

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет

ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

для студентів **заочної** форми навчання
спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Основи теорії електричних апаратів: Програма дисципліни та контрольні завдання для студентів заочної форми навчання спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка /Укл.: О.В. Близняков, Л.С.Скрупська – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 22 с.

Укладачі: О.В. Близняков, доцент, кандидат технічних наук,
Л.С.Скрупська, старший викладач

Рецензент: В.М.Снігірьов , доцент, кандидат технічних наук

Відповідальний за випуск: О.В. Близняков.

Затверджено
на засіданні кафедри ЕА
Протокол № 2 від 13.09.17 р.

Затверджено НМК ЕТФ
Протокол № 2
від 28 вересня 2017 р.

ЗМІСТ

1. МЕТА І ЗАДАЧІ ДИСЦИПЛІНИ	4
2. ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ.....	5
3. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ	9
4. КОНТРОЛЬНІ РОБОТИ.....	13
4.1 Контрольна робота №1	13
4.2 Контрольна робота №2	16
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	22

1. МЕТА І ЗАДАЧІ ДИСЦИПЛІНИ

Без електричних апаратів неможливо уявити собі системи електропостачання промислових підприємств, населених пунктів, електропривода та засобів автоматизації виробництва та сільського господарства. За цих обставин, весь час гостро стоять питання удосконалення конструкцій електричних апаратів та технології їх виробництва.

Метою викладання дисципліни "Основи теорії електричних апаратів" є формування у студентів знань, навичок та умінь, що дозволять їм здійснювати проектування електричних апаратів та правильно їх використовувати.

Вивчення дисципліни "Основи теорії електричних апаратів" являє собою один з ключових моментів підготовки фахівців в галузі електроапаратобудування, головною метою якого є дати студентам необхідну науково-технічну підготовку для подальшого вивчення спеціальних дисциплін. Задачі вивчення дисципліни полягають в тому, щоб студент засвоїв фундаментальні теоретичні основи різноманітних фізичних явищ, що відбуваються в електричних апаратах і на яких засновано їх функціонування.

Дисципліна "Основи теорії електричних апаратів" базується на попередніх дисциплінах: фізика, хімія, вища математика, теоретичні основи електротехніки, теоретична та прикладна механіка. Знання цієї дисципліни, використовуються студентами при виконанні курсових робіт та проектів, що розробляються згідно навчального плану, при роботі над дипломним проектом або магістерською роботою. В результаті вивчення дисципліни студент повинен:

знати:

- фізичні процеси, що відбуваються в електричних апаратах та методи їх аналізу;
- принципи роботи основних елементів електричних апаратів та співвідношення для їх розрахунків;

вміти:

- здійснювати аналіз фізичних процесів, що відбуваються в електричних апаратах;
- здійснювати дослідження та розрахунки основних елементів електричних апаратів.

2 ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Розділ 1. Загальні відомості про електричні апарати

Функції, що виконують електричні апарати. Класифікація електричних апаратів. Стислі історичні відомості про розвиток електричних апаратів. Призначення та застосування основних різновидів електричних апаратів: електричні апарати високої напруги, електричні апарати автоматики і керування, автоматичні регулятори та стабілізатори, підсилювачі і перетворювачі, спеціальні види електричних апаратів. Наукові та технічні проблеми сучасного електроапаратобудування.

Література, що рекомендується [1–4, 6].

Дисципліни, що забезпечують: Фізика, теоретичні основи електротехніки.

