

**Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет**



ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань G

Інженерія, виробництво та будівництво
спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 621.3 (075.8)

Е–50

Рекомендовано до видання вченою радою факультету РАІ ЛНТУ,
протокол № _____ від « ____ » _____ 20 26 року.

Голова вченої ради факультету РАІ _____ Анатолій ТКАЧУК

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛІЩУК

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки, фізики та СМАРТ-систем
ЛНТУ, протокол № _____ 2 _____ від « 19 » _____ червня _____ 20 26 року.

Завідувач кафедри ЕФСС _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ

Укладач: _____ Йосип СЕЛЕПИНА, кандидат технічних наук,
доцент кафедри електроніки фізики, та СМАРТ-систем ЛНТУ

Рецензент: _____ Микола ЄВСЮК, кандидат технічних наук, доцент
кафедри електроніки, фізики та СМАРТ-систем ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ, кандидат
технічних наук, завідувач кафедри електроніки, фізики та СМАРТ-систем ЛНТУ

Е–50

Електротехніка: методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності 65 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка денної та заочної форм навчання/ уклад. Й. Р. Селепина. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 63 с.

Методичні вказівки до самостійної роботи з освітньої компоненти
«**Електротехніка:** складені відповідно до діючої робочої програми курсу.

Призначені для здобувачів вищої освіти спеціальності 65 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка освітньої програми «Автомобільна електроніка».

© Й. Р. Селепина 2026

СТРУКТУРА РОБОЧОЇ ПРОГРАМИ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

1. Опис дисципліни «Електротехніка»

Дисципліна «Електротехніка»	Галузь знань, спеціальність, СВО	Характеристика навчальної дисципліни	
		денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів – 7	<u>Галузь знань</u> (шифр, найменування) 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації	Статус дисципліни: <i>обов'язкова</i> <i>дисципліна професійної підготовки</i> Мова навчання: <i>українська</i>	
Кількість залікових модулів – 4	<u>Спеціальність</u> (шифр, найменування) 171 Електроніка	Рік підготовки: 2-й Семестр: 3-й	
Кількість змістових модулів – 2	<u>Ступінь</u> <u>вищої освіти</u> бакалавр	Лекції: 45 год. Лабораторні: 30 год. Практичні: 30 год.	Лекції: 10 год. Лабораторні: 6 год. Практичні: 6 год.
Загальна кількість годин – 210		Самост. роб.: 105 год. з них КППЗ 10 год.	Самост. роб.: 188 год з них КППЗ 10 год.
Тижневих годин для денної форми навчання – 14, з них аудиторних – 7		Вид підсумкового контролю: <i>екзамен у</i> <i>третьому семестрі</i>	

2. Мета і завдання дисципліни «Електротехніка»

2.1. Мета вивчення дисципліни

Вивчення фізичних особливостей електромагнітних явищ і процесів, законів, яким вони підлягають; засвоєння здобувачами сучасних методів моделювання електромагнітних процесів, методів аналізу і розрахунку електричних кіл; формування знань та практичних навичок в галузі обертових електричних машин і трансформаторів, їх електричних та механічних властивостей.

2.2. Завдання вивчення дисципліни

Засвоєння методів розрахунку електричних кіл постійного, змінного та несинусоїдного струмів, методів розрахунку перехідних процесів в електричних колах та колах з розподіленими параметрами, характеристики і математичні моделі; застосування електричних машин в системах автомобіля.

2.3. Найменування та опис компетентностей, формування котрих забезпечує вивчення дисципліни

Інтегральна компетентність

ІК1. Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов, під час професійної діяльності у галузі електроніки, або у процесі навчання, що передбачає застосування теорій та методів електроніки.

Спеціальні (фахові, предметні) компетентності спеціальності

СК1. Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування приладів, пристроїв та систем електроніки.

СК 3. Здатність інтегрувати знання фундаментальних розділів фізики та хімії для розуміння процесів твердотільної, функціональної та енергетичної електроніки, електротехніки.

2.4. Передумови для вивчення дисципліни

Пререквізити дисципліни: Вища математика; Фізика.

2.5. Результати навчання

Програмні результати навчання (ПРН):

ПРН 2. Застосовувати знання і розуміння диференційного та інтегрального числення, алгебри, функціонального аналізу дійсних і комплексних змінних, векторів та матриць, векторного числення, диференціальних рівняння в звичайних та часткових похідних, ряду Фур'є, статистичного

аналізу, теорії інформації, чисельних методів для вирішення теоретичних і прикладних задач електроніки.

ПРН 4. Оцінювати характеристики та параметри матеріалів електронної техніки, розуміти основи твердотільної електроніки, електротехніки, аналогової та цифрової схемотехніки, перетворювальної та мікропроцесорної техніки.

3. Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1

Тема 1. Лінійні електричні кола постійного та змінного струму

Основні поняття про електричне кола. Закони електричних кіл. Методи розрахунку кіл з одним та багатьма джерелами. Синусоїдні струми в електричних колах. Комплексний метод розрахунку. Потужність та баланс потужності. Моделювання електричних кіл постійного та змінного струму. Література: [3-6].

Тема 2. Трифазні кола

Особливості побудови та роботи трифазних кіл. Розрахунок симетричного та несиметричного навантаження при з'єднанні споживачів зіркою та трикутником. Коефіцієнт потужності. Використання кіл трифазного змінного струму в автомобільній електроніці. Література: [3-6].

Тема 3. Чотириполюсники

Основні поняття про багатополіусники. Рівняння чотириполюсників. Схеми заміщення та визначення їх параметрів дослідним шляхом. Електричні фільтри як чотириполюсники. Література: [3-6, 9].

Тема 4. Перехідні процеси в лінійних електричних колах

Поняття про перехідні процеси. Закони комутації. Розрахунок перехідних процесів класичним методом та операторним. Перехідні процеси в імпульсних колах та колах з довільною формою джерела енергії. Література: [4-6, 7].

Тема 5. Електричні кола несинусоїдного струму

Причини виникнення несинусоїдних струмів. Неліній елементи та їх характеристики. Розкладання несинусоїдних величин в ряд Фур'є. Розрахунок кіл несинусоїдних струмів методом накладання. Література: [1-10].

Змістовий модуль 2

Тема 6. Магнітні кола

Основні поняття та величини, що характеризують магнітне поле. Магнітне поле провідника зі струмом. Робота електромагнітних сил. Взаємодія провідників зі струмом. Закон повного струму. Потокозчеплення та індуктивність котушок. Явище самоіндукції та взаємоіндукції. Література: [4-6, 8].

Тема 7. Трансформатори

Конструктивне виконання трансформаторів. Принцип роботи трансформатора. Заступна схема трансформатора. Рівняння намагнічуючих струмів, векторні діаграми. Зовнішні характеристики трансформатора. Література: [1-2, 10].

Тема 8. Асинхронні машини

Будова асинхронних машин. Області використання асинхронних машин. Принцип дії асинхронних машин. Асинхронні двигуни з короткозамкненим та фазним ротором. Література: [1-2].

Тема 9. Синхронні машини

Будова і принципи роботи синхронної машини. Векторні діаграми неявнополюсного та явно полюсного синхронного генератора з урахуванням та без урахування насичення магнітного кола. Характеристики синхронного генератора при роботі на автономне навантаження. Характеристики синхронного двигуна. Література: [1-2, 9].

Тема 10. Машини постійного струму

Будова і принцип роботи генераторів та двигунів постійного струму за способами збудження. Характеристики генераторів та двигунів постійного струму. Класифікація двигунів постійного струму.

Література: [1-2, 7].

4. Структура залікового кредиту з дисципліни «Електротехніка»

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин									
	денна форма					заочна форма				
	усього	у тому числі:				усього	у тому числі:			
		лек.	лаб	прак.	сам. роб.		лек	лаб	прак.	сам. роб.
Тема 1. Лінійні електричні кола постійного та змінного струму	24	6	4	4	10	100	4	4	2	20
Тема 2. Трифазні кола	20	4	4	2	10					20
Тема 3. Чотириполюсники	20	4	2	4	10					15
Тема 4. Перехідні процеси в лінійних електричних колах	21	5	4	2	10					20
Тема 5. Електричні кола несинусоїдного струму	15	4	2	4	5					15
Разом за змістовим модулем 1	100	23	16	16	45	100	4	4	2	90
Тема 6. Магнітні кола	20	4	4	2	10	100	6	2	4	15
Тема 7. Трансформатори	20	4	2	4	10					20
Тема 8. Асинхронні машини	18	4	2	2	10					20
Тема 9. Синхронні машини	20	4	4	2	10					15
Тема 10. Машини постійного струму	22	6	2	4	10					18
Разом за змістовим модулем 2	100	22	14	14	50	100	6	2	4	88
КПІЗ	10	-	-	-	10	10	-	-	-	10
Усього годин	210	45	30	30	105	210	10	6	6	188

5. Тематика семінарських занять – не передбачено

6. Тематика практичних занять

Модуль 1

Практичне заняття 1

Тема – Розрахунок лінійних електричних кіл методами контурних струмів та вузлових потенціалів.

Мета – навчитися розраховувати електричні кола постійного струму з одним та багатьма джерелами енергії методами контурних струмів та вузлових потенціалів.

Питання для обговорення:

1. Основні закони електричних кіл.
2. Хід розрахунку електричних кіл методом контурних струмів.
3. Хід розрахунку електричних кіл методом вузлових потенціалів.

Література: [3-6].

Практичне заняття 2

Тема – Розрахунок електричних кіл синусоїдного струму.

Мета – навчитися розраховувати електричні кола змінного синусоїдного струму з змішаним з'єднанням елементів класичним та комплексним методами

Питання для обговорення:

1. Основні параметри синусоїдних величин.
2. Комплексний метод розрахунку.
3. Векторна діаграма.
4. Потужність в колах змінного синусоїдного струму.

Література: [3-6].

Практичне заняття 3

Тема – Розрахунок трифазних кіл.

Мета – навчитися розраховувати електричні кола трифазного струму при з'єднанні трикутником та зіркою симетричних та несиметричних режимів.

Питання для обговорення:

1. Виникнення трифазної системи ЕРС.
2. Типи з'єднання трифазних споживачів.
3. Симетричне та несиметричне навантаження трифазних кіл.

Література: [3-6].

Практичне заняття 4

Тема – Побудова колових діаграм чотириполюсників.

Мета – навчитися розраховувати чотириполюсники на основі експериментальних даних, будувати їх векторні діаграми та схеми заміщення, а також використовувати метод змінних стану для моделювання чотириполюсників в якості «чорної скриньки».

Питання для обговорення:

1. Властивості симетричних та несиметричних чотириполюсників.
2. Основні рівняння чотириполюсників.
3. Векторна діаграма чотириполюсників.

Література: [3-6, 7].

Практичне заняття 5

Розрахунок перехідних процесів в електричних колах класичним методом.

Мета – навчитися розраховувати перехідні процеси в лінійних електричних колах класичним та операторним методами.

Питання для обговорення:

1. Закони комутації.
2. Усталені та вільні складові струмів перехідного процесу.
3. Постійна часу кола.

Література: [3-6, 8].

Практичне заняття 6

Тема – Розрахунок кіл несинусоїдного періодичного струму методом накладання.

Мета – навчитися розкладати несинусоїдні періодичні сигнали в ряд Фур'є та розраховувати електричні кола методом накладання для кожної з гармонік.

Питання для обговорення:

1. Причини виникнення несинусоїдних струмів.
2. Розклад періодичних сигналів в ряд Фур'є.
3. Розрахунок методом накладання.

Література: [3-6].

Практичне заняття 7

Тема – Розрахунок електричних кіл з розподіленими параметрами.

Мета – навчитися розраховувати електричні кола змінного синусоїдного струму з розподіленими параметрами, а саме усталені процеси в однорідних довгих лініях.

Питання для обговорення:

1. Основні параметри кіл з розподіленими параметрами.
2. Лінія без втрат.
3. Усталений та перехідний процес в довгих лініях.

Література: [3-6].

Практичне заняття 8

Тема – Спектральний опис періодичних сигналів.

Мета – освоїти методи отримання та опису спектрів гармонічних коливань, імпульсних сигналів.

Питання для обговорення:

1. Спектральний опис періодичних сигналів.
2. Властивості спектральних характеристик.
3. Комплексна форма пису ряду Фур'є.

Література: [3-6].

Модуль 2

Практичне заняття 9

Тема – Визначення параметрів трансформатора при холостому ході та короткому замиканні трансформатора.

Мета – З'ясувати суть і призначення досліду короткого замикання, зрозуміти побудову векторних діаграм та заступну схему.

Питання для обговорення:

1. Векторна діаграма та рівняння при короткому замиканні, струм короткого замикання.
2. Коефіцієнт корисної дії, втрати трансформатора

Література: [1-2].

Практичне заняття 10

Тема – Розрахунок зовнішніх характеристик трансформатора.

Мета – Засвоїти рівняння зовнішньої характеристики, вияснити вплив різних видів навантаження на зміну вторинної напруги.

Питання для обговорення:

1. Коефіцієнт завантаження трансформатора.
2. Опори короткого замикання, напруга короткого замикання.
3. Активно-індуктивне, активне, активно-ємнісне навантаження.

Література: [1-2].

Практичне заняття 11

Тема – Розрахунок механічної характеристики АД.

Мета – Опанувати методику розрахунку та побудови механічних характеристик АД за формулою Клосса та за формулою електромагнітного моменту.

Питання для обговорення:

1. Ковзання в АД.
2. Електромагнітний, максимальний, номінальний та пусковий моменти АД.

Література: [1-2].

Практичне заняття 12

Тема – Розрахунок V-подібних характеристик синхронного двигуна.

Мета – Опанувати методику побудови V-подібних характеристик синхронного генератора.

Питання для обговорення:

1. Електромагнітна потужність, максимальний момент, перевантажувальна здатність.
2. Вплив різних видів навантаження на вигляд V-подібних характеристик.
3. Перезбудження та недозбудження СГ.

Література: [1-2].

Практичне заняття 13

Тема – Розрахунок V-подібних характеристик синхронного генератора.

Мета – Опанувати методику побудови V-подібних характеристик синхронного генератора.

Питання для обговорення:

1. Електромагнітна потужність, максимальний момент, перевантажувальна здатність.
2. Вплив різних видів навантаження на вигляд V-подібних характеристик.
3. Перезбудження та недозбудження СГ.

Література: [1-2].

Практичне заняття 14

Тема – Характеристики генераторів постійного струму.

Мета – Оволодіти основними електричними величинами генератора постійного струму.

Питання для обговорення:

1. Струм якоря, струм збудження, номінальний струм.
2. Втрати в генераторах постійного струму.
3. Основні характеристики генераторів.

Література: [1-2].

Практичне заняття 15

Тема – Характеристики двигунів постійного струму.

Мета – Оволодіти основними електричними величинами двигуна постійного струму.

Питання для обговорення:

1. Струм якоря, струм збудження, номінальний струм.
2. Втрати в двигунах постійного струму.
3. Основні характеристики двигунів.

Література: [1-2].

7. Тематика лабораторних занять

Модуль 1

Лабораторне заняття 1

Тема – Дослідження активного двополюсника.

Мета – дослідження режимів роботи та вольт-амперних характеристик активних двополюсників.

Питання для обговорення:

1. Режими роботи активного двополюсника.
2. ВАХ активного двополюсника.
3. Еквівалентний генератор.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 2

Тема – Дослідження усталеного режиму кола синусоїдного струму при послідовному сполученні елементів.

Мета – Вивчення особливостей електричних кіл з джерелами змінного струму, а саме: особливостей вимірювання амплітудних і діючих значень напруги і струмів, їх частоти й зміщення фаз між двома сигналами з використанням осцилографа; особливостей послідовного з'єднання джерел напруги й паралельного з'єднання джерел струму при різних початкових фазах; особливостей вимірювання потужності в колах змінного струму з активним і реактивним навантаженням.

Питання для обговорення:

1. Фізична суть резонансу струмів в електричному колі. Шляхи досягнення резонансу струмів в електричному колі.
2. Залежність величини струмів від параметрів реактивних елементів електричного кола при резонансі струмів.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 3

Тема – Дослідження трифазного електричного кола при з'єднанні приймачів зіркою.

Мета – Аналіз властивостей і взаємозв'язків між струмами та напругами в симетричних трифазних електричних колах. Ознайомлення із методами вимірювання параметрів трифазної системи і побудова векторних діаграм.

Питання для обговорення:

1. Суть термінів: «фаза», «симетричне трифазне коло», «лінійний струм», «фазний струм», «нейтраль».
2. Визначення кутових співвідношень між фазними струмами та напругами.
3. Обчислення потужності, що споживається симетричним трифазним навантаженням при з'єднанні опорів у «зірку».

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 4

Тема – Вивчення часових характеристик чотирьохполюсника

Мета – вивчення часових характеристик найпростіших чотирьохполюсників та взаємозв'язку між їх часовими і частотними характеристиками. В результаті вивчення роботи студенти повинні оволодіти досвідом використання інтегруючих і диференціюючих ланок для зміни часових параметрів імпульсних сигналів.

Питання для обговорення:

1. Суть явищ інтегрування і диференціювання схемами фільтрів нижніх і верхніх частот.
2. Зміна форми імпульсу на виході фільтра верхніх частот при зміні частоти зрізу.
3. Зміна форми імпульсу на виході фільтра нижніх частот при зміні частоти зрізу.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 5

Тема – Дослідження перехідних процесів в RC і RL колах.

Мета – дослідження перехідних процесів, при заряді і розряді конденсатора, при ввімкненні індуктивної котушки і конденсатора у коло постійного струму.

Питання для обговорення:

1. Закони комутації.
2. Визначення постійної часу τ кола за параметрами R, L, C.
3. Визначення постійної часу кола по експериментальній залежності $u(t)$ чи $i(t)$.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 6

Тема – Дослідження електричних кіл з несинусоїдним джерелом живлення.

Мета – дослідження кола несинусоїдного струму з реактивними елементами і оволодіння методикою розрахунку кіл несинусоїдного струму.

Питання для обговорення:

1. Причини, які зумовлюють несинусоїдність напруг та струмів.
2. Залежність опору резистора, індуктивності та ємності від порядку гармоніки струму.
3. Методи розрахунку несинусоїдних кіл?

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 7

Тема – Дослідження електричного кола з розподіленими параметрами.

Мета – дослідження режимів роботи довгих ліній.

Питання для обговорення:

1. Поняття довгої лінії.
2. Основні параметри (повздовжні та поперечні) довгих ліній.
3. Параметри ліній без втрат.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 8

Тема – Дослідження електричних фільтрів.

Мета – до вивчення основних властивостей і частотних характеристик фільтрів низьких та високих частот.

Питання для обговорення:

1. Визначення частотного фільтра.
2. Класифікація частотних фільтрів?
3. Зміна коефіцієнта згасання та фаза ФНЧ в залежності від частоти.
5. Узгодження частоти ФВЧ з навантаженням.

Література: [1-3].

Модуль 2

Лабораторне заняття 9

Тема – Дослідження однофазного трансформатора.

Мета – Навчитись складати електричні кола, зняти основні характеристики трансформатора.

Питання для обговорення:

1. Дослід холостого ходу.
2. Дослід короткого замикання.
3. Зовнішні характеристики.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 10

Тема – Дослідження трифазного трансформатора.

Мета – Навчитись складати електричні кола, зняти основні характеристики трифазного трансформатора, засвоїти схеми і групи з'єднань обмоток.

Питання для обговорення:

1. Вимірювання лінійних та фазних напруг при різних з'єднаннях обмоток.
2. Зовнішні характеристики трифазного трансформатора.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 11

Тема – Дослідження трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором.

Мета – Ознайомитись з конструкцією асинхронного двигуна з фазним ротором, вміти знаходити початки і кінці фаз обмотки статора, здійснити пуск та регулювання швидкості обертання шляхом зміни опору кола ротора.

Питання для обговорення:

1. Конструкція фазного ротора.
2. Методика визначення початків і кінців обмотки статора.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 12

Тема – Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Мета – Ознайомитись з конструкцією асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, вміти знаходити початки і кінці фаз обмотки статора, здійснити пуск та навантаження двигуна, побудувати механічну характеристику.

Питання для обговорення:

1. Конструкція короткозамкненого ротора.
2. Види навантажувальних моментів.
3. Втрати в двигуні.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 13

Тема – Дослідження трифазного явнополюсного синхронного генератора, що працює на автономне навантаження.

Мета – вивчення будови трифазного явнополюсного синхронного генератора, зняття основних характеристик генератора при його роботі на автономне навантаження.

Питання для обговорення:

1. Конструкція синхронного генератора.
2. Дослід холостого ходу, зовнішня характеристика, характеристика короткого замикання.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 14

Тема – Дослідження генератора постійного струму паралельного збудження.

Мета – вивчити будову і принцип роботи електричної машини постійного струму. Провести дослідження машини постійного струму в режимі генератора. Зняти основні характеристики генератора постійного струму паралельного збудження.

Питання для обговорення:

1. Характеристика холостого ходу. Зовнішня характеристика.
2. Регульовальна характеристика.

Література: [1-3].

Лабораторне заняття 15

Тема – Дослідження двигуна постійного струму паралельного збудження.

Мета – ознайомлення з будовою двигуна постійного струму, вивчення правил пуску, зупинки, реверсу і регулювання швидкості обертання; зняття основних характеристик двигуна постійного струму.

Питання для обговорення:

1. Механічна характеристика.
2. Швидкісна характеристика.
3. Способи пуску.

Література: [1-3].

8. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	
		денна	заочна
1	Тема 1. Лінійні електричні кола постійного та змінного струму Література: [1-13].	10	20
2	Тема 2. Трифазні кола Література: [1-13].	10	20
3	Тема 3. Моделювання чотириполюсників Література: [1-13].	10	15
4	Тема 4. Перехідні процеси в лінійних електричних колах Література: [1-13].	10	20
5	Тема 5. Електричні кола несинусоїдного струму Література: [1-13].	5	15
6	Тема 6. Магнітні кола Література: [1-13].	10	15
7	Тема 7. Трансформатори Література: [1-13].	10	20
8	Тема 8. Асинхронні машини Література: [1-13].	10	20
9	Тема 9. Синхронні машини Література: [1-13].	10	15
10	Тема 10. Машини постійного струму Література: [1-13].	10	18
11	КПЗ. Розрахунок електричних кіл в системах автомобіля (на конкретних прикладах) Література: [1-13].	10	10
	Всього	105	188

Самостійна робота здобувачів освіти з дисципліни «Електротехніка» включає наступні форми:

- опрацювання теоретичних основ лекційного матеріалу;
- виконання завдань, передбачених на самостійне вивчення дисципліни;
- систематизація вивченого матеріалу перед написанням модульної роботи;
- підготовка до поточного та підсумкового контролю.

9. Комплексне практичне індивідуальне завдання

Комплексне практичне індивідуальне завдання з дисципліни «Електротехніка» виконується упродовж семестру. Виконання його є обов'язковою умовою успішного вивчення курсу та отримання позитивної оцінки.

Метою виконання індивідуального завдання є оволодіння навичками розрахунку електричних кіл та модуляції сигналів. Індивідуальне завдання захищається під час семестру у години, виділені для індивідуальної роботи. При виконанні та оформленні індивідуального завдання студент може використовувати наявну базу службової документації із кафедральної лабораторії, законодавчу базу, інтернет-ресурси. Метою виконання КПЗ розвиток навичок самостійної роботи, систематизація знань, поглиблене вивчення інформаційних систем, узагальнення класифікаційних ознак, закріплення теоретичних знань та практичне застосування знань студента з навчального курсу; при його виконанні та оформленні студент використовує комп'ютерну техніку.

КПЗ оцінюється за 100-бальною шкалою. Виконання КПЗ є одним із обов'язкових складових модулів залікового кредиту.

Завдання КПЗ з дисципліни «Електротехніка»: Розрахунок електричних кіл в системах автомобіля (на конкретних прикладах)

10. Тренінги з дисципліни – не передбачено

11. Критерії, форми поточного та підсумкового контролю

Підсумкова оцінка (за 100-бальною шкалою) з навчальної дисципліни «Електротехніка» розраховується як середньозважена з оцінок, отриманих за залікові модулі, включаючи екзаменаційну:

	Поточний контроль	Модульний контроль		Заліковий модуль 4 (оцінка за ІЗ/КПЗ)	Підсумковий контроль	Підсумкова оцінка
	Заліковий модуль 1	Заліковий модуль 2	Заліковий модуль 3		Екзамен	
Вагові коефіцієнти	20%	15%	15%	10%	40%	100%
Максимальна кількість балів (за 100 бальною шкалою)	100	100	100	100	100	100

Шкала оцінювання:

Бали за шкалою Університету	За шкалою ЄКТС	За державною (національною) шкалою	Критерії оцінювання знань
		екзамен, практична підготовка, КПЗ	
90-100	А (відмінно)	відмінно	здобувач освіти вільно володіє програмним обсягом матеріалу, виявляє і демонструє особисті творчі здібності, вміє самостійно здобувати нові знання, демонструє ґрунтовні знання, вміння та практичні навички; без допомоги викладача знаходить та опрацьовує необхідну інформацію, використовує набуті знання і вміння для прийняття рішень у нестандартних ситуаціях, переконливо аргументує відповіді, використовує методи наукового обґрунтування власних рішень, самостійно розкриває власні обдарування й нахили
85-89	В (дуже добре)	добре	здобувач освіти вільно володіє програмним обсягом матеріалу, застосовує його на практиці, вільно розв'язує вправи і задачі у стандартних ситуаціях, самостійно виправляє допущені помилки, кількість яких є незначною, обґрунтовує та аргументує свою думку
75-84	С (добре)		здобувач освіти вміє: зіставляти, узагальнювати, систематизувати інформацію під керівництвом викладача, в цілому, самостійно застосовувати її на практиці; контролювати власну діяльність; виправляти помилки, серед яких є суттєві; добирати окремі аргументи для підтвердження своїх думок
65-74	Д (задовільно)	задовільно	здобувач освіти відтворює значну частину теоретичного матеріалу, демонструє знання і розуміння основних положень з допомогою викладача; поверхнево відтворює і аналізує навчальний матеріал, виправляє помилки, серед яких є значна кількість суттєвих

60-64	Е (достатньо)		здобувач освіти володіє навчальним матеріалом на рівні, вищому за початковий, значну його частину відтворює на репродуктивному рівні або володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу
35-59	FX (недостатньо з можливістю повторного складання)	незадовільно	здобувач освіти володіє матеріалом на рівні окремих фрагментів, що становлять незначну частину навчального матеріалу
0-34	F (незадовільно з обов'язковим повторним курсом)		здобувач освіти володіє матеріалом на рівні елементарного розпізнавання і відтворення окремих фактів, елементів, об'єктів

12. Інструменти, обладнання та програмне забезпечення, використання яких передбачає навчальна дисципліна

№	Найменування	Номер теми
1.	Мультимедійний проектор, комп'ютер, програмне забезпечення Microsoft PowerPoint, Electronics Workbench, навчальна платформа Moodle	1-10
2.	Універсальний лабораторний стенд «УЛС ЛПІ», лабораторія електричних машин	1-10

13. Методичне забезпечення

1. Електронний засіб навчального призначення: Електротехніка.
<https://mdl.lntu.edu.ua/course/view.php?id=7854>.

