

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра «Електротехніка та електричні машини»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

Частина 2

ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Харків – 2012

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Електротехніка та електричні машини”

24 лютого 2012 р., протокол № 9.

Викладено рекомендації щодо проведення практичних занять активним методом, наведено необхідні теоретичні положення, приклади розрахунків, запропоновано контрольні запитання для самоконтролю та задачі для самостійної роботи.

Методичні вказівки призначені для студентів денної форми навчання спеціальностей “Електричний транспорт” і “Електричні системи та комплекси транспортних засобів”, що вивчають дисципліну “Теоретичні основи електротехніки”.

Укладачі:

проф. М.М. Бабаєв,
доц. С.М. Тихонравов,
асист. О.Є. Зінченко

Рецензент

доц. А.А. Прилипко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

“ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ”

Частина 2

Електричні кола змінного синусоїдного струму

Відповідальний за випуск Тихонравов С.М.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 06.03.12 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,5. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ЗМІСТ

Загальні положення	5
Практичне заняття 1. Математичні операції з напругами та струмами у вигляді комплексних чисел	7
1 Вихідні дані та завдання	7
2 Методичні рекомендації щодо виконання та приклади розрахунків	10
3 Контрольні запитання	16
Практичне заняття 2. Розрахунок простих електричних кіл синусоїдного струму з одним джерелом ЕРС або струму	17
1 Вихідні дані та завдання	17
2 Методичні рекомендації щодо виконання	20
3 Приклад розрахунку	21
4 Контрольні запитання	26
Практичне заняття 3. Розрахунок складних електричних кіл синусоїдного струму з двома джерелами живлення методом рівнянь Кірхгофа та накладання	27
1 Вихідні дані та завдання	27
2 Методичні рекомендації щодо виконання	29
3 Приклад розрахунку	31
Контрольні запитання	35
Практичне заняття 4. Розрахунок складних електричних кіл однофазного синусоїдного струму з декількома джерелами методами контурних струмів і вузлових потенціалів	36
1 Вихідні дані та завдання	36
2 Методичні рекомендації щодо виконання	37
3 Приклади розрахунків	41
4 Контрольні запитання	44
Практичне заняття 5. Розрахунок складних електричних кіл однофазного синусоїдного струму методом еквівалентного генератора	45
1 Вихідні дані та завдання	45
2 Методичні рекомендації щодо виконання	46
3 Приклад розрахунку	47
4 Контрольні запитання	49

	Практичне заняття 6. Аналіз і розрахунок електричних кіл з урахуванням індуктивних зв'язків	49
1	Вихідні дані та завдання	49
2	Методичні рекомендації щодо виконання	53
3	Приклад розрахунку	55
4	Контрольні запитання	59
	Практичне заняття 7. Аналіз і розрахунок магнітного кола постійного струму	60
1	Вихідні дані та завдання	60
2	Методичні рекомендації щодо виконання	61
3	Контрольні запитання	64
	Практичне заняття 8. Контрольне модульне тестування	65
1	Загальні положення	65
2	Тестові питання	65
	Список літератури	70
	Додаток А. Основні електричні величини розділів «Електричні кола змінного синусоїдного струму» та «Магнітні кола»	71

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Практичні заняття з теоретичних основ електротехніки під керівництвом викладача, що передбачені навчальним планом в першому семестрі у кількості 2 години на тиждень, є важливою складовою навчального процесу і мають велике значення для успішного засвоєння дисципліни.

На практичних заняттях відбувається становлення професійного мислення майбутніх інженерів електротехнічного напрямку та основне закріплення складного теоретичного матеріалу.

Проведення практичних занять в активній формі з індивідуальним контролем кінцевих результатів спонукає студентів до самостійної творчої роботи.

Другий змістовний модуль дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” охоплює за часом другу половину семестру і складається з таких розділів:

1 Аналіз і розрахунок лінійних електричних кіл синусоїдного струму.

2 Аналіз і розрахунок магнітних кіл.

Календарний план практичних занять побудовано за схемою «від простого до складного». Кожне наступне заняття базується на ретельному вивченні теоретичного лекційного матеріалу та методів розрахунку попередніх задач.

Практичні заняття логічно ув'язані з планом лабораторних робіт, тому окремі розділи курсу більш ретельно вивчають на лабораторному практикумі з обов'язковим внесенням їх до контрольних питань модульного тестування, яке проводиться на останньому практичному занятті.

Для викладача дуже важливо з перших занять об'єктивно оцінити особисті індивідуальні можливості та загальну підготовку кожного студента для диференціації рівня складності завдань на самостійну роботу. Особливу увагу треба приділяти не тільки тим, хто відстає в навчанні, але й відмінникам. Для оптимального розвитку природних інтелектуальних здібностей треба розв'язувати такі задачі, що

забезпечують постійний достатньо високий рівень напруження творчих сил.

Варіанти схем і числових даних визначає викладач. Наприклад, за двозначним номером студента в журналі групи. За першою цифрою визначається номер варіанта з таблиці числових даних, а за другою – номер схеми з рисунка.

Конкретні задачі, електричні кола для розрахунку та їх числові дані, що наведені в цих методичних вказівках, треба розглядати як зразкові і базові. Викладач, має змогу змінювати їх як у бік полегшення для тих студентів, які не відстають в навчанні, так і в бік ускладнення для забезпечення розвитку здібностей відмінників.

Для ефективного засвоєння матеріалу найбільш продуктивним є проведення практичних занять у формі багатоваріантних контрольних робіт з обов'язковою оцінкою, яка враховується при розрахунку загальної модульної оцінки кожного студента. На початку заняття викладач дає загальні рекомендації щодо виконання контрольної роботи з посиланням на відповідні розділи лекційного курсу, а потім, під час виконання роботи, відповідає на питання та допомагає кожному розібратися в тонкощах розрахунків.

Якщо якісь окремі питання набувають масового характеру, доцільно зупинити процес роботи і дати роз'яснення для всієї групи з обов'язковою фіксацією зроблених висновків у відповідних місцях конспектів лекцій.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

Математичні операції з напругами та струмами у вигляді комплексних чисел

1 Вихідні дані та завдання

1 Знайти комплексний струм \underline{I}_3 , який дорівнює додатку двох струмів, що задані в показовій формі ($\underline{I}_1 + \underline{I}_2$). Діючі значення струмів (модулі показової форми комплексних чисел) наведені в таблицях 1, 3. Аргументи показової форми струмів наведені в таблицях 2, 4.

Таблиця 1

Варіант	Діюче значення першого струму I_1, A									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	3	13	25	5	8	21	13	12	11	2
1	10	22	18	24	6	15	7	8	9	14
2	4	17	6	23	18	16	17	18	19	20

Таблиця 2

Варіант	Аргумент показової форми першого струму $\Psi_{i1}, ^\circ$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	10	-20	0	-40	50	-60	70	-80	90	-100
1	-120	140	-160	180	-200	15	0	35	-90	55
2	65	0	85	-125	115	-145	135	-155	175	0

Таблиця 3

Варіант	Діюче значення другого струму I_2, A									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2

Таблиця 4

Варіант	Аргумент показової форми другого струму, $\Psi_{i2}, ^\circ$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	-120	130	-140	150	-90	0	-180	190	-200	220
1	90	-80	0	-60	50	-140	30	-220	15	-10
2	-5	15	-20	0	-30	35	-40	45	-50	55

Накреслити векторну діаграму трьох струмів на комплексній площині. Векторна сума першого та другого струму повинна дорівнювати вектору третього струму.

2 Знайти комплексний струм \underline{I}_4 , який дорівнює від'ємному значенню двох струмів ($\underline{I}_1 - \underline{I}_2$). Побудувати векторну діаграму.

3 Знайти комплексний струм \underline{I}_5 , який дорівнює від'ємному значенню двох струмів ($\underline{I}_2 - \underline{I}_1$). Побудувати векторну діаграму.

4 Знайти комплексну напругу \underline{U}_1 , як результат множення комплексного струму \underline{I}_3 з попереднього завдання на комплексний опір $\underline{Z} = R + jX$, активна складова якого задана в таблиці 5, а реактивна – у таблиці 6.

Цю дію виконати двома способами: у вигляді почленного перемноження в алгебраїчній формі з урахуванням того, що $j^2 = -1$, і в показовій формі шляхом множення модулів і додавання аргументів. Результати порівняти, для чого подати кожен з них у двох формах (алгебраїчній і показовій).

Таблиця 5

Варіант	Активна складова комплексного опору R, Ом									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	25	0	2	4	6	8	0	13	22	25
1	5	7	9	10	11	12	14	15	18	20
2	28	30	0	40	50	19	21	24	27	29

Таблиця 6

Варіант	Реактивна складова комплексного опору, X, Ом									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

0	10	-12	14	-16	18	-20	22	0	-26	28
1	-20	22	-24	26	-28	0	-32	34	36	-38
2	5	-7	9	-11	0	-15	17	-19	21	23

5 Знайти за законом Ома комплексний струм \underline{I}_6 через опір $\underline{Z} = R + jX$ (з п. 4), до якого підключена синусоїдна напруга $u_2 = U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_{u2})$, В.

Амплітудне значення U_{2m} синусоїдної напруги u_2 та її початкова фаза ψ_{u2} наведені в таблицях 7, 8.

Таблиця 7

Варіант	Амплітудне значення U_{2m} , В									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	250	220	200	240	150	180	100	130	260	280
1	90	170	190	110	80	120	140	95	185	210
2	285	300	60	75	115	195	215	245	275	295

Таблиця 8

Варіант	Початкова фаза ψ_{u2} , ° (десяткові градуси)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	100	90	-45	60	180	-30	75	0	90	-60
1	45	-75	-90	120	30	0	-60	180	-270	40
2	-90	270	50	90	0	-120	-25	35	-70	230

6 За результатом розрахунку п. 5 записати вираз миттєвого значення струму i_6 у вигляді синусоїди та визначити, що покаже амперметр, якщо його підключити послідовно з опором \underline{Z} .

7 На одній комплексній площині побудувати вектори напруги \underline{U}_2 та струму \underline{I}_6 . Масштаби напруги та струму можуть не співпадати й обираються довільно за критерієм раціональної довжини векторів у межах рисунка.

Розрахувати математично і показати на векторній діаграмі кут зсуву фаз між напругою та струмом.

2 Методичні рекомендації щодо виконання та приклади розрахунків

1 Комплексні величини слід позначати так:

$$\underline{A} = a + jb = \operatorname{Re} \underline{A} + j \operatorname{Im} \underline{A} = A e^{j\alpha} = |\underline{A}| e^{j\alpha},$$

де \underline{A} – комплексне число, яке може бути представлене в алгебраїчній або показовій формі;

a – дійсна частина алгебраїчної форми комплексної величини,
 $a = \operatorname{Re} \underline{A} = A \cdot \cos \alpha$;

b – уявна частина алгебраїчної форми комплексної величини,
 $b = \operatorname{Im} \underline{A} = A \cdot \sin \alpha$;

$A = |\underline{A}|$ – модуль показової форми комплексної величини,

$$A = |\underline{A}| = \sqrt{a^2 + b^2};$$

α – аргумент показової форми комплексної величини,

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}, \text{ якщо } a > 0;$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{b}{a} + 180^\circ, \text{ якщо } a < 0.$$

Якщо розрахунок ведеться за допомогою інженерного калькулятора, доцільно для переведення комплексного числа з алгебраїчної форми в показову і навпаки використовувати вбудовану операцію переходу між відображенням вектора у проєкціях на осі (що відповідає алгебраїчній формі) до відображення в полярній системі координат (що відповідає показовій формі).

Перед початком розрахунків треба визначитись щодо форми представлення кутів на калькуляторі (десяткові градуси – **Deg**, радіани – **Rad** або градуси з секундами – **Grad**). Якщо прийнято рішення відображати кути в десяткових градусах, протестуйте свій калькулятор дією **tg45=1** або **arctg1=45**. При отриманні іншого результату перейдіть на **Deg**, використовуючи клавішу **Mode**, або іншим чином згідно з інструкцією калькулятора.

Для переведення комплексного числа з алгебраїчної форми в показову треба на калькуляторі виконати таку послідовність дій:

- 1 Натиснути клавішу **Pol(...**

На дисплеї висвітиться напис $\text{Pol}($.

- 2 Ввести числове значення дійсної частини **a**.
- 3 Натиснути клавішу «велика роздільна кома» $\boxed{,}$.
- 4 Ввести числове значення уявної частини **b**.
- 5 Натиснути клавішу $=$.
- 6 Прочитати на дисплеї та вписати числове значення модуля показової форми комплексного числа.
- 7 Натиснути послідовно клавіші **RCL** та **tan**.
- 8 Прочитати на дисплеї та вписати числове значення аргументу показової форми зі своїм знаком.

Наприклад: $\underline{z} = a + jb = 3 - j4 = Z \cdot e^{j\varphi} = 5 \cdot e^{-j53.13^\circ}$.

Якщо на калькуляторі немає клавіші $\text{Pol}($, то треба використати формули

$$Z = |Z| = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{3^2 + (-4)^2} = \sqrt{25} = 5$$

$$\varphi = \arctg \frac{b}{a} = \arctg \frac{-4}{3} = -53.13^\circ$$

Для переведення комплексного числа із показової форми в алгебраїчну послідовність дій на калькуляторі така:

- 1 Натиснути послідовно клавіші **SHIFT** та **Pol(** , або **2nd** та **Pol(** . На дисплеї висвітиться напис $\text{Res}($.
- 2 Ввести числове значення модуля показової форми комплексного числа **A**.
- 3 Натиснути клавішу «велика роздільна кома».
- 4 Ввести числове значення аргументу показової форми **α** .
- 5 Натиснути клавішу $=$.
- 6 Прочитати на дисплеї та вписати числове значення дійсної частини алгебраїчної форми комплексного числа зі своїм знаком **a**.
- 7 Натиснути послідовно клавіші **RCL** та **tan**.
- 8 Прочитати на дисплеї та вписати числове значення уявної частини алгебраїчної форми комплексного числа зі своїм

знаком **b**.

$$\text{Наприклад: } \underline{I} = I \cdot e^{j\psi^\circ} = 10 \cdot e^{-j38.5^\circ} = 7.826 - j \cdot 6.225 .$$

Якщо на калькуляторі немає клавiші $\text{Pol}()$, то треба використати формули:

$$a = \text{Re}(\underline{I}) = I \cdot \cos \psi^\circ = 10 \cdot \cos(-38.5^\circ) = 7.826 ;$$

$$b = \text{Im}(\underline{I}) = I \cdot \sin \psi^\circ = 10 \cdot \sin(-38.5^\circ) = -6.225 .$$

2 Щоб скласти (вiдняти) два комплексних числа, треба їх обидва подати в алгебраїчній формі і потім окремо скласти (вiдняти) дійсні частини і окремо скласти (вiдняти) уявні частини. Результатом буде нове комплексне число в алгебраїчній формі.

$$\text{Наприклад: } \underline{I}_1 = a + jb = 10 + j4 ;$$

$$\underline{I}_2 = c + jd = -7 + j12 ;$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = (a + c) + j(b + d) = (10 - 7) + j(4 + 12) = 3 + j16 ;$$

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = (a - c) + j(b - d) = (10 + 7) + j(4 - 12) = 17 - j8 .$$

3 Щоб помножити (розділити) два комплексних числа треба їх обидва представити в показовій формі, потім помножити (розділити) модулі й окремо скласти (або вiдняти) аргументи. Результатом буде нове комплексне число в показовій формі.

Якщо дії виконуються з електричними величинами в комплексній формі, то треба наприкінці чисельного запису наводити одиниці виміру.