Розділ 2. Теплообмін в електричних апаратах

Джерела теплоти та теплові явища в електричних апаратах. Тепловий баланс нагрітого тіла. Допустимі температури нагріву елементів електричних апаратів. Види теплопереносу в електричних апаратах. Формула Ньютона для конвективної тепловіддачі. Поняття про коефіцієнт тепловіддачі. Основні теореми теорії подібності. Критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією. Закон Стефана-Больцмана та визначення тепловіддачі випромінюванням. Передача тепла теплопровідністю: основні рівняння, закон Фур'є. Розрахунок тепловіддачі теплопровідністю. Тепловий розрахунок обмоток електричних апаратів. Поняття коефіцієнту теплопровідності тіла заміщення. Поняття теплового опору, теплові схеми заміщення. Підвищення ефективності тепловіддачі від нагрітих тіл. Задачі теплового розрахунку елементів електричних апаратів. Стаціонарний тепловий режим струмопровідних елементів. Нестационарні теплові явища в апаратах. Загальне рівняння балансу енергії та його рішення, тепла постійна часу. Режим роботи електричних апаратів, поняття про коефіцієнти перевантаження та еквівалентний струм та потужність. Нагрів струмопровідних елементів струмами короткого замикання. Поняття термічної стійкості апаратів.

Література, що рекомендується [1–6, 18–22]

Дисципліни, що забезпечують: Вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки.

Розділ 3. Теорія комутації електричних кіл.

Основні параметри та закономірності процесу комутації електричного кола. Основні закони комутації. Диференційні рівняння процесів комутації і методи їх рішення. Вмикання активно-індуктивного кола змінного струму. Вмикання трансформатору. Перетворювання енергії при вимиканні електричного кола зі струмом. Стадії газового розряду. Загальна характеристика електродугового розряду. Розподіл напруги впродовж електричної дуги. Плазма електричної дуги і її властивості. Процеси іонізації та деіонізації, ступінь іонізації, рівняння Саха. Рівняння енергетичного балансу і аналіз теплових явищ стовбура електричної дуги. Процеси у катодній та анодній зонах дуги. Потoki плазми в електричній дузі. Статичні характеристики дуги. Каналова модель дуги. Динамічні характеристики дуги. Загальне рівняння динамічної характеристики дуги. Моделі динамічної дуги Кассі та Майру. Вимикання електричного кола постійного та змінного струму. Умови вимикання. Поняття напруги відновлення та міцності відновлення. Дійсна та власна напруга відновлення, зворотна напруга, основні параметри напруги відновлення. Відновлення напруги у найпростіших одночастотному та двочастотному контурах. Відновлення напруги при коротких замиканнях в лінії, невіддалені короткі замикання. Методи розрахунку параметрів напруги відновлення. Вимикання малих індуктивних та ємкісних струмів. Процеси відновлення міцності при вимиканні електричних кіл низької і високої напруги. Засоби впливу на електричну дугу при вимиканні електричного кола. Особливості дугогасильних пристроїв апаратів низької та високої напруги. Комутаційні пристрої з бездуговою та обмежено дуговою комутацією.

Література, що рекомендується [1–6, 24–27]

Дисципліни, що забезпечують: Вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки, теоретична та прикладна механіка.

Розділ 4. Електромагнітні явища в електричних апаратах

Електромагнітне поле в електричних апаратах. Диференційні рівняння електромагнітного поля. Магнітні кола електричних апаратів. Магнітні матеріали та їх характеристики. Аналогія між електричними та магнітними колами. Задачі розрахунку магнітних кіл. Розрахунок магнітних кіл без урахування і з урахуванням поля розсіяння. Особливості розрахунку магнітних кіл змінного струму. Перетворення енергії

в електромагнітах. Електромагнітні сили та силові характеристики електромагнітів постійного та змінного струму. Динамічні характеристики електромагнітів постійного та змінного струму. Основні засоби для підвищення та зменшення часу спрацювання та відпускання електромагнітів. Поляризовані електромагніти та постійні магніти. Електромагніти змінного струму. Загальні відомості про магнітні підсилювачі. Дросель насичення без підмагнічування. Дросельний магнітний підсилювач. Зворотні зв'язки та зміщення в магнітних підсилювачах. Магнітний підсилювач з самонасиченням.

Література, що рекомендується [1–14]

Дисципліни, що забезпечують: Вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки.

