

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"**



Кафедра електротехніки



Хілов В.С.

**Методичні вказівки до самостійних та практичних занять
і контрольні завдання з дисципліни
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ, ЧАСТИНА 3
(розділи: «Нелінійні кола постійного і змінного струмів, магнітні кола,
перехідні процеси у колах з нелінійними елементами»
для студентів спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро
2021**

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № від за поданням науково-методичної комісії зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 21/22-01 від 30.08.2021 р.)

Методичні вказівки до самостійних та практичних занять і контрольні завдання з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" (частина 3, розділи "Нелінійні електричні кола постійного і змінного струмів", "Магнітні кола", "Перехідні процеси в колах з нелінійними елементами") для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка /В.С. Хілов; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка» – Д.: НТУ "ДП", 2021. – 57 с.

Автор: В. С. Хілов, д-р техн. наук, професор.

Методичні вказівки призначено для виконання самостійної роботи і контрольних завдань та проведення практичних занять з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" (частина 2, розділи "Нелінійні електричні кола постійного і змінного струмів", "Магнітні кола", "Перехідні процеси в колах з нелінійними елементами") студентами денної та заочної форм навчання за спеціальностями: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

У кожному розділі подано короткі методичні вказівки, типові завдання з рішенням та необхідними поясненнями, а також вихідні дані для виконання самостійно студентами розрахунково-графічних завдань. Наводяться питання для самостійного контролю залишкових знань.

Друкується в редакції автора.

© Хілов В.С. 2021.

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2021

Зміст частини 3

	ПЕРЕДМОВА	5
1	1 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	6
1.1	Методичні вказівки до розрахунку нелінійних електричних кіл постійного струму	
1.2	Графічний розрахунок параметрів розгалуженого нелінійного кола з одним нелінійним елементом	9
1.3	Розрахунок параметрів розгалуженого нелінійного кола з одним нелінійним елементом методом еквівалентного генератора	11
1.4	Розрахунок параметрів розгалуженого нелінійного кола з двома нелійними елементами методом заміщення	12
1.5	Розрахунок параметрів розгалуженого нелінійного кола з трьома нелійними елементами методом вузлових потенціалів	14
1.6	Питання для самоконтролю за методами розрахунку нелінійних ланцюгів постійного струму	22
2	МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНИХ КІЛ	29
2.1	Методичні вказівки до розрахунку магнітних кіл на постійному струмі	26
2.2	Розрахунок струму намагнічування за заданим магнітним потоком у феромагнітному осерді (пряма задача)	33
2.3	Розрахунок магнітних потоків за заданим намагнічуючим силам (зворотна задача)	35
2.4	Розрахунок спадів магнітних напруг в стрижнях магнітопроводу за заданими намагнічувальними силам	36
2.5	Розрахунково-графічне завдання "Розрахунок магнітних кіл за постійними намагнічувальними силами"	37
3	МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ	49
3.1	Методичні вказівки до розрахунку стаціонарних процесів у нелінійних електричних колах змінного струму	49
3.1	Розрахунок параметрів в неоднорідному резистивно-вентильному колі за миттєвими значеннями	53
	Розрахунок параметрів в однорідному резистивно-вентильному колі за миттєвими значеннями	
3.2	Розрахунок параметрів в однорідному резистивно-ємнісному колі за миттєвими значеннями	85
3.3	Розрахунок параметрів в однорідному резистивно-індуктивному колі за миттєвими значеннями	62
3.3	Розрахунок параметрів в однорідному нелінійному резистивно-індуктивно-ємнісному колі за діючими	

	значеннями еквівалентних синусоїд	
3.5	Розрахунок параметрів котушки зі сталевим осердям методом еквівалентних синусоїд	90
3.6	Розрахунково-графічне завдання "Розрахунок стаціонарних процесів в нелінійних електричних колах змінного струму"	99
3.7	Питання для самоперевірки за методами розрахунку стаціонарних процесів в нелінійних електричних колах змінного струму	87
4	МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ	
	Додатки	
	Додаток А. Гармонійний склад несінусодальних функцій з періодом повторення 2π	92
	Додаток В. Таблиця перетворень функцій по Лапласу	94
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	95

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки (модуль 5) з розрахунку параметрів нелінійних електричних кіл охоплюють методи розрахунку: графічний; еквівалентного генератора; заміщення; вузлових потенціалів; по миттєвим значенням струмів і напруг; еквівалентних синусоїд.

Методичні вказівки є прямим продовженням методичних вказівок з розрахунку кіл постійного, однофазного синусоїдального струмів і магнітно пов'язаних кіл (модулі 1, 2), а також трифазних схем при гармонійній напрузі, трифазних кіл при симетричних полігармонічних напругах, однофазних кіл за наявності вищих гармонік, кіл в нестаціонарних режимах роботи (модулі 3, 4).

Нелінійні електричні елементи знаходять широке застосування в практичних додатках електротехніки. Це пояснюється тим, що при наявності нелінійних елементів в електричному колі можливий більш широкий клас явищ, які принципово не досяжні в лінійних електричних колах. Випрямлення змінних струмів і напруг, множення і перетворення спектру частот, стабілізація струмів і напруг, трансформація рівнів постійних струмів і напруг, посилення потужності, отримання модульованих коливань, генерування релаксаційних коливань, а також коливань різної форми і частоти і ряд інших явищ можливі тільки в нелінійних колах.

Строго кажучи, будь-яке електричне коло є нелінійним. Тільки при певних припущеннях і на окремих робочих ділянках можемо стверджувати, що коло лінійне і до нього можливо застосовувати методи розрахунку лінійних кіл.

Принципова відмінність у методах розрахунку нелінійних кіл полягає в неможливості застосування методу накладення і всіх інших методів, заснованих на методі накладення.

Розрахунку конкретних параметрів електричних кіл передують короткі методичні вказівки, якими слід керуватися при виконанні розрахунково-графічного індивідуального завдання.

В кінці кожного розділу наводяться типові питання при вирішенні конкретних задач. Для перевірки ступеня засвоєння матеріалу кожному студенту рекомендується самостійно вирішити зазначені завдання.

Правильність і коректність виконуваних розрахунково-графічних завдань перевіряються викладачами циклу і після усунення зауважень допускаються до захисту.

Захист результатів виконаних розрахунково-графічних завдань являє собою співбесіду з викладачем і відповіді на поставлені питання в рамках даної теми, або відповіді на тестові завдання. Результати захисту оцінюються за шкалами: національною бальною системою, ECTS, університету (RD).

1. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1. Методичні вказівки з розрахунку нелінійних кіл постійного струму

1. Електрична схема, яка містить хоча б один нелінійний елемент в цілому є нелінійною. Нелінійним елементом є елемент вольт-амперна характеристика якого не співпадає з прямою лінією. Задаються вольт-амперні характеристики нелінійних елементів аналітично, графічно або таблично.

2. Нелінійні елементи на постійному струмі мають статичні і динамічні опори. Статичні опори завжди мають додатне значення. Динамічні опори для зростаючих вольт-амперних характеристик додатні, а для спадаючих - від'ємні.

3. У лінійних елементах статичні і динамічні опори збігаються у всіх точках вольт-амперної характеристики.

4. Методи розрахунку нелінійних кіл постійного струму ґрунтуються на законах Кірхгофа, які зв'язують між собою струми в вузлах, електрорушійні сили і спади напруги в незалежних контурах.

5. До розрахунку нелінійних кіл не можна застосувати принцип суперпозиції, тому всі методи розрахунку кіл, що використовують метод накладення, не застосовуються до нелінійних кіл постійного струму.

6. Якщо робочу ділянку нелінійного елемента можна апроксимувати прямою лінією, то в цьому випадку розрахунок параметрів кола можна лінеаризувати шляхом заміни нелінійного елемента еквівалентним динамічним опором з джерелом енергії або статичним опором. Розрахунок лінеаризованої еквівалентної схеми в межах робочої точки проводиться аналітично.

7. При наявності в колі двох вузлів розрахунок раціонально проводити методом вузлових потенціалів. Для цього будуються вольт-амперні характеристики кожної вітки, які будуть зміщені щодо початку координат на величину веденої ЕРС в цю вітку. Потім будується результуюча вольт-амперна характеристика всього кола, що дозволяє знайти напруги на паралельних вітках. Знаючи напруги на паралельних вітках знаходимо параметри всіх віток.

8. Якщо електричне коло містить один нелінійний елемент, то розрахунок ефективно проводити методом еквівалентного генератора. Коло розбивається на пасивний і активний двополюсники. Пасивний двополюсник включає вітку з нелінійним елементом, а активний двополюсник містить всю решту лінійну частину кола. Активний двополюсник замінюється еквівалентним генератором. Після визначення параметрів лінійного еквівалентного генератора задача зводиться до знаходження параметрів елементарної одноконтурної схеми з джерелом ЕРС або двоконтурної з джерелом струму та нелінійного кола. Визначається робоча точка на нелінійній вольт-амперній характеристиці, що дозволяє лінеаризувати нелінійну вольт-амперну характеристику динамічним опором з додатковим джерелом енергії або статичним опором. Після лінеаризації розрахунок всіх інших параметрів кола в початковій схемі проводиться як в лінійному колі.

9. У разі двох нелінійних елементів розрахунок раціонально проводити з використанням теорії чотириполюсників. Розрахункова схема представляється у вигляді активного чотириполюсника до виводів якого приєднуються два нелінійних елемента. Активний чотириполюсник представляється Т-образної схемою заміщення пасивного чотириполюсника з двома джерелами ЕРС холостого ходу. В результаті чого розрахунок зводиться до знаходження параметрів кола в двоконтурній схемі з трьома лінійними, двома нелійними опорами і двома джерелами ЕРС.

10. Властивості кола з нелійними елементами істотно відмінні від властивостей лінійних кіл постійного струму. У колах з нелійними елементами можливі нестійкі режими роботи при від'ємних динамічних опорах. У лінійних колах опори завжди додатні, тому режими роботи цих кіл завжди стійкі.

1.2. Графічний розрахунок параметрів нерозгалуженого та розгалуженого кіл з одним нелінійним елементом

Задача.

Два резистора з заданими вольт-амперних характеристиками (рис.1.1,*a*) з'єднані послідовно в нерозгалужене коло і ввімкнені на джерело постійної напруги 14 В. Внутрішнім опором джерела знехтувати.

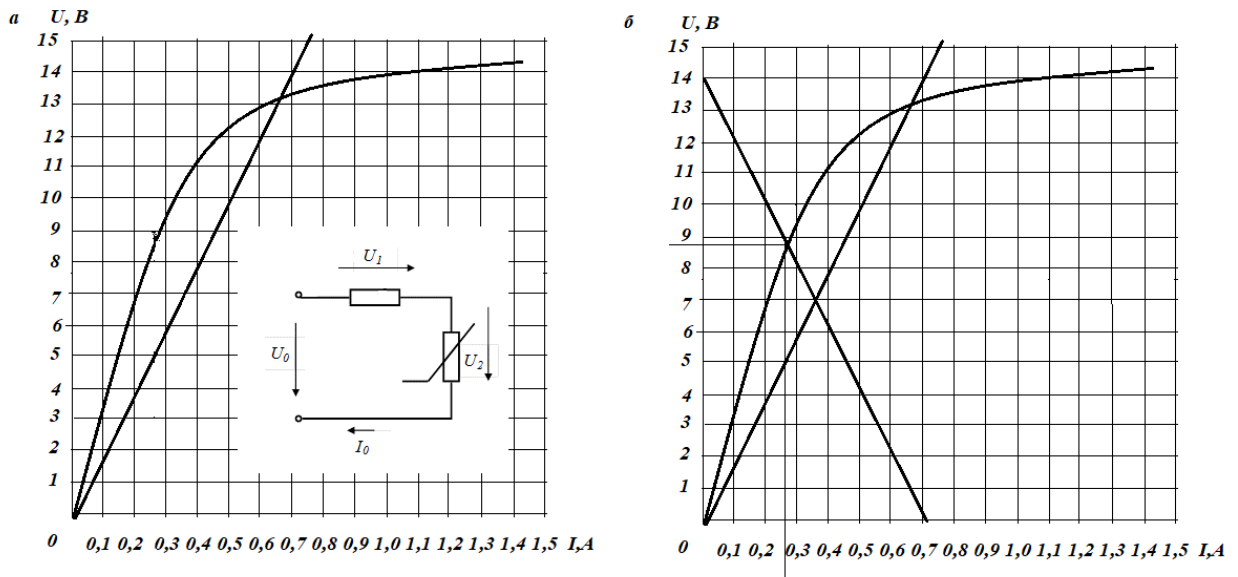


Рис.1.1

Обчислити силу струму через резистори, спад напруги на лінійному резисторі, спад напруги на нелінійному резисторі; скласти рівняння балансу потужностей схеми.

Розв'язок.

Беремо точку приналежну ВАХ лінійного опору $U = 14 \text{ В}$, $I = 0,7 \text{ А}$. Величина лінійного опору $R = U / I = 14 / 0,7 = 20 \text{ Ом}$.

ВАХ лінійної частини кола (джерело напруги $U = 14 \text{ В}$ - лінійний резистор $R = 20 \text{ Ом}$) будемо по точках:

- холостого ходу (ТХХ $U_{\text{ХХ}} = 14 \text{ В}$, $I_{\text{ХХ}} = 0 \text{ А}$)
- короткого замикання (ТКЗ $U_{\text{КЗ}} = 0 \text{ В}$, $I_{\text{КЗ}} = U_{\text{ХХ}} / R = 14/20 = 0,7 \text{ А}$).

За координатами ТХХ і ТКЗ будемо ВАХ лінійної частини кола – пряма лінія, яка перетинає ВАХ нелінійного опору в робочій точці (ТР) з координатами $U_{\text{НЕ}} = 8,7 \text{ В}$, $I_{\text{НЕ}} = 0,26 \text{ А}$ (рис.1.1,б).

Таким чином, сила струму через резистори $0,26 \text{ А}$.

Спад напруги на лінійному резисторі $U_{\text{ЛР}} = R * I_{\text{НЕ}} = 20 * 0,26 = 5,2 \text{ В}$.

Спад напруги на нелінійному резисторі $U_{\text{НР}} = U_{\text{ХХ}} - U_{\text{ЛР}} = 14 - 5,2 = 8,8 \text{ В}$.

Потужність генерується джерелом енергії $P_{\text{ДЖ}} = U_{\text{ХХ}} I_{\text{НЕ}} = 14 * 0,26 = 3,64 \text{ Вт}$.

Потужність теплових втрат на лінійному резисторі $P_{\text{ЛР}} = U_{\text{ЛР}} * I_{\text{НЕ}} = 5,2 * 0,26 = 1,352 \text{ Вт}$.

Потужність теплових втрат на нелінійному резисторі $P_{\text{НР}} = U_{\text{НР}} * I_{\text{НЕ}} = 8,7 * 0,26 = 2,262 \text{ Вт}$.

Сумарна потужність теплових втрат на нелінійному і лінійному резисторах $P_{\text{НАВ}} = P_{\text{ЛР}} + P_{\text{НР}} = 1,352 + 2,262 = 3,614 \text{ Вт}$.

Рівняння балансу потужностей схеми $P_{\text{ДЖ}} \approx P_{\text{НАВ}}$, $3,64 \text{ Вт} \approx 3,614 \text{ Вт}$.

Відносна похибка обчислень

$\gamma_P = 100\% * (P_{\text{НАВ}} - P_{\text{ДЖ}}) / P_{\text{НАВ}} = 100\% * (3,614 - 3,64) / 3,614 = -0,72\%$,
що пояснюється неточністю графічного методу розрахунку.

Задача.

Два лінійних ($R_1=2$ Ом, $R_2=40$ Ом) і один нелінійний елемент включені за схемою рис.1.2,*а* в розгалужене коло. Вольт-амперна характеристика нелінійного опору задана графічно, рис.1.2,*б* (крива для $R_3 (U_3(I_3))$). Схема увімкнена на напругу $U_0=50$ В. Визначити струми у всіх вітках і напруги на елементах схеми.

Розв'язок.

1. Розрахунок параметрів кола виконуємо графічним методом.

Так як $R_1=2$ Ом, $R_2=40$ Ом лінійні опори, то вольт-амперні характеристики $U_1(I_1)$, $U_2(I_2)$ це прямі лінії, які найбільш просто будувати за двома характерними точками, що приналежать ВАХ: початок координат і спад напруги на лінійних резисторах R_1 і R_2 , наприклад, при струмі 1А буде 2В і 40В, відповідно. З'єднуємо ці точки з початком координат і отримуємо прямі лінії які належать вольт-амперним характеристикам лінійних елементів $R_1 (U_1(I_1))$, $R_2 (U_2(I_2))$, рис.1.2,*б*.

2. По ВАХ нелінійного $R_3 (U_3(I_3))$ і лінійного елементів $R_2 (U_2(I_2))$ будуємо сумарну ВАХ паралельної ділянки $R_{23} (U_2(I_2 + I_3) = U_3(I_2 + I_3) = U_2(I_1) = U_3(I_1))$, тим самим замінюючи паралельне з'єднання лінійного R_2 і нелінійного R_3 опорів одним нелінійним R_{23} (рис.1.2,*в*).

Побудову робимо з урахуванням, що при паралельному з'єднанні елементів струми віток підсумовуються при однаковій напрузі на елементах.

3. По ВАХ лінійного $R_1 (U_1(I_1))$ і не лінійного $R_{23} (U_2(I_1) = U_3(I_1))$ елементів будуємо результуючу ВАХ усій схеми $R_{123} (U(I_1))$, рис.1.1,*г*. На рис.1.2 приведена схема з результуючим нелінійним опором R_{123} . Результуюча ВАХ є нелінійною характеристикою. Тобто наявність хоча б одного нелінійного елемента у колі робить усе коло нелінійним.

Побудову робимо з урахуванням, що при послідовному з'єднанні елементів напруги на елементах підсумовуються при однаковому струмі елементів.

4. За відомою прикладеною напругою $U_0=50$ В і результуючій ВАХ усєї схеми $R_{123} (U(I_1))$ знаходимо струм в нерозгалуженій частині кола $I_1=3$ А.

5. За значенням вхідного струму $I_1=3$ А знаходимо спад напруги на лінійному резисторі R_1 по його ВАХ ($U_1(I_1)$) $U_1=6$ В і напругу на паралельних вітках по сумарній характеристиці паралельної ланки $R_{23} (U_2(I_1) = U_3(I_1))$ $U_2=U_3=44$ В.

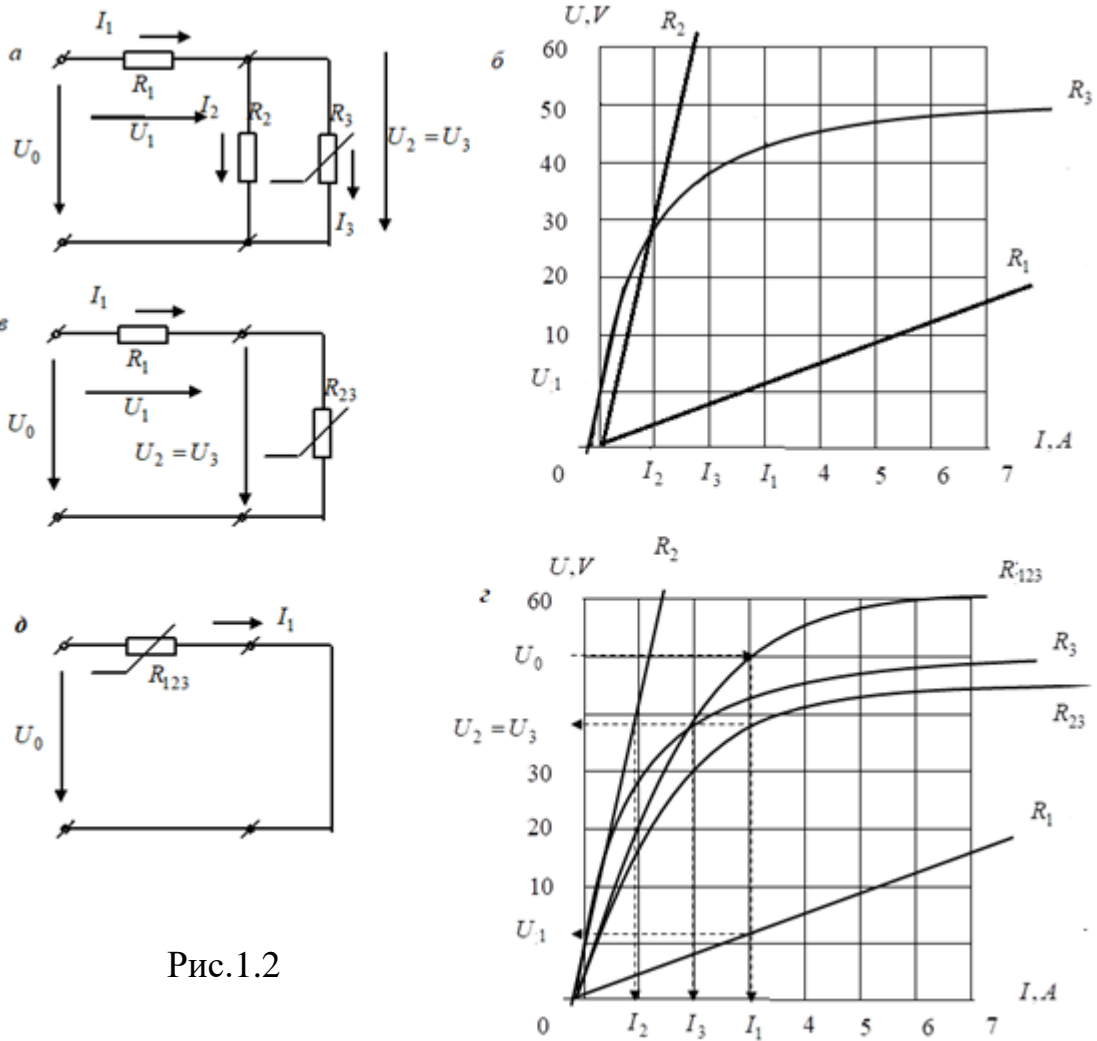


Рис.1.2

6. По знайденим напругам $U_2 = U_3 = 44$ В визначаємо струми у паралельних вітках $I_2 = 1$ А, $I_3 = 2$ А, користаючись характеристиками нелінійного R_3 ($U_3(I_3)$) і лінійного елементів R_2 ($U_2(I_2)$), рис.1.1,з.