Наприклад:

$$\underline{I} = 3,2 \cdot e^{j30^\circ} \text{ А}; \quad \underline{Z} = 15,8 \cdot e^{-j72^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z} = 3,2 \cdot e^{j30^\circ} \cdot 15,8 \cdot e^{-j72^\circ} = (3,2 \times 15,8) \cdot e^{j(30-72)^\circ} = 50,56 \cdot e^{-j42^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{50,56 \cdot e^{-j42^\circ}}{3,2 \cdot e^{j30^\circ}} = \frac{50,56}{3,2} \cdot e^{j(-42-30)^\circ} = 15,8 \cdot e^{-j72^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексні числа можна перемножити в алгебраїчній формі почленно з урахуванням того, що $j^2 = -1$

Наприклад:

$$\underline{I} = 5 + j3$$

$$\underline{Z} = 2 - j6$$

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z} = (5 + j3) \cdot (2 - j6) = 10 - j30 + j6 - j^2 \cdot 18 = 10 - j24 + 18 = 28 - j24.$$

4 На комплексній площині комплексне число зображують у вигляді вектора, який починається на початку координат і закінчується у точці з координатами, що дорівнюють дійсній та уявній частинам алгебраїчної форми комплексного числа. Довжина вектора дорівнює модулю показової форми, а кут відносно осі x дорівнює аргументу показової форми (рисунок 1).

Сума двох комплексних чисел на векторній діаграмі дорівнює сумі двох векторів. Щоб графічним шляхом знайти суму двох векторів, треба один з них перенести паралельно самому собі в точку закінчення другого вектора. Додатком буде третій вектор, що з'єднує початок другого вектора і кінець першого (правило паралелограма)

Наприклад:

$$\underline{I}_1 = 4 + j3 = \sqrt{(4^2 + 3^2)} \cdot e^{j \arctg \frac{3}{4}} = 5 \cdot e^{j36.87^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_2 = -2 - j6 = \sqrt{((-2)^2 + (-6)^2)} \cdot e^{j \arctg \frac{-6}{-2} + 180^\circ} = 6.32 \cdot e^{-j108.43^\circ} \text{ А}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = (4 - 2) + j(3 - 6) = 2 - j3 = 3.61 \cdot e^{-j56.31^\circ} \text{ А}$$

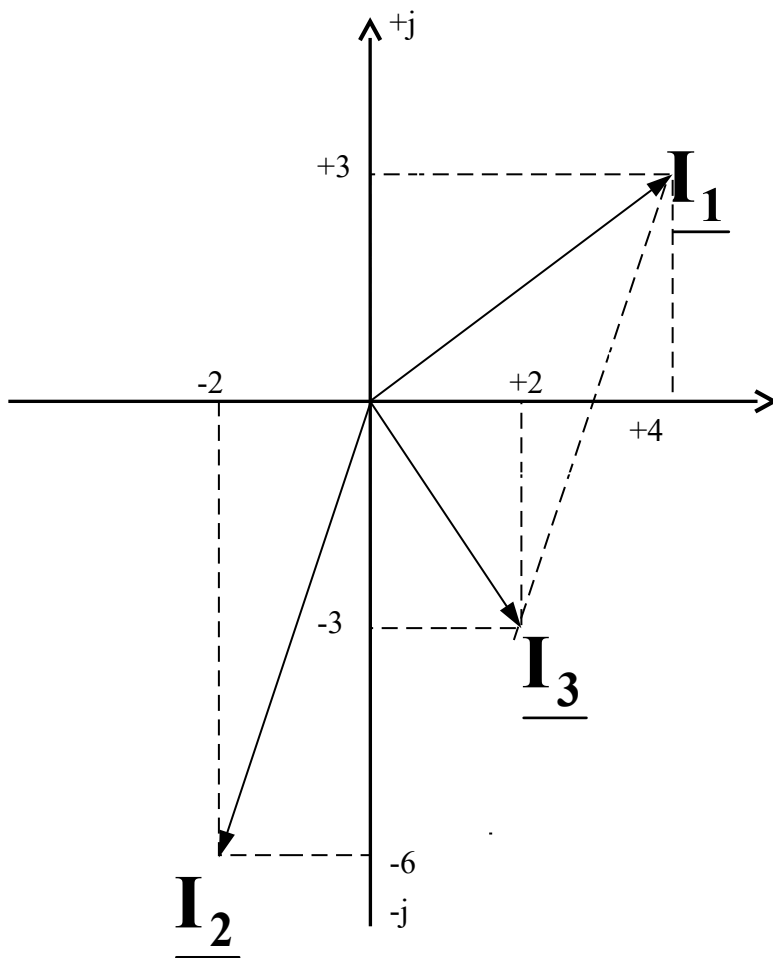


Рисунок 1 - Векторна діаграма двох струмів і їх суми

5 Якщо задано миттєве значення електричної величини, то для подальших розрахунків її треба подати у вигляді комплексного числа. Відповідне комплексне число формується в показовій формі за таким правилом:

Модуль показової форми дорівнює діючому значенню цієї електричної величини, а аргумент - початковій фазі.

Наприклад, нехай миттєве значення напруги задано у вигляді синусоїди

$$u_2 = U_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_{u_2}) = 28.284 \sin(\omega \cdot t + 50^\circ) \text{ В} .$$

Відповідна комплексна напруга формується у такому вигляді:

$$\underline{U}_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi_{u_2}} = \frac{28.284}{\sqrt{2}} \cdot e^{j50^\circ} = 20 \cdot e^{j50^\circ} \text{ В.}$$

Після знаходження струму за законом Ома у вигляді комплексного числа у показовій формі можна записати вираз миттєвого значення цього струму та визначити, що покаже вимірювальний прилад – амперметр.

Наприклад, якщо комплексний струм $\underline{I}_6 = 5 \cdot e^{j40^\circ}$ А, то амперметр покаже його діюче значення 5 А, яке дорівнює модулю показової форми цього комплексного числа.

Миттєве значення цього струму записується так:

$$i_6 = I_{6m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_{i_6}) = 5 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 40^\circ) \text{ А.}$$

6 Кут зсуву фаз між напругою u_2 і струмом i_6 дорівнює різниці початкових фаз миттєвих значень напруги та струму:

$$\varphi = \psi_{u_2} - \psi_{i_6} = 50^\circ - 40^\circ = 10^\circ.$$

На векторній діаграмі цей кут φ буде між векторами напруги та струму.

3 Контрольні запитання

- 1 Що таке амплітуда, період, частота, початкова фаза та кутова частота синусоїдного струму?
- 2 Що таке діюче значення синусоїдної напруги або струму?
- 3 Чому метод розрахунку електричних кіл синусоїдного

струму називається символічним?

4 Як від виразу миттєвого значення електричної величини у вигляді синусоїди перейти до комплексного числа, яке буде представляти цю синусоїду в подальших розрахунках?

5 Навіщо потрібно подавати комплексні струми та напруги у двох формах (алгебраїчній і показовій)?

6 Що таке уявна одиниця, чому дорівнює її квадрат?

7 Яка форма комплексного числа називається алгебраїчною?

8 Яка форма комплексного числа називається показовою?

9 Як перейти від алгебраїчної форми комплексного числа до показової?

10 Як перейти від показової форми комплексного числа до алгебраїчної?

11 Як додати чи відняти два комплексних числа?

12 Як перемножити два комплексних числа в показовій формі?

13 Як перемножити два комплексних числа в алгебраїчній формі?

14 Як поділити два комплексних числа?

15 Як комплексне число зображується на комплексній площині?

16 Як визначити кут зсуву фаз між напругою та струмом?

17 Як на векторній діаграмі визначити суму двох векторів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

Розрахунок простих електричних кіл синусоїдного струму з одним джерелом ЕРС або струму

1 Вихідні дані та завдання

1 Для електричних кіл, зображених на рисунку 2, що

живляться від джерел синусоїдної ЕРС з частотою $f = 50$ Гц, визначити струми в усіх гілках.

Числові значення амплітуд та початкових фаз синусоїдних ЕРС джерела наведені в таблицях 9, 10. Числові значення пасивних елементів кола наведені у таблиці 11.

2 Перевірити розрахунок за першим та другим законами Кірхгофа.

3 Побудувати векторну діаграму струмів для одного довільно обраного вузла та векторну діаграму напруг для одного довільно обраного контуру з джерелом ЕРС.

4 Для одного довільно обраного контуру з джерелом ЕРС (наприклад, для того, який було використано для перевірки за другим законом Кірхгофа) обчислити падіння напруги на пасивних елементах і побудувати векторну діаграму напруг.

5 В електричних колах, зображених на рисунку 2, замінити джерело ЕРС на джерело струму з частотою $f = 50$ Гц і вилучити зі схеми одну довільно обрану гілку.

Числові значення амплітуд та початкових фаз синусоїдних джерел струму наведені в таблицях 12, 13.

Числові значення пасивних елементів залишити такими, що були раніше обрані за варіантом з таблиці 11.

Визначити струми в усіх гілках отриманого кола.

6 Розрахувати падіння напруги на затискачах джерела струму.

Таблиця 9

Варіант	Амплітудне значення E_m , В									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	250	220	200	240	150	180	100	130	260	280
1	90	170	190	110	80	120	140	95	185	210
2	285	300	60	75	115	195	215	245	275	295

Таблиця 10

Варіант	Початкова фаза ψ_E , ° (десяткові градуси)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	100	90	-45	60	180	-30	75	0	90	-60
1	45	-75	-90	120	30	0	-60	180	-270	40
2	-90	270	50	90	0	-120	-25	35	-70	230

Таблиця 11

Варіант	Реактивний елемент				Активний опір, Ом		
	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	C ₁ , мкФ	C ₂ , мкФ	R ₁	R ₂	R ₃
1	9.55	22.3	318	289.3	14	8	10
2	66.85	19.1	265.1	530	5	12	6
3	57.3	22.3	353.6	795	7	9	4
4	41.4	12.74	289.3	212.2	11	6	16
5	44.57	15.92	176.8	265.1	3	15	12
6	38.2	9.55	244.8	227.3	9	14	13
7	25.48	60.5	265.1	187.2	11	9	14
8	35.02	47.75	397.8	1061	10	8	3
9	50.93	28.65	198.9	454.7	7	5	9
0	54.12	15.92	289.3	636.6	13	15	17

Таблиця 12

Варіант	Амплітудне значення J_m , А									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	12	4	7	5	6	15	3	5	11	8
1	7	9	8	5	3	7	10	12	13	14
2	3	4	5	6	17	8	7	16	9	10

Таблиця 13

Варіант	Початкова фаза ψ_j , ° (десяткові градуси)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	100	90	-45	60	180	-30	75	0	90	-60
1	45	-75	-90	120	30	0	-60	180	-270	40
2	-90	270	50	90	0	-120	-25	35	-70	230

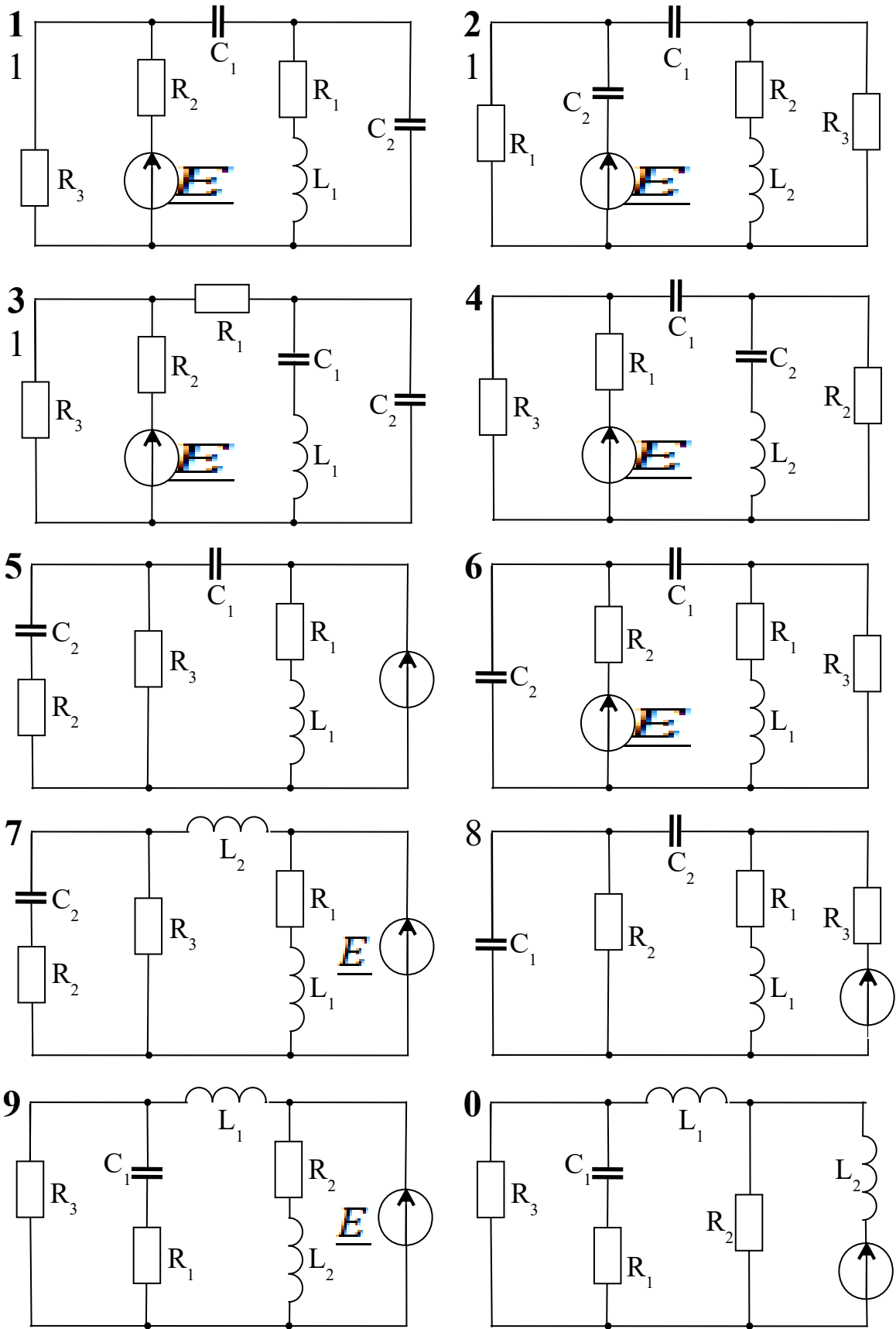


Рисунок 2

2 Методичні рекомендації щодо виконання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «джерело ЕРС», «джерело струму», «синусоїдний струм», «падіння напруги», «контур», «амплітудне та діюче значення синусоїдних електричних величин», «період», «частота», «кутова частота», «початкова фаза», «комплексне число», «уявна одиниця», «алгебраїчна та показова форми подання комплексного числа», особливості використання законів Ома та Кірхгофа для розрахунку кіл синусоїдного струму символічним методом.

Послідовність розрахунку.

Позначаємо та нумеруємо струми в гілках напрямком від плюса джерела до мінуса. Кількість невідомих струмів у колі дорівнює кількості гілок.

Розраховуємо індуктивні та ємнісні опори кола за формулами:

$$X_L = \omega \cdot L ;$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} ,$$

де X_L - індуктивний опір, Ом;

ω – кутова частота, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314.16 \text{ c}^{-1}$;

L – індуктивність, Гн (1 Гн = 10^{-3} мГн);

X_C - ємнісний опір, Ом;

C – ємність, Ф (1 Ф = 10^{-6} мкФ).

Для кожної гілки записуємо вираз повного опору у вигляді комплексного числа в алгебраїчній формі $\underline{Z}_k = R_k + j(X_{Lk} - X_{Ck})$

і переводимо його в показову форму за допомогою інженерного калькулятора так, як було рекомендовано вище в п. 2.1 методичних рекомендацій щодо виконання розрахунків з практичного заняття 1.