Розділ 5. Контакти електричних апаратів

Визначення поняття "електричний контакт". Основні елементи електричного контакту. Класифікація електричних контактів. Поняття перехідного контактного опору. Математичні моделі електричних контактів. Теоретичні та експериментальні залежності величини перехідного контактного опору від зусилля контактного натиску. Стисла характеристика плівок на контактах. Явище фрітінгу контактних плівок. Робота контактів у замкненому стані. Нагрів електричних контактів в режимі тривалого протікання номінального струму. Визначення максимальної температури на контактній площадки. Залежність перехідного опору контактів від температури та від падіння напруги на контактах. Вплив контактів на нагрів контактуючих провідників. Контакти в режимі протікання понадструмів. Зварювання електричних контактів. Електродинамічні зусилля в контактах та їх компенсація. Розрахунок шинних контактних сполучень. Процеси при розмиканні контактів. Масоперенесення в електричних контактах (ерозія та знос контактів). Моделі розрахунку місткової та дугової ерозії. Боротьба з зносом електричних контактів. Матеріали електричних контактів. Металокерамічні контактні матеріали. Спеціальні види контактів. Рідиннометалеві контакти, напрямку їх розвитку. Конструкції та матеріали рідиннометалевих контактів.

Література, що рекомендується [1–6, 16, 27]

Дисципліни, що забезпечують: Вища математика, фізика, хімія, теоретичні основи електротехніки, теоретична та прикладна механіка.

Розділ 6. Електродинамічні та індукційні явища в електричних апаратах

Взаємодія провідників з струмом та електродинамічні сили в електричних апаратах. Методи визначення напрямку дії електродинамічних сил. Основні принципи розрахунку електродинамічних сил. Поняття коефіцієнта контуру. Приклади розрахунку електродинамічних сил в електричних апаратах: електродинамічні сили між паралельними провідниками; зусилля, моменти, які діють на перемичку струмопровідного контуру; зусилля у витках та котушках; зусилля між вільно розташованими прямолінійними провідниками; зусилля між прямолінійними провідниками у вигляді кола або його частини; електродинамічні сили в контактах; зусилля на провідник зі струмом, розташованим поблизу феромагнітного елементу. Електродинамічні сили при змінному струмі. Поняття електродинамічної стійкості електричного апарата. Індукційні явища в електричних апаратах та пристрої на їх підставі. Електродинамічні та індукційно-динамічні системи електричних апаратів.

Література, що рекомендується [1–6, 15]

Дисципліни, що забезпечують: Вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки, теоретична та прикладна механіка.

3. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Загальні відомості про теплові явища. Норми нагріву елементів електричних апаратів.
2. Джерела теплоти в електричних апаратах.
3. Способи передачі теплоти в просторі. Стисла характеристика.
4. Тепловіддача теплопровідністю: загальна характеристика; закон Фур'є; рівняння теплопровідності, початкові та граничні граничні умови.
5. Використання рівняння теплопровідності при розрахунку передачі тепла через плоску та циліндричну стінки без внутрішніх джерел теплоти
6. Використання рівняння теплопровідності при розрахунку передачі тепла через плоску та циліндричну стінки з рівномірно розподіленими в них джерелами теплоти.
7. Тепловіддача конвекцією. Основні види та рівняння конвективного теплообміну.
8. Використання формули Ньютона для розрахунку конвективного теплообміну. Поняття коефіцієнта тепловіддачі та фактори, що впливають на його величину.
9. Основні положення теорії подібності та її використання для розрахунку конвективного коефіцієнта тепловіддачі.
10. Тепловіддача випромінюванням. Загальна характеристика та основні закони, що використовуються при розрахунках .
11. Стадії теплових розрахунків електричних апаратів. Прямі та зворотні задачі теплових розрахунків.
12. Аналіз теплового режиму однорідного провідника. Криві нагріву та охолодження. Поняття постійної часу нагріву. Адіабатичний нагрів.
13. Режими роботи електричних апаратів. Поняття коефіцієнта перевантаження по струму та потужності.
14. Нагрів електричних апаратів струмами короткого замикання. Поняття фіктивного часу к.з. Поняття термічної стійкості.
15. Основні поняття та закони, що використовують для аналізу процесів комутації електричних кіл.
16. Енергетичні перетворення при комутації електричних кіл.
17. Включення електричних кіл. Активно-індуктивне коло постійного струму.

