

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ КОЛА ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Теоретичні основи електротехніки. Нелінійні електричні і магнітні кола: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л.Ю. Спінул, М.П.Бурик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 59 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 21.06.2018 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 10 від 12.06.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ КОЛА ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Спінул Людмила Юрійвна*, канд. техн. наук, доц.

Бурик Микола Петрович, канд. техн. наук, ст. викл.

Відповідальний редактор *Кудря Євген Антонович*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент: *Чумак Вадим Володимирович*, канд. техн. наук, доц .

За редакцією укладачів

Представлено основні положення для аналізу нелінійних електричних і магнітних кіл постійного струму з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки». Приведено методи розрахунку нелінійних кіл. Наведені теоретичні положення проілюстровані розв’язаними задачами. Призначений для студентів денної форми навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ I. НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	5
1.1. Характеристика нелінійних елементів.....	5
1.2. Статичні та диференціальні параметри нелінійних елементів	7
1.3 Заміна нелінійного елемента лінійним і ЕРС.....	9
1.4 Методи розрахунку нелінійного електричного кола.....	10
1.4.1. Графічний метод.....	11
1.4.2. Графо-аналітичний метод.....	22
Завдання на розрахунково-графічну роботу «Нелінійне електричне коло постійного струму».....	28
Розділ II. НЕЛІНІЙНІ МАГНІТНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	33
2.1. Загальні положення.....	33
2.2 Аналогія між величинами, що характеризують магнітні та електричні кола.....	35
2.3. Закони, що використовують для розрахунків магнітних кіл.....	38
2.4. Розрахунок магнітних кіл.....	39
2.4.1. Припущення, прийняті при розрахунках магнітних кіл.....	39
2.4.2. Розрахунок нерозгалуженого магнітного кола.....	40
2.4.3.Розрахунок розгалужених магнітних кіл.....	48
2.4.3.1. Розрахунок симетричного магнітного кола.....	48
2.4.3.2. Розрахунок несиметричного магнітного кола.....	49
Завдання на розрахунково-графічну роботу «Нелінійне магнітне коло постійного струму».....	55
Список рекомендованої літератури	59

ВСТУП

Вивчення курсу "Теоретичні основи електротехніки" не можливе без отримання практичних навичок, що набуваються під час розв'язування задач за його розділами. Тому метою навчального посібника з розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл є засвоєння студентами методів їх розрахунку. Представлені графічний і графо-аналітичний методи розрахунку як електричних, так і магнітних нелінійних кіл постійного струму. Методи проілюстровані розв'язаними задачами. У навчальному посібнику наведено індивідуальні варіанти для самостійного виконання студентами розрахунково-графічної роботи по темам «Розрахунок нелінійного електричного кола» і «Розрахунок нелінійного магнітного кола». Номер варіанта для студента задає викладач, який проводить практичні заняття. Навчальний посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання, які вивчають дисципліну "Теоретичні основи електротехніки".

Розділ І. НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Характеристика нелінійних елементів

Електричний стан будь-якого елемента визначається напругою на його клеммах і струмом, що проходить через нього. Опір резистора залежить від струму, оскільки із зміною струму у провідниках змінюється температура. Ємність конденсатора може залежати від напруги, якщо діелектрична проникність діелектрика у конденсаторі залежить від напруженості електричного поля. Індуктивність котушки також може залежати від струму, якщо магнітна проникність речовини осердя змінюється в залежності від напруженості магнітного поля. У загальному випадку залежності параметрів R , L , C від напруг, струмів або їх напрямків є нелінійними. Залежність напруги від струму $U(I)$ на затискачах елемента або зворотну залежність струму від напруги $I(U)$ називають **вольт – амперною характеристикою (ВАХ)**. Залежність заряду конденсатора від прикладеної напруги $q(U)$ називають **кулон – вольтною характеристикою (КлВХ)**. Залежність потокозчеплення елемента або ділянки електричного кола від струму $\psi(I)$ називають **вебер-амперною характеристикою (ВбАХ)**. В багатьох випадках ці залежності незначні, ними можна знехтувати і вважати, що параметри елементів не залежать ні від струму, ні від напруги. Тому такі елементи називають **лінійними**, а кола, що складаються з лінійних елементів, - **лінійними електричними колами**. Лінійні елементи мають ВАХ, зображену на рис. 1.1,а.

Якщо параметри електричного кола суттєво залежать від струму або напруги і характеристики цих елементів зображуються кривою (рис. 1.1,б), то такі елементи називають нелінійними, а електричні кола, які містять хоч один нелінійний елемент, - **нелінійними електричними колами**.

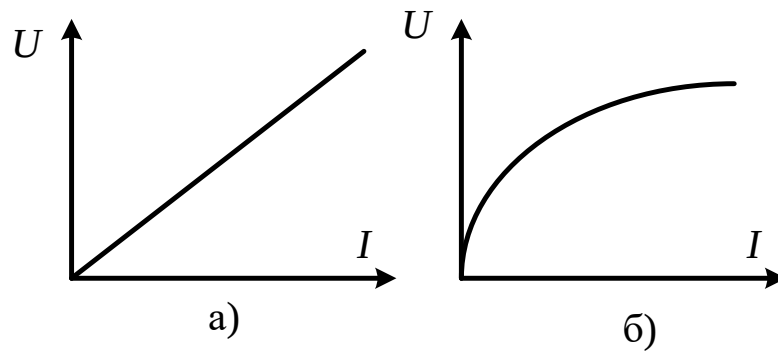


Рис. 1.1

В залежності від виду характеристики нелінійні елементи поділяють на дві основні групи: симетричні і несиметричні.

Симетричними називають нелінійні елементи, у яких ВАХ не залежить від напрямку струму і напруги. До таких елементів відносять лампи розжарювання, бареттери, терморезистори. Їх опори визначаються температурою, що залежить від сили струму. На рис. 1.2.а лініями 1, 2 показано ВАХ ламп розжарювання відповідно з вугільною і металевою ниткою; лінією 3 – ВАХ бареттера, 4 – терморезистора.

Несиметричними називають нелінійні елементи, у яких ВАХ не однакові при різних напрямках струму або напруги на затискачах.

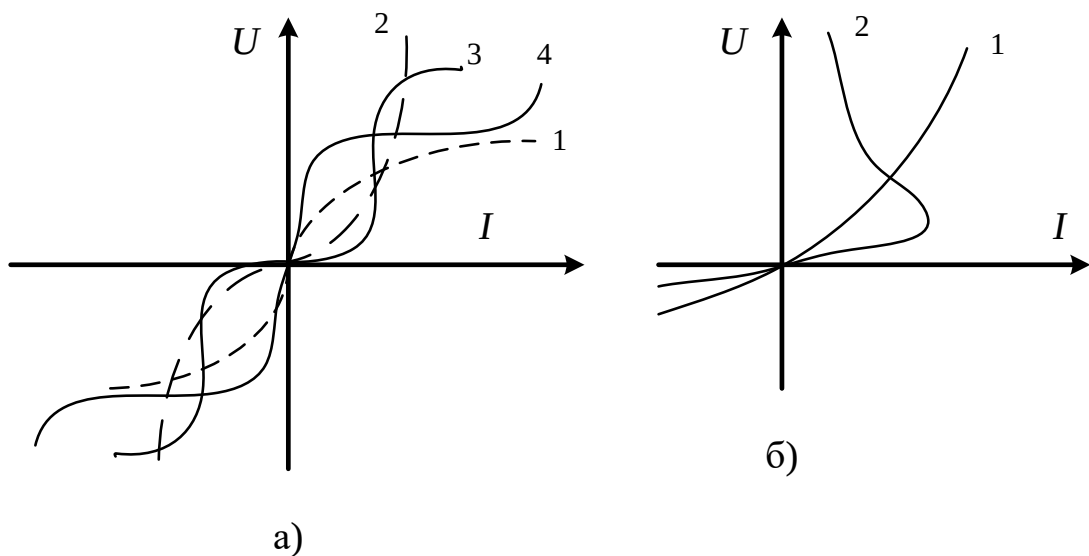


Рис. 1.2

До таких елементів відносять електричну дугу з різнорідними електродами (мідь - вугілля, залізо - ртуть), напівпровідникові прилади тощо. На рис. 1.2,б 1 – ВАХ діода; 2 – ВАХ електричної дуги.

Нелінійні елементи поділяють також на некеровані і керовані. **Некерований елемент** має одне основне коло і його ВАХ зображується однією кривою. До групи некерованих елементів входять лампи розжарювання, електрична дуга, бареттер, тиритові опори, напівпровідникові випрямлячі (діоди) і т.і. **Керований нелінійний елемент** на відміну від некерованого, крім основного кола, має допоміжне або керуюче коло. ВАХ керованого елемента зображується сімейством кривих.

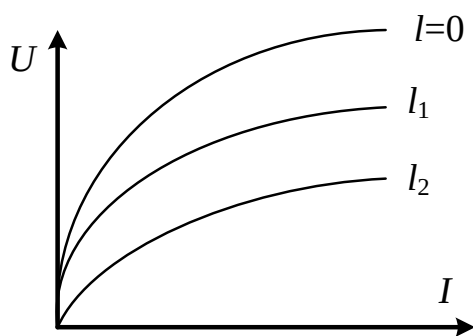


Рис. 1.2,в

Наприклад, опір котушки з феромагнітним осердям, що має повітряний зазор, суттєво залежить від довжини зазору. Така котушка характеризується цілим рядом ВАХ, кожна з яких відповідає певній довжині зазору l (рис. 1.2, в).

До числа керованих нелінійних елементів належать транзистори, терморезистори, триелектродні (і більше) лампи та інші елементи.

1.2. Статичні та диференціальні параметри нелінійних елементів

На відміну від лінійних елементів нелінійні не характеризуються тільки одним параметром: опором (провідністю), індуктивністю, ємністю. Нелінійний елемент повністю характеризує лише завдання всієї залежності між змінними величинами. Для кожної точки ВАХ (рис. 1.3) визначають **статичний і диференціальний опір**. Статичний опір $R_{\text{СТ}}$ характеризує поведінку нелінійного опора в режимі незмінного струму. Він дорівнює

відношенню напруги на нелінійному опорі до струму, що протікає по ньому:
 $R_{СТ} = U/I$. Припустимо, що робочий режим елементу заданий точкою a (рис. 1.3).

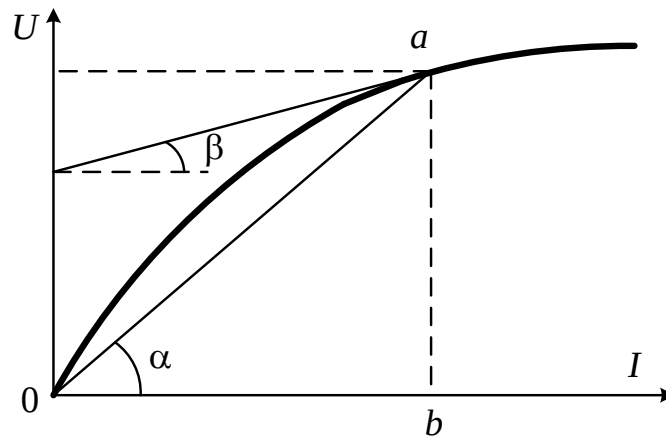


Рис. 1.3

Відношення напруги, яка вимірюється відрізком ab , до струму, що вимірюється відрізком ob , визначає в масштабі $m_R = \frac{m_U}{m_I}$ статичний опір

$R_{СТ}$ у точці a . З рис. 1.3 видно, що $R_{СТ}$ чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу прямої, проведеної з початку координат у дану точку характеристики, помноженому на відношення масштабів по осям:

$$R_{СТ} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha.$$

Під **диференційним опором** $R_{\text{диф}}$ розуміють відношення приросту напруги dU на нелінійному опорі до відповідного приросту струму dI у заданій точці: $R_{\text{диф}} = dU/dI$. Диференціальний опір у будь-якій точці ВАХ дорівнює похідній, обчисленій у даній точці. $R_{\text{диф}}$ чисельно дорівнює тангенсу кута β нахилу дотичної до ВАХ у даній точці, помноженому на відношення масштабів по осям:

$$R_{\text{диф}} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \beta.$$

Точку на характеристиці, яка відповідає заданим значенням напруги і струму, називають робочою точкою. У разі переході від однієї робочої точки до іншої статичний і диференціальний опори змінюються. Статичний опір $R_{\text{СТ}}$ завжди позитивний; а диференціальний опір $R_{\text{ДИФ}}$ залежить від вигляду характеристики. Так, на висхідній ділянці характеристики $R_{\text{ДИФ}}$ додатний, а на низхідній – від’ємний.

1.3. Заміна нелінійного елемента лінійним і ЕРС

Якщо робочий діапазон нелінійного елемента не виходить за межі ділянки ВАХ, яку за певної міри наближення можна представити прямою, то таку ділянку можна замінити лінійним елементом і ЕРС.

У більшості випадків ВАХ НЕ можна поділити на 2 класи:

- 1) із зростанням струму статичний опір зменшується (рис. 1.4,а);
- 2) із зростанням струму статичний опір зростає (рис. 1.4,б);

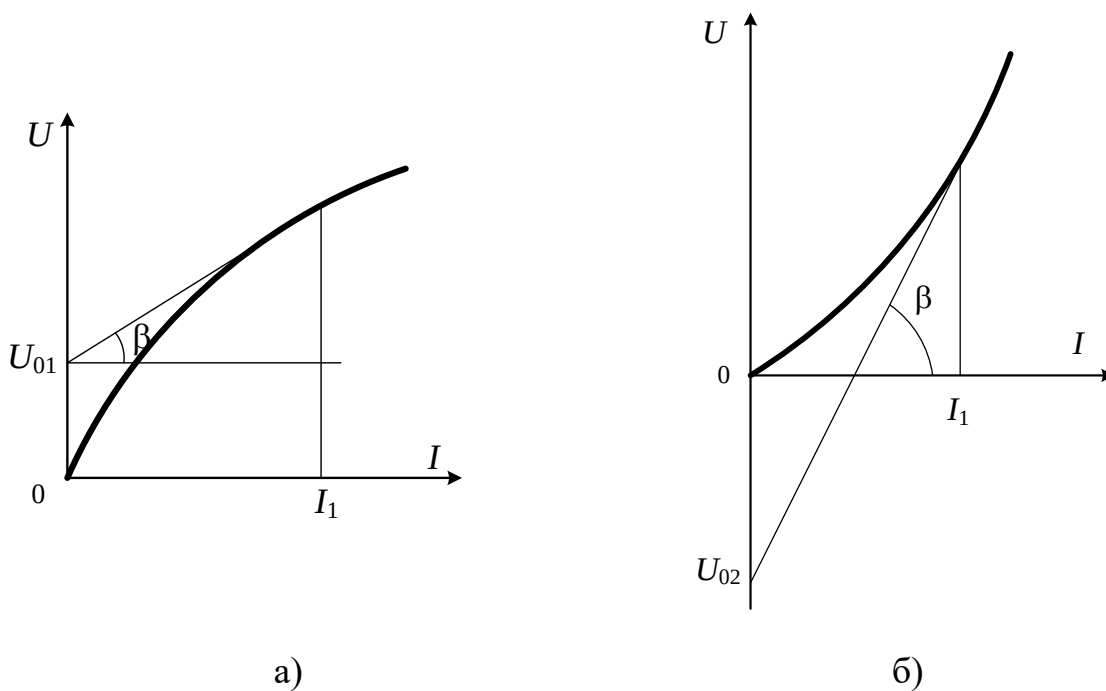


Рис. 1.4

Для обох видів ВАХ, у разі подовження її прямолінійної ділянки до перетину з віссю напруг, можуть бути визначені напруги U_{01}, U_{02} . Кут між даною прямою і віссю струмів визначає диференціальний опір нелінійного елемента $R_d = m_R \operatorname{tg} \beta$, $m_R = \frac{m_U}{m_I}$. Тоді нелінійні елементи схеми із ВАХ, у якій статичний опір зменшується із зростанням струму, можуть бути представлені лінійними (рис. 1.5,а) і нелінійні елементи схеми із ВАХ, у якій статичний опір зростає із зростанням струму, можна зобразити схемою, поданою на рис. 1.5,б.

