

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТЕХНІЧНИЙ КОЛЕДЖ

Луцького національного технічного університету

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Методичні вказівки до практичних занять
для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти
освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
галузь знань 14 Електрична інженерія
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
денної форми навчання

Луцьк 2021

УДК 621.397

Е-47

До друку

Голова навчально-методичної ради Луцького НТУ _____ О.М. Ляшенко

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій Луцького НТУ

Директор бібліотеки _____ С.С. Бакуменко

Затверджено навчально-методичною радою Луцького НТУ, протокол № ___ від «___» _____ 2021 року.

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою ТК Луцького НТУ, протокол № ___ від «___» _____ 2021 року.

Голова навчально-методичної ради ТК ЛНТУ _____

Розглянуто і схвалено на засіданні випускаючої циклової комісії «Електропостачання» ТК Луцького НТУ,

протокол № ___ від «___» _____ 2021 року.

Голова ВЦК _____ М.М. Євсюк

Укладач: _____ В.В. Лишук, викладач Технічного коледжу Луцького НТУ

Рецензент: _____ Й.Р. Селепина, доцент кафедри електроніки та телекомунікацій Луцького НТУ

Відповідальний за випуск: _____ М.М. Євсюк, голова випускаючої циклової комісії «Електропостачання» Технічного коледжу Луцького НТУ

Електричні апарати [Текст]: Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми / укладачі В.В. Лишук. – Луцьк : ТК Луцького НТУ, 2021. – 24 с.

Дані методичні вказівки до практичних занять складені на основі робочої програми з дисципліни „Електричні апарати” і призначені для студентів студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми навчання.

© В.В. Лишук, 2021

ЗМІСТ

1. Робоча програма дисципліни «Електричні апарати».....	4
2. Характеристика дисципліни.....	4
3. Індивідуальні завдання.....	5
3.1. Завдання № 1.....	5
3.2. Завдання № 2.....	8
3.3. Завдання № 3.....	10
3.4. Завдання № 4.....	12
3.5. Завдання № 5.....	13
3.6. Завдання № 6.....	15
Додаток А.....	18
Додаток Б.....	19
Додаток В.....	21
Література.....	22

1. Робоча програма дисципліни «Електричні апарати»

Розподіл навчальних годин

	Усього	Семестр
		VIII
Усього годин за навчальним планом, у тому числі:	120	120
Аудиторні заняття, з них:	56	80
Лекції	48	48
Лабораторні роботи	0	0
Практичні заняття	32	32
Семінарські заняття	0	0
Самостійна робота, у тому числі при:	40	40
Підсумковий контроль	екзамен	екзамен

2. Характеристика дисципліни

Навчальна дисципліна „Електричні апарати” входить до блоку професійно орієнтованих дисциплін.

Мета вивчення дисципліни – засвоєння знань та придбання навичок, необхідних для розуміння питань щодо значення та ролі електричних апаратів у автоматизованому електроприводі на підприємствах металургійної промисловості.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен знати:

- процеси в електричних апаратах низької напруги;
- елементи розрахунку електромагнітів;
- особливості використання комутаційної безконтактної апаратури та апаратури захисту електроустаткування.

Вміти:

- висувати комплекс вимог до електричних апаратів;
- оцінювати можливість використання електричних апаратів;
- читати електричні принципи схеми;
- застосовувати комутаційну апаратуру в електроустаткуванні;
- оцінити можливість застосування безконтактних електричних апаратів.

Критерії успішності – отримання позитивної оцінки по самостійній роботі.

Засоби діагностики успішності навчання – перелік тем самостійної роботи; перелік джерел, що є вихідною інформацією.

Дисципліні передуює вивчення дисциплін „Теоретичні основи електротехніки”, „Електроніка та мікросхемо-техніка”. Набуті знання використовуються при вивченні дисциплін електротехнічного напрямку.

3. Індивідуальні завдання

В процесі вивчення дисципліни виконується контрольна робота, яка складається з двох частин. Кожна частина полягає у вирішенні задач №1 - №6. Вирішення задач повинно супроводжуватись відповідними поясненнями та посиланнями на літературу, що використовується.

Контрольна робота захищається 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.

3.1. Методичні вказівки до виконання задачі №1 «Розрахунок обмотки електромагніта постійного струму»

На рисунку 1 показані магнітопровід і котушка електромагніта. Обмотка котушки виконується ізолюваним проводом, який намотується на каркас. Котушки можуть бути і безкаркасними. У цьому випадку витки обмотки скріплюються стрічкової або листовий ізоляцією, або заливальним компаундом. Для розрахунку обмотки напруги повинні бути задані напруга U , МРС F і геометричні розміри котушки.