7. Перевірку рішення виробляємо за законами Кірхгофа:

– алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю

$$I_1 - I_2 - I_3 = 3 - 1 - 2 = 0;$$

– алгебраїчна сума спадів напруг в контурі дорівнює нулю

$$U_0 - U_1 - U_2 = 50 - 44 - 6 = 0.$$

1.3. Розрахунок параметрів розгалуженої нелінійної кола з одним нелінійним елементом методом еквівалентного генератора

Задача.

Дана схема електричного моста рис.1.3. В одне плече моста увімкнений нелінійний елемент R_1 . Вольт-амперна характеристика нелінійного елемента $R_1(U_1(I_1))$ приведена на рис.1.4.

Визначити струми у всіх вітках, якщо лінійні параметри кола відомі: $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 6 \text{ Ом}$, $R_4 = 12 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$. Напряга в діагоналі моста $U_0 = 12 \text{ В}$.

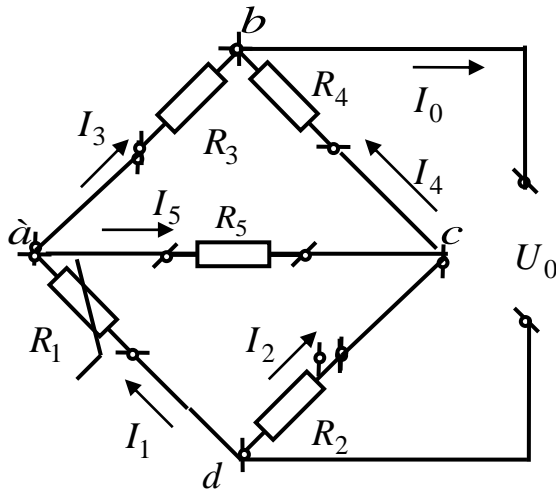


Рис.1.3

Розв'язання.

Струм I_1 визначимо, скориставшись методом еквівалентного генератора.

Розірвемо вітку з нелінійним елементом R_1 і знайдемо напругу холостого ходу U_{xx} , тобто напругу на виводах ab , застосувавши другий закон Кірхгофа:

$$U_{xx} = U_{ab} = R_3 I_{3xx} + R_5 I_{5xx} = 6 \cdot 1,2 + 2 \cdot 0,8 = 8,8, \text{ В},$$

де по закону Ома
$$I_{3xx} = \frac{U_0}{R_3 + \frac{R_4(R_2 + R_5)}{R_4 + R_2 + R_5}} = 1,2, \text{ А};$$

і відповідно до правила розподілу струму між двома паралельними гілками

$$I_{5xx} = I_{3xx} \frac{R_4}{R_4 + R_2 + R_5} = 0,8, \text{ А}.$$

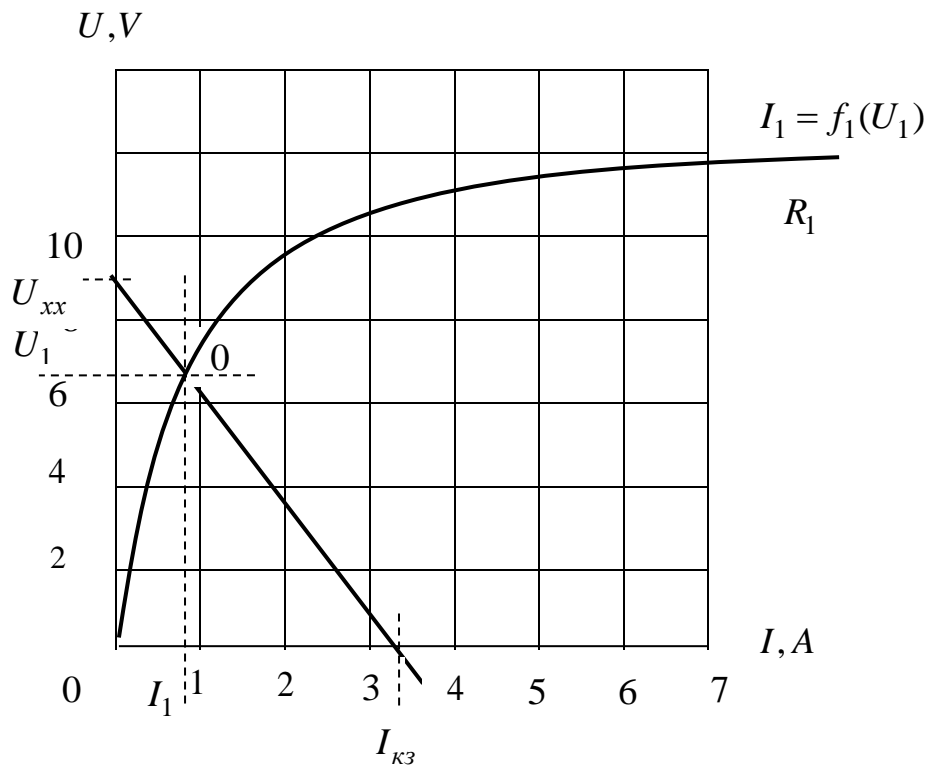


Рис. 1.4

Визначимо внутрішній опір $R_{кз}$ еквівалентного генератора відносно виводів ab при короткому замиканні затискачів ca

$$R_{\hat{e}c} = \frac{\left(R_5 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) R_2}{R_2 + R_5 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} = 2,4 \text{ Ом.}$$

Після перетворення все лінійне коло замінюється еквівалентним генератором з відомою ЕРС холостого ходу і внутрішнім опором короткого замикання. Еквівалентна схема заміщення являє собою контур з послідовно з'єднаними еквівалентним генератором і нелінійним опором.

Для знаходження струму I_1 будемо навантажувальну вольт-амперну характеристику еквівалентного генератора за двома характерними точками: холостого ходу $U_{xx} = 8,8, B$ $I_{xx} = 0, A$ и короткого замикання $U_{кз} = 0, B$ $I_{кз} = U_{xx} / R_{кз} = 3,7, A$, рис.1.4.

Перетин навантажувальної характеристики еквівалентного генератора з ВАХ нелінійного елемента визначає робочу точку еквівалентної схеми заміщення. Координати перетину характеристик визначають напругу і струм нелінійного елемента R_1 : $I_1 = 0,8, A$, $U_1 = 7,8, B$.

Повертаючись до початкової схемою, знаходимо:

$$I_3 = \frac{U_0 - U_1}{R_3} = 0,7, A, \quad I_5 = I_1 - I_3 = 0,1, A, \quad I_4 = \frac{I_3 R_3 - I_5 R_5}{R_4} = 0,33, A,$$

$$I_2 = I_4 - I_5 = 0,23, A.$$

1.4. Розрахунок параметрів розгалуженої нелінійної кола з двома нелійними елементами методом заміщення

Задача.

Дана мостова схема з двома нелійними елементами: у вітці ab $R_1(I_1)$ і $R_2(I_2)$ у вітці bc (рис. 1.5.). Вольт-амперні характеристики наведені на рис. 1.6 опори інших віток дорівнюють $R_3 = 6 \text{ Ом}$, $R_4 = 12 \text{ Ом}$, $R_5 = 2 \text{ Ом}$. Напряга в діагоналі джерела живлення $U_0 = 12 \text{ В}$.

Визначити струми у всіх гілках.

Розв'язок.

Для обчислення струмів I_1 і I_2 у вітках з нелійними елементами використовуємо принцип компенсації для чого розмикаємо ці вітки і знаходимо напруги $U_{1xx} = U_{ab}$ і $U_{2xx} = U_{bc}$, рис.1.7,а.

$$U_{1xx} = \frac{U_0 R_3}{R_3 + R_4} = 4, B \quad \text{і} \quad U_{2xx} = \frac{U_0 R_4}{R_3 + R_4} = 8, B.$$

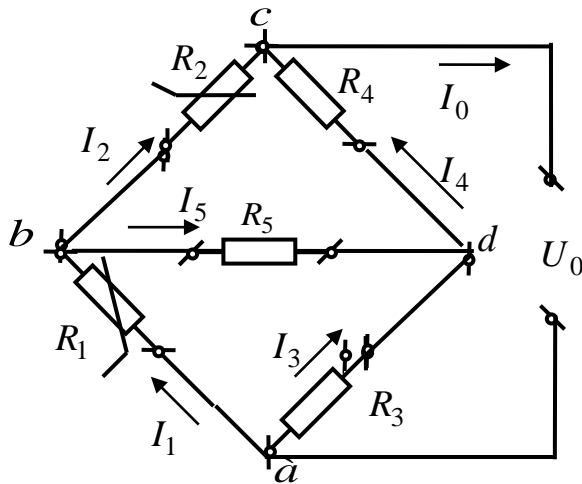


Рис.1.5

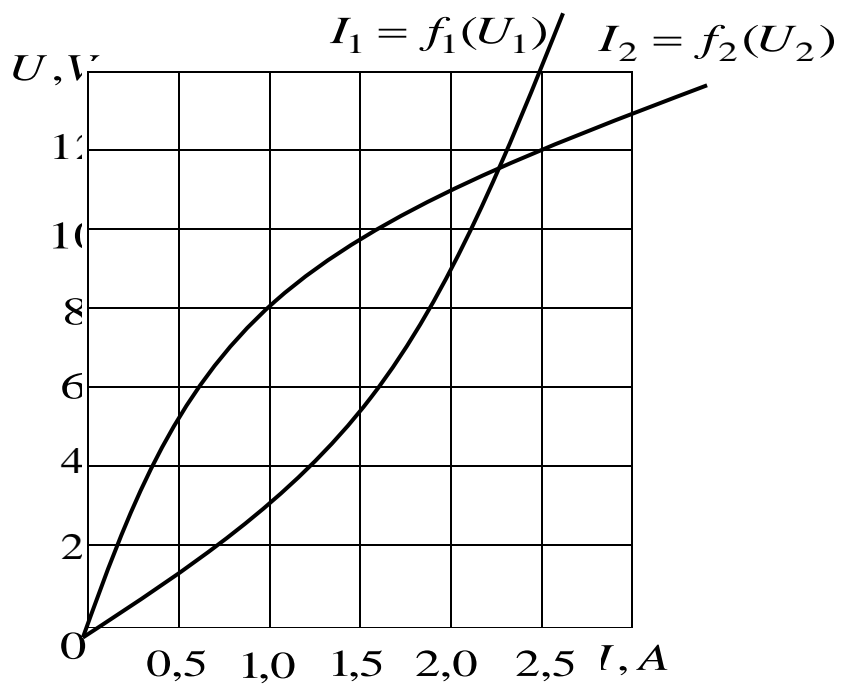


Рис.1.6

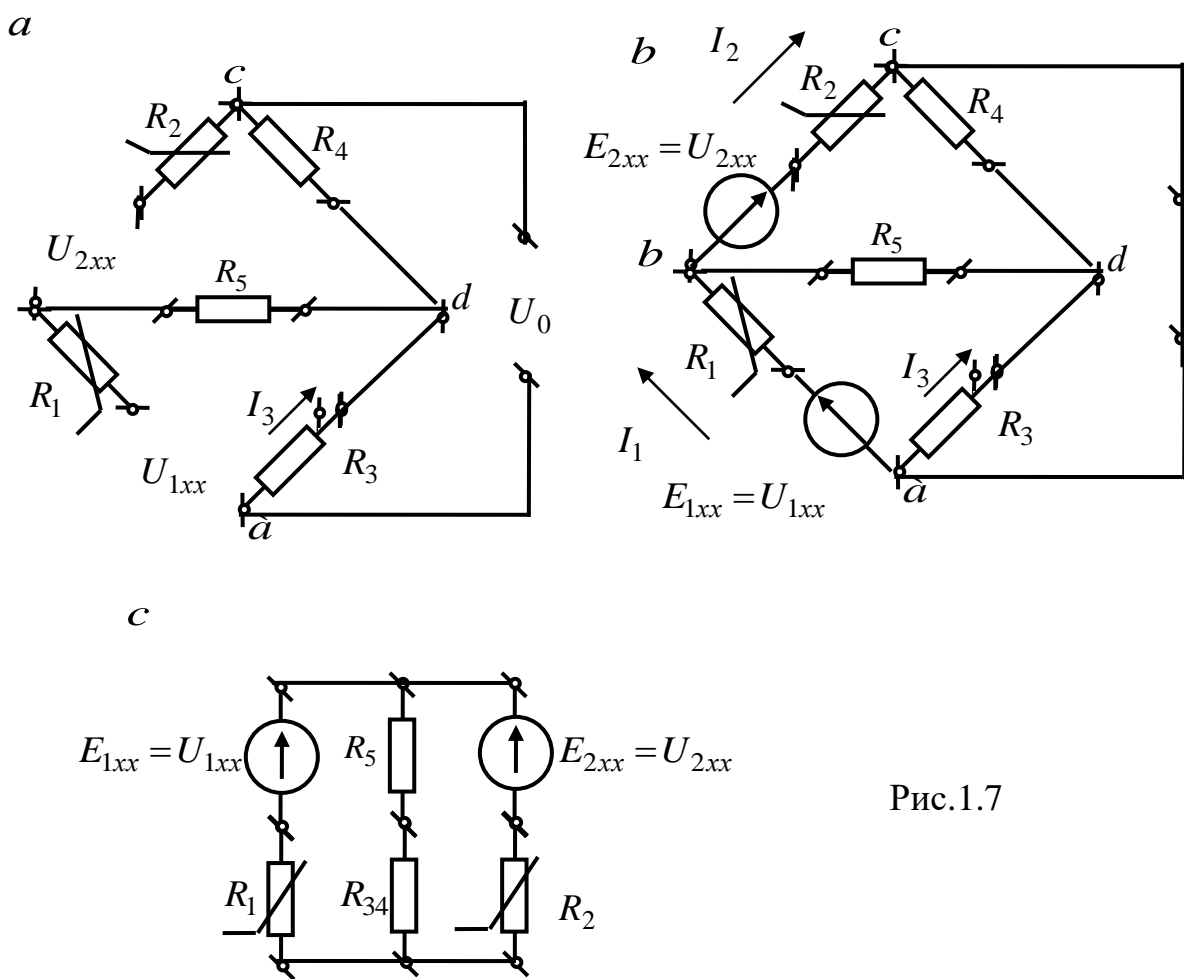


Рис.1.7

Ввімкнемо у вітки з нелінійними елементами ЕРС $E_{1xx} = U_{1xx}$ і $E_{2xx} = U_{2xx}$ і замкнемо накоротко затискачі ca , до яких приєднаний зовнішній джерело напруги U_0 , рис.1.7,б.

Струми I_1 і I_2 у вітках з нелінійними елементами перетвореної схеми будуть рівні дійсним струмам початкової схеми у відповідних вітках схеми.

Після заміни двох паралельних віток з опорами R_3 і R_4 однієї еквівалентної віткою, отримаємо схему з двома вузлами (рис.1.7,с), де

$$R_2 = 2 \text{ Ом і } R_{34} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = 4 \text{ Ом.}$$

Користуючись цією схемою, можна струми I_1 і I_2 визначити графічно, як в завданні 1.2, побудувавши характеристики, рис. 1.6.

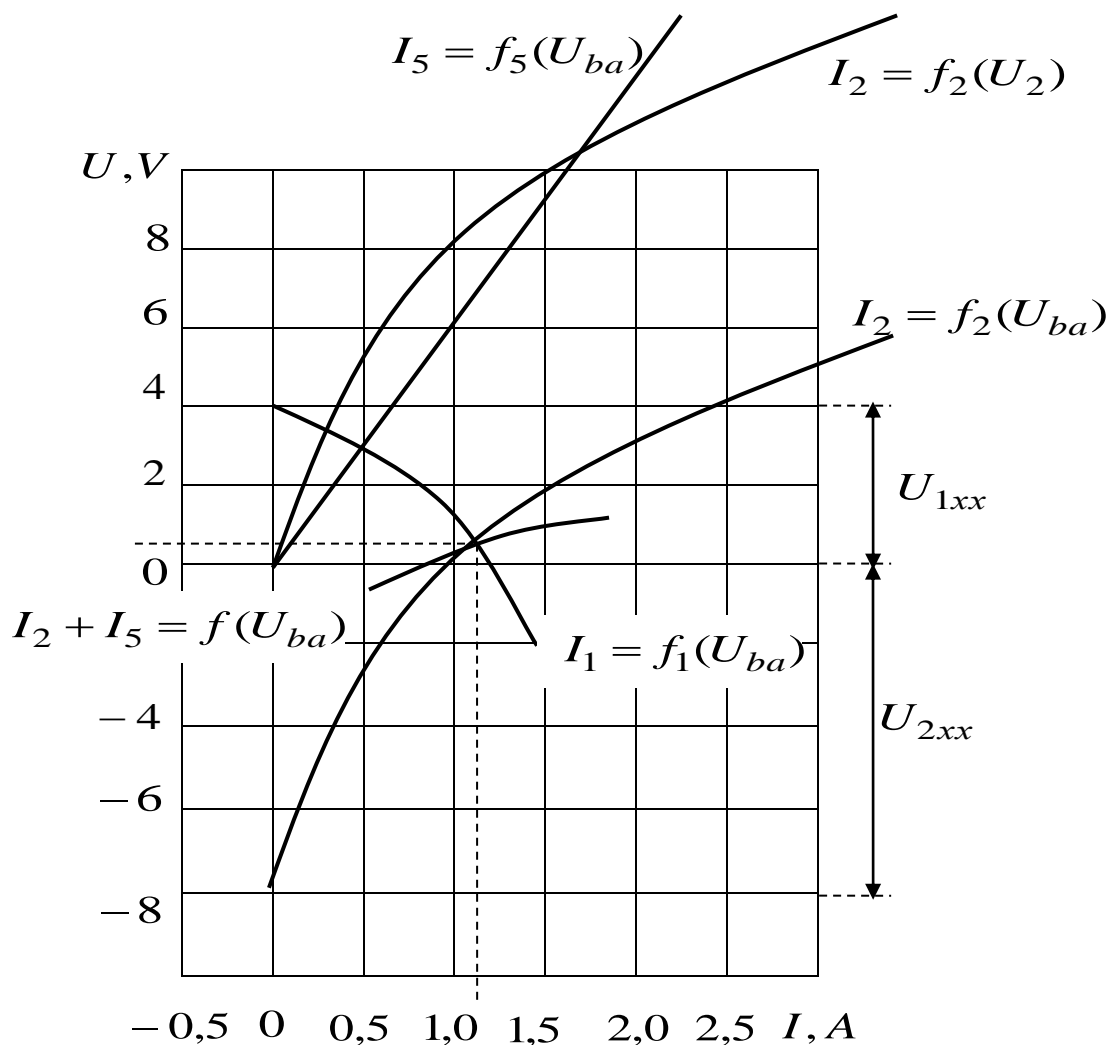


Рис.1.8

Так як струми I_1 і I_2 є струмами у початковій схемі, то струм $I_5 = I_1 - I_2$ в еквівалентній схемі має також значення, як в початковій схемі. Струми I_3 і I_4 легко визначаються на підставі законів Кірхгофа у початковій схемі.

Величини струмів рівні: $I_1 = 1,15$ А, $I_2 = 1,05$ А, $I_3 = 0,6$ А, $I_4 = 0,7$ А, а напруги на затискачах нелінійних елементів – $U_1 = 3,4$ В, $U_2 = 8,6$ В.

1.5. Розрахунок параметрів розгалуженої нелінійної кола з трьома нелійними елементами методом вузлових потенціалів

Задача.

Дана схема електричного кола з трьома однаковими нелійними елементами, рис.1.9. Електрорушійні сили джерел $E_3 = 100$ В, $E_1 = 10$ В, $E_2 = 30$ В.

Визначити струми у всіх вітках, вважаючи джерела ЕРС ідеальними.

Вольт-амперні характеристики нелінійних елементів задані табличне в першому квадраті і наведені у таблиці 1.1.