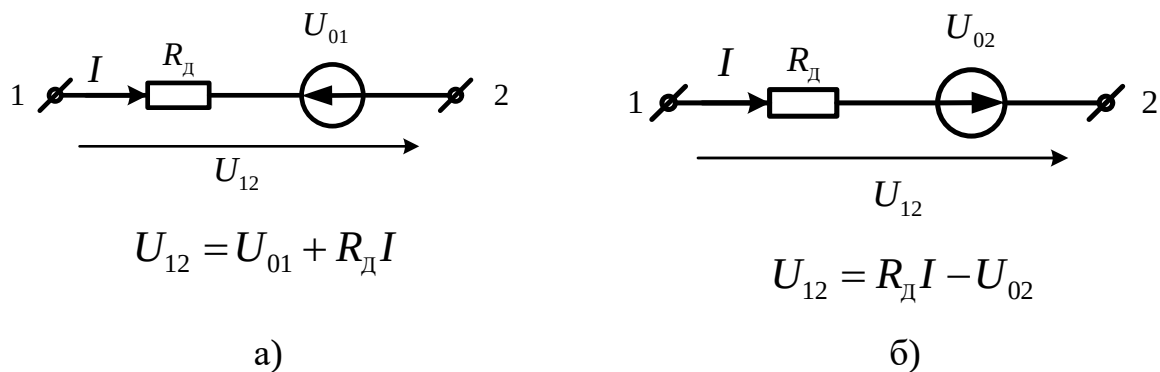


Рис. 1.5

Виконавши заміну нелінійного елемента, отримаємо лінійну схему, для визначення струмів і напруг в якій використовуються відомі методи розрахунку лінійного кола. Після розв'язання відповідних рівнянь і знаходження струмів віток необхідно виконати перевірку на відповідність рішень для струмів лінійними ділянками ВАХ. Застосування такого підходу до розрахунку нелінійного кола дає наближені рішення.

1.4. Методи розрахунку нелінійного електричного кола

Електричний стан як лінійного, так і нелінійного кола, можна описати законами Кірхгофа, методом контурних струмів або методом вузлових потенціалів. Для лінійного кола коефіцієнти для напруги чи струму були наперед задані константи, незмінні в умовах даної задачі. Для нелінійного

кола опори чи провідності кола не можуть бути наперед визначені, оскільки їх величини залежать від струму чи напруги елементів, які ще не визначені. У випадку нелінійних кіл рівняння, складені за вказаними вище методами, є нелінійними, тому методи їх розв'язання мають свою специфіку. Для аналітичного розв'язку рівнянь необхідно мати аналітичні вирази характеристик усіх нелінійних елементів кола. Аналітичний розв'язок нелінійної системи рівнянь є досить складним.

Для полегшення розрахунків у нелінійному колі розроблені графічні і графоаналітичні методи розв'язку рівнянь, в яких використовують ВАХ нелінійних елементів, заданих у вигляді графіків або таблиць.

1.4.1. Графічний метод

Графічний метод використовують для аналізу простого кола з одним джерелом ЕРС при послідовно-паралельному з'єднанні нелінійних елементів (НЕ), а також складного кола з кількома джерелами ЕРС, але яке має два вузли. Послідовність розрахунку графічним методом розглянемо на прикладі простого кола з одним джерелом та послідовним (рис. 1.6), паралельним (рис. 1.7) і змішаним (рис. 1.8) з'єднанням НЕ. Відомими вважаються ЕРС джерела напруги або струм джерела, ВАХ нелінійних елементів $U_1(I_1), U_2(I_2), U_3(I_3)$. Необхідно визначити струми I_1, I_2, I_3 в колі.

У разі послідовного з'єднання споживачів (рис.1.6,а) через них протікає один й той саме струм $I_1 = I_2 = I_3 = I$. Рівняння для напруг, складене за 2-м законом Кірхгофа $U = U_1 + U_2 + U_3$. Тому для побудови результуючої характеристики кола $U(I)$ необхідно:

- 1) довільно задатися значенням струму у колі;

2) відкласти на осі I вибране значення струму (точка p) і через цю точку провести пряму, паралельну осі напруг, до перетину її з ВАХ окремих елементів;

3) спроектувати точки перетину прямої з ВАХ кожного елемента на вісь U і знайти напругу на кожному елементі U_1, U_2, U_3 ;

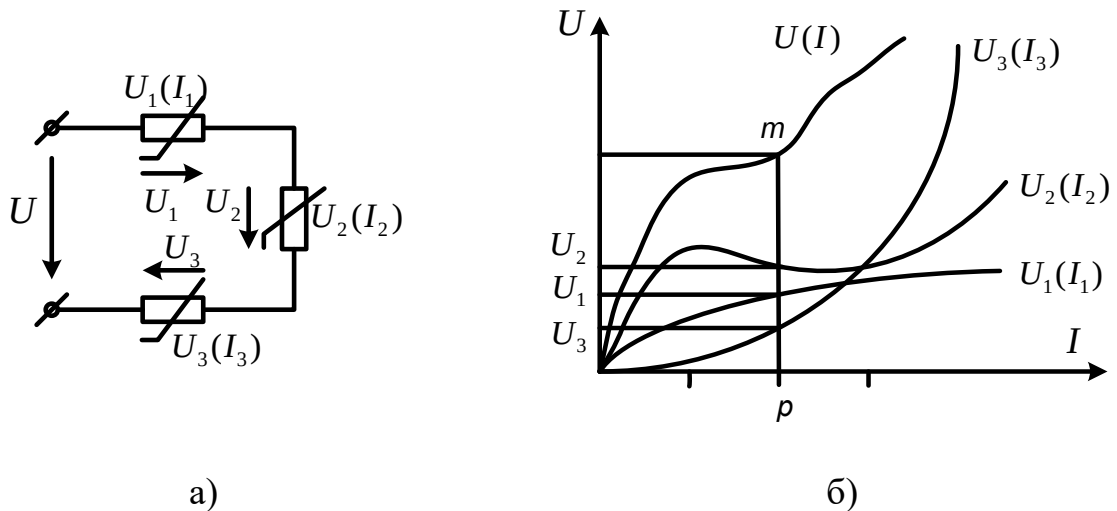


Рис. 1.6

4) визначити результуючу напругу $U = U_1 + U_2 + U_3$, яка відповідає вибраному у п.1 значенню струму і нанести на координатну площину першу точку результуючої ВАХ $U(I)$;

5) повторити пп.1-4 декілька разів і побудувати криву $U(I)$ (рис. 1.6,б).

За отриманою ВАХ можна визначити струм у колі і напругу на окремих елементах за будь-якого значення вхідної напруги.

У разі паралельного з'єднання (рис. 1.7,а) напруга на елементах однакова $U_1 = U_2 = U_3 = U$. Рівняння для струмів, складене за 1-м законом Кірхгофа $I = I_1 + I_2 + I_3$. Для результуючої характеристики кола $U(I)$ необхідно:

1) довільно задатися значенням напруги в колі;

2) відкласти на осі U вибране значення напруги (точка p) і через цю точку провести пряму, паралельну осі струмів, до перетину її з ВАХ окремих елементів;

3) спроектувати точки перетину прямої з ВАХ кожного елемента на вісь I і знайти струм кожного елемента I_1, I_2, I_3 ;

4) визначити струм на вході кола $I = I_1 + I_2 + I_3$, який відповідає вибраному у п.1 значенню і нанести на координатну площину першу точку результуючої ВАХ $U(I)$;

5) повторити пп.1-4 декілька разів і побудувати криву $U(I)$ (рис. 1.7,б).

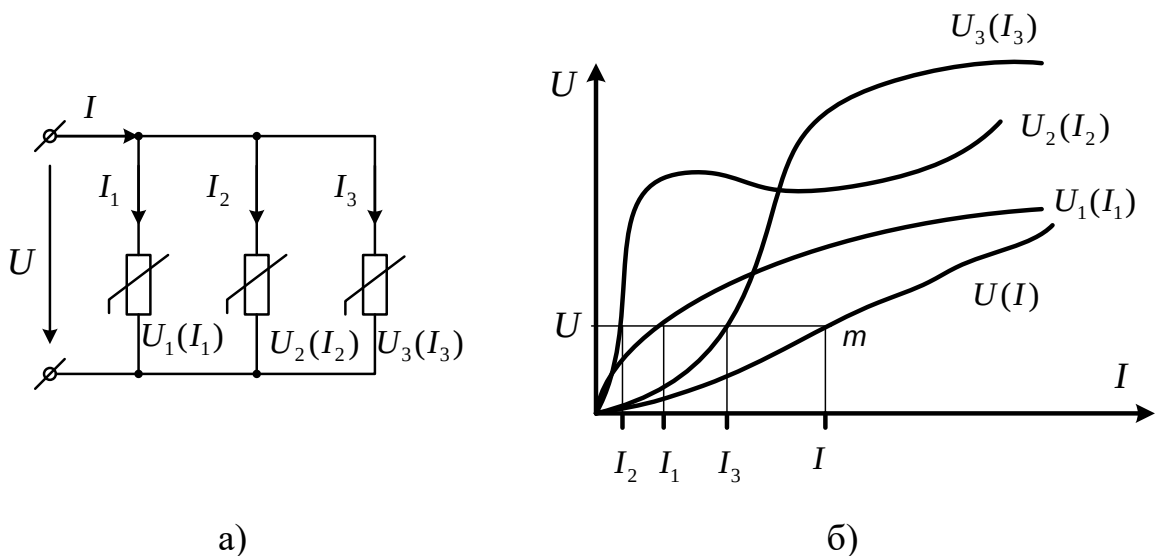


Рис. 1.7

Використавши результуючу ВАХ, можна легко визначити напругу на вході кола і струм у кожному елементі, якщо відоме значення струму I .

У разі змішаного з'єднання (рис. 1.8,а) розрахунки виконують у два етапи:

1) паралельно з'єднанні елементи замінюють одним еквівалентним, для чого будують результуючу ВАХ паралельної ділянки $U_{23}(I)$, сумуючи струми I_2 та I_3 для однакових значень напруги U_{23} (рис. 1.8, б);

2) будують результуючу ВАХ усього кола $U(I)$ (рис. 1.8,б), додаючи при однаковому значенні струму I напругу, отриману по ВАХ $U_1(I_1)$, і напругу, одержаної по ВАХ паралельної ділянки $U_{23}(I)$.

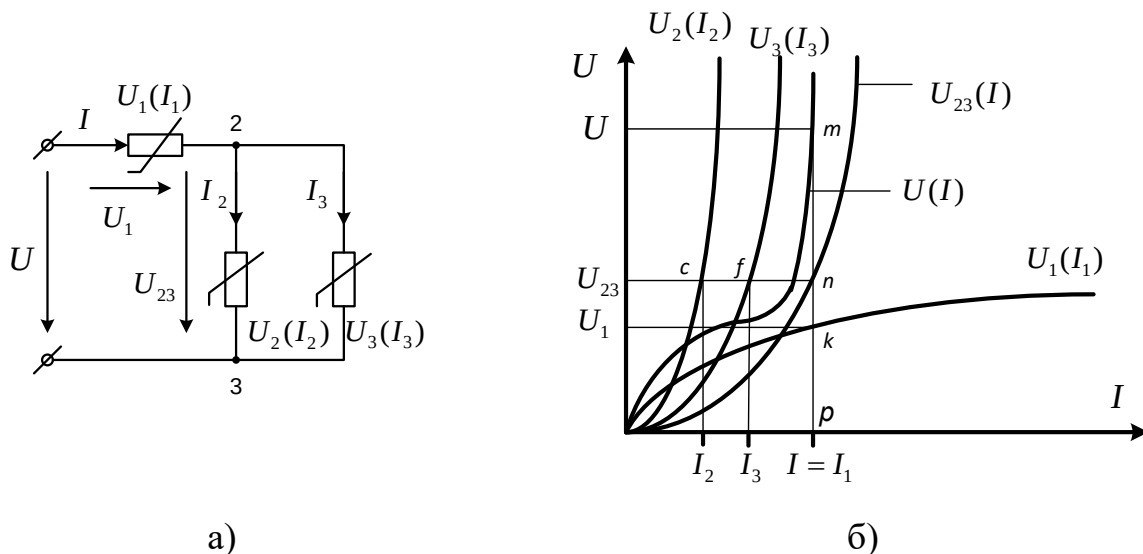


Рис. 1.8

Струми і напруги у колі на рис. 1.8,а за заданого значення вхідної напруги U розраховують так. По осі U відкладають значення вхідної напруги U і через цю точку проводять пряму, паралельну осі I , до перетину з результуючою ВАХ усього кола $U(I)$ у точці m . Через точку m проводять пряму mp , паралельну осі U . Ордината точки k перетину цієї прямої з ВАХ першого елемента $U_1(I_1)$ дорівнює у масштабі напруг значенню U_1 ; ордината точки n перетину прямої mp з ВАХ паралельної ділянки дорівнює у масштабі напруг значенню U_{23} .

На осі I пряма mp покаже значення струму нерозгалуженої частини кола I_1 . За напругою паралельної ділянки U_{23} визначити струми I_2 і I_3 просто; для чого через точку n слід провести пряму, паралельну осі струмів I . Абсциси точок c, f перетину цієї прямої з ВАХ $U_2(I_2)$, $U_3(I_3)$ у масштабі струмів дорівнюють струмам I_2 і I_3 відповідно.

Графічний метод також можна використовувати для розрахунку кола з декількома джерелами ЕРС і двома вузлами.

Задача 1.1. На рис. 1.9 показано схему з трьома однаковими нелінійними

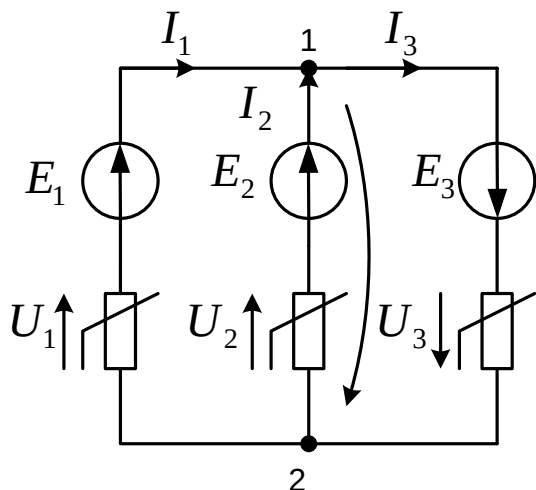


Рис. 1.9

елементами, вольт-амперні характеристики яких задано у таблиці 1.1. ЕРС джерел напруги $E_1 = 100$ В, $E_2 = 10$ В, $E_3 = 20$ В. Визначити струми у всіх вітках схеми.

Таблиця 1.1

$\pm U$, В	0	5	20	30	50	70	100
$\pm I$, мА	0	10	30	39	50	55	60

Розв'язання. Оскільки всі вітки схеми увімкнені паралельно до двох вузлів 1 і 2, для розв'язання скористаємось методом двох вузлів.

Довільно оберемо додатні напрямки струмів і вузлової напруги U_{12} (рис. 1.9). Запишемо рівняння за 2-м законом Кірхгофа для контурів, до складу яких входить одна з віток і напруга U_{12} :

$$U_{12} + U_1 = E_1, \quad U_{12} + U_2 = E_2, \quad U_{12} - U_3 = -E_3.$$

Виразимо з цих рівнянь напругу U_{12} :

$$U_{12} = E_1 - U_1, \quad U_{12} = E_2 - U_2, \quad U_{12} = -E_3 + U_3.$$

Користуючись цими виразами, розраховуємо залежність напруги U_{12} від струму у такій послідовності:

- довільно задамо значення струму і за ВАХ нелінійного елемента визначимо на ньому напругу;

- за відповідним рівнянням другого закону Кірхгофа розрахуємо вузлову напругу U_{12} , яка буде відповідати обраному значенню струму.

Результати розрахунків зведено у таблиці 1.2, 1.3, 1.4, а відповідні графіки показано на рис. 1.10.

Таблиця 1.2

I_1 , мА	0	10	30	39	50	55	60
U_{12} , В	100	95	80	70	50	30	0

Таблиця 1.3

I_2 , мА	-10	0	10	30	30
U_{12} , В	15	10	5	-10	-20

Таблиця 1.4

I_3 , мА	0	10	30	39	50	55	60
U_{12} , В	-20	-15	0	10	30	50	80

За першим законом Кірхгофа можна записати рівняння $I_1 + I_2 = I_3$, яке для даної схеми повинно виконуватись за одного значення напруги U_{12} . Щоб визначити це значення побудуємо допоміжну криву $(I_1 + I_2)(U_{12})$ і знайдемо точку перетину цієї кривої із залежністю $(I_3)(U_{12})$. Ця точка визначає розв'язок задачі: $U_{12} = 18$ В, $I_1 = 58$ мА, $I_2 = -15$ мА, $I_3 = 43$ мА; напруга на елементах $U_1 = 82$ В, $U_2 = -8$ В, $U_3 = 38$ В.