2. Селепина Й. Р. Теорія електричних кіл і сигналів : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Електроніка» галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спец. 171 Електроніка та 172 Електронні комунікації та радіотехніка денної та заоч. форм навч. Луцьк: ЛНТУ, 2023. 248 с.

3. Селепина Й. Р., Якимчук Н. М. Теорія електричних кіл і сигналів. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка. Луцьк: ЛНТУ, 2022. 140 с.

14. Рекомендована література

Базова

1. Белікова Л. Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Одеса: Наука і техніка, 2022. 478 с.

2. Гайденок Ю. А. Електричні машини. Курс лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с.

3. Горєв В. М. Теорія електричних кіл та сигналів. Частина II. Навчальний посібник. Дніпро: Дніпровська політехніка, 2021. 107 с.

4. Горєв В. М. Теорія електричних кіл та сигналів. Частина I. Навчальний посібник. Дніпро: Дніпровська політехніка, 2021. 104 с.

5. Захаров І. П., Милютченко І. О. Основи аналізу лінійних електричних кіл: навч. посіб. Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків: ХНУРЕ, 2021. 102 с.

6. Матвієнко М. П. Основи електротехніки та електроніки. К: Ліра, 2024. 506 с.

Допоміжна

7. Muthusubramanian R., Salivahanan S. Basic Electrical and Electronics Engineering. 2nd Edition. Mc MAG Hill. 2024. 386 p.
8. Mehta, V.K., and Rohit Mehta. Basic Electrical Engineering. Revised 2nd ed., S. Chand Publishing, 2023. 433 p.
9. Лишук В. В., Євсюк М. М., Селепина Й. Р., Мороз С. А., Літковець С. П. Імпульсно-фазове керування в електротехнічних пристроях. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. №41, 2021, с. 65-71.
10. Лишук В. В., Євсюк М. М., Приступа С. О., Селепина Й. Р., Якимчук Н. М. Математична модель напівпровідникового перетворювача АС-DC. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. №47, 2022, с.105-110.
11. Prystupa, A. Tkachuk, Y. Selepyna, S. Moroz, I. Vynnychenko and O. Zabolotnyi. Distribution of the Surface Current Density in the Plate of a Quartz Resonator. 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2024, pp. 1-6.
12. Lyshuk, V., Tchaban, V., Tkachuk, A., Zablotskyi, V., & Selepyna, Y. (2024). Electromagnetic Field Equations in Nonlinear Environment. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 14(1), 11-16.
13. Lyshuk, V., Moroz, S., Selepyna, Y., Zablotskyi, V., Yevsiuk, M., Satsyk, V., & Tkachuk, A. (2025). Modeling dynamic and static operating modes of a low-power asynchronous electric drive. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 15(2), 118-123.

Інформаційні ресурси

14. Програмне забезпечення Electronics Workbench (демонстраційна навчальна безкоштовна версія) URL: <https://www.ni.com/pl-pl/shop/electronic-test-instrumentation/application-software-for-electronic-test-and-instrumentation-category/what-is-multisim.html> (дата звернення 25.05.2025р).

Методичні вказівки до вивчення розділів курсу

1. Вступ

Зміст і структура предмету «Електротехніка». Значення електротехнічної підготовки фахівців для неелектротехнічних спеціальностей. Електрична енергія, її особливості, галузь застосування. Історичний нарис розвитку електротехніки як науки. Основні закони електричних кіл. Шляхи раціонального використання і економії електричної енергії.

Література: [1,с.5-10; 2,с.5-16; 3,с.5-11; 4,с.7-21.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Під час вивчення вступу до дисципліни «Електротехніка» необхідно звернути увагу на універсальні властивості електричної енергії, її переваги над іншими видами енергії. Варто звернути увагу на вклад українських і російських вчених у розвиток електротехніки як науки.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати структуру курсу електротехніки та його зв'язок з іншими дисциплінами, основні етапи розвитку електротехніки, шляхи раціонального використання електричної енергії.

—Розуміти необхідність прискореного пониження питомих витрат електричної енергії.

—Вміти обґрунтувати значення робіт українських і російських вчених у розвитку електротехніки як науки, накреслити план основних заходів з економії електричної енергії на виробництві та побуті.

Запитання для самоконтролю

—Накресліть заступну схему електричного кола, що складається з джерела живлення, приймача і з'єднувальних провідників.

—Яка відмінність електричного кола від його заступної схеми?

—Назвіть приклади використання електротехнічних пристроїв як елементів кіл постійного струму.

—Що таке двополюсник?

—Що таке заступна схема електричного кола?

—Напишіть закон Ома для повного кола.

—Сформулюйте перший і другий закони Кірхгофа

—Як записати баланс потужності електричного кола?

—Назвіть основні закони електричних кіл.

—Що називають електричним колом?

—Що таке електрорушійна сила?

—Що таке опір і провідність провідника? Як ці величини залежать від розмірів провідника?

—Що таке густина електричного струму? В яких одиницях вона вимірюється?

—Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.

—Що таке потужність джерела та приймача електричної енергії?

—Як визначають внутрішній опір джерела та приймача електричної енергії?

—Яке співвідношення між ЕРС і напругою на затискачах джерела?

2 Електричні кола постійного струму

Нерозгалужені та розгалужені лінійні електричні кола з одним джерелом живлення. Умовно додані напрями електричних величин на заступних схемах електричних кіл. Пасивні та активні двополюсники, їх режими роботи. Енергетичні співвідношення в електричних колах.

Розрахунок електричних кіл постійного струму з багатьма джерелами живлення методами законів Кірхгофа, контурних струмів, вузлової напруги, накладання та еквівалентного генератора.

Нелінійні електричні кола постійного струму. Параметри та характеристики нелінійних елементів. Графічні методи розрахунку нерозгалужених і розгалужених електричних кіл із нелінійними резистивними елементами.

Література: [1,с.10-55; 2,с.17-60; 3,с.55-89; 4,с.7-33; 5,с.31-70.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

На початку вивчення цього розділу необхідно згадати основні визначення та закони електричних кіл, які є фундаментальними законами електротехніки.

Основну увагу необхідно приділити методам розрахунку електричних кіл.

Визначення струмів в електричних колах з одним джерелом живлення проводиться методом перетворення електричного кола. Суть його полягає в тому, що шляхом заміни окремих пасивних елементів еквівалентними елементами коло перетворюється до

найпростішого з одним еквівалентним елементом. Струм у такому колі визначається за законом Ома і дорівнює струму у нерозгалуженій частині початкового електричного кола. Далі визначають струми у всіх вітках, попередньо навчившись визначати еквівалентний опір ділянок кола з послідовно та паралельно з'єднаними резисторами. Також необхідно вміти здійснювати перетворення з'єднання резисторів зіркою в трикутник і навпаки.

Для розрахунку розгалужених електричних кіл з багатьма джерелами живлення використовують декілька методів. Найбільш загальним серед них є метод безпосереднього використання законів Кірхгофа, яким можна розрахувати електричне коло будь-якої складності. Суть методу полягає в тому, що для визначення струмів в електричному колі, яке має n віток і k вузлів, записують і розв'язують систему з n рівнянь. Число рівнянь, записаних за першим законом Кірхгофа, дорівнює $k-1$, за другим – $n-(k-1)$. При вивченні цього методу необхідно звернути особливу увагу на визначення вузлів і віток у схемі електричного кола, напрямку струмів, вибору незалежних контурів і запису рівнянь за законами Кірхгофа.

Інші методи (контурних струмів, вузлових напруг, накладання та еквівалентного генератора) розрахунку електричних кіл також ґрунтуються на законах Ома і Кірхгофа. Однак у різних часткових випадках вказані методи дають можливість отримати більш прості рівняння або зменшити їх число.

Для закріплення знань необхідно самостійно розв'язати декілька тестових задач, наведених у методичних рекомендаціях, та відповісти на запитання для самоконтролю.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Розуміти суть еквівалентних перетворень у лінійних електричних колах.

—Вміти записати рівняння за законами Кірхгофа для вузлів і контурів складних електричних кіл з метою визначення струмів у вітках; використовувати методи контурних струмів, вузлової напруги, накладання та еквівалентного генератора для розрахунку лінійних електричних кіл

Запитання для самоконтролю

—Яку кількість рівнянь записують за першим і другим законами Кірхгофа для визначення струмів у вітках електричного кола?

—За якими формулами визначають еквівалентний опір при послідовному, паралельному і мішаному з'єднанні резисторів?

—Які переваги методу контурних струмів порівняно з іншими методами розрахунку електричних кіл?

—Що називають вузлом, віткою та контуром електричного кола?

—Як визначають знаки членів рівнянь, написаних за першим і другим законами Кірхгофа?

—Яке з'єднання елементів електричного кола називають послідовним? Основні властивості послідовного з'єднання.

—Чи зміниться режим роботи електричного кола, якщо при послідовному з'єднанні поміняти місцями його елементи?

—Як за напрямками ЕРС і струмів визначають джерела та споживачі електричного кола?

—Яке з'єднання елементів електричного кола називають паралельним? Основні властивості паралельного з'єднання.

—За якими формулами визначають еквівалентний опір при послідовному та паралельному з'єднанні елементів електричного кола?

—Який режим роботи електричного кола називають номінальним?

—Назвіть основні особливості режимів неробочого ходу та короткого замикання.

—Який режим роботи електричного кола називають узгодженим?

—Як розподіляються потужності при послідовному з'єднанні резисторів?

—Як розподіляються струми у вітках при паралельному з'єднанні кількох резисторів?

—Які елементи електричного кола називають нелінійними? Назвіть приклади нелінійних елементів.

—Які електричні кола називають лінійними та нелінійними?

—Що називають вольтамперною характеристикою елемента електричного кола і який вигляд вона має для лінійного та нелінійного елементів?

—Як визначають за вольтамперною характеристикою статичний і диференціальний опори нелінійного елемента?

—Які нелінійні елементи називають симетричними, які – несиметричними?

—Чому для розрахунку нелінійних електричних кіл не можна використовувати принцип накладання для струмів і напруг?

- Як побудувати вольтамперні характеристики кола при паралельному, послідовному та мішаному з'єднаннях нелінійних елементів за відомими вольтамперними характеристиками окремих елементів?
- Які методи розрахунку нелінійних кіл постійного струму відомі Вам?
- Чи можуть статичний і диференціальний опори нелінійного елемента мати від'ємні значення?
- Скільки рівнянь необхідно записати за першим і другим законами Кірхгофа при розв'язуванні задач методом законів Кірхгофа?
- У чому полягає суть методу накладання?
- У яких випадках доцільно використовувати метод вузлових напруг?
- Коли доцільно використовувати метод контурних струмів?
- Поясніть чим відрізняються між собою ідеальні джерела ЕРС і струму.
- Поясніть чому для електричного кола, що має q вузлів, можна записати за першим законом Кірхгофа тільки $q - 1$ незалежних рівнянь.
- Чи можна для контура, що має тільки пасивні елементи, написати рівняння за другим законом Кірхгофа?

Тестові задачі до розділу «Електричні кола постійного струму»

2.1. Враховуючи величину поверхні охолодження (за рівних інших умов), який із провідників можна навантажити більше: круглий перерізом 50 мм^2 чи прямокутний розміром $5 \times 10 \text{ мм}$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. Прямокутний. 2. Круглий. 3. Інша відповідь.

2.2. При струмі 2 А напруга між затискачами акумулятора дорівнювала $2,1 \text{ В}$, а при струмі 4 А — 2 В . Визначити ЕРС джерела E , внутрішній опір R_0 і струм короткого замикання I_k за умови, що ЕРС і внутрішній опір джерела не залежать від навантаження.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $E = 2 \text{ В}$; $R_0 = 0,4 \text{ Ом}$; $I_k = 40 \text{ А}$.
2. $E = 2,2 \text{ В}$; $R_0 = 0,05 \text{ Ом}$; $I_k = 44 \text{ А}$.
3. $E = 2,4 \text{ В}$; $R_0 = 0,06 \text{ Ом}$; $I_k = 45 \text{ А}$.
4. $E = 2,6 \text{ В}$; $R_0 = 0,08 \text{ Ом}$; $I_k = 40 \text{ А}$.
5. $E = 2,5 \text{ В}$; $R_0 = 0,07 \text{ Ом}$; $I_k = 42 \text{ А}$.

2.3. Визначити діаметр d і довжину l ніхромового провідника для нагрівального елемента електричного чайника (220 В , $2,5 \text{ А}$) при густині струму $j = 7,5 \text{ А/мм}^2$ та питомому опорі ніхрому $\rho = 1,25 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ у нагрітому стані.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $d = 0,24 \text{ мм}$; $l = 21 \text{ м}$.
2. $d = 0,34 \text{ мм}$; $l = 22 \text{ м}$.
3. $d = 0,64 \text{ мм}$; $l = 23,2 \text{ м}$.
4. $d = 0,44 \text{ мм}$; $l = 24,2 \text{ м}$.
5. $d = 0,54 \text{ мм}$; $l = 25,2 \text{ м}$.

2.4. Декоративні електричні лампи потужністю $P = 2 \text{ Вт}$ і напругою $U = 6 \text{ В}$ використовують для ялинкової гірлянди. Яку мінімальну кількість n ламп необхідно взяти, якщо гірлянду під'єднують до напруги 220 В , і який струм I буде протікати через гірлянду?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $n = 34$; $I = 0,1 \text{ А}$.
2. $n = 35$; $I = 0,23 \text{ А}$.
3. $n = 36$; $I = 0,3 \text{ А}$.
4. $n = 37$; $I = 0,33 \text{ А}$.
5. $n = 38$; $I = 0,4 \text{ А}$.

2.5. Щоб переконатися, що напруга мережі дорівнює 220 В , потрібно послідовно ввімкнути два вольтметри з номінальною напругою 150 В і внутрішніми опорами $R_1 = 30 \text{ кОм}$, $R_2 = 14 \text{ кОм}$. Визначити покази кожного вольтметра.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $U_1 = 110 \text{ В}$; $U_2 = 110 \text{ В}$.
2. $U_1 = 120 \text{ В}$; $U_2 = 100 \text{ В}$.
3. $U_1 = 130 \text{ В}$; $U_2 = 90 \text{ В}$.
4. $U_1 = 140 \text{ В}$; $U_2 = 80 \text{ В}$.
5. $U_1 = 150 \text{ В}$; $U_2 = 70 \text{ В}$.

2.6. Електрична лампа та вольтметр мають однакові номінальні напруги і опори. У якому випадку лампа буде світити яскравіше: при послідовному чи паралельному їх увімкненні в мережу?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. При паралельному. 2. При послідовному. 3. Інша відповідь.

3. Однофазні електричні кола синусоїдного струму

Генерування синусоїдної ЕРС. Основні параметри, що характеризують синусоїдну електричну величину. Представлення синусоїдних електричних величин часовими діаграмами та векторами.

Резистор, ідеальна котушка індуктивності та конденсатор у колі змінного струму. Фазові співвідношення між струмами та напругами на елементах. Активний, індуктивний та ємнісний опори. Часові діаграми напруг, струмів і потужності. Аналіз електричних кіл синусоїдного струму з послідовним з'єднанням елементів. Активний, реактивний і повний опори. Трикутники опорів та потужностей. Фазові співвідношення між струмом та напругами. Резонанс напруг.

Електричні кола синусоїдного струму з паралельним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного елементів. Графо-аналітичний метод та метод провідностей розрахунку електричних кіл синусоїдного струму. Резонанс струмів. Коефіцієнт потужності та його вплив на економічні показники енергосистеми. Компенсація реактивної потужності.

Основні положення комплексного методу розрахунку електричних кіл синусоїдного струму. Зображення синусоїдних ЕРС, напруг і струмів та повного опору і провідності комплексними числами. Основні закони та потужність електричного кола в комплексній формі.

Література: [1, с. 60-122; 2, с. 61-104; 3, с. 151-217; 4, с. 40-103; 5, с. 71-147;]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

При вивченні цієї теми необхідно зрозуміти фізичний зміст явищ, що відбуваються в електричних колах змінного струму, знати чим обумовлені індуктивний та ємнісний опори, а також відмінність між омичним опором кола постійного струму і активним опором кола змінного струму.

При зображенні синусоїдно змінних ЕРС, напруг і струмів за допомогою векторів беруть вектори, довжина яких у заданому масштабі відповідає амплітудним значенням цих величин. Необхідно уявити собі, що ці вектори обертаються відносно початку координат з однаковою кутовою швидкістю, а тому взаємне розміщення векторів при цьому не змінюється. За додатній напрям обертання приймають обертання проти годинникової стрілки. Дійсним значенням ЕРС, напруг і струмів у будь-який момент часу відповідають проекції цих векторів на вісь ординат. Зображені на векторних діаграмах вектори можна розглядати як «заморожені» їх положення в один із моментів часу.

Вивчення розділу необхідно почати з найпростіших кіл із резистивним, індуктивним та ємнісним елементами. Добре засвоїти фазові співвідношення між струмами та напругами елементів. Усвідомити зміст понять про активний, індуктивний та ємнісний опори, що полегшить вивчення процесів і розуміння співвідношень між струмами та напругами у більш складних колах.

При вивченні кіл з послідовним і паралельним з'єднанням елементів особливу увагу рекомендується звернути на запис рівнянь електричної рівноваги кола, визначення повних опорів і провідностей та побудову векторних діаграм.

У розгалужених і нерозгалужених електричних колах синусоїдного струму може виникнути явище резонансу струмів і напруг. Варто звернути увагу на те, що при резонансних явищах напруга на затискачах кола та струм співпадають за фазою, що забезпечує повну компенсацію реактивної потужності у промислових установках.

Вивчення питань, що стосуються потужності в колах змінного струму, ускладнюються розумінням реактивної та повної потужності. Реактивна потужність фізично характеризує процес обміну енергією між джерелом електричної енергії і споживачем. Варто зазначити, що для кіл з індуктивним характером реактивна енергія додатня, а для кіл з ємнісним характером – від'ємна. Переважно наявність реактивної енергії в електричних колах є не бажаною, оскільки вона завантажує кола без корисного ефекту. Тому зазвичай від реактивної потужності прагнуть у міру можливого позбутись.

Повна потужність також є важливим показником електричної системи. Незважаючи на те, що активна потужність менша за повну, електричні кола розраховують за повною потужністю. Отже переріз провідників і обмоток визначають за повним струмом.

Для практичних розрахунків зручно зображати вектори струму та напруги, а також опори і провідності комплексними числами, у яких активні складові є дійсними величинами, а реактивні – уявними. Зображення синусоїдних величин та опорів комплексними числами дає можливість використати всі методи розрахунку лінійних електричних кіл постійного струму для розрахунку складних кіл синусоїдного струму.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати зміст термінів: активний, індуктивний, ємнісний та повний опори; початкова фаза; кут зсуву за фазою; активна, реактивна та повна потужності; миттєве, діюче та середнє значення синусоїдної величини; активна, реактивна та повна потужності.

—Розуміти особливості електромагнітних процесів та енергетичні співвідношення в електричних колах синусоїдного струму, економічне значення коефіцієнта потужності, суть явищ резонансів напруг і струмів та умови їх виникнення.

—Вміти записати рівняння електричної рівноваги лінійних електричних кіл; визначати струми, напруги та їх фазові співвідношення на ділянках електричного кола за відомими прикладеною напругою та величинами опорів; будувати топографічні векторні діаграми струму та напруги для розгалужених і нерозгалужених електричних кіл синусоїдного струму.

Запитання для самоконтролю

- Який змінний струм називають синусоїдним?
- Як можна отримати синусоїдну ЕРС?
- Які величини необхідно знати, щоб записати миттєве значення синусоїдної ЕРС?
- Як зображають синусоїдні величини у вигляді векторів?
- Що таке векторна діаграма?
- Як визначають кути нахилу векторів на векторній діаграмі?
- Що називають діючим і середнім значенням синусоїдного струму?
- Як середнє і діюче значення синусоїдного струму пов'язане з амплітудним значенням?
- Що таке індуктивний опір та за якою формулою він визначається?
- За якою формулою визначають ємнісний опір?
- За якими формулами визначають активну, реактивну та повну потужності?
- Що таке повний опір електричного кола?
- Які фазові співвідношення між векторами напруги і струму при активному, індуктивному та ємнісному навантаженні?
- Які потужності називають активною та реактивною?
- За якими формулами визначають активну, реактивну та повну провідності?
- За яких умов виникає резонанс напруг?
- За допомогою яких приладів і за якими ознаками можна визначити настання резонансу напруг?
- Яким способами можна досягти резонанс напруг?
- Чим небезпечний резонанс напруг?
- За яких умов настає резонанс струмів?
- Якими приладами та за якими ознаками можна експериментально визначити настання резонансу струмів?
- Якими способами можна досягти резонанс струмів?
- Де використовують явище резонансу струмів?
- За показами яких приладів і як можна обчислити параметри R, X_L, X_C, C ?
- За якими формулами визначають резонансну частоту для резонансів напруг і струмів?
- Чому дорівнює коефіцієнт потужності при резонансі.
- При яких з'єднаннях реактивних елементів можливі резонанси напруг і струмів?
- Поясніть побудову векторних діаграм напруг і струмів для електричного кола з послідовним та паралельним з'єднанням елементів R, L, C .
- Назвіть форми запису комплексних чисел.
- Сформулюйте правила додавання, віднімання, ділення та множення комплексних чисел.
- Доведіть, що синусоїдні величини можна зображати комплексними числами.
- Запишіть у комплексній формі вирази для активного, індуктивного та ємнісного опорів.
- За якою формулою визначають повний опір у комплексній формі для послідовного з'єднання елементів R, X_L, X_C ?
- Запишіть закони Ома та Кірхгофа в комплексній формі.
- За якою формулою визначають потужність у комплексній формі?

—Побудуйте вектори напруги $\dot{U}$ та струму $\dot{I}$, зсунені між собою за фазою ($\varphi > 0$ або $\varphi < 0$). Розкладіть обидва вектори на активну і реактивну складові.

—Поясніть, чому вмикання у коло постійного струму конденсатора рівнозначне розриву кола, а в електричному колі змінного струму через ємність протікає струм.

Тестові задачі до розділу «Однофазні електричні кола синусоїдного струму»

3.1. Потужність електричної лампи, що ввімкнена в мережу змінної напруги $U = 220\text{ В}$, дорівнює 75 Вт .

Визначити струм лампи, опір і енергію, що споживається нею за 2 години роботи.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I = 0,34\text{ А}$; $R = 647\text{ Ом}$; $W = 150\text{ Вт} \cdot \text{год}$.
2. $I = 0,3\text{ А}$; $R = 650\text{ Ом}$; $W = 140\text{ Вт} \cdot \text{год}$.
3. $I = 0,25\text{ А}$; $R = 655\text{ Ом}$; $W = 145\text{ Вт} \cdot \text{год}$.
4. $I = 0,35\text{ А}$; $R = 645\text{ Ом}$; $W = 155\text{ Вт} \cdot \text{год}$.
5. $I = 0,4\text{ А}$; $R = 640\text{ Ом}$; $W = 160\text{ Вт} \cdot \text{год}$.

3.2. Визначити ємність C конденсатора для отримання реактивної ємнісної потужності $Q_c = 110\text{ ВАр}$ при напрузі $U = 220\text{ В}$ та частоті $f = 50\text{ Гц}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $7,0 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$.
2. $7,24 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$.
3. $6,24 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$.
4. $7,5 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$.
5. $8,2 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$.

3.3. При вмиканні котушки індуктивності в мережу постійної напруги $U_{\square} = 12\text{ В}$ по ній протікає струм $I_{\square} = 0,5\text{ А}$. Якщо ввімкнути цю котушку в мережу змінної напруги $U_{\square} = 100\text{ В}$, $f = 50\text{ Гц}$ через неї протікає струм $I_{\square} = 2\text{ А}$. Визначити параметри котушки, активну та повну потужності.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $R = 18\text{ Ом}$; $L = 0,11\text{ Гн}$; $P = 86\text{ Вт}$; $S = 180\text{ Вт}$.
2. $R = 20\text{ Ом}$; $L = 0,2\text{ Гн}$; $P = 76\text{ Вт}$; $S = 190\text{ Вт}$.
3. $R = 24\text{ Ом}$; $L = 0,1397\text{ Гн}$; $P = 96\text{ Вт}$; $S = 200\text{ Вт}$.
4. $R = 26\text{ Ом}$; $L = 0,2397\text{ Гн}$; $P = 95\text{ Вт}$; $S = 210\text{ Вт}$.
5. $R = 30\text{ Ом}$; $L = 0,33\text{ Гн}$; $P = 90\text{ Вт}$; $S = 220\text{ Вт}$.

3.4. Визначити параметри котушки індуктивності (активний опір R та індуктивність L) ввімкненої у мережу змінної напруги частотою $f = 50\text{ Гц}$, якщо вольтметр показує напругу $U = 120\text{ В}$, амперметр – струм $I = 4\text{ А}$, ватметр – потужність $P = 81\text{ Вт}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $R = 6\text{ Ом}$; $L = 0,1\text{ Гн}$.
2. $R = 6,5\text{ Ом}$; $L = 0,2\text{ Гн}$.
3. $R = 7\text{ Ом}$; $L = 0,01\text{ Гн}$.
4. $R = 7,5\text{ Ом}$; $L = 0,0925\text{ Гн}$.
5. $R = 8\text{ Ом}$; $L = 0,02\text{ Гн}$.