Подальший розрахунок кіл синусоїдного струму ведеться за методами та формулами, відомими з розділу розрахунку кіл

постійного струму, але всі електричні величини мають бути подані у вигляді комплексних чисел.

Таким чином, щоб знайти струм у гілці з джерелом ЕРС за законом Ома для повного кола, треба згорнути схему за формулами послідовного і паралельного з'єднання та обчислити загальний еквівалентний повний опір схеми відносно затискачів джерела ЕРС.

Струми в інших гілках знаходять при послідовному розгортанні схеми у зворотному порядку, використовуючи струми, що вже обчислені. Для цього можна застосувати формули розкиду або закони Ома та Кірхгофа.

Падіння напруги на пасивних елементах знаходимо за законом Ома, помножуючи комплексний струм у показовій формі на комплексний опір елемента.

При розрахунку кола з одним джерелом струму схему не треба згортати до одного еквівалентного опору, оскільки струм через джерело струму відомий за визначенням. Доцільно згорнути схему до трьох гілок, в одній з яких буде джерело струму, і скористатися формулами розкиду.

3 Приклад розрахунку

1 Нехай задано коло, що зображено на рисунку 3.

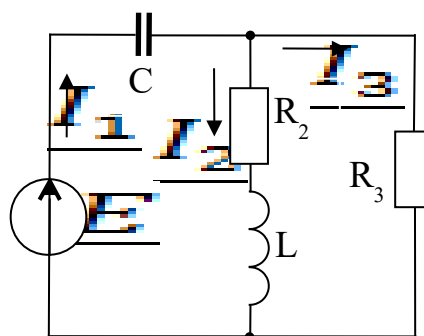


Рисунок 3

Вихідні дані.

$$E_m = 50 \cdot \sqrt{2} \text{ В}, \quad \Psi_e = -42^\circ, \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314.16 \text{ с}^{-1};$$

$$C = 227.3 \text{ мкФ}, \quad L = 19.1 \text{ мГн}, \quad R_2 = 4.5 \text{ Ом}, \quad R_3 = 5 \text{ Ом}.$$

Розраховуємо індуктивний та ємнісний опори:

$$X_L = \omega \cdot L = 314.16 \cdot 19.1 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{10^6}{314.16 \cdot 227.3} = 14 \text{ Ом}.$$

Записуємо вирази повних комплексних опорів трьох гілок в алгебраїчній формі та переводимо їх у показову форму за допомогою функції Pol(інженерного калькулятора.

$$\underline{Z}_1 = -jX_C = -j14 = 14 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$$

;

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_L = 4.5 + j6 = 7.5 \cdot e^{j53.13^\circ} \text{ Ом}$$

;

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j0 = 5 + j0 = 5 \cdot e^{j0^\circ} \text{ Ом}$$

.

Знаходимо еквівалентний опір паралельно з'єднаних опорів другої та третьої гілок.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{23} &= \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{7.5 \cdot e^{j53.13^\circ} \cdot 5 \cdot e^{j0^\circ}}{4.5 + j6 + 5} = \frac{37.5 \cdot e^{j53.13^\circ}}{9.5 + j6} = \frac{37.5 \cdot e^{j53.13^\circ}}{11.24 \cdot e^{j32.28^\circ}} \\ &= 3.34 \cdot e^{j20.85^\circ} = \\ &= 3.12 + j1.19 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Знаходимо еквівалентний опір всього кола відносно
 \underline{Z}_1 \underline{Z}_{23}
 затискачів джерела ЕРС, як послідовне з'єднання опорів та :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{123} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = -j14 + 3.12 + j1.19 = \\ &= 3.12 - j12.81 = 13.18 \cdot e^{-j76.31^\circ} \text{ Ом} \end{aligned}$$

Записуємо вираз комплексної ЕРС та знаходимо струм через джерело за законом Ома:

$$\underline{E} = \frac{50\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \cdot e^{-j42^\circ} = 50 \cdot e^{-j42^\circ} = (37.16 - j33.46) \text{ В;}$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{123}} = \frac{50 \cdot e^{-j42^\circ}}{13.18 \cdot e^{-j76.31^\circ}} = 3.79 \cdot e^{j34.31^\circ} = 3.131 + j2.136 \text{ A}$$

Знаходимо інші струми за формулами розкиду:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{3.79 \cdot e^{j34.31^\circ} \cdot 5 \cdot e^{j0^\circ}}{11.24 \cdot e^{j32.28^\circ}} = 1.69 \cdot e^{j2.03^\circ} = 1.689 + j0.06 \text{ A}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{3.79 \cdot e^{j34.31^\circ} \cdot 7.5 \cdot e^{j53.13^\circ}}{11.24 \cdot e^{j32.28^\circ}} = 2.53 \cdot e^{j55.16^\circ} = 1.445 + j2.076 \text{ A}$$

Перевіряємо результат за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3$$

$$1.689 + j0.06 + 1.445 + j2.076 = 3.134 + j2.136 \approx 3.131 + j2.136 \text{ A}$$

Перевіряємо результат за другим законом Кірхгофа. Обхід контуру обираємо за годинниковою стрілкою:

$$\underline{E} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2$$

$$\begin{aligned} 3.79 \cdot e^{j34.31^\circ} \cdot 14 \cdot e^{-j90^\circ} + 1.69 \cdot e^{j2.03^\circ} \cdot 7.5 \cdot e^{j53.13^\circ} &= \\ = 53.06 \cdot e^{-j55.69^\circ} + 12.675 \cdot e^{j55.15^\circ} &= \\ = 29.91 - j43.83 + 7.24 + j10.40 = 37.15 - j33.43 &= \\ = 49.98 \cdot e^{-j41.98^\circ} \approx 50 \cdot e^{-j42^\circ} \text{ B} \end{aligned}$$

Висновок: результат перевірки зійшовся з похибкою менш ніж 0.1 %.

2 Будуємо векторну діаграму струмів (рисунок 4), яка відображає перший закон Кірхгофа.

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_1$$

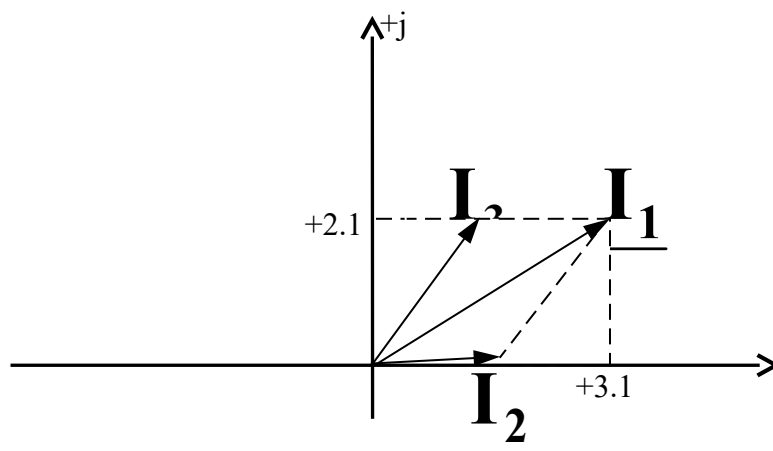


Рисунок 4

3 Знаходимо падіння напруги на елементах першої та другої гілки для побудови векторної діаграми напруг для цього контуру (рисунок 5):

$$\underline{U}_C = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_C = 3.79 \cdot e^{j34.31^\circ} \cdot 14 \cdot e^{-j90^\circ} = 53.06 \cdot e^{-j55.69^\circ} = (29.9 - j43.82) \text{ В}$$

$$\underline{U}_{R2} = \underline{I}_2 \cdot R2 = 1.69 \cdot e^{j2.03^\circ} \cdot 4.5 = 7.61 \cdot e^{j2.03^\circ} = (7.605 + j0.274) \text{ В}$$

$$\underline{U}_L = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_L = 1.69 \cdot e^{j2.03^\circ} \cdot 6 \cdot e^{j90^\circ} = 10.14 \cdot e^{j92.03^\circ} = (0.36 - j10.13) \text{ В}$$

Векторна діаграма напруг у контурі відображає другий закон Кірхгофа:

$$\underline{E} = \underline{U}_C + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_L$$

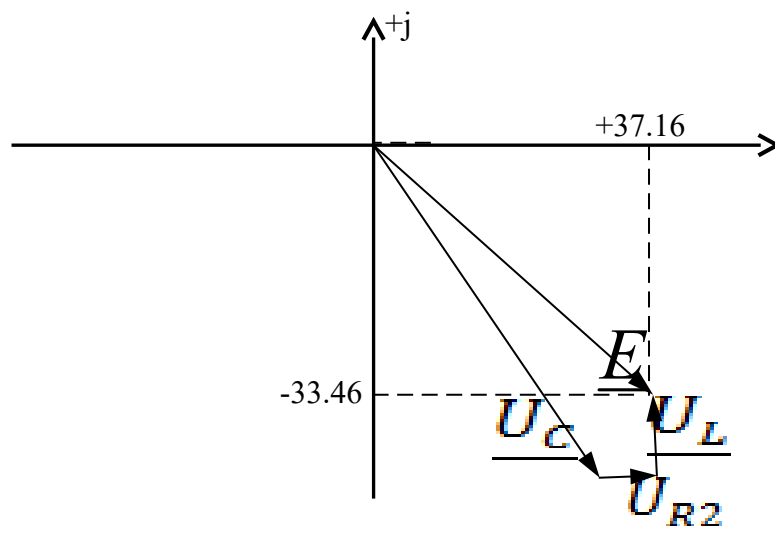


Рисунок 5

4 Якщо в наведеній вище схемі замінити джерело ЕРС на джерело струму, то вихідне коло буде таким, що зображено на рисунку 6.

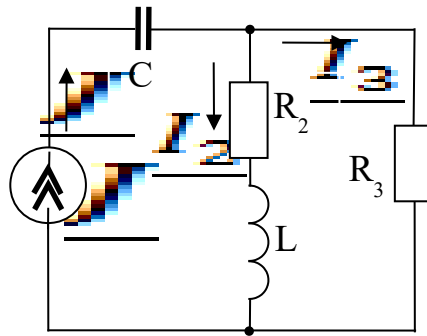


Рисунок 6

Оскільки струм у першій гілці дорівнює струму джерела, то нема потреби згортати схему. Невідомі струми у другій і третій гілках можна відразу знайти за формулами розкиду:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{J} \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}; \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{J} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

5 Для визначення падіння напруги на затискачах джерела струму заземлюємо його мінусовий затискач, тобто приймаємо, що його потенціал дорівнює нулю. Від цієї точки кола проти часової стрілки обходимо контур, що складається з опору R_3 , через який протікає струм \underline{I}_3 , і ємності C , через яку протікає струм \underline{I} . Оскільки перехід через обидва елементи відбувається назустріч струму, то падіння напруги на них записуються зі знаком плюс.

$$\underline{U}_J = \underline{I}_3 \cdot R_3 + \underline{I} \cdot \underline{Z}_C.$$

Векторна діаграма напруг у цьому контурі відображає наведене вище рівняння та будується аналогічно до п. 3.

4 Контрольні запитання

- 1 Що таке індуктивний опір?
- 2 Що таке ємнісний опір?
- 3 Формула повного опору послідовно з'єднаних пасивних елементів гілки у вигляді комплексного числа в алгебраїчній формі.
- 4 Як від алгебраїчної форми повного опору перейти до показової?
- 5 Як від показової форми повного опору перейти до алгебраїчної?
- 6 За якими законами та формулами ведеться розрахунок кола синусоїдного струму з одним джерелом ЕРС або струму?
- 7 Який електротехнічний закон відображає векторна діаграма струмів?
- 8 Який електротехнічний закон відображає векторна діаграма напруг?
- 9 Чому не можна знайти напруги на затискачах джерела струму за законом Ома?
- 10 Що показує напрямок стрілки джерела ЕРС?
- 11 Навести правила розрахунку потенціалів контуру відносно точки заземлення.
- 12 Як знайти різницю потенціалів між затискачами джерела струму?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

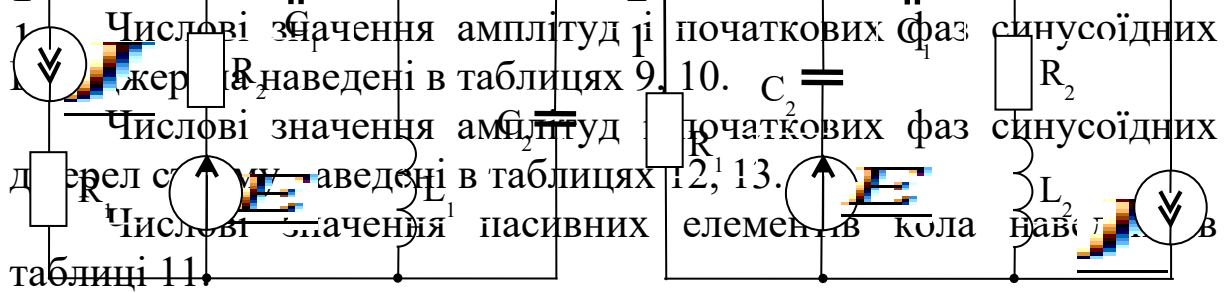
Розрахунок складних електричних кіл синусоїдного струму з двома джерелами живлення методом рівнянь Кірхгофа та накладання

1 Вихідні дані та завдання

1 Для складних електричних кіл з двома джерелами синусоїдного струму та ЕРС з частотою $f = 50$ Гц, зображених на

рисунку 7, скласти систему рівнянь за законами Кірхгофа, за допомогою якої можна розрахувати всі струми кола. Розв'язувати систему не треба.

2 Розрахувати складне електричне коло з двома джерелами методом накладання.



3 Перевірити розрахунок за першим та другим законами Кірхгофа.

4 Розрахувати падіння напруг на резисторах та джерелах струму.

5 Розрахувати комплексні потужності джерел ЕРС та струму I і виразити їх в алгебраїчну форму, відділити активну та реактивну складові повної потужності. Визначити потужності, що споживають пасивні елементи кола, і скласти баланс потужностей електричного кола.