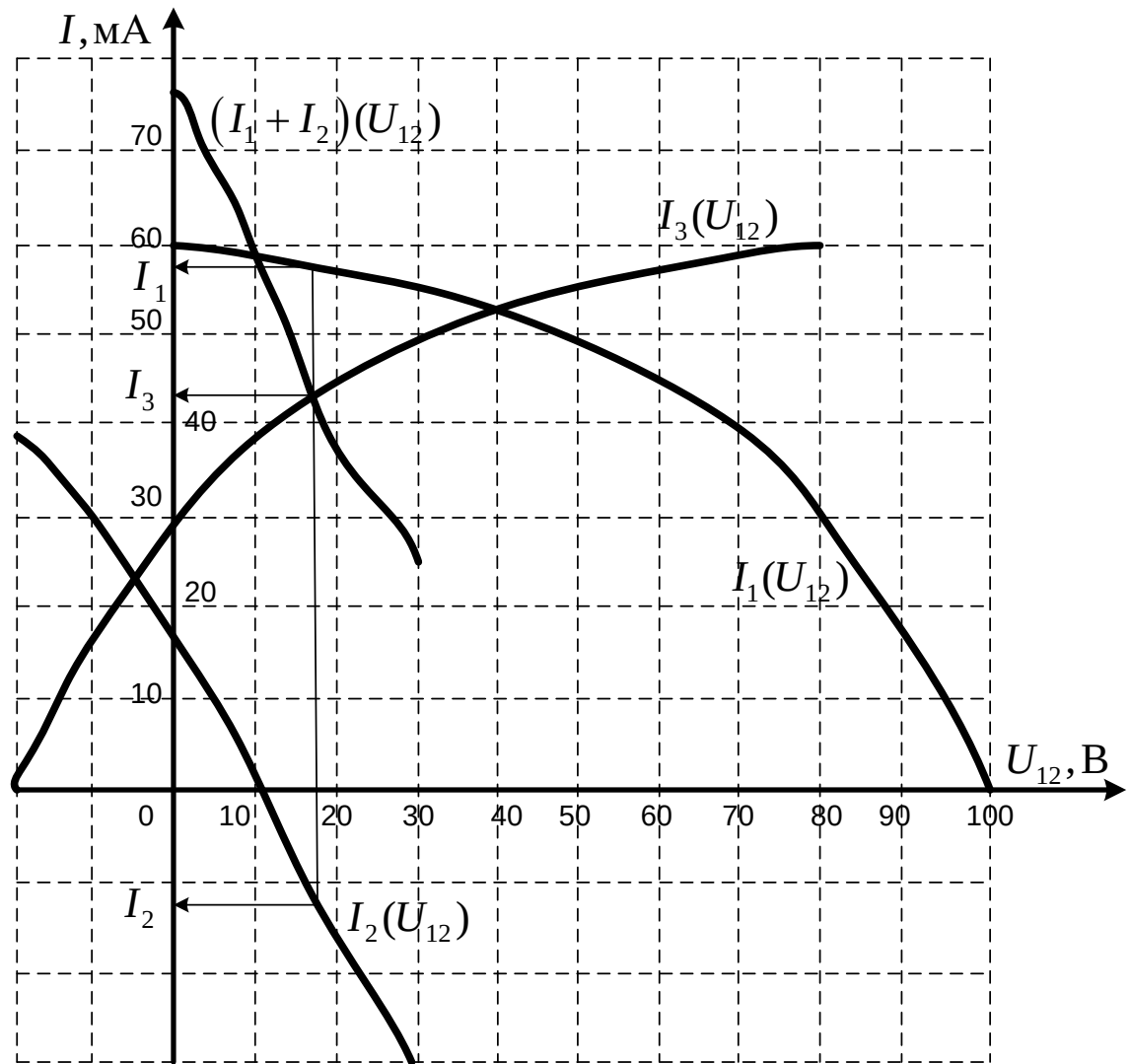


Рис. 1.10

Правильність розрахунків перевіряємо за балансом потужностей. Сумарна потужність джерел енергії

$$P_{\text{дж}} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = 100 \cdot 50 + 10 \cdot (-15) + 20 \cdot 43 = 6510 \text{ мВт},$$

сумарна потужність споживачів

$$P_{\text{сп}} = U_1 I_1 + U_2 I_2 + U_3 I_3 = 82 \cdot 50 + (-8) \cdot (-15) + 38 \cdot 43 = 6510 \text{ мВт}.$$

Баланс потужностей виконується.

Відповідь: $I_1 = 58 \text{ мА}$, $I_2 = -15 \text{ мА}$, $I_3 = 43 \text{ мА}$.

Задача 1.2.

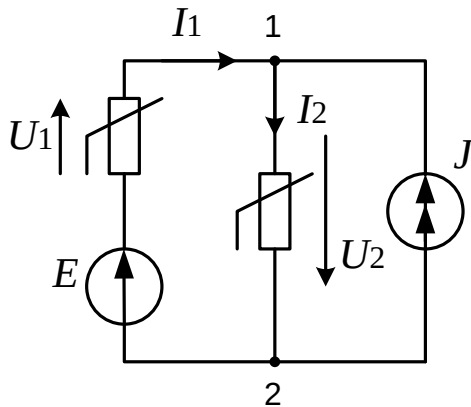


Рис. 1.11

Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів кола рис. 1.11 $U_1(I_1)$ і $U_2(I_2)$ наведено у табл.1.2. Визначити струми, перевірити баланс потужностей, якщо $E = 70 \text{ В}$, $J = 1,5 \text{ А}$.

Таблиця 1.2

$U, \text{ В}$	5	10	20	30	40	50	60	70
$I_1, \text{ мА}$	0,2	0,4	0,68	0,86	0,96	1	1	1
$I_2, \text{ мА}$	1,12	1,4	1,8	2,14	2,44	2,77	3,5	4

Розв'язання. Оскільки всі вітки схеми увімкнені паралельно до двох вузлів 1 і 2, для розв'язання скористаємось методом двох вузлів.

Довільно оберемо додатні напрямки струмів і вузлової напруги U_{12} (рис. 1.11) і запишемо рівняння за 2-м законом Кірхгофа:

$$U_{12} = E_1 - U_1, \quad U_{12} = U_2.$$

Користуючись цими виразами, для першої вітки розрахуємо залежність напруги U_{12} від струму. Довільно задамо значення струму і за ВАХ першого нелінійного елемента визначимо на ньому напругу; за відповідним рівнянням розрахуємо вузлову напругу U_{12} , яка буде відповідати обраному значенню струму. Результати розрахунків зведені у таблиці 1.6, а відповідні графіки показано на рис. 1.12.

Таблиця 1.6

$I_1, \text{мА}$	0,2	0,4	0,68	0,86	0,96	1	1	1
$U_{12}, \text{В}$	65	60	50	40	30	20	10	0

За першим законом Кірхгофа можна записати рівняння $I_1 + J = I_2$, яке для даної схеми повинно виконуватись за одного значення напруги U_{12} . Щоб знайти це значення побудуємо допоміжну криву $(I_2 - J)(U_{12})$ і знайдемо точку перетину цієї кривої із залежністю $(I_1)(U_{12})$. Ця точка визначає розв'язок задачі: $U_{12} = 38 \text{ В}$, $I_1 = 0,9 \text{ А}$, $I_2 = 2,4 \text{ А}$.

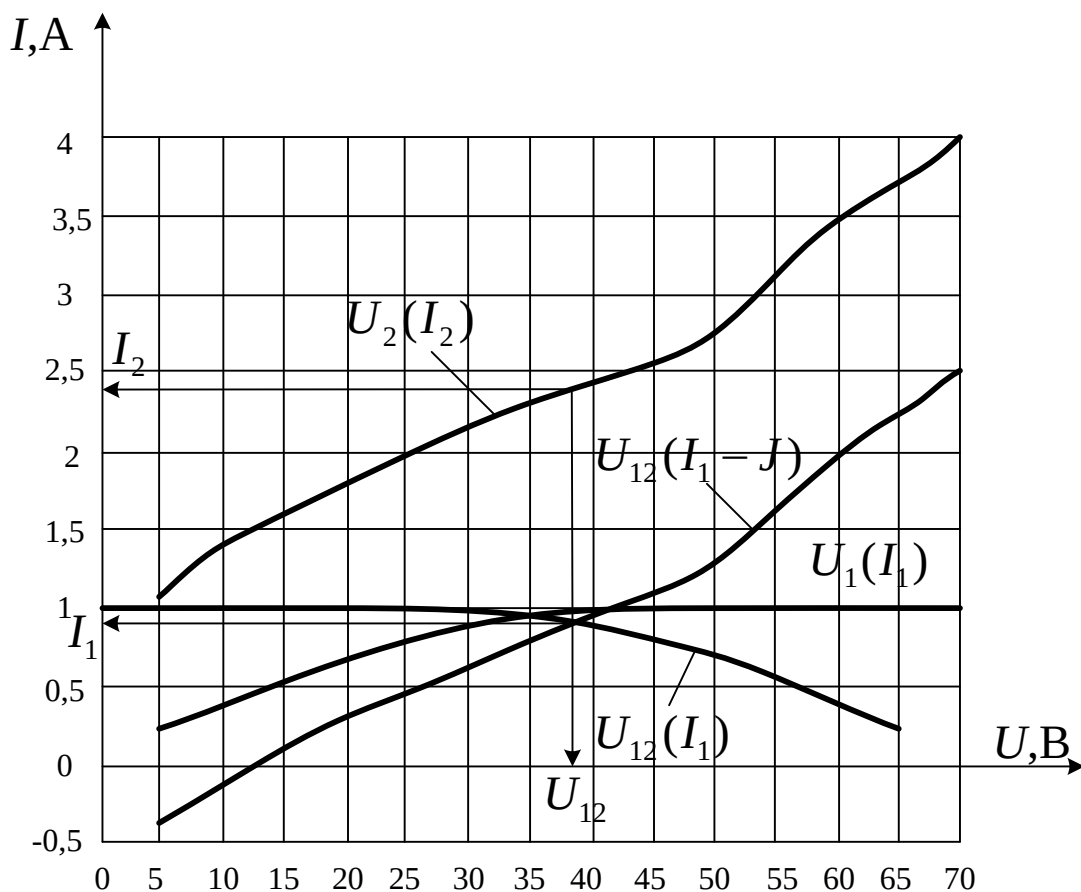


Рис.1.12

Правильність розрахунків перевіряємо за балансом потужностей. Сумарна потужність джерел енергії :

$$P_{\text{дж}} = E_1 I_1 + U_{12} J = 70 \cdot 0,9 + 38 \cdot 1,5 = 120 \text{ Вт},$$

сумарна потужність споживачів

$$P_{\text{СП}} = U_1 I_1 + U_2 I_2 = 32 \cdot 0,9 + 38 \cdot 2,4 = 120 \text{ Вт.}$$

Баланс потужностей виконується.

Відповідь: $I_1 = 0,9 \text{ А}$, $I_2 = 2,4 \text{ А}$.

Задача 1.3. У колі на рис. 1.13 крім лінійних опорів $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 1 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$ є два однакових нелінійних резистора із заданою ВАХ (табл. 1.7) ЕРС джерел $E_1 = 5 \text{ В}$, $E_4 = 5 \text{ В}$. Розрахувати усі струми в колі.

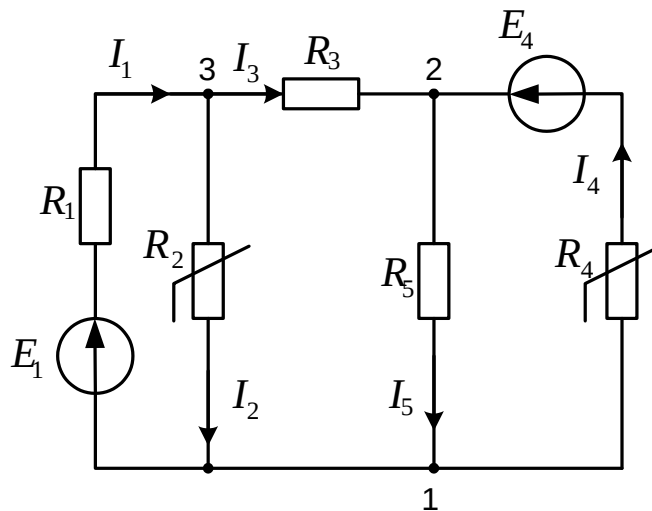


Рис. 1.13

Таблиця 1.7

$U, \text{В}$	0	1	2	3	4
$I, \text{А}$	0	0,2	0,5	1	2

Розв'язання. Будемо ВАХ нелінійного елементу $U = f(I)$ (рис. 1.14).

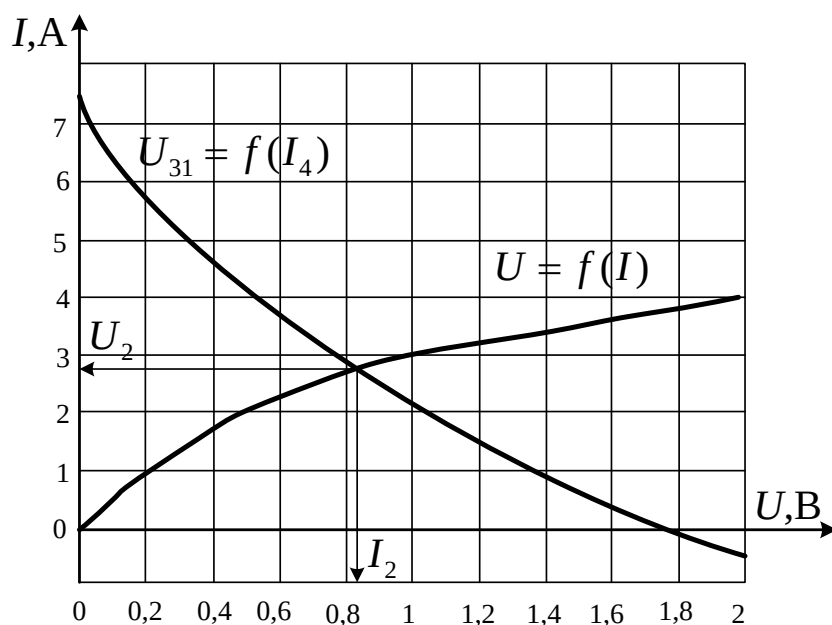


Рис. 1.14

Довільно задамо значення струму I_4 і обчислимо відповідну напругу U_4 та струм I_2 нелінійного опору R_2 .

Припустимо, $I_4 = 2 \text{ A}$, тоді $U_4 = 4 \text{ В}$ (див.табл.1.7).

$$U_{21} = E_1 - U_4 = 5 - 4 = 1 \text{ В}, \quad I_5 = \frac{U_{21}}{R_5} = 0,5 \text{ А},$$

$$I_3 = I_5 - I_4 = -1,5 \text{ А}, \quad U_{31} = R_3 \cdot I_3 + U_{21} = -1,5 \cdot 1 + 1 = -0,5 \text{ В}.$$

Припустимо далі, що $I_4 = 1 \text{ А}$ і в такій самій послідовності знову обчислимо U_{31} . Цю процедуру повторимо декілька разів. Розрахунки зведено у таблицю 1.8.

Таблиця 1.8

$I_4,$	$U_4,$	$U_{21} = E_1 - U_4$	$I_5 = \frac{U_{21}}{R_5}$	$I_3 = I_5 - I_4$	$U_{31} = R_3 \cdot I_3 + U_{21}$
2	4	1	0,5	-1,5	-0,5
1	3	2	1	0	2
0,5	2	3	1,5	1	4
0,2	1	4	2	1,8	5,8
0	0	5	2,5	2,5	7,5

Побудуємо графік залежності $U_{31} = f(I_4)$ (рис. 1.14). Точка перетину графіків $U = f(I)$ і $U_{31} = f(I_4)$ відповідає дійсному значенню струму $I_2 = 0,84 \text{ A}$. За ВАХ $U = f(I)$ визначаємо напругу $U_2 = 2,7 \text{ В}$.

Усі інші напруги та струми легко розраховуються за законами Кірхгофа:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{31}}{R_1} = 1,15 \text{ A}, \quad I_3 = I_1 - I_2 = 1,15 - 0,84 = 0,31 \text{ A},$$

$$U_{21} = -R_3 \cdot I_3 + U_2 = -0,31 + 2,7 = 2,39 \text{ В}, \quad I_5 = \frac{U_{21}}{R_5} = 1,195 \text{ A},$$

$$U_4 = E_4 - U_{21} = 5 - 2,31 = 2,69 \text{ В}.$$

Струм I_4 знаходимо за формулою лінійної інтерполяції:

$$\frac{U_4 - 2}{3 - 2} = \frac{I_4 - 0,5}{1 - 0,5}, \quad I_4 = 0,5 + 0,69 \cdot 0,5 = 0,845 \text{ A}.$$

Відповідь: $I_1 = 1,15 \text{ A}$, $I_2 = 0,84 \text{ A}$, $I_3 = 0,31 \text{ A}$, $I_4 = 0,845 \text{ A}$,
 $I_5 = 1,195 \text{ A}$.