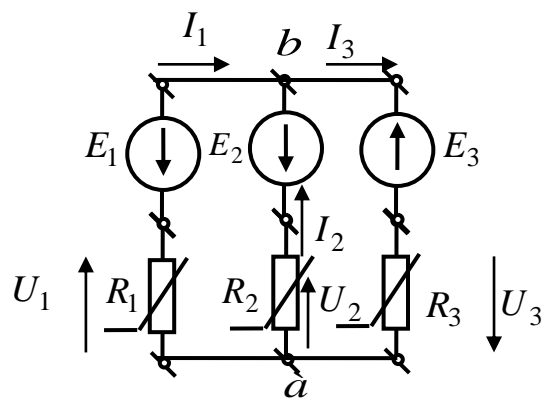


Рис.1.9

Таблица 1.1.

$U, \text{В}$	0	4	8	25	110	115	118
$I, \text{мА}$	0	10	20	40	60	80	100

Розв'язок.

Задаємо додатні напрямки струмів віток I_1, I_2, I_3 і будуємо вольт-амперні характеристики віток (рис.1.10) $I_1(U_{ab}) = I_1(E_1 + U_1)$, $I_2(U_{ab}) = I_2(E_2 + U_2)$, $I_3(U_{ab}) = I_3(-E_3 + U_3)$ виходячи з потенційних рівнянь на паралельних вітках

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

де U_1, U_2, U_3 – напруга на виводах нелінійних резисторів, рис.1.9.

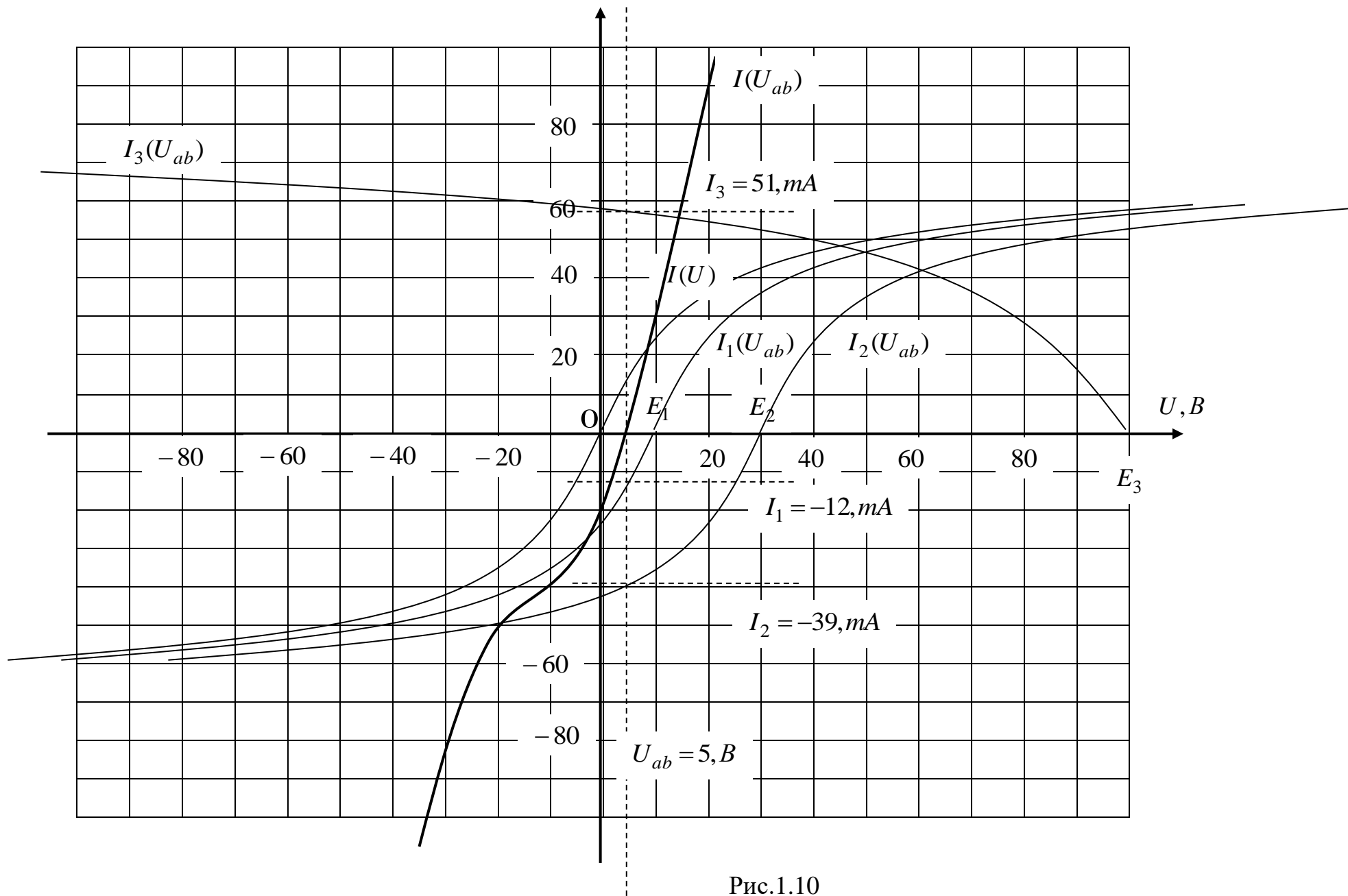


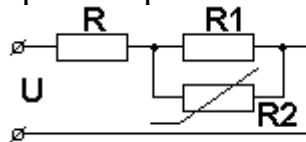
Рис.1.10

На підставі кривих $I_1(U_{ab})=I_1(E_1+U_1)$, $I_2(U_{ab})=I_2(E_2+U_2)$ будемо результуючу криву і знаходимо точку перетину результуючої кривої з віссю абсцис. У цій точці виконуються закони Кірхгофа. Графічно знаходимо значення струмів віток $I_1=-12,мА$, $I_2=-39,мА$, $I_3=51,мА$. Від'ємні значення струмів свідчать про те, що їхнє справжнє напрямки протилежні задалегідь обраним.

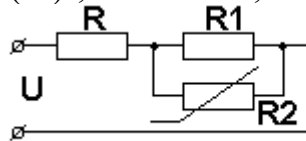
Напругу між вузлами схеми також знаходимо графічним шляхом $U_{ab}=5,В$.

1.6. Питання для самоконтролю за методами розрахунку нелінійних кіл постійного струму

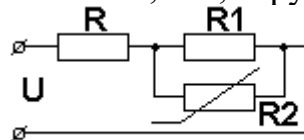
1. Знайти прикладену напругу U , якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$, $R=R_1=10$ Ом, струм резистора R_1 $I_1=4$ А.



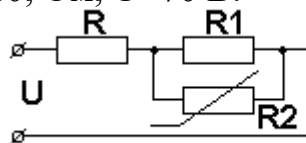
2. Знайти значення статичного опору R_2 в робочій точці, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$, $R=R_1=10$, Ом, струм резистора R_1 $I_1=4$, А.



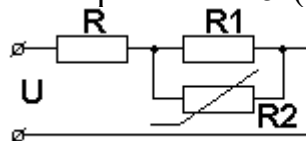
3. Знайти значення динамічного опору R_2 в робочій точці, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом, струм резистора R_1 $I_1=4$, А.



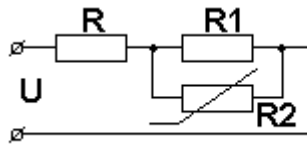
4. Знайти значення струму нелінійного елемента, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом, $U=70$ В.



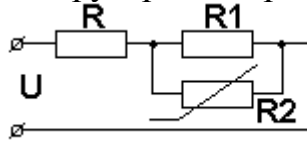
5. Знайти значення динамічного опору нелінійного елемента у робочій точці, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом; $U=70$ В.



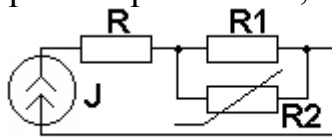
6. Знайти значення статичного опору нелінійного елемента в робочій точці, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом; $U=70$ В.



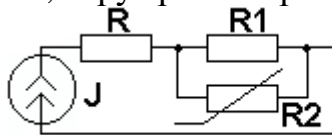
7. Знайти потужність джерела живлення, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$, $R=R_1=10$, струм резистора R_1 $I_1=4$ А.



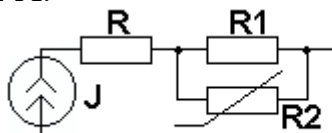
8. Знайти спад напруги на резисторі R , якщо ВАХ R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$, $R=R_1=10$, Ом, струм резистора R_1 $I_1=2$, А.



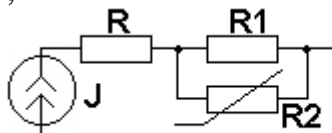
9. Знайти потужність джерела живлення, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$, $R=R_1=10$, струм резистора R_1 $I_1=2$ А.



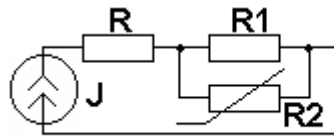
10. Знайти значення статичного опору нелінійного елемента в робочій точці, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом; струм резистора R_1 $I_1=2$ А.



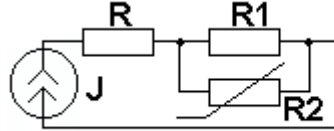
11. Знайти значення динамічного опору нелінійного елемента в робочій точці, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом, струм резистора R_1 $I_1=2$, А



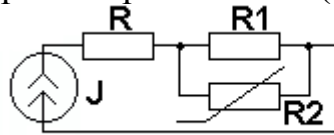
12. Знайти струм нелінійного елемента, якщо ВАХ резистора R_2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом, струм $J=4$, А.



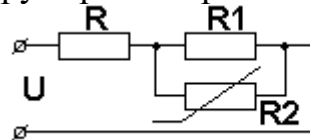
13. Знайти значення статичного опору нелінійного елемента в робочій точці, якщо ВАХ резистора R2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом; $J=4$ А.



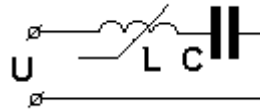
14. Знайти значення динамічного опору нелінійного елемента в робочій точці, якщо ВАХ резистора R2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$ $R=R_1=10$, Ом; $J=4$ А.



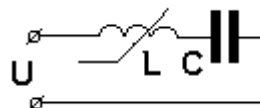
15. Знайти прикладену напругу U , якщо ВАХ резистора R2 $U_2=5 \cdot (I_2)^2$, $R=R_1=10$ Ом, напруга резистора R1 $U_1=40$ В.



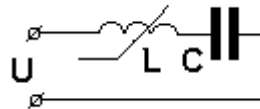
16. Розрахувати граничні значення ділянки ВАХ з негативним динамічним опором, якщо $U_L^2=4 \cdot (I)$; $U_C=2 \cdot I$



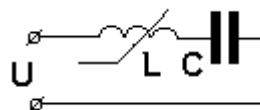
17. Розрахувати значення динамічного опору на нестійкій ділянці ВАХ, якщо $U_L^2=4 \cdot (I)$; $U_C=2 \cdot I$



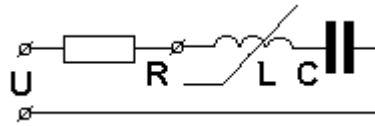
18. Знайти значення ємності C , при якій в точці $I = 2$ А, виникає явище ферорезонансу напруг, если $U_L^2=4 \cdot (I)$; $f=50$ Гц.



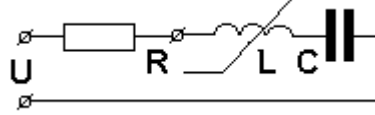
19. Знайти значення ємності C , при якій в точці $I = 1$ А, виникає явище ферорезонансу напруг $U_L^2=4 \cdot (I)$; $f=50$ Гц.



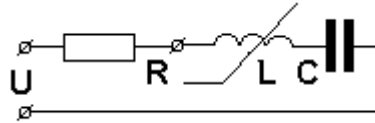
20. Знайти напруги на елементах і струм у колі при ферорезонансу напруг, якщо $U_L^2=4 \cdot (I)$; $x_C=10$ Ом; $R=5$ Ом.



21. Знайти значення ємності C , при якій в точці $I = 2$ А, виникає явище ферорезонансу напруг, якщо $U_L^2 = 4 \cdot (I)$; $R = 5$ Ом; $f = 50$ Гц.



22. Вважаючи, що в колі діє еквівалентний синусоїдальний струм, розрахувати напругу у колі при струмі $I = 2,5$ А і побудувати векторну діаграму, якщо $U_L^2 = 4 \cdot (I)$; $U_C = 2 \cdot I$; $R = 5 \cdot I$.



23. Розрахувати граничні значення ділянки ВАХ з від'ємним динамічним опором, якщо $I_L = 0.02 \cdot (U)^2$; $I_C = 0.2 \cdot U$



24. Розрахувати значення динамічного опору на нестійкій ділянці ВАХ, якщо $I_L = 0.02 \cdot (U)^2$; $I_C = 0.2 \cdot U$



25. Знайти значення ємності C , при якій в точці $U = 10$ В, виникає явище ферорезонансу струмів, якщо $I_L = 0.02 \cdot (U)^2$; $f = 50$ Гц.



26. Знайти значення ємності C , при якій в точці $U = 20$ В, виникає явище ферорезонансу струмів, якщо $I_L = 0.02 \cdot (U)^2$; $f = 50$ Гц.



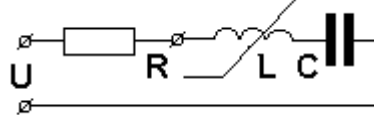
27. Вважаючи, що у колі діє еквівалентна синусоїдальна напруга, розрахувати струми у вітках при напрузі $U = 4$ В і побудувати векторну діаграму, якщо $I_L = 0.02U^2$; $I_C = 0.2U^2$.



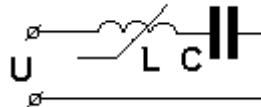
28. Вважаючи, що у колі діє еквівалентна синусоїдальна напруга, розрахувати струми у вітках при напрузі $U = 12 \text{ В}$ і побудувати векторну діаграму, якщо $I_L = 0.02U^2$; $I_C = 0.2U^2$.



29. Вважаючи, що в колі діє еквівалентний синусоїдальний струм, розрахувати напругу у колі при струмі $I = 0.2 \text{ А}$ і побудувати векторну діаграму, якщо $U_L^2 = 4 \cdot (I)$; $U_C = 2 \cdot I$; $R = 5 \cdot I$.



30. Розрахувати граничні значення ділянки ВАХ з від'ємним динамічним опором, якщо $U_L^2 = 4 \cdot (I)$; $U_C = 3 \cdot I$



2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНИХ КІЛ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМЕ

2.1. Методичні вказівки з розрахунку магнітних кіл на постійному струмі

1. Магнітне коло являє собою сукупність пристроїв, що містять феромагнітні тіла і утворюють замкнене коло у якому при наявності магніторушійної (намагнітчувальної) сили утворюється магнітний потік.
2. Закон повного струму і принцип безперервності магнітного потоку – основні закони магнітного кола. Вони дозволяють встановити зв'язок між магніторушійними силами, магнітними потоками і магнітними опорами.
3. Закон Ома для магнітного кола: магнітний потік на ділянці кола магнітопроводу прямо пропорційний величині різниці магнітних

потенціалів, прикладених до крайніх точок магнітопроводу і обернено пропорційний значенню магнітного опору ділянки магнітопроводу.

4. Перший закон Кірхгофа для магнітних кіл: алгебраїчна сума магнітних потоків у вузлу магнітного кола дорівнює нулю.

5. Другий закон Кірхгофа для магнітних кіл: у будь-якому контурі замкненого магнітного кола алгебраїчна сума спадів магнітних напруг дорівнює нулю.

6. Магнітне коло може бути представлено аналогом електричної схеми.

Принципова відмінність магнітних кіл від електричних постійного струму є те, що магнітний опір не приймає нескінченно великого значення. Тому при наявності магніторушійної сили завжди існує магнітний потік, відмінний від нуля. В електричних колах постійного струму при наявності ЕРС струм в колі може бути відсутнім.

7. Магнітні кола містять ділянки з феромагнітних матеріалів, магнітний опір яких у багато разів менше магнітного опору повітряного зазору. У таких випадках більша частина магнітного потоку замикається через ділянки без повітряного зазору.

8. Наявність магнітного зазору на ділянці магнітопроводу дає можливість знехтувати незначним магнітним опором самого магнітопроводу в порівнянні з опором повітряного зазору.

9. Як правило наявність повітряного зазору призводить до того, що ділянка кола стає лінійною.

10. При розрахунку магнітних кіл будемо вважати, що магнітний потік замикається по магнітопроводам і повітряним зазорам без розсіювання в навколишньому просторі, тобто нехтуємо потоками розсіювання.

11. Так як магнітні властивості феромагнітних речовин змінюються в залежності від величини напруженості магнітного поля, то магнітні кола з феромагнітними матеріалами є нелінійними. До розрахунку магнітних кіл з насиченими магнітопроводами не можна застосувати принцип накладання і методи, засновані на цьому принципі.

12. Розрахунок магнітного кола зазвичай зводиться або до знаходження магнітних потоків по заданих магніторушійних силах (зворотна задача) або до знаходження магніторушійних сил по заданим магнітним потокам (пряма задача).

2.2. Розрахунок намагнічуючого струму за заданим магнітним потоком феромагнітного осердя (пряма задача)

Задача.

Сталеве осердя магнітопроводу виконано з листової електротехнічної сталі Э 31 з обмоткою $W=300$ витків.

Знайти струм I_1 в обмотці, якщо потрібно створити в осерді магнітний потік $\Phi = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Вб. Усі розміри магнітопроводу і повітряного зазору дані на рис.3.1 у міліметрах. Крива намагнічування $B(H)$ сталі Э 31 задана у таблиці 2.1.

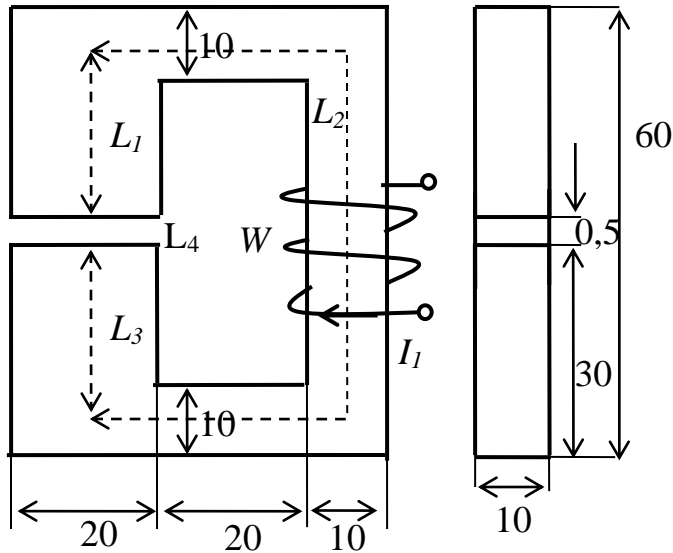


Рис. 2.1

Таблица 2.1.

$B, \text{Тл}$	0	0,65	1,0	1,18	1,25	1,34	1,38
$H, \text{А/м}$	0	100	200	400	600	800	1000

Розв'язок.

Довжини ділянок із середньою силовою лінією $L_1 = 0,025$ м; $L_2 = 0,12$ м;
 $L_3 = 0,025$ м; $L_4 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Перерізи ділянок $S_1 = S_3 = S_4 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $S_2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Значення індукції в перерізах магнітопроводу

$$B_1 = B_3 = B_4 = \Phi / S_1 = 0,65 \text{ Тл}; \quad B_2 = \Phi / S_2 = 1,3 \text{ Тл}.$$

За кривою намагнічування знаходимо напруженості магнітного поля на ділянках магнітопроводу

$$H_1 = H_3 = 100 \text{ А/м}; \quad H_2 = 650 \text{ А/м}.$$

Напруженість в повітряному зазорі

$$H_4 = 0,8 \cdot 10^6 B_4 = 520 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Магніторушійна сила обмотки

$$F = I_1 W = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_3 L_3 + H_4 L_4 = 343 \text{ А}.$$

Намагнічувальний струм обмотки
 $I_1 = F/W = 1,14 \text{ A}$.

2.3. Розрахунок магнітних потоків по заданих намагнічувальних силах (зворотна задача)

Задача.

Магнітопровід з литої сталі (рис.2.2) має дві обмотки з струмами $I_1 = 10 \text{ A}$ і $I_2 = 20 \text{ A}$. Перша котушка W_1 має 200 витків, а друга W_2 має 218 витків. Додатні напрямки струмів в котушках вказані на рис.2.2 стрілками. Розміри магнітопроводу: $S_1 = S_2 = 30 \text{ см}^2$; $S_3 = S_0 = 36 \text{ см}^2$; $L_1 = L_2 = 46 \text{ см}$; $L_3 = 24,8 \text{ см}$; $l_0 = 0,2 \text{ см}$ (L, l – довжини середніх магнітних ліній і повітряного зазору). Знайти розподіл магнітних потоків в осердях. Потоками розсіювання знехтувати. Матеріал магнітопроводу виконаний з холоднокатаної листової сталі товщиною 1,75 мм.