18. Стисла характеристика основних видів газового розряду. Загальна характеристика електродугового розряду.

19. Характеристика фізичних явищ у стовбурі електричної дуги та приелектродних зонах. Потoki плазми.

20. Енергетичний баланс стовбура електричної дуги. Характеристика процесів теплообміну стовбура дуги з навколишнім середовищем.

21. Статичні та динамічні характеристики електричної дуги. Моделі дуги Кассі та Майра

22. Вимикання електричних кіл постійного струму. Умова вимикання електричного кола постійного струму. Перенапруги.

23. Вимикання електричних кіл змінного струму. Процеси біля нуля струму. Умова вимикання електричного кола змінного струму.

24. Поняття поновлюваної напруги. Поновлення напруги у одночасотному та двочастотному контурах. Невіддалене коротке замикання.

25. Поняття поновлюваної міцності. Поновлення міцності у міжконтактному проміжку при вимиканні електричних кіл високої та низької напруги.

26. Практичні способи дугогасіння в комутаційних апаратах.

27. Комутаційні елементи з шунтуванням електричної дуги активним опором. Контактно-напівпровідникові комутаційні елементи.

28. Комутаційні елементи з використанням напівпровідникових приладів.

29. Загальні відомості про електромагнітні системи електричних апаратів. Структура та класифікація електромагнітних систем

30. Характеристики та властивості феромагнітних матеріалів. Статична та динамічна петлі гістерезису.

31. Дайте детальну характеристику магнітом'яких і магніто-твердих феромагнітних матеріалів. Пермалой і аморфні сплави.

32. Задачі розрахунку магнітних кіл. Рівняння електромагнітного поля. Поняття схеми заміщення магнітного кола. Закони Ома та Кирхгофа для розрахунку магнітних кіл.

33. Розрахунок магнітних провідностей повітряних проміжків магнітних кіл. Поняття коефіцієнта випучування.

34. Методи розрахунку магнітних кіл без урахування розсіяння магнітного потоку та з його урахуванням.

35. Задача розрахунку обмотки. Поняття коефіцієнта заповнення обмотки. Методи визначення обмоточних даних.

36. Методи визначення електромагнітних зусиль електромагнітів.

Силові характеристики електромагнітів постійного струму: тягова, протидіючих сил, навантажна.

37. Електромагнітні зусилля та тягова характеристика електромагнітів змінного струму. Явище вібрації якоря та методи її обмеження.

38. Час спрацьовування електромагніта постійного струму при включенні та відключенні. Складові часу спрацьовування та їх визначення.

39. Прискорення та уповільнення спрацьовування електромагнітів. Магнітне та механічне демпфування. Форсування електромагнітів.

40. Принцип дії поляризованих електромагнітів. Різновиди магнітних кіл та налаштувань.

41. Принцип дії магнітних підсилювачів. Теорії лінеаризованого та ідеального магнітного підсилювача. Аналіз роботи дроселя насичення без підмагнічування на основі теорії ідеального магнітного підсилювача.

42. Аналіз роботи дроселя дросельного магнітного підсилювача на основі теорії ідеального магнітного підсилювача. Зворотні зв'язки та зміщення характеристики.

43. Принцип дії магнітних підсилювачів з самонасиченням. Основні схемні рішення.

44. Поняття електричного контакту. Класифікація електричних контактів електричних апаратів. Навести приклади.

45. Поняття перехідного контактного опору. Його основні складові. Сферична та еліптична моделі електричного контакту.

46. Основні фактори, що впливають на величину перехідного контактного пору. $R-U$ характеристика.