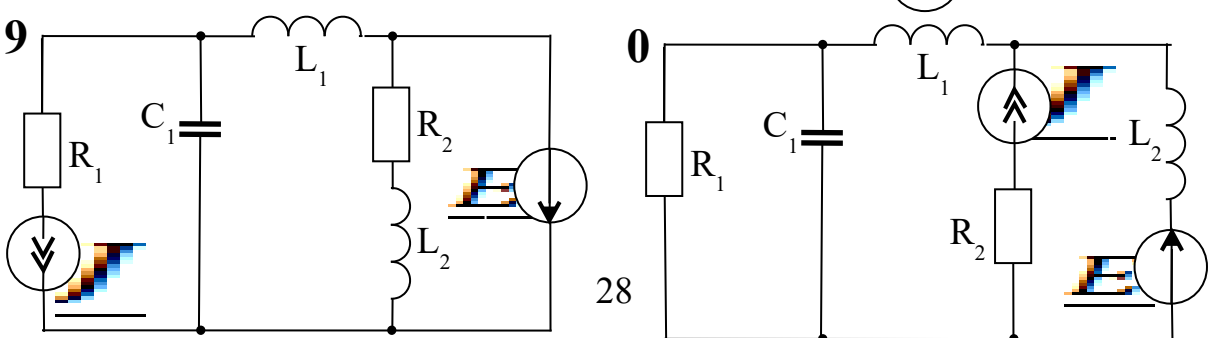
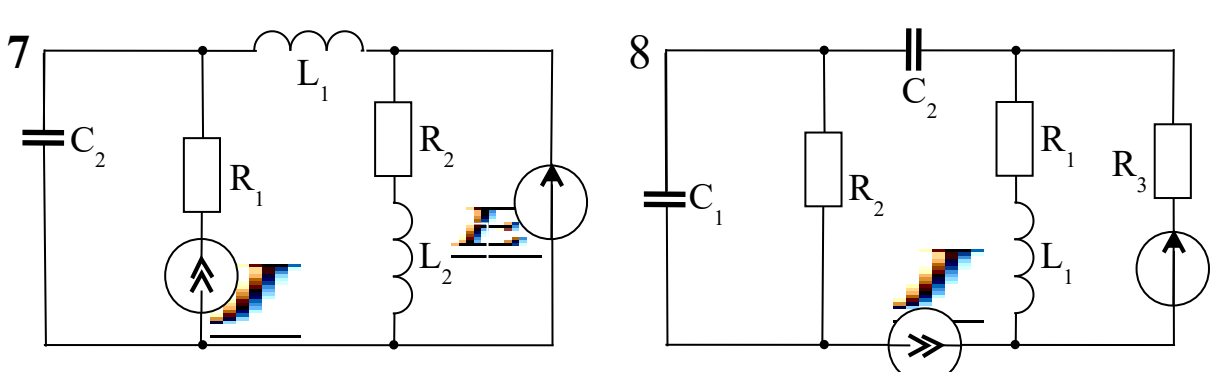
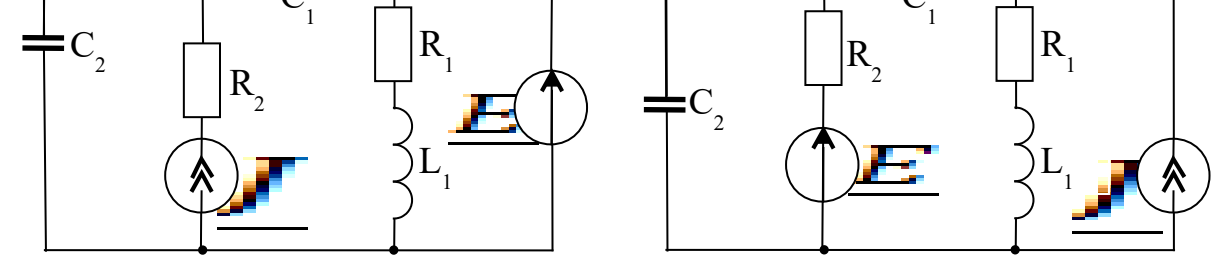
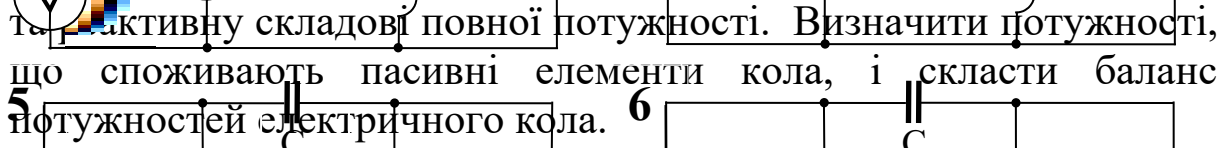


Рисунок 7

2 Методичні рекомендації щодо виконання

1 Для виконання завдання треба засвоїти принцип суперпозиції та визначення понять «часткові струми», «активна потужність», «реактивна потужність», «повна потужність», «комплексна потужність», «баланс потужностей».

2 Довільно направляємо та нумеруємо струми в гілках. Загальна кількість струмів кола дорівнює кількості гілок. Невідомих струмів у колі менше, ніж кількість гілок, на кількість

гілок з джерелами струму.

3 Кількість рівнянь за законами Кірхгофа повинна дорівнювати кількості невідомих струмів. За першим законом Кірхгофа можна скласти на одне рівняння менше, ніж кількість вузлів у колі, з урахуванням того, що лінія на схемі не має опору і може бути стягнута в точку. Недостатню кількість рівнянь складаємо за другим законом Кірхгофа, пам'ятаючи, що не можна записувати другий закон Кірхгофа для кола з джерелом струму.

4 Згідно з принципом суперпозиції в лінійних електричних колах з декількома джерелами струму у кожній гілці дорівнює алгебраїчній сумі часткових струмів від кожного джерела окремо. Таким чином, схему треба розраховувати стільки раз, скільки в ній є джерел (не в одній гілці). Якщо декілька джерел ЕРС знаходяться в одній гілці, то їх можна замінити одним еквівалентним джерелом, ЕРС якого буде дорівнювати їх алгебраїчній сумі. Якщо декілька джерел ЕРС послідовно включені в одну гілку з ідеальним джерелом струму, то за визначенням джерела струму ці джерела ЕРС не будуть впливати на струми кола, і їх можна зі схеми вилучити.

Складаємо першу розрахункову схему. Для цього залишаємо у схемі тільки якесь одне джерело (ЕРС або струму). Усі інші ідеальні джерела ЕРС закорочуємо, тобто замінюємо лініями без опору, а в реальних джерел ЕРС залишаємо замість них у схемі їх внутрішні опори. Гілки з іншими ідеальними джерелами струму розриваємо і фактично вилучаємо зі схеми, бо внутрішній опір ідеального джерела струму, який треба залишити у схемі, дорівнює безкінечності.

Розраховуємо реактивні опори елементів кола та записуємо вирази повних комплексних опорів усіх гілок.

Розраховуємо схему з одним джерелом звичайним методом еквівалентних перетворень, позначивши в ній реальні напрямки струмів у гілках відповідно до напрямку джерела, і отримуємо комплект часткових струмів, тобто струмів у кожній гілці кола від дії цього джерела.

Аналогічно складаємо другу розрахункову схему й отримуємо другий комплект часткових струмів від дії другого джерела.

Реальні струми в кожній гілці знаходимо як алгебраїчну

суму часткових струмів у цій гілці. При цьому частковий струм записують зі знаком плюс, якщо його напрямок співпадає з напрямком струму в гілці, обраним у первинній схемі, і зі знаком мінус, якщо не співпадає.

5 Знаходимо напругу на затискачах джерела струму як різницю потенціалів аналогічно до п. 5 з прикладу розрахунку (практичне заняття 2).

6 Обчислюємо комплексні потужності, що розвивають джерело ЕРС і джерело струму та потужності, що споживають пасивні елементи навантаження кола. Активні опори споживають чисто активну потужність. Ідеальні індуктивні та ємнісні елементи споживають чисто реактивну потужність. Сумарна активна потужність кола дорівнює арифметичній сумі активних потужностей усіх активних опорів. Сумарна реактивна потужність кола дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей індуктивностей та ємностей. Реактивна потужність індуктивних елементів враховується зі знаком плюс, а ємнісних – зі знаком мінус.

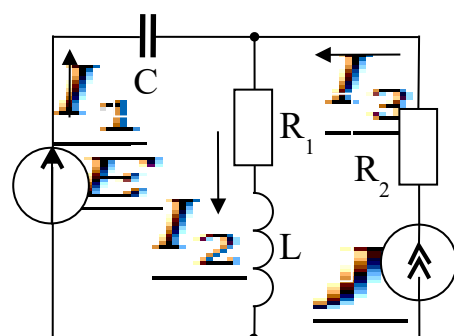
Складаємо баланс потужностей кола. У лівій частині рівняння балансу записуємо потужності джерел, а у правій – потужності пасивних елементів кола. Якщо струм через джерело ЕРС співпадає за напрямком зі стрілкою джерела, то потужність цього джерела враховується зі знаком плюс. Якщо струм через джерело ЕРС не співпадає зі стрілкою джерела, то потужність цього джерела в балансі враховується зі знаком мінус. Сумарна активна потужність джерел повинна дорівнювати сумарній активній потужності усіх активних опорів. Сумарна реактивна потужність джерел повинна дорівнювати сумарній реактивній потужності пасивних елементів кола.

3 Приклад розрахунку

Нехай задана схема з двома джерелами синусоїдних ЕРС та струму, зображена на рисунку 8.

$$e(t) = 50 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ) \text{ В};$$

$$j(t) = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t - 20^\circ) \text{ А};$$



$$R_1 = 5 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 48 \text{ Ом};$$

$$L = 41.4 \text{ мГн};$$

$$C = 530 \text{ мкФ};$$

$$f = 50 \text{ Гц}.$$

Рисунок 8

1 Задаємо довільні напрямки струмів в усіх гілках.

Оскільки невідомих струмів два, то треба скласти систему з двох рівнянь. Одне рівняння складаємо за першим законом Кірхгофа, а друге – за другим. Обхід контуру обираємо за годинниковою стрілкою.

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_3 = \underline{I}_2;$$

$$\underline{E} = \underline{I}_1 \cdot (-jX_C) + \underline{I}_2 \cdot (R_1 + jX_L).$$

Розв'язувати систему за завданням не треба, а рівняння використовуються для подальшої перевірки розрахунку.

2 Для розрахунку кола методом накладання спочатку залишаємо у схемі тільки джерело ЕРС, вилучаємо гілку з джерелом струму та складаємо першу розрахункову схему (рисунок 9).

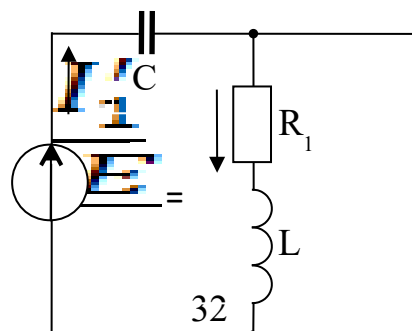


Рисунок 9

Знаходимо перший комплект часткових струмів, тобто струм \underline{I}'_1 за законом Ома, розрахувавши опори реактивних елементів і записавши повний опір у вигляді комплексного числа в алгебраїчній і показовій формах;

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 314.16 \cdot 41.4 \cdot 10^{-3} = 13 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1000000}{314.16 \cdot 530} = 6 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z} = R_1 + j(X_L - X_C) = 5 + j(13 - 6) = 5 + j7 = 8.6 \cdot e^{j54.46^\circ} \text{ Ом}.$$

З алгебраїчної форми повний опір перевели в показову за допомогою клавіші Pol(інженерного калькулятора.

Записуємо вираз комплексної ЕРС і за законом Ома знаходимо струм:

$$\underline{I}'_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}} = \frac{50 \cdot e^{j30^\circ}}{8.6 \cdot e^{j54.46^\circ}} = 5.81 \cdot e^{j(30^\circ - 54.46^\circ)} = 5.81 \cdot e^{-j24.46^\circ} = (5.29 - j2.41) \text{ А}.$$

Складаємо другу розрахункову схему (рисунок 10). Для цього залишаємо у вихідній схемі джерело струму та закорочуємо джерело ЕРС.

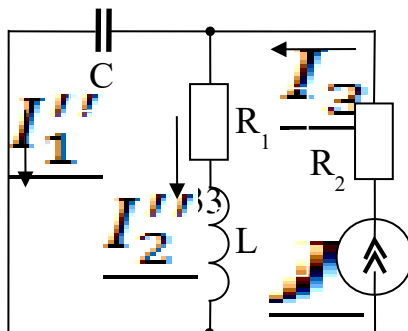


Рисунок 10

Записуємо вирази повних опорів гілок і розраховуємо струми за формулами розкиду;

$$\underline{Z}_1 = -jX_C = -j6 = 6 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_2 = R_1 + jX_L = 5 + j13 = 13.92 \cdot e^{j68.96^\circ} \text{ Ом}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_1'' &= \frac{\underline{J} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{3 \cdot e^{-j20^\circ} \cdot 13.92 \cdot e^{j68.96^\circ}}{-j6 + 5 + j13} = \frac{3 \cdot e^{-j20^\circ} \cdot 13.92 \cdot e^{j68.96^\circ}}{5 + j7} = \\ &= \frac{41.76 \cdot e^{j48.96^\circ}}{8.6 \cdot e^{j54.46^\circ}} = 4.86 \cdot e^{-j5.5^\circ} = (4.84 - j0.47) \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_2'' &= \frac{\underline{J} \cdot \underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{3 \cdot e^{-j20^\circ} \cdot 6 \cdot e^{-j90^\circ}}{-j6 + 5 + j13} = \frac{18 \cdot e^{-j110^\circ}}{8.6 \cdot e^{j54.46^\circ}} = \\ &= 2.09 \cdot e^{-j164.46^\circ} = (-2.01 - j0.56) \text{ A} \end{aligned}$$

Знаходимо реальні струми в гілках вихідної схеми як алгебраїчні сумки часткових струмів від кожного джерела:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_1' - \underline{I}_1'' = (5.29 - j2.41) - (4.84 - j0.47) = \\ &= 5.29 - j2.41 - 4.84 + j0.47 = 0.45 - j1.94 = 1.99 \cdot e^{-j76.94^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 &= \underline{I}_2' + \underline{I}_2'' = (5.29 - j2.41) + (-2.01 - j0.56) = \\ &= 5.29 - j2.41 - 2.01 - j0.56 = 3.28 - j2.97 = 4.42 \cdot e^{-j42.16^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{J} = 3 \cdot e^{-j20^\circ} = (2.82 - j1.03) \text{ A}$$

Робимо перевірку розрахунку за законами Кірхгофа:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_3 = 0.45 - j1.94 + 2.82 - j1.03 = 3.27 - 2.97 \approx \underline{I}_2$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 \cdot (-jX_C) + \underline{I}_2 \cdot (R_1 + jX_L) &= \\ &= 1.99 \cdot e^{-j76.94^\circ} \cdot 6 \cdot e^{-j90^\circ} + 4.42 \cdot e^{-j42.16^\circ} \cdot 13.92 \cdot e^{j68.96^\circ} = \\ &= 11.94 \cdot e^{-j166.94^\circ} + 61.53 \cdot e^{j26.80^\circ} = -11.63 - j2.70 + 54.92 + j27.74 = \\ &= 43.29 + j25.04 = 50.01 \cdot e^{j30.05^\circ} \approx \underline{E} \end{aligned}$$

Знаходимо напругу на затискачах джерела струму:

$$\underline{U}_J = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{I}_3 \cdot R_2 =$$

$$\begin{aligned} &4.42 \cdot e^{-j42.16^\circ} \cdot 13.92 \cdot e^{j68.96^\circ} + 3 \cdot e^{-j20^\circ} \cdot 48 = \\ &= 61.53 \cdot e^{j26.80^\circ} + 144 \cdot e^{-j20^\circ} = 54.92 + j27.74 + 135.32 - j49.25 = \\ &= 190.24 - j21.51 = 191.45 \cdot e^{-j6.45^\circ} \text{ В} \end{aligned}$$

Знаходимо комплексну потужність джерел, помножуючи спряжений струм через джерело на комплексну ЕРС або напругу на затискачах джерела струму:

$$\begin{aligned} P_{дж} &= \underline{\dot{I}}_1 \cdot \underline{E} + \underline{\dot{I}}_3 \cdot \underline{U}_J = \\ &= 1.99 \cdot e^{j76.94^\circ} \cdot 50 \cdot e^{j30^\circ} + 3 \cdot e^{j20^\circ} \cdot 191.45 \cdot e^{-j6.45^\circ} = \\ &= 99.5 \cdot e^{j106.94^\circ} + 574.35 \cdot e^{j13.55^\circ} = \\ &= -28.99 + j95.18 + 558.36 + j134.57 = 529.37 + j229.75 = \\ &= P_{дж} + jQ_{дж} = S_{дж} \cdot e^{j\varphi^\circ} = 577.08 \cdot e^{j23.46^\circ} \text{ ВА} \end{aligned}$$

Знаходимо активну потужність, споживану активними опорами кола:

$$P_n = I_2^2 \cdot R_1 + I_3^2 \cdot R_2 = (4.42)^2 \cdot 5 + (3)^2 \cdot 48 = 97.68 + 432 = 529.68 \text{ Вт}$$

Знаходимо реактивну потужність, споживану реактивними елементами кола:

$$Q_{\text{н}} = I_1^2 \cdot (-X_C) + I_2^2 \cdot X_L = (1.99)^2 \cdot (-6) + (4.42)^2 \cdot 13 = \\ = -23.76 + 253.97 = 230.21 \text{ ВАр}$$

Знаходимо повну потужність, споживану пасивними елементами кола:

$$S_{\text{н}} \cdot e^{j\varphi^\circ} = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}} = 529.68 + j230.21 = 577.54 \cdot e^{j23.49^\circ} \text{ ВА}$$

Баланс активної потужності зійшовся з розбіжністю 0,06 %.