Розв'язок.

Напрямок магнітних потоків вибираємо довільно. На підставі першого і другого законів Кірхгофа для магнітних кіл складаємо рівняння:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_3 &= \Phi_1 + \Phi_2; \\ I_1 W_1 &= H_1 L_1 + H_3 L_3 + H_0 l_0 = H_1 L_1 + U_{M3}; \\ I_2 W_2 &= H_2 L_2 + H_3 L_3 + H_0 l_0 = H_2 L_2 + U_{M3}; \\ U_{M3} &= H_3 L_3 + H_0 l_0. \end{aligned} \right\}$$

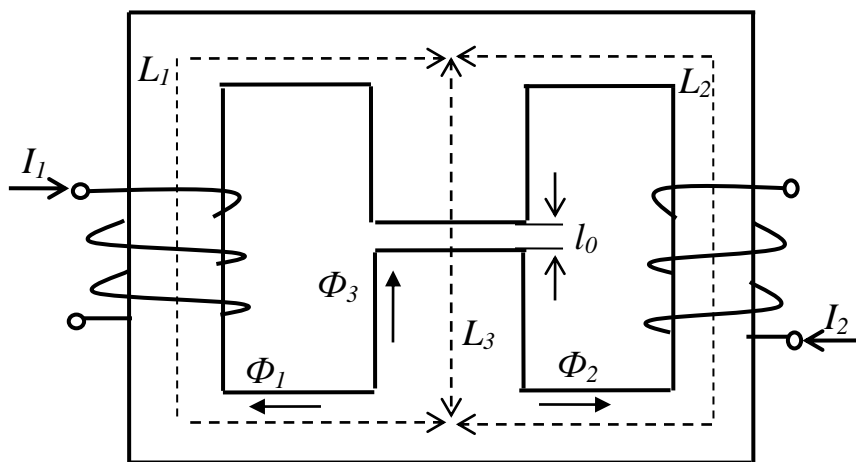


Рис. 2.2

Так як залежність між магнітним потоком Φ і напруженістю магнітного поля H не має загального аналітичного виразу, то отриману систему рівнянь

вирішуємо графічним методом. Для розв'язку рівнянь будуюмо криві залежностей магнітних потоків в стрижнях магнітопроводів від магнітної напруги U_{M3} (рис.2.3). Великою магнітних потоків задаємося у межах від $150 \cdot 10^{-5}$ Вб до $510 \cdot 10^{-5}$ Вб, знаходимо магнітну індукцію в стрижнях, а потім по кривій намагнічування визначаємо напруженість магнітного поля H . Знаючи напруженість магнітного поля H , знаходимо спади магнітних потенціалів на ділянках для різних значень магнітних потоків. Результати обчислень зведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

$\Phi \cdot 10^{-5}$, Вб	$B_1 = B_2 \cdot 10^{-5}$, Вб/см ²	$H_1 = H_2$, А/см	$H_1 L_1 = H_2 L_2$, А	$I_1 W_1 - H_1 L_1$, А	$I_2 W_2 - H_2 L_2$, А
150	5	2,3	106	1894	4254
210	7	4	184	1816	4176
240	8	5	230	1770	4130
300	10	7,5	345	1655	4015
360	12	12,5	575	1425	3785
390	13	16,7	770	1230	3560
450	15	35	1610	390	2750
510	17	73	3360	-1360	1000

За даними таблиці 2.2 будуюмо криві $\Phi_1(I_1 W_1 - H_1 L_1)$; $\Phi_2(I_2 W_2 - H_2 L_2)$ (рис.2.3) де $I_1 W_1 - H_1 L_1 = I_2 W_2 - H_2 L_2 = H_3 L_3 + H_0 l_0 = U_{M3}$, тобто магнітна напруга на третій ділянці. Так як значення магнітних потоків повинні задовольняти рівняння $\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2$, будуюмо ще одну допоміжну криву $\Phi_1 + \Phi_2 = f(U_{M3})$.

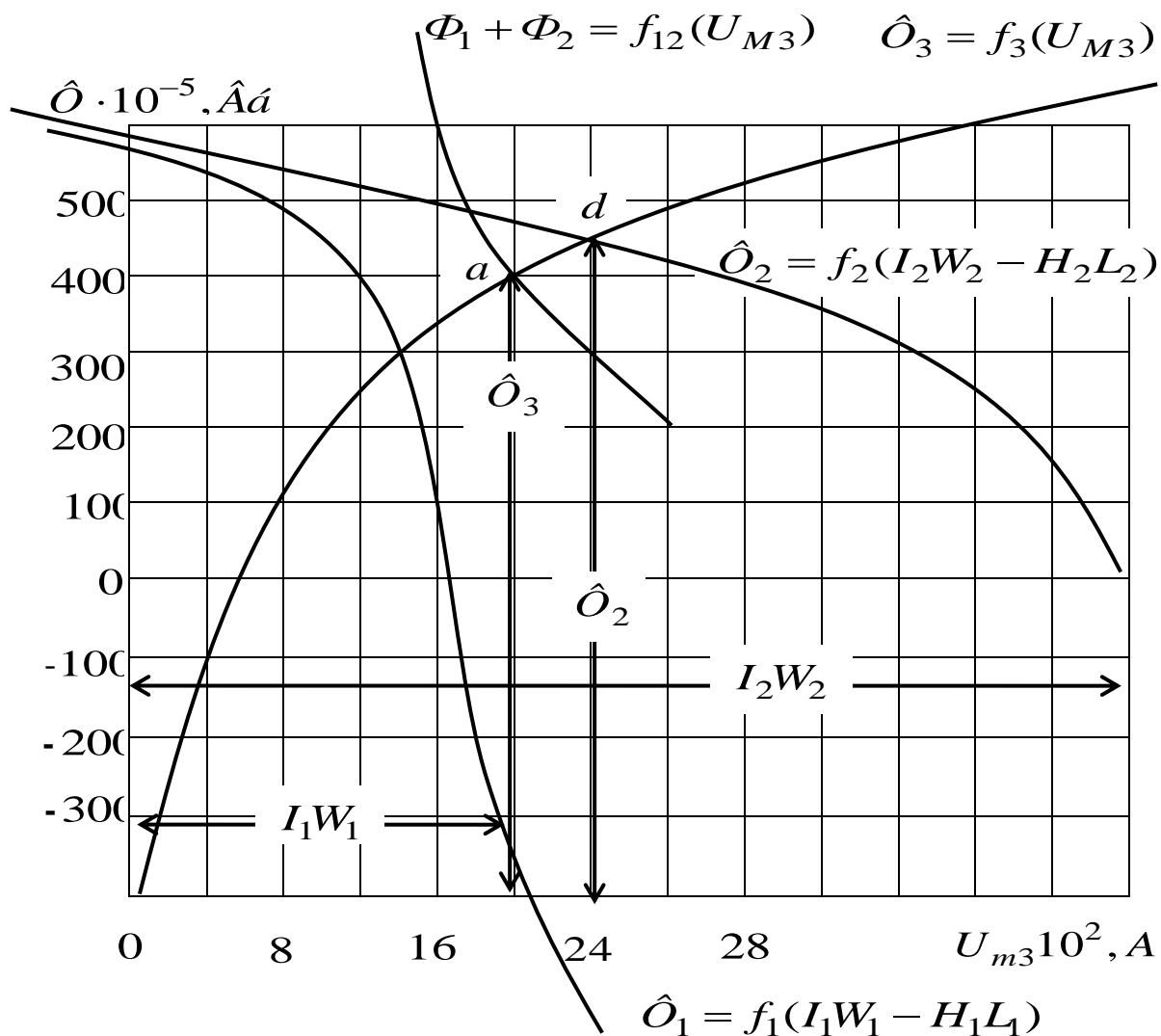


Рис.2.3

Для побудови допоміжної кривої підсумовуємо ординати кривих $\Phi_1 = f_1(U_{M3})$ і $\Phi_2 = f_2(U_{M3})$ для одних і тих же значень магнітної напруги U_{M3} . Ордината точки перетину кривої $\Phi_1 + \Phi_2 = f(U_{M3})$ з кривою $\Phi_3 = f_3(U_{M3})$ визначає величину потоку \hat{O}_3 , так як для цієї точки справедливі всі рівняння, що визначають магнітний стан розрахункового магнітопроводу, тобто

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$I_1W_1 - H_1L_1 = I_2W_2 - H_2L_2 = H_3L_3 + H_0l_0.$$

Для знаходження магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 проведемо через точку *a* пряму паралельну осі ординат до перетину з кривою $\Phi_1(I_1W_1 - H_1L_1)$ і $\Phi_2 = f_2(U_{M3})$. Отримаємо відрізки, що визначають в масштабі потоки $\Phi_1 = \Phi_2$.

Зауважимо, що попередньо обране додатний напрямок потоку Φ_1 не співпало з дійсним напрямком потоку в стрижні магнітопроводу, і його значення отримано негативним.

2.4. Розрахунок спадів магнітних напруг в стрижнях магнітопроводу за заданими намагнічуючими силами

Задача.

Початкові дані магнітного кола, наведеної на рис.2.4:

- число витків котушки першого стрижня $W_1 = 200$ витків;
- намагнічуючий струм другої котушки $I_2 = 10$ А;
- число витків котушки другого стрижня $W_2 = 150$ витків;
- величина магнітного зазору в третьому стрижні $l_{02} = 10$ мм.

Розміри магнітопроводу на рис.2.2 вказані в міліметрах.

Додаткова умова $\Phi_1 = \Phi_3$.

Крива намагнічування стали магнітопроводу задана таблично, табл.2.3.

Таблица 2.3.

$B, \text{Тл}$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
$H, \text{А/м}$	0	200	400	950	3900	15000

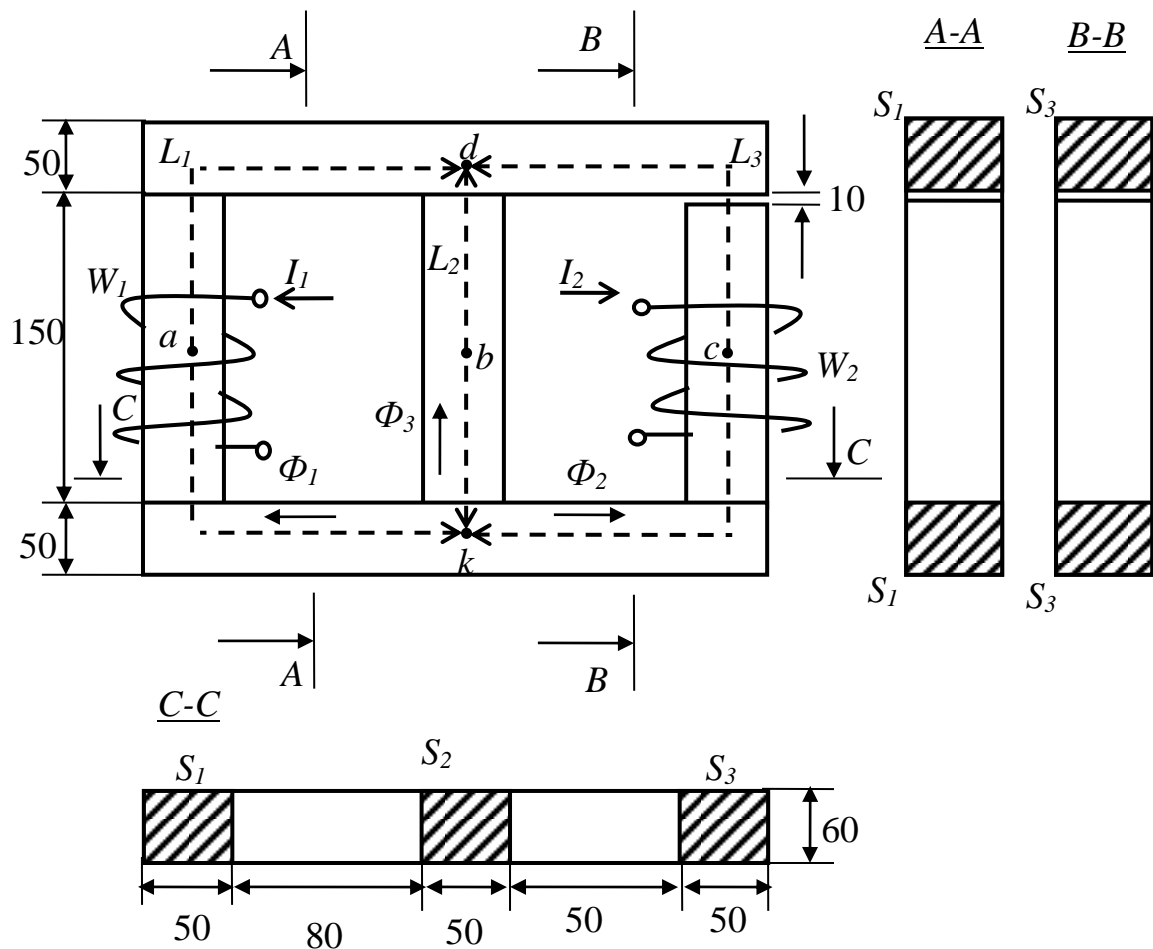


Рис. 2.4

Для магнітного кола (рис. 2.4) розрахувати:

- намагнічуючий струм першої котушки;
- магнітні потоки стрижнів;
- спади магнітних напруг між точками a і d двома шляхами, вибравши напрямок обходу по і проти ходу стрілки годинника;
- накреслити електричну еквівалентну схему заміщення, вказати на ній напрямки магнітних потоків і магніторушійних сил;
- скласти розрахункову систему рівнянь за законами Кірхгофа і визначити значення магнітної індукції в повітряному зазорі.

Розв'язок.

Для визначення магнітних потоків магнітне коло розбиваємо на однорідні ділянки, кожна з яких виконана з однорідного матеріалу і має однаковий перетин уздовж всієї ділянки.

Визначаємо довжини L_1 , L_2 , L_3 і перетини S_1 , S_2 , S_3 однорідних ділянок магнітопроводу.

Довжина середньої магнітної лінії першої ділянки
 $L_1 = (25 + 80 + 25 + 25 + 150 + 25 + 25 + 80 + 25) \cdot 10^{-3} = 0,46 \text{ м}$.

Довжина середньої магнітної лінії другої ділянки
 $L_2 = L'_2 + L''_2 = (25 + 50 + 25 + 25 + 150 - 10 + 25 + 25 + 50 + 25) \cdot 10^{-3} = 0,39 \text{ м}$.

Довжина повітряного зазору
 $l_{02} = 10 \cdot 10^{-3} = 0,01 \text{ м}$.

Довжина середньої магнітної лінії третьої ділянки

$L_3 = (25 + 150 + 25) \cdot 10^{-3} = 0,2 \text{ м}$.

Переріз першої ділянки $S_1 = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

переріз другої ділянки $S_2 = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$;

переріз третьої ділянки $S_3 = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

За правилом правоходового гвинта (правило буравчик) знаходимо напрямки дій магніторушійних сил у стрижнях магнітопроводу. У першому стрижні напрямок намагнічуючої сили $I_1 w_1 = F_1$ від вузла d до вузлу k , а у другому стрижні $I_2 w_2 = F_2$ від вузла k до вузлу d . Напрямок магнітних потоків в стрижнях магнітопроводу задаємо довільно: від вузла k до вузлу d . Задали напрямок магнітних потоків від вузла k до вузла d , вважаючи, що магнітний потенціал точки k вище магнітного потенціалу точки d . В дійсності для виконання першого закону Кірхгофа для магнітних потоків які сходяться у вузлі, один або два магнітних потоки повинні мати протилежний напрямок.

На рис.2.5. приведена еквівалентна схема заміщення магнітопроводу.

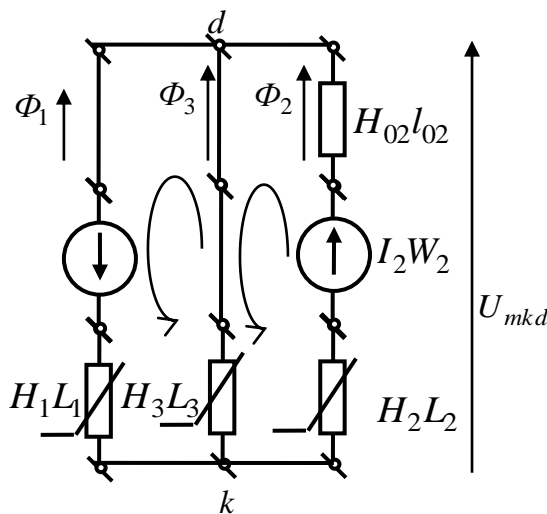


Fig.2.5

Намагнічуючі сили враховані джерелами енергії, повітряний зазор – лінійним опором, а феромагнітні магнітопроводи – нелінійними опорами. Магнітні потоки є еквівалентом електричних струмів, магнітні напруги - електричним напругам. Схема містить три вітки і два вузла, тому її раціонально розрахувати методом двох вузлів.

Для розрахункової схеми складаємо одне рівняння (в схемі два вузла) за першим законом і два - за другим законами Кірхгофа (в схемі два незалежних контури)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0 - \text{для вузла „d” - алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю (перший закон Кірхгофа для магнітних кіл);} \\ I_1W_1 = -H_1L_1 + H_3L_3 - \text{для лівого контуру - алгебраїчна сума магнітних спадів напруг в контурі дорівнює нулю (другий закон Кірхгофа для магнітних кіл);} \\ I_2W_2 = H_2L_2 + H_02l_02 - H_3L_3 - \text{для правого контуру - другий закон Кірхгофа для магнітних кіл.} \end{array} \right.$$

Отримана система рівнянь є нелінійною. У ній змінюються коефіцієнти H_1 , H_2 , H_3 рівнянь через насичення матеріалу магнітопроводу. Втрачається лінійна залежність між напруженістю магнітного поля H і магнітної індукції B при зміні струму котушки намагнічування через явища насичення магнітопроводу.

Розрахунок проводимо графічним методом з побудовою вебер-амперних характеристик однорідних віток магнітопроводу.

Для побудова вебер-амперних характеристик складаємо потенційні рівняння для розрахункової схеми

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{mkd} = H_1L_1 + I_1W_1 - \text{для першого стрижня магнітопроводу;} \\ U_{mkd} = H_3L_3 - \text{для третього стрижня магнітопроводу;} \\ U_{mkd} = -I_2W_2 + H_2L_2 + H_02L_02 - \text{для другого стрижня магнітопроводу.} \end{array} \right.$$

Так як стрижні в магнітному колі включені паралельно, то магнітні напруги на них повинні бути однаковими.

Знаючи перерізу магнітопроводів по кривій намагнічування, знаходимо магнітні потоки стрижнів $\Phi_1 = B \cdot S_1$, $\Phi_2 = B \cdot S_2$, $\Phi_3 = B \cdot S_3$. Магнітні

індукції B беруться в останніх рівняннях з кривої намагнічування стали муздромтеатру, таблиця 2.3.

За потенційним рівнянням розраховуємо вебер-амперні характеристики гіток магнітопроводу.

Для першого стрижня магнітопроводу не відомий струм намагнічування, тому зміщення вебер-амперної характеристики щодо початку координат на цьому етапі розрахунку не можемо зробити.

Наведемо приклад розрахунку другий (таблиця 2.3) точки вебер-амперній характеристики магнітопроводів.

Магнітний потік другої вітки знаходимо по кривій намагнічування, таблиця 2.3, і перерізу магнітопроводу, наприклад для другої точки в першому квадраті

$$\Phi_2 = B_2 \cdot S_2 = 0,4 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Магнітне напруження в цій же точці вебер-амперної характеристики

$$U_{mdk} = -I_2 W_2 + H_2 L_2 + H_{02} l_{02} = -10 \cdot 150 + 200 \cdot 0,39 + 32 \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 1778 \text{ А}$$

де H_0 – напруженість поля в повітряному зазорі, знаходиться зі співвідношення

$$H_{02} = \frac{B}{\mu \mu_0} = \frac{0,4}{1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}} = 32 \cdot 10^4 \text{ А/м;}$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – абсолютна магнітна проникність порожнечі; $\mu = 1$ – відносна магнітна проникність повітря.