1.4.2. Графо-аналітичний метод

Цей метод дозволяє знайти розв'язок задачі для більш складного кола. Він ґрунтується на використанні теореми про активний двополюсник, теореми про активний чотиріполусник, а також на лінеаризації ВАХ нелінійних елементів. Метод, оснований на теоремі про активний двополюсник, застосовується для розрахунку кола з одним нелінійним елементом. Якщо в колі два НЕ, то можна скористатись теоремою про активний чотиріполусник. Метод лінеаризації ВАХ НЕ використовують за умови, що вони мають ділянки, близькі до лінійних.

Метод активного двополюсника

Відомими вважаються ЕРС або струм джерела, параметри лінійних елементів, схема з'єднань елементів кола, а також ВАХ НЕ. Метод поділяється на такі етапи розрахунку:

1) виключаємо із схеми вітку з НЕ. Отримане коло буде лінійним (рис. 1.15,а). Використовуючи відомі методи розрахунку лінійного кола, знаходимо напругу неробочого ходу U_{ab0} на затискачах, до яких був підключений НЕ;

2) вилучаємо із схеми джерела напруги і (або) струму, замінюючи їх відповідними внутрішніми опорами чи провідностями, розраховуємо вхідний опір пасивного лінійного двополюсника R_{BXab} (рис. 1.15,б).

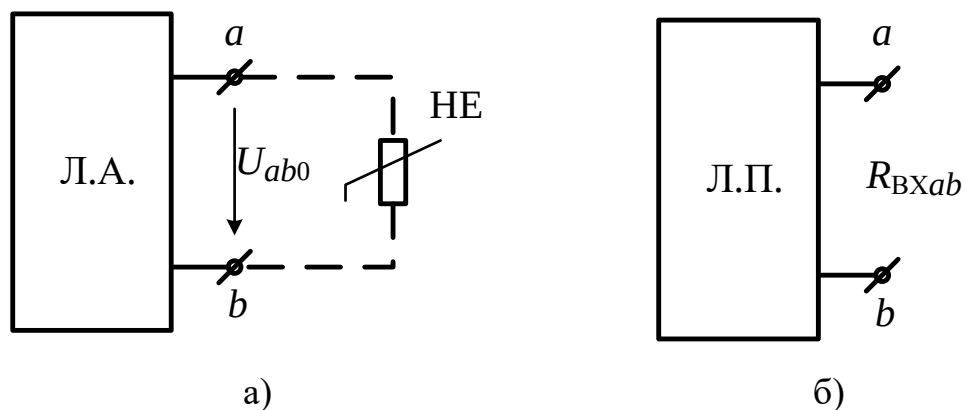


Рис. 1.15

Виходячи з теореми про активний двополюсник, лінійний активний двополюсник рис. 1.15,а замінюють еквівалентним генератором, ЕРС якого $E_{\text{ЕКВ}} = U_{ab0}$ і внутрішній опір $R_{\text{ЕКВ}} = R_{BXab}$. Вмикаємо на отриманий еквівалентний генератор нелінійний елемент і отримаємо схему рис. 1.16.

Нехай ВАХ НЕ зображена на рис. 1.17. Струм в колі рис. 1.15,а можна знайти двома способами:

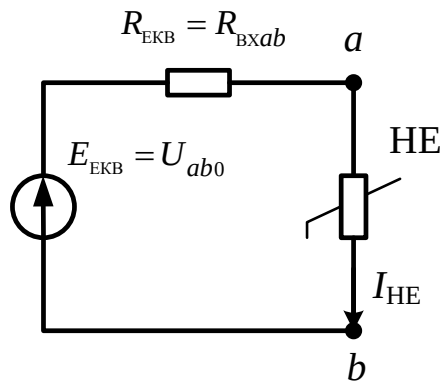


Рис. 1.16

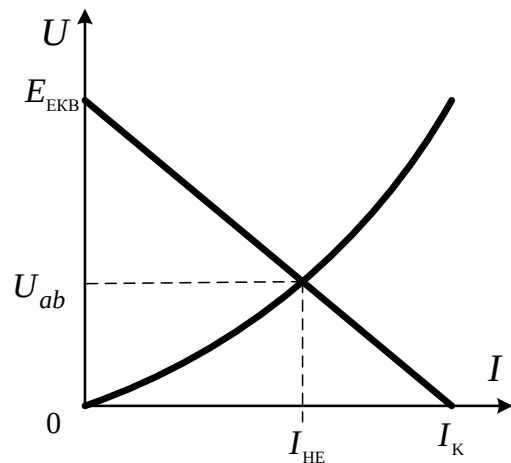


Рис. 1.17

1. Користуючись графічним методом (див. п.1.4.1), побудувати воль-амперну характеристику $U(I)$ всього кола відносно джерела $E_{\text{ЕКВ}}$ і знайти точку перетину характеристики $U(I)$ і $E_{\text{ЕКВ}}$.

2. Побудувати залежність для лінійного активного двополюсника, в який входять $E_{\text{ЕКВ}}$ і $R_{\text{ЕКВ}}$. У відповідності з рівнянням для цієї ділянки кола маємо:

$$U_{ab}(I) = E_{\text{ЕКВ}} - R_{\text{ЕКВ}} I, \quad I_K = E_{\text{ЕКВ}} / R_{\text{ЕКВ}}.$$

Точка перетину ВАХ лінійного активного двополюсника і НЕ визначає напругу U_{ab} і струм кола $I_{\text{НЕ}}$. За знайденими значеннями U_{ab} і $I_{\text{НЕ}}$ знаходимо статичний опір нелінійного елемента:

$$R_{\text{СТНЕ}} = \frac{U_{ab}}{I_{\text{НЕ}}}.$$

Визначивши $R_{\text{СТНЕ}}$ і приймаючи до уваги, що параметри лінійних елементів відомі, можемо знайти рішення для інших струмів схеми.

Задача 1.4. У колі, показаному на рис. 1.18 відомо: $E_1 = 250 \text{ В}$, $E_2 = 50 \text{ В}$, $J = 2 \text{ А}$, $R_1 = 150 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $R_3 = 120 \text{ Ом}$,

$R_4 = 180 \text{ Ом}$, $R_5 = 60 \text{ Ом}$. Вольт-амперна характеристика нелінійного опору задана у таблиці 1.8. Розрахувати струм нелінійного елементу I .

Таблиця 1.8

$U, \text{В}$	0	40	70	95	110	150	170
$I, \text{А}$	0	0,25	0,5	0,75	1	1,75	2,5

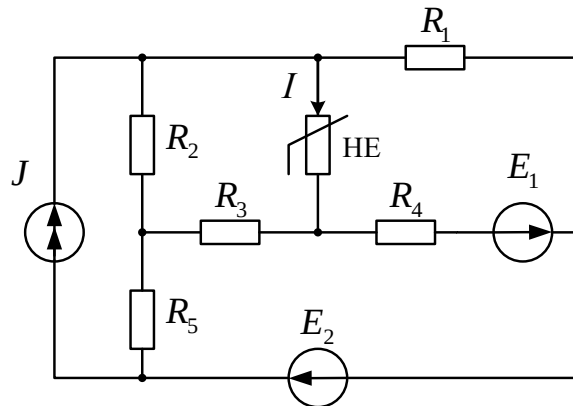


Рис. 1.18

Розв'язання. Схема має один нелінійний елемент, тому для її розрахунку застосовуємо метод еквівалентного генератора. Після вилучення вітки з нелінійним опором схема набуде вигляду, показаного на рис. 1.19. Відносно затискачів 1-2 вона являє собою активний лінійний двополіусник.

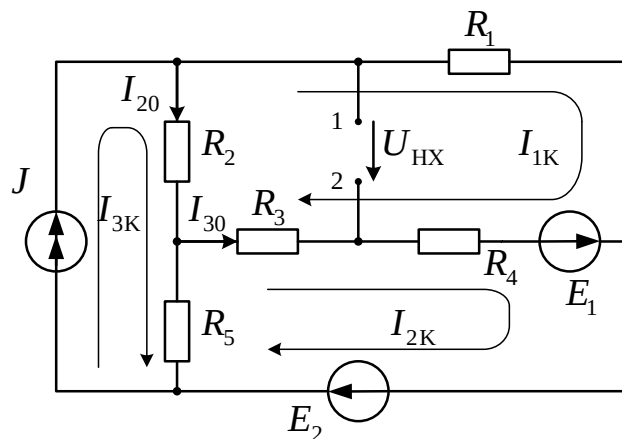


Рис. 1.19

Визначимо напругу U_{HX} між входними клемми двополіусника 1-2, застосовуючи 2-й закон Кірхгофа

$$U_{\text{HX}} = I_{20}R_2 + I_{30}R_3.$$

Для знаходження струмів I_{20}, I_{30} скористаємось методом контурних струмів. Контурний струм $I_{3К}$ відомий: $I_{3К} = J = 2$ А. Тому необхідно визначити тільки струми $I_{1К}, I_{2К}$.

Складемо рівняння для контурів з невідомими контурними струмами

$$\begin{cases} I_{1К} (R_1 + R_4 + R_3 + R_2) - I_{2К} (R_4 + R_3) - JR_2 = -E_1, \\ -I_{1К} (R_4 + R_3) + I_{2К} (R_4 + R_3 + R_5) - JR_5 = E_1 + E_2. \end{cases}$$

Після підстановки чисельних даних будемо мати

$$\begin{cases} 550I_{1К} - 300I_{2К} = -50, \\ -300I_{1К} + 360I_{2К} = 420. \end{cases}$$

З останньої системи рівнянь розрахуємо контурні струми $I_{1К} = 1$ А, $I_{2К} = 2$ А. Далі визначимо струми I_{20}, I_{30} :

$$I_{20} = I_{3К} - I_{1К} = 2 - 1 = 1 \text{ А}, \quad I_{30} = I_{2К} - I_{1К} = 2 - 1 = 1 \text{ А}.$$

Знайдемо напругу між вхідними клемми двополюсника $U_{НХ}$:

$$U_{НХ} = I_{20}R_2 + I_{30}R_3 = 1 \cdot 100 + 1 \cdot 120 = 220 \text{ В}.$$

Вилучимо із схеми джерела енергії (рис. 1.20,а) і розрахуємо вхідний опір двополюсника.

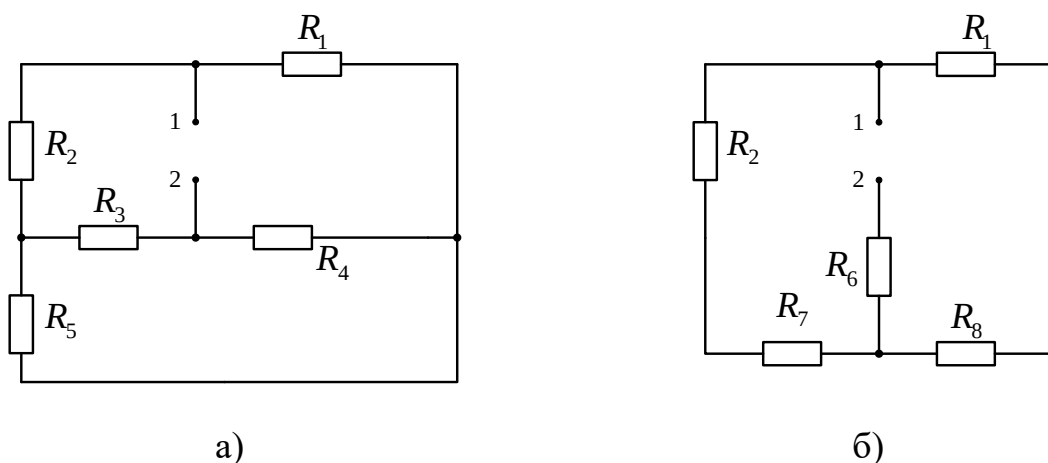


Рис. 1.20

Для цього попередньо перетворимо трикутник опорів R_3, R_4, R_5 на еквівалентну зірку R_6, R_7, R_8 :

$$R_6 = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{120 \cdot 180}{120 + 180 + 60} = 40 \text{ Ом},$$

$$R_7 = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{120 \cdot 60}{120 + 180 + 60} = 20 \text{ Ом},$$

$$R_8 = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{180 \cdot 60}{120 + 180 + 60} = 30 \text{ Ом}.$$

Вхідний опір двополюсника відносно клем 1 і 2 дорівнює:

$$R_{\text{BX}} = R_6 + \frac{(R_1 + R_8) \cdot (R_2 + R_7)}{R_1 + R_2 + R_7 + R_8} = 40 + \frac{180 \cdot 120}{300} = 112 \text{ Ом}.$$

Обчисливши значення U_{HX} , R_{BX} , складемо відповідну схему (рис. 1.21).

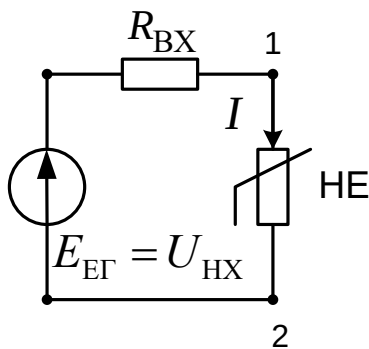


Рис. 1.21

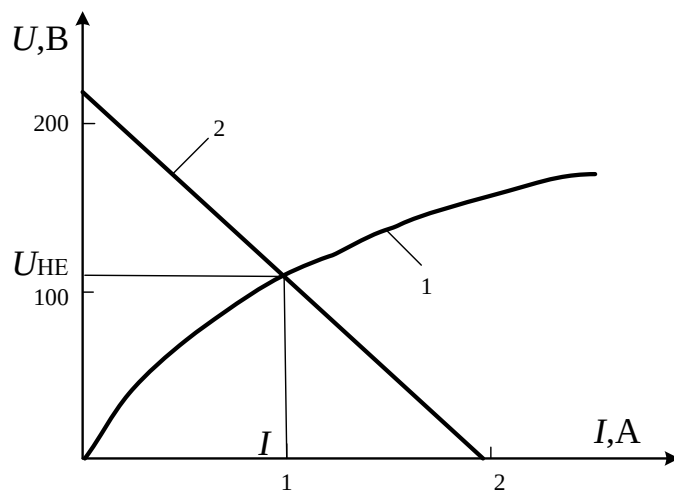


Рис. 1.22

Графічне розв'язання задачі наведено на рис. 1.22. В одній координатній площині будовані вольт-амперні характеристики нелінійного елемента (рис. 1.22, крива – 1) і лінійного активного двополюсника (рис. 1.22, крива -2), в який входять $E_{\text{ЕГ}}$ і R_{BX} . У відповідності з рівнянням для цієї ділянки кола маємо:

$$U_{12}(I) = E_{\text{ЕГ}} - R_{\text{BX}} I.$$

ВАХ двополюсника будемо по двом точкам: $E_{\text{ЕГ}} = 220 \text{ В}$ коли $I=0$ і $I_{\text{К}} = E_{\text{ЕГ}}/R_{\text{ВХ}} = 220/112 = 1,96 \text{ А}$ для $U=0$. Точка перетину ВАХ лінійного активного двополюсника і НЕ визначає напругу $U_{\text{НЕ}} = 110 \text{ В}$ і струм нелінійного елемента $I = 1 \text{ А}$.

Відповідь: $I = 1 \text{ А}$.

Завдання на розрахунково-графічну роботу

«Нелінійне електричне коло постійного струму»

Задача 1. Для кола показаного на рис. 1.23 відомі значення ЕРС джерел E_1 , E_2 , опір лінійного елемента R і вольт-амперна характеристика нелінійного елемента. Значення E_1 , E_2 і R наведені у таблиці 1.10, ВАХ нелінійного елемента – у таблиці 1.11.

Необхідно:

1. Розрахувати всі струми у нелінійному колі (рис. 1.23). Правильність розрахунків перевірити за балансом потужностей. Розв'язати задачу методом двох вузлів.