Баланс реактивної потужності зійшовся з розбіжністю 0,20 %.

Баланс повної потужності зійшовся з розбіжністю 0,08 %.

Висновок: баланс потужності зійшовся з розбіжністю не більше ніж 0,2 %. Розрахунок виконано правильно.

4 Контрольні запитання

1 Скільки рівнянь треба скласти, щоб розрахувати схему при безпосередньому використанні законів Кірхгофа?

2 Скільки рівнянь можна скласти за першим законом Кірхгофа?

3 Чому при складанні рівняння за другим законом Кірхгофа не можна використовувати контур з джерелом струму?

4 Чому метод рівнянь Кірхгофа практично не застосовується?

5 Коли доцільно використовувати метод накладання для розрахунку складних електричних кіл?

6 Скільки разів треба розраховувати схему за методом накладання?

7 Що таке частковий струм?

8 Правило вилучення джерел ЕРС при складанні розрахункової схеми за методом накладання?

9 Правило вилучення джерел струму при складанні розрахункової схеми за методом накладання.

10 Як знайти реальні струми в гілках вихідного кола після розрахунку всіх часткових струмів?

11 Як складається баланс потужностей для кола синусоїдного струму?

- 12 Як знайти сумарну комплексну потужність джерел?
- 13 Що таке спряжений струм?
- 14 Як знайти активну потужність споживану активними опорами кола?
- 15 Як знайти реактивну потужність споживану реактивними опорами кола?
- 16 Що таке повна потужність електричного кола?
- 17 Одиниці виміру активної, реактивної та повної потужностей електричного кола синусоїдного струму.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

Розрахунок складних електричних кіл однофазного синусоїдного струму з декількома джерелами методами контурних струмів і вузлових потенціалів

1 Вихідні дані та завдання

1 Для більш ефективного засвоєння матеріалу цього практичного заняття кожному студенту доцільно взяти для розрахунку реальне складне електричне коло за своїм варіантом розрахунково-графічної роботи 2 [3].

2 За термін аудиторного заняття треба проаналізувати свою схему для її розрахунку методами контурних струмів і вузлових потенціалів, позначити невідомі струми та потенціали вузлів, скласти необхідні системи рівнянь, обчислити їх коефіцієнти та записати в загальному вигляді вирази для знаходження струмів у гілках як алгебраїчну суму контурних струмів і за формулами закону Ома через потенціали вузлів, які будуть знайдені після розв'язання відповідних систем рівнянь.

3 На початку заняття викладач дає загальні рекомендації щодо особливостей використання методів контурних струмів і вузлових потенціалів для розрахунку складних струму, а потім в інтерактивному режимі вирішує проблеми, що виникають, і відповідає на індивідуальні питання кожного студента.

2 Методичні рекомендації щодо виконання

1 Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «контурний струм», «контурна ЕРС», «власний опір контуру», «суміжний опір контурів», «вузловий струм», «власна провідність вузла», «суміжні провідності вузлів».

2 Перед початком розрахунку довільно позначаємо напрямки струмів в усіх гілках і заземлюємо вузол, до якого підключено гілку з ідеальним джерелом ЕРС без опорів.

3 Для застосування методу контурних струмів визначаємо в розрахунковому колі незалежні контури, кількість яких дорівнює

$$K = \Gamma - (B - 1),$$

де K – необхідна кількість незалежних контурів;

Γ – кількість гілок у схемі електричного кола;

B – кількість вузлів у схемі електричного кола.

Якщо в колі є джерела струму, то треба обирати контури таким чином, щоб гілки з джерелами струму не були загальними для будь-якої пари обраних контурів.

В обраних контурах довільно позначаємо напрямки контурних струмів.

Складаємо формалізовану систему рівнянь відносно контурних струмів. Формалізованою є система, кількість рівнянь якої дорівнює необхідній кількості незалежних контурів (K).

$$\begin{cases} \underline{Z}_{11} \cdot \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{12} \cdot \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{13} \cdot \underline{I}_{33} = \underline{E}_{11}; \\ \underline{Z}_{21} \cdot \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{22} \cdot \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{23} \cdot \underline{I}_{33} = \underline{E}_{22}; \\ \underline{Z}_{31} \cdot \underline{I}_{11} + \underline{Z}_{32} \cdot \underline{I}_{22} + \underline{Z}_{33} \cdot \underline{I}_{33} = \underline{E}_{33}, \end{cases}$$

де $\underline{E}_{11}, \underline{E}_{22}, \underline{E}_{33}$ – контурні ЕРС;

$\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22}, \underline{Z}_{33}$ – власні опори контурів;

$\underline{Z}_{12}, \underline{Z}_{13}, \underline{Z}_{21}, \underline{Z}_{23}, \underline{Z}_{31}, \underline{Z}_{32}$ – загальні (суміжні) опори пар контурів,

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}; \quad \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31}; \quad \underline{Z}_{32} = \underline{Z}_{23}.$$

У кінцевій системі рівнянь при розрахунку методом контурних струмів кількість рівнянь буде менше за кількість

обраних незалежних контурів (K) на кількість джерел струму в колі.

Отримуємо кінцеву систему рівнянь шляхом вилучення з формалізованої системи тих рівнянь, що відповідають запису другого закону Кірхгофа для контурів з джерелами струму. Наприклад, якщо джерело струму у другому контурі, то залишається система двох рівнянь з двома невідомими контурними струмами I_{11} та I_{33} . Контурний струм другого контуру дорівнює в цьому випадку струму джерела струму з відповідним знаком плюс або мінус залежно від взаємної орієнтації їхніх напрямків.

$$\begin{cases} Z_{11} \cdot I_{11} + Z_{12} \cdot I_{22} + Z_{13} \cdot I_{33} = E_{11}; \\ Z_{31} \cdot I_{11} + Z_{32} \cdot I_{22} + Z_{33} \cdot I_{33} = E_{33}. \end{cases}$$

Обчислюємо контурні ЕРС, як алгебраїчну суму ЕРС, що входять у даний контур. Якщо напрямок ЕРС співпадає з напрямком контурного струму, то вона береться зі знаком плюс, якщо не співпадає – то зі знаком мінус.

Знаходимо власні опори контурів як арифметичні суми всіх опорів, що входять у контур.

Визначаємо загальні (суміжні) опори пар контурів. Загальний опір двох контурів дорівнює арифметичній сумі опорів гілок, що входять в обидва контури, і береться зі знаком плюс, якщо контурні струми, що протікають через ці гілки, збігаються за напрямком. Коли напрямки контурних струмів у суміжних гілках не співпадають, загальний опір записують зі знаком мінус.

Розв'язуємо отриману систему рівнянь яким завгодно математичним методом з урахуванням того, що для контурів з джерелами струму значення контурних струмів нам відомі і дорівнюють заданим струмам відповідних джерел струму.

Визначаємо струми в кожній гілці кола як алгебраїчну суму контурних струмів, що протікають через цю гілку. Контурний струм береться зі знаком плюс, якщо його напрямок співпадає з обраним напрямком дійсного струму, в іншому випадку - зі знаком мінус.

Результати обчислень перевіряють за першим законом Кірхгофа.

4 При застосуванні методу вузлових потенціалів за невідомі величини приймають потенціали вузлів. Таким чином, до початку розрахунку відомі потенціали заземленого вузла, а також вузла, від якого до заземленого вузла з нульовим потенціалом підключено гілку з ідеальними джерелами ЕРС без опору. Він дорівнює додатній величині ЕРС, якщо її напрямок іде від заземленого вузла і від'ємному значенню величини ЕРС при її напрямку до заземленого вузла.

Позначаємо номери незаземлених вузлів і складаємо формалізовану систему рівнянь відносно незаземлених вузлових потенціалів. Формалізованою є система, кількість рівнянь якої дорівнює кількості незаземлених вузлів.

$$\begin{cases} \underline{Y}_{11} \cdot \varphi_1 + \underline{Y}_{12} \cdot \varphi_2 + \underline{Y}_{13} \cdot \varphi_3 = \underline{J}_{11}; \\ \underline{Y}_{21} \cdot \varphi_1 + \underline{Y}_{22} \cdot \varphi_2 + \underline{Y}_{23} \cdot \varphi_3 = \underline{J}_{22}; \\ \underline{Y}_{31} \cdot \varphi_1 + \underline{Y}_{32} \cdot \varphi_2 + \underline{Y}_{33} \cdot \varphi_3 = \underline{J}_{33}, \end{cases}$$

де $\underline{J}_{11}, \underline{J}_{22}, \underline{J}_{33}$ - вузлові струми незаземлених вузлів;
 $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{22}, \underline{Y}_{33}$ - власні провідності незаземлених вузлів;
 $\underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{13}, \underline{Y}_{21}, \underline{Y}_{23}, \underline{Y}_{31}, \underline{Y}_{32}$ - суміжні (загальні) провідності незаземлених вузлів, узяті зі знаком мінус,
 $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}; \underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31}; \underline{Y}_{32} = \underline{Y}_{23}$.

Оскільки потенціал вузла, з'єднаного з заземленим вузлом через гілку з ідеальним джерелом без опору, вже знайдено, то вилучаємо з формалізованої системи те рівняння, у правій частині якого міститься вузловий струм вузла з відомим потенціалом. Наприклад, якщо потенціал φ_2 вузла 2 вже знайдено, то залишається система двох рівнянь з двома невідомими потенціалами φ_1 та φ_3 .

$$\begin{cases} \underline{Y}_{11} \cdot \varphi_1 + \underline{Y}_{13} \cdot \varphi_3 = \underline{J}_{11}; \\ \underline{Y}_{31} \cdot \varphi_1 + \underline{Y}_{33} \cdot \varphi_3 = \underline{J}_{33}. \end{cases}$$

Визначаємо вузлові струми, що залишилися в кінцевій системі рівнянь. У формуванні вузлового струму \underline{J}_{kk} вузла з

порядковим номером k беруть участь ті гілки, що підходять до цього вузла та містять джерела електричної енергії. Якщо гілка з номером p містить джерело ЕРС \underline{E}_p , спрямоване до вузла k , то її внесок у формування вузлового струму \underline{J}_{kk} дорівнює $(+\underline{E}_p \cdot \underline{Y}_p)$, а якщо ця ЕРС спрямована від вузла k , то внесок складає $(-\underline{E}_p \cdot \underline{Y}_p)$, де \underline{Y}_p - провідність гілки p . Якщо гілка p містить джерело струму \underline{J}_p , то її внесок у формування вузлового струму \underline{J}_{kk} дорівнює струму \underline{J}_p , який повинен бути введений у \underline{J}_{kk} зі знаком плюс, якщо \underline{J}_p спрямован до вузла k , і зі знаком мінус, якщо від вузла k .

Обчислюємо власні провідності незаземлених вузлів, що залишилися в кінцевій системі рівнянь. Власна провідність вузла – це арифметична сума провідностей усіх гілок, з'єднаних з даним вузлом.

Визначаємо суміжні (загальні) провідності незаземлених вузлів. Суміжною провідністю двох вузлів є сума провідностей гілок, що безпосередньо з'єднують ці вузли. **Суміжні провідності завжди беруться зі знаком мінус.**

Розв'язуючи отриману систему, знаходимо вузлові потенціали.

Обчислюємо струми у гілках за законом Ома

$$\underline{I}_{km} = \frac{\varphi_k - \varphi_m \pm \underline{E}_{km}}{Z_{km}},$$

де \underline{E}_{km} береться зі знаком плюс, якщо в гілці km струм \underline{I}_{km} та ЕРС \underline{E}_{km} співпадають за напрямком.

Струми в гілках з джерелами ЕРС без опорів знаходимо в останню чергу за першим законом Кірхгофа після розрахунку всіх інших струмів.

Результати обчислень перевіряємо за другим законом Кірхгофа та порівнюємо з розрахунками цієї схеми методом контурних струмів.

3 Приклади розрахунків

1 Метод контурних струмів.

Визначаємо незалежні контури і довільно розставляємо напрямки контурних струмів і струмів у гілках (рисунки 11).

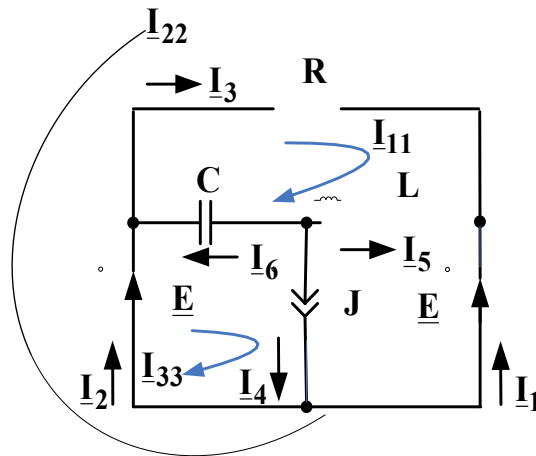


Рисунок 11

Оскільки у третьому контурі є джерело струму, то $\underline{I}_{33} = \underline{J}$.

Для контурів, що не містять джерел струму (перший і другий), обчислюємо контурні ЕРС та власні опори:

$$\underline{E}_{11} = 0;$$

$$\underline{E}_{22} = \underline{E} - \underline{E}.$$

$$\underline{Z}_{11} = R + jX_L - jX_C;$$

$$\underline{Z}_{22} = R.$$

Визначаємо загальні (суміжні) опори контурів:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = R;$$

$$\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} = jX_C;$$

$$\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} = 0.$$

Складаємо систему рівнянь за правилами, що залишаються такими, як і для кіл постійного струму:

$$\begin{cases} \underline{E}_{11} = \underline{I}_{11} \underline{Z}_{11} + \underline{I}_{22} \underline{Z}_{12} + \underline{I}_{33} \underline{Z}_{13} \\ \underline{E}_{22} = \underline{I}_{11} \underline{Z}_{21} + \underline{I}_{22} \underline{Z}_{22} + \underline{I}_{33} \underline{Z}_{23} \end{cases}$$

Розв'язуємо отриману систему та визначаємо контурні струми \underline{I}_{11} і \underline{I}_{22} .

Визначаємо дійсні струми в гілках як алгебраїчні суми контурних струмів:

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_{22}; \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_{22} + \underline{I}_{33}; \quad \underline{I}_3 = \underline{I}_{11} + \underline{I}_{22};$$

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_{33}; \quad \underline{I}_5 = -\underline{I}_{11}; \quad \underline{I}_6 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{33}.$$

Перевіряємо розрахунок за допомогою рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_6 = \underline{I}_3$$

$$0 = \underline{I}_4 + \underline{I}_5 + \underline{I}_6$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_3 + \underline{I}_5 = 0$$

2 Метод вузлових потенціалів.

Заземлюємо вузол **0**, до якого підходять гілки, що містять тільки ідеальне джерело ЕРС, нумеруємо незаземлені вузли та довільно позначаємо напрямки струмів у гілках (рисунок 12).