Магнітне напруження на третьому стрижні $U_{mdk} = H_3 L_3 = 200 \cdot 0,2 = 40 \text{ А.}$

Магнітний потік в другій точці третього стрижня

$$\Phi_3 = 0,4 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4

$B, \text{Тл}$	$H, \text{А/м}$	Второй стержень		Третий стержень	
		$U_{mdk} = -I_2 W_2 + H_2 L_2 + H_{02} L_{02}, \text{А}$	$\Phi_2 = B \cdot S_2 \cdot 10^{-4}, \text{Вб}$	$U_{mdk} = H_3 L_3, \text{А}$	$\Phi_3 = B \cdot S_3 \cdot 10^{-4}, \text{Вб}$
-2,0	-15000	-23274	-6,0	-3000	-6,0
-1,6	-3900	-15760	-4,8	-780	-4,8
-1,2	-950	-11425	-3,6	-190	-3,6
-0,8	-400	-8025	-2,4	-80	-2,4
-0,4	-200	-4762	-1,2	-40	-1,2
0	0	-1500	0	0	0
0,4	200	1762	1,2	40	1,2
0,8	400	5025	2,4	80	2,4
1,2	950	8425	3,6	190	3,6
1,6	3900	12760	4,8	780	4,8
2,0	15000	20274	6,0	3000	6,0

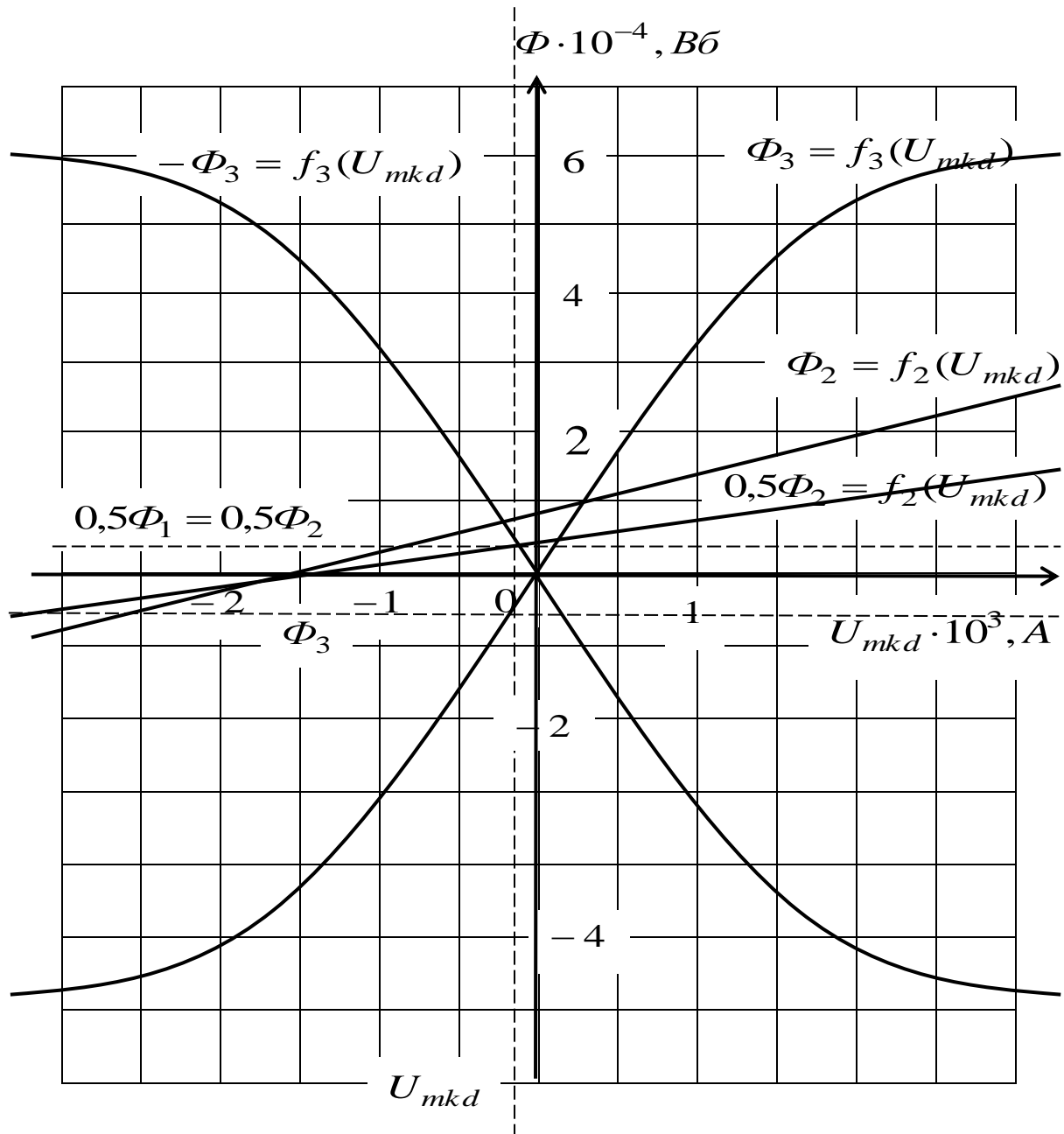


Рис.2.6

На рис.2.6. побудовані вебер-амперні характеристики гілок муздраттеатру. Спочатку побудовані характеристики другого і третього стрижня відповідно до даних таблиці 2.4. Потім використано додаткову умову $\Phi_1 = \Phi_3$, тоді за першим законом Кірхгофа для магнітних кіл маємо $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$, тобто $\Phi_2 + 2\Phi_3 = 0$ або $\Phi_2 = -2\Phi_3$ остаточно $0,5\Phi_2 = -\Phi_3$. Побудовано графіки $0,5\Phi_2 = f_2(U_{mkd})$ і $-\Phi_3 = f_3(U_{mkd})$. Точка перетину останніх графіків визначає робочу точку магнітних стрижнів. З графіків визначаємо: $\Phi_3 = -0,4 \cdot 10^{-4}$ Вб; $\Phi_2 = 0,8 \cdot 10^{-4}$ Вб, тобто єсть $\Phi_1 = \Phi_3 = -0,4 \cdot 10^{-4}$ Вб. Магнітне напруження на паралельних вітках $U_{mkd} = -150$ А. Від'ємний знак магнітних потоків свідчить про протилежний напрямок потоків в третьому і першому стрижнях.

Знаючи магнітний потік в першому стрижні знаходимо магнітну індукцію в першому стрижні $B_1 = \Phi_1 / S_1 = -0,4 \cdot 10^{-4} / 3 \cdot 10^{-4} = -0,13$, Тл.

Робимо лінійну інтерполяцію прямою лінією, що проходить через дві точки початкової кривої намагнічування, розраховуємо напруженість магнітного поля в першому стрижні

$$\frac{B_1 - 0}{0,4 - 0} = \frac{H_1 - 0}{200 - 0}; H_1 = -65 \text{ А/м.}$$

Для першого стрижня магнітопроводу $U_{mkd} = H_1 L_1 + I_1 W_1$, звідки знаходимо намагнічуючий струм першої котушки

$$I_1 = \frac{U_{mkd} - H_1 L_1}{W_1} = -0,6, \text{ А.}$$

Напрямок струму повинен бути протилежним до вказаного на рис.2.4.

Магнітна індукція в третьому стрижні

$$B_3 = \Phi_3 / S_3 = -0,4 \cdot 10^{-4} / 3 \cdot 10^{-4} = -0,13, \text{ Тл.}$$

Напруженість магнітного поля в третьому стрижні збігається з напруженістю магнітного поля в першому стрижні

$$H_3 = -65 \text{ А/м.}$$

Спад магнітної напруги на ділянці $a-d$

$$U_{mad} = -\frac{1}{2}(-H_1 L_1 + I_1 W_1) = -45,05, \text{ А.}$$

Спад магнітної напруги на ділянці $a-k-b-d$

$$U_{makbd} = \frac{H_1 L_1}{2} - \frac{I_1 W_1}{2} + H_3 L_3 = 45,05, \text{ А.}$$

2.5. Розрахунково-графічне завдання "Розрахунок магнітних кіл при постійних намагнічуючих силах"

За початковими даними магнітного кола, рис.2.7, таблиця 2.6, виконати наступні розрахунки:

1. Розрахувати магнітне коло методом двох вузлів, визначити задані величини, що зазначені в таблиці.
 2. За результатами, отриманими в пункті 1, знайти магнітну напругу між двома точками магнітного кола, обчисливши її спочатку по найкоротшому шляху а потім за будь-яким іншим шляхом, обраним на власний розсуд.
 3. Для прийнятих в п.1 додатних напрямків магнітних потоків і заданого напрямку намагнічуючих сил скласти систему рівнянь за законами Кірхгофа.
- Примітка: точки a, b, c, d, k знаходяться посередині кожної ділянки магнітопроводу. Крива намагнічування стали магнітопроводу задана таблично, табл.2.5.

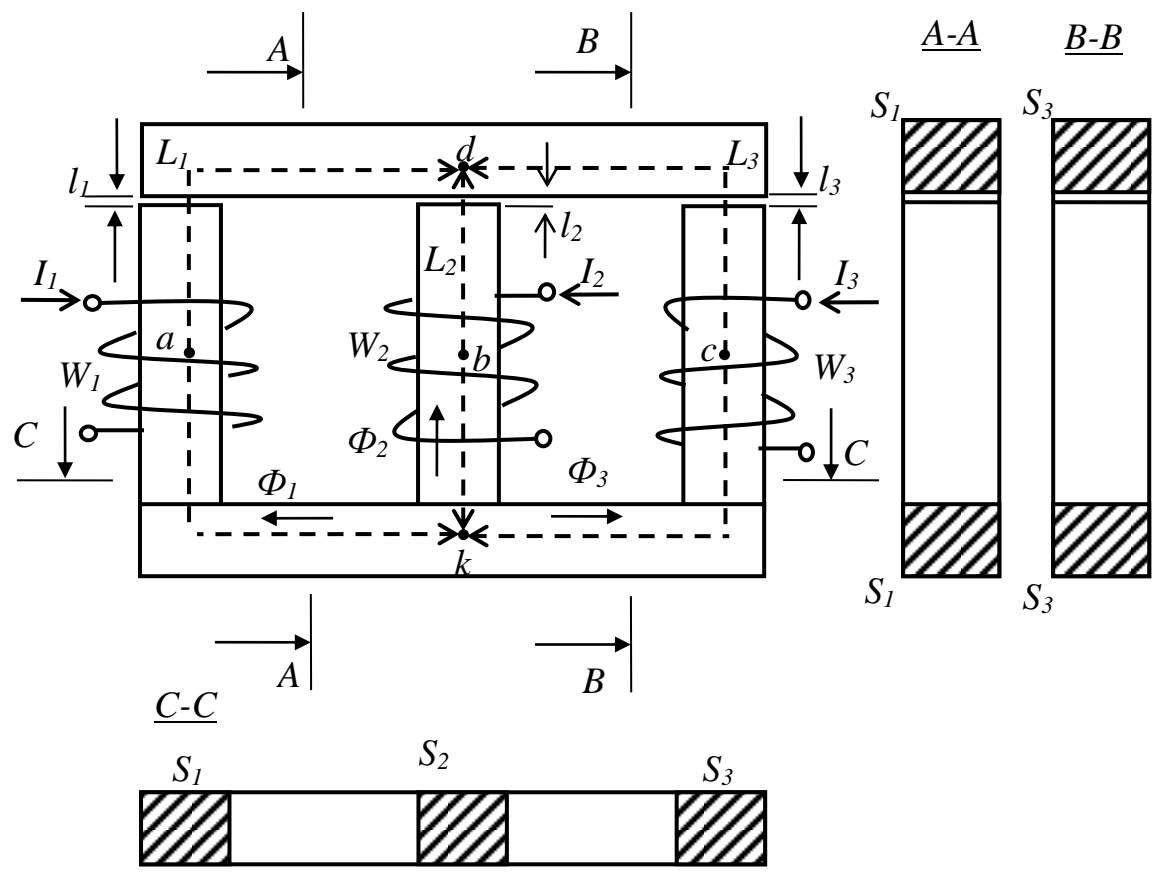


Рис. 2.7

Таблица 2.5.

$B, Тл$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
$H, А/м$	0	200	400	950	3900	15000

Таблиця 2.6.

Варіант	Перший стрижень магнітопроводу					Другий стрижень магнітопроводу					Третій стрижень магнітопроводу					Додаткова умова $\Phi \cdot 10^{-4}$ Вб	Визначити
	L_1 , см	S_1 , см ²	W_1 , витки	I_1 , А	l_{01} , мм	L_2 , см	S_2 , см ²	W_2 , витки	I_2 , А	l_{02} , мм	L_3 , см	S_3 , см ²	W_3 , витки	I_3 , А	l_{03} , мм		
00	25,0	8,5	250	0,07	0,0	14,0	8,2	–	0,2	0,0	23,0	14,9	98	1,2	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30,0$	W_2, Φ_2
01	20,0	4,0	413	1,1	0,5	12,0	6,06	0	0,0	0,0	38,0	4,05	250	1,0	0,0	–	Φ_1, Φ_2
02	80,0	5,7	300	0,6	0,0	25,0	3,9	200	–	0,0	80,0	9,5	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	I_2, Φ_1
03	20,0	4,0	100	0,3	0,0	10,0	8,0	300	–	0,0	30,0	5,6	250	0,21	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	I_2, Φ_3
04	33,5	7,6	500	0,21	0,0	12,0	12,0	600	0,05	0,0	45,0	11,3	975	–	0,0	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20,0$	I_3, Φ_1
05	45,0	15,4	300	1,0	0,0	22,0	10,4	0	0,0	0,0	40,0	15,0	400	0,5	1,0	–	Φ_1, Φ_2
06	45,0	44,0	300	0,5	0,0	15,0	14,2	–	0,3	0,0	35,0	13,7	0	0,0	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	W_2, Φ_1
07	20,0	3,9	215	1,0	0,0	10,0	4,8	–	0,1	0,0	26,0	4,6	500	0,2	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	W_2, Φ_3
08	17,0	7,9	615	0,1	0,0	5,0	4,8	420	0,05	0,0	26,0	4,4	150	–	0,0	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20$	I_3, Φ_2
09	60,0	60,0	400	0,65	0,0	20,0	84,0	0	0,0	1,25	60,0	60,0	400	0,575	0,0	–	Φ_1, Φ_2
10	50,0	25,0	500	0,7	0,0	28,0	51,0	0	0,0	0,0	50,0	50,0	300	–	0,0	$\Phi_1 = \Phi_3$	I_3, Φ_1
11	12,0	2,0	100	–	0,0	4,0	1,0	500	0,04	0,0	12,0	12,0	196	0,1	0,0	$\Phi_1 = 25,0$	I_1, Φ_3
12	40,0	3,0	300	0,2	0,0	12,0	5,0	390	–	0,0	40,0	8,0	0	0,0	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_2
13	20,0	8,0	0	0	0,1	7,0	2,0	500	0,2	0,0	20,0	1,78	500	0,3	0,0	–	Φ_2, Φ_3
14	25,0	5,3	100	0,5	0,0	10,0	5,0	–	0,2	0,0	32,0	10,2	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	W_2, Φ_1
15	30,0	8,0	1450	0,1	0,0	12,0	14,0	204	0,25	0,0	35,0	7,0	2000	–	0,0	$\Phi_3 = 98,0$	I_3, Φ_2
16	25,0	3,8	76	0,25	0,0	12,0	7,6	275	–	0,0	32,0	10,1	160	0,5	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_1
17	15,0	7,2	135	0,47	0,0	8,0	4,8	–	0,1	0,0	20,0	2,9	70	0,2	0,0	$\Phi_2 = 70,0$	W_2, Φ_1
18	85,0	100,0	3000	0,1	0,0	33,0	200,0	500	0,7	0,52	85,0	100,0	0	0,0	0,0	–	Φ_1, Φ_2
19	45,0	12,00	0	0,0	0,0	15,0	12,0	550	0,4	0,0	45,0	9,0,0	520	–	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	I_3, Φ_3
20	30,0	9	350	0,05	0,0	10,0	7,8	–	0,2	0,0	25,0	15	1175	0,1	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30,0$	W_2, Φ_1

Продовження таблиці 2.6.

Варіант	Перший стрижень магнітопроводу					Другий стрижень магнітопроводу					Третій стрижень магнітопроводу					Додаткова умова $\Phi \cdot 10^{-4}$ $B\delta$	Визначити
	L_1 , см	S_1 , см ²	W_1 , витки	I_1 , А	l_{01} , мм	L_2 , см	S_2 , см ²	W_2 , витки	I_2 , А	l_{02} , мм	L_3 , см	S_3 , см ²	W_3 , витки	I_3 , А	l_{03} , мм		
21	30,0	4,0	300	1,52	0,5	10,0	6,0	0	0,0	0,0	30,0	4,0	100	2,5	0,0	–	Φ_1, Φ_2
22	100,0	6,15	600	0,3	0,0	33,0	4,2	200	–	0,0	100,0	10,0	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	I_2, Φ_1
23	30,0	4,3	300	0,1	0,0	12,0	6,0	300	–	0,0	20,0	4,8	125,0	0,42	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	I_2, Φ_3
24	30,0	7,3	105	1,0	0,0	11,5	12,3	100	0,3	0,0	22,5	10,0	975	–	0,0	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20,0$	I_3, Φ_1
25	32,0	14,4	400	0,75	0,0	25,0	10,5	0	0,0	0,0	40,0	15,0	200	1,0	1,0	–	Φ_3, Φ_2
26	40,0	42,0	375	0,4	0,0	13,0	14,0	–	0,3	0,0	40,0	15,0	0	0,0	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	W_2, Φ_1
27	30,0	4,2	430	0,5	0,0	10,0	4,8	–	0,1	0,0	32,0	4,9	200	0,5	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	W_2, Φ_3
28	19,0	8,1	400	0,154	0,0	6,5	5,1	210	0,1	0,0	15,0	3,2	150	–	0,0	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20,0$	I_3, Φ_2
29	55,0	55,0	260	1,0	0,0	18,0	84,0	0	0,0	1,25	57,0	57,0	230	1,0	0,0	–	Φ_3, Φ_2
30	55,0	25,3	700	0,5	0,0	25,0	50,0	0	0,0	0,0	47,0	45,5	300	–	0,0	$\Phi_1 = \Phi_3$	I_3, Φ_3
31	12,0	2,0	100	–	0,0	4,0	1,0	500	0,04	0,0	12,0	12,0	196	0,1	0,0	$\Phi_1 = 25,0$	I_1, Φ_3
32	35,0	2,9	240	0,25	0,0	10,0	4,75	390	–	0,0	45,0	8,33	0	0,0	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_2
33	13,5	7,5	0	0	0,1	4,32	1,9	100	1,0	0,0	19,8	1,75	300	0,5	0,0	–	Φ_1, Φ_3
34	30,0	5,6	250	0,2	0,0	10,0	5,0	200	–	0,0	18,0	8,9	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	I_2, Φ_3
35	28,0	7,95	290	0,5	0,0	11,5	13,8	51	1	0,0	37,0	7,1	2000	–	0,0	$\Phi_3 = 98,0$	I_3, Φ_2
36	28,0	3,9	38	0,5	0,0	8,0	6,8	275	–	0,0	28,0	9,9	320	0,25	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_2
37	25,0	8,0	635	0,1	0,0	10,0	5,0	–	0,1	0,0	25,0	3,0	7	2,0	0,0	$\Phi_2 = 70,0$	W_2, Φ_3
38	70,0	97,0	750	0,4	0,0	35,0	220,0	250	1,4	0,57	70,0	92	0	0,0	0,0	–	Φ_3, Φ_2
39	43,0	11,9	0	0	0,0	14,0	11,5	200	1,1	0,0	48,0	9,1	520	–	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	I_3, Φ_1
40	32,0	9,3	270	0,065	0,0	9,0	7,7	–	0,2	0,0	30,0	15,5	168	0,7	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30,0$	W_2, Φ_2

Продовження таблиці 2.6.

Варіант	Перший стрижень магнітопроводу					Другий стрижень магнітопроводу					Третій стрижень магнітопроводу					Додаткова умова $\Phi \cdot 10^{-4}$ Вб	Визначити
	L_1 , см	S_1 , см ²	W_1 , витки	I_1 , А	l_{01} , мм	L_2 , см	S_2 , см ²	W_2 , витки	I_2 , А	l_{02} , мм	L_3 , см	S_3 , см ²	W_3 , витки	I_3 , А	l_{03} , мм		
41	25,0	4,0	505	0,9	0,5	14,0	6,15	0	0,0	0,0	25,0	3,9	625	0,4	0,0	–	Φ_3, Φ_2
42	90,0	6,0	360	0,5	0,0	30,0	4,0	200	–	0,0	90,0	9,7	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	I_2, Φ_3
43	25,0	4,15	150	0,2	0,0	8,0	4,0	300	–	0,0	35,0	5,95	100	0,525	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	I_2, Φ_1
44	40,0	8,0	210	0,5	0,0	22,5	14,0	300	0,1	0,0	30,0	10	975	–	0,0	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20,0$	I_3, Φ_3
45	40,0	15,0	600	0,5	0,0	20,0	10,3	0	0,0	0,0	40,0	15	800	0,25	1,0	–	Φ_1, Φ_3
46	35,0	10,0	150	1,0	0,0	10,0	13,7	–	0,3	0,0	30,0	14,2	0	0,0	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	W_2, Φ_2
47	35,0	4,3	215	1,0	0,0	10,0	4,8	–	0,1	0,0	20,0	4,4	1000	0,1	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	W_2, Φ_1
48	16,0	7,8	205	0,3	0,0	5,5	4,9	300	0,07	0,0	23,0	4,2	150	–	0,0	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20,0$	I_3, Φ_3
49	65,0	71,0	520	0,5	0,0	22,0	84,0	0	0,0	1,25	62,0	62,0	460	0,5	0,0	–	Φ_1, Φ_2
50	48,0	24,9	350	1,0	0,0	30,0	51,5	0	0,0	0,0	52,0	51,5	300	–	0,0	$\Phi_1 = \Phi_3$	I_3, Φ_2
51	13,0	2,05	100	–	0,0	3,0	0,94	1000	0,02	0,0	11,0	1,18	132	0,15	0,0	$\Phi_1 = 25,0$	I_1, Φ_3
52	45,0	3,1	200	0,3	0,0	14,0	5,3	390	–	0,0	35,0	7,8	0	0,0	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 10,0$	I_2, Φ_2
53	19,5	7,7	0	0,0	0,1	10,0	2,1	200	0,5	0,0	24,2	1,8	750	0,2	0,0	–	Φ_2, Φ_1
54	18,0	4,9	200	0,25	0,0	10,0	5,0	–	0,2	0,0	25,0	9,5	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	W_2, Φ_1
55	26,0	7,9	145	1,0	0,0	11,0	13,6	102	0,5	0,0	39,0	7,2	2000	–	0,0	$\Phi_3 = 98,0$	I_3, Φ_2
56	35,0	4,1	19	1,0	0,0	6,0	6,3	275	–	0,0	25,0	9,6	400	0,2	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_3
57	20,0	7,7	107	0,59	0,0	9,0	4,9	–	0,1	0,0	15,0	2,6	20	0,7	0,0	$\Phi_2 = 70,0$	W_2, Φ_3
58	100,0	104,0	125	2,4	0,0	28,0	182,0	125	2,8	0,48	95,0	200,0	0	0,0	0,0	–	Φ_1, Φ_3
59	40,0	11,8	0	0,0	0,0	13,0	11,0	100	2,2	0,0	50,0	9,3	520	–	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	I_3, Φ_2
60	34,0	9,5	175	0,1	0,0	12	8,0	–	0,2	0,0	28,0	15,6	47	2,5	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30,0$	W_2, Φ_3

Продовження таблиці 2.6.

