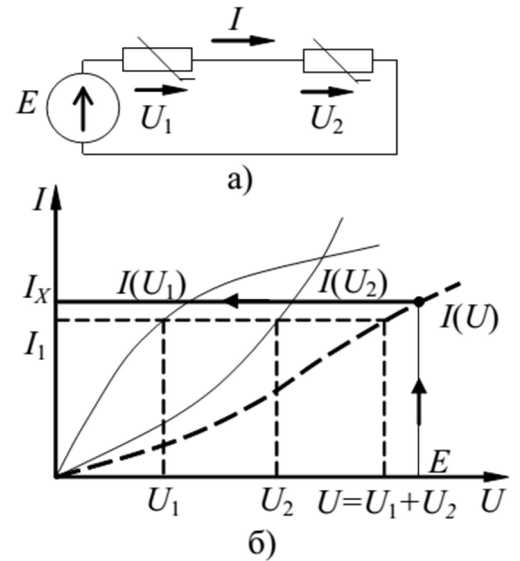


Рисунок 5.6

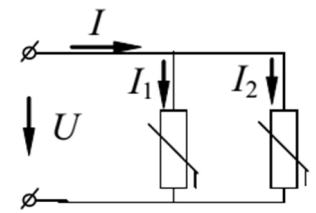


Рисунок 5.7

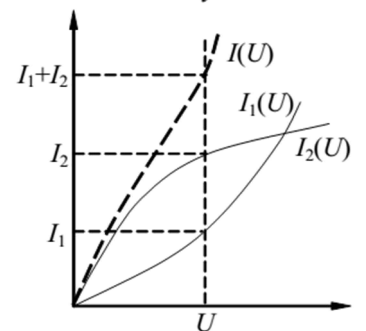
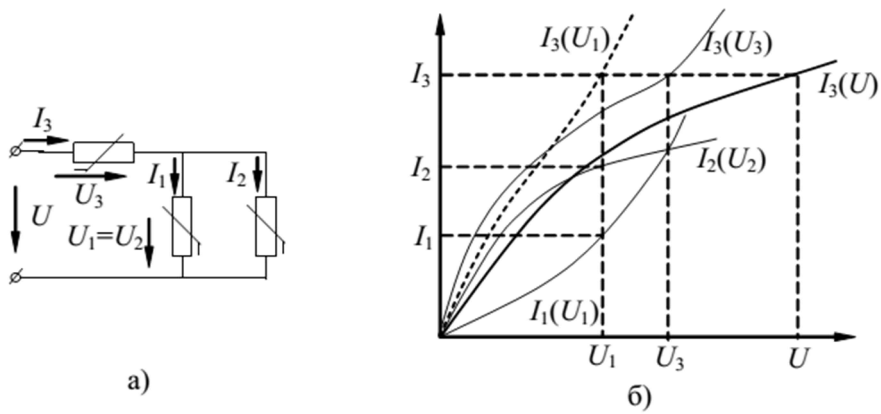


Рисунок 5.8



*Рисунок 5.9*

Спочатку характеристики  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$  замінюють однією  $I_3(U_3)$ , додаючи струми для декількох значень напруги, а потім, за одержаною характеристикою та заданою  $U_3(I_3)$ , будують сумарну вольт-амперну характеристику (ВАХ) кола  $I_3(U)$ , додаючи напруги для декількох значень струмів. Для будь-якого значення  $U$  за сумарною ВАХ  $I_3(U)$  можна визначити струм  $I_3$  та напруги на паралельній ділянці кола  $U_1$ , та напругу на нелінійному елементі  $U_3$ . Знаючи напругу  $U$ , можна визначити струми  $I_1$  та  $I_2$  за ВАХ  $I_1(U_1)$  та  $I_2(U_2)$ .