3.5. На якій гармоніці можливий резонанс напруг в електричному колі з послідовно з'єднаними R, L, C - елементами ввімкненому на несинусоїдну напругу, якщо для першої гармоніки $R = 10\text{ Ом}$, $X_L = 5\text{ Ом}$, $X_C = 20\text{ Ом}$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. На п'ятій.
2. На четвертій.
3. На третій.
4. На першій.
5. На другій.

3.6. Електричну лампу потужністю $P_{\text{л}} = 75\text{ Вт}$ і напругою $U_{\text{л}} = 150\text{ В}$ необхідно під'єднати до мережі напругою $U = 220\text{ В}$ та частотою $f = 50\text{ Гц}$. Для компенсації частини напруги послідовно з лампою можна ввімкнути конденсатор ємністю C або реостат з опором R_p . Визначити величини ємності C і опору R_p та вказати який спосіб компенсації напруги є кращим.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $C = 9,9 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$; $R_p = 140\text{ Ом}$.
2. $C = 7,9 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$; $R_p = 120\text{ Ом}$.
3. $C = 8,9 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$; $R_p = 110\text{ Ом}$.
4. $C = 6,9 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$; $R_p = 150\text{ Ом}$.
5. $C = 5,9 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$; $R_p = 130\text{ Ом}$.

3.7. Чому контактор, котушка якого розрахована на напругу $U = 220\text{ В}$, може практично нормально працювати при напрузі 127 В , якщо послідовно з котушкою ввімкнути конденсатор відповідної ємності?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. Напруга більша за номінальну.
2. Напруга наближається до номінальної.
3. Напруга дорівнює номінальній.
4. Інші відповіді.

3.8. Визначити активну P , реактивну Q та повну S потужності споживача, що під'єднаний до напруги $u = 220 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ)$, якщо споживаний струм $i = 10 \cdot \sqrt{2} \sin \omega t$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $P = 10\text{ Вт}$; $Q = 1100\text{ ВАр}$; $S = 1100\text{ ВА}$.
2. $P = 1\text{ Вт}$; $Q = 1200\text{ ВАр}$; $S = 1200\text{ ВА}$.
3. $P = 0\text{ Вт}$; $Q = 2200\text{ ВАр}$; $S = 2200\text{ ВА}$.
4. $P = 5\text{ Вт}$; $Q = 3200\text{ ВАр}$; $S = 3200\text{ ВА}$.
5. $P = 4\text{ Вт}$; $Q = 4200\text{ ВАр}$; $S = 4200\text{ ВА}$.

3.9. Визначити активну P , реактивну Q та повну S потужності споживача, що під'єднаний до напруги $u = 311 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$, якщо споживаний струм $i = 14,14 \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $P = 1100\text{ Вт}$; $Q = 1\text{ ВАр}$; $S = 1100\text{ ВА}$.
2. $P = 1200\text{ Вт}$; $Q = 2\text{ ВАр}$; $S = 1200\text{ ВА}$.
3. $P = 3200\text{ Вт}$; $Q = 5\text{ ВАр}$; $S = 3200\text{ ВА}$.
4. $P = 2200\text{ Вт}$; $Q = 0\text{ ВАр}$; $S = 2200\text{ ВА}$.
5. $P = 4200\text{ Вт}$; $Q = 4\text{ ВАр}$; $S = 4200\text{ ВА}$.

3.10. Величини опорів послідовно з'єднаних R, L, C - елементів дорівнюють: $X_L = 12\text{ Ом}$, $X_C = 20\text{ Ом}$. Визначити струм I в електричному колі та напругу живлення U , коли відомо, що спад напруги на конденсаторі $U_C = 100\text{ В}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I = 1\text{ А}$; $U = 10\text{ В}$.
2. $I = 2\text{ А}$; $U = 20\text{ В}$.
3. $I = 3\text{ А}$; $U = 30\text{ В}$.
4. $I = 4\text{ А}$; $U = 40\text{ В}$.
5. $I = 5\text{ А}$; $U = 50\text{ В}$.

4 Трифазні електричні кола

Генерування трифазної ЕРС. Способи з'єднання обмоток генератора. Умовно-додатні напрями ЕРС, напруг і струмів. Розрахунок трифазних кіл при з'єднанні приймачів трикутником.

Трифазні кола при з'єднанні приймачів зіркою з нейтральним та без нейтрального провідника. Визначення потужності при симетричному та несиметричному навантаженні.

Література: [1, с. 123-148; 2, с. 116-152; 3, с. 218-242; 4, с. 104-120; 5, с. 148-166.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Теорія трифазних кіл ґрунтується на теорії однофазних кіл синусоїдного струму, але має ряд особливостей: напруги трифазного генератора зсувені за фазою на кут 120° , співвідношення між напругами та струмами споживача залежать від схеми з'єднання його фаз, параметрів споживача та симетрії трифазної системи. Варто зазначити, що при симетричному навантаженні значення напруг і струмів усіх фаз однакові, а зсув за фазою відносно один одного дорівнює 120° . Тому розрахунок проводиться для однієї фази аналогічно розрахунку звичайного кола однофазного струму. При несиметричному навантаженні трифазне коло необхідно розглядати як розгалужене коло з трьома джерелами живлення і для його розрахунку використовувати методи, що використовуються при розрахунку складних електричних кіл (наприклад метод вузлової напруги). При вивченні матеріалу слід звернути особливу увагу на побудову векторних діаграм при з'єднанні фаз зіркою і трикутником, що дасть можливість більш ґрунтовно засвоїти суть процесів, які протікають у трифазних колах при симетричному та несиметричному навантаженнях.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати визначення трифазних кіл, способи з'єднання фаз генератора та споживача. Співвідношення між фазними та лінійними напругами при з'єднанні фаз зіркою чи трикутником.

—Розуміти схеми передачі електричної енергії за допомогою трифазних три- і чотирипровідних ліній; векторні діаграми напруг і струмів при симетричному та несиметричному навантаженні; роль нейтрального провідника.

—Вміти з'єднувати трифазні приймачі зіркою чи трикутником; аналізувати симетричні та несиметричні режими трифазних кіл; вмикати вимірювальні прилади для вимірювання напруг, струмів, потужності.

Запитання для самоконтролю

- Як практично отримують трифазну систему ЕРС?
- Яке з'єднання трифазних приймачів називають з'єднанням зіркою, трикутником?
- Які напруги в трифазному колі називають фазними, а які лінійними?
- Яке співвідношення в трифазній симетричній системі між фазними і лінійними струмами та напругами для з'єднання споживачів трикутником, зіркою?
- Напишіть вирази для активної, реактивної та повної потужностей трифазної системи для симетричного і несиметричного навантаження при з'єднанні приймачів трикутником.
- Побудуйте векторну діаграму напруг і струмів трифазної системи при з'єднанні приймачів зіркою або трикутником для симетричного та несиметричного навантажень.
- Яке призначення нейтрального провідника?
- Як аналітично та графічно визначити струм у нейтральному провіднику?
- Яке навантаження називають симетричним?
- Чи можна за зовнішнім виглядом визначити нейтральний і лінійний провідники?
- Як зміняться фазні напруги симетричного та несиметричного споживача при вмиканні в коло нейтрального провідника з опором Z_N ?
- Яке співвідношення між величинами фазних і лінійних струмів та напруг для з'єднання приймачів зіркою та симетричному навантаженні?
- Які струми в трифазному колі називають фазними і які – лінійними?
- За якими виразами визначають потужності трифазного кола при з'єднанні приймачів зіркою для симетричного та несиметричного навантажень?
- У скільки разів зміниться величина лінійного струму при перемиканні трьох однакових приймачів із зірки на трикутник?
- Як зміняться фазні струми симетричного трифазного споживача, з'єданого трикутником за умови обриву одного з лінійних або фазних провідників?
- Як аналітично і графічно визначити струм у лінійному провіднику для з'єднання приймачів трикутником?
- Чому в нейтральний провідник не встановлюють запобіжник?
- Чому для симетричного навантаження використовують трипровідну трифазну систему?
- Що таке зміщення нейтральної точки споживача? У яких випадках воно відсутнє?
- Які переваги трифазної системи порівняно з однофазною?
- Чому обрив нейтрального провідника в чотирипровідній трифазній системі є аварійним режимом?
- У скільки разів зміниться величина активної потужності при перемиканні трьох однакових споживачів із зірки на трикутник?
- Які є способи підвищення коефіцієнта потужності трифазного споживача?

Тестові задачі до розділу «Трифазні електричні кола»

4.1. Фазні ЕРС синхронного генератора E_A, E_B, E_C зображені на векторній діаграмі у вигляді симетричної тривекторної зірки, що має однакові довжини векторів і кути 120° між векторами. Написати рівняння для миттєвих значень фазних ЕРС, якщо вектор $\vec{E}_A$ розміщений на горизонтальній осі праворуч. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $e_A = E_m \sin \omega t$; $e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$; $e_C = E_m \sin (\omega t + 120^\circ)$.
2. $e_A = E_m \sin \omega t$; $e_B = E_m \sin (\omega t + 120^\circ)$; $e_C = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$.
3. $e_A = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$; $e_B = E_m \sin \omega t$; $e_C = E_m \sin (\omega t + 120^\circ)$.
4. $e_A = E_m \sin (\omega t + 120^\circ)$; $e_B = E_m \sin \omega t$; $e_C = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$.
5. $e_A = E_m \sin$; $e_B = E_m \sin \omega t$; $e_C = E_m \sin \omega t$.

4.2. У кожній обмотці трифазного генератора індукується ЕРС величиною 220В. Визначити лінійну напругу генератора для з'єднання обмоток трикутником (зіркою).

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 110 В (220 В).
2. 220 В (380 В).
3. 127 В (220 В).
4. 220 В (110 В).
5. 220 В (127 В).

4.3. Відбувся обрив лінійного провідника *a* симетричного трифазного навантаження з'єданого трикутником. Які величини напруг будуть на кожній фазі навантаження, якщо лінійна напруга дорівнювала 220В?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $U_{ca} = U_{ab} = 110$ В; $U_{bc} = 110$ В.
2. $U_{ca} = U_{ab} = 220$ В; $U_{bc} = 110$ В.
3. $U_{ca} = U_{ab} = 110$ В; $U_{bc} = 220$ В.
4. $U_{ca} = U_{ab} = 120$ В; $U_{bc} = 220$ В.
5. $U_{ca} = U_{ab} = 220$ В; $U_{bc} = 220$ В.

4.4. Діюче значення струму в лінії *a* симетричного трифазного споживача, з'єданого зіркою без нульового провідника, дорівнює 20А. Чому дорівнюють струми в лінійних провідниках, якщо відбувся обрив провідника лінії *a*? Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I_a = 20$; $I_b = I_c = 0$.
2. $I_a = 0$; $I_b = I_c = 40$.
3. $I_a = 0$; $I_b = I_c = 20$.
4. $I_a = 0$; $I_b = I_c = 10$ А.
5. $I_a = 10$; $I_b = I_c = 20 \cdot \sqrt{2}$ А.

4.5. До затисків генератора, обмотки якого з'єдані зіркою, з фазною напругою $U_\phi = 220$ В під'єднаний споживач, з'єднаний трикутником, кожна фаза якого має опір $Z_\phi = (8 + j6)$ Ом. Визначити фазні струми генератора. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I_A = I_B = I_C = 6,6$ А; $I_\phi = 3,8$ А.
2. $I_A = I_B = I_C = 3,8$ А; $I_\phi = 2,2$ А.
3. $I_A = I_B = I_C = 22$ А; $I_\phi = 12,7$ А.
4. $I_A = I_B = I_C = 38$ А; $I_\phi = 22$ А.
5. $I_A = I_B = I_C = 68,5$ А; $I_\phi = 38$ А.

4.6. До трифазної мережі з лінійною напругою $U_\lambda = 220$ В під'єднаний трифазний споживач, з'єднаний трикутником. Опір кожної фази дорівнює $Z_\phi = 8 - j8$. Визначити фазні та лінійні струми, кути зсуву фаз між фазними струмами і напругами, а також потужності трифазного споживача. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I_\phi = 19,5$ А; $I_\lambda = 33,77$ А; $\varphi_\phi = -45^\circ$.
2. $I_\phi = 10$ А; $I_\lambda = 17,3$ А; $\varphi_\phi = 45^\circ$.
3. $I_\phi = 15$ А; $I_\lambda = 25,95$ А; $\varphi_\phi = 30^\circ$.
4. $I_\phi = 25$ А; $I_\lambda = 43,25$ А; $\varphi_\phi = 90^\circ$.
5. $I_\phi = 30$ А; $I_\lambda = 51,9$ А; $\varphi_\phi = -90^\circ$.

4.7. Визначити опір фази R_2 симетричного трифазного споживача, з'єданого зіркою, якщо відомо, що опір фази симетричного трифазного споживача, з'єданого трикутником $R_1 = 27$ Ом. Обидва споживачі під'єднувались до однієї трифазної мережі і лінійні струми в обох випадках були однакові.

Визначити правильний варіант відповіді:

- 1.8 Ом. 2.9 Ом. 3.10 Ом. 4.15 Ом. 5.12 Ом.

4.8. До трифазної мережі з лінійною напругою $U_\lambda = 220$ В під'єднаний споживач, з'єднаний трикутником. Комплексний опір кожної фази дорівнює $Z_\phi = (15 + j15) = 21,2e^{j45^\circ}$ Ом. Визначити фазні струми. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I_{ab} = 10,4 \cdot e^{j0^\circ}$ А; $I_{bc} = 10,4 \cdot e^{j120^\circ}$ А; $I_{ca} = 10,4 \cdot e^{-j120^\circ}$ А.

2. $I_{ab} = 10,4 \cdot e^{j120^\circ} \text{ A}; I_{bc} = 10,4 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ A}; I_{ca} = 10,4 \cdot e^{j0} \text{ A}$
3. $I_{ab} = 10,4 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ A}; I_{bc} = 10,4 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ A}; I_{ca} = 10,4 \cdot e^{j75^\circ} \text{ A}$
4. $I_{ab} = 10,4 \cdot e^{j45^\circ} \text{ A}; I_{bc} = 10,4 \cdot e^{j165^\circ} \text{ A}; I_{ca} = 10,4 \cdot e^{j75^\circ} \text{ A}$
5. $I_{ab} = 10,4 \cdot e^{j30^\circ} \text{ A}; I_{bc} = 10,4 \cdot e^{j90^\circ} \text{ A}; I_{ca} = 10,4 \cdot e^{j30^\circ} \text{ A}$

4.9. До трифазної мережі з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ під'єднаний споживач, з'єднаний зіркою. Комплексний опір кожної фази дорівнює $(4 + j3) = 5e^{j37^\circ} \text{ Ом}$. Визначити фазні струми.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $I_a = 25,4e^{j37^\circ} \text{ A}; I_b = 25,4e^{j120^\circ} \text{ A}; I_c = 25,4e^{-j120^\circ} \text{ A}$
2. $I_a = 25,4e^{j30^\circ} \text{ A}; I_b = 25,4e^{j120^\circ} \text{ A}; I_c = 25,4e^{-j120^\circ} \text{ A}$
3. $I_a = 25,4e^{53^\circ} \text{ A}; I_b = 25,4e^{j173^\circ} \text{ A}; I_c = 25,4e^{-j100^\circ} \text{ A}$
4. $I_a = 25,4e^{-j37^\circ} \text{ A}; I_b = 25,4e^{-j157^\circ} \text{ A}; I_c = 25,4e^{j83^\circ} \text{ A}$
5. $I_a = 25,4e^{j30^\circ} \text{ A}; I_b = 25,4e^{150^\circ} \text{ A}; I_c = 25,4e^{-j90^\circ} \text{ A}$

4.10. До трифазної мережі з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ під'єднаний споживач, з'єднаний зіркою. Струм, що протікає через кожну фазу споживача, дорівнює $10e^{-j45^\circ}$. Визначити потужності трифазного споживача. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $\tilde{S} = (4100 + j4100) \text{ ВА}$
2. $\tilde{S} = (4200 + j4200) \text{ ВА}$
3. $\tilde{S} = (4300 + j4300) \text{ ВА}$
4. $\tilde{S} = (4325 + j4325) \text{ ВА}$
5. $\tilde{S} = (4635 + j4635) \text{ ВА}$

5. Перехідні процеси в лінійних електричних колах

Причини виникнення перехідних процесів в лінійних електричних колах. Закони комутації. Зарядження і розрядження конденсатора через резистор.

Вимикання активно-індуктивного навантаження в мережу синусоїдної непрямої.

Література: [1, с. 149-170; 2, с. 153-181; 3, с. 243-278; 4, с. 122-136; 5, с. 167-182].

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Перехідні процеси виникають в електричних колах з нагромаджувачами електромагнітної або електричної енергії при переході від одного енергетичного стану до іншого, який супроводжується зміною магнітного поля індуктивності і енергії електричного поля конденсатора. Ці процеси описуються диференціальними рівняннями, розв'язок яких характеризує зміну струму та напруги в елементах електричного кола як функцію часу. Постійні інтегрування визначають з початкових умов, що обумовлені законами комутації.

Варто зазначити, що перехідні процеси в колах з резистором та послідовно з'єднаним з ним котушкою індуктивності чи конденсатором описуються диференціальним рівнянням першого порядку.

Після вивчення цієї теми студенти повинні:

—Знати методику складання диференціальних рівнянь електричного стану кола при перехідному процесі; експериментальне дослідження перехідних процесів за допомогою електронного осцилографа; графічне визначення сталої часу.

—Розуміти причини виникнення перехідних процесів, закони комутації, суть і значення сталої часу для визначення тривалості перехідних процесів.

—Вміти записати диференціальні рівняння електричного стану лінійних кіл при перехідних процесах, визначати сталу часу, отримати часові діаграми перехідних струмів і напруг за допомогою електронного осцилографа.

Запитання для самоконтролю

- Вкажіть причини виникнення перехідних процесів.
- Який режим електричного кола називається усталеним, а який – перехідним?
- Сформулюйте перший і другий закони комутації.
- Чи можуть змінюватися стрибком напруги на активному опорі та індуктивності?
- Який фізичний зміст сталої часу?

—За якими формулами визначається стала часу для електричних кіл з активно-індуктивним та активно-ємнісним елементами?

—Як визначити сталу часу графічно?

—За якими формулами визначаються величини енергій електричного та магнітного полів?

—Як визначається величина струму, що відповідає моменту вмикання електричного кола з послідовно з'єднаними активним та ємнісним опорами?

—У чому полягає фізична суть вільних і усталених струмів і напруг?

—Чому представлення перехідного струму у вигляді усталеного і вільного можна використовувати тільки для лінійних електричних кіл?

—Як зміниться тривалість перехідного процесу в електричному колі, що складається з активного опору та конденсатора, якщо зменшити одну з величин: напругу джерела, активний опір, ємність конденсатора?

—У які види енергії перетворюється енергія джерела живлення при зарядженні конденсатора через резистор?

—У якому випадку після вмикання котушки індуктивності в мережу синусоїдної напруги відсутній перехідний процес? У якому випадку величина струму перехідного процесу найбільша при вмиканні котушки індуктивності в мережу синусоїдної напруги?

—Поясніть процес перетворення енергії в електричному колі за умови розрядження конденсатора на резистор.

—Чому виникає електрична дуга між контактами вимикача за умови його вимикання?

—Через який проміжок часу перехідний процес практично закінчується?

—Яка залежність між сталою часу електричного кола та тривалістю перехідного процесу?

—Чому дорівнює перехідний струм у момент вмикання котушки індуктивності в мережу постійної напруги?

—За яких умов в електричному колі постійного струму можливий коливний перехідний процес?

—Конденсатор ємністю C заряджається від джерела постійної напруги U через резистор з опором R . Накресліть графіки зміни напруги на конденсаторі та струму, що протікає через нього, від часу. Напишіть відповідні формули.

—Конденсатор ємністю C , заряджений до напруги U_0 , розряджається через резистор R . Накресліть графіки залежності напруги на конденсаторі та струму розрядження від часу. Напишіть відповідні формули.

—Котушку індуктивності з параметрами L і R під'єднують до джерела постійної напруги U з нульовим внутрішнім опором. Накресліть графік залежності струму, що протікає через котушку, від часу і напишіть відповідні формули.

Тестові задачі до розділу «Перехідні процеси в лінійних електричних колах»

5.1. Визначити сталу часу і тривалість перехідного процесу при зарядженні конденсатора. Параметри кола: $R = 2000 \text{ Ом}$; $C = 40 \text{ мкФ}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

- | | |
|---|---|
| 1. $\tau = 0,08\text{с}$; $t \approx 0,4\text{с}$. | 4. $\tau = 0,1\text{с}$; $t \approx 0,5\text{с}$. |
| 2. $\tau = 0,07\text{с}$; $t \approx 0,35\text{с}$. | 5. $\tau = 0,2\text{с}$; $t = 1\text{с}$. |
| 3. $\tau = 0,09\text{с}$; $t \approx 0,45\text{с}$. | |

5.2. Конденсатор ємністю $C = 500 \text{ мкФ}$, заряджений до напруги $U = 220\text{В}$, розряджається на опір $R = 20 \text{ Ом}$. Визначити час розрядження конденсатора до напруги, що дорівнює 11В .

Визначити правильний варіант відповіді:

- | | | | | |
|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 1. $0,045\text{с}$. | 2. $0,0045\text{с}$. | 3. $0,45\text{с}$. | 4. $0,006\text{с}$. | 5. $0,06\text{с}$. |
|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|

5.3. Котушка з активним опором $R = 10 \text{ Ом}$ та індуктивністю $0,1\text{Гн}$ під'єднується до джерела постійної ЕРС $E = 110 \text{ В}$. Визначити енергію магнітного поля котушки для моменту часу $t = 0,01\text{с}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

- | | | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1. $1,42 \text{ Дж}$. | 2. $3,42 \text{ Дж}$. | 3. $2,42 \text{ Дж}$. | 4. $5,42 \text{ Дж}$. | 5. $6,42 \text{ Дж}$. |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|

5.4. Як зміниться усталений струм, тривалість перехідного процесу і енергія магнітного поля котушки при вмиканні її на постійну напругу, якщо індуктивність збільшиться у три рази?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. Залишаться без зміни.
2. Зменшаться у три рази.
3. Інші варіанти відповіді.
4. збільшаться у три рази.

5.5. Для визначення активного опору R котушки індуктивності паралельно до неї під'єднали вольтметр з внутрішнім опором $R_v = 10000 \text{ Ом}$ і ввімкнули в мережу постійної напруги $U = 100 \text{ В}$. Величина струму дорівнювала 1 А . Визначити напругу на затискачах вольтметра в момент від'єднання кола від мережі постійної напруги.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 100 В
2. 1000 В.
3. 5000 В.
4. 100000 В.
5. 10000 В.

6. Лінійні електричні кола періодичного несинусоїдного струму

Причини виникнення несинусоїдного струму. Зображення та параметри періодичних несинусоїдних електричних величин. Розрахунок лінійних електричних кіл несинусоїдного струму. Резонансні електричні фільтри. Література: [1, с. 175-192; 2, с. 182-199; 3, с. 193-209; 4, с. 156-172; 5, с. 183-201.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Аналітичне зображення несинусоїдної періодичної функції здійснюють за допомогою ряду Фур'є. Число членів ряду визначають потрібною точністю розрахунку.

Розрахунок електричних кіл несинусоїдного струму ґрунтується на тому, що несинусоїдну періодичну криву напруги замінюють рядом гармонійних функцій таких частот, амплітуд і початкових фаз, що алгебраїчна сума ординат цих гармонійних функцій у будь-який момент часу дорівнює ординаті заданої несинусоїдної періодичної кривої. Для лінійного електричного кола справедливий принцип накладання, тому при кожній синусоїдній складовій напруги електричне коло може бути розраховане так, ніби інших напруг не існує. При цьому розрахунок кола для кожної із гармонійних складових напруги можна проводити з використанням усього апарату і всіх методів розрахунку кіл синусоїдного струму.

Особливу увагу слід звернути на резонансні явища в колах несинусоїдного струму та електричні фільтри, робота яких ґрунтується на явищах резонансу.

У результаті вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати причини виникнення несинусоїдного струму, зображення та параметри несинусоїдних електричних величин.

—Розуміти резонансні явища в колах несинусоїдного струму, будову резонансних фільтрів.

—Вміти проводити розрахунки електричних кіл несинусоїдного струму.

Запитання для самоконтролю

—Який змінний струм називають несинусоїдним?

—Назвіть причини виникнення несинусоїдних струмів і напруг.

—Напишіть загальний вираз несинусоїдної функції у вигляді тригонометричного ряду.

—Запишіть формулу для аналітичного визначення постійної складової.

—Чи можна за графічним зображенням несинусоїдної функції встановити наявність або відсутність постійної складової?

—Яка гармонійна складова називається основною?

—За якими формулами визначають коефіцієнти тригонометричного ряду?

—За якими формулами визначають діюче значення несинусоїдних струмів і напруг?

—Що називають коефіцієнтом форми, коефіцієнтом амплітуди, коефіцієнтом спотворення несинусоїдної величини?

—На які етапи можна розділити розрахунок кола несинусоїдного струму?

—Накресліть схему резонансного та запираючого фільтрів.

—На чому ґрунтується фільтруюча дія послідовного та паралельного коливних контурів?

—Чому при індуктивному характері навантаження форма кривої струму в електричному колі ближче до синусоїди, ніж форма кривої напруги?

—Чому при ємнісному характері навантаження крива напруги за формою ближче до синусоїди, ніж крива струму?

—За якими формулами визначають діючі значення несинусоїдних напруги та струму?

Тестові задачі до розділу «Лінійні електричні кола періодичного несинусоїдного струму»

6.1. До електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних елементів, підведена несинусоїдна напруга $u = [100 + 150 \sin \omega t + 50 \sin \omega t] \text{ В}$. Параметри кола: $R = 8$, $X_L = 6$ при частоті $f = 50 \text{ Гц}$. Визначити повний опір для кожної із складових несинусоїдної напруги.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $Z_{(1)} = 10 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 19,7 \text{ Ом}$; $Z_{(0)} = 8 \text{ Ом}$.
2. $Z_{(1)} = 12 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 18 \text{ Ом}$; $Z_{(0)} = 6 \text{ Ом}$.
3. $Z_{(1)} = 11 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 17,7 \text{ Ом}$; $Z_{(0)} = 8 \text{ Ом}$.
4. $Z_{(1)} = 9 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 21 \text{ Ом}$; $Z_{(0)} = 6 \text{ Ом}$.
5. $Z_{(1)} = 14 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 22,7 \text{ Ом}$; $Z_{(0)} = 8 \text{ Ом}$.