Варіант	Перший стрижень магнітопроводу					Другий стрижень магнітопроводу					Третій стрижень магнітопроводу					Додаткова умова $\Phi \cdot 10^{-4}$ Вб	Визначити
	L_1 , см	S_1 , см ²	W_1 , витки	I_1 , А	l_{01} , мм	L_2 , см	S_2 , см ²	W_2 , витки	I_2 , А	l_{02} , мм	L_3 , см	S_3 , см ²	W_3 , витки	I_3 , А	l_{03} , мм		
61	35,0	4,1	350	1,3	0,5	8,0	5,8	0	0,0	0,0	20,0	3,8	500	0,5	0,0	–	Φ_1, Φ_2
62	90,0	6,0	100	1,8	0,0	30,0	4,0	–	1,1	0,0	85,0	9,7	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	W_2, Φ_2
63	15,0	3,8	60	0,5	0,0	6,0	2,0	300	–	0,0	20,0	4,8	350	0,15	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	I_2, Φ_1
64	37,5	7,8	200	0,525	0,0	13,0	12,8	150	0,2	0,0	37,5	10,5	975	–	0,0	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20,0$	I_3, Φ_2
65	35,0	14,6	900	0,3	0,0	18,0	10,2	0	0,0	0,0	40,0	15,0	1000	0,2	1,0	–	Φ_1, Φ_3
66	30,0	38,0	600	0,25	0,0	17,0	14,7	–	0,3	0,0	45,0	15,3	0	0,0	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	W_2, Φ_3
67	25,0	4,0	1075	0,2	0,0	10,0	4,8	–	0,1	0,0	29,0	4,8	2000	0,05	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	W_2, Φ_3
68	20,0	8,2	615	0,1	0,0	7,0	5,2	105	0,2	0,0	17,0	3,6	150	–	0,0	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20,0$	I_3, Φ_1
69	58,0	58,0	200	1,3	0,0	9,0	84,0	0	0,0	1,25	55,0	55,0	575	0,4	0,0	–	Φ_1, Φ_2
70	45,0	24,7	700	0,5	0,0	27,0	50,4	0	0,0	0,0	48,0	47,5	300	–	0,0	$\Phi_1 = \Phi_3$	I_3, Φ_1
71	10,0	1,92	100	–	0,0	4,5	10,15	200	0,1	0,0	14,0	1,26	9,8	0,2	0,0	$\Phi_1 = 25,0$	I_1, Φ_2
72	38,0	2,97	400	0,15	0,0	11,0	4,9	390	–	0,0	43,0	8,25	0	0,0	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_3
73	29,8	8,2	0	0,0	0,1	13,0	2,2	1000	0,1	0,0	25,0	1,82	200	0,75	0,0	–	Φ_2, Φ_3
74	32,0	6,0	125	0,4	0,0	10,0	5	200	–	0,0	20,0	9,0	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	I_2, Φ_2
75	32,0	8,1	725	0,2	0,0	12,5	14,1	170	0,3	0,0	33,0	6,9	2000	–	0,0	$\Phi_3 = 98,0$	I_3, Φ_1
76	30,0	4,0	38	0,5	0,0	10,0	7,0	275	–	0,0	30,0	10,0	400	6,2	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_2
77	30,0	8,4	89	0,73	0,0	12,0	5,2	–	0,1	0,0	26,0	3,0	35	0,4	0,0	$\Phi_2 = 70,0$	W_2, Φ_1
78	110,0	105,0	600	0,5	0,0	27,0	17,7	175	2,0	0,46	100,0	240	0	0,0	0,0	–	Φ_1, Φ_2
79	48,0	12,1	0	0,0	0,0	16,0	12,9	220	1,0	0,0	43,0	8,8	520	–	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	I_3, Φ_1
80	26,0	8,6	125	0,14	0,0	13,0	8,1	–	0,2	0,0	22,0	14,7	25	4,7	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 30,0$	W_2, Φ_1

Варіант	Перший стрижень магнітопроводу					Другий стрижень магнітопроводу					Третій стрижень магнітопроводу					Додаткова умова $\Phi \cdot 10^{-4}$ Вб	Визначити
	L_1 , см	S_1 , см ²	W_1 , витки	I_1 , А	l_{01} , мм	L_2 , см	S_2 , см ²	W_2 , витки	I_2 , А	l_{02} , мм	L_3 , см	S_3 , см ²	W_3 , витки	I_3 , А	l_{03} , мм		
81	40,0	4,1	455	1,0	0,5	10,0	6,0	0	0,0	0,0	40,0	4,15	125	2,0	0,0	–	Φ_1, Φ_3
82	85,0	5,9	200	0,9	0,0	25,0	3,9	–	1,1	0,0	95,0	9,9	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	W_2, Φ_3
83	30,0	4,3	200	0,15	0,0	10,0	8,0	300	–	0,0	20,0	4,8	150	0,35	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	I_2, Φ_1
84	40,0	8,0	420	0,25	0,0	15,0	13,0	150	0,2	0,0	30,0	10,0	975	–	0,0	$\Phi_3 - \Phi_1 = 20,0$	I_3, Φ_1
85	48,0	15,6	1500	0,2	0,0	20,0	10,3	0	0	0,0	40,0	15,0	800	0,25	1,0	–	Φ_3, Φ_2
86	38,0	41,0	500	0,3	0,0	12,0	13,8	–	0,3	0,0	50,0	15,8	0	0,0	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	W_2, Φ_1
87	18,0	3,8	860	0,25	0,0	10,0	4,8	–	0,1	0,0	23,0	4,5	100	1,0	0,0	$\Phi_2 = 0,0$	W_2, Φ_3
88	18,0	8,0	205	0,3	0,0	6,0	5,0	210	0,1	0,0	20,0	4,0	150	–	0,0	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20,0$	I_3, Φ_2
89	63,0	66,5	650	0,4	0,0	21,0	84,0	0	0,0	1,25	65,0	65,0	200	1,15	0,0	–	Φ_3, Φ_2
90	52,0	25,2	1000	0,35	0,0	29,0	51,0	0	0,0	0,0	55,0	55,3	300	–	0,0	$\Phi_1 = \Phi_3$	I_3, Φ_2
91	14,0	2,7	100	–	0,0	5,0	1,03	100	0,2	0,0	10,0	11,4	392	0,05	0,0	$\Phi_1 = 25,0$	I_1, Φ_2
92	42,0	3,07	600	0,2	0,0	13,0	5,14	390	–	0,0	37,0	7,9	0	0,0	0,0	$\Phi_2 - \Phi_3 = 20,0$	I_2, Φ_3
93	42,5	9,0	0	0,0	0,1	20,0	2,4	50	2,0	0,0	40,5	2,0	150	1,0	0,0	–	Φ_1, Φ_3
94	20,0	5,0	400	0,125	0,0	10,0	5,0	–	0,2	0,0	30,0	10,0	0	0,0	0,0	$\Phi_1 = \Phi_2$	W_2, Φ_1
95	34,0	8,3	290	0,5	0,0	13,0	14,2	255	0,2	0,0	31,0	6,8	2000	–	0,0	$\Phi_3 = 98,0$	I_3, Φ_2
96	32,0	4,06	76	0,25	0,0	14,0	8,3	275	–	0,0	35,0	10,4	800	0,1	0,0	$\Phi_2 - \Phi_1 = 20,0$	I_2, Φ_3
97	22,0	7,8	635	0,1	0,0	15,0	5,5	–	0,1	0,0	28,0	3,1	28	0,5	0,0	$\Phi_2 = 70,0$	W_2, Φ_2
98	90,0	100,0	150	2,0	0,0	30,0	180,0	700	0,5	0,5	90,0	100	0	0,0	0,0	–	Φ_1, Φ_2
99	50,0	12,1	0	0,0	0,0	17,0	14,0	440	0,5	0,0	40,0	8,6	520	–	0,0	$\Phi_3 = \Phi_2$	I_3, Φ_2

3. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ЗМІННОГО СТРУМУ В СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ

3.1. Методичні вказівки до розрахунку нелінійних електричних кіл в стаціонарних режимах

1. Нелінійні елементи змінного струму за своїми властивостями поділяються на симетричні, несиметричні, інерційні, безінерційні, резистивні, реактивні, з додатними і від'ємними динамічними опорами.
2. Властивості симетричних нелінійних елементів не залежать від напрямку протікає в них струму або прикладеної напруги.
3. Інерційні властивості нелінійних елементів обумовлюються наявністю теплової інерції, що призводить до лінійної залежності між миттєвими значеннями струму і напруги і до нелінійної залежності між діючими значеннями струму і напруги.
3. Розрізняють нелінійні електричні кола з однорідними джерелами енергії, коли у колі діють джерела однієї частоти, і кола з неоднорідними джерелами енергії, що містять джерела різних частот.
4. У колах, що містять нелінійні елементи з від'ємними динамічними опорами можлива поява автоколивальних процесів, коли при підключенні постійного джерела напруги нелінійне коло генерує стійкі коливання струму.
5. Дослідження кіл з вентильними (діодними) елементами проводиться в припущенні, що діод має ідеальну вольт-амперної характеристику: в провідному стані його опір прагне до нульового значення, а в непровідному – опір діода прагне до нескінченно великого значення.
6. Діод перебуває в провідному стані, коли потенціал анода вище потенціалу катода.
7. Розрахунок складних електричних кіл змінного струму робиться на підставі застосування законів Кірхгофа. Ця операція виконується або аналітично – при наявності аналітичних виразів для вольт-амперних характеристик, або графічно – при завданні характеристик у вигляді графіків або таблиць.
8. Для розрахунку нелінійних електричних і магнітних кіл, що допускають кусочно-лінійну апроксимацію характеристик, ефективним методом є метод послідовних наближень, що дозволяє розрахувати параметри будь-яких та скільки-завгодно складних кіл.
9. Якщо відомо, що нелінійний елемент працює на ділянці вольт-амперної характеристики, що приблизно можна вважати лінійним, то задача лінеарізується шляхом заміни робочої ділянки вольт-амперної характеристики прямою лінією і визначення еквівалентних параметрів схеми заміщення.
10. При дослідженні котушок з феромагнітними осердями ефективним методом розрахунку параметрів кола є метод еквівалентних синусоїд, при якому дійсні несинусоїдальні величини замінюються еквівалентними

синусоїдальними. Умовами еквівалентності є: однакові діючі значення і втрати в колі від початкової несинусоїдної кривої і замінної синусоїдальної.

3.2. Розрахунок параметрів в неоднорідному резистивно-вентильному колі по миттєвим значенням

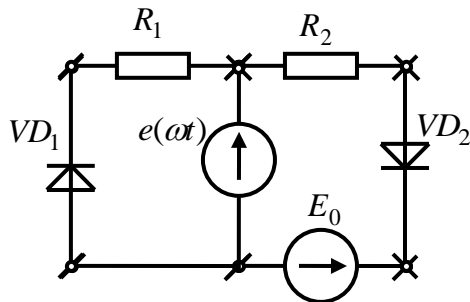


Рис. 3.1

Задача.

Розрахувати струми віток в неоднорідній резистивно-вентильному колі, рис.3.1, що містить нелінійні ідеальні напівпровідникові діоди VD_1, VD_2 і лінійні елементи: $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $E_0 = 5$ В, $e(\omega t) = 20 \sin \omega t$ В. Циклічна частота коливання гармонічного джерела енергії $f = 50$ Гц.

Розв'язок.

Електричне коло містить три вітки і три контури з двома нелінійними елементами. У колі відсутні накопичувачі енергії, тому миттєві значення струмів і спадів напруг збігаються по фазі на елементах кола. Внутрішній опір гармонійного ідеального джерела ЕРС дорівнює нулю, тому схема має два незалежних контури: лівий контур, в який послідовно включені діод VD_1 , резистор R_1 і гармонійний джерело енергії $e(\omega t)$ і правий контур, де послідовно з'єднані гармонійний джерело енергії R_2 , діод VD_2 і джерело постійної ЕРС E_0 .

Період коливання гармонічного джерела енергії

$$T = 1/f = 0,02 \text{ с.}$$

Лівий незалежний контур. У перший напівперіод додатного вихідної напруги гармонійного джерела енергії за час $t = 0 \dots 0,01$ с потенціал катода діода VD_1 вище потенціалу анода, діод перебувати в замкненому стані. В цей період часу струм лівого контуру дорівнює нулю $i_1(\omega t) = 0$. Спад напруги на першому резистивному елементі дорівнює

$$u_{R_1}(\omega t) = R_1 i_1(\omega t) = 0.$$

Напряга джерела енергії прикладена до закритого діода VD_1

$$u_{VD_1}(\omega t) = 20 \sin \omega t \text{ В.}$$

У другій напівперіод від'ємної вихідної напруги гармонійного джерела енергії за час $t = t_0 \dots T$ с потенціал катода діода VD_1 становиться нижче потенціалу анода і діод у момент часу $t_0 = 0,01$ с стрибком переходить у відкритий стан. Струм лівого контуру обмежується резистором R_1 , визначається за законом Ома

$$i_1(\omega t) = e(\omega t) / R_1 = 1 \cdot \sin \omega t \text{ А.}$$

Спад напруги на відкритому діоді дорівнює нулю $u_{VD1}(\omega t) = 0$, напруга джерела енергії прикладена до резистору $u_{R1}(\omega t) = 20 \sin \omega t$ В.

Правий незалежний контур. Наявність в правому контурі джерела постійної ЕРС E_0 призводить до підвищення потенціалу анода на величину E_0 , тому час переходу другого діода у провідний стан VD_2 буде зміщено в бік запізнювання від точок переходу через нуль миттєвого значення напруги джерела енергії на величину t_1

$$E_0 = 20 \sin \omega t_1 = 5; t_1 = \frac{\arcsin 0,25}{2\pi f} = 0,25 \mu\text{s} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

На ділянках часу $0 \dots t_1$ с, $t_0 - t_1 \dots t_0$ с і $t_0 \dots T$ с діод VD_2 знаходиться у непровідному стані і струм контуру дорівнює нулю $i_2(\omega t) = 0$. Напруга джерела енергії прикладена до закритого діода VD_2 $u_{VD1}(\omega t) = 20 \sin \omega t$ В.

На ділянці часу $t_1 \dots t_0 - t_1$ потенціал катода діода VD_2 стає нижче потенціалу анода і діод у момент часу $t_1 = 0,01$ с стрибком переходить у непровідний стан. Струм правого контуру обмежується резистором R_2 та визначається за законом Ома

$$i_2(\omega t) = (e(\omega t) - E_0) / R_2 = 1,5 \cdot \sin \omega t \text{ А.}$$

Струм джерела енергії $i_0(\omega t)$ є сумою струмів лівого $i_1(\omega t)$ і правого $i_2(\omega t)$ контурів:

- ділянка часу $0 \dots t_1$ с $i_0(\omega t) = 0$;
- ділянка часу $t_1 \dots t_0 - t_1$ с $i_0(\omega t) = i_2(\omega t) = 1,5 \cdot \sin \omega t$ А;
- ділянка часу $t_0 - t_1 \dots t_0$ с $i_0(\omega t) = 0$;
- ділянка часу $t_0 \dots T$ с $i_0(\omega t) = 1,5 \cdot \sin \omega t$ А.

Графіки розрахункових значень струмів і напруг гілок, представлені на рис. 3.2.

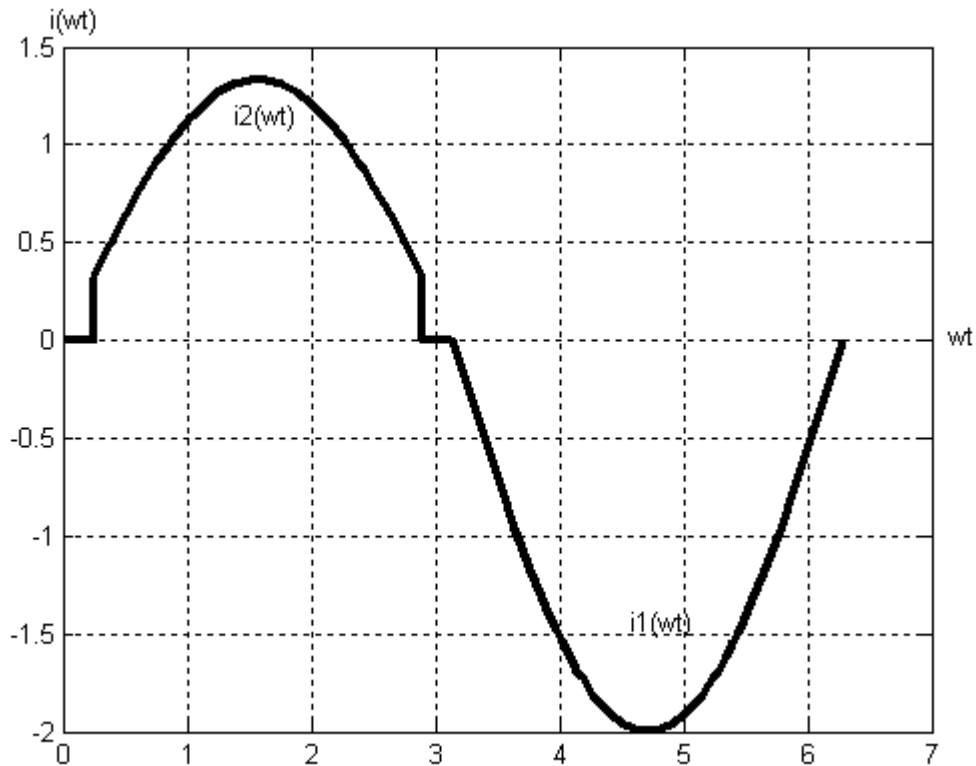


Рис.3.2

3.2. Розрахунок параметрів в однорідному резистивно-вентильному колі по миттєвим значенням

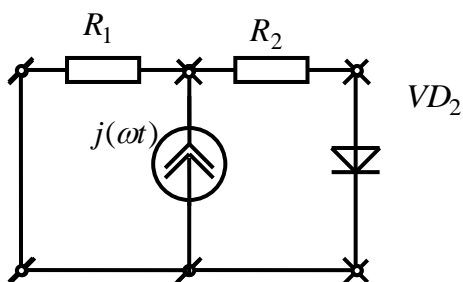


Рис. 3.3

Задача.

Розрахувати струми віток в однорідному резистивно-вентильному колі, рис.3.3, що містить нелінійний ідеальний напівпровідниковий діод VD_2 і лінійні елементи: $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $j(\omega t) = 2 \sin \omega t$ А, $f = 50$ Гц.

Розв'язок.

Електричне коло містить три вітки і три контури з одним нелінійним елементом. У колі відсутні накопичувачі енергії, тому миттєві значення струмів і спадів напруг збігаються по фазі на елементах кола. Внутрішній опір гармонійного ідеального джерела струму дорівнює нескінченності. Виділяємо в схемі два контури: лівий контур, в який включені резистор R_1 і гармоне джерело

енергії $j(\omega t)$ і правий контур де з'єднані гармонійний джерело енергії, резистор R_2 , діод VD_2 .

Період колювання гармонічного джерела енергії $T = 1/f = 0,02$, с.

Перший напівперіод вихідного струму. У перший напівперіод позитивного вихідного струму гармонійного джерела енергії за час $t = 0 \dots T$ с потенціал катода діода VD_2 нижче потенціалу анода, діод перебувати у відкритому стані. В цей період часу струм лівій вітці визначається відповідно до правила

подільника струму $i_1(\omega t) = j(\omega t) \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,67 \sin \omega t$, А. Спад напруги на першому резистивном елементі орівнює $u_{R1}(\omega t) = R_1 i_1(\omega t) = 13,3 \sin \omega t$, В.