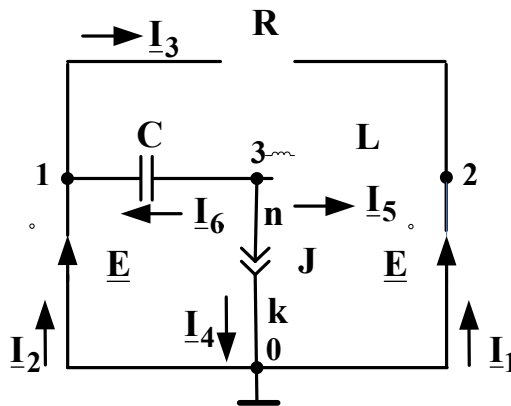


Рисунок 12

Визначаємо потенціали вузлів **1** та **2**, які з'єднані з вузлом **0** гілками, що містять тільки ідеальні джерела ЕРС:

$$(\varphi_1 = \varphi_0 + \underline{E} = \underline{E}),$$

$$(\varphi_2 = \varphi_0 + \underline{E} = \underline{E}).$$

Визначаємо вузлові струми незаземлених вузлів, до яких не

підходять гілки, що містять тільки ідеальні джерела ЕРС, тобто тільки вузла 3.

$$\underline{J}_{33} = -\underline{J}.$$

Обчислюємо власну провідність вузла 3:

$$\underline{Y}_{33} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{jX_L} + \frac{1}{-jX_C} = \underline{Y}_4 + \underline{Y}_5 + \underline{Y}_6.$$

Визначаємо суміжні провідності незаземлених вузлі:

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = -\frac{1}{R} = -\underline{Y}_3; \quad \underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} = -\frac{1}{-jX_C} = -\underline{Y}_6;$$

$$\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32} = -\frac{1}{jX_L} = -\underline{Y}_5$$

Складаємо рівняння за правилами, що залишаються такими, як і для кіл постійного струму. Оскільки невідомим є тільки один вузловий потенціал, то в кінцевій системі рівнянь залишиться одне рівняння.

$$\underline{J}_{33} = \varphi_1 \underline{Y}_{13} + \varphi_2 \underline{Y}_{23} + \varphi_3 \underline{Y}_{33}.$$

Розв'язуючи отримане рівняння, обчислюємо потенціал вузла 3.

Визначаємо струми в гілках, використовуючи закон Ома для ділянки кола, що містить джерело ЕРС, і перший закон Кірхгофа.

$\underline{I}_4 = \underline{J}$, тому що в даній гілці знаходиться джерело струму \underline{J} .

$$\underline{I}_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}; \quad \underline{I}_5 = \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{jX_L}; \quad \underline{I}_6 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{-jX_C};$$

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_3 - \underline{I}_5; \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_3 - \underline{I}_6$$

Перевіряємо розрахунок за допомогою рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} 0 &= \underline{I}_3 R - \underline{I}_5 jX_L - jX_C \underline{I}_6, \\ \underline{E} - \underline{E} &= \underline{I}_3 R. \end{aligned}$$

4 Контрольні запитання

- 1 Скільки незалежних контурів треба визначити в колі при використанні методу контурних струмів?
- 2 Як треба обирати контури, якщо в колі є джерела струму?
- 3 Чи реально існують у колі контурні струми?
- 4 Що таке контурні ЕРС і як їх розрахувати?
- 5 Що таке власні контурні опори і як їх розрахувати?
- 6 Що таке суміжні опори і як їх розрахувати?
- 7 Чому дорівнює кількість рівнянь у системі за методом контурних струмів у колі без джерел струму?
- 8 Чому дорівнює кількість рівнянь у системі за методом контурних струмів у колі з джерелами струму?
- 9 Чому за наявності в колі джерел струму кількість необхідних рівнянь зменшується?
- 10 Які рівняння треба вилучити з формалізованої системи за наявності в колі джерел струму?
- 11 Які є математичні методи розв'язання системи рівнянь з невідомими контурними струмами?
- 12 Як знайти реальні струми в гілках після розв'язання системи і знаходження контурних струмів?
- 13 Як зробити перевірку розрахунку кола за методом контурних струмів? Коли доцільно використовувати метод вузлових потенціалів у порівнянні з методом контурних струмів?
- 14 Чому доцільно заземлювати вузол, до якого підходить гілка з ідеальним джерелом ЕРС?
- 15 Що таке вузловий струм і як його обчислити?
- 16 Одиниця виміру провідності.
- 17 Чому дорівнює провідність гілки з джерелом струму?
- 18 Що таке власна провідність вузла і як її обчислити?
- 19 Що таке суміжна провідність вузлів і як її обчислити?
- 20 Як знайти струми в гілках після знаходження вузлових потенціалів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

Розрахунок електричного кола методом еквівалентного генератора

1 Вихідні дані та завдання

1 Для ефективного засвоєння матеріалу цього практичного заняття доцільним є впровадження диференційного підходу до вибору задачі для розв'язання.

Сильним встигаючим студентам можна відразу дозволити розв'язувати реальну задачу за своїм варіантом розрахунково-графічної роботи 2 [3]. Інші студенти під керівництвом викладача спочатку розраховують методом еквівалентного генератора струм в одній з гілок електричного кола, схема якого подана на рисунку 13, а вихідні дані наведено в таблиці 14. Частоту джерела живлення для всіх варіантів прийняти промисловою, тобто $\omega = 314.16 \text{ c}^{-1}$.

При швидкому засвоєнні матеріалу окремим студентам за їх бажанням можна дозволяти не розв'язувати навчальну задачу до кінця і теж переходити до свого варіанта РГР.

2 На початку заняття викладач дає загальні рекомендації щодо особливостей використання методу еквівалентного генератора для розрахунку складних електричних кіл синусоїдного струму, а потім роз'яснює студентам, які не встигають у навчанні, послідовність розв'язання навчальної задачі та в інтерактивному режимі вирішує проблеми, що виникають, і відповідає на індивідуальні питання студентів, що розв'язують реальну задачу за своїм варіантом РГР.

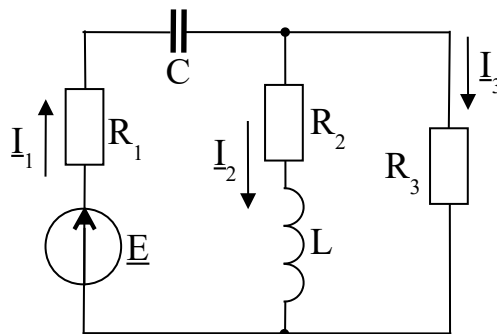


Рисунок 13

Таблиця 14

Варіант	Параметр Джерела		Реактивний елемент		Активний опір, Ом			Знайти струм
	Е, В	$\psi_E, ^\circ$	L, мГн	C, мкФ	R ₁	R ₂	R ₃	
1	100	30	9.55	289.3	14	8	10	I ₃
2	200	-60	66.85	530	15	12	20	I ₂
3	127	90	57.3	795	17	9	13	I ₃
4	220	-45	41.4	212.2	11	25	16	I ₂
5	60	70	44.57	265.1	8	15	12	I ₃
6	80	-30	38.2	227.3	9	14	13	I ₂
7	24	60	25.48	187.2	7	9	14	I ₃
8	90	-90	35.02	1061	10	8	3	I ₂
9	36	45	50.93	454.7	7	5	9	I ₃
0	110	-75	54.12	636.6	13	15	17	I ₂

2 Методичні рекомендації щодо виконання

Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «еквівалентний генератор», «вхідний опір», «холостий хід» і вивчити теорему про еквівалентний генератор.

Визначаємо напругу \underline{U}_{abxx} на затискачах розімкнутої гілки, у якій треба за завданням знайти струм методом еквівалентного генератора. Для цього треба розрахувати коло з розімкнутою гілкою яким завгодно методом.

Методом еквівалентних перетворень обчислюємо вхідний повний опір $\underline{Z}_{вх}$ усієї схеми відносно до затискачів ab розімкнутої гілки при закорочених ідеальних джерелах ЕРС і вилучених гілках з джерелами струму.

Визначаємо шуканий струм за формулою закону Ома:

$$\underline{I}_n = \frac{\underline{U}_{abxx} \pm \underline{E}_n}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{вх}},$$

де \underline{Z}_n - опір гілки, у якій визначається струм;
 \underline{E}_n - джерело ЕРС цієї гілки.

Якщо \underline{E}_n і \underline{I}_n збігаються за напрямком, то \underline{E}_n береться зі знаком плюс. В іншому випадку – мінус.

3 Приклад розрахунку

Нехай задана електрична схема, зображена на рисунку 14. Треба визначити струм \underline{I}_2 методом еквівалентного генератора.

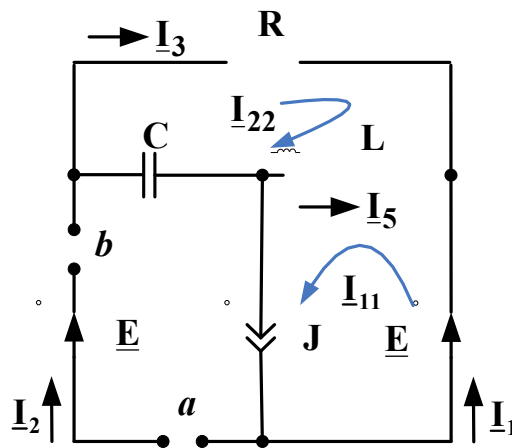


Рисунок 14

Щоб визначити напругу $\underline{U}_{abxx} = \varphi_a - \varphi_b$ на затискачах розімкнutoї гілки, використовуємо метод контурних струмів.

$$\underline{E}_{22} = 0;$$

$$\underline{Z}_{22} = R + j(X_L - X_C);$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = jX_L.$$

$\underline{I}_{11} = \underline{J}$, тому що в цьому контурі знаходиться джерело струму.

Обчислюємо струм \underline{I}_{22} , розв'язуючи рівняння

$$\underline{E}_{22} = \underline{I}_{11} \underline{Z}_{21} + \underline{I}_{22} \underline{Z}_{22}.$$

Знаходимо струм у третій гілці та шукану напругу:

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{22} ;$$

$$\underline{U}_{abxx} = -\underline{U}_a - \underline{U}_b = -\underline{I}_3 \underline{R} - \underline{E} .$$

Для обчислення вхідного опору всієї схеми відносно затискачів **ab** заміняємо ідеальні джерела ЕРС перемичками, а джерело струму – розривом (рисунок 15).

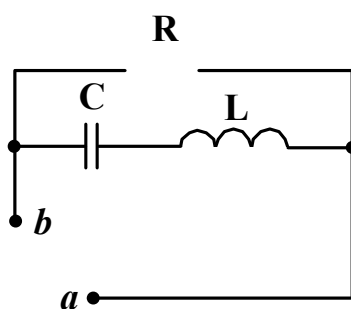


Рисунок 15

У цьому опорі до послідовно з'єднаних елементів L та C паралельно підключено активний опір R.

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{R \cdot j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}{R + j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}$$

Визначаємо шуканий струм \underline{I}_2 за законом Ома для ділянки кола з джерелом ЕРС з урахуванням того, що опір цієї гілки дорівнює нулю:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{abxx} + \underline{E}}{\underline{Z}_{\text{вх}}} .$$

4 Контрольні запитання

1 Коли доцільно використовувати метод еквівалентного генератора?

2 Сформулювати теорему про еквівалентний генератор.

3 Що таке холостий хід, як знайти напругу в режимі холостого ходу між точками підключення гілки, у якій треба знайти струм методом еквівалентного генератора?

4 Чому дорівнює і як обчислити внутрішній опір еквівалентного генератора?

5 Що треба зробити з джерелами ЕРС та струму для обчислення вхідного опору схеми відносно до точок підключення розрахункової гілки?

6 Як знайти струм у розрахунковій гілці після знаходження ЕРС і внутрішнього опору еквівалентного генератора?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

Аналіз і розрахунок електричних кіл з урахуванням індуктивних зв'язків

1 Вихідні дані та завдання

1 Перетворити схему у вигляді графа (рисунки 16, а–л) у повне вихідне коло за варіантом.

Графи розрахункових електричних схем вибираються згідно з передостанньою цифрою шифру студента або іншим чином за вказівками викладача.

У таблиці 15 вихідних параметрів розрахункових кіл наведено елементи відповідних гілок графа, числові дані яких беруть з таблиці 16. Потрібний горизонтальний рядок таблиці 15 обирається за останньою цифрою шифру студента, яка вказана в першому стовпці таблиці. При перетворенні схеми електричного кола у вигляді графа в повну вихідну схему напрямки джерел треба направити за напрямком стрілки гілки графа.

Числові дані вихідних параметрів розрахункового кола, частоти ω та коефіцієнта зв'язку k , наведені в таблиці 16, обираються для кожного поточного року однаковими для усіх студентів. Наприклад, у 2015 році всі студенти беруть числові

дані з рядка 5.

2 Ввести в повне вихідне коло взаємну індуктивність. Для цього довільно позначити на схемі великими точками однойменні затискачі двох магнітозв'язаних індуктивних елементів, задавши таким чином один з можливих варіантів їх включення (злагоджений або зустрічний).

3 Безпосередньо застосовуючи закони Кірхгофа, записати систему рівнянь для розрахунку символічним методом повної вихідної електричної схеми з урахуванням того зв'язку між індуктивними елементами. Розв'язувати цю систему рівнянь не слід.

4 Розрахувати повне вихідне коло зі взаємною індуктивністю методом контурних струмів і визначити струми в гілках кола.

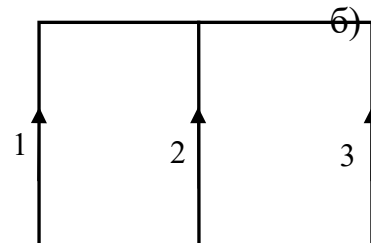
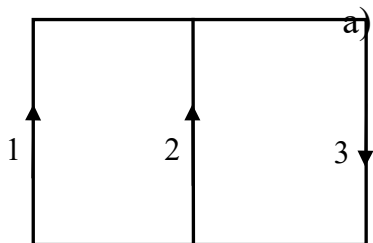
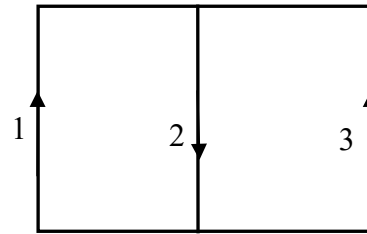
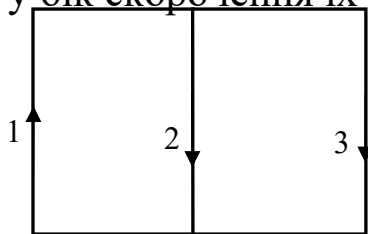
5 Побудувати в масштабі замкнену діаграму струмів.

6 Обчислити напруги на всіх пасивних елементах електричного кола, напругу на затискачах джерела струму та напруги між вузлами.

7 Побудувати у масштабі замкнену векторну діаграму напруг.

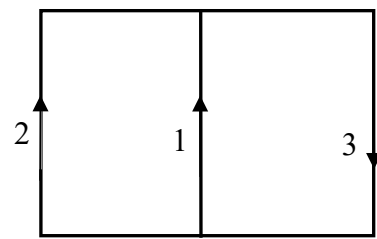
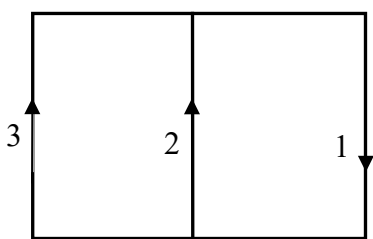
9 Визначити активні потужності, що передаються магнітним шляхом від однієї котушки до іншої.

10 При необхідності викладач може змінити кількість завдань у бік скорочення їх кількості.