6.2. До електричного кола з послідовно з'єднаними R і C - елементами, підведена несинусоїдна напруга $u = [80 + 40 \sin \omega t + 20 \sin(3\omega t + 60^\circ)] \text{ В}$. Параметри електричного кола: $R = 6 \text{ Ом}$, $X_C = 8 \text{ Ом}$ при частоті $f = 50 \text{ Гц}$. Визначити повний опір для кожної складової напруги живлення.

Визначте правильний варіант відповіді:

1. $Z_{(0)} = 6 \text{ Ом}$; $Z_{(1)} = 5 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 5,57 \text{ Ом}$.
2. $Z_{(0)} = \infty \text{ Ом}$; $Z_{(1)} = 10 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 6,57 \text{ Ом}$.
3. $Z_{(0)} = 8 \text{ Ом}$; $Z_{(1)} = 15 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 7,57 \text{ Ом}$.
4. $Z_{(0)} = 0 \text{ Ом}$; $Z_{(1)} = 20 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 6 \text{ Ом}$.
5. $Z_{(0)} = \infty \text{ Ом}$; $Z_{(1)} = 10 \text{ Ом}$; $Z_{(3)} = 8 \text{ Ом}$.

6.3. У вітку електричного кола, через яку протікає струм $i = [5 + 2\sqrt{2} \sin \omega t] \text{ А}$, увімкнено амперметр магнітоелектричної системи. Визначити показ амперметра.

1. 3А.
2. 4А.
3. 5А.
4. 6А.
5. 7А.

6.4. Визначити показ амперметра електромагнітної системи, увімкненого у вітку електричного кола, по якій протікає струм $i = [4\sqrt{2} \sin \omega t + 3\sqrt{2} \sin 3\omega t] \text{ А}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 3А.
2. 4А.
3. 5А.
4. 6А.
5. 7А.

6.5. Напруга та струм в електричному колі змінюються за законами:

$$u = [50\sqrt{2} \sin(\omega t + 10^\circ) + 40\sqrt{2} \sin(3\omega t - 30^\circ)] \text{ В}; \quad i = [20\sqrt{2} \sin(\omega t + 70^\circ) + 10\sqrt{2} \sin(3\omega t + 30^\circ)] \text{ А}.$$

Визначити активну потужність електричного кола.

1. 500 Вт.
2. 600 Вт.
3. 800 Вт.
4. 900 Вт.
5. 700 Вт.

7. Магнітні кола

Основні властивості та величини магнітного поля. Характеристики феромагнітних матеріалів у магнітному полі. Основні закони магнітних кіл. Магнітні кола з постійними намагнічуючими силами. Розрахунок нерозгалужених і розгалужених магнітних кіл.

Особливості електромагнітних процесів у магнітних колах зі змінними намагнічуючими силами. Векторні діаграми та заступні схеми ідеальної та реальної котушок індуктивності. Використання явища ферорезонансу для стабілізації напруги.

Література: [1, с. 247-261; 2, с. 253-304; 3, с. 101-150; 4, с. 173-212; 5, с. 219-259].

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Перед вивченням розділу необхідно повторити матеріал про основні магнітні величини із курсу фізики.

Розрахунок магнітних кіл ґрунтується на законі повного струму, який встановлює кількісний зв'язок між магнітною напругою і магніторушійною силою. Подібно до електричного кола цей закон відображає другий закон Кірхгофа для магнітного кола. Тому заступна схема магнітного кола аналогічна заступній схемі електричного кола. Однак аналогія в формулах для електричного і магнітного кіл тільки зовнішня. Ніякої подібності фізичних явищ в електричному та магнітному колах не існує.

Основною інженерною задачею, яка виникає при розрахунку магнітних кіл, є визначення зв'язків між магнітним потоком та струмом в обмотці намагнічуючої котушки. При цьому доводиться розв'язувати дві

задачі: пряму та зворотну. Прямою називають таку задачу, коли відомою величиною є магнітний потік, а визначенню підлягає намагнічуюча сила або струм котушки. Зворотна задача – струм котушки є відомим, а визначенню підлягає магнітний потік. При розв'язуванні як прямої, так і зворотної задачі геометричні розміри магнітного кола та матеріал, з якого воно виготовлене, зазвичай, відомі.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати характеристики феромагнітних матеріалів; методику розрахунку магнітних кіл з постійною МРС; залежність амплітуди магнітного потоку від напруги обмотки збудження.

—Розуміти причини виникнення нелінійної залежності магнітної індукції феромагнетика від напруженості магнітного поля; картину магнітного поля розгалужених і нерозгалужених магнітних кіл; електромагнітні процеси в котушці з феромагнітним осердям.

—Вміти розрахувати розгалужене і нерозгалужене магнітне коло з постійною МРС; використовувати нерозгалужені контури, дроселі насичення та магнітні підсилювачі для стабілізації та підсилення напруги.

Запитання для самоконтролю

- Назвіть пристрої, в яких проявляється дія магнітного поля.
- Як математично записують закон електромагнітної індукції?
- За яким правилом визначають напрям ЕРС у провіднику?
- Що визначають за правилом лівої руки?
- Що таке магнітна індукція?
- За допомогою якої величини проводиться інтегральна оцінка магнітного поля?
- Добуток яких величин називають намагнічуючою силою, потокозчепленням?
- Що називають магнітним колом і яке його призначення в електричних пристроях?
- Що таке магнітна проникність? В яких одиницях вона вимірюється?
- Як формують і записують математично закон повного струму?
- Що характеризує площа петлі гістерезису?
- Якими одиницями вимірюють магнітний потік, індукцію, напруженість, намагнічуючу силу?
- Запишіть рівняння Кірхгофа для магнітного кола.
- Чому при синусоїдній напрузі, що подається на котушку з феромагнітним осердям, струм у ній не синусоїдний?
- Як визначити величину індуктивності котушки з феромагнітним осердям?
- Що називають прямою задачею розрахунку магнітного кола?
- У чому полягає суть зворотної задачі розрахунку магнітного кола?
- Як впливає величина немагнітного проміжку на величину намагнічуючої сили?
- Сформулюйте перший і другий закони Кірхгофа для магнітного кола.
- В яких електротехнічних пристроях використовують явище ферорезонансу?
- Що таке дросель насичення і де його використовують?
- Що називають основним магнітним потоком і потоком розсіяння?
- Що характеризує відносна магнітна проникність?
- Що таке крива початкового намагнічування?
- Назвіть сфери використання магнітом'яких і магнітотвердих матеріалів.
- За якою формулою визначають магнітний опір?
- Яку залежність називають кривою намагнічування магнітного кола?

Тестові задачі до розділу «Магнітні кола»

7.1. З якою силою буде діяти магнітне поле на провідник, що розташований у повітрі, довжиною $l = 5\text{ м}$, через який протікає струм $I = 400\text{ А}$, якщо напруженість магнітного поля $H = 1000\text{ А/м}$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $2,5\text{ Н}$. 2. $3,5\text{ Н}$. 3. $4,5\text{ Н}$. 4. $5,5\text{ Н}$. 5. $6,5\text{ Н}$.

7.2. Визначити напруженість магнітного поля H і величину магнітної індукції B в повітрі на відстані $l = 2\text{ м}$ від провідника з величиною струму $I = 100\text{ А}$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $20 \cdot 10^{-6}\text{ Тл}$. 4. $30 \cdot 10^{-6}\text{ Тл}$.
2. $10 \cdot 10^{-6}\text{ Тл}$. 5. $40 \cdot 10^{-6}\text{ Тл}$.

3. $50 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}$.

7.3. Довжина повітряного проміжку між якорем і полюсами електромагніту дорівнює $l_{\text{п}} = 10 \text{ мм}$. Сила тяги дорівнює $F = 10 \text{ Н}$. Яка буде сила тяги при зменшенні зазору в 10 разів при незмінних інших умовах? Визначити правильний варіант відповіді:

1. 800Н. 2. 900Н. 3. 1000Н. 4. 1100Н. 5. 1200Н.

7.4. На замкненому магнітопроводі однакового перерізу з відносною магнітною проникністю $\mu = 1000$ намотана обмотка з числом витків $W = 100$. Визначити струм обмотки, необхідний для створення магнітного потоку $\Phi = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$, якщо довжина середньої магнітної лінії $l = 0,5 \text{ м}$, а площа поперечного перерізу $S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $\mu_a = \mu\mu_0$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 4,58А. 2. 6,58А. 3. 4,98А. 4. 3,98А. 5. 5,98А.

7.5. На сталюму сердечнику з відносною магнітною проникністю $\mu = 1000$ намотана обмотка з числом витків $W = 200$. Магнітний потік у сердечнику $\Phi = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$. Визначити індуктивність обмотки, якщо довжина середньої магнітної лінії $L = 0,5 \text{ м}$, а площа поперечного перерізу $S = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. 0,01Гн. 2. 0,02Гн. 3. 0,03Гн. 4. 0,05Гн. 5. 0,04Гн.

7.6. Визначити енергію магнітного поля котушки з числом витків $W = 100$, індуктивністю $L = 0,1 \text{ Гн}$ і струмом $I = 10 \text{ А}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 5дж. 2. 6дж. 3. 7дж. 4. 8дж. 5. 9дж.

7.7. Тороїдний магнітопровід з довжиною середнього кола $l = 0,5 \text{ м}$ і поперечним перерізом $S = 0,002 \text{ м}^2$ має зазор довжиною $l_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Яку кількість витків має обмотка, що намотана на магнітопровід, якщо по ній протікає струм 5 А , магнітний потік у магнітопроводі $\Phi = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$, а абсолютна магнітна проникність $\mu_a = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 249. 2. 259. 3. 269. 4. 270. 5. 280.

7.8. За умовою задачі 9.7.7 визначити яку кількість витків повинна мати обмотка при відсутності зазора і незмінних інших умовах. Визначити правильний варіант відповіді:

1. 80. 2. 90. 3. 100. 4. 120. 5. 140.

7.9. У нерозгалужене магнітне коло ввімкнені один раз послідовно, а другий – зустрічно дві обмотки з числами витків $W_1 = 150$ та $W_2 = 100$ і опорами відповідно $R_1 = 0,8 \text{ Ом}$ та $R_2 = 0,4 \text{ Ом}$. До обмоток прикладена напруга $U = 12 \text{ В}$. Довжина середньої лінії $l = 1 \text{ м}$. Визначити напруженість магнітного поля в магнітопроводі при послідовному $H_{\text{пос}}$ та зустрічному $H_{\text{зус}}$ ввімкненні обмоток.

Вказати правильний варіант відповіді:

1. $H_{\text{пос}} = 2200 \text{ А/м}$; $H_{\text{зус}} = 200 \text{ А/м}$.
2. $H_{\text{пос}} = 2300 \text{ А/м}$; $H_{\text{зус}} = 200 \text{ А/м}$.
3. $H_{\text{пос}} = 2400 \text{ А/м}$; $H_{\text{зус}} = 200 \text{ А/м}$.
4. $H_{\text{пос}} = 2500 \text{ А/м}$; $H_{\text{зус}} = 200 \text{ А/м}$.
5. $H_{\text{пос}} = 2600 \text{ А/м}$; $H_{\text{зус}} = 200 \text{ А/м}$.

7.10. Який магнітний потік, буде протікати у замкненому магнітопроводі, якщо намагнічуюча сила обмотки $IW = 600$, а магнітний опір магнітопровода $R_{\text{м}} = 3 \cdot 10^4 \text{ Гн}$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 0,14Вб. 2. 0,12Вб. 3. 0,11Вб. 4. 0,01Вб. 5. 0,02Вб.

8. Трансформатори

Призначення, сфера застосування та номінальні дані трансформаторів. Умовні позначення та загальні відомості про конструкцію трансформаторів.

Електромагнітні процеси в трансформаторі при неробочому ході та навантаженні. Призначення та умови проведення дослідів неробочого ходу та короткого замикання. Зовнішні характеристики та коефіцієнт корисної дії трансформатора.

Трифазні трансформатори. Схеми та групи з'єднань обмоток. Паралельна робота трансформаторів. Вимірювальні трансформатори струму та напруги. Автотрансформатори.

Література: [1, с. 301-341; 2, с. 305-350; 3, с. 279-323; 4, с. 237-261; 5, с. 258-297.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Принцип роботи трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, що забезпечує виникнення ЕРС в обмотках трансформатора. Необхідно звернути увагу на те, що передача електричної енергії від первинної обмотки до вторинної відбувається за рахунок магнітного поля. При цьому магнітний потік залишається незмінним при зміні навантаження трансформатора від неробочого ходу до номінального.

Векторна діаграма та заступна схема трансформатора дають можливість краще зрозуміти вплив навантаження трансформатора на його зовнішні характеристики.

При вивченні трифазних трансформаторів необхідно звернути увагу на їх конструкцію, групи з'єднання обмоток, умови вмикання на паралельну роботу.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати конструкцію однофазних та трифазних трансформаторів, їх характеристики та способи охолодження; схеми вмикання автотрансформаторів і вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

—Розуміти принцип роботи трансформатора; побудову його векторних діаграм при неробочому ході та навантаженні; розподіл витрат енергії у трансформаторі; роль групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора при вмиканні його на паралельну роботу.

—Вміти визначати коефіцієнт корисної дії при різних навантаженнях; експериментально визначити групу з'єднань обмоток; вмикати електровимірювальні прилади через вимірювальні трансформатори.

Запитання для самоконтролю

- Намалюйте схематично однофазний трансформатор і поясніть принцип його роботи.
- Які величини, що характеризують роботу трансформатора, називають номінальними?
- Яку обмотку трансформатора називають первинною, а яку – вторинною?
- Для чого у трансформаторах використовують замкнений сталний магнітопровід? Чому його не виконують суцільним?
- Які втрати енергії виникають у навантаженому трансформаторі?
- Що називають коефіцієнтом трансформації трансформатора?
- Які існують способи охолодження трансформатора?
- Для чого проводять дослід неробочого ходу трансформатора?
- Який режим роботи трансформатора називають режимом короткого замикання?
- Накресліть заступну схему трансформатора.
- З якою метою проводять дослід короткого замикання трансформатора?
- Напишіть рівняння електричної рівноваги первинної та вторинної обмоток і поясніть фізичний зміст їх складових.
- Чому проводять зведення величин вторинної обмотки до первинної?
- Що таке зовнішня характеристика трансформатора і як її розрахувати?
- Чому в досліді неробочого ходу нехтують втратами в обмотках?
- Сформулюйте визначення напруги короткого замикання.
- Чому в досліді короткого замикання нехтують втратами в сталі?
- Чи можна увімкнути трансформатор в електричне коло постійного струму з напругою, що дорівнює номінальній?
- За якою формулою визначають коефіцієнт корисної дії трансформатора?

—Чому зі зміною струму у вторинній обмотці змінюється струм у первинній обмотці трансформатора?

—Намалюйте схематично трифазний трансформатор і поясніть принцип його роботи.

—Яку роль відіграють трифазні трансформатори в сучасних електричних системах?

—Як можна за зовнішнім виглядом відрізнити обмотку ВН від обмотки НН трансформатора?

—Як маркують виводи обмоток трифазного трансформатора?

—Які можуть бути схеми та групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора?

—Що повинно бути задано для однозначного визначення групи з'єднань обмоток трансформатора?

—Як визначають річний ККД трансформатора?

—Чому струми фаз при неробочому ході трансформатора різні за величиною?

—Назвіть основні види обмоток силових трифазних трансформаторів.

—Назвіть умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу.

—Який трансформатор називають автотрансформатором і де його використовують?

—Для чого потрібні вимірювальні трансформатори?

—Які особливості зварювального трансформатора?

—Чому перерізи стрижнів магнітопроводів силових трансформаторів середньої і великої потужностей мають ступеневу форму, вписану в коло?

Тестові задачі до розділу «Трансформатори»

8.1. Чому дорівнює ККД трансформатора, якщо загальні втрати складають 5% від корисної потужності?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 95%. 2. 90%. 3. 100%. 4. 80%. 5. 10%.

8.2. Первинна напруга трансформатора $U_1 = 6000 \text{ В}$, а вторинна $U_2 = 400 \text{ В}$. Для визначення числа витків первинної і вторинної обмоток намотали додаткову обмотку з числом витків $W_d = 15$. Напруга на затискачах додаткової обмотки $U_d = 120 \text{ В}$ в режимі неробочого ходу. Визначити числа витків первинної W_1 і вторинної W_2 обмоток. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $W_1 = 700$; $W_2 = 100$. 2. $W_1 = 750$; $W_2 = 50$. 3. $W_1 = 600$; $W_2 = 500$.
4. $W_1 = 900$; $W_2 = 200$. 5. $W_1 = 1000$; $W_2 = 300$.

8.3. Однофазний трансформатор працює в режимі неробочого ходу. Напруги обмоток: $U_1 = 6000 \text{ В}$, $U_2 = 400 \text{ В}$. Потужність втрат $P_0 = 1300 \text{ Вт}$ при струмі $I_{10} = 2 \text{ А}$. Визначити коефіцієнти потужності та трансформації. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $\cos \varphi_{10} = 0,2$; $n = 5$. 4. $\cos \varphi_{10} = 0,4$; $n = 20$.
2. $\cos \varphi_{10} = 0,3$; $n = 10$. 5. $\cos \varphi_{10} = 0,5$; $n = 30$.
3. $\cos \varphi_{10} = 0,08$; $n = 15$.

8.4. Визначити площу перерізу магнітопровода S понижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $n = 45$ і під'єданого до мережі напругою $U_1 = 10 \text{ кВ}$, $f = 50 \text{ Гц}$, якщо індукція в магнітопроводі $B = 1 \text{ Тл}$, а число витків вторинної обмотки $W_2 = 200$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $0,5 \text{ м}^2$. 2. $0,01 \text{ м}^2$. 3. $0,9 \text{ м}^2$. 4. $0,005 \text{ м}^2$. 5. $0,8 \text{ м}^2$.

8.5. При повному навантаженні трансформатор працює 7 годин на добу, а решта часу – в режимі неробочого ходу. Визначити річний ККД $\eta_{рчн}$ трансформатора, якщо корисна потужність його $P_2 = 10 \text{ кВт}$. Втрати в сталі складають 3%, а втрати в міді 2% від потужності P_2 . Тривалість року 365 днів.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 0,7. 2. 0,8. 3. 0,5. 4. 0,1. 5. 0,89.

8.6. Яку кількість витків має первинна W_1 і вторинна W_2 обмотки трансформатора, під'єданого до мережі змінної напруги $U_1 = 380\text{ В}$, якщо в режимі неробочого ходу напруга на вторинній обмотці $U_2 = 38\text{ В}$, а магнітний потік у сердечнику $\Phi = 2 \cdot 10^{-4}\text{ Вб}$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $W_1 = 856$; $W_2 = 8559$.
2. $W_1 = 800$; $W_2 = 8000$.
3. $W_1 = 200$; $W_2 = 300$.
4. $W_1 = 500$; $W_2 = 1000$.
5. $W_1 = 400$; $W_2 = 500$.

8.7. Однофазний трансформатор номінальною потужністю $S_H = 1\text{ кВА}$ має номінальні напруги на обмотках: $U_{1H} = 400\text{ В}$ і $U_{2H} = 80\text{ В}$. Потужність втрат у режимі неробочого ходу $P_0 = 100\text{ Вт}$, у режимі короткого замикання $P_K = 150\text{ Вт}$. Визначити площу поперечного перерізу провідника $S_{\text{пр}}$ вторинної обмотки, щоб густина струму j не перевищувала 4 А/мм^2 , і ККД трансформатора η при $\cos\varphi_2 = 0,8$ та заданих втратах.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $S_{\text{пр}} = 5\text{ мм}^2$; $\eta = 0,5$.
2. $S_{\text{пр}} = 3,125\text{ мм}^2$; $\eta = 0,76$.
3. $S_{\text{пр}} = 4\text{ мм}^2$; $\eta = 0,6$.
4. $S_{\text{пр}} = 2\text{ мм}^2$; $\eta = 0,9$.
5. $S_{\text{пр}} = 1\text{ мм}^2$; $\eta = 0,4$.

8.8. Для однофазного трансформатора з такими даними: $S_H = 5\text{ кВА}$, $U_{1H} = 3000\text{ В}$, $U_{2H} = 220\text{ В}$, $P_0 = 60\text{ Вт}$, $P_K = 150\text{ Вт}$, $I_{10} = 10\%$, $U_K = 5\%$. Визначити зміну вторинної напруги ΔU_2 при номінальному активному навантаженні.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 1%.
2. 3%.
3. 2,94%.
4. 4%.
5. 5%.

8.9. Первинна обмотка автотрансформатора має $W_1 = 700$ витків і увімкнена в мережу напругою $U_1 = 380\text{ В}$. Яку напругу U_2 можна отримати на вторинній обмотці, якщо $W_2 = 300$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 100 В.
2. 200 В.
3. 300 В.
4. 150 В.
5. 350 В.

8.10. Два трансформатори з однаковими номінальними потужностями $S_{H1} = S_{H11} = 100\text{ кВА}$, але різними напругами короткого замикання ($U_{K1} = 5,5\%$; $U_{K11} = 7\%$) увімкнені на паралельну роботу. Як розподілиться навантаження між ними?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $S_I = 0,5S_{I1}$.
2. $S_I = 2S_{I1}$.
3. $S_I = 1,55S_{I1}$.
4. $S_I = 3,5S_{I1}$.
5. $S_I = 1,27S_{I1}$.

9. Асинхронні машини

Будова, принцип роботи та сфери використання трифазних асинхронних двигунів. Створення обертового магнітного поля обмоткою статора. Рівняння електричної рівноваги обмоток статора ротора.

Асинхронна машина з загальмованим ротором як фазорегулятор та індукційний регулятор. Електромагнітні процеси в асинхронній машині при рухомому роторі. Механічні та робочі характеристики. Пуск, регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи асинхронного двигуна.

Робота трифазного асинхронного двигуна в однофазному режимі. Однофазні асинхронні двигуни.

Література: [1, с.401-471; 2, с.351-419; 3, с.363-390; 4, с.387-416; 5, с.413-463.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Нині асинхронні двигуни є найбільш розповсюджені завдяки малій вартості та надійності. Принцип роботи асинхронного двигуна ґрунтується на використанні обертового магнітного поля. Варто зазначити, що фізичні процеси в асинхронних двигунах описуються рівняннями електричної і магнітної рівноваги, що аналогічні рівнянням трансформатора. Відмінна особливість цих рівнянь пов'язана з наявністю величини, яка називається ковзанням.

При вивченні рівняння електромагнітного моменту доцільно звернути увагу на квадратичну залежність електромагнітного моменту від напруги живлення, а також на вплив додаткових опорів у колі ротора на пусковий момент і струм двигуна.

Вивчаючи питання пуску, регулювання швидкості обертання, та гальмівні режими доцільно вивчити характер зміни механічних характеристик при різних режимах.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати будову трифазних асинхронних двигунів з фазним та короткозамкненим ротором; способи пуску, регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи асинхронних двигунів; механічні та робочі характеристики.

—Розуміти електромагнітні процеси в трифазному асинхронному двигуні; фактори, що впливають на швидкість обертання ротора.

—Вміти під'єднати трифазний асинхронний двигун до мережі живлення і провести його пуск; змінити напрям обертання ротора; визначити за каталожними даними номінальний, максимальний і пусковий момент, пусковий струм, номінальне ковзання.

Запитання для самоконтролю

—Поясніть будову та принцип роботи асинхронного двигуна з фазним і короткозамкненим ротором.

—Від чого залежить швидкість обертання магнітного поля статора асинхронного двигуна?

—Як можна змінити напрям обертання ротора асинхронного двигуна?

—Чому при ковзанні, що дорівнює нулю, асинхронний двигун не розвиває обертового моменту?

—Що визначає кількість пар полюсів обмотки статора і як практично його можна визначити?

—Як визначають „початки” і „кінці” фазних обмоток статора за умови відсутності маркування затискачів?

—Як здійснити пуск, зупинку і реверс асинхронного двигуна з фазним ротором?

—Яке призначення має реостат у колі ротора асинхронного двигуна з фазним ротором?

—Чому машини називають асинхронними? Що таке ковзання?

—Для чого ротор і статор складають з окремих ізольованих одна від одної сталейних пластин?

—Чому при однакових номінальних потужностях намагнічуючий струм асинхронного двигуна більший, ніж у трансформатора?

—Як позначають початки та кінці обмоток статора асинхронних машин?

—У яких ділянках магнітопровода асинхронного двигуна виникають втрати при нерухомому роторі, номінальному режимі, синхронному обертанні?

—Від яких параметрів залежить швидкість обертання магнітного поля статора асинхронного двигуна?

—У скільки разів зменшаться фазний і пусковий струми двигуна, якщо для пуску обмотку статора з'єднати зіркою замість трикутника?

—Назвіть переваги та недоліки асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором порівняно з асинхронним двигуном з фазним ротором.

—Чому змінюється струм в обмотці ротора та обмотці статора зі зміною гальмівного моменту на валу?

—Назвіть основні способи регулювання швидкості асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

—Яку потужність називають номінальною потужністю двигуна? З яким перевантаженням можуть працювати асинхронні двигуни?

—Як визначити номінальний момент асинхронного двигуна за його паспортними даними?

—Як змінюється коефіцієнт потужності асинхронного двигуна під час переходу від режиму неробочого ходу до номінального навантаження на валу?

—Намалюйте механічну характеристику асинхронного двигуна. Вкажіть характерні точки.

—Поясніть вплив обриву фази статора асинхронного двигуна на його роботу.

—Частота напруги живлення у США дорівнює 60 Гц, в Україні – 50 Гц, а стандартні напруги електричних мереж однакові. Як зміниться магнітний потік трифазного асинхронного двигуна виробництва США у випадку роботи його в Україні за однакових напруг мережі живлення?

—Як зміниться струм ротора асинхронного двигуна, якщо з незмінним моментом навантаження зменшити напругу на обмотці статора?

—У якому асинхронному двигуні – з фазним чи короткозамкненим ротором більші втрати?

—Чому не створюється обертове магнітне поле у трифазного трансформатора?