47. Вплив факторів зовнішнього середовища на роботоспроможність малопотужних і потужних контактів. Засоби їх усунення.

48. Нагрів контактів при тривалому протіканні струму. Температури контакту та контактної площадки (формула Хольма-Кольрауша).

49. Робота контактів в режимі короткого замикання. Термічна та електродинамічна дії струму к.з. Компенсація електродинамічних зусиль.

50. Поняття електричної ерозії. Характеристика електроерозійних явищ в процесі розмикання та замикання контактів під навантаженням.

51. Фактори, що впливають на швидкість електродугової ерозії і комутаційний ресурс електричних апаратів.

52. Вимоги до матеріалів контактів електричних апаратів. Використання металокерамічних матеріалів. Рідиннометалеві матеріали.

53. Загальна характеристика електродинамічних та індукційних

явищ в електричних апаратах.

54. Визначення електродинамічних зусиль за законом Біо-Савара-Лапласа. Методи визначення напрямку дії електродинамічних зусиль.

55. Визначення електродинамічних зусиль за зміненням електромагнітної енергії. Електродинамічні зусилля у кільцевому провіднику.

56. Електродинамічні зусилля при змінному струмі. Електродинамічна стійкість електричних апаратів.

4 КОНТРОЛЬНІ РОБОТИ

В процесі вивчення дисципліни виконуються дві контрольні роботи, по одній у кожному семестрі. Кожна контрольна робота складається з теоретичної та практичної частин. Теоретична частина полягає у письмовій відповіді на одне з контрольних питань, що надані у розділі 3. Відповіді на питання повинні бути конкретними, містити математичні співвідношення, освітлюючи фізичні принципи протікаючих процесів або конструктивних рішень. Практична частина полягає у вирішенні задач №1–№4. Вирішення задач повинно супроводжуватись відповідними поясненнями та посиланнями на літературу, що використовується.

Контрольні роботи захищаються при співбесіді з викладачем в дні консультацій, але не пізніше за термін, вказаний в семестровому графіку. Іногородні студенти висилають контрольну роботу поштою. Якщо контрольна робота не буде зарахована, всі необхідні виправлення потрібно виконати в тому ж зошиті після підпису рецензента.

Не можна вносити які-небудь поправки в текст або в графіки, що вже перевірені рецензентом. При відсутності місця в зошиті можна підклеїти до неї додаткові листки.

4.1 Контрольна робота №1

Варіанти щодо контрольних питань до контрольної роботи надані у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти контрольних питань

Перед- остання цифра інд. шифру	Остання цифра індивідуального шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
7	21	22	23	24	26	27	28	1	2	3
6	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
4	24	26	27	28	1	2	3	4	5	6
3	7	8	9	10	12	13	14	15	16	12
2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	23	24	26	27	28	1	2	3	4	5

Задача №1: Скласти рівняння кривої нагріву круглої мідної шини діаметром d , по якій почав протікати постійний струм I . Температура шини до початку його протікання дорівнювала температурі навколишнього середовища ϑ_0 . Варіанти чисельних значень початкових даних до задачі надані у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Варіанти початкових даних до задачі №1

Остання цифра індивідуального шифру	Діаметр шини d , мм	Величина струму I , А	Температура навколишнього середовища ϑ_0 , °C
0	8	350	30
1	12	400	32
2	14	400	33
3	16	450	35
4	18	450	31
5	20	500	30
6	22	500	32
7	24	530	33
8	26	600	35
9	30	700	30

Методичні вказівки до вирішення задачі №1:

Рівняння кривої нагріву у загальному вигляді має такий вигляд:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{уст}} (1 - e^{t/T}) + \vartheta_0 e^{t/T}$$

де $\vartheta_{\text{уст}}$ – стале значення температури шини, °C;

T – постійна часу нагріву, с.