в)

г)



д)

е)

ж)

и)

к)

л)

Рисунок 16 - Графи розрахункових схем для практичного заняття 6

Таблиця 15

Остання цифра шифру	Номер гілки графа		
	1	2	3
0	<u>Е</u> , <u>Л</u> , L ₂	L	R, C
1	R	<u>Е</u> , R, L, C	<u>Л</u> , L ₂
2	R, L ₂	<u>Л</u> R, L	<u>Е</u> , R, C
3	<u>Л</u> , R, L	R, C	<u>Е</u> , R, L ₂
4	<u>Е</u> , L	<u>Л</u> , C, L ₂	R
5	R, L	<u>Е</u> , R, L ₂	<u>Л</u> , C
6	<u>Л</u> , L	R, C	<u>Е</u> , R, L ₂
7	<u>Л</u> , L	<u>Е</u> , R, C,	R, L ₂
8	<u>Е</u> , R	R, L, C	<u>Л</u> , L ₂
9	<u>Е</u> , R, C,	R, L ₂	<u>Л</u> , L

Таблиця 16

Остання	<u>Л</u> А	<u>Е</u> В	R	C	L	L ₂	k	ω
---------	---------------	---------------	---	---	---	----------------	---	---

цифра поточно-го року			Ом	мкФ	мГн	мГн		ϵ^{-1}
0	e^{j45°	$10e^{-j45^\circ}$	10	50	10	8	0,5	10^3
1	$2e^{j30^\circ}$	$10e^{j60^\circ}$	10	10	2	1,6	0,6	10^4
2	e^{j60°	$10e^{-j30^\circ}$	10	1	0,2	0,16	0,7	10^5
3	$2e^{-j30^\circ}$	$10e^{j60^\circ}$	10	100	20	16	0,75	10^3
4	e^{-j45°	$10e^{j45^\circ}$	10	5	1	0,8	0,8	10^4
5	$2e^{-j60^\circ}$	$10e^{j30^\circ}$	10	0,5	0,1	0,2	0,55	10^5
6	$2e^{j60^\circ}$	$20e^{-j60^\circ}$	20	20	20	16	0,65	10^3
7	$2.5e^{-j45^\circ}$	$25e^{j30^\circ}$	25	4	5	4	0,85	10^4
8	$1.5e^{j30^\circ}$	$15e^{j45^\circ}$	15	0,333	0,15	0,2	0,7	10^5
9	$3e^{-j30^\circ}$	$30e^{-j60^\circ}$	30	66,67	30	24	0,6	10^3

2 Методичні рекомендації щодо виконання

1 Розрахунок розгалужених кіл синусоїдного струму за наявності індуктивних зв'язків символічним методом можна зробити шляхом прямого використання законів Кірхгофа або методом контурних струмів.

2 Правила складання рівнянь за першим законом Кірхгофа для кіл з індуктивними зв'язками не мають особливостей по відношенню до кіл без магніто-зв'язаних елементів.

3 При використанні другого закону Кірхгофа наявність взаємної індуктивності M_{12} між двома котушками враховується введенням у рівняння величини напруги взаємної індукції $\pm j\omega M_{12}I_2$ та $\pm j\omega M_{21}I_1$. Якщо напрямок обходу котушки 1 співпадає з напрямком струму в котушці 2 відносно однойменних затискачів, напруга взаємної індукції на котушці 1 $\pm j\omega M_{12}I_2$ береться зі знаком плюс, у протилежному випадку – зі знаком мінус.

4 При розрахунку електричного кола методом контурних струмів треба пам'ятати, що:

- взаємно індуктивний зв'язок між індуктивними елементами враховується в загальному опорі суміжних контурів додаванням $j\omega M$ (зі знаком плюс, якщо напрямки контурних струмів I_{11} та I_{22} однаковий відносно однойменних затискачів магнітозв'язаних індуктивних елементів, і в протилежному випадку зі знаком мінус);

- у власному опорі контурів взаємноіндуктивний зв'язок враховується додаванням $2j\omega M$ тільки в тому випадку, якщо магнітозв'язані індуктивні елементи знаходяться в одному контурі. Взаємноіндуктивний опір $2j\omega M$ береться зі знаком плюс у тому випадку, коли напрямки відповідного контурного струму однаковий відносно однойменних затискачів магнітозв'язаних індуктивних елементів, у протилежному випадку – зі знаком мінус.

5 При розрахунку потенціалів необхідно враховувати падіння напруги на опори взаємної індуктивності ($j\omega M$). Знак напруги на ньому залежить від включення магнітозв'язаних індуктивних елементів. При злагоженому включенні даних елементів падіння напруги на індуктивності та взаємній індуктивності одного знаку; при зустрічному включенні падіння напруги на взаємній індуктивності протилежне знаку падіння напруги на відповідній індуктивності. Величина падіння напруги на взаємній індуктивності одного елемента визначається множенням опору взаємної індуктивності на струм у другому індуктивнозв'язаному елементі ($\pm j\omega M I_1$ або $\pm j\omega M I_2$).

6 При побудові топографічної діаграми потенціал будь-якої точки можна прийняти рівним нулю. На діаграмі цю точку розміщують на початку координат. Положення інших точок схеми на діаграмі визначаються параметрами електричного кола, ЕРС і струмами гілок.

7 Слід пам'ятати, що

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \quad \underline{U}_L = j\omega L I \pm j\omega M I_2, \quad \underline{U}_{L_2} = j\omega L_2 I_2 \pm j\omega M I_1$$

де \underline{I}_1 і \underline{I}_2 - струми, що протікають через магнітозв'язані індуктивні елементи \underline{L}_1 та \underline{L}_2 відповідно;

\underline{U}_{L_1} та \underline{U}_{L_2} - падіння напруги на індуктивнозв'язаних елементах \underline{L}_1 та \underline{L}_2 відповідно.

8 активні потужності, що передаються магнітним шляхом від однієї котушки до іншої, знаходять за формулами

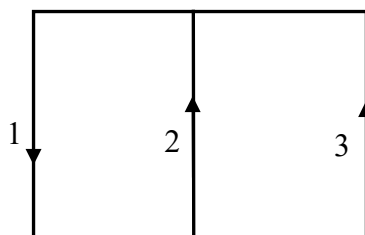
$$P_L = -\omega M \cdot I_2 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$P_{L_2} = -\omega M \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$$

3 Приклад розрахунку

1 Складаємо розрахункову схему за варіантом.

Для шифру 8-ET-000 вибирається граф за рисунком 16, а параметри електричного кола беруться з нульового рядка таблиці 15.



Остання цифра шифру	Номер гілки графа		
	1	2	3
0	$\underline{J}, \underline{E}, \underline{L}_2$	\underline{L}	$\underline{R}, \underline{C}$

Для одержання розрахункової схеми вводимо у відповідні гілки графа елементи з таблиці 15, направляючи джерела за напрямком гілок графа. Довільно позначаємо (точками) однойменні затискачі котушок індуктивності та напрямки струмів у гілках (стрілками).

Даним вихідним параметрам відповідає схема розрахункового кола на рисунку 17.

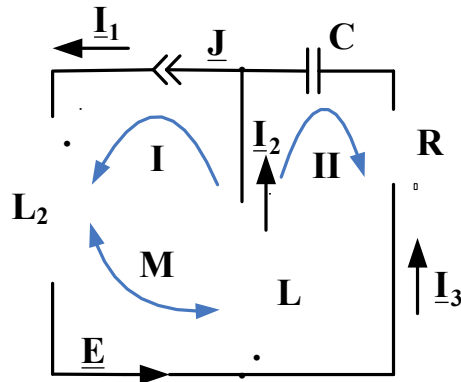


Рисунок 17

Числові значення параметрів джерел електричної енергії, пасивних елементів, частоти ω та коефіцієнта зв'язку k в кожному році однакові для усіх варіантів і задані в таблиці 16. Наприклад, у 2015 році числові дані треба взяти з п'ятого рядка цієї таблиці.

Для варіантів 2015 року

Остання цифра поточного року	\underline{J} А	\underline{E} В	R Ом	C мкФ	L мГн	L_2 мГн	k	ω c^{-1}
5	$2e^{-j60^\circ}$	$10e^{j30^\circ}$	10	0,5	0,1	0,2	0,55	10^5

2 Метод рівнянь Кірхгофа.

У даній розрахунковій електричній схемі джерело ЕРС на розрахунок не впливає, оскільки знаходиться в одній гілці з ідеальним джерелом струму.

Довільно позначаємо напрямки струмів у гілках і напрямки

обходу контурів, пам'ятаючи, що $\underline{I}_1 = \underline{J}$.

Кількість рівнянь, які потрібно скласти за законами Кірхгофа, дорівнює кількості гілок мінус кількість джерел струму даного кола, тобто треба скласти два рівняння. За першим законом Кірхгофа необхідно скласти максимально можливу кількість неповторюваних рівнянь, що на одиницю менше, ніж кількість вузлів кола (тобто одне рівняння). $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3$.

Друге необхідне рівняння складаємо за другим законом Кірхгофа для другого контуру без джерел:

$$0 = jX_C \underline{I}_3 - \underline{I}_3 R + jX_L \underline{I}_2 + jX_M \underline{I}_1$$

де $jX_M = j\omega M$ - реактивний опір взаємної індуктивності;

$M = k\sqrt{L_1 L_2}$ - взаємна індуктивність.

Складені рівняння використовуються для перевірки правильності розрахунку вихідної схеми методом контурних струмів.

3 Метод контурних струмів.

Визначаємо два незалежні контури і довільно розставляємо напрямки контурних струмів та струмів у гілках (рисунок 17).

$\underline{I}_{11} = \underline{J}$, тому що в цьому контурі є джерело струму.

Обчислюємо контурну ЕРС і власний опір для контуру, що не містить джерел струму:

$$\underline{E}_{22} = 0;$$

$$\underline{Z}_{22} = R + jX_L - jX_C.$$

Визначаємо загальні опори контурів:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = jX_L + jX_M.$$

За загальними правилами складаємо систему рівнянь, у якій залишиться тільки одне рівняння:

$$\underline{E}_{22} = \underline{Z}_{21} + \underline{I}_{22} \underline{Z}_{22} .$$

Для визначення контурного струму \underline{I}_{22} розв'язуємо отримане рівняння.

Визначаємо струми в гілках через відомі контурні струми

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{11} ; \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_{11} + \underline{I}_{22} ; \quad \underline{I}_3 = -\underline{I}_{22} .$$

Перевіряємо розрахунок за допомогою рівнянь, складених за першим та другим законами Кірхгофа:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 ,$$

$$0 = j X_C \underline{I}_3 - \underline{I}_3 R + j X_L \underline{I}_2 + j X_M \underline{I}_1 .$$

4 Будуємо в масштабі замкнену діаграму струмів (рисунок 18).

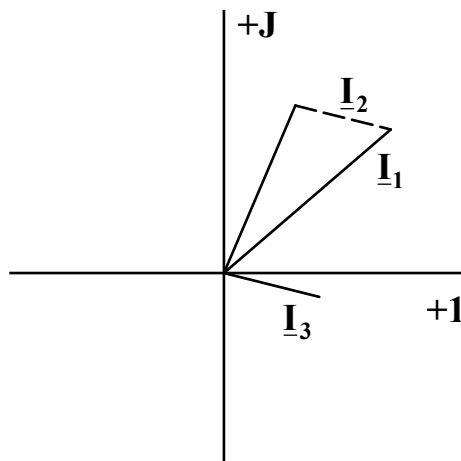


Рисунок 18

5 Розрахуємо потенціали замкненого контуру $0, a, b, 0$, прийнявши потенціал точки 0 рівним нулю ($\varphi_0 = 0$):

$$\varphi_a = \varphi_0 - j \frac{1}{\omega C} I_3, \quad \varphi_b = \varphi_a + R I_3, \quad \varphi_0 = \varphi_b - j \omega L I_2 - j \omega M I_1,$$

де $R I_3 = \underline{U}_R$ - напруга на активному опорі;

$-j \frac{1}{\omega C} I_3 = \underline{U}_C$ - напруга на ємності;

$j \omega L I_2 + j \omega M I_1 = \underline{U}_L$ - напруга на індуктивності L .

6 Будуємо в масштабі замкнену векторну діаграму напруг і топографічну діаграму замкненого контуру $0, a, b, 0$ (рисунок 19).

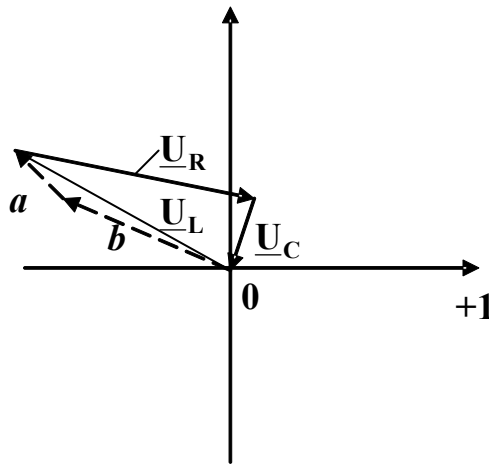


Рисунок 19

4 Контрольні запитання

- 1 У чому полягає явище взаємної індукції?
- 2 Що таке взаємна індуктивність? Одиниця її виміру.
- 3 Яке з'єднання котушок називається узгодженим?
- 4 Яке з'єднання котушок називається зустрічним?
- 5 Як змінити з'єднання котушок з узгодженого на зустрічне?
- 6 Чому дорівнює опір двох послідовно з'єднаних котушок індуктивності за наявності між ними магнітного зв'язку?
- 7 Чи є особливості запису першого закону Кірхгофа за наявності в колі котушок індуктивності зі взаємною індукцією?
- 8 У чому полягають особливості запису другого закону

Кірхгофа для кола зі взаємною індукцією?

9У чому полягають особливості розрахунку кола зі взаємною індукцією методом контурних струмів?

10Що таке коефіцієнт зв'язку?

11Чому коефіцієнт зв'язку завжди менше одиниці?

12Як розрахувати напругу на індуктивному елементі за наявності магнітного зв'язку?

13Як на векторній діаграмі напруг відображається наявність магнітного зв'язку між котушками індуктивності?

14Як розрахувати активні потужності, що передаються магнітним шляхом від однієї котушки до іншої?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7

Аналіз і розрахунок магнітного кола постійного струму

1 Вихідні дані та завдання

1 Розрахувати кількість витків обмотки, яка при заданій величині струму забезпечить потрібну величину магнітної індукції в повітряному зазорі нерозгалуженого магнітопроводу, що зображено на рисунку 20.

2 Розміри осердя, тип сталі та їх криві намагнічування, а також струм в обмотці та величина магнітної індукції, наявність якої треба забезпечити в повітряному зазорі, задані за варіантами в таблицях 17, 18, 19.