—Як впливає зміна величини магнітного поля в повітряному проміжку асинхронного двигуна на швидкість його обертання?

Тестові задачі до розділу «Асинхронні машини»

9.1. Номінальна швидкість обертання асинхронного двигуна $n_{2H}=1440 \text{ об/хв}$. Визначити кількість пар полюсів p обмотки статора двигуна, номінальне ковзання s_H , частоту ЕРС в обмотці ротора f_{2H} для номінальної швидкості обертання, якщо частота напруги живлення $f_1=50 \text{ Гц}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $p=2$; $f_{2H}=2 \text{ Гц}$; $s_H=0,04$.
2. $p=1$; $f_{2H}=4 \text{ Гц}$; $s_H=0,01$.
3. $p=4$; $f_{2H}=7 \text{ Гц}$; $s_H=0,06$.
4. $p=3$; $f_{2H}=10 \text{ Гц}$; $s_H=0,08$.
5. $p=5$; $f_{2H}=50 \text{ Гц}$; $s_H=0,1$.

9.2. Кількість витків фази обмотки статора асинхронного двигуна $W_1=85$, ротора $W_2=70$, а обмоткові коефіцієнти відповідно дорівнюють: $K_{об1}=0,95$ і $K_{об2}=0,96$. Визначити електрорушійні сили, що індукуються у фазах обмоток статора E_1 і ротора E_2 двигуна у нерухомому роторі та за умови обертання його з ковзанням $s=0,03$, якщо магнітний потік $\Phi=1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$. Двигун під'єднаний до мережі змінного струму частотою $f_1=50 \text{ Гц}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $E_1=250 \text{ В}$; $E_2=200 \text{ В}$; ($E_1=250 \text{ В}$; $E_2=10 \text{ В}$).
2. $E_1=269 \text{ В}$; $E_2=224 \text{ В}$; ($E_1=269 \text{ В}$; $E_2=6,7 \text{ В}$).
3. $E_1=220 \text{ В}$; $E_2=127 \text{ В}$; ($E_1=200 \text{ В}$; $E_2=8 \text{ В}$).
4. $E_1=70 \text{ В}$; $E_2=80 \text{ В}$; ($E_1=80 \text{ В}$; $E_2=70,5 \text{ В}$).
5. $E_1=150 \text{ В}$; $E_2=300 \text{ В}$; ($E_1=15 \text{ В}$; $E_2=100 \text{ В}$).

9.3. При зміні частоти напруги живлення у 2 рази швидкість обертання магнітного поля асинхронного двигуна збільшилася на 600 об/хв . Двигун має обмотку з кількістю пар полюсів $p=4$. Яка була початкова частота f_1 напруги живлення?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 20 Гц .
2. 30 Гц .
3. 40 Гц .
4. 45 Гц .
5. 50 Гц .

9.4. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором споживає з мережі потужність 3 кВт зі струмом статора $I_1=15 \text{ А}$ і напрузі $U_1=220 \text{ В}$. Визначити ККД η і $\cos \varphi_1$, якщо корисна потужність двигуна $P_2=2,4 \text{ кВт}$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $\eta=0,7$; $\cos \varphi_1=0,75$.
2. $\eta=0,75$; $\cos \varphi_1=0,7$.
3. $\eta=0,9$; $\cos \varphi_1=0,88$.
4. $\eta=0,8$; $\cos \varphi_1=0,91$.
5. $\eta=0,85$; $\cos \varphi_1=0,95$.

9.5. Асинхронний двигун розвиває номінальну потужність $P_{2H}=60 \text{ кВт}$ при номінальній швидкості обертання ротора

$n_{2H}=1460 \text{ об/хв}$. Перевантажувальна здатність $K_M = M_{\max} / M_H = 2,1$. Виразити залежність між обертовим моментом M і ковзанням s .

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $M=1500/(s/0,2+0,2/s)$.
2. $M=1400/(s/0,3+0,3/s)$.
3. $M=1700/(s/0,1+0,1/s)$.
4. $M=1800/(s/0,4+0,4/s)$.
5. $M=1648,5/(s/0,11+0,11/s)$.

9.6. Напруга живлення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зменшилась на 20% . Як зміниться обертовий момент асинхронного двигуна? Визначити правильний варіант відповіді:

1. Зменшиться на 36% .
2. Залишиться без зміни.
3. Зросте на 36% .
4. Зменшиться на 20% .
5. Зменшиться на 19% .

9.7. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має такі параметри: $P_{2H}=5,8 \text{ кВт}$, $U_{1H}=380/220 \text{ В}$, з'єднання обмоток статора Y/Δ , $n_{2H}=1450 \text{ об/хв}$, $\cos \varphi_{1H}=0,7$, $\eta_H=0,8$. Визначити: потужність P_1 , що споживає двигун; струми в обмотці статора при з'єднанні обмоток зіркою I_{1Y} і трикутником $I_{1\Delta}$; обертовий момент і ковзання при номінальному режимі роботи.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $P_1=6\text{кВт}$; $M_H=25\text{Нм}$; $s_H=0,01$; $I_{1Y}=10\text{А}$; $I_{1\Delta}=25\text{А}$.
2. $P_1=7,25\text{кВт}$; $M_H=38,2\text{Нм}$; $s_H=0,03$; $I_{1Y}=15,75\text{А}$; $I_{1\Delta}=27,2\text{А}$.
3. $P_1=8\text{кВт}$; $M_H=40\text{Нм}$; $s_H=0,02$; $I_{1Y}=20\text{А}$; $I_{1\Delta}=15\text{А}$.
4. $P_1=10\text{кВт}$; $M_H=45\text{Нм}$; $s_H=0,002$; $I_{1Y}=25\text{А}$; $I_{1\Delta}=10\text{А}$.
5. $P_1=12\text{кВт}$; $M_H=48\text{Нм}$; $s_H=0,003$; $I_{1Y}=30\text{А}$; $I_{1\Delta}=20\text{А}$.

9.8. За умови обертання ротора асинхронного двигуна з швидкістю $n_{2H}=900\text{об/хв}$ потужність, що споживає двигун, $P_1=22\text{кВт}$, а сумарна потужність втрат $\Delta P=2,5\text{кВт}$. Визначити ковзання двигуна і його ККД, якщо $p=3$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $s=0,2$; $\eta=0,75$.
2. $s=0,3$; $\eta=0,7$.
3. $s=0,1$; $\eta=0,87$.
4. $s=0,15$; $\eta=0,9$.
5. $s=0,05$; $\eta=0,95$.

9.9. За умови збільшення споживаної потужності асинхронного двигуна в 2 рази, ККД збільшився на 10%. Визначити початкову величину P_1 і η , якщо сума втрат $\Delta P=0,6\text{кВт}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $P_1=1\text{кВт}$; $\eta=0,7$.
2. $P_1=2\text{кВт}$; $\eta=0,75$.
3. $P_1=2,5\text{кВт}$; $\eta=0,95$.
4. $P_1=3\text{кВт}$; $\eta=0,8$.
5. $P_1=4\text{кВт}$; $\eta=0,85$.

9.10. Ковзання чотириполюсного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором змінюється від 30% до 50% зі зміною навантаження. Визначити діапазон зміни швидкості ротора, якщо $f_1=50\text{Гц}$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. $n_{2(1)}=1200\text{об/хв}$; $n_{2(2)}=900\text{об/хв}$.
2. $n_{2(1)}=1500\text{об/хв}$; $n_{2(2)}=1000\text{об/хв}$.
3. $n_{2(1)}=750\text{об/хв}$; $n_{2(2)}=1000\text{об/хв}$.
4. $n_{2(1)}=1000\text{об/хв}$; $n_{2(2)}=800\text{об/хв}$.
5. $n_{2(1)}=1050\text{об/хв}$; $n_{2(2)}=750\text{об/хв}$.

10. Синхронні машини

Конструкції, принцип роботи та сфери використання трифазних синхронних машин з електромагнітним збудженням. Електромагнітні процеси в синхронному генераторі при неробочому ході та навантаженні. Характеристики синхронного генератора при роботі на автономне навантаження.

Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею. Потужність, електромагнітний момент та статична стійкість синхронного генератора, що працює паралельно з мережею.

Робота синхронної машини в режимі двигуна. Характеристики синхронного двигуна. Синхронний компенсатор.

Література: [1,с.472-498; 2,с.420-475; 3,с. 408-420; 4,с.417-440; 5,с.464-488.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Оскільки вся електрична енергія виробляється на електричних станціях синхронними машинами, то особливу увагу слід звернути на конструкцію ротора: неявнополюсну (турбогенератор) і явнополюсну (гідрогенератор). При навантаженні синхронної машини осі полюсів статора і ротора розходяться на кут що визначається навантаженням. Якщо цей кут досягає критичного значення, ротор випадає із синхронізму. При вивченні механічних і робочих характеристик синхронного двигуна необхідно звернути увагу на його перевантажувальну здатність, залежність коефіцієнта потужності від навантаження та струму збудження.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати будову синхронних машин з явно та неявно вираженими полюсами і принцип їх роботи в режимі генератора та двигуна; кутові, механічні та робочі характеристики; способи регулювання коефіцієнта потужності двигуна.

—Розуміти електромагнітні процеси в синхронних машинах; залежність моменту від кута між осями полюсів статора і ротора; роль короткозамкненої обмотки ротора трифазного синхронного двигуна.

—Вміти визначити конструкцію явно та неявнополюсної синхронної машини; оцінити вплив коефіцієнта потужності синхронного двигуна на економію електричної енергії.

Запитання для самоконтролю

—Будова, принцип роботи та призначення синхронних машин.

- Робота синхронної машини в режимі генератора. Основні співвідношення.
- На яких електростанціях використовують швидкохідні генератори, а на яких тихохідні? Чим це обумовлено?
- За якою формулою визначають частоту ЕРС синхронного генератора?
- Назвіть основні характеристики синхронного генератора, що працює на автономне навантаження.
- Як впливає реакція якоря при різних видах навантаження на електромагнітні процеси у синхронному генераторі?
- Що називають характеристикою неробочого ходу? Про які властивості синхронного генератора можна судити за цією характеристикою?
- Графіком якої залежності є зовнішня характеристика?
- Що таке регульовальна характеристика?
- Поясніть вплив реакції якоря при різних навантаженнях синхронного генератора на характер зовнішньої і регульовальної характеристик.
- Яким чином досягають синусоїдний розподіл магнітного поля у повітряному проміжку уздовж внутрішньої поверхні статора?
- Як можна регулювати частоту та величину напруги синхронного генератора?
- Як проводиться побудова векторних діаграм синхронного генератора при активному, активно-індуктивному та активно-ємнісному навантаженнях?
- Які необхідно виконати умови для правильної синхронізації синхронного генератора з мережею?
- Яким чином досягають необхідні умови синхронізації?
- У чому полягає суть способу грубої синхронізації?
- Яка умова статичної стійкої роботи синхронного генератора?
- Від чого залежить стійка робота синхронного генератора при заданій величині активної потужності?
- Принцип роботи синхронного двигуна. Основні рівняння.
- Основні характеристики синхронного двигуна.
- Назвіть основні способи пуску синхронних двигунів.
- Для чого використовують синхронний компенсатор?
- Чому потужний синхронний двигун без пускової обмотки не розвиває пусковий момент?

Тестові задачі до розділу «Синхронні машини»

10.1. Вольтметр, що під'єднаний до фазних затискачів синхронного генератора з внутрішнім опором обмотки якоря $0,2\text{ Ом}$, при неробочому ході показує 232 В . Визначити покази вольтметра у навантаженій фазі генератора струмами 50 А і 100 А при постійних ЕРС та опорі обмотки якоря. Визначити правильний варіант відповіді:

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. 222 В і 212 В . | 4. 190 В і 200 В . |
| 2. 200 В і 200 В . | 5. 240 В і 230 В . |
| 3. 230 В і 205 В . | |

10.2. Обмотка статора синхронного генератора з'єднана трикутником. Для вимірювання опору фазної обмотки використали два затискачі та джерело постійної напруги. Покази амперметра дорівнювали 1 А , вольтметра – 2 В . Визначити опір R кожної фазної обмотки. Визначити правильний варіант відповіді:

- | | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1. 1 Ом . | 2. 3 Ом . | 3. 4 Ом . | 4. 5 Ом . | 5. 6 Ом . |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|

10.3. Як зміниться швидкість обертання ротора трифазного синхронного двигуна при зменшенні: а) струму збудження на 5%; б) частоти напруги живлення на 5%?

Визначити правильний варіант відповіді:

- | |
|--|
| 1. а) залишиться без зміни; б) залишиться без зміни. |
| 2. а) зменшиться на 7%; б) залишиться без зміни. |
| 3. а) залишиться без зміни; б) зменшиться на 5%. |
| 4. а) зросте на 5%; б) зменшиться на 10%. |
| 5. а) зросте на 6%; б) зросте на 5%. |

10.4. Синхронний генератор має 12 пар полюсів і обертається зі швидкістю 1200 об/хв . Скільки раз за секунду змінює свій напрям струм, що протікає по фазній обмотці генератора?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 200. 2. 210. 3. 220. 4. 240. 5. 230.

10.5. Яку кількість обертів за хвилину можна допустити для ротора турбогенератора, якщо допустима лінійна швидкість $V_d = 50 \text{ м/с}$, а діаметр ротора $D = 1,1 \text{ м}$? Визначити правильний варіант відповіді:

1. 750об/хв. 2. 1000об/хв. 3. 1100об/хв. 4. 1200об/хв. 5. 869об/хв.

10.6. Визначити ЕРС фази синхронного генератора, якщо: $W_1 = 15$; $K_{\text{об1}} = 0,91$; $f = 50 \text{ Гц}$; $\Phi = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 12,1В. 2. 10В. 3. 15В. 4. 14,1В. 5. 13,1В.

10.7. Сумарна потужність втрат у синхронному двигуні $\Delta P = 0,2 \text{ кВт}$. Яку потужність споживає двигун із мережі, якщо $\eta = 0,95$? Визначити правильний варіант відповіді:

1. 2кВт. 2. 4кВт. 3. 6кВт. 4. 5кВт. 5. 1кВт.

10.8. Яке число полюсів $2p$ повинен мати синхронний генератор при частоті ЕРС $f = 50 \text{ Гц}$, якщо його ротор обертається зі швидкістю 300 об/хв ? Визначити правильний варіант відповіді:

1. 10. 2. 15. 3. 20. 4. 25. 5. 30.

10.9. Визначити корисну потужність, що віддає синхронний генератор за умови симетричного навантаження, якщо кут між векторами фазних напруги та струму $\varphi_\phi = 90^\circ$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 0,1. 2. 1. 3. 0,05. 4. 0. 5. 1,5.

10.10. При магнітному потоці $\Phi = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$ у фазі обмотки статора при неробочому ході синхронного генератора індукується ЕРС $E = 30 \text{ В}$ частотою $f = 50 \text{ Гц}$. Яке число витків W_1 фазної обмотки, якщо обмотковий коефіцієнт $K_{\text{об1}} = 0,91$?

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 10. 2. 20. 3. 15. 4. 18. 5. 28.

11. Машини постійного струму

Будова, принцип роботи та сфери використання машин постійного струму. Якірні обмотки та реакція якоря у машинах постійного струму. Комутація.

Класифікація генераторів постійного струму за способом збудження. Характеристики генераторів.

Двигуни постійного струму та їх характеристики. Пуск, регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи двигунів постійного струму.

Література: [1, с. 342-400; 2, с. 476-541; 3, с. 429-470; 4, с. 358-386; 5, с. 373-412.]

Методичні рекомендації до вивчення розділу

Вивчаючи будову і принцип роботи машин постійного струму необхідно звернути увагу на роль колектора в цих машинах, різні способи збудження.

Аналізуючи основні рівняння, що характеризують роботу машин постійного струму, необхідно усвідомити, що при незмінному струмі збудження ЕРС пропорційна швидкості обертання, а електромагнітний момент – струму якоря. Причини іскріння на колекторі пов'язані з реакцією якоря.

Зверніть увагу на можливість широкого, плавного і економічного регулювання швидкості обертання ротора двигунів постійного струму і використання цього в регульованих електроприводах.

Після вивчення цього розділу студенти повинні:

—Знати будову машин постійного струму і способи їх збудження; способи регулювання швидкості двигунів постійного струму та напруги генератора; як змінити напрям обертання якоря.

—Розуміти електромагнітні процеси в машинах постійного струму, роль послідовної обмотки збудження, особливості пуску двигунів постійного струму.

—Вміти під'єднати двигун постійного струму до мережі живлення, експериментально визначити характеристики двигуна, під'єднати колекторний двигун до мережі постійної і змінної напруги.

Запитання для самоконтролю

—Розкажіть будову та призначення основних частин машини постійного струму.

—Поясніть принцип роботи машини постійного струму в режимах генератора та двигуна.

- Поясніть фізичну суть явища реакції якоря.
- Поясніть явище комутації в машинах постійного струму.
- Як класифікують генератори постійного струму за способом увімкнення обмотки збудження?
- Назвіть основні способи покращення комутації.
- Напишіть рівняння, що характеризують роботу генератора постійного струму.
- Від яких величин залежить ЕРС обмотки якоря?
- Від яких величин залежить обертовий момент двигуна постійного струму?
- Назвіть основні характеристики генераторів постійного струму.
- Що називають характеристикою неробочого ходу і як її визначають експериментально?
- Які причини викликають пониження напруги генератора постійного струму при збільшенні навантаження?
- Яке значення має регульовальна характеристика для оцінки властивостей генератора постійного струму?
- Для чого служать головні та додаткові полюси в машинах постійного струму?
- Розкажіть будову та призначення колектора в машинах постійного струму.
- Поясніть явище самозбудження в генераторах постійного струму.
- Назвіть умови виникнення явища самозбудження.
- Як класифікують двигуни постійного струму за способом увімкнення обмотки збудження?
- Як здійснюють пуск і реверс двигунів постійного струму?
- Розкажіть про регулювання швидкості обертання та гальмівні режими роботи двигунів постійного струму.
- Що таке «рознос» двигуна постійного струму і чим він небезпечний?
- Як знімати основні характеристики двигуна постійного струму?
- Поясніть вигляд основних характеристик двигунів постійного струму.
- Який вплив чинить реакція якоря на характеристики двигуна та його роботу?
- Для чого потрібний двигунам постійного струму пусковий реостат і з яких міркувань вибирають величину його опору?

Тестові задачі до розділу «Машина постійного струму»

11.1. При збільшенні швидкості обертання генератора постійного струму в 2 рази ЕРС збільшилась на 50 В. Визначити початкову величину ЕРС E_n при номінальному незмінному потоці.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 50В. 2. 40В. 3. 55В. 4. 60В. 5. 70В.

11.2. У генераторі паралельного збудження $I_z = 3\text{ А}$. Визначити напругу U на затискачах генератора, якщо $R_z = 5\text{ Ом}$, опір регульовального реостата $R_p = 35\text{ Ом}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 100В. 2. 120В. 3. 90В. 4. 140В. 5. 150В.

11.3. Генератор паралельного збудження має напругу на затискачах $U = 240\text{ В}$ при струмі навантаження $I = 150\text{ А}$. Опір кола обмотки збудження $R_z = 57,6\text{ Ом}$, а опір кола якоря $R_{я} = 0,15\text{ Ом}$. Втрати у сталі в цьому режимі дорівнюють $P_c = 2800\text{ Вт}$, а механічні та додаткові $P_m = 1200\text{ Вт}$. Визначити потужність первинного двигуна P_1 і ККД генератора η .

Визначити правильний варіант відповіді:

1. $P_1 = 30000\text{ Вт}$; $\eta = 0,6$. 4. $P_1 = 45000\text{ Вт}$; $\eta = 0,9$.
 2. $P_1 = 40000\text{ Вт}$; $\eta = 0,7$. 5. $P_1 = 50000\text{ Вт}$; $\eta = 0,95$.
 3. $P_1 = 44565\text{ Вт}$; $\eta = 0,81$.

11.4. Визначити номінальну швидкість обертання двигуна постійного струму послідовного збудження за паспортними даними: $P_H = 1414\text{ кВт}$; $U_H = 440\text{ В}$; $\eta_H = 0,83$, якщо задано $R_{я} = 0,3\text{ Ом}$, $R_z = 0,7\text{ Ом}$, $c_E \Phi = 0,4\text{ Вб}$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. 800об/хв. 2. 900об/хв. 3. 1000об/хв. 4. 1196об/хв. 5. 1300об/хв.

11.5. Визначити потужність P_1 , яку споживає двигун паралельного збудження при номінальному навантаженні, якщо $U_H = 110\text{ В}$, $I_{яH} = 10\text{ А}$, $R_3 = 110\text{ Ом}$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. 950Вт. 2. 1000Вт. 3. 1100Вт. 4. 1300Вт. 5. 1210Вт.

11.6. Визначити номінальну потужність генератора з паралельним збудженням при заданих параметрах: $U_H = 110\text{ В}$, $I_{яH} = 10\text{ А}$, $R_3 = 110\text{ Ом}$. Визначити правильний варіант відповіді:

1. 990Вт. 2. 800Вт. 3. 750Вт. 4. 1100Вт. 5. 1200Вт.

11.7. Визначити опір обмотки якоря двигуна постійного струму з паралельним збудженням і номінальними даними: $U_H = 110\text{ В}$, $I_{яH} = 50\text{ А}$, $E_{яH} = 105\text{ В}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 0,01Ом. 2. 0,1Ом. 3. 0,2Ом. 4. 0,3Ом. 5. 0,4Ом.

11.8. Двигун послідовного збудження вмикається на напругу 220 В через пусковий реостат $1,7\text{ Ом}$.

Визначити кратність пускового струму, якщо: $I_H = 50\text{ А}$, $R_{я} = 0,1\text{ Ом}$, $R_3 = 0,4\text{ Ом}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 1. 2. 1,5. 3. 2. 4. 3. 5. 4.

11.9. Визначити обертовий момент двигуна постійного струму, якщо задано: $c = \frac{pN}{2\pi a} = 100$;

$\Phi = 2 \cdot 10^{-2}\text{ Вб}$; $I_{я} = 250\text{ А}$.

Визначити правильний варіант відповіді:

1. 200Нм. 2. 300Нм. 3. 400Нм. 4. 500Нм. 5. 600Нм.

Завдання на КПЗ №1
«Електричні кола постійного струму»
та методичні рекомендації до її виконання

Задача 1.1. В електричному колі, схема якого наведена на рис. 1.1а, визначити струм I джерела живлення, якщо відомі: $E, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$. Вихідні дані наведені в табл.1.1.

Таблиця 1.1

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Вихідні дані до задачі 1.1									
	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E, В$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$R_1, Ом$	12	8	10	19	8	10	21	16	20	22
$R_2, Ом$	8	7	4	8	10	4	5	6	9	8
$R_3, Ом$	10	6	4	5	8	9	11	12	14	16
$R_4, Ом$	4	10	8	6	4	5	8	9	10	12
$R_5, Ом$	6	7	9	8	11	10	13	12	14	15
$R_6, Ом$	18	21	23	20	24	22	14	15	19	18

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 1.1. В електричному колі, схема якого наведена на рис. 1.1, а, визначити струм I джерела живлення, якщо: $E = 40 В$, $R_1 = R_2 = 6 Ом$, $R_5 = R_4 = 4 Ом$, $R_3 = 2 Ом$, $R_6 = 3 Ом$.

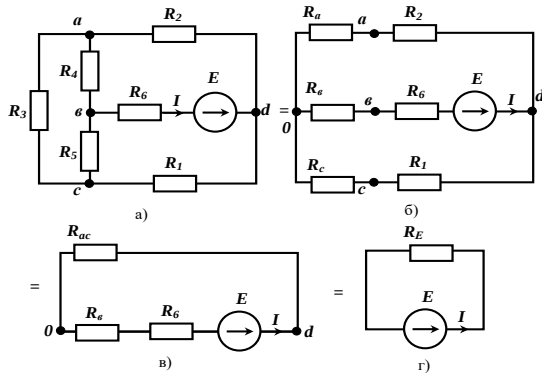


Рис. 1.1. Схема електричного кола (а) та схеми його послідовного перетворення (б, в, г.)

Розв'язування. Оскільки в електричному колі одне джерело живлення, то задачу розв'язуватимемо методом перетворення (рис. 1.1). Для визначення еквівалентного опору відносно затисків джерела замінимо трикутник опорів R_3, R_4, R_5 еквівалентною зіркою з опорами R_a, R_b, R_c :

$$R_a = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4 + 4} = 0,8 Ом; \quad R_b = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{4 \cdot 4}{2 + 4 + 4} = 1,6 Ом;$$

$$R_c = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_3 + R_4 + R_5} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4 + 4} = 0,8 Ом.$$

Визначимо опір R_{ac} двох паралельних віток a і c (рис.1.1,в):

$$R_{ac} = \frac{(R_a + R_2)(R_c + R_1)}{R_a + R_2 + R_c + R_1} = \frac{(0,8 + 6)(0,8 + 6)}{0,8 + 6 + 0,8 + 6} = 3,4 Ом.$$

Еквівалентний опір R_E (рис.1.1,г) електричного кола відносно затисків джерела живлення дорівнює:

$$R_E = R_b + R_{ac} = 3 + 1,6 + 3,4 = 8 Ом.$$

Величину струму I визначимо за формулою:

$$I = \frac{E}{R_E} = \frac{40}{8} = 5 А.$$

Задача 1.2. На рис.1.2,а наведена схема електричного кола з мішаним з'єднанням резисторів, величини опорів яких дорівнюють: $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$.

Визначити ЕРС E джерела, якщо воно віддає в електричне коло струм I . Вихідні дані наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2

Вихідні дані до задачі 1.2

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I , А	2	1,4	2,8	1,2	3	1,5	2,5	2	2,4	1,6
R_1 , Ом	25	4	10	12	18	15	8	16	14	16
R_2 , Ом	15	2	4	7	6	12	5	9	10	8
R_3 , Ом	12	5	11	15	14	13	11	18	8	10
R_4 , Ом	14	3	10	8	11	16	18	12	9	6
R_5 , Ом	16	10	20	22	21	20	24	14	23	25
R_6 , Ом	10	8	4	4	4	5	4	5	4	5

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 1.2. На рис. 1.2 наведена схема електричного кола з мішаним з'єднанням резисторів, величини опорів яких дорівнюють: $R_1 = 25\text{Ом}$, $R_2 = 15\text{Ом}$, $R_3 = R_4 = R_5 = 5\text{Ом}$, $R_6 = 10\text{Ом}$.