Таблиця 1.10

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_1, \text{В}$	60	30	20	50	48	24	50	20	42	40
$E_2, \text{В}$	20	60	40	30	24	48	25	50	‘1	20
$R, \text{Ом}$	20	15	20	12	16	10	10	20	15	12

Таблиця 1.11

$U, \text{В}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	150
$I, \text{А}$	0	1	1,75	2,25	2,75	3,2	3,5	3,8	4	4,3	4,5	5	5,7	6,3	7

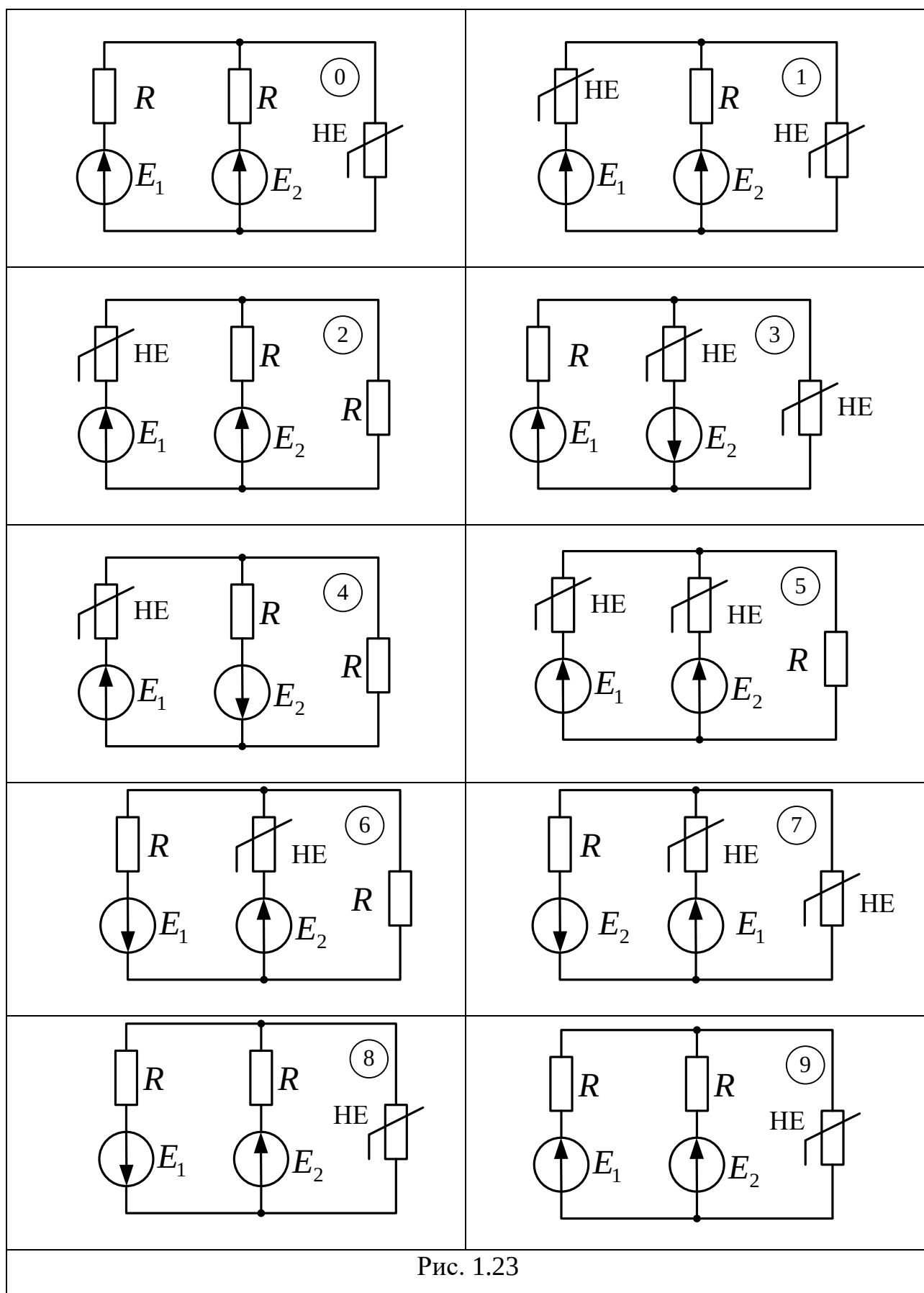


Рис. 1.23

Задача 2. У електричному колі (рис. 1.24) діють джерела ЕРС E_1 , E_2 і джерело струму J . Значення ЕРС і струму джерел наведені у таблиці 1.12, значення опорів лінійних елементів – у таблиці 1.13. Вольт-амперні характеристики нелінійного елемента задані таблицями 1.14 і 1.15.

Необхідно:

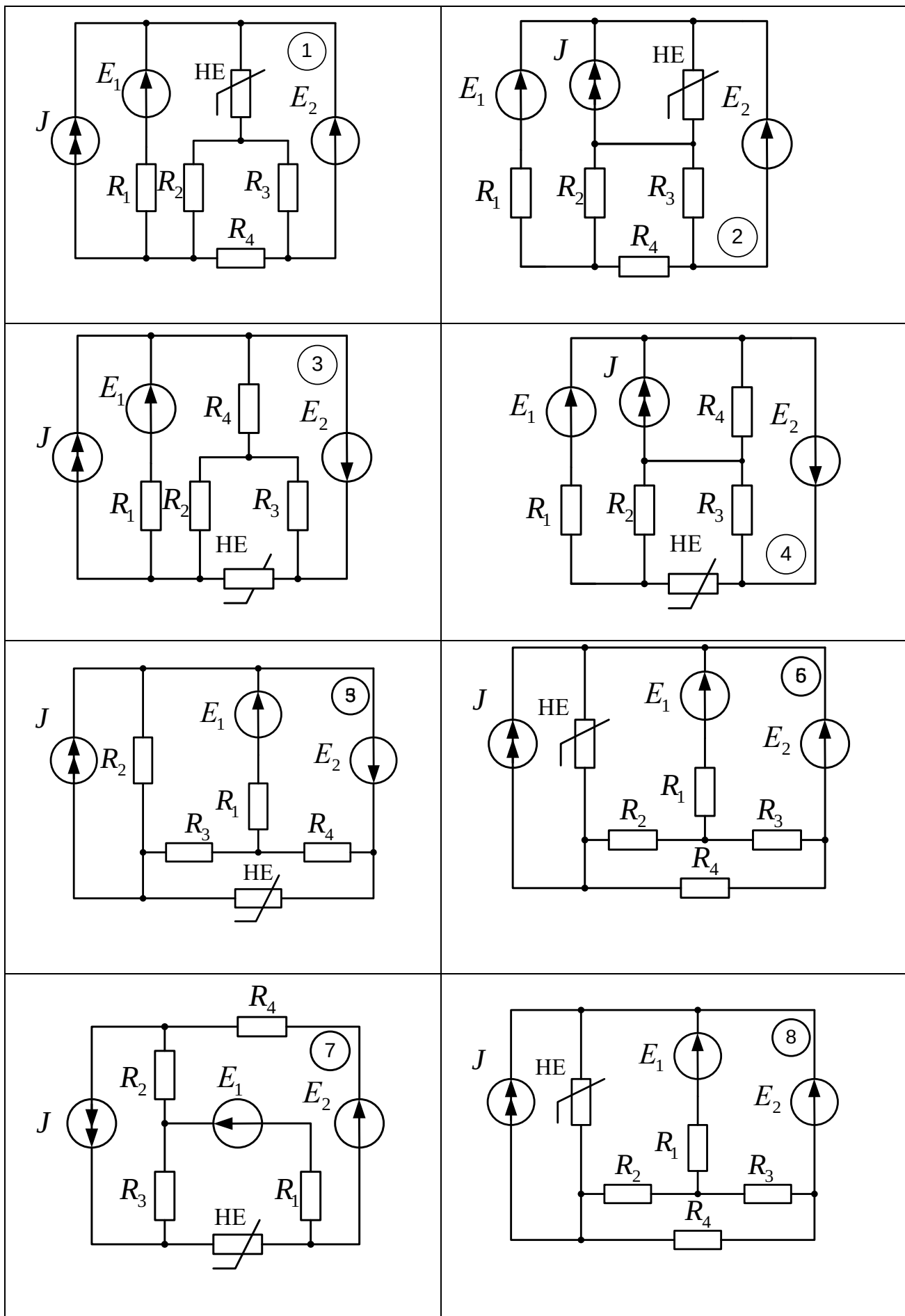
1. Визначити струм і напругу нелінійного елемента.
2. Розрахувати всі струми у нелінійному колі. Правильність розрахунків перевірити за балансом потужностей. Розв'язати задачу методом еквівалентного генератора.

Таблиця 1.12

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_1, \text{В}$	30	40	50	60	70	30	40	50	60	30
$E_2, \text{В}$	60	50	40	30	20	60	50	40	30	20
$J, \text{А}$	2	2,5	3	3,5	4	5	3	3,5	4	4,5

Таблиця 1.13

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$R_1, \text{Ом}$	10	15	20	25	30	40	45	50	35	25
$R_2, \text{Ом}$	15	20	25	30	35	40	45	20	25	30
$R_3, \text{Ом}$	20	25	30	35	40	45	50	45	40	30
$R_4, \text{Ом}$	25	30	35	40	45	50	55	50	45	40



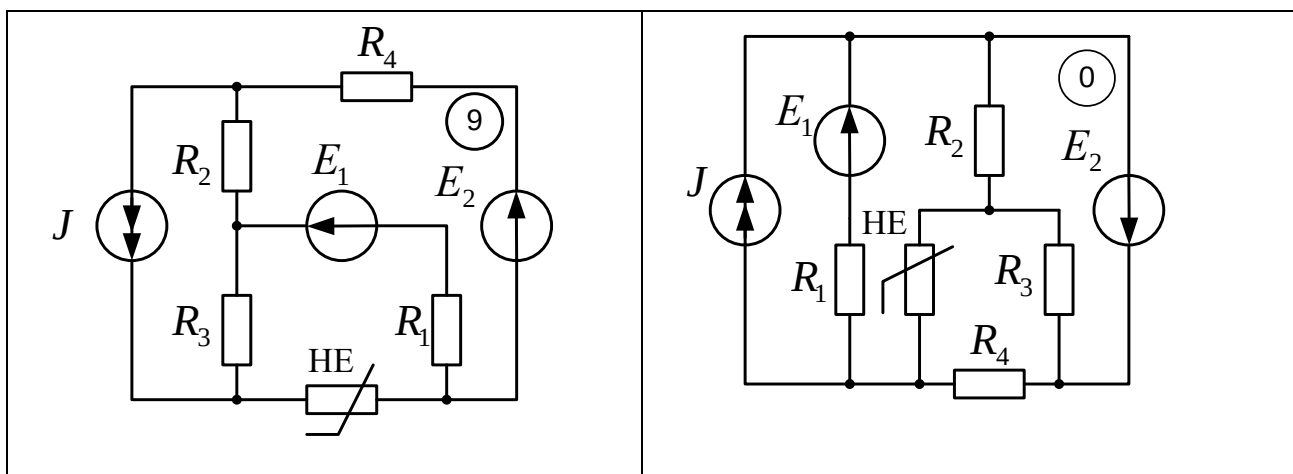


Рис. 1.24

Для парних варіантів

Таблиця 1.14

$U, \text{В}$	0	25	40	56	80	111	150
$I, \text{А}$	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5

Для непарних варіантів

Таблиця 1.15

$U, \text{В}$	0	35	60	82	100	114	125	144	150
$I, \text{А}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	4,5

Розділ II. НЕЛІНІЙНІ МАГНІТНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Загальні положення

Сукупність пристроїв, що містять феромагнітні тіла і утворюють замкнене коло, в якому за наявності магніторушійної сили F утворюється магнітний потік Φ , називають **магнітним колом**.

Магнітна властивість речовини характеризується абсолютною магнітною проникністю μ_a і для зручності її порівнюють із магнітною властивістю вакууму, яка характеризується магнітною сталою $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Відношення $\mu_a / \mu_0 = \mu_r$ називають відносною магнітною проникністю середовища. За магнітними властивостями речовини поділяють на 3 групи:

- 1) діамагнітні ($\mu_r < 1$);
- 2) парамагнітні ($\mu_r > 1$);
- 3) феромагнітні ($\mu_r = 10^4 \dots 10^6$).

В електричних машинах, трансформаторах, електромагнітних апаратах та приладах для збільшення магнітного потоку у певних частинах пристроїв використовують феромагнітні матеріали.

Розглянемо основні величини, що характеризують магнітне поле.

1. Магнітна індукція $\vec{B}$ (Тл) - це векторна величина, яка визначає силу, що діє у даній точці з боку магнітного поля на рухомі заряди. Потрібно пам'ятати фундаментальний принцип неперервності магнітних ліній: лінії магнітної індукції, не мають ні початку ні кінця - вони завжди замкнені. У природі не існує магнітних зарядів.

2. Магнітний потік Φ (Вб) - потік вектора магнітної індукції $\vec{B}$ через деяку поверхню S : $\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$. Оскільки лінії магнітної індукції неперервні та

замкнені, потік вектора магнітної індукції скрізь замкнену поверхню дорівнює нулю

$$\overline{\Phi} = \oint_S \overline{B} d\overline{S} = 0.$$

3. Намагніченість $\overline{M}$ (А/м) - магнітний момент одиниці об'єму речовини. Намагнічуваність характеризує стан речовини, коли вона намагнічується.

4. Напруженість магнітного поля $\overline{H}$ (А/м) - кількісна характеристика магнітного поля.

Основні характеристики магнітного поля для ізотропного середовища поєднані співвідношеннями

$$\overline{B} = \mu_a \overline{H} = \mu_0 \mu_r \overline{H}.$$

Слід відзначити, що напрямки векторів $\overline{B}$ та $\overline{H}$ не завжди збігаються. Вони можуть відрізнятися в анізотропних матеріалах, де значення μ_a залежить від напрямку вектора $\overline{H}$. Більшість практичних обчислень виконують з припущенням того, що середовище є ізотропним і напрямки векторів $\overline{B}$ та $\overline{H}$ однакові. Характеристики магнітного поля також поєднані співвідношенням

$$\overline{B} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{M}).$$

Під час розрахунків магнітних кіл звичайно використовують дві величин - B та H . Намагніченість M , як правило, не використовують; у разі необхідності її величину, що відповідає певним значенням B та H , завжди можна знайти за вище наведеною формулою.

Для феромагнітних матеріалів залежність між B та H не має точного аналітичного виразу. Якщо задати залежність $B = f(H)$ наближеним аналітичним виразом, то розрахунки стають громіздкими, а отримані результати важко аналізувати. У зв'язку з цим для розрахунку магнітного

кола використовують залежність між B та H , отриману дослідним шляхом та зображену у вигляді гістерезису або кривої намагнічування.

Якщо у магнітному колі електричної машини або апарату є феромагнітний матеріал, то магнітний потік у колі за тієї ж самої магніторушійної сили буде значно більшим ніж за відсутності феромагнітного матеріалу. Крім того, введення феромагнітного матеріалу у магнітне коло дозволяє зосередити магнітне поле у заданій області простору і надати йому певну конфігурацію.

2.2 Аналогія між величинами, що характеризують магнітні та електричні кола

Між величинами, що характеризують магнітні та електричні кола, існує формальна аналогія, яка дозволяє ввести для магнітних кіл ряд понять, аналогічних поняттям, притаманним електричним колом. Ця аналогія розповсюджується також на методи розрахунку кіл.

1. Магнітний потік Φ у магнітному колі аналогічний струму I в електричному колі.

2. Магніторушійна сила (МРС) $F = IW$ (W - кількість витків у обмотці пристрою, I - струм, що тече по ній) аналогічна електрорушійній силі (ЕРС) e в електричному колі:

$$F = IW = \oint \bar{H} d\bar{l}, \text{ А} \cdot \text{вит}; \quad e = \oint \bar{E} d\bar{l}, \text{ В.}$$

Аналогія полягає у тому, що МРС F збуджує у магнітному колі магнітний потік Φ , подібно до того, як ЕРС e створює в електричному колі струм I . МРС є величиною напрямленою. Слід відзначити, що ЕРС існує й за відсутності струму в електричному колі, на відміну від МРС, існування якої завжди пов'язане з одночасним існуванням струму.

3. Магнітна напруга аналогічна електричній напрузі:

$$U_{Mab} = \int_a^b \overline{H} d\bar{l}, \text{ А;} \quad U_{ab} = \int_a^b \overline{E} d\bar{l}, \text{ В.}$$

Визначаючи магнітну напругу U_{Mab} необхідно пам'ятати:

а) якщо на ділянці магнітного кола між точками a і b напруженість $\overline{H} = \text{const}$ і

її напрям збігається з напрямком елементу шляху $d\bar{l}$, то

$$U_{Mab} = \int_a^b \overline{H} d\bar{l} = H \int_a^b d\bar{l} = H l_{ab},$$

де l_{ab} - довжина шляху між точками a і b ;

б) якщо на ділянці кола між точками a і b $\overline{H} \neq \text{const}$, то шлях l_{ab} може бути поділений на n окремих частин таким чином, щоб для кожної k -ої частини $H_k = \text{const}$, тоді

$$U_{Mab} = \sum_{k=1}^n H_k l_k.$$

4. Магнітний опір аналогічний електричному нелінійному статичному опору:

$$R_M = \frac{U_M}{\Phi} = \frac{l}{\mu_a S}, \text{ Гн}^{-1}; \quad R_{CT} = \frac{U}{I} = \frac{l}{\rho S}, \text{ Ом.}$$

Оскільки у феромагнітних матеріалів магнітна проникність μ_a залежить від індукції B , то R_M буде змінною величиною. Якщо магнітне коло складається з ділянок з різною магнітною проникністю μ_a , то мова йде про магнітні опори ділянок кола.