Стала температура шини визначається з наступного рівняння:

$$\vartheta_{\text{уст}} = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{уст}})}{\alpha_t p q} + \vartheta_0,$$

де α_t – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини; його величину прийняти такою, що складає 10 Вт/(м²·K);

ρ_0 – питомий опір міді при 0°C;

α – температурний коефіцієнт опору, 1/K;

p – охолоджувана поверхня шини у розрахунку на одиницю її довжини (або периметр поперечного перерізу), м;

q – площа поперечного перерізу шини, м^2

Постійна часу нагріву шини визначається за таким виразом:

$$T = \frac{c\gamma q}{\alpha p},$$

де c – питома теплоємність міді, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

γ – щільність міді, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Задача №2: Визначити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з бокової зовнішньої поверхні циліндричної котушки індуктивності висотою h , розташованою вертикально в спокійному повітрі з температурою ϑ_0 і нагрітою при протіканні струму до температури ϑ . Варіанти чисельних значень початкових даних до задачі надані у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Варіанти початкових даних до задачі №2.

Передостання цифра індивідуального шифру	Висота котушки, h , мм	Температура	
		ϑ_0 , °C	ϑ , °C
0	150	35	110
1	160	30	115
2	170	40	125
3	180	30	100
4	190	20	95
5	200	25	90
6	210	20	105
7	150	30	110
8	160	35	101
9	170	45	135

Методичні вказівки до рішення задачі №2:

Оскільки котушка розташована у спокійному повітрі, то уданому випадку для визначення коефіцієнта тепловіддачі застосовується відповідне критеріальне рівняння до вільної конвекції у необмеженому просторі:

$$Nu_m = C[Gr \cdot Pr]_m^n,$$

де Gr – критерій Грасгофа, що визначається за наступною формулою

$$Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (\vartheta - \vartheta_0),$$

де g – прискорення вільного падіння;

β – коефіцієнт об'ємного розширення навколишнього середовища; у даному випадку котушка розташована у повітрі, тобто у газовому середовищі, для якого ця величина складає

$$\beta_m = \frac{1}{\vartheta_m + 273};$$

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості навколишнього середовища [5];

L – визначальний розмір охолоджуваного об'єкту; у даному випадку котушка розташована вертикально, тому визначальним розміром котушки є її висота;

Pr – критерій Прандтля [5].

C та n — емпіричні коефіцієнти, що визначаються в залежності від добутку $(Gr \cdot Pr)_m$ [5];

m – індекс, який вказує на те, що значення теплофізичних параметрів охолоджувального середовища λ , ν треба обирати для так званої **визначальної температури** між нагрітим тілом і середовищем, якою є середньо арифметична температура між нагрітим тілом та охолоджувальним середовищем $\vartheta_m = 0,5 \cdot (\vartheta + \vartheta_0)$.

4.2 Контрольна робота №2

Варіанти щодо контрольних питань до контрольної роботи надані у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Варіанти контрольних питань

Передостання цифра індексу шифру	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
8	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
7	49	50	51	52	53	54	55	56	29	30
6	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
5	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
4	51	52	53	54	55	56	28	29	30	31

Продовження табл. 4.4

3	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
2	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
1	52	53	54	55	56	28	29	30	31	32
0	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42

Задача №3: Визначити температуру контакту та контактної площинки для контактного вузла, виконаного з двох мідних нескінченних шин прямокутного поперечного перетину розміром $a \times b$, складених у стик і стиснених силою P . Через контактний вузол протікає струм I . Температура навколишнього середовища складає ϑ_0 . Варіанти чисельних значень початкових даних до задачі надані у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти початкових даних до задачі №3

Остання цифра індивідуального шифру	Поперечний перетин $a \times b$, мм	Контактне натиснення P , Н	Величина струму I , А	Температура навколишнього середовища ϑ_0 , °С
0	50×10	280	500	30
1	60×8	290	600	30
2	50×8	300	550	35
3	60×10	310	650	35
4	40×10	315	630	40
5	40×8	285	530	40
6	60×15	295	570	32
7	50×15	305	670	32
8	50×12	320	620	41
9	40×12	325	610	41