Визначити ЕРС E джерела, якщо воно віддає в електричне коло струм $I = 2,78\text{А}$.

Розв'язування. Визначимо еквівалентний опір R_E кола відносно затискачів джерела. Для цього перетворимо ділянки кола, що з'єднані зіркою (опори R_4, R_5, R_6), в еквівалентний трикутник із опорами R_{ad}, R_{dc}, R_{ca} :

$$R_{ad} = R_4 + R_6 + \frac{R_4 \cdot R_6}{R_5} = 5 + 10 + \frac{5 \cdot 10}{5} = 25\text{Ом}; R_{dc} = R_5 + R_6 + \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4} = 5 + 10 + \frac{5 \cdot 10}{5} = 25\text{Ом};$$

$$R_{ca} = R_4 + R_5 + \frac{R_4 \cdot R_5}{R_6} = 5 + 5 + \frac{5 \cdot 5}{10} = 12,5\text{Ом}.$$

Далі послідовним перетворенням схему, зображену на рис. 1.2,б, замінимо нерозгалуженим електричним колом з одним еквівалентним опором R_E і джерелом E

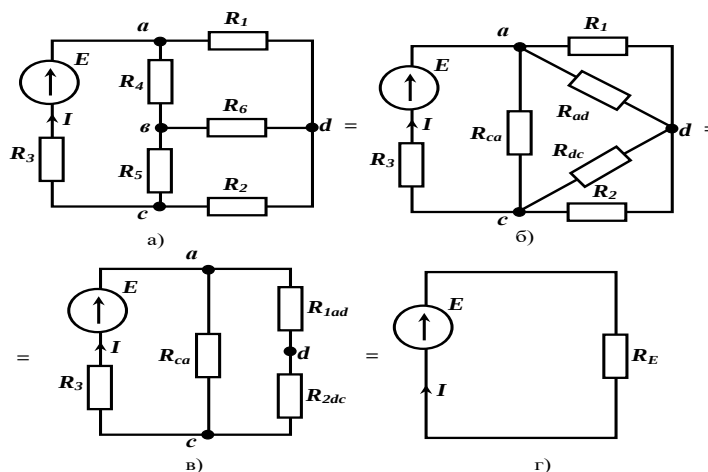


Рис. 1.2. Схема електричного кола (а) та схеми його послідовного перетворення (б, в, г)

$$R_{1ad} = \frac{R_1 \cdot R_{ad}}{R_1 + R_{ad}} = \frac{25 \cdot 25}{25 + 25} = 12,5\text{Ом};$$

$$R_{2dc} = \frac{R_2 \cdot R_{dc}}{R_2 + R_{dc}} = \frac{15 \cdot 25}{15 + 25} = 9,375\text{Ом};$$

$$R_E = R_3 + \frac{R_{ca}(R_{1ad} + R_{2dc})}{R_{ca} + R_{1ad} + R_{2dc}} = \frac{12,5(12,5 + 9,375)}{12,5 + 12,5 + 9,375} = 12,955\text{Ом}$$

ЕРС E джерела визначимо за формулою:

$$E = R_E \cdot I = 12,955 \cdot 2,78 = 36\text{В}.$$

Задача 1.3. В електричному колі, схема якого зображена на рис. 1.3, відомі ЕРС джерел і опори резисторів. Визначити струми у вітках і режими роботи кожного джерела. Скласти баланс потужностей. Задачу розв'язати трьома методами: методом законів Кірхгофа, методом вузлової напруги та методом контурних струмів. Параметри електричного кола: $E_1, E_2, E_3, R_1, R_2, R_3, R_4$, наведені в таблиці 1.3.

Вихідні дані до задачі 1.3

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_1, В$	120	120	220	120	120	220	120	300	400	200
$E_2, В$	220	200	150	220	180	150	190	200	300	400
$E_3, В$	140	160	180	200	220	160	150	170	250	300
$R_1, Ом$	2	1	5	4	5	2	1	5	4	2
$R_2, Ом$	1	2	4	2	1	4	3	2	1	5
$R_3, Ом$	4	4	2	1	2	5	4	2	1	2
$R_4, Ом$	5	7	1	5	4	1	5	1	6	4

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 1.3. В електричному колі, схема якого зображена на рис. 1.3, відомі ЕРС джерел і опори резисторів. Визначити струми у вітках і режими роботи кожного джерела. Скласти баланс потужностей. Задачу розв'язати трьома методами: методом законів Кірхгофа, методом вузлової напруги та методом контурних струмів. Параметри електричного кола: $E_1 = 200 В$, $E_2 = 400 В$, $E_3 = 120$, $R_1 = 2 Ом$, $R_2 = 4 Ом$, $R_3 = 5 Ом$, $R_4 = 1 Ом$.

Розв'язування. *Метод законів Кірхгофа*

Задаємося довільним напрямом струмів у вітках так, як зображено на рис. 1.3. Записуємо рівняння за першим законом Кірхгофа для вузла $в$

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0. \quad (1.3.1)$$

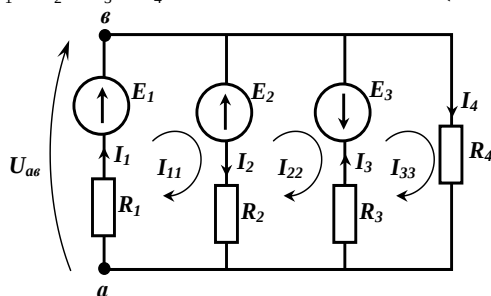


Рис.1.3. До прикладу 1.3

Число рівнянь за першим законом Кірхгофа дорівнює на одиницю менше від числа вузлів ($2-1=1$). Тому решту рівнянь запишемо на основі другого закону Кірхгофа:

$$\begin{aligned} -I_1 R_1 + E_1 - E_2 - I_2 R_2 &= 0; \\ I_2 R_2 + E_2 + E_3 + I_3 R_3 &= 0; \\ -I_3 R_3 - E_3 - I_4 R_4 &= 0. \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

Розв'язуємо спільно системи рівнянь (1.3.1) і (1.3.2) відносно невідомих струмів. Для зменшення кількості рівнянь системи з рівняння (1.3.1) визначимо струм $I_1 = I_2 - I_3 + I_4$ і підставимо його в систему рівнянь (1.3.2):

$$\begin{aligned} -(I_2 - I_3 + I_4) R_1 + E_1 - E_2 - I_2 R_2 &= 0; \\ I_2 R_2 + E_2 + E_3 + I_3 R_3 &= 0; \\ -I_3 R_3 - E_3 - I_4 R_4 &= 0. \end{aligned} \quad (1.3.3)$$

Підставимо числові значення у систему рівнянь (1.3.3) і зведемо її до вигляду, зручного для розв'язування:

$$\begin{aligned} -6I_2 + 2I_3 - 2I_4 &= 200; \\ 4I_2 + 5I_3 &= -520; \\ -5I_3 - I_4 &= 120. \end{aligned}$$

Рівняння для довільного струму I_k буде мати вигляд:

$$I_k = \frac{\Delta_k}{\Delta},$$

де Δ - визначник системи. Визначник Δ_k отримують із визначника Δ внаслідок заміни опорів k -го стовпця на стовпець правих частин:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -6 & 2 & -2 \\ 4 & 5 & 0 \\ 0 & -5 & -1 \end{vmatrix} = 78; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} 200 & 2 & -2 \\ -520 & 5 & 0 \\ 120 & -5 & -1 \end{vmatrix} = -6040;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} -6 & 200 & -2 \\ 4 & -520 & 0 \\ 0 & 120 & -1 \end{vmatrix} = -3280; \quad \Delta_4 = \begin{vmatrix} -6 & 2 & 200 \\ 4 & 5 & -520 \\ 0 & -5 & 120 \end{vmatrix} = 7040;$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-6040}{78} = -77,43 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-3280}{78} = -42,05 \text{ A};$$

$$I_4 = \frac{\Delta_4}{\Delta} = \frac{7040}{78} = 90,25 \text{ A};$$

$$I_1 = I_2 - I_3 + I_4 = -77,43 + 42,5 + 90,25 = 54,87 \text{ A}.$$

Метод вузлової напруги

Задаємося напрямками струмів і міжвузлової напруги U_{ae} так, як зображено на рис. 1.3.

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для контурів так, щоб у кожне рівняння входила напруга U_{ae} і одна вітка електричного кола:

$$U_{ae} - E_1 + I_1 R_1 = 0; \quad U_{ae} - E_2 + I_2 R_2 = 0;$$

$$U_{ae} + E_3 + I_3 R_3 = 0; \quad U_{ae} - I_4 R_4 = 0.$$

Із кожного рівняння створеної системи визначимо струм:

$$I_1 = \frac{-U_{ae} + E_1}{R_1} = -g_1 U_{ae} + g_1 E_1, \text{ де } g_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ Ом}^{-1};$$

$$I_2 = \frac{U_{ae} - E_2}{R_2} = g_2 U_{ae} - g_2 E_2,$$

$$\text{де } g_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ Ом}^{-1};$$

$$I_3 = \frac{-U_{ae} - E_3}{R_3} = -g_3 U_{ae} - g_3 E_3, \text{ де } g_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ Ом}^{-1};$$

$$I_4 = \frac{U_{ae}}{R_4} = g_4 U_{ae}, \text{ де } g_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{1} = 1 \text{ Ом}^{-1}.$$

За першим законом Кірхгофа запишемо рівняння для вузла e

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

і підставимо в нього значення струмів

$$-g_1 U_{ae} + g_1 E_1 - g_2 U_{ae} + g_2 E_2 - g_3 U_{ae} - g_3 E_3 - g_4 U_{ae} = 0.$$

З останнього рівняння визначимо напругу U_{ae}

$$U_{ae} = \frac{g_1 E_1 + g_2 E_2 - g_3 E_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} = \frac{0,5 \cdot 200 + 0,25 \cdot 400 - 0,2 \cdot 120}{0,5 + 0,25 + 0,2 + 1} = 90,26 \text{ В.}$$

За відомою напругою U_{ae} визначаємо струми у вітках:

$$I_1 = -g_1 U_{ae} + g_1 E_1 = -0,5 \cdot 90,26 + 0,5 \cdot 200 = 54,87 \text{ A};$$

$$I_2 = g_2 U_{ae} - g_2 E_2 = 0,25 \cdot 90,26 - 0,25 \cdot 400 = -77,43 \text{ A};$$

$$I_3 = -g_3 U_{ae} - g_3 E_3 = -0,2 \cdot 90,26 - 0,2 \cdot 120 = -42,05 \text{ A};$$

$$I_4 = g_4 U_{ae} = 1 \cdot 90,26 = 90,26 \text{ A}.$$

Метод контурних струмів

Задаємося напрямками струмів у вітках і контурних струмів так, як це зображено на рис. 1.3.

На основі загальної форми запису рівнянь методом контурних струмів запишемо систему рівнянь контурних струмів для схеми (рис. 1.3), що має три незалежні контури:

$$R_{11} I_{11} + R_{12} I_{22} + R_{13} I_{33} = E_{11};$$

$$R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} + R_{23} I_{33} = E_{22}; \quad (1.3.4)$$

$$R_{31} I_{11} + R_{32} I_{22} + R_{33} I_{33} = E_{33},$$

де

$$\begin{aligned}E_{11} &= E_1 - E_2 = 200 - 400 = -200; & R_{33} &= R_3 + R_4 = 5 + 1 = 6; \\E_{22} &= E_2 + E_3 = 400 + 120 = 520; & R_{12} &= R_{21} = -R_2 = -4; \\E_{33} &= -E_3 = -120; & R_{23} &= R_{32} = -R_3 = -5; \\R_{11} &= R_1 + R_2 = 2 + 4 = 6; & R_{13} &= R_{31} = 0; \\R_{22} &= R_2 + R_3 = 4 + 5 = 9;\end{aligned}\quad (1.3.5)$$

Підставимо числові значення (1.3.5) в систему (1.3.4) :

$$\begin{aligned}6I_{11} - 4I_{22} &= -200; \\-4I_{11} + 9I_{22} - 5I_{33} &= 520; \\-5I_{22} + 6I_{33} &= -120.\end{aligned}\quad (1.3.6)$$

Розв'яжемо систему (1.3.6) відносно невідомих контурних струмів:

$$\begin{aligned}\Delta &= \begin{vmatrix} 6 & -4 & 0 \\ -4 & 9 & -5 \\ 0 & -5 & 6 \end{vmatrix} = 78; & \Delta_1 &= \begin{vmatrix} -200 & -4 & 0 \\ 520 & 9 & -5 \\ -120 & -5 & 6 \end{vmatrix} = 4280; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} 6 & -200 & 0 \\ -4 & 520 & -5 \\ 0 & -120 & 6 \end{vmatrix} = 10320; & \Delta_3 &= \begin{vmatrix} 6 & -4 & -200 \\ -4 & 9 & 520 \\ 0 & -5 & -120 \end{vmatrix} = 7040; \\ I_{11} &= \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{4280}{78} = 54,87 \text{ A}; & I_{33} &= \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{7040}{78} = 90,26 \text{ A}; \\ I_{22} &= \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{10320}{78} = 132,3 \text{ A}.\end{aligned}$$

Визначаємо дійсні струми у вітках за відомими контурними струмами:

$$\begin{aligned}I_1 &= I_{11} = 54,87 \text{ A}; & I_2 &= I_{11} - I_{22} = 54,8 - 132,3 = -77,43 \text{ A}; \\ I_3 &= I_{33} - I_{22} = 90,26 - 132,3 = -42,05 \text{ A}; & I_4 &= I_{33} = 90,26 \text{ A}.\end{aligned}$$

У результаті розрахунків бачимо, що дійсні напрями струмів у вітках співпадають з напрямками відповідних ЕРС. Отже, всі джерела ЕРС працюють у режимі віддачі енергії (генераторний режим, а для акумуляторів – режим розрядки).

Рівняння балансу потужності має вигляд:

$$\begin{aligned}E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 &= R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2; \\ E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 &= 200 \cdot 54,87 + 400 \cdot 77,43 + 120 \cdot 42,5 = 47046 \text{ Вт}; \\ R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 &= 2 \cdot 54,87^2 + 4 \cdot 77,43^2 + 5 \cdot 42,05^2 + 1 \cdot 90,25^2 = \\ &= 46989,13 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Підставивши числові значення, переконуємося, що рівняння балансу потужностей підтверджується:
 $47046 \approx 46989,13$.

Похибка обчислень становить 0,12%.

Завдання на КПЗ №2

„Електричні кола синусоїдного струму” та методичні рекомендації до її виконання

Задача 2.1. У коло синусоїдного струму частотою f

(рис. 2.1) ввімкнено послідовно дві котушки індуктивності та конденсатор. Визначити струм, напругу на елементах кола, резонансну частоту. Скласти баланс активних і реактивних потужностей, якщо прикладена напруга U , а параметри елементів дорівнюють: R_1 , L_2, L_1 , C , R_2 . Побудувати топографічну векторну діаграму напруг. Задачу розв'язати комплексним методом.

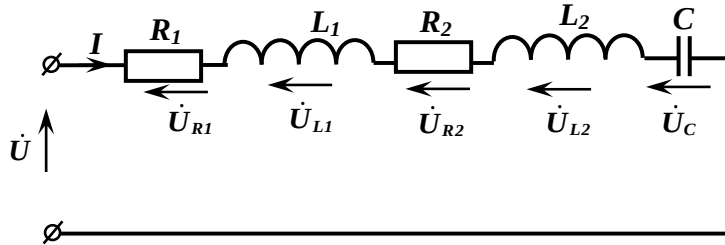


Рис.2.1. До прикладу 2.1

Таблиця.2.1

Вихідні дані до задачі 2.1

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
U, В	50	40	60	30	70	80	90	70	80	100
R ₁ , Ом	4	3	4	5	6	3	5	6	4	5
R ₂ , Ом	5	4	5	3	4	6	3	5	8	9
L ₁ · 10 ⁻³ Гн	32	16	20	25	19	96	19	35	38	29
L ₂ · 10 ⁻³ Гн	19	32	96	22	26	28	12,7	28	25	39
C, мкФ	320	500	400	400	320	350	450	550	400	500

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 2.1. У коло синусоїдного струму частотою $f = 50 \text{ Гц}$ (рис. 2.1) ввімкнено послідовно дві котушки індуктивності та конденсатор. Визначити струм, напругу на елементах кола, резонансну частоту. Скласти баланс активних і реактивних потужностей, якщо прикладена напруга $U = 70 \text{ В}$, а параметри елементів дорівнюють: $R_1 = 4 \text{ Ом}$; $L_2 = L_1 = 0,032 \text{ Гн}$; $C = 320 \text{ мкФ}$; $R_2 = 6 \text{ Ом}$. Побудувати топографічну векторну діаграму напруг. Задачу розв'язати комплексним методом.

Розв'язування. Визначаємо реактивні опори елементів:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}; \quad X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 0,032 = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 0,032 = 10 \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 320 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом}.$$

Повний опір електричного кола дорівнює:

$$\underline{Z} = (R_1 + R_2) + j(X_{L1} + X_{L2} - X_C) = (4 + 6) + j(10 + 10 - 10) = 14,14e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Визначаємо струм:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{70}{14,14e^{j45^\circ}} = 4,95e^{-j45^\circ} \text{ А}$$

Спади напруг на елементах електричного кола визначимо за формулами:

$$\underline{U}_{R1} = \underline{I} \cdot R_1 = 4,95e^{-j45^\circ} \cdot 4 = 19,8e^{-j45^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{L1} = \underline{I} \cdot jX_{L1} = 4,95e^{-j45^\circ} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 10 = 49,5e^{j45^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{R2} = \underline{I} \cdot R_2 = 4,95e^{-j45^\circ} \cdot 6 = 29,7e^{-j45^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{I} \cdot jX_{L2} = 4,95e^{-j45^\circ} \cdot e^{j90^\circ} \cdot 10 = 49,5e^{j45^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_C = \underline{I} \cdot (-j) \cdot X_C = 4,95e^{-j45^\circ} \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 10 = 49,5e^{-j135^\circ} \text{ В}.$$

За даними розрахунків будуюмо топографічну векторну діаграму (рис.2.2). Для побудови векторної діаграми вибираємо масштаби $m_U = 10 \text{ В/см}$, $m_I = 1 \text{ А/см}$.

Комплексна потужність джерела

$$\tilde{S}_d = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = 70 \cdot 4,95e^{j45^\circ} = 346,5e^{j45^\circ} = (244,98 + j244,98) \text{ ВА}.$$

Отже, активна потужність джерела P_d і реактивна - Q_d дорівнюють: $P_d = 244,98 \text{ Вт}$;

$$Q_d = 244,98 \text{ ВАр}.$$

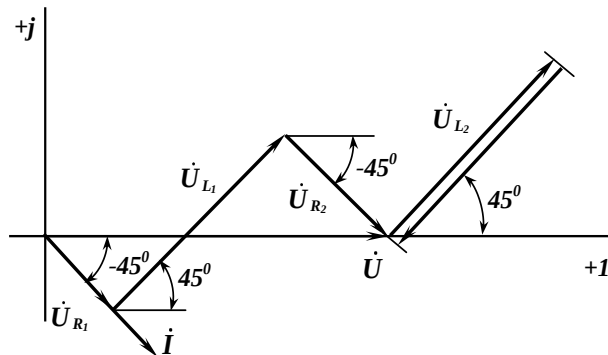


Рис.2.2. Векторна діаграма схеми, зображеної на рис. 2.1

Визначаємо активну P_c і реактивну Q_c потужності споживача:

$$P_c = I^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 4,95^2 (4 + 6) = 245 \text{ Вт}$$

$$Q_c = I^2 X_{L1} + I_2^2 X_{L2} - I^2 X_C = 4,95^2 (10 + 10 - 10) = 245 \text{ ВАр};$$

Складаємо баланс активних і реактивних потужностей:

$$P_d = P_c; 244,98 \approx 245. \text{ Похибка обчислень становить } 0,008\%.$$

$$Q_d = Q_c; 244,98 \approx 245. \text{ Похибка обчислень становить } 0,008\%.$$

Визначаємо резонансну частоту:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14\sqrt{(0,032 + 0,032) \cdot 320 \cdot 10^{-6}}} = 35,15 \text{ Гц}.$$

Задача 2.2. Дві паралельні вітки (рис.2.2.1) під'єднані до джерела синусоїдної напруги U , частотою f . Визначити струми у вітках і нерозгалуженій частині кола, якщо параметри елементів кола дорівнюють: R_1 ; R_2 ; L ; C . Побудувати векторну діаграму струмів. Визначити резонансну частоту. Скласти баланс потужностей.

Розв'язування провести комплексним методом. Вихідні дані наведені в табл.2.2.

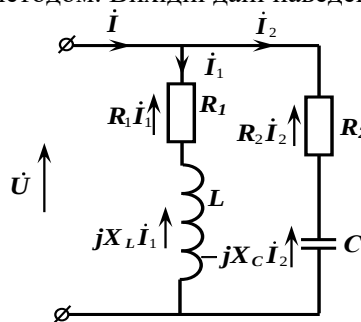


Рис. 2.2.1. Схема електричного кола до прикладу 2.2

Таблиця 2.2

Вихідні дані до задачі 2.2

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, \text{Ом}$	3	8	9	2	10	7	4	7	5	6
$L \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$	16	12	32	38	10	15	20	25	30	18
$R_2, \text{Ом}$	17	18	20	26	19	23	25	21	24	22
$C, \text{мкФ}$	200	800	400	900	300	1000	500	1200	600	700
$U, \text{В}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$f, \text{Гц}$	50	60	70	120	80	200	90	400	100	250

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 2.2. Дві паралельні вітки (рис.2.2.1) під'єднані до джерела синусоїдної напруги $U = 40 \text{ В}$, частотою 50 Гц . Визначити струми у вітках і нерозгалуженій частині кола, якщо параметри елементів кола дорівнюють: $R_1 = 6 \text{ Ом}$; $R_2 = 8 \text{ Ом}$; $L = 0,0127 \text{ Гн}$; $C = 400 \text{ мкФ}$. Побудувати векторну діаграму струмів. Визначити резонансну частоту. Скласти баланс потужностей.

Розв'язування провести комплексним методом.

Розв'язування. Визначаємо реактивні опори елементів:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}; \quad X_L = \omega L = 314 \cdot 0,0127 = 4 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 400 \cdot 10^{-6}} = 8 \text{ Ом}.$$

Повні опори віток:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_L = 6 + j4 = 7,2e^{j33,25^\circ} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_2 = R_2 - jX_C = 8 - j8 = 11,3e^{-j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Еквівалентний опір електричного кола:

$$\underline{Z}_E = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{7,2e^{j33,25^\circ} 11,3e^{-j45^\circ}}{6 + j4 + 8 - j8} = \frac{81,36e^{-j11,75^\circ}}{14,56e^{-j16^\circ}} = 5,59e^{j4,25^\circ} \text{ Ом}.$$

Визначаємо струми у вітках:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_E} = \frac{40}{5,59e^{j4,25^\circ}} = 7,16e^{-j4,25^\circ} \text{ А}; \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{40}{7,2e^{j33,25^\circ}} = 5,56e^{-j33,25^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{40}{11,3e^{-j45^\circ}} = 3,54e^{j45^\circ} \text{ А}.$$

Для побудови векторної діаграми вибираємо масштаби $m_U = 10 \text{ В/см}$; $m_I = 1 \text{ А/см}$. Векторна діаграма наведена на рис.2.2.2.

Комплексна потужність джерела:

$$\tilde{S}_d = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = 40 \cdot 7,16e^{j4,25^\circ} = 286,4e^{j4,25^\circ} = (285,4 + j23,2) \text{ ВА}.$$

Активна потужність джерела дорівнює $P_d = 285,4 \text{ Вт}$, а реактивна - $Q_d = 23,2 \text{ ВАр}$

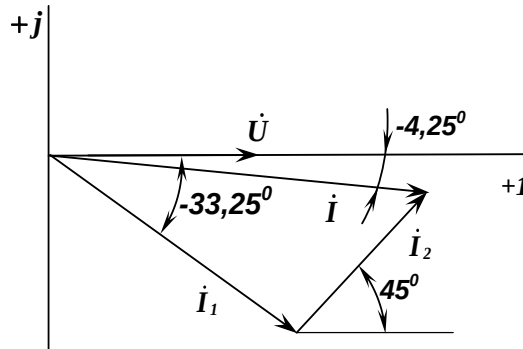


Рис.2.2.2. Векторна діаграма схеми, зображеної на рис. 2.2.1

Визначаємо активну P_C і реактивну Q_C потужності споживача:

$$P_C = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 5,56^2 \cdot 6 + 3,54^2 \cdot 8 = 285,73 \text{ Вт};$$

$$Q_C = I_1^2 X_L - I_2^2 X_C = 5,56^2 \cdot 4 - 3,54^2 \cdot 8 = 23,4 \text{ ВАр}.$$

Складаємо баланс активних і реактивних потужностей:

$$P_d = P_C; \quad 285,4 \approx 285,73. \text{ Похибка обчислень становить } 0,12\%.$$

$$Q_d = Q_C; \quad 23,2 \approx 23,4. \text{ Похибка обчислень становить } 0,86\%.$$

Визначаємо резонансну частоту:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{0,0127 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{0,0127}{400 \cdot 10^{-6}} - 6^2}{\frac{0,0127}{400 \cdot 10^{-6}} - 8^2}} = 25,7 \text{ Гц}.$$

Задача 2.3. Трифазний споживач з нейтральним провідником і несиметричним навантаженням під'єднаний до трифазної мережі з лінійною напругою U_λ . Навантаження фаз споживача дорівнюють: $\underline{Z}_{\text{фа}}$; $\underline{Z}_{\text{фа}}$; $\underline{Z}_{\text{фс}}$. Нарисувати заступну схему електричного кола. Визначити фазні та лінійні струми, струм у нейтральному провіднику, а також споживану активну потужність. Визначити вказані параметри при обриві нейтрального провідника. Побудувати векторні діаграми напруг і струмів для обох випадків. Вихідні дані наведені в табл.2.3.