5. Магнітна провідність аналогічна електричній провідності:

$$G_M = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu_a S}{l}, \text{ Гн;} \quad G = \frac{1}{R_{CT}} = \frac{\rho S}{l}, \text{ См.}$$

У загальному випадку R_M та G_M - функції магнітного потоку (змінні величини). Поняттями R_M та G_M користуються лише у випадках, коли магнітне коло в цілому або його ділянка, для якої визначаються R_M та G_M , не насичені (частіше за все це буває, коли у магнітному колі існує достатньо великий повітряний зазор).

2.3. Закони, що використовують для розрахунків магнітних кіл

1. **Закон повного струму.** Циркуляція вектора напруженості магнітного поля $\overline{H}$ по замкненому контуру l дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які охоплюються цим контуром

$$\oint \overline{H} d\overline{l} = \sum I.$$

Якщо контур інтегрування l охоплює W витків котушки зі струмом I , закон повного струму набуває вигляду

$$\oint \overline{H} d\overline{l} = IW = F.$$

2. **Перший закон Кірхгофа.** Алгебраїчна сума магнітних потоків у будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю:

$$\sum \Phi = 0.$$

3. **Другий закон Кірхгофа.** Алгебраїчна сума МРС, що діють у будь-якому контурі магнітного кола, дорівнює алгебраїчній сумі магнітних напруг у тому ж контурі

$$\sum F = \sum U_M = \sum Hl.$$

Другий закон Кірхгофа для магнітних кіл по суті являє собою іншу форму запису закону повного струму.

Зауваження. Закон Ома $U_M = R_M \Phi$ у більшості випадків не може бути застосований для розрахунку кіл оскільки магнітний опір R_M залежить від магнітного потоку.

2.4. Розрахунок магнітних кіл

Всі методи, які були розглянуті для аналізу нелінійного електричного кола постійного струму, можуть бути застосовані і для аналізу магнітних кіл, оскільки і електричні і магнітні кола підпорядковуються одним й тим самим законам – законам Кірхгофа.

2.4.1. Припущення, прийняті при розрахунках магнітних кіл

Магнітний потік, створений струмом у обмотці, має два складники – основний потік і потік розсіювання. Оскільки потік розсіювання розподіляється по осердю нерівномірно, то у різних перерізах навіть нерозгалуженого осердя значення магнітного потоку різне. Тому при розрахунку магнітного кола необхідного виходити із такого припущення: магнітним потоком розсіювання можна знехтувати і вважати, що магнітний потік однаковий в усіх поперечних перерізах нерозгалуженого магнітопроводу, а також в усіх перерізах окремої гілки розгалуженого магнітопроводу.

Крім цього, у будь-якій площині поперечного перерізу магнітопроводу будемо вважати розподіл значень вектора магнітної індукції і вектора магнітної напруженості однорідними. Це дозволяє вести розрахунок магнітного кола по довжині середньої лінії магнітопроводу.

2.4.2. Розрахунок нерозгалуженого магнітного кола

Розрахунок нерозгалуженого магнітного кола поділяють на два типи задач – на **прямую і зворотню**.

Пряма задача: відомий магнітний потік Φ або магнітна індукція B на будь-якій ділянці кола. Необхідно визначити струм I або МРС $F = IW$, яка створює задане значення Φ або B . Геометричні розміри осердя, крива намагнічення сталі та число витків W задані.

Послідовність розрахунку прямої задачі.

1. Приймаючи до уваги, що магнітний потік у всіх ділянках магнітопроводу однаковий, визначаємо магнітну індукцію ділянок $B_k = \frac{\Phi}{S_k}$. Оскільки випучування невраховані, то переріз повітряного зазору такий саме, що і відповідної ділянки магнітопроводу $S_{\text{пз}} = S_k$. Тому $B_{\text{пз}} = B_k$.
2. За розрахованими значеннями B_k визначаємо відповідні значення напруженості магнітного поля в осерді H_k , користуючись залежністю $B(H)$.

Для повітряного зазору $H_{\text{пз}} = \frac{B_{\text{пз}}}{\mu_0}$.

3. Знаходимо спади магнітних напруг на всіх ділянках магнітопроводу та в повітряному зазорі $H_k \cdot l_k, H_{\text{пз}} \cdot l_{\text{пз}}$.
4. Визначаємо МРС як суму спадів магнітних напруг на всіх ділянках магнітопроводу

$$H_{\text{пз}} l_{\text{пз}} + \sum_{k=1}^n H_k l_k = F = IW.$$

Задача 2.1. На рис. 2.1 представлено дросель, що є котушкою з числом

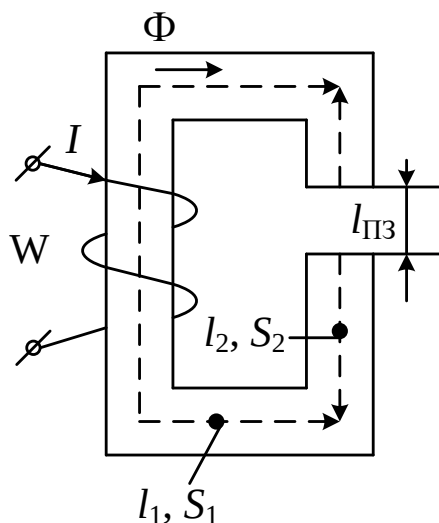


Рис. 2.1

витків $W=500$, намотаною на осердя з електротехнічної сталі 1512, крива намагнічування якої наведена у таблиці 2.1. В осерді є повітряний зазор.

Розміри осердя: $l_1 = 70$ см, $l_2 = 30$ см, $l_{ПЗ} = 0,5$ см, $S_1 = 10$ см², $S_2 = 15$ см². Знайти струм, який створює в осерді магнітний потік $\Phi = 14 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Таблиця 2.1

В, Тл	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
Н, А/см	0,25	0,5	0,65	0,8	0,95	1,15	1,5	2	3
В, Тл	1,2	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65
Н, А/см	4,65	7,4	9	12	15	22	33	49	90

Розв'язання.

1. Оскільки магнітний потік у всіх ділянках магнітопроводу однаковий, визначаємо магнітну індукцію ділянок:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{14 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1,4 \text{ Тл}, \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{14 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-4}} = 0,93 \text{ Тл}.$$

Магнітна індукція у повітряному зазорі $B_{ПЗ} = B_2 = 0,93$ Тл.

2. Визначаємо напруженість поля H на кожній ділянці кола: за кривою намагнічування (див. табл. 2.1) знаходимо для $B_1 = 1,4$ Тл значення $H_1 = 12$ А/см та для $B_2 = 0,93$ Тл значення H_2 розраховуємо, користуючись формулою лінійної інтерполяції $\frac{0,93 - 0,9}{1 - 0,9} = \frac{H_2 - 1,5}{2 - 1,5}$, звідки $H_2 = 1,5015$

A/см; напруженість магнітного поля у повітряному зазорі обчислюємо за формулою:

$$H_{\text{пз}} = \frac{B_2}{\mu_0} = \frac{0,93}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,93 = 7,44 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

3. Складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$F = IW = U_{\text{м1}} + U_{\text{м2}} + U_{\text{пз}} = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\text{пз}} l_{\text{пз}}.$$

4. Знаходимо магнітні напруги на ділянках кола:

$$U_{\text{м1}} = H_1 l_1 = 12 \cdot 70 = 840 \text{ А};$$

$$U_{\text{м2}} = H_2 l_2 = 1,5015 \cdot 30 = 45 \text{ А};$$

$$U_{\text{пз}} = H_{\text{пз}} l_{\text{пз}} = 7,44 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 372 \text{ А.}$$

5. Шуканий струм в обмотці визначаємо з рівняння:

$$I = \frac{H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_{\text{пз}} l_{\text{пз}}}{W} = \frac{2257}{500} = 2,514 \text{ А.}$$

За обчисленими магнітними напругами $U_{\text{м1}}$, $U_{\text{м2}}$, $U_{\text{м0}}$ можна розрахувати магнітні опори ділянок кола, скориставшись для цього законом Ома:

$$R_{\text{м1}} = \frac{U_{\text{м1}}}{\Phi} = \frac{840}{14 \cdot 10^{-4}} = 60 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$R_{\text{м2}} = \frac{U_{\text{м2}}}{\Phi} = \frac{45}{14 \cdot 10^{-4}} = 3,2 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$R_{\text{м0}} = \frac{U_{\text{м0}}}{\Phi} = \frac{372}{14 \cdot 10^{-4}} = 26,57 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн}.$$

Як видно з розрахунків, основну частину магнітного опору усього кола складає опір повітряного зазору.

Відповідь: $I = 2,514 \text{ А.}$

Обернена задача: відомий струм I у обмотці або МРС $F = IW$. Визначити магнітний потік Φ або магнітну індукцію B на певній ділянці кола. Геометричні розміри осердя, крива намагнічування та кількість витків у котушці відомі.

Послідовність розрахунку оберненої задачі.

1. Вибираємо довільне значення магнітного потоку Φ' в осерді, але таке, щоб значення індукції в ділянках магнітопроводу знаходилося в робочих межах.

2. Знаходимо магнітні індукції на ділянках магнітопроводу B_k' для вибраного потоку $B_k' = \frac{\Phi'}{S_k}, B_3' = \frac{\Phi'}{S_3} = B_{пз}'$. За вебер-амперною характеристикою визначаємо відповідні значення напруженостей магнітного поля $B_k' \rightarrow H_k'$, для повітряного зазору $H_{пз}' = \frac{B_3'}{\mu_0}$.

3. Знаходимо суму спадів магнітної напруги на всіх ділянках магнітопроводу для першого значення потоку Φ'

$$H_{пз}'l_{пз} + \sum H_k'l_k = U_M'.$$

4. Порівнюємо суму спадів магнітної напруги із заданою в умові МРС обмотки F . Порівнявши U_M' і МРС обмотки F , встановлюємо, яке наступне значення магнітного потоку треба взяти. Якщо U_M' менше МРС, то потрібно взяти більший магнітний потік Φ'' порівняно із Φ' та виконати такі самі розрахунки, що й у пунктах 1-3. Знову виконати порівняння U_M'' із МРС обмотки F . Якщо величина знову менша, то треба знову збільшувати магнітний потік.

5. За отриманими значеннями U_M й Φ , будуємо саму залежність $\Phi(U_M)$ (рис. 2.2). Використовуючи задане в умові значення МРС F за графіком знаходимо величину магнітного потіка Φ .

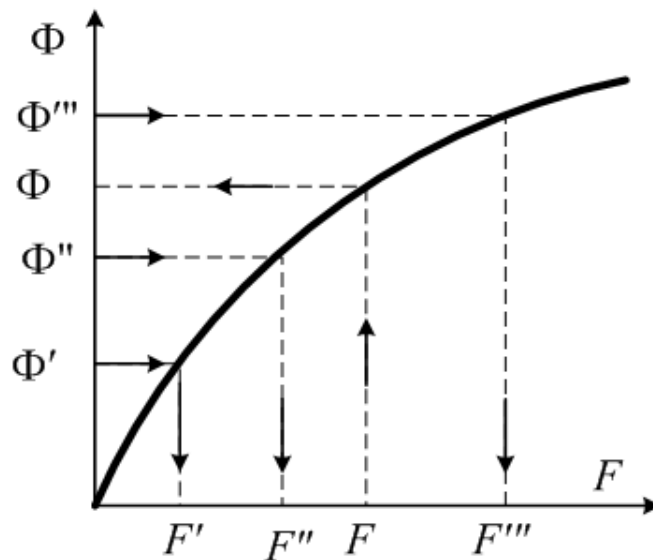


Рис. 2.2

Задача 2.2. Для магнітного кола (рис. 2.1) відомо: $l_1 = 70$ см, $l_2 = 30$ см, $l_{\text{пз}} = 0,15$ см, $S_1 = 10$ см², $S_2 = 15$ см². Число витків $W = 600$. Визначити магнітний потік в осерді Φ , якщо по обмотці протікає струм $I = 1$ А.

Розв'язання.

1. За відомими значеннями I та W обчислюємо МРС $F = IW = 600$ А·вит.

2. Будуємо графік залежності $\Phi = f(F = IW)$:

а) задаємося наближеним значенням магнітного потоку Φ' (доцільно знайти

Φ' з виразу $\Phi' = \frac{U_M}{R_M} = IW \cdot \frac{\mu_0 S_2}{l_{\text{пз}}}$):

$$\Phi' = 300 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 11,3097 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

б) розраховуємо магнітну індукцію B' ділянок кола, яка відповідає обраному значенню Φ' :

$$B'_1 = \frac{\Phi'}{S'_1} = \frac{11,3 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1,13 \text{ Тл};$$

$$B_2' = \frac{\Phi'}{S_2'} = \frac{11,3 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-4}} = 0,753 \text{ Тл};$$

$$B_0' = \frac{\Phi'}{S_2'} = \frac{11,3 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-4}} = 0,753 \text{ Тл}.$$

в) визначаємо на всіх ділянках кола напруженість поля H' , яка відповідає обраному значенню магнітного потоку Φ' :

- за кривою намагнічування (див. табл. 2.1) для $B_1' = 1,13$ Тл знаходимо

$$\text{напруженість } \frac{1,13 - 1,1}{1,2 - 1,1} = \frac{H_1' - 3}{4,65 - 3}, \text{ звідки } H_1' = 3,495 \text{ А/см};$$

- за кривою намагнічення для $B_2' = 0,753$ Тл знаходимо

$$\frac{0,753 - 0,7}{0,8 - 0,7} = \frac{H_2' - 0,95}{1,15 - 0,95} \quad H_2' = 1,056 \text{ А/см};$$

- за формулою $H_0' = \frac{B_0'}{\mu_0}$ розраховуємо H_0' :

$$H_0' = \frac{B_0'}{\mu_0} = \frac{0,753}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 602,4 \cdot 10^3 \text{ А/м};$$

г) обчислюємо магнітні напруги U_M' , які відповідають вибраному значенню Φ' :

$$U_{M1}' = H_1' l_1 = 3,495 \cdot 70 = 244,65 \text{ А};$$

$$U_{M2}' = H_2' l_2 = 1,056 \cdot 30 = 31,68 \text{ А};$$

$$U_{M0}' = H_0' l_{\text{ПЗ}} = 602,4 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} = 899,225 \text{ А}.$$

д) використовуючи рівняння (3.1), знаходимо значення МРС F' , яке відповідає обраному Φ' :

$$F' = U_{M1}' + U_{M2}' + U_{M0}' = 244,65 + 31,68 + 899,225 = 1176 \text{ А}.$$

Таким чином, отримуємо першу точку характеристики $\Phi=f(F)$ з координатами $\Phi' = 11,3097 \cdot 10^{-4}$ Вб, $F' = 1176$ А.

З отриманого результату видно, що розрахована МРС F' набагато перевищує задане в умові $F=600$ А, тому наступне значення магнітного потоку Φ'' потрібно брати значно меншим.