Методичні вказівки до рішення задачі №3:

Стале значення температури шини у точках, віддалених від місця контакту визначається з наступного рівняння (див. задачу №1):

$$\vartheta_{\text{уст}} = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{уст}})}{\alpha_t p q} + \vartheta_0,$$

а температура контакту (тобто на межі області стягування ліній струму) визначиться з вираження [5]:

$$\vartheta_k = \vartheta_{\text{уст}} + \frac{I^2 R_k}{2\sqrt{\lambda q \alpha_t p}},$$

де I – струм, що протікає через контактний вузол, А;

R_k – перехідний контактний опір, Ом;

α_t – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шин; його величину при розрахунках прийняти такою, що складає 16 Вт/(м²·К);

λ – теплопровідність матеріалу шин, Вт/(м·К).

Перехідний контактний опір при вирішенні задачі визначити за емпіричною формулою [2]:

$$R_k = R_0 + \frac{\kappa}{(0,102P_k)^m},$$

де R_0 , κ та m – константи, що залежать від матеріалів, форми та стану контактної поверхні [2];

P_k – величина контактного натиснення, Н.

Температура контактної площинки визначається за формулою Хольма-Кольрауша [5]:

$$\vartheta_{\text{кпл}} = \frac{I^2 R_k^2}{8\rho\lambda} + \vartheta_k.$$

Питомий опір матеріалу шин в області стягування ліній струму може бути визначено за наступним виразом [5]:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \vartheta_k \right).$$

Задача №4: Визначити мінімальне значення електромагнітної сили, що діє у прямокутному розщепленому полюсі електромагніта, розміри якого складають $a \times b$. Дві третини площі полюса охоплює короткозамкнений виток, активний опір якого складає r_b . Амплітудне значення магнітної індукції в осерді B_m . Варіанти чисельних значень початкових даних до задачі надані у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Варіанти початкових даних до задачі №4

Остання цифра індивідуального шифру	Розміри полюсу $a \times b$, мм	Амплітудне значення магнітної індукції B_m , Тл	Активний опір к.з. витка r_b , Ом
0	50×30	0,8	$5 \cdot 10^{-4}$
1	60×40	0,75	$6 \cdot 10^{-4}$

Продовження табл. 4.6

2	50×25	0,7	$4 \cdot 10^{-4}$
3	60×25	0,65	$4,5 \cdot 10^{-4}$
4	45×15	0,85	$3,5 \cdot 10^{-4}$
5	40×12	0,9	$2 \cdot 10^{-4}$
6	62×28	0,95	$6,5 \cdot 10^{-4}$
7	50×20	1,0	$4,5 \cdot 10^{-4}$
8	45×20	1,05	$4 \cdot 10^{-4}$
9	40×16	1,1	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Методичні вказівки до рішення задачі №3:

Відповідно до умови задачі, дві третини полюса охоплено короткозамкненим витком. Отже площа, що охоплена к.з. витком буде складати:

$$S_2 = \frac{2}{3} ab.$$

Відповідно площа полюса, що не охоплена к.з. витком буде складати:

$$S_1 = \frac{1}{3} ab$$

Реактивний магнітний опір магнітному потоку, що проходить через охоплену к.з. витком частину полюса визначається за наступним виразом [5]:

$$X_{\text{м.кз}} = \frac{2\pi f}{r_{\text{в}}},$$

де f – частота джерела живлення; прийняти такою, що дорівнює промисловій частоті 50 Гц.

Амплітудне значення магнітного потоку в осерді електромагніта а отже і сумарного потоку, що проходить через розщеплений полюс буде складати:

$$\Phi_{\text{м}} = B_{\text{м}} ab \cdot \kappa_{\text{з.ст}},$$

де $\kappa_{\text{з.ст}}$ – коефіцієнт заповнення стали; у даному випадку прийняти таким, що дорівнює 0,92.