Вихідні дані до задачі 2.3

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Z_{\phi a}, \text{Ом}$	22-j7	23-j6	24-j8	25-j9	20-j10	18-j14	27-j10	16-j12	19-j16	24-j6
$Z_{\phi b}, \text{Ом}$	22	20	18	24	19	21	23	20	18	16
$Z_{\phi c}, \text{Ом}$	30+j16	32+j18	36+j14	34+j12	38+j28	40+j20	42+j26	48+j32	44+j35	45+j40

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 2.3. Трифазний споживач з нейтральним провідником і несиметричним навантаженням під'єднаний до трифазної мережі з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$. Навантаження фаз споживача: $Z_{\phi a} = (26,5 - j7) \text{ Ом}$; $Z_{\phi b} = 22 \text{ Ом}$; $Z_{\phi c} = (34,5 + j16) \text{ Ом}$. Нарисувати заступну схему електричного кола. Визначити фазні та лінійні струми, струм у нейтральному провіднику, а також споживану активну потужність. Визначити вказані параметри при обриві нейтрального провідника. Побудувати векторні діаграми напруг і струмів для обох випадків.

Розв'язування. Заступна схема електричного кола наведена на рис.2.3.1.

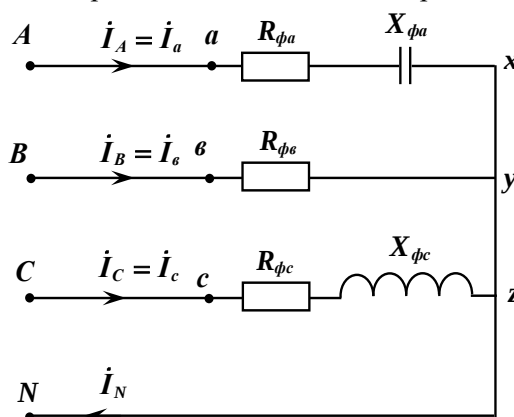


Рис.2.3.1. Заступна схема електричного кола до прикладу 2.3

Величини фазних напруг дорівнюють:

$$U_{\phi a} = U_{\phi b} = U_{\phi c} = U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В},$$

або в комплексній формі:

$$\dot{U}_a = U_{\phi} = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = U_{\phi} e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} = (-110 - j190,5) \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = U_{\phi} e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} = (-110 + j190,5) \text{ В}.$$

При наявності нейтрального провідника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C; \quad U_a = U_b = U_c = U_{\phi} = 220 \text{ В}.$$

Повні опори фаз і кути зсуву фаз між фазними напругами та струмами визначаємо за формулами:

$$Z_a = \sqrt{R_{\phi a}^2 + X_{\phi a}^2} = \sqrt{26,5^2 + 7^2} = 27,4 \text{ Ом};$$

$$\varphi_a = \arctg \frac{-X_{\phi a}}{R_{\phi a}} = \arctg \frac{-7}{26,5} = -14,8^\circ$$

$$Z_b = R_{\phi b} = 22 \text{ Ом}; \quad \varphi_b = 0^\circ; \quad Z_c = \sqrt{R_{\phi c}^2 + X_{\phi c}^2} = \sqrt{34,5^2 + 16^2} = 38 \text{ Ом};$$

$$\varphi_c = \arctg \frac{X_{\phi c}}{R_{\phi c}} = \arctg \frac{16}{34,5} = 24,9^\circ.$$

Фазні струми (вони ж і лінійні) визначимо за формулами:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220}{27,4e^{-j14,8^\circ}} = 8e^{j14,8^\circ} = (7,75 + j2)A;$$

$$\dot{I}_e = \frac{\dot{U}_e}{\underline{Z}_e} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22} = 10e^{-j120^\circ} = (-5 - j8,65)A;$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^\circ}}{38e^{j24,9^\circ}} = 5,8e^{j95,1^\circ} = (-0,5 + j5,77)A.$$

Струм у нейтральному провіднику дорівнює:

$$\begin{aligned}\dot{I}_N &= \dot{I}_a + \dot{I}_e + \dot{I}_c = 7,75 + j2 - 5 - j8,65 - 0,5 + j5,77 = 2,25 - j0,82 = \\ &= 2,39e^{-j20^\circ} A;\end{aligned}$$

На рис.2.3.2, а побудована векторна діаграма напруг і струмів з прийнятими масштабами: $m_U = 50B/см$, $m_I = 4A/см$.

Споживані активні потужності дорівнюють:

$$P_a = U_a I_a \cos \varphi_a = 220 \cdot 8 \cdot \cos(-14,8^\circ) = 1700Bm;$$

$$P_e = U_e I_e \cos \varphi_e = 220 \cdot 10 \cdot \cos 0 = 2200Bm;$$

$$P_c = U_c I_c \cos \varphi_c = 220 \cdot 5,8 \cdot \cos 24,9^\circ = 1157Bm;$$

$$P = P_a + P_e + P_c = 1700 + 2200 + 1157 = 5057Bm.$$

При обриві нейтрального провідника величини фазних напруг будуть різними, оскільки навантаження фаз споживача несиметричне.

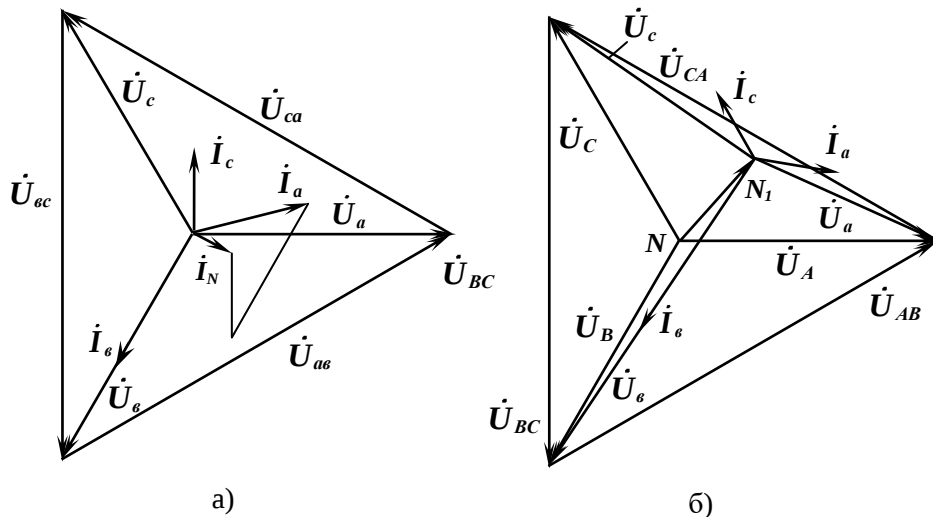


Рис.2.3.2. Векторні діаграми до прикладу 2.3 з нейтральним (а) та без нейтрального (б) провідника

Для визначення фазних напруг необхідно визначити комплексні повні провідності фаз $\underline{Y}_a, \underline{Y}_e, \underline{Y}_c$ і напругу між нейтральними точками $\dot{U}_N$:

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = \frac{1}{26,5 - j7} = \frac{26,5 + j7}{26,5^2 + 7^2} = (0,0353 + j0,0093)Cм;$$

$$\underline{Y}_e = \frac{1}{\underline{Z}_e} = \frac{1}{22} = 0,0455Cм;$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{34,5 - j16} = \frac{34,5 + j16}{34,5^2 + 16^2} = (0,0239 - j0,0111)Cм;$$

$$\begin{aligned}\underline{Y}_a + \underline{Y}_e + \underline{Y}_c &= 0,0352 + j0,0093 + 0,0455 + 0,0239 - j0,0111 = \\ &= 0,1047 - j0,0018;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_N &= \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_A + \underline{Y}_b \dot{U}_b + \underline{Y}_c \dot{U}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{(0,0353 + j0,0093)220}{0,1047 - j0,0018} + \\ &+ \frac{0,00455(-110 - j190,5) + (0,0239 - j0,0111)(-110 + j190,5)}{0,1047 - j0,0018} = \\ &= \frac{6,83 + j6,953}{0,1047 - j0,0018} = \frac{(6,83 + j6,953)(0,1047 + j0,0018)}{0,1047^2 + 0,0018^2} = 64,1 + j67,5 = \\ &= 93,1e^{j46,5^\circ} \text{ В.}\end{aligned}$$

Визначимо фазні напруги та струми:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_N = 220 - 64,1 - j67,5 = 155,9 - j67,5 = 169,9e^{-j23,4^\circ} \text{ В;} \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_N = -110 - j190,5 - 64,1 - j67,5 = -174,1 - j258 = 311e^{-j124^\circ} \text{ В;} \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_N = -110 + j190,5 - 64,1 - j67,5 = -174,1 + j123 = 178,4e^{j144,8^\circ} \text{ В;} \\ \dot{I}_a &= \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{169,9e^{-j23,4^\circ}}{27,4e^{-j14,8^\circ}} = 6,2e^{-j8,6^\circ} \text{ А;} \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{311e^{-j124^\circ}}{22} = 14,1e^{-j124^\circ} \text{ А;} \\ \dot{I}_c &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{178,4e^{j144,8^\circ}}{38e^{j24,9^\circ}} = 4,7e^{j119,9^\circ} \text{ А.}\end{aligned}$$

Задача 2.4. До трифазної мережі з лінійною напругою 220В під'єднаний трифазний несиметричний споживач при з'єднанні фаз трикутником. Навантаження фаз: $\underline{Z}_{ab}$; $\underline{Z}_{bc}$; $\underline{Z}_{ca}$. Необхідно накреслити заступну схему електричного кола, визначити фазні та лінійні струми, а також споживану активну потужність. Побудувати векторну діаграму напруг і струмів. Вихідні дані наведені в табл.2.4

Таблиця 2.4

Вихідні дані до задачі 2.4

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\underline{Z}_{\phi a}, \text{Ом}$	22-j7	23-j6	24-j8	25-j9	20-j10	18-j14	27-j10	16-j12	19-j16	24-j6
$\underline{Z}_{\phi b}, \text{Ом}$	22	20	18	24	19	21	23	20	18	16
$\underline{Z}_{\phi c}, \text{Ом}$	30+j16	32+j18	36+j14	34+j12	38+j28	40+j20	42+j26	48+j32	44+j35	45+j40

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 2.4. До трифазної мережі з лінійною напругою 220В під'єднаний трифазний несиметричний споживач при з'єднанні фаз трикутником. Навантаження фаз таке ж, як і в прикладі 2.3. $\underline{Z}_{ab} = (26,5 - j7) \text{ Ом}$; $\underline{Z}_{bc} = 22 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_{ca} = (34,5 + j16) \text{ Ом}$. Необхідно накреслити заступну схему електричного кола, визначити фазні та лінійні струми, а також споживану активну потужність. Побудувати векторну діаграму напруг і струмів.

Розв'язування. Заступна схема кола наведена на рис.2.4.1.

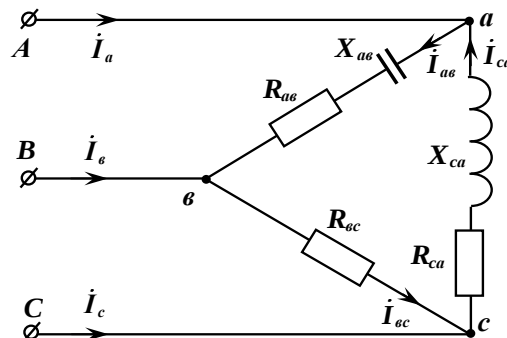


Рис.2.4.1. Заступна схема електричного кола до прикладу 2.4.

Комплексні лінійні напруги:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220V; \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j120^\circ} V; \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = 220e^{j120^\circ} V.$$

Повні опори фаз і кути зсуву фаз між фазними напругами та фазними струмами такі ж, як і в прикладі 3.1:

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_a = 27,4e^{-j14,8^\circ} \text{ Ом}; \varphi_{ab} = \varphi_a = -14,8^\circ;$$

$$\underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_b = 22 \text{ Ом}; \varphi_{bc} = \varphi_b = 0^\circ;$$

$$\underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_c = 38e^{j24,9^\circ} \text{ Ом}; \varphi_{ca} = \varphi_c = 24,9^\circ.$$

Визначимо фазні струми:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{220}{27,4e^{-j14,8^\circ}} = 8^{j14,8^\circ} = (7,75 + j2)A;$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22} = 10e^{-j120^\circ} = (-5 - j8,65)A;$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{38e^{j24,9^\circ}} = 5,8e^{j95,1^\circ} = (-0,5 + j5,77)A.$$

Лінійні струми дорівнюють:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 7,75 + j2 + 0,5 - j5,77 = 8,25 - j3,77 = 9,07e^{-j24,5^\circ};$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -5 - j8,65 - 7,75 - j2 = -12,75 - j10,65 = 16,6e^{-j140,2^\circ};$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = -0,5 + j5,77 + 5 + j8,65 = 4,5 + j14,42 = 15,1e^{j72,6^\circ}.$$

Векторна діаграма наведена на рис. 2.4.2. При побудові використані масштаби $m_U = 50V/см$, $m_I = 4A/см$.

Споживані активні потужності визначимо за формулами:

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab} = 220 \cdot 8 \cdot \cos(-14,8^\circ) = 1710 \text{ Вт};$$

$$P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc} = 220 \cdot 10 \cdot \cos 0^\circ = 2200 \text{ Вт};$$

$$P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca} = 220 \cdot 5,8 \cdot \cos 24,9^\circ = 1150 \text{ Вт};$$

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 1710 + 2200 + 1150 = 5060 \text{ Вт}.$$

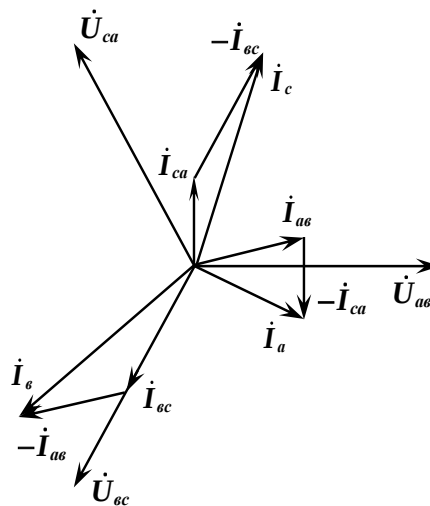


Рис.2.4.2. Векторна діаграма до прикладу 2.4

Завдання на КПЗ №3
«Магнітні кола. Трансформатори. Асинхронні машини»
та методичні рекомендації до її виконання

Задача 3.1. Розрахувати обмотку підковоподібного електромагніту з силою тяги F , якщо обмотка під'єднана до джерела постійної напруги U і допустима густина струму $j=2 \text{ мм}^2$. Сердечник і ярмі електромагніту виготовлені зі сталі, крива намагнічування якої задана в таблиці 3.1.1. Розміри магнітопровода зображені на рис.3.1. З метою запобігання прилипання якоря до полюсів електромагніту передбачена прокладка із немагнітного матеріалу, товщиною $l_{\text{п}}=0,5\text{мм}$. Вихідні дані наведені в табл.3.1.2.

Таблиця 3.1.1

$B, \text{Тл}$	0	0,5	0,9	1,1	1,15	1,2	1,4	1,55	1,65	1,7	1,71	1,72
$H, \text{А/м} \cdot 10^3$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8	10	12

Таблиця 3.1.2

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Вихідні дані до задачі 3.1 Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$F, \text{Н}$	800	600	700	750	650	900	850	500	550	950
$U, \text{В}$	60	80	100	90	120	110	70	110	120	100
$a, \text{см}$	10	11	12	23	24	25	26	27	28	29
$b, \text{см}$	4	4,5	5	6	7	7,5	8	8,5	9	10

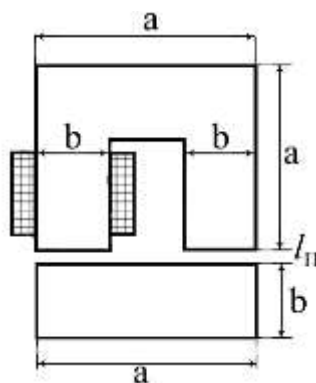


Рис.3.1. Схема магнітопровода електромагніту до прикладу 3.1

Приклад 3.1. Розрахувати обмотку підковоподібного електромагніту з силою тяги $F=800\text{Н}$, якщо обмотка під'єднана до джерела постійної напруги $U=60\text{В}$ і допустима густина струму $j=2\text{А/мм}^2$. Сердечник і ярмі електромагніту виготовлені зі сталі, крива намагнічування якої задана в таблиці 3.1.1. Розміри магнітопровода зображені на рис. 3.1, при цьому $a=12\text{см}$, $b=5\text{см}$. З метою запобігання прилипання якоря до полюсів електромагніту передбачена прокладка із немагнітного матеріалу, товщиною $l_{\text{п}}=0,5\text{мм}$.

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Розв'язування. Магнітну індукцію визначаємо за формулою:

$$B = \sqrt{\frac{F}{4 \cdot 10^5 S_m}} = \sqrt{\frac{800}{4 \cdot 10^5 \cdot 25 \cdot 10^{-4}}} = 0,89 \text{ Тл.}$$

де $S_m = a \cdot b = 12 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

За кривою намагнічування (таблиця 3.1.1) визначаємо величину напруженості магнітного поля в сталі $H=395\text{А/м}$.

Напруженість магнітного поля в немагнітному проміжку дорівнює:

$$H_{II} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,89}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 70,9 \cdot 10^4 \text{ А / м.}$$

Визначаємо середню лінію протікання магнітного потоку:

$$l = 2(a - \epsilon) + 2a = 2(12 - 5) + 2 \cdot 12 = 38 \text{ см} = 0,38 \text{ м.}$$

За законом повного струму визначаємо намагнічуючу силу:

$$IW = Hl + H_{II} l_{II} = 395 \cdot 0,38 + 70,9 \cdot 10^4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 504,6 \text{ А.}$$

За формулою опору довжина провідника дорівнює:

$$l_{np} = \frac{RS}{\rho} = \frac{U}{j\rho} = \frac{60}{2 \cdot 0,0188} = 1595,7 \text{ м,}$$

$$\text{з урахуванням що } R = \frac{U}{I}; \quad I = jS; \quad \rho = 0,0188 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м.}$$

Висота котушки h приблизно дорівнює 80% висоти вікна електромагніту, тобто

$$h = 0,8(a - \epsilon) = 0,8(12 - 5) = 5,6 \text{ см} = 56 \text{ мм.}$$

Відстань від сердечника до витків внутрішнього (першого) шару, внаслідок використання каркасу та ізолюючих прокладок, хай дорівнює 4мм. Припустимо також, що товщина котушки D разом з каркасом складає також 80% ширини вікна електромагніту $a - 2\epsilon = 12 - 2 \cdot 5 = 2 \text{ см}$, тобто

$$D = 0,8 \cdot 2 = 1,6 \text{ см} = 16 \text{ мм.}$$

Отже, переріз провідників котушки (односторонній) дорівнює:

$$hD = 56 \cdot 16 = 896 \text{ мм}^2.$$

Перевіримо чи вкладуться всі провідники котушки в заданій площі.

Діаметр ізолюваного провідника d в κ разів більший за діаметр провідника d без ізоляції. Для провідника марки ПЕВ – 1 або ПЕВ – 2 (емалеве покриття) $\kappa = 1,5$.

Припустимо, що в поперечному перерізі котушки кожен виток займає квадрат із стороною $d_1 = d \cdot \kappa$, запишемо

$$W\kappa^2 d^2 = hD,$$

звідси

$$W = \frac{hD}{\kappa^2 d^2} = \frac{896}{1,5^2 \cdot d^2}.$$

Представимо намагнічуючу силу у вигляді:

$$IW = j \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{hD'}{\kappa^2 d^2},$$

де $j \frac{\pi d^2}{4}$ - величина струму в провіднику.

З останньої формули визначимо необхідну товщину котушки:

$$D' = \frac{IW \cdot 4\kappa^2}{j\pi h} = \frac{504,6 \cdot 4 \cdot 1,5^2}{2 \cdot \pi \cdot 56} = 12,9 \text{ мм.}$$

Отже, необхідна товщина котушки D' не перевищує можливої товщини котушки $D = 16 \text{ мм}$.

Довжина середнього витка котушки дорівнює:

$$l_{cp} = 4(\epsilon + 2\Delta) = 4(50 + 2 \cdot 10,5) = 284 \text{ мм} = 0,282 \text{ м,}$$

де $\Delta = 4 + D' / 2 = 4 + 12,9 / 2 \approx 10,5 \text{ мм}$.

Число витків визначаємо за формулою:

$$W = \frac{l_{np}}{l_{cp}} = \frac{1595,7}{0,282} = 5659.$$

Струм в обмотці:

$$I = \frac{I \cdot W}{W} = \frac{504,6}{5659} = 0,089 \text{ А.}$$

Площа поперечного перерізу провідника дорівнює:

$$S = \frac{I}{j} = \frac{0,089}{2} = 0,044 \text{ мм}^2.$$

Із довідника вибираємо провідник відповідного діаметру так, щоб його площа була найближчою до площі $S = 0,044 \text{ мм}^2$.

Задача 3.2. Однофазний трансформатор має такі номінальні параметри: S_H ; U_{1H} ; U_{2H} ; потужності втрат при неробочому ході P_0 , а при короткому замиканні P_K ; напруга короткого замикання U_K , струм неробочого ходу I_0 . Визначити: коефіцієнт трансформації; параметри заступної схеми трансформатора; вторинну напругу та струм при під'єднанні споживача з параметрами: Z_H , $\cos \varphi_H$. Вихідні дані наведені в табл.3.2.

Таблиця 3.2

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Вихідні дані до задачі 3.2 Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_H , кВА	75	100	180	240	320	420	63	63	160	160
U_{1H} , кВ	6	10	10	10	35	10	6	6	6	10
U_{2H} , В	230	525	525	525	10500	525	230	400	400	230
P_0 , кВт	0,59	0,73	1,2	1,6	2,3	2,1	0,26	0,26	0,54	0,54
P_K , кВт	1,87	2,4	4,1	5,1	6,2	7,0	1,28	1,28	2,65	3,1
U_K , %	5	4,5	5	4,8	5	5	4,7	4,7	4,5	4,5
I_0 , %	7,5	7,5	7,0	7,0	7,5	6,5	2,6	2,6	2,4	2,4
Z_H , Ом	0,5	0,54	0,55	0,51	0,53	0,52	0,49	0,48	0,5	0,5
$\cos \varphi_H$	0,8	0,8	0,82	0,76	0,75	0,78	0,77	0,8	0,81	0,79

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 3.2. Однофазний трансформатор має такі номінальні параметри: $S_H = 1800 \text{ кВА}$; $U_{1H} = 6 \text{ кВ}$; $U_{2H} = 525 \text{ В}$; потужності втрат при неробочому ході $P_0 = 7 \text{ кВт}$, а при короткому замиканні $P_K = 16 \text{ кВт}$; напруга короткого замикання $U_K = 5,5\%$, струм неробочого ходу $I_0 = 5\%$. Визначити: коефіцієнт трансформації; параметри заступної схеми трансформатора; вторинну напругу та струм при під'єднанні споживача з параметрами: $Z_H = 0,5 \text{ Ом}$, $\cos \varphi_H = 0,8$.

Розв'язування: Визначаємо коефіцієнт трансформації:

$$n = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = \frac{6000}{525} = 11,43.$$

Номінальний струм первинної обмотки дорівнює:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}} = \frac{1800 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^3} = 300 \text{ А}.$$

Струм неробочого ходу визначаємо за формулою:

$$I_{10} = \frac{I_0 \%}{100} \cdot I_{1H} = \frac{5}{100} \cdot 300 = 15 \text{ А}.$$

Визначаємо параметри заступної схеми:

$$Z_M = \frac{U_{1H}}{I_{10}} = \frac{6 \cdot 10^3}{15} = 400 \text{ Ом}; \quad R_M = \frac{P_0}{I_{10}^2} = \frac{7 \cdot 10^3}{15^2} = 31 \text{ Ом};$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = \sqrt{400^2 - 31^2} = 398,8 \text{ Ом}; \quad U_{1K} = \frac{U_K \%}{100} \cdot U_{1H} = \frac{5,5}{100} \cdot 6 \cdot 10^3 = 330 \text{ В};$$

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}} = \frac{330}{300} = 1,1 \text{ Ом}; \quad R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2} = \frac{16 \cdot 10^3}{300^2} = 0,18 \text{ Ом};$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{1,1^2 - 0,18^2} = 1,085 \text{ Ом}; \quad R_1 = R'_2 = R_K / 2 = 0,09 \text{ Ом}; \quad X_1 = X'_2 = X_K / 2 = 0,54 \text{ Ом}.$$

Для визначення вторинної напруги і струму при навантаженні визначимо наперед коефіцієнт завантаження $\beta = I_1 / I_{1H}$, де

I_1 – струм первинної обмотки при навантаженні

$$I_1 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_K + R'_H)^2 + (X_K + X'_H)^2}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{(0,18 + 52,25)^2 + (1,085 + 39,2)^2}} = \text{де}$$

$$= 90,8 \text{ A},$$

$$R'_H = Z'_H \cos \varphi_H = n^2 Z_H \cos \varphi_H = 11,43^2 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 52,25 \text{ Ом};$$

$$X'_H = Z'_H \sin \varphi_H = n^2 \cdot Z_H \sin \varphi_H = 11,43^2 \cdot 0,5 \cdot 0,6 = 39,2 \text{ Ом};$$

$$\beta = I_1 / I_{1H} = 90,8 / 300 = 0,3.$$

Зміна вторинної напруги $\Delta U_2 = \beta(U_{KA} \cos \varphi_H + U_{KP} \sin \varphi_H) = 0,3(0,89 \cdot 0,8 + 5,4 \cdot 0,6) = 1,19\%$,

де $U_{KA} = U_K \cdot \cos \varphi_K = U_K \frac{P_K}{U_{1K} \cdot I_{1H}} = 5,5 \frac{16 \cdot 10^3}{330 \cdot 300} = 0,89\%;$

$$U_{KP} = \sqrt{U_K^2 - U_{KA}^2} = \sqrt{5,5^2 - 0,89^2} = 5,4\%.$$

Визначаємо вторинні напругу та струм

$$U_2 = U_{2H} - \frac{\Delta U_2}{100} \cdot U_{2H} = 525 - \frac{1,19}{100} \cdot 525 = 518,8 \text{ В}; \quad I_2 = \frac{U_2}{Z_H} = \frac{518,8}{0,5} = 1037,6 \text{ А}.$$

Задача 3.3. Для трифазного трансформатора потужністю S_H і заданою схемою та групою з'єднань обмоток відомо: $U_{1H}; U_{2H}$; величина напруги короткого замикання у відсотках U_K ; величина струму неробочого ходу у відсотках I_0 ; потужність втрат неробочого ходу P_0 ; потужність втрат короткого замикання P_K .