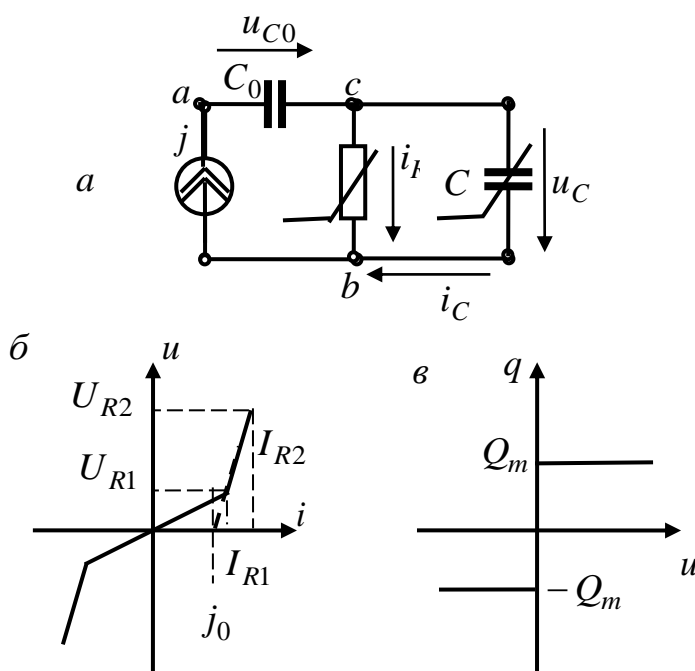
Струм правої вітки $i_2(\omega t) = j(\omega t) \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 1,33 \sin \omega t$, А.

Другий напівперіод вихідного струму. У другій напівперіод негативного вихідного струму гармонійного джерела енергії за час $t = t_0 \dots T$ с потенціал катода діода VD_2 стає вище потенціалу анода і діод в момент часу $t_0 = 0,01$ с срибком переходе у закритий стан. Струм лівої вітки дорівнює току джерела струму $i_1(\omega t) = j(\omega t) = 2 \sin \omega t$, А. Струм правої вітки дорівнює нулю.

Спад напруги на закритому діоді дорівнює падінню напруги на резисторі R_1 $u_{VD2}(\omega t) = 40 \sin \omega t$, В, напруга джерела енергії прикладено до резистору R_1 $u_{R1}(\omega t) = 20 \sin \omega t$, В.

3.3. Розрахунок параметрів в однорідному нелінійному резистивно-ємнісному колі по миттєвим значенням

Задача.



До ідеального джерела струму $j = 0,15 \sin \omega t$, А, ($\omega = 10000$, rad/c) рис.3.4,а, підключені лінійна ємність $C_0 = 10$ мкФ, нелінійна ємність C , кулон-вольтна характеристика приведена на рис.3.4,с ($Q_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Кл) і нелінійний резистор з вольт-амперної характеристикою, наведеної на рис.3.4,б ($U_{R1} = 1$ В, $U_{R2} = 3$ В, $I_{R1} = 0,1$ А, $I_{R2} = 0,2$ А). Потрібно побудувати часові графіки миттєвих змін напруг на елементах схеми.

Рис.3.4

Розв'язок.

Кулон-вольтна характеристика нелінійної ємності C має дві характерні ділянки: горизонтальну і вертикальну. Електрична ємність конденсатора визначається відношенням приростів значень заряду до напруги, тому на горизонтальній ділянці ємність нелінійного конденсатора дорівнює нулю, а на вертикальній – нескінченності. Ємнісний реактивний опір нелінійного конденсатора обернено пропорційно ємності, тому на горизонтальній ділянці кулон-вольтної характеристики нелінійної ємності C її опір дорівнює нескінченності (розривається вітка), а на вертикальному – нулю (шунтується вітка з нелінійним резистивним опором).

Момент переходу з горизонтальної на вертикальну ділянку кулон-вольтної характеристики нелінійної ємності C визначається досягненням величини максимального заряду на конденсаторі Q_m .

Знаючи струм ідеального джерела струму $j = 0,15 \sin 10000t$, А знайдемо заряд, що генерується джерелом енергії

$$q = \int j dt = -\frac{0,15}{10000} \cos \omega \cdot t = -1,5 \cdot 10^{-5} \cos 10000t, \text{ Кл.}$$

Знаходимо момент часу досягнення максимального заряду Q_m на ємності

$$Q_m = -1,0 \cdot 10^{-5} = -1,5 \cdot 10^{-5} \cos \omega \cdot t_C;$$

$$\omega \cdot t_C = \arccos \frac{-1,0 \cdot 10^{-5}}{-1,5 \cdot 10^{-5}} = 0,84, \text{ рад.}$$

Період колювання синусоїдального струму джерела енергії

$$\omega \cdot T = 2\pi = 6,28, \text{ рад.}$$

Нелінійний резистивний опір має дві ділянки з різними динамічними опорами. Динамічний опір на першій ділянці

$$R_{d1} = \Delta U_1 / \Delta I_1 = U_{R1} / I_{R1} = 1/0,1 = 10, \text{ Ом.}$$

Динамічний опір нелінійного резистора на другій ділянці вольт-амперної характеристики

$$R_{d2} = \Delta U_2 / \Delta I_2 = (U_{R2} - U_{R1}) / (I_{R2} - I_{R1}) = 2/0,1 = 20, \text{ Ом.}$$

Зміщення другої ділянки вольт-амперної характеристики нелінійного резистора, відносно початку координат знаходимо шляхом лінійної екстраполяції прямою лінією, що проходить через дві точки ($U_{R1} = 1$ В, $U_{R2} = 3$ В, $I_{R1} = 0,1$ А, $I_{R2} = 0,2$ А) початкової прямої другої ділянки

$$\frac{j_0 - I_{R2}}{I_{R2} - I_{R1}} = \frac{0 - U_{R2}}{U_{R2} - U_{R1}}; j_0 = 0,05 \text{ А.}$$

Знайдене зміщення враховується в схемі заміщення шляхом паралельного вмикання додаткового джерела струму $j_0 = 0,05$, А динамічному опорі R_{d2} на другій ділянці апроксимації.

Спад напруги на першій ділянці вольт-амперної характеристики нелінійного резистора

$$u_{R1} = jR_{d1} = 0,15 \cdot 10 \sin \omega t = 1,5 \sin \omega t \text{ В.}$$

Спад напруги на другій ділянці вольт-амперної характеристики нелінійного резистора

$$u_{R2} = (j + j_0)R_{d2} = (0,05 + 0,15 \sin \omega t) \cdot 20 = 1,0 + 3,0 \sin \omega t \text{ В.}$$

Час переходу з першого на другий ділянку вольт-амперної характеристики нелінійного резистору

$$I_{R1} = 0,1 = j(t_R) = 0,15 \sin \omega t_R;$$

$$\omega \cdot t_R = \arcsin \frac{0,1}{0,15} = 0,72, \text{ рад.}$$

Спад напруги на лінійній ємності

$$u_c = \frac{j}{\omega \cdot C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = 1,5 \sin \omega t \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \text{ В.}$$

Графіки спадів напруг, наведені нарис.3.5.

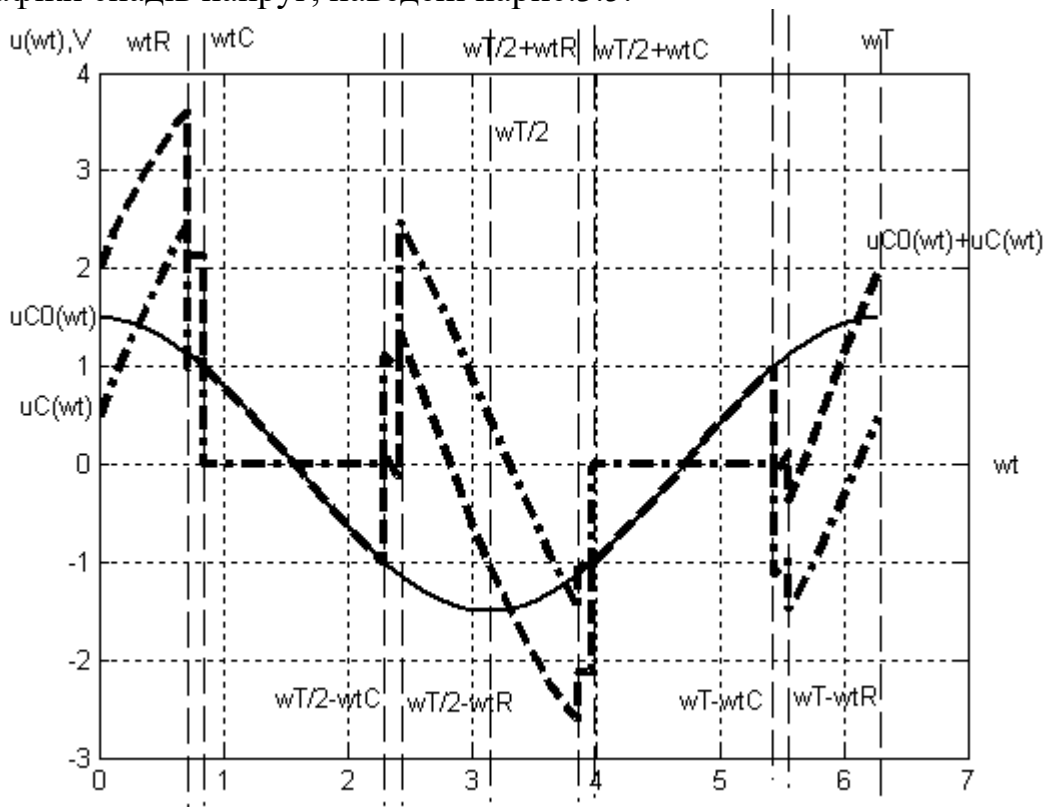


Рис.3.5

3.4. Розрахунок параметрів в однорідному нелінійному резистивно-індуктивному колі по миттєвим значенням

Задача.

До ідеального джерела напруги $e = 4,0 \sin \omega t$, В, ($\omega = 1000$, рад/с) рис.3.6,а, підключені лінійна індуктивність $L_1 = 10$ мГ, нелінійна індуктивність L_2 , вебер-амперна характеристика приведена на рис.3.4,с ($\psi_m = 2,0 \cdot 10^{-3}$, Вс),

лінійний резистор $R_2 = 10 \text{ Ом}$ і нелінійний резистор з вольт-амперної характеристикою, наведеної на рис.3.4,б ($U_{R1} = 1 \text{ В}$, $I_{R1} = 0,1 \text{ А}$). Потрібно побудувати часові графіки миттєвих змін струмів у вітках схеми.

Розв'язок.

Вебер-амперна характеристика нелінійної індуктивності L_2 має дві характерні ділянки: горизонтальну і вертикальну. Індуктивність котушки L_2 визначається відношенням приростів потокозчеплення до струму, тому на горизонтальній ділянці індуктивність нелінійної котушки дорівнює нулю, а на вертикальній – нескінченності. Індуктивний реактивний опір нелінійної котушки прямо пропорційний індуктивності, тому на горизонтальній ділянці вебер-амперної характеристики нелінійної котушки L_2 її опір дорівнює нулю (замикається ділянка вітки), а на вертикальному – нескінченності (розмикається ділянка вітки з лінійним резистивним опором R_2).

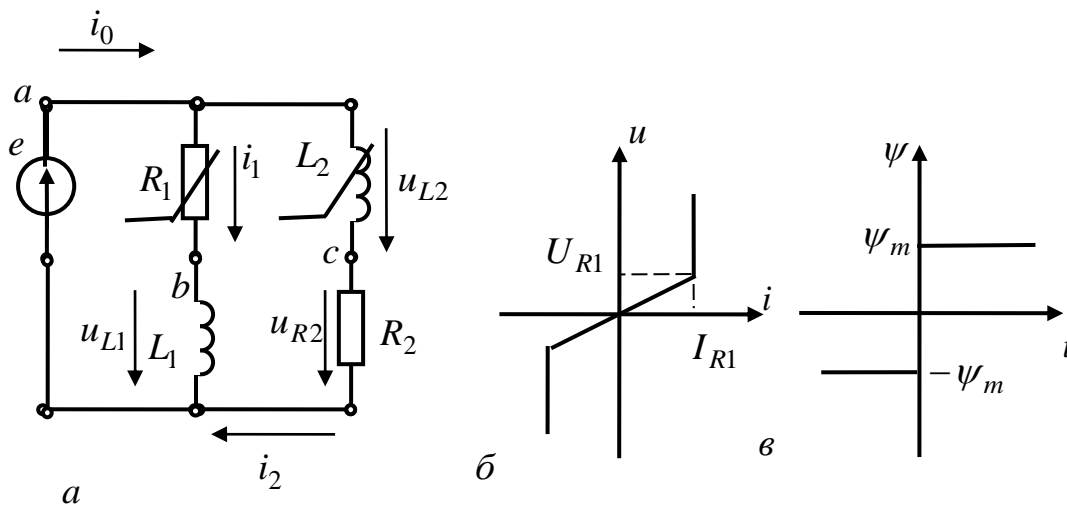


Рис.3.6

Момент переходу з горизонтальної ділянки на вертикальну вебер-амперної характеристики нелінійної індуктивності L_2 визначається досягненням величини максимального потокозчеплення в котушці ψ_m .

Знаючи напругу ідеального джерела енергії $e = 4,0 \sin 1000t$, В знайдемо потокозчеплення у нелінійної індуктивності L_2

$$\psi = \int e dt = -\frac{4,0}{1000} \cos \omega \cdot t = -4,0 \cdot 10^{-3} \cos 1000t, \text{ Вс.}$$

Знаходимо момент часу досягнення максимального потокозчеплення в індуктивності

$$\psi_m = -2,0 \cdot 10^{-3} = -4,0 \cdot 10^{-3} \cos \omega \cdot t_L;$$

$$\omega \cdot t_L = \arccos \frac{-2,0 \cdot 10^{-3}}{-4,0 \cdot 10^{-3}} = 1,04, \text{ рад.}$$

Період колювання синусоїдальної напруги джерела енергії

$$\omega \cdot T = 2\pi = 6,28 \text{ рад.}$$

Нелінійний резистивний опір має дві ділянки з різними динамічними опорами. Динамічний опір на першій ділянці

$$R_{d1} = \Delta U_1 / \Delta I_1 = U_{R1} / I_{R1} = 1/0,1 = 10, \text{ Ом.}$$

Динамічний опір нелінійного резистора на другій ділянці вольт-амперної характеристики $R_{d2} = \infty$, Ом.

Спад напруги на першій ділянці вольт-амперної характеристики нелінійного резистора при нескінченно великому реактивному опорі нелінійної індуктивності L_2

$$u_{R1} = R_{d1} \cdot \frac{e}{\sqrt{R_{d1}^2 + (\omega L_1)^2}} \sin\left(\omega t - \arctg \frac{\omega L_1}{R_{d1}} + \frac{\pi}{2}\right) = 0,63 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right), \text{ В.}$$

Спад напруги на другій ділянці вольт-амперної характеристики нелінійного резистора при нескінченно великому реактивному опорі нелінійної індуктивності L_2

$$u_{R2} = 4,0 \sin \omega t, \text{ В.}$$

Час переходу з першого на другий ділянку вольт-амперної характеристики нелінійного опору

$$I_{R1} = 0,1 = \frac{e}{R_{d1}} \sin \omega \cdot t_R = 0,4 \sin \omega \cdot t_R;$$

$$\omega \cdot t_R = \arcsin \frac{0,1}{0,4} = 0,25, \text{ рад.}$$

Період часу $0 \dots \omega \cdot t_R$. Значення параметрів кола $R_1 = R_{d1} = 10$, Ом, $L_2 = \infty$:

$$i_1 = \frac{e}{\sqrt{R_{d1}^2 + (\omega L_1)^2}} \sin\left(\omega t - \arctg \frac{\omega L_1}{R_{d1}}\right) = 0,63 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right), \text{ А;}$$

$$u_{R1} = R_{d1} \cdot \frac{e}{\sqrt{R_{d1}^2 + (\omega L_1)^2}} \sin\left(\omega t - \arctg \frac{\omega L_1}{R_{d1}}\right) = 0,63 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right), \text{ В;}$$

$$u_{L1} = \omega L_1 \cdot \frac{e}{\sqrt{R_{d1}^2 + (\omega L_1)^2}} \sin\left(\omega t - \arctg \frac{\omega L_1}{R_{d1}} + \frac{\pi}{2}\right) = 0,63 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right), \text{ В;}$$

$$i_2 = 0, \text{ А.}$$

Період часу $\omega \cdot t_R \dots \omega \cdot t_L$. Значення параметрів кола $R_1 = R_{d2} = \infty$ Ом, $L_2 = \infty$:

$$i_1 = I_{R1} = 0,1 \text{ А, – резистор працює в режимі стабілізації струму;}$$

$$u_{R1} = 4,0 \cdot \sin \omega \cdot t \text{ В;}$$

$$u_{L1} = 0 \text{ В;}$$

$$i_2 = 0 \text{ А.}$$

Період часу $\omega \cdot t_L \dots \pi/4$. Значення параметрів кола $R_1 = R_{d2} = \infty$ Ом, $L_2 = 0$:

$$i_1 = I_{R1} = 0,1 \text{ А, – резистор працює в режимі стабілізації струму;}$$

$$u_{R1} = 4,0 \cdot \sin \omega \cdot t \text{ В};$$

$$u_{L1} = 0 \text{ В};$$

$$u_{L2} = 0 \text{ В};$$

$$i_2 = e/R_2 = 0,4 \sin \omega \cdot t \text{ А.}$$

Далі процес повторюється. Графіки струмів віток наведені на рис.3.7.

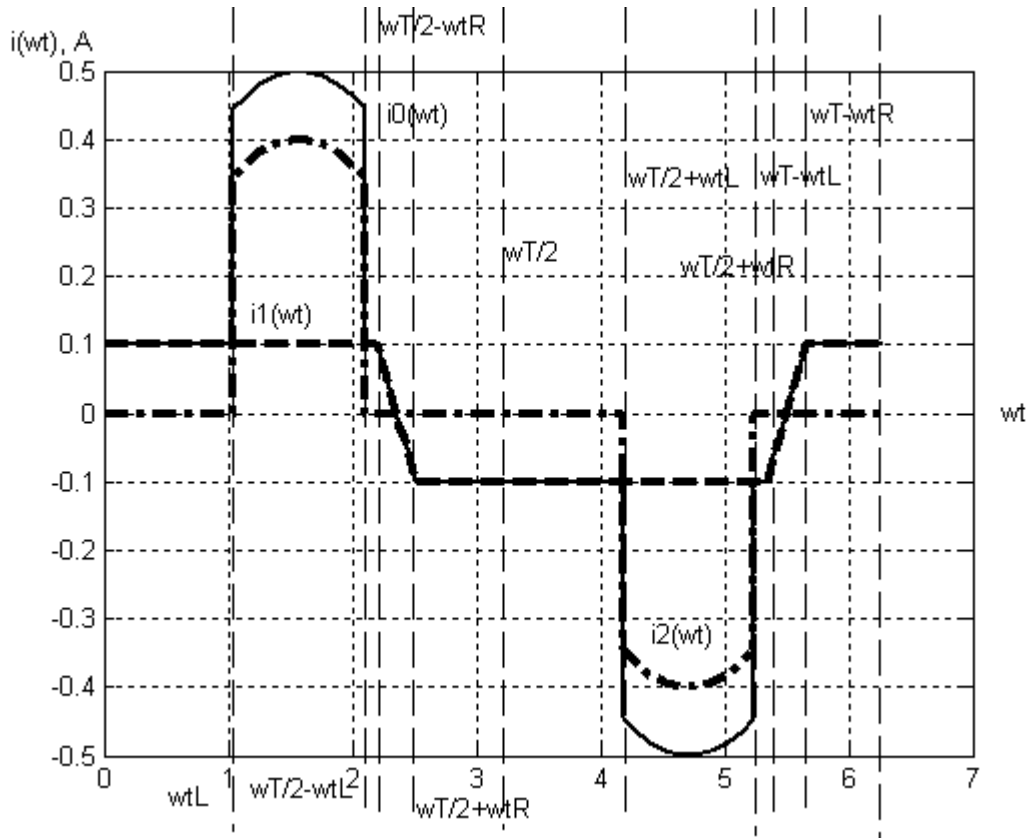


Рис.3.7.

3.5. Розрахунок параметрів у однорідному нелінійному резистивно-індуктивно-ємнісному колі за діючими значеннями еквівалентних синусоїд

Задача.

Задана нелінійна електрична схема, рис.3.8,*а*, на вході якої діє гармонійне джерело. Вважаючи в першому наближенні, що в схемі діють еквівалентні синусоїдальні струми і напруги, що збігаються з першими гармоніками, визначити комплексні значення струмів і напруг у вітках схеми і побудувати векторну діаграму. Нелінійна ємність і індуктивність задані вольт-амперними характеристиками, рис.3.8,*б,в*. Параметри лінійних елементів схеми: $x_C = R_1 = R_2 = 100$ Ом.