Відношення магнітних потоків, що проходять відповідно через охоплену та охоплену к.з. витком частини полюса визначається за наступним виразом [5]:

$$n = \frac{\Phi_{1m}}{\Phi_{2m}} = \frac{S_1}{S_2 \cos \psi},$$

де ψ – фазовий зсув між магнітними потоками Φ_1 та Φ_2 , який визначається за наступним виразом:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X_{\text{м.кз}}}{R_{\text{м}\delta 2}},$$

де $R_{\text{м}\delta 2}$ – активний магнітний опір магнітному потоку, що проходить через охоплену к.з. витком частину полюса; цей опір обумовлений проходженням магнітного потоку через повітряний зазор, тому визначається за наступним виразом [5]:

$$R_{\text{м}\delta 2} = \frac{\delta}{\mu_0 S_2},$$

де δ – величина повітряного зазора; у даному випадку може бути прийняти таким, що дорівнює 0,1 мм.

Амплітудне значення магнітного потоку, що проходить через охоплену к.з. витком частину полюса визначається за наступним рівнянням [5]:

$$\Phi_{2m} = \frac{\Phi_m}{\sqrt{1 + n^2 + 2n \cos \psi}}.$$

Середні значення електромагнітних сил відповідно в охопленій та охопленій к.з. витком частин полюса визначаються за формулою Максвела:

$$P_{\text{сер1}} = \frac{\Phi_{1m}^2}{4\mu_0 S_1}; \quad P_{\text{сер2}} = \frac{\Phi_{2m}^2}{4\mu_0 S_2}$$

Амплітуда змінної складової сумарного електромагнітного зусилля визначається за наступним рівнянням [5]:

$$P_{m\sim} = \sqrt{P_{\text{сер1}}^2 + P_{\text{сер2}}^2 + P_{\text{сер1}} P_{\text{сер2}} \cos 2\psi}.$$

Пульсація електромагнітної сили

$$p = \frac{P_{m\sim}}{P_{\text{сер1}} + P_{\text{сер2}}} \cdot 100\%$$

Мінімальне значення електромагнітної сили

$$P_{\text{мін}} = P_{\text{сер1}} + P_{\text{сер2}} - P_{m\sim}.$$

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. Таев И.С. Электрические аппараты: Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов / Под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 496 с.
3. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1970. – 328 с.
4. Теория электрических аппаратов/ Г.Н Александров, В.В. Борисов, В.Л. Иванов и др.; п/ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. – 354 с.
5. Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. Задачник по электрическим аппаратам. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.
6. Буль Б.К., Буткевич Г.В., Годжелло А.Г. и др. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
7. Теория электрических аппаратов: Учебник для вузов/ Г.Н Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др.; п/ред. проф. Г.Н. Александрова. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбТУ, 2000. – 540 с.

Додаткова

8. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. М.-Л.: ГЭИ, 1969. – 370 с.
9. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Поляризованные электромагниты. – М.: Энергия, 1965. – 160 с.
10. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты переменного тока. М.: Энергия, 1968. – 138 с.
11. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. Учебное пособие. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
12. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
13. Шопен Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики: Учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
14. Преображенский А.А., Бишард Е.Т. Магнитные материалы и элементы. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.
15. Холявский Г.Б. Расчет электродинамических усилий в элект-

рических аппаратах. – Л.: Энергия, 1971. – 156 с.

16. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильнотоочных электрических аппаратов/ Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.Б. Борисов и др. Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 384 с.

17. Никитенко А.Г. Автоматизированное проектирование электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1983. – 192 с.

18. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1967. – 380 с.

19. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

20. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.

21. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1971.–560 с.

22. Брон О.Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. – М.: Госэнергоиздат, 1954.– 532 с.

23. Брон О.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. – Л.: Энергия, 1975.– 212 с.

24. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. – М.: Энергия, 1973. – 263 с.

25. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. – М.: Энергия, 1973.– 424 с.