Усі наступні розрахунки виконуємо аналогічно і зводимо їх до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

$\Phi \cdot 10^{-4}, \text{Вб}$	$B_1, \text{Тл}$	$B_2, \text{Тл}$	$H_1, \text{А/см}$	$H_2, \text{А/см}$	$H_0, \text{А/м}$	$H_1 l_1, \text{А}$	$H_2 l_2, \text{А}$	$H_0 l_{\text{пз}}, \text{А}$	$F, \text{А}$
11,3	1,13	0,753	3,495	1,056	$6 \cdot 10^5$	244,65	31,68	899,225	1176
9	0,9	0,6	1,5	0,8	$4,77 \cdot 10^5$	105	24	716,197	845,197
8	0,8	0,533	1,15	0,7	$4,24 \cdot 10^5$	80,5	21	636,62	738,12
7	0,7	0,467	0,95	0,6	$3,714 \cdot 10^5$	66,5	18	557,042	641,542
6	0,6	0,4	0,8	0,5	$3,183 \cdot 10^5$	56	15	477,465	548,465

За даними розрахунку будемо вебер-амперну характеристику кола $\Phi = f(F = \sum Hl)$ (рис. 2.3)

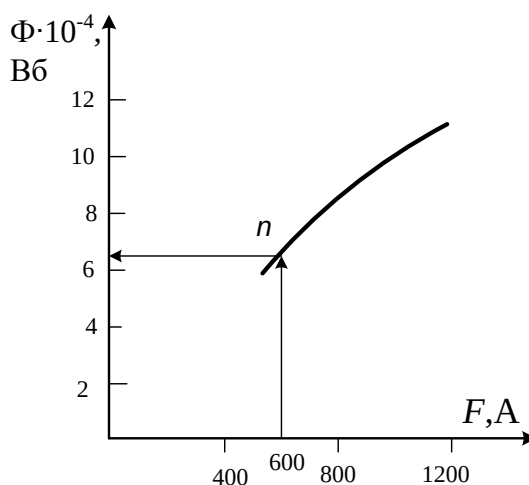


Рис. 2.3

2. По осі F відкладаємо розраховане у пункті 5 значення $F=600$ А і через цю точку проводимо пряму, паралельну осі Φ , до перетину з побудованою характеристикою у точці n . Проектуємо точку n на вісь Φ і визначаємо магнітний потік $\Phi = 6,4 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Для обчислення магнітних опорів ділянок кола при заданій МРС $F=600$ А, виконуємо такі розрахунки:

а) знаходимо магнітну індукцію на кожній ділянці кола при $\Phi' = 6,4 \cdot 10^{-4}$ Вб:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{6,4 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-4}} = 0,64 \text{ Тл};$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{6,4 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-4}} = 0,427 \text{ Тл};$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{6,4 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-4}} = 0,427 \text{ Тл}.$$

б) визначаємо напруженість H на ділянках кола:

за кривою намагнічення $B_1 = 0,64$ Тл відповідає $H_1 = 0,86$ А/см;

за кривою намагнічення $B_2 = 0,427$ Тл відповідає $H_2 = 0,54$ А/см;

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,427}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 339,8 \cdot 10^3 \text{ А/м};$$

в) розраховуємо магнітні напруги ділянок кола:

$$U_{M1} = H_1 l_1 = 0,86 \cdot 70 = 60,2 \text{ А};$$

$$U_{M2} = H_2 l_2 = 0,54 \cdot 30 = 16,2 \text{ А};$$

$$U_{M0} = H_0 l_0 = 339,8 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} = 509,7 \text{ А};$$

г) за законом Ома $U_M = R_M \Phi$, обчислюємо величини магнітних опорів:

$$R_{M1} = \frac{U_{M1}}{\Phi} = \frac{60,2}{6,4 \cdot 10^{-4}} = 9,4 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{Гн}};$$

$$R_{M2} = \frac{U_{M2}}{\Phi} = \frac{16,2}{6,4 \cdot 10^{-4}} = 2,53 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$R_{M0} = \frac{U_{M0}}{\Phi} = \frac{509,7}{6,4 \cdot 10^{-4}} = 79,64 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн}.$$

За відомими значеннями R_{M1} , R_{M2} можна визначити також магнітну проникність ділянок сталі:

$$R_{M1} = \frac{l_1}{\mu_1 S_1}, \text{ звідки } \mu_1 = \frac{l_1}{R_{M1} S_1} = \frac{70 \cdot 10^{-2}}{9,4 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 7,44 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м};$$

$$R_{M2} = \frac{l_2}{\mu_2 S_2}, \text{ звідки } \mu_2 = \frac{l_2}{R_{M2} S_2} = \frac{30 \cdot 10^{-2}}{2,53 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 11,85 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}.$$

Відповідь: $\Phi = 6,4 \cdot 10^{-4}$ Вб.

2.4.3. Розрахунок розгалужених магнітних кіл

2.4.3.1. Розрахунок симетричного магнітного кола

Розгалужені кола поділяють на симетричні та несиметричні. Магнітне коло зображене на рис. 2.4 симетричне: в ньому потік Φ_1 дорівнює потоку Φ_2 . Обидві його частини, розташовані ліворуч і праворуч від вертикальної пунктирної лінії, мають однакові в геометричні параметри, виготовлені з одного і того самого матеріалу та мають рівні магніторухійні сили $I_1 W_1 = I_2 W_2$.

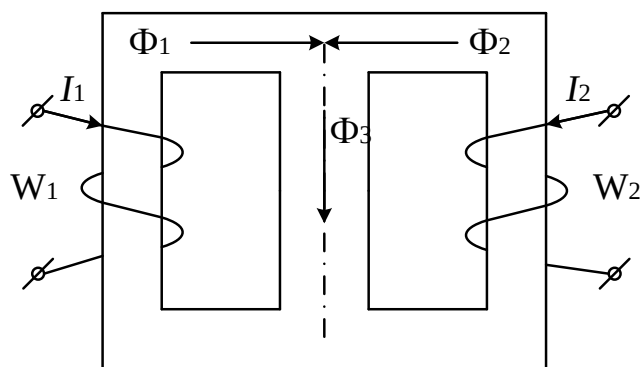


Рис. 2.4

Для розрахунку симетричного магнітного кола його спочатку необхідно поділити на два однакових нерозгалужених кола по осі симетрії і за наведеним вище алгоритмом провести розрахунок.

В кожному колі магнітні потоки $\Phi_1 = \Phi_2$, а магнітний потік середнього стрижня $\Phi_3 = 2\Phi_1 = 2\Phi_2$.

Якщо зробити $I_1W_1 \neq I_2W_2$, або змінити напрямок струму в одній з обмоток, або зробити повітряний зазор в одному з крайніх стрижнів магнітопроводу, то магнітне коло стане несиметричним. У несиметричному колі $\Phi_1 \neq \Phi_2$.

2.4.3.2. Розрахунок несиметричного магнітного кола

Магнітні та електричні кола підпорядковуються одним і тим самим законам - законам Кірхгофа, тому для розрахунку магнітних кіл застосовують вивчені раніше методи розрахунку нелінійних електричних кіл. На конкретному прикладі розглянемо розрахунок розгалуженого несиметричного магнітного кола методом двох вузлів.

Задача 2.3. Осердя магнітного кола (рис. 2.5) виготовлене з листової електротехнічної сталі 1512, крива намагнічування якої приведена у задачі 2.1. Розміри осердя $l_1 = l_3 = 33$ см, $l_2 = 11$ см, $l_{\text{пз}} = 0,1$ см, $S_1 = 12$ см², $S_2 = 24$ см², $S_3 = 16$ см². Намагнічувальні сили $I_1W_1 = 500$ А, $I_2W_2 = 1000$ А, $I_3W_3 = 750$ А. Визначити магнітні потоки на всіх ділянках.

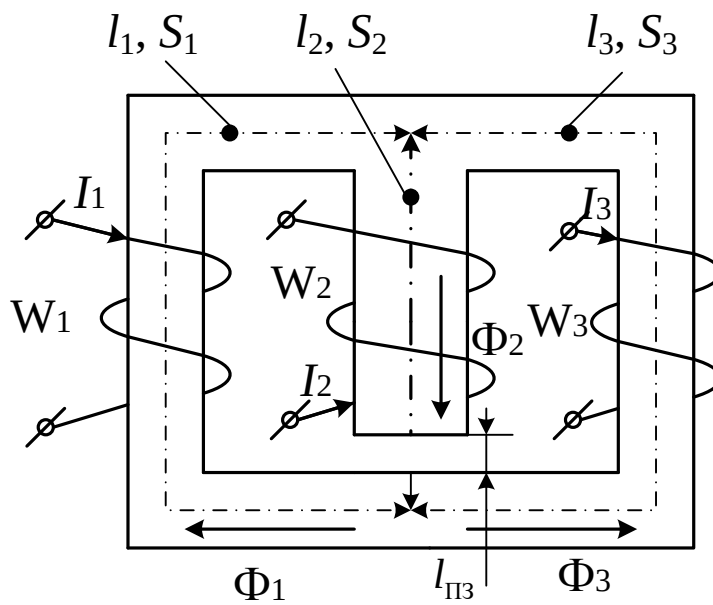


Рис. 2.5

Розв'язання.

1. Зобразимо магнітне коло схемою заміщення, в якій ферромагнітні ділянки кола представлені нелінійними опорами R_{M1} , R_{M2} , R_{M3} , а повітряний зазор – лінійним опором R_{M0} (рис. 2.6).

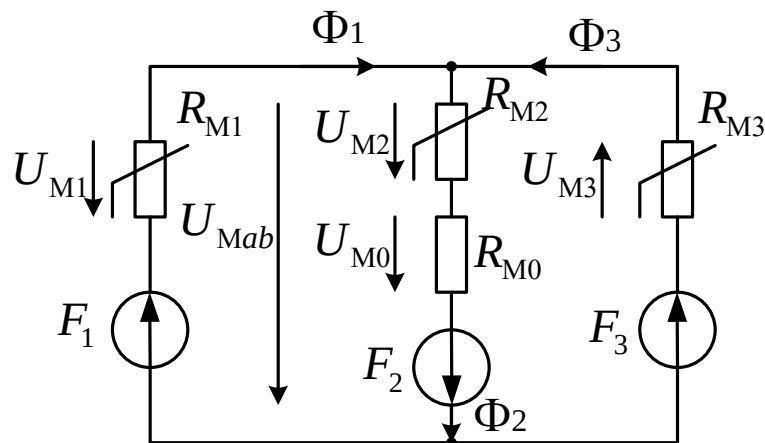


Рис. 2.6

2. Довільно задамо напрямки потоків Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 у вітках магнітного кола і вузлової напруги U_M і складемо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$\begin{cases} U_M = I_1 W_1 - H_1 l_1, \\ U_M = -I_2 W_2 + H_2 l_2 + H_0 l_{\text{ПЗ}}, \\ U_M = I_3 W_3 - H_3 l_3. \end{cases}$$

3. Представимо кожний магнітний потік як функцію магнітної напруги U_M , скориставшись рівняннями п.2:

$$\Phi_1 = f(U_M) = f(I_1 W_1 - H_1 l_1);$$

$$\Phi_2 = f(U_M) = f(-I_2 W_2 + H_2 l_2 + H_0 l_{\text{ПЗ}});$$

$$\Phi_3 = f(U_M) = f(I_3 W_3 - H_3 l_3).$$

4. Побудуємо графіки залежності магнітних потоків від магнітної напруги U_M . Задамо значення магнітної індукції B та виконаємо розрахунки за відомою з попередніх задач схемою:

$$B_1 \Rightarrow \Phi_1 = B_1 \cdot S_1,$$

$$B_1 \Rightarrow H_1 \Rightarrow H_1 l_1 \Rightarrow I_1 W_1 - H_1 l_1.$$

Для побудови вебер-амперної характеристики повторимо розрахунок 4-5 разів.

Аналогічні розрахунки виконаємо для побудови вебер-амперної характеристики правої гілки:

$$B_3 \Rightarrow \Phi_3 = B_3 \cdot S_3,$$

$$B_3 \Rightarrow H_3 \Rightarrow H_3 l_3 \Rightarrow I_3 W_3 - H_3 l_3.$$

і середньої гілки:

$$B_2 \Rightarrow \Phi_2 = B_2 \cdot S_2,$$

$$\begin{array}{ccccc} & & H_2 \Rightarrow H_2 l_2 & & \\ & \nearrow & & \searrow & \\ B_2 & & & & -I_2 W_2 + H_2 l_2 + H_0 l_{\text{ПЗ}}. \\ & \searrow & & \nearrow & \\ & & H_0 = \frac{B_2}{\mu_0} \Rightarrow H_0 l_{\text{ПЗ}} & & \end{array}$$

Значення H_1, H_2, H_3 визначаємо за кривою намагнічування сталі 1512, H_0 знаходимо із співвідношення

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_0 \text{ Вб.}$$

Усі розрахунки зводимо до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

$B,$ Тл	$H,$ А/см	$H_0 \cdot 10^3,$ А/см	$H_1 l_1 =$ $H_3 l_3,$ А	$\Phi_1 \cdot 10^{-4},$ Вб	$I_1 W_1 -$ $-H_1 l_1,$ А	$\Phi_2 \cdot 10^{-4},$ Вб	$-I_2 W_2 +$ $-H_2 l_2 +$ $H_0 l_{ПЗ},$ А	$\Phi_3 \cdot 10^{-4},$ Вб	$I_3 W_3 -$ $-H_3 l_3,$ А
0,4	0,5	3,2	16,5	4,8	484	9,6	-674,5	6,4	734
0,8	1,15	6,4	38	9,6	462	19,2	-347	12,8	712
1	2	8	66	12	434	24	-178	16	684
1,1	3	8,8	99	13,2	401	26,4	-87	17,6	651
1,2	4,65	9,6	153,5	14,4	346	28,8	11	19,2	597
1,3	7,4	10,4	244	15,6	256	31,2	121	20,8	506
1,4	12	11,2	396	16,8	104	33,6	252	22,4	354
1,45	15	11,6	495	17,4	5	34,8	325	23,2	255
1,5	22	12	726	18	-226	36	442	24	24
1,6	49	12,8	1617	19,2	-1117	38,4	819	25,6	-867

За результатами розрахунків у одній системі координат будуюмо графіки (рис. 2.7):

$$\Phi_1 = f(U_M) = f(I_1 W_1 - H_1 l_1);$$

$$\Phi_2 = f(U_M) = f(-I_2 W_2 + H_2 l_2 + H_0 l_{ПЗ});$$

$$\Phi_3 = f(U_M) = f(I_3 W_3 - H_3 l_3).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа $\Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_3$, тому додатково будуюмо графік $(\Phi_1 + \Phi_3)(U_M)$. Точка перетину А графіків $(\Phi_1 + \Phi_3)(U_M) = \Phi_2(U_M)$ визначає величину вузлової напруги $U_M = 400 \text{ В}$ і потік $\Phi_2 = 35,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$, а – потоки точки В і С $\Phi_1 = 13,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ і $\Phi_3 = 22,4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ відповідно.

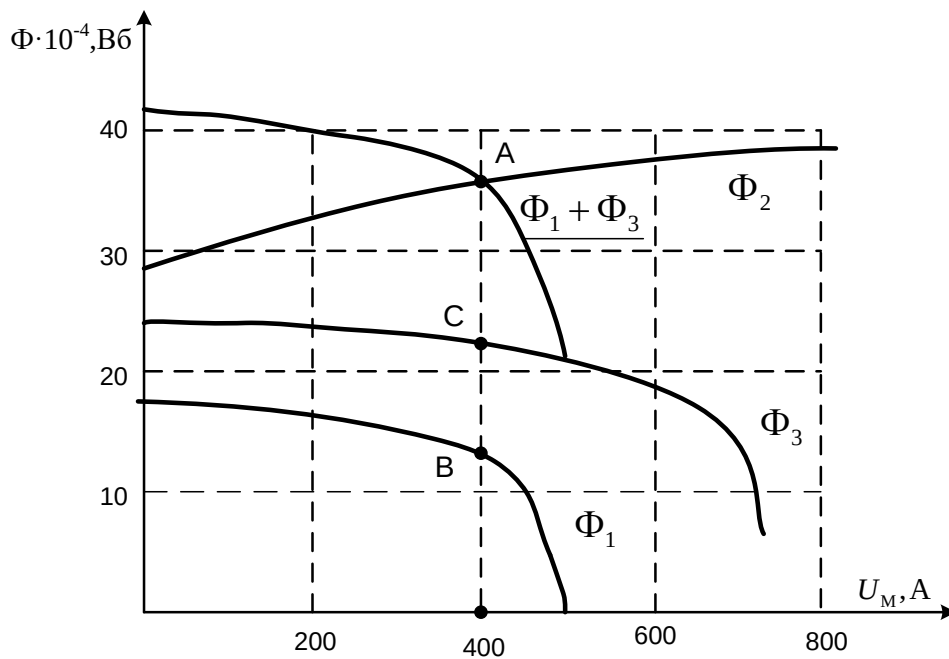


Рис. 2.7

Відповідь: $\Phi_1 = 13,2 \cdot 10^{-4}$ Вб, $\Phi_2 = 35,6 \cdot 10^{-4}$ Вб, $\Phi_3 = 22,4 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Задача 2.4. Осердя розгалуженого магнітного кола виконано з електротехнічної сталі 1512. Розміри осердя: $l_1 = 40$ см, $l_2 = 12$ см, $l_3 = 30$ см, $S_1 = 4$ см², $S_2 = 2$ см², $S_3 = 4$ см². Магніторухійна сила $IW = 1800$ А, потік у лівому стрижні $\Phi_1 = 5,8 \cdot 10^{-4}$ Вб. Ви значити довжину повітряного зазору $l_{пз}$.