Розв'язок.

Задаємо довільно модуль струму і фазу струму нелінійного індуктивного елемента $\underline{I}_L = 0,4e^{j0^\circ}$, А, згідно вольт-амперній характеристиці рис.3.8,б комплексне значення напруги на індуктивності $\underline{U}_L = 70e^{j90^\circ}$, В.

Напруга на резистивному опорі R_2 дорівнює напрузі на індуктивному елементі $\underline{U}_{R2} = \underline{U}_L = 70e^{j90^\circ}$, В. Струм резистора R_2 $\underline{I}_R = \underline{U}_{R2} / R_2 = 0,7e^{j90^\circ}$, А.

Напруга на ємнісному елементі C дорівнює напрузі на індуктивному елементі $\underline{U}_C = \underline{U}_L = 70e^{j90^\circ}$, В. Струм ємності C $\underline{I}_C = \underline{U}_{R2} / (-jx_C) = 0,7e^{j180^\circ}$, А.

Вхідний струм знаходимо за першим законом Кірхгофа

$$\underline{I} = \underline{I}_L + \underline{I}_C + \underline{I}_R = 0,4e^{j0^\circ} + 0,7e^{j180^\circ} + 0,7e^{j90^\circ} = 0,76e^{j113^\circ}, \text{ А.}$$

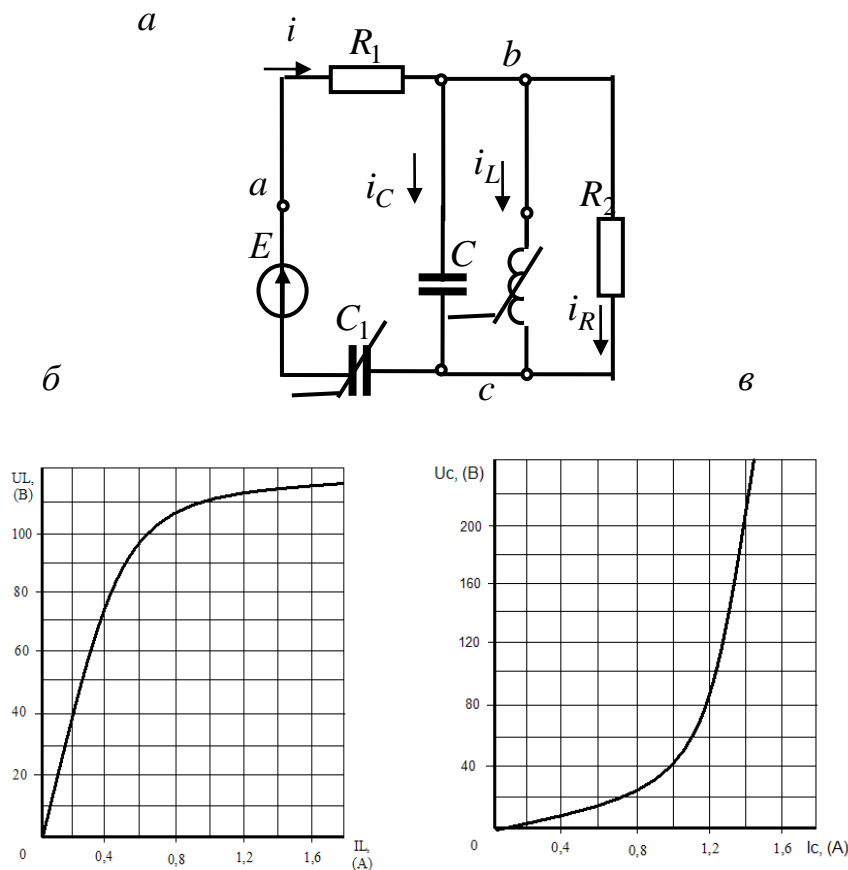


Рис.3.8

Знаючи модуль вхідного струму 0,76, А по вольт-амперній характеристиці нелінійної ємності рис.3.8,в, знаходимо напруги на першій ємності

$\underline{U}_{C1} = 20e^{j(113^\circ - 90^\circ)} = 20e^{j23^\circ}$, В. Спад напруги на лінійному резисторі R_1

$\underline{U}_{R1} = \underline{I} \cdot R_1 = 76e^{j113^\circ}$, В.

Комплексне напруга джерела енергії E

$\underline{E} = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_C + \underline{U}_{C1} = 76e^{j113^\circ} + 70e^{j90^\circ} + 20e^{j23^\circ} = 148e^{j94^\circ}$ В.

Суміщена векторна діаграма струмів і напруги представлена на рис. 3.9.

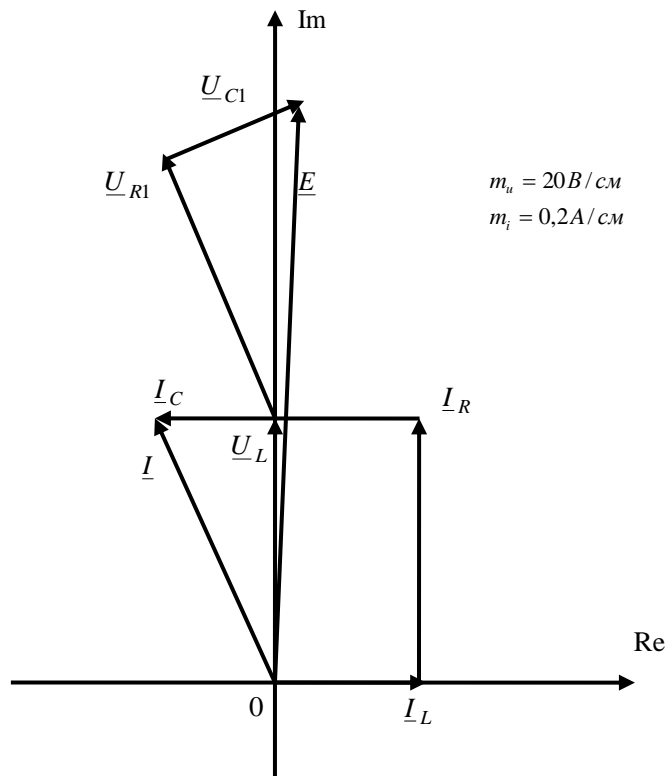


Рис.3.9

3.6. Розрахунково-графічне завдання " Розрахунок перехідного процесу в нелінійному електричному колі постійного струму"

На рис. 3.10, 3.11 представлені нелінійні електричні схеми з одним нелінійним елементом – індуктивністю або ємністю. Нелінійна індуктивність задана вебер-амперною характеристикою $i_L(\psi) = 10^2 \psi + 10^3 \psi^2$ (розмірність струму в амперах і розмірність потокозчеплення у веберах), а нелінійна ємність задана кулон-вольтною характеристикою $u_C(q) = 10^5 q + 10^{12} q^2$ (розмірність напруги у вольтах, а заряду – кулонах). У колах діють джерела постійного струму або напруги. Параметри схеми за номером варіанту

вказані в таблиці 3.1. Визначити перехідні функції потокозчеплення або заряду в часі після комутації.

Таблиця 3.1

Варіант	Схема	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$J, \text{ А}$	$E, \text{ В}$	Визначити
01	4.12.a	1	1	2	0	$\psi(t)$
02	4.12.b	1	1	0	2	$q(t)$
03	4.12.c	1	1	0	2	$\psi(t)$
04	4.12.d	50	50	0,04	0	$q(t)$
05	4.12.e	1	1	2	0	$\psi(t)$
06	4.12.f	1	1	0	2	$q(t)$
07	4.13.a	10	10	1	10	$\psi(t)$
08	4.13.b	1	1	1	1	$q(t)$
09	4.13.c	1	1	0	2	$\psi(t)$
10	4.13.d	1	1	2	0	$q(t)$
11	4.12.a	1	2	3	0	$\psi(t)$
12	4.12.b	2	1	0	3	$q(t)$
13	4.12.c	2	2	0	4	$\psi(t)$
14	4.12.d	40	10	0,05	0	$q(t)$
15	4.12.e	2	2	2	0	$\psi(t)$
16	4.12.f	2	2	0	2	$q(t)$
17	4.13.a	20	20	1	20	$\psi(t)$
18	4.13.b	2	2	0,5	1	$q(t)$
19	4.13.c	2	2	0	4	$\psi(t)$
20	4.13.d	2	2	1	0	$q(t)$
21	4.12.a	1	3	4	0	$\psi(t)$
22	4.12.b	3	1	0	4	$q(t)$

Продовження табл. 3.1

Варіант	Схема	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$J, \text{ А}$	$E, \text{ В}$	Визначити
23	4.12.c	3	1	0	6	$\psi(t)$
24	4.12.d	20	20	0,1	0	$q(t)$
25	4.12.e	3	3	2	0	$\psi(t)$
26	4.12.f	3	3	0	2	$q(t)$
27	4.13.a	30	30	1	30	$\psi(t)$
28	4.13.b	4	4	0,25	1	$q(t)$
29	4.13.c	3	1	0	6	$\psi(t)$

30	4.13.d	4	4	0,5	0	$q(t)$
31	4.12.a	1	4	5	0	$\psi(t)$
32	4.12.b	4	1	0	5	$q(t)$
33	4.12.c	4	1	0	8	$\psi(t)$
34	4.12.d	10	20	0,2	0	$q(t)$
35	4.12.e	4	4	2	0	$\psi(t)$
36	4.12.f	4	4	0	2	$q(t)$
37	4.13.a	40	40	1	40	$\psi(t)$
38	4.13.b	8	8	0,125	1	$q(t)$
39	4.13.c	4	1	0	8	$\psi(t)$
40	4.13.d	5	5	0,4	0	$q(t)$
41	4.12.a	1	5	6	0	$\psi(t)$
42	4.12.b	5	1	0	6	$q(t)$
43	4.12.c	5	5	0	10	$\psi(t)$
44	4.12.d	8	12	0,25	0	$q(t)$
45	4.12.e	5	5	2	0	$\psi(t)$
46	4.12.f	5	5	0	2	$q(t)$
47	4.13.a	50	50	1	50	$\psi(t)$
48	4.13.b	10	10	0,1	1	$q(t)$
49	4.13.c	5	5	0	10	$\psi(t)$
50	4.13.d	8	8	0,25	0	$q(t)$
51	4.12.a	1	6	7	0	$\psi(t)$
52	4.12.b	6	1	0	7	$q(t)$
53	4.12.c	6	2	0	12	$\psi(t)$
54	4.12.d	5	5	0,4	0	$q(t)$
55	4.12.e	6	6	2	0	$\psi(t)$
56	4.12.f	6	6	0	2	$q(t)$
57	4.13.a	60	60	1	60	$\psi(t)$

Продовження табл. 3.1

Варіант	Схема	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$J, \text{ А}$	$E, \text{ В}$	Визначити
58	4.13.b	20	20	0,05	1	$q(t)$
59	4.13.c	6	2	0	12	$\psi(t)$
60	4.13.d	10	10	0,2	0	$q(t)$
61	4.12.a	1	7	8	0	$\psi(t)$
62	4.12.b	7	1	0	8	$q(t)$
63	4.12.c	7	3	0	14	$\psi(t)$
64	4.12.d	4	6	0,5	0	$q(t)$

65	4.12.e	7	7	2	0	$\psi(t)$
66	4.12.f	7	7	0	2	$q(t)$
67	4.13.a	70	70	1	70	$\psi(t)$
68	4.13.b	25	25	0,4	1	$q(t)$
69	4.13.c	7	3	0	14	$\psi(t)$
70	4.13.d	12,5	12,5	0,16	0	$q(t)$
71	4.12.a	1	8	9	0	$\psi(t)$
72	4.12.b	8	1	0	9	$q(t)$
73	4.12.c	8	2	0	16	$\psi(t)$
74	4.12.d	2,5	7,5	0,8	0	$q(t)$
75	4.12.e	8	8	2	0	$\psi(t)$
76	4.12.f	8	8	0	2	$q(t)$
77	4.13.a	80	80	1	80	$\psi(t)$
78	4.13.b	40	40	0,25	1	$q(t)$
79	4.13.c	8	2	0	16	$\psi(t)$
80	4.13.d	20	20	0,1	0	$q(t)$
81	4.12.a	1	9	10	0	$\psi(t)$
82	4.12.b	9	1	0	10	$q(t)$
83	4.12.c	9	1	0	18	$\psi(t)$
84	4.12.d	2	3	1	0	$q(t)$
85	4.12.e	9	9	2	0	$\psi(t)$
86	4.12.f	9	9	0	2	$q(t)$
87	4.13.a	90	90	1	90	$\psi(t)$
88	4.13.b	50	50	0,02	1	$q(t)$
89	4.13.c	9	1	0	18	$\psi(t)$
90	4.13.d	25	25	0,08	0	$q(t)$
91	4.12.a	1	10	11	0	$\psi(t)$
92	4.12.b	10	1	0	11	$q(t)$

Продовження табл. 3.1

Варіант	Схема	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$J, \text{ А}$	$E, \text{ В}$	Визначити
93	4.12.c	10	10	0	20	$\psi(t)$
94	4.12.d	1	4	2	0	$q(t)$
95	4.12.e	10	10	2	0	$\psi(t)$
96	4.12.f	10	10	0	2	$q(t)$
97	4.13.a	100	100	1	100	$\psi(t)$
98	4.13.b	100	100	0,01	1	$q(t)$
99	4.13.c	10	10	0	20	$\psi(t)$

00	4.13.d	40	40	0,5	0	$q(t)$
----	--------	----	----	-----	---	--------

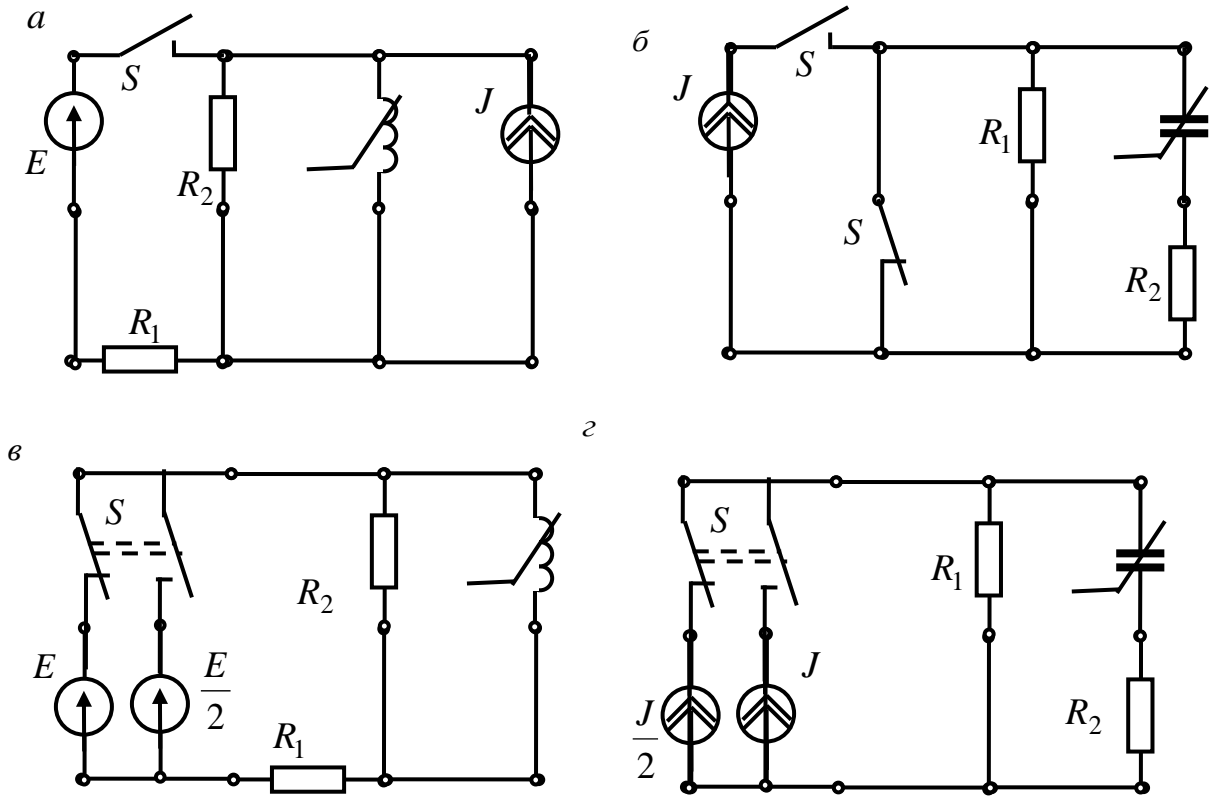


Рис.3.10

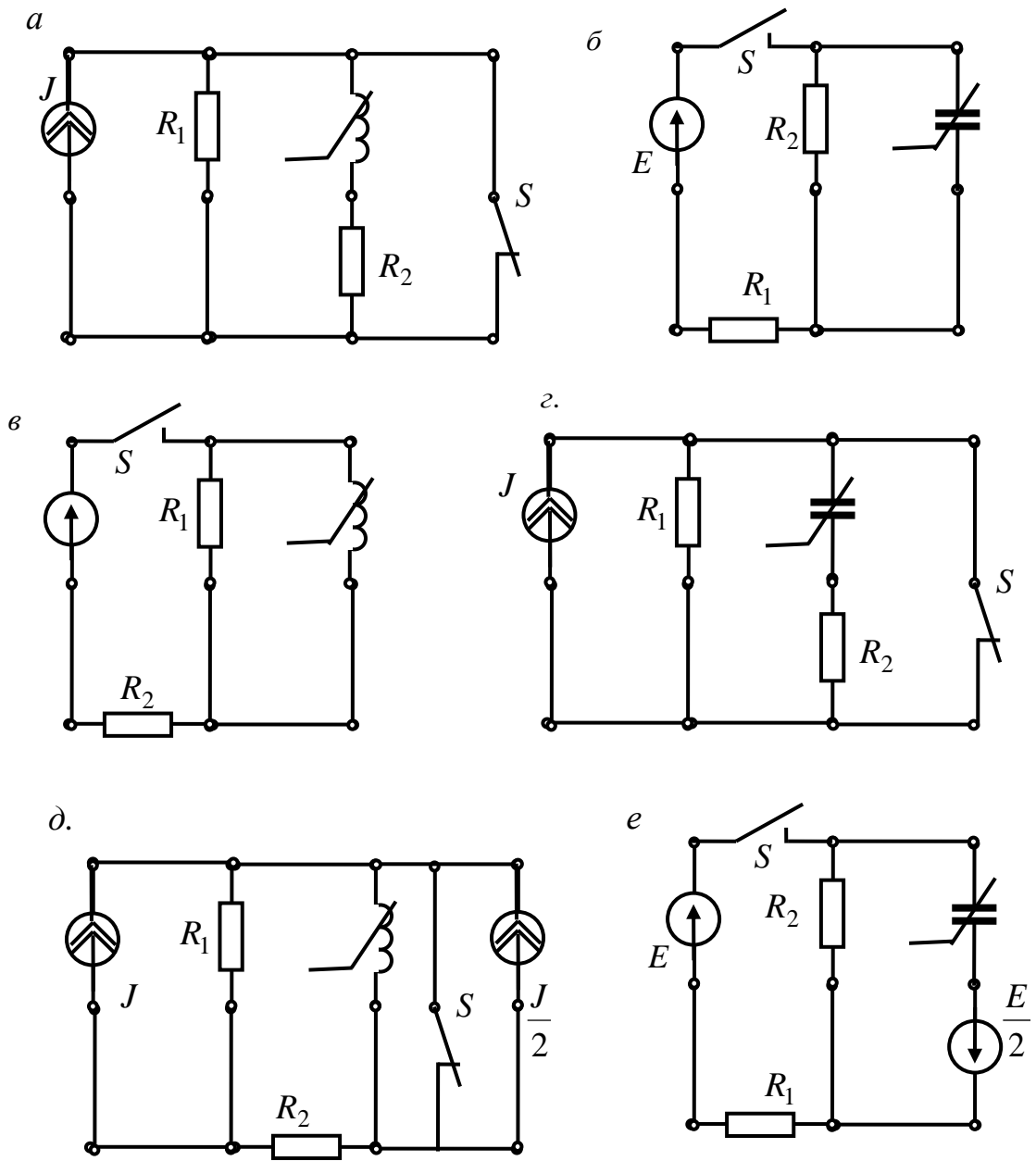


Fig.3.11

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
2. Основы теории цепей /Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.– 528 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1 – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч.1. – М.: Энергия, 1978. – 592 с.
5. Шебес М.Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах. – М.: Высшая школа, 1967. – 478 с.
6. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа. –1972. 448 с.

Хілов Віктор Сергійович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
І КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ К ПРАКТИЧНИМ ЗАНЯТТЯМ
з дисципліни
“Теоретичні основи електротехніки”**

(модуль 5)

Для студентів денної та заочної форм навчання за спеціальностями:
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології,
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології

Комп'ютерний дизайн В.С. Хілова

Підписано до друку . . . Формат 30 x 42/4.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 4,0.
Обл.-вид. арк. 4,0. Тираж прим. Зам. №

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

49005, м. Дніпро, просп. Д.Яворницького, 19.