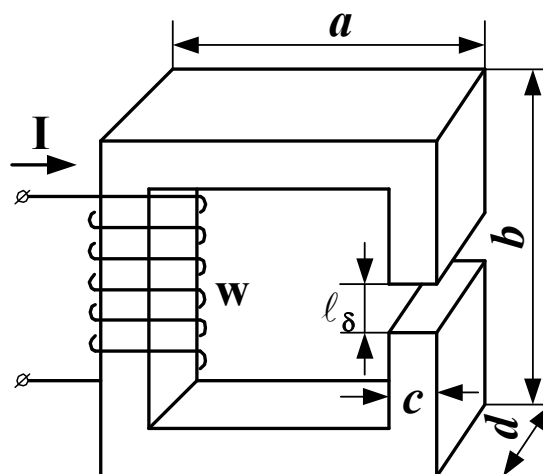


Рисунок 20

Таблиця 17

Передостання цифра шифру	Марка сталі	Струм I в обмотці, А	Магнітна індукція B_0 у повітряному зазорі, Тл
0	Е11	1,75	1,2
1	Е41	0,75	0,7
2	Лита	1,25	1,0
3	Е11	1,0	0,9
4	Е41	2,3	1,4
5	Лита	2,25	1,3
6	Е11	2,75	1,5
7	Е41	0,9	0,8
8	Лита	1,6	1,1
9	Е11	2,0	1,25

Таблиця 18

Остання цифра шифру	Розміри осердя, мм				
	a	b	c	D	l_δ
0	50	70	10	40	0,45
1	55	80	15	35	0,5
2	60	90	20	30	0,55
3	65	100	25	25	0,6
4	70	110	30	20	0,65
5	75	120	35	15	0,7
6	80	130	40	10	0,75
7	85	140	35	15	0,8
8	90	150	30	20	0,85
9	100	60	25	25	0,9

2 Методичні рекомендації щодо виконання

1 Для виконання завдання треба засвоїти визначення понять «магнітне поле», «силові лінії магнітного поля», «магнітна індукція», «магнітна напруженість», «магнітний потік», «магнітопровід», «магнітне коло», «магніторушійна сила», «крива намагнічування сталі», «магнітна напруга», особливості використання закону повного струму для розрахунку магнітних кіл.

2 Розраховуємо магнітний потік у тій частині магнітного кола, де задана магнітна індукція, тобто в повітряному зазорі,

пам'ятаючи, що геометричні розміри треба підставляти до формули в метрах.

$$\Phi_0 = B_0 \cdot S_0,$$

$$\text{де } S_0 = c \cdot d.$$

3 У нерозгалуженому магнітному колі з урахуванням загальноприйнятих допущень про нехтування потоками розсіяння магнітний потік на всіх ділянках кола буде однаковим і дорівнюватиме Φ_0 .

4 Розраховуємо магнітну індукцію у сталі для кожної ділянки магнітопроводу з різним перерізом. Оскільки магнітопровід на рисунку 20 по всій довжині має один переріз, то магнітна індукція у сталі буде дорівнювати магнітній індукції в повітряному зазорі.

$$B_{ст} = \frac{\Phi_0}{S_{ст}},$$

$$\text{де } S_{ст} = c \cdot d$$

Таблиця 19

Магнітна індукція, B , Тл	Напруженість магнітного поля H , А/м, для сталі марки		
	Е11	Е41	Лита
0,1	-	40	80
0,2	-	50	160
0,3	-	60	240
0,4	140	70	320
0,5	171	85	400
0,6	211	110	488
0,65	236	127	535
0,7	261	145	584
0,75	287	165	632
0,8	318	185	682
0,85	352	210	745
0,9	397	235	798
0,95	447	270	850
1,00	502	300	920

1,05	570	340	1004
1,10	647	395	1090
1,15	739	460	1187
1,20	840	540	1290
1,25	976	640	1430
1,30	1140	770	1590
1,35	1340	970	1810
1,40	1580	1300	2090
1,45	1950	1830	2440
1,50	2500	2750	2890
1,55	3280	3850	3430
1,60	4370	5150	4100
1,65	5880	6950	4870
1,70	7780	8900	5750

5 За кривою намагнічування знаходимо напруженість магнітного поля у сталі магнітопроводу. Наприклад, якщо $B_0 = B_{ст} = 0.6$ Тл, то для сталі марки Е11 за даними таблиці 19 виписуємо значення напруженості магнітного поля.

$$H_{ст} = 211 \text{ А/м.}$$

6 Напруженість магнітного поля в повітряному зазорі знаходимо за формулою

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = 0.8 \cdot 10^6 \cdot B_0$$

7 Знаходимо необхідну магніторушійну силу за другим законом Кірхгофа для магнітного кола:

$$F = \sum U_m = H_{ст} \cdot l_{ст} + H_0 \cdot l_\delta,$$

де U_m – магнітна напруга ділянки магнітного кола;

l_δ – повітряний зазор, м;

$l_{ст}$ – довжина середньої лінії сталюого магнітопроводу за геометричними розмірами, м,

$$l_{\text{ст}} = 2 \cdot (a - c) + (b - c) + (b - c - l_{\delta}), \text{ м}$$

8 Знаходимо необхідну кількість витків обмотки w , по якій протікає заданий струм I з виразу магніторушійної сили

$$F = I \cdot w$$

$$w = \frac{F}{I}$$

3 Контрольні запитання

- 1 Що таке магнітна індукція магнітного поля та яка одиниця її виміру?
- 2 Що таке напруженість магнітного поля та яка одиниця її виміру?
- 3 Що таке магнітний потік та яка одиниця його виміру?
- 4 Що таке магнітопровід?
- 5 Що таке магнітне коло?
- 6 Які допущення роблять при розрахунку магнітних кіл з повітряним зазором?
- 7 Що таке крива намагнічування сталі та коерцитивна сила?
- 8 Що таке магніторушійна сила?
- 9 Як розрахувати довжину середньої лінії ділянки магнітопроводу?
- 10 Як формулюється закон повного струму?
- 11 Що таке магнітний опір?
- 12 Що таке магнітна напруга?
- 13 Як формулюється перший закон Кірхгофа для магнітних кіл?
- 14 Як формулюється другий закон Кірхгофа для магнітних кіл?

15 У чому полягає суть розв'язання прямої задачі при розрахунку магнітних кіл?

16 У чому полягає суть розв'язання зворотної задачі при розрахунку магнітних кіл?

17 Що таке вебер-амперна характеристика?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

Контрольне модульне тестування

1 Загальні положення

Контрольне модульне тестування є логічним кінцевим етапом і перевіркою якості засвоєння теоретичного матеріалу та набуття первісних практичних навиків розрахунку електричних кіл синусоїдного струму та магнітних кіл постійного струму у другій половині семестру.

Завдання контрольного тестування складається з теоретичних питань і задач для практичного розв'язання, аналогічних до тих, що розглядались на практичних заняттях.

Тестові питання, що наведені нижче, є узагальненими, тобто одне питання може бути розділено на декілька частин або сформульовано інакше.

Викладач, який проводить тестування, повинен забезпечити контроль за самостійністю роботи кожного студента.

2 Тестові питання

1 Що таке амплітуда, період, частота, початкова фаза та

кутова частота синусоїдного струму?

2 Що таке діюче значення синусоїдної напруги або струму?

3 Чому метод розрахунку електричних кіл синусоїдного струму називається символічним?

4 Як від виразу миттєвого значення електричної величини у вигляді синусоїди перейти до комплексного числа, яке буде представляти цю синусоїду в подальших розрахунках?

5 Навіщо потрібно подавати комплексні струми та напруги у двох формах (алгебраїчній та показовій)?

6 Що таке уявна одиниця, і чому дорівнює її квадрат?

7 Яка форма комплексного числа називається алгебраїчною?

8 Яка форма комплексного числа називається показовою?

9 Як перейти від алгебраїчної форми комплексного числа до показової?

10 Як перейти від показової форми комплексного числа до алгебраїчної?

11 Як додати чи відняти два комплексних числа?

12 Як перемножити два комплексних числа в показовій формі?

13 Як перемножити два комплексних числа в алгебраїчній формі?

14 Як поділити два комплексних числа?

15 Як комплексне число зображується на комплексній площині?

16 Як визначити кут зсуву фаз між напругою та струмом?

17 Як на векторній діаграмі визначити суму двох векторів?

18 Що таке індуктивність та яка одиниця її виміру?

19 Що таке ємність та яка одиниця її виміру?

20 Що таке індуктивний опір?

21 Що таке ємнісний опір?

22 Формула повного опору послідовно з'єднаних пасивних елементів гілки у вигляді комплексного числа в алгебраїчній формі.

23 Як від алгебраїчної форми повного опору перейти до

показової?

24 Як від показової форми повного опору перейти до алгебраїчної?

25 За якими законами та формулами ведеться розрахунок кола синусоїдного струму з одним джерелом ЕРС або струму?

26 Який електротехнічний закон відображає векторна діаграма струмів?

27 Який електротехнічний закон відображає векторна діаграма напруг?

28 Чому не можна знайти напруги на затискачах джерела струму за законом Ома?

29 Навести правила розрахунку потенціалів контуру відносно до точки заземлення?

30 Як знайти різницю потенціалів між затискачами джерела струму?

31 Скільки рівнянь треба скласти, щоб розрахувати схему при безпосередньому використанні законів Кірхгофа?

32 Скільки рівнянь можна скласти за першим законом Кірхгофа?

33 Чому при складанні рівняння за другим законом Кірхгофа не можна використовувати контур з джерелом струму?

34 Чому метод рівнянь Кірхгофа практично не застосовується?

35 Коли доцільно використовувати метод накладання для розрахунку складних електричних кіл?

36 Скільки разів треба розраховувати схему за методом накладання?

37 Що таке частковий струм?

38 Правило вилучення джерел ЕРС при складанні розрахункової схеми за методом накладання.

39 Правило вилучення джерел струму при складанні розрахункової схеми за методом накладання.

40 Як знайти реальні струми в гілках вихідного кола після розрахунку всіх часткових струмів?

41 Як складається баланс потужностей для кола синусоїдного струму?

42 Як знайти сумарну комплексну потужність джерел?

43 У чому полягає фізичний сенс від'ємного значення

потужності джерела?

44 Що таке спряжений струм?

45 Як знайти активну потужність, споживану активними опорами кола?

46 Як знайти реактивну потужність, споживану реактивними опорами кола?

47 Що таке повна потужність електричного кола?

48 Одиниці виміру активної, реактивної та повної потужностей електричного кола синусоїдного струму.

49 Скільки незалежних контурів треба визначити в колі при використанні метода контурних струмів?

50 Як треба обирати контури, якщо в колі є джерела струму?

51 Чи реально існують у колі контурні струми?

52 Що таке контурні ЕРС і як їх розрахувати?

53 Що таке власні контурні опори і як їх розрахувати?

54 Що таке суміжні опори і як їх розрахувати?

55 Чому дорівнює кількість рівнянь у системі за методом контурних струмів у колі без джерел струму?

56 Чому дорівнює кількість рівнянь у системі за методом контурних струмів у колі з джерелами струму?

57 Чому за наявності в колі джерел струму кількість необхідних рівнянь зменшується?

58 Які рівняння треба вилучити з формалізованої системи за наявності в колі джерел струму?

59 Які є математичні методи розв'язання системи рівнянь з невідомими контурними струмами?

60 Як знайти реальні струми в гілках після розв'язання системи і знаходження контурних струмів?

61 Коли доцільно використовувати метод вузлових потенціалів порівняно з методом контурних струмів?

62 Чому доцільно заземлювати вузол, до якого підходить гілка з ідеальним джерелом ЕРС?

63 Що таке вузловий струм і як його обчислити?

64 Одиниця виміру провідності.

65 Чому дорівнює провідність гілки з джерелом струму?

66 Що таке власна провідність вузла і як її обчислити?

67 Що таке суміжна провідність вузлів і як її обчислити?

- 68 Як знайти струми в гілках після знаходження вузлових потенціалів?
- 69 В чому полягає явище взаємної індукції?
- 70 Що таке взаємна індуктивність? Одиниця її виміру.
- 71 Яке з'єднання котушок називається узгодженим?
- 72 Яке з'єднання котушок називається зустрічним?
- 73 Як змінити з'єднання котушок з узгодженого на зустрічне?
- 74 Чому дорівнює опір двох послідовно з'єднаних котушок індуктивності за наявності між ними магнітного зв'язку?
- 75 Чи є особливості запису першого закону Кірхгофа за наявності в колі котушок індуктивності зі взаємною індукцією?
- 76 У чому полягають особливості запису другого закону Кірхгофа для кола зі взаємною індукцією?
- 77 У чому полягають особливості розрахунку кола зі взаємною індукцією методом контурних струмів?
- 78 Що таке коефіцієнт зв'язку?
- 79 Чому коефіцієнт зв'язку завжди менше одиниці?
- 80 За якою гіпотетичною умовою коефіцієнт зв'язку міг би дорівнювати одиниці?
- 81 Як розрахувати напругу на індуктивному елементі за наявності магнітного зв'язку?
- 82 Як на векторній діаграмі напруг відображається наявність магнітного зв'язку між котушками індуктивності?
- 83 Як розрахувати активні потужності, що передаються магнітним шляхом від однієї котушки до іншої?
- 84 Коли доцільно використовувати метод еквівалентного генератора?
- 85 Сформулювати теорему про еквівалентний генератор.
- 86 Що таке холостий хід, як знайти напругу в режимі холостого ходу між точками підключення гілки, у якій треба знайти струм методом еквівалентного генератора?
- 87 Чому дорівнює і як обчислити внутрішній опір еквівалентного генератора?
- 88 Що треба зробити з джерелами ЕРС для обчислення вхідного опору схеми по відношенню до точок підключення розрахункової гілки?

89 Що треба зробити з джерелами струму для обчислення вхідного опору схеми по відношенню до точок підключення розрахункової гілки?

90 Як знайти струм у розрахунковій гілці після знаходження ЕРС та внутрішнього опору еквівалентного генератора?

91 Що таке магнітна індукція магнітного поля та яка одиниця її вимірювання?

92 Що таке напруженість магнітного поля та яка одиниця її вимірювання?

93 Що таке магнітний потік та яка одиниця його виміру?

94 Що таке магнітопровід?

95 Що таке магнітне коло?

96 Які допущення роблять при розрахунку магнітних кіл з повітряним зазором?

97 Що таке крива намагнічування сталі та коерцитивна сила?

98 Що таке магніторушійна сила?

99 Як розрахувати довжину середньої лінії ділянки магнітопроводу?

100 Як формулюється закон повного струму?

101 Що таке магнітний опір?

102 Що таке магнітна напруга?

103 Як формулюється перший закон Кірхгофа для магнітних кіл?

104 Як формулюється другий закон Кірхгофа для магнітних кіл?

105 У чому полягає суть розв'язання прямої задачі при розрахунку магнітних кіл?

106 У чому полягає суть вирішення зворотної задачі при розрахунку магнітних кіл?

107 Що таке вебер-амперна характеристика?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники:

Электрические цепи: – М.: Гардарики, 2000.

2 Сборник задач по теоретическим основам электротехники /Под ред. Л.А. Бессонова – М.: Высшая школа, 2000.

3 Завдання та методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», Ч. 1. – Харків: УкрДАЗТ, 2002.

ДОДАТОК А

Основні електричні та магнітні величини

Найменування	Буквене позначення	Одиниця виміру	Позначення
Струм	I, i	Ампер	А
Електрорушійна сила	E, e	Вольт	В
Напруга електрична	U, u	Вольт	В
Потенціал електричний	ϕ	Вольт	В
Потужність активна	P	Ват	Вт
Потужність повна	S	вольт- ампер	ВА
Потужність реактивна	Q	вольт-ампер реактивний	ВАр
Ємність електрична	C	Фарада	Ф
Період коливань	T	Секунда	с
Щільність струму	J	ампер на кв. метр	A/m^2
Індуктивність власна	L	Генрі	Гн
Індуктивність взаємна	M	Генрі	Гн
Провідність активна	G, g	Сименс	См
Провідність повна	Y, y	Сименс	См
Провідність реактивна	B, b	Сименс	См

Частота коливань кутова	ω, Ω	радіан у секунду	с^{-1}
Частота електрична	f	Герц	Гц
Початкова фаза	ψ, φ	градус	$^{\circ}$
Опір постійному струму	R, r	ом	Ом
Активний опір	R, r	ом	Ом
Опір повний	Z	ом	Ом
Опір реактивний	X, x	ом	Ом
Зсув фаз	φ	градус	$^{\circ}$
Магнітна індукція	B	Тесла	Тл
Напруженість магнітна	H	Ампер на метр	А/м
Магнітний потік	Φ	Вебер	Вб
Магніторушійна сила	F	Ампер	А