Визначити: фазні напруги первинної і вторинної обмоток при неробочому ході; фазні та лінійні коефіцієнти трансформації; номінальні струми в обмотках трансформатора, напругу короткого замикання, струм неробочого ходу та коефіцієнт потужності при неробочому ході; параметри Т – подібної заступної схеми; номінальний (при $\cos \varphi_2 = 0,8, \beta = 1$) і річний ККД трансформатора за умови, що трансформатор працює протягом року $T = 5400$ годин, а решту часу працює в режимі неробочого ходу, рік має 365 днів, $\cos \varphi_2 = 0,8, \beta = 1$. Вихідні дані наведені в табл.3.3

Таблиця 3.3

Вихідні дані до задачі 3.3					
Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)				
	0	1	2	3	4
Схема і група з'єднань	Y \ \Delta - 11	Y \ \Delta - 0	Y \ \Delta - 0	Y \ \Delta - 11	Y \ \Delta - 0
$S_H, \text{кВА}$	100	100	160	160	250
$U_{1H}, \text{кВ}$	35	10	10	6	10
$U_{2H}, \text{В}$	230	400	400	690	230
$U_K, \%$	4,7	4,7	4,5	4,5	4,7
$P_K, \text{кВт}$	2,27	2,3	3,1	0,26	4,2
$P_0, \text{Вт}$	465	365	540	550	750
$I_0, \%$	2,6	2,4	2,5	2,4	2,3

Вихідні дані до задачі 3.3					
Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)				
	5	6	7	8	9
Схема і група з'єднань	Y \ \Delta - 11	Y \ \Delta - 0	Y \ \Delta - 11	Y \ \Delta - 0	Y \ \Delta - 11
$S_H, \text{кВА}$	250	400	400	630	630
$U_{1H}, \text{кВ}$	10	6	6,3	3	6
$U_{2H}, \text{В}$	690	690	400	400	230
$U_K, \%$	4,7	4,5	4,5	5	5
$P_K, \text{кВт}$	4,1	5,5	5,6	7,5	7,6
$P_0, \text{Вт}$	780	1050	1080	1600	1700
$I_0, \%$	2,3	3,2	3,2	3,2	3,2

Приклад 3.3. Для трифазного трансформатора потужністю $S_H = 240 \text{ кВА}$, з'єднання обмоток якого $Y/Y-0$, відомо: $U_{1H} = 10 \text{ кВ}$; $U_{2H} = 525 \text{ В}$; величина напруги короткого замикання у відсотках $U_K = 5\%$; величина струму неробочого ходу у відсотках $I_0 = 7\%$; потужність втрат неробочого ходу $P_0 = 1,6 \text{ кВт}$; потужність втрат короткого замикання $P_K = 5,1 \text{ кВт}$.

Визначити: фазні напруги первинної і вторинної обмоток при неробочому ході; фазні та лінійні коефіцієнти трансформації; номінальні струми в обмотках трансформатора, напругу короткого замикання, струм неробочого ходу та коефіцієнт потужності при неробочому ході; параметри Т – подібної заступної схеми; номінальний (при $\cos \varphi_2 = 0,8$, $\beta = 1$) і річний ККД трансформатора за умови, що трансформатор працює протягом року $T = 5400$ годин, а решту часу працює в режимі неробочого ходу, рік має 365 днів, $\cos \varphi_2 = 0,8$, $\beta = 1$.

Розв'язування. Оскільки за умовою задачі первинна та вторинна обмотки з'єднані зіркою, то фазні напруги визначимо за формулами:

$$U_{1H \phi} = U_{1H} / \sqrt{3} = 10000 / \sqrt{3} = 5780 \text{ В}; \quad U_{2H \phi} = U_{2H} / \sqrt{3} = 525 / \sqrt{3} = 302 \text{ В}.$$

Фазні та лінійні коефіцієнти трансформації:

$$n_L = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = 19; \quad n_\phi = \frac{U_{1H \phi}}{U_{2H \phi}} = \frac{5780}{302} = 19.$$

Визначимо номінальні струми в обмотках трансформатора:

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} U_{1H}) = 240 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 10000) = 13,87 \text{ А};$$

$$I_{2H} = S_H / (\sqrt{3} U_{2H}) = 240 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 525) = 264,2 \text{ А}.$$

Напруга короткого замикання U_K , струм неробочого ходу I_{10} і коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{10}$ при неробочому ході визначаємо за формулами:

$$U_K = \frac{U_K \%}{100} \cdot U_{1H} = \frac{5}{100} \cdot 10000 = 500 \text{ В};$$

$$I_{10} = \frac{I_0 \%}{100} \cdot I_{1H} = \frac{7}{100} \cdot 13,87 = 0,97 \text{ А}; \quad \cos \varphi_{10} = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{10}} = \frac{1600}{\sqrt{3} \cdot 10000 \cdot 0,97} \approx 0,1.$$

Параметри заступної схеми:

$$Z_K = \frac{U_{K\phi}}{I_{K\phi}} = \frac{U_{K\phi}}{100} \cdot \frac{U_{1H\phi}}{I_{1H\phi}} = \frac{5 \cdot 5780}{100 \cdot 13,87} = 20,8 \text{ Ом}; \quad R_K = \frac{P_K}{3 I_{K\phi}^2} = \frac{5,1 \cdot 10^3}{3 \cdot 13,87^2} = 8,8 \text{ Ом};$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{20,8^2 - 8,8^2} = 18,8 \text{ Ом}; \quad R_1 = R_2 = R_K / 2 = 8,8 / 2 = 4,4 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_2 = X_K / 2 = 18,8 / 2 = 9,4 \text{ Ом}; \quad R_2 = R_2' / n_\phi^2 = 4,4 / 19^2 = 0,012 \text{ Ом};$$

$$X_2 = X_2' / n_\phi^2 = 9,4 / 19^2 = 0,026 \text{ Ом}; \quad Z_M = \frac{U_{1H\phi}}{I_{10}} = \frac{5780}{0,97} = 5958,8 \text{ Ом};$$

$$R_M = \frac{P_0}{3 I_{10}^2} = \frac{1,6 \cdot 10^3}{3 \cdot 0,97^2} = 566,8 \text{ Ом}; \quad X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = \sqrt{5958,8^2 - 566,8^2} = 5931,8 \text{ Ом}.$$

Номінальний і річний ККД трансформатора:

$$\eta_H = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = \frac{240 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{240 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 1,6 \cdot 10^3 + 5,1 \cdot 10^3} = 0,966$$

$$\eta_{р\text{ічн}} = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2 T}{\beta S_H \cos \varphi_2 T + P_0 \cdot 365 \cdot 24 + \beta^2 P_K T} = \frac{240 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 5400}{240 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 5400 + 1,6 \cdot 10^3 \cdot 365 \cdot 24 + 5,1 \cdot 10^3 \cdot 5400} = 0,96.$$

Задача 3.4. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором живиться від мережі з лінійною напругою 220 В і частотою $f_1 = 50 \text{ Гц}$. Номінальні дані двигуна: U_{1H} ; P_{2H} ; n_{2H} ; $K_M = M_{\max} / M_H$; η_H ; $\cos \varphi_{1H}$; $K_{\text{пм}} = M_{\text{п}} / M_H$; $K_I = I_{1\text{п}} / I_{1H}$; кількість полюсів статора $2p$.

Визначити активну потужність, що споживається двигуном із мережі; номінальний і максимальний моменти; номінальний і пусковий струми; номінальне та критичне ковзання; залежність обертового моменту від ковзання $M = f(s)$. Вихідні дані наведені в табл.3.4.

Вихідні дані до задачі 3.4

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2H}, кВт$	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15	18,5
$n_{2H}, об/хв$	1420	1415	1425	1435	1430	1445	1445	1460	1465	1465
$\eta_H, \%$	75	77	80	82	84	85,5	87,5	87,5	88,5	89,5
$\cos \varphi_{1H}$	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88
K_M	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2	3	3	2,3	2,3
$K_{пм}$	2	2	2	2,1	2	2	2,2	2,2	1,4	1,4
K_I	5	5	6	6	6	7	7,5	7,5	7	7

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 3.4. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором живиться від мережі з лінійною напругою 220В і частотою $f_1=50Гц$. Номінальні дані двигуна: $U_{1H}=220В$; $P_{2H}=2,2кВт$; $n_{2H}=1425об/хв$ $\eta_H=0,8$; $\cos \varphi_{1H}=0,83$;

$K_M = M_{max} / M_H = 2,4$; $K_{пм} = M_{п} / M_H = 2,1$; $K_I = I_{1п} / I_{1H} = 6$; кількість полюсів статора $2p=4$.

Визначити активну потужність, що споживається двигуном із мережі; номінальний і максимальний моменти; номінальний і пусковий струми; номінальне та критичне ковзання; залежність обертового моменту від ковзання $M = f(s)$.

Розв'язування. Активна потужність, що споживається двигуном із мережі $P_{1H} = P_{2H} / \eta_H = 2,2 / 0,8 = 2,75кВт$.

Номінальний і максимальний моменти:

$$M_H = 9,55 \frac{P_{2H}}{n_{2H}} = 9,55 \frac{2,2 \cdot 10^3}{1425} = 14,7 Нм.$$

$$M_{max} = K_M M_H = 2,4 \cdot 14,7 = 35,28 Нм.$$

Номінальний і пусковий струми:

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} U_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H}} = \frac{2,75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,83} = 8,7 А;$$

$$I_{1п} = K_I I_{1H} = 6 \cdot 8,7 = 52,2 А.$$

Номінальне та критичне ковзання:

$$s_H = \frac{n_1 - n_{2H}}{n_1} = \frac{1500 - 1425}{1500} = 0,05,$$

де $n_1 = (60 f) / p = (60 \cdot 50) / 2 = 1500 об/хв$;

$$s_{кр} = s_H (K_M + \sqrt{K_M^2 - 1}) = 0,05(2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,229.$$

Для визначення залежності $M = f(s)$ скористаємося формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = \frac{2 \cdot 35,28}{\frac{s}{0,229} + \frac{0,229}{s}}.$$

Формулу Клосса можна використати для розрахунку механічної характеристики асинхронного двигуна. Для цього необхідно задатись значеннями s від 0 (щоб не було невизначеності, то близьким до нуля) до 1 і визначити відповідні значення M . За розрахунковими даними графічно будують залежність $M = f(s)$.

Слід відмітити, що формула Клосса дає задовільний результат тільки в робочій частині механічної характеристики, тобто для s від 0 до $s_{кр}$. Пускова частина механічної характеристики визначається за цією формулою з великою похибкою.

Задача 3.5. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором живиться від трифазної мережі з лінійною напругою $U_{л}=380 В$ і частотою $f=50 Гц$. Номінальні дані двигуна: U_{1H} ; I_{1H} ; P_{2H} ; n_{2H} ; η_H ; K_I ; $\cos \varphi_K$.

Визначити схему з'єднання фаз обмотки статора; номінальний момент на валу ротора M_H ; номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{1H}$; номінальне ковзання; параметри заступної схеми при короткому замиканні; активний та індуктивний опори обмотки статора; критичне ковзання; реактивну потужність і ємність батареї конденсаторів, необхідної для підвищення коефіцієнта потужності мережі живлення від 0,81 до 0,95. Вихідні дані наведені в табл.3.5.

Таблиця 3.5
Вихідні дані до задачі 3.5

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_{1H}, A	9,2	12,1	16,5	24	32,2	39,4	45,8	64,7	76,3	92,3
$P_{2H}, кВт$	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45
$n_{2H}, об/хв$	950	965	970	975	975	975	975	980	980	985
$\eta, \%$	82	85	85,5	86	87,5	88	90	90,5	91	91,5
K_I	6	6,5	6,5	6	6	5	6,5	6,5	6,5	6,5
$\cos \varphi_K$	0,3	0,32	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,35	0,34

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 3.5. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором живиться від трифазної мережі з лінійною напругою $U_L = 380 В$ і частотою $f = 50 Гц$. Номінальні дані двигуна: $U_{1H} = 380 / 220 В$; $I_{1H} = 64,7 А$; $P_{2H} = 30 кВт$; $n_{2H} = 950 об / хв$; $\eta_H = 0,87$; $K_I = 6,5$; $\cos \varphi_K = 0,36$.

Визначити схему з'єднання фаз обмотки статора; номінальний момент на валу ротора M_H ; номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{1H}$; номінальне ковзання; параметри заступної схеми при короткому замиканні; активний та індуктивний опори обмотки статора; критичне ковзання; реактивну потужність і ємність батареї конденсаторів, необхідної для підвищення коефіцієнта потужності мережі живлення від 0,81 до 0,95.

Розв'язування. Якщо двигун під'єднуємо до мережі з лінійною напругою $U_L = 380 В$, то обмотки статора необхідно з'єднати зіркою. На фазу буде подаватися напруга $U_\phi = U_L / \sqrt{3} = 220 В$.

У випадку, коли лінійна напруга трифазної мережі $U_L = 220 В$, то обмотки статора необхідно з'єднати трикутником. У цьому випадку на фазу буде також подаватися напруга $U_\phi = U_L = 220 В$.

Отже, в обох випадках фазна напруга дорівнює $220 В$.

Номінальний момент на валу ротора дорівнює:

$$M_H = 9,55 \frac{P_{2H}}{n_{2H}} = 9,55 \frac{30 \cdot 10^3}{950} = 301,6 Нм.$$

Номінальний коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_{1H} = \frac{P_{2H}}{\sqrt{3} U_{1H} \eta_H I_{1H}} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 64,7} = 0,81.$$

Номінальне ковзання:

$$s_H = \frac{n_1 - n_{2H}}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05,$$

де n_1 – найближча більша відносно n_{2H} швидкість обертання магнітного поля.

Пусковий струм:

$$I_{1H} = K_I I_{1H} = 6,5 \cdot 64,7 = 420,55 А.$$

Параметри заступної схеми визначимо в момент пуску, тобто при $S = 1$. У цьому випадку $R'_2(1-s)/s = 0$, і заступна схема має вигляд, зображений на рис.3.5.

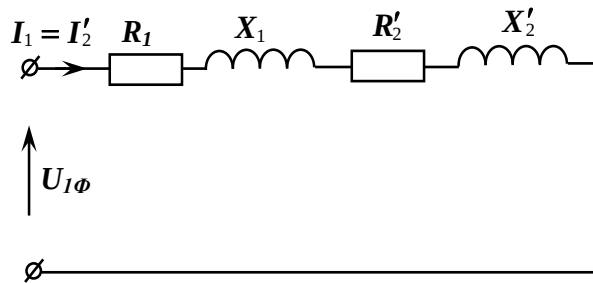


Рис.3.5. Заступна схема асинхронного двигуна для $s = 1$

Як видно із заступної схеми, опори короткого замикання дорівнюють:

$$Z_K = \frac{U_{1\phi}}{I_{1л}} = \frac{220}{420,55} = 0,523 \text{ Ом}; \quad R_K = Z_K \cos \varphi_{1K} = 0,523 \cdot 0,36 = 0,183 \text{ Ом};$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{0,523^2 - 0,183^2} = 0,49 \text{ Ом}.$$

Активний та індуктивний опори обмотки статора:

$$R_1 = R'_2 = R_K / 2 = 0,0915 \text{ Ом}; \quad X_1 = X'_2 = X_K / 2 = 0,245 \text{ Ом}.$$

Критичне ковзання

$$s_{кр} = R'_2 / X_K = 0,0915 / 0,49 = 0,187.$$

Ємність батареї конденсаторів, яка необхідна для підвищення коефіцієнта потужності від $\cos \varphi_{1(1)} = 0,81$ до $\cos \varphi_{1(2)} = 0,95$ визначають за формулою:

за умови з'єднання конденсаторів трикутником:

$$C = \frac{P_{2\phi}}{3U^2\omega} (tg \varphi_{1(1)} - tg \varphi_{1(2)}) = \frac{30 \cdot 10^3}{3 \cdot 220^2 \cdot 314} (0,724 - 0,325) = 0,0002625 \text{ Ф} = 262,5 \text{ мкФ},$$

де C – ємність конденсаторів однієї фази;

$$\cos \varphi_{1(1)} = 0,81; \quad \varphi_{1(1)} = 35,9^\circ; \quad tg \varphi_{1(1)} = 0,724;$$

$$\cos \varphi_{1(2)} = 0,95; \quad \varphi_{1(2)} = 18^\circ; \quad tg \varphi_{1(2)} = 0,325;$$

за умови з'єднання конденсаторів зіркою:

$$C = \frac{P_{2\phi}}{U^2\omega} (tg \varphi_{1(1)} - tg \varphi_{1(2)}) = \frac{30 \cdot 10^3}{220^2 \cdot 314} (0,724 - 0,325) = 0,000787 \text{ Ф} = 787 \text{ мкФ}.$$

Завдання на КПЗ №4

«Машини постійного струму» та методичні рекомендації до її виконання

Задача 4.1. Генератор постійного струму паралельного збудження має такі дані: $P_{2H}; U_H \text{ В}; n_H$. Опір обмотки збудження дорівнює R_3 . Втрати потужності $P_{ял}$ у колі обмотки якоря складають 5%, а потужність механічних, магнітних і додаткових втрат – 6% від номінальної потужності. Визначити: номінальний струм генератора, струми якоря і обмотки збудження, ЕРС якоря і ККД при номінальному режимі; електромагнітний момент і потужність первинного двигуна. Вихідні дані наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Вихідні дані до задачі 4.1

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2H}, \text{ кВт}$	9	11	11	13,5	13,5	16	16	20	24	27
$U_H, \text{ В}$	115	230	115	115	230	230	115	230	230	230
$n_H, \text{ об/хв}$	1000	970	1000	1150	2250	1150	1500	1050	2200	1150
$R_3, \text{ Ом}$	32	85	24	18	73	60	15	52	45	35

Методичні рекомендації до розв'язування задачі

Приклад 4.1. Генератор постійного струму паралельного збудження має такі дані: $P_{2H} = 25 \text{ кВт}; U_H = 230 \text{ В}; n_H = 2000 \text{ об/хв}$.

Опір обмотки збудження дорівнює 160 Ом . Втрати потужності $P_{ян}$ у колі обмотки якоря складають 5%, а потужність механічних, магнітних і додаткових втрат – 6% від номінальної потужності. Визначити: номінальний струм генератора, струми якоря і обмотки збудження, ЕРС якоря і ККД при номінальному режимі; електромагнітний момент і потужність первинного двигуна.

Розв’язування. Номінальний струм генератора

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{25 \cdot 10^3}{230} = 108,7 \text{ А.}$$

Струм обмотки збудження

$$I_3 = \frac{U_H}{R_3} = \frac{230}{160} = 1,44 \text{ А.}$$

Струм якоря при номінальному режимі

$$I_{ян} = I_H + I_3 = 108,7 + 1,44 = 110,14 \text{ А.}$$

ЕРС в обмотці якоря

$$E_{я} = U_H + R_{я} \cdot I_{ян} = 230 + 0,103 \cdot 110,14 = 241,3 \text{ В,}$$

$$\text{де } R_{я} = \frac{P_{ян}}{I_{ян}^2} = \frac{0,05 \cdot 25 \cdot 10^3}{110,14^2} = 0,103 \text{ Ом.}$$

Електромагнітна потужність

$$P_{ЕМ} = E_{я} I_{ян} = 241,3 \cdot 110,14 = 26576,8 \text{ Вт.}$$

Електромагнітний момент

$$M_{ЕМ} = \frac{P_{ЕМ}}{\omega} = \frac{26576,8}{209,3} = 127 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{де } \omega = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 2000}{30} = 209,3 \text{ рад / сек.}$$

Потужність механічних, магнітних і додаткових втрат

$$P_{Мех} + P_M + P_d = 0,06 \cdot P_H = 0,06 \cdot 25 \cdot 10^3 = 1500 \text{ Вт.}$$

Потужність електричних втрат у колі якоря

$$P_{я} = 0,05 \cdot P_H = 1250 \text{ Вт.}$$

Потужність електричних втрат у колі обмотки збудження

$$P_3 = I_3^2 R_3 = 1,44^2 \cdot 160 = 331,8 \text{ Вт.}$$

Потужність сумарних втрат в генераторі

$$\sum P = P_{Мех} + P_M + P_d + P_{ян} + P_3 = 1500 + 1250 + 331,8 = 3081,8 \text{ Вт.}$$

Потужність первинного двигуна

$$P_1 = P_H + \sum P = 25000 + 3081,8 = 28081,8 \text{ Вт.}$$

ККД генератора

$$\eta = \frac{P_{2H}}{P_1} = \frac{25000}{28081,8} = 0,89.$$

Задача 4.2. Двигун паралельного збудження має такі номінальні дані: P_{2H} ; U_H ; n_H ; η_H . Опір якірного кола $R_{я}$, обмотки збудження R_3 . Визначити номінальний струм двигуна і опір пускового реостата, при якому кратність пускового струму дорівнює 2, пусковий момент, швидкість обертання та струм у режимі неробочого ходу. Вихідні дані наведені в табл.4.2.

Таблиця 4.2

Вихідні дані до задачі 4.2

Параметр, його умовне позначення, розмірність	Номер варіанта (остання цифра залікової книжки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2H}, \text{кВт}$	1	1,5	2,2	3,2	4,5	6	8	11	14	19
$U_H, \text{В}$	110	110	110	110	110	220	220	220	220	220
$n_H, \text{об\хв}$	3000	3000	3000	1500	1500	3000	3000	1500	1500	1500
$\eta_H, \%$	77	76	80	78,5	80	82,5	83,5	84	86,5	84,5
$R_{я}, \text{Ом}$	1,2	0,8	0,48	0,34	0,23	0,62	0,44	0,31	0,29	0,16
$R_3, \text{Ом}$	220	160	110	80	70	220	170	185	135	110

Приклад 4.2. Двигун паралельного збудження має такі номінальні дані: $P_{2H} = 30 \text{ кВт}$; $U_H = 220 \text{ В}$; $n_H = 1500 \text{ об/хв}$; $\eta_H = 0,8$. Опір якорного кола $R_{\text{я}} = 0,1 \text{ Ом}$, обмотки збудження $R_3 = 75 \text{ Ом}$. Визначити номінальний струм двигуна і опір пускового реостата, при якому кратність пускового струму дорівнює 2, пусковий момент, швидкість обертання та струм у режимі неробочого ходу.

Розв'язування. Потужність, що споживає двигун з мережі при номінальному навантаженні

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta} = \frac{30}{0,8} = 37,5 \text{ кВт}.$$

Номінальний струм двигуна

$$I_H = \frac{P_{1H}}{U_H} = \frac{37,5 \cdot 10^3}{220} = 170,5 \text{ А}.$$

Струм збудження

$$I_3 = \frac{U_H}{R_3} = \frac{220}{75} = 2,93 \text{ А}.$$

Номінальний струм обмотки якоря

$$I_{\text{яH}} = I_H - I_3 = 170,5 - 2,93 = 167,57 \text{ А}.$$

Пусковий струм при заданій кратності $I_{\text{п}} / I_H = 2$

$$I_{\text{п}} = 2 \cdot I_H = 2 \cdot 170,5 = 341 \text{ А}.$$

Пусковий струм обмотки якоря

$$I_{\text{яп}} = I_{\text{п}} - I_3 = 341 - 2,93 = 338,07 \text{ А}.$$

Опір якорного кола в момент пуску

$$R_{\text{я}} + R_{\text{п}} = \frac{U_H}{I_{\text{яп}}} = \frac{220}{338,07} = 0,65 \text{ Ом}.$$

Опір пускового реостата

$$R_{\text{п}} = (R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) - R_{\text{я}} = 0,65 - 0,1 = 0,55 \text{ Ом}.$$

Номінальна кутова швидкість обертання

$$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/сек}.$$

ЕРС якоря при номінальному навантаженні

$$E_{\text{яH}} = U_H - I_{\text{яH}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 167,5 \cdot 0,1 = 203,25 \text{ В}.$$

Постійна $c\Phi$ при незмінному магнітному потоці

$$c\Phi = \frac{E_{\text{яH}}}{\omega_H} = \frac{203,25}{157} = 1,29 \text{ Вб}.$$

Електромагнітний пусковий момент

$$M_{\text{п}} = c\Phi I_{\text{яп}} = 1,29 \cdot 338,07 = 436 \text{ Нм}.$$

Електромагнітний момент у номінальному режимі

$$M_H = c\Phi I_{\text{яH}} = 1,29 \cdot 167,57 = 216 \text{ Нм}.$$

Момент на валу

$$M_{2H} = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{30000}{157} = 191 \text{ Нм}.$$

Момент неробочого ходу

$$M_0 = M_H - M_{2H} = 216 - 191 = 25 \text{ Нм}.$$

Струм якоря в режимі неробочого ходу

$$I_{0\text{я}} = \frac{M_0}{c\Phi} = \frac{25}{1,29} = 19,38 \text{ А}.$$

Струм неробочого ходу двигуна

$$I_0 = I_{0\text{я}} + I_3 = 19,38 + 2,93 = 22,31 \text{ А}.$$

Кутова швидкість обертання ротора при неробочому ході та номінальній напрузі

$$\omega_0 = \frac{U_H - I_{0\text{я}} R_{\text{я}}}{c\Phi} = \frac{220 - 19,38 \cdot 0,1}{1,29} = 169 \text{ рад/сек}.$$

$$n_0 = \frac{\omega_0 \cdot 30}{\pi} = \frac{169 \cdot 30}{3,14} = 1615 \text{ об / сек.}$$

Електротехніка: методичні вказівки до самостійної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми "Автомобільна електроніка» галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка денної та заочної форм навчання/ уклад. Й. Р. Селепина. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 63 с.

Методичні вказівки до самостійної роботи з освітньої компоненти «**Електротехніка:** складені відповідно до діючої робочої програми курсу.

Призначені для здобувачів вищої освіти спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка освітньої програми «Автомобільна електроніка».

Комп'ютерний набір

Й. Р. Селепина

Редактор

Й. Р. Селепина

Підп. до друку «___» _____ 2026 р.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. _____. Тираж 10 прим. Зам. _____

Відділ іміджу та промоцій
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75