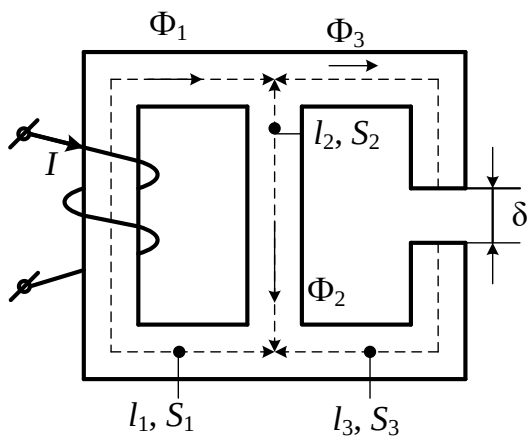


Рис. 2.8

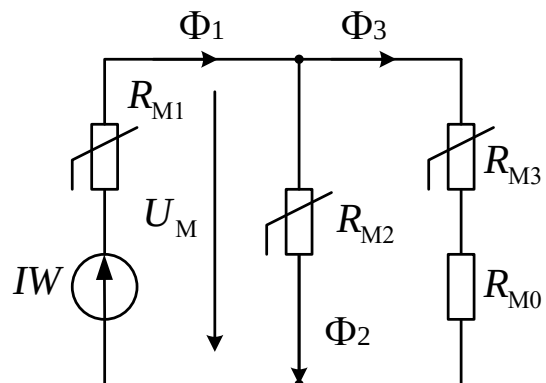


Рис. 2.9

Розв'язання.

1. Зобразимо магнітне коло схемою заміщення (рис. 2.9).
2. За другим законом Кірхгофа $U_M = IW - H_1 l_1$. Для визначення магнітної напруги знаходимо спочатку H_1 . Для визначення H_1 за кривою намагнічування знайдемо спочатку магнітну індукцію:

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}} = 1,45 \text{ Тл},$$

а потім $H_1 = 15 \text{ А/см}$, магнітна напруга $U_M = 1800 - 15 \cdot 40 = 1200 \text{ А}$.

3. Для середньої вітки $U_M = H_2 l_2$, звідки $H_2 = \frac{U_M}{l_2} = \frac{1200}{12} = 100$

А/см. На підставі кривої намагнічування $B_2 = 1,66 \text{ Тл}$. Тоді магнітний потік $\Phi_2 = B_2 \cdot S_2 = 1,66 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 3,32 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$.

4. За першим законом Кірхгофа:

$$\Phi_3 = \Phi_1 - \Phi_2 = (5,8 - 3,32) \cdot 10^{-4} = 2,48 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Магнітна індукція $B_3 = B_{\text{ПЗ}} = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{2,48 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-4}} = 0,62 \text{ Тл}$. Цьому значенню

відповідає напруженість у третьому стрижні $H_3 = 0,83 \text{ А/см}$ і у повітряному

зазорі $H_{\text{ПЗ}} = \frac{B_{\text{ПЗ}}}{\mu_0} = \frac{0,62}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 4960 \text{ А/см}$.

5. Спад напруги на магнітному опорі повітряного зазору $U_{\text{ПЗ}} = H_{\text{ПЗ}} l_{\text{ПЗ}} = U_M - H_3 l_3 = 1200 - 0,83 \cdot 30 = 1175 \text{ А}$.

6. Довжина повітряного зазору $l_{\text{ПЗ}} = \frac{U_{\text{ПЗ}}}{H_{\text{ПЗ}}} = \frac{1175}{4960} = 0,237 \text{ см}$

Відповідь: $l_{\text{ПЗ}} = 0,237 \text{ см}$.

Задача №1. У повітряному зазорі електромагніту (рис. 2.10) Завдання на розрахунково-графічну роботу

«Нелінійне магнітне коло постійного струму»

збуджується магнітний потік Φ . Осердя електромагнітну виконане із електротехнічної сталі 1512, якір – із чавуна. Довжина повітряного зазору l_{Π} . Визначити струм в обмотці котушки, силу, з якою якір притягується до осердя, та індуктивність котушки. Розміри магнітного кола задані у міліметрах.

Крива намагнічування сталі 1512

B , Тл	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65
H , А/см	0,25	0,5	0,65	0,8	0,95	1,15	1,5	2	3	4,65	7,4	9	12	15	22	33	49	90

Крива намагнічування чавуна

B , Тл	0,15	0,25	0,38	0,46	0,6	0,67	0,8	1	1,12	1,2	1,35	1,45	1,48
H , А/см	5	10	15	20	25	35	60	100	150	200	300	400	500

Таблиця варіантів до задачі 1

1-ша цифра варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi \cdot 10^{-3}$, Вб	3,2	3,1	3	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
2-га цифра варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W , витків	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
l_{Π} , мм	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,4	0,45	0,5

Задача №2. На тороїдальне осердя (рис. 2.11) з довжиною середньої лінії l_c , прямокутним перерізом площею S , з повітряним зазором l_{Π} рівномірно

намотано обмотку постійного струму з числом витків W . Враховуючи рівномірний розподіл магнітного потоку в осерді, розрахувати магнітний потік в осерді тороїда для трьох випадків: 1) осердя виконано із сталі 1512; 2) із чавуна; 3) з дерева.

Зробити висновок про вплив матеріалу осердя на величину магнітного потоку. Криві намагнічування наведено у задачі №1.

Таблиця варіантів до задачі 2

1-ша цифра варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
IW, A	2100	2300	2500	2900	2000	2200	2400	2600	2800	3000
S, cm^2	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
2-га цифра варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_{II}, mm	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
l_C, cm	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125

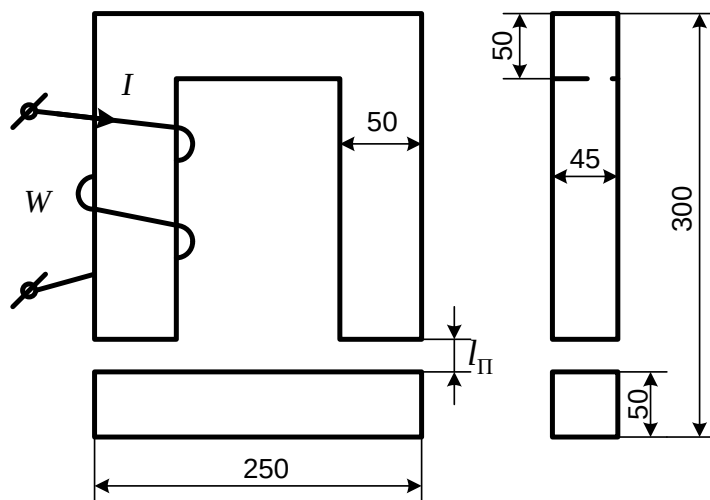


Рис. 2.10

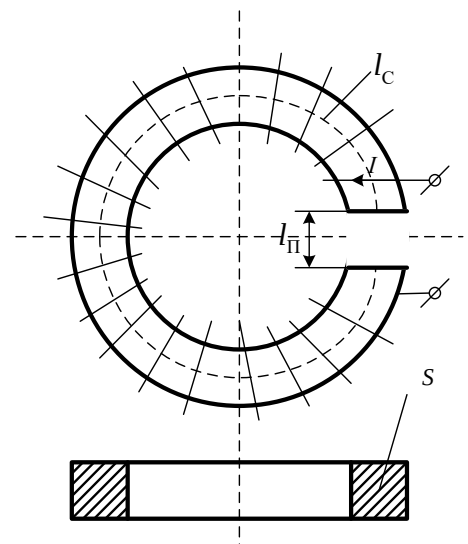
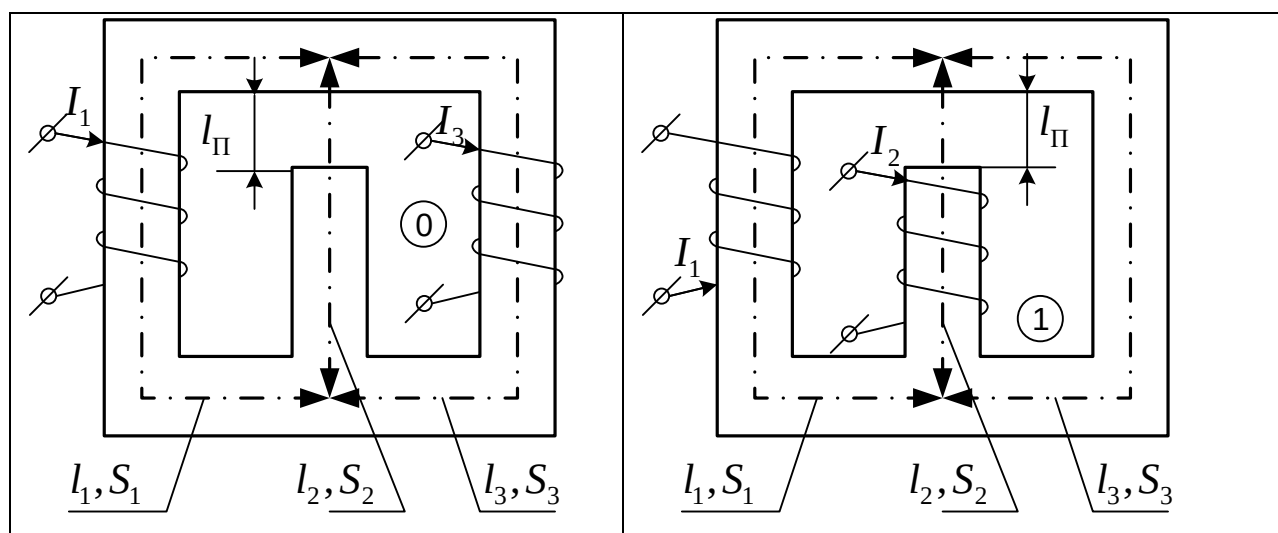


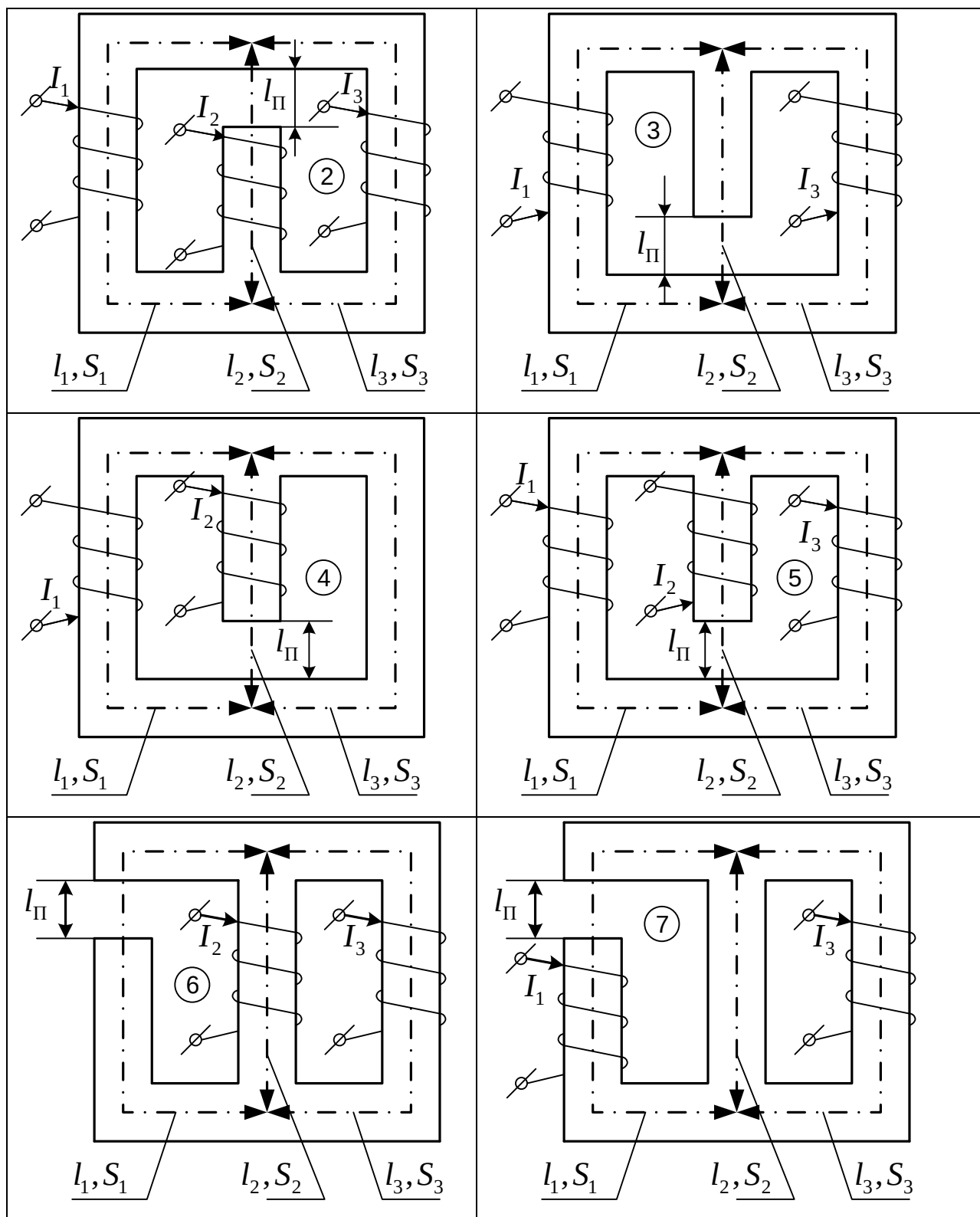
Рис. 2.11

Задача №3. Розрахувати магнітні потоки, індукції та напруженості магнітного поля у розгалуженому магнітному колі (сталь 1512) постійного струму (рис. 2.12).

Таблиця варіантів до задачі 3

1-ша цифра варіанту	$l_1 = l_3,$ см	$l_2,$ см	$l_{\Pi},$ мм	$S_1 = S_3,$ см ²	$S_2,$ см ²	$I_1 W_1,$ А	$I_2 W_2,$ А	$I_3 W_3,$ А
0	41	21	0,3	20	30	300	600	850
1	38	19	0,25	20	28	350	600	800
2	34	17	0,2	20	26	400	600	750
3	30	15	0,15	20	24	450	600	700
4	26	13	0,1	20	22	500	600	650
5	28	14	0,2	20	18	550	700	600
6	32	16	0,25	20	16	600	850	600
7	36	18	0,3	20	14	650	800	600
8	40	20	0,35	20	12	700	850	600
9	44	22	0,4	20	10	750	900	600





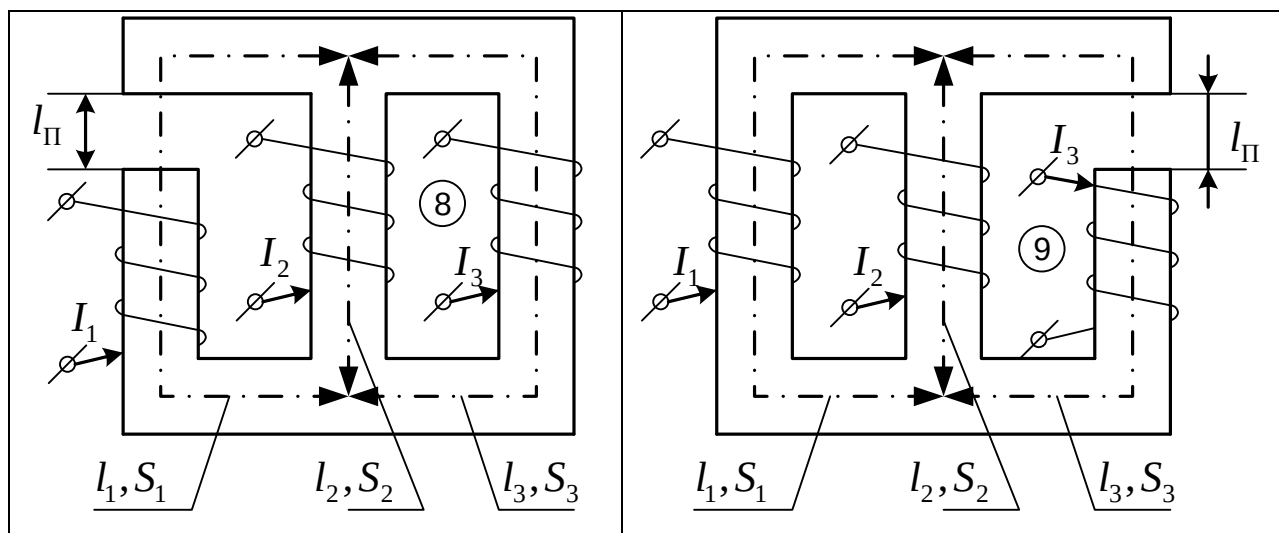


Рис. 2.12

Список рекомендованої літератури:

1. Бойко В. С., Видолоб Ю. Ф., Курило І.А. та ін. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: У 3 т.; Т. 2: Перехідні процеси у лінійних електричних колах із зосередженими параметрами. Нелінійні та магнітні кола.– К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2008. – 224 с.
2. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола. – К.: "Вища школа", 1992. – 439 с.
3. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В.Корощенко, В.Ф.Денник, О.А.Журавель та ін.; за заг.ред. О.В.Корощенко.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.
4. Методичні вказівки “Нелінійні кола постійного струму” / укл. Щерба А.А., Грудська В. П., Спінул Л.Ю., Чибеліс В.І. - К.: НТУУ «КПІ».- 2005.-59 с.