Перетин обмоточного дроту q знаходять з потрібної МДС:

$$F = \frac{U}{R} \cdot W = \frac{U \cdot q \cdot W}{\rho \cdot l_{\text{сер}} \cdot W} = \frac{U \cdot q}{\rho \cdot l_{\text{сер}}}, \quad (1)$$

звідси

$$q = F \cdot \rho \cdot l_{\text{сер}} / U, \quad (2)$$

де ρ - питомий опір матеріалу проводу, Ом·м;

W - число витків обмотки;

$l_{\text{сер}}$ - середня довжина витка, м;

З рисунка 1 впливає

$$l_{\text{сер}} = \frac{\pi(D_{\text{об}} + d_{\text{об}})}{2}, \quad (3)$$

$D_{\text{об}}$, $d_{\text{об}}$ - відповідно зовнішній і внутрішній діаметри обмотки, м;

R - опір обмотки, Ом;

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\text{сер}} \cdot W}{q}. \quad (4)$$

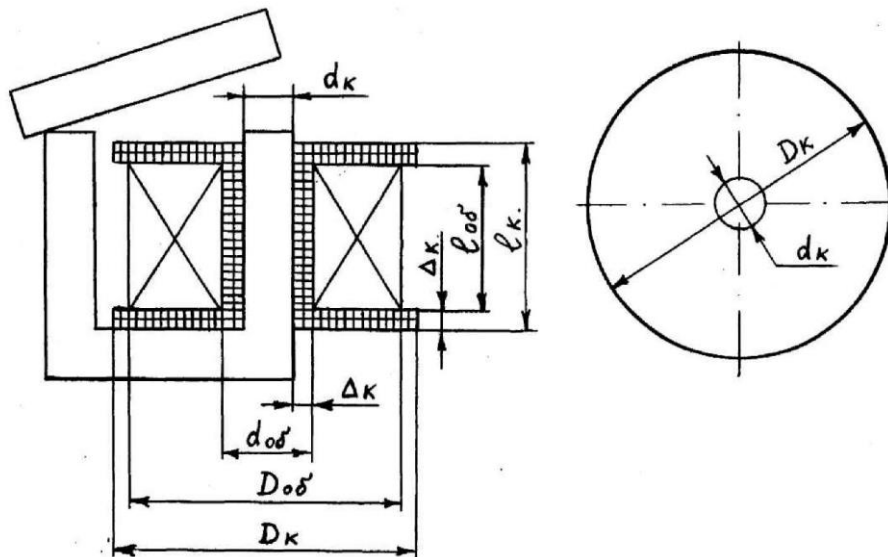


Рис.1. Електромагніт постійного струму

По знайденому перетину, за допомогою таблиць сортаментів [3, 4] знаходиться найближчий стандартний діаметр проводу. Число витків обмотки при заданому перерізі котушки $Q_{об}$ визначається коефіцієнтом заповнення по міді f_m :

$$f_m = \frac{W \cdot q}{Q_{об}}, \quad (5)$$

де $W \cdot q$ - площа, займана міддю обмотки, m^2 ;

$Q_{об}$ - перетин обмотки, m^2 .

З рисунка 1

$$Q_{об} = \frac{D_{об} - d_{об}}{2} \cdot l_{об}, \quad (6)$$

де $l_{об}$ - довжина обмотки, м.

Число витків обмотки

$$W = \frac{f_m \cdot Q_{об}}{q}. \quad (7)$$

Потужність, що виділяється в обмотці у вигляді тепла

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (8)$$

З урахуванням виразів (1), (4), (5) потужність, споживану обмоткою, можна розрахувати інакше:

$$P = \frac{U^2 \cdot q^2}{\rho \cdot l_{сер} \cdot f_m \cdot Q_{об}} = F^2 \cdot \frac{\rho \cdot l_{сер}}{f_m \cdot Q_{об}}. \quad (9)$$

Таким чином, потужність прямо пропорційна квадрату МРС і обернено пропорційна коефіцієнту заповнення f_m і площі перетину обмотки $Q_{об}$. Звичайно застосовується рядове намотування і намотування " навалом ". У

першій - провід укладають рядами щільно виток до витка . Такі обмотки можна мотати вручну або на спеціальних верстатах. У другій - провід намотують без дотримання рядності .

Згідно (1) при заданому діаметрі дроту МРС обмотки не залежить від способу укладання дроти. При намотуванні " навалом " число витків при тих же геометричних розмірах каркаса зменшиться в порівнянні з рядовий, струм пропорційно збільшиться, а МРС обмотки залишиться без зміни. Потужність, споживана обмоткою, під час намотування " навалом " збільшиться, оскільки зменшиться коефіцієнт f_m .

Для рядового намотування значення f_m беруть в довідковій літературі [2] або знаходять розрахунковим шляхом:

$$f_m \approx \frac{q}{d_1^2}. \quad (10)$$

Орієнтовну оцінку нагріву обмотки можна виконати за наступними рекомендаціями [1]. Дослідним шляхом встановлено, що в обмотці, намотаною проводом ПЕВ-1 і ПЕВ-2 на ізоляційному каркасі, максимальна температура не перевищить 105°C , якщо на кожну одиницю виділеної потужності буде припадати визначена бокова поверхня $S_{\text{бок}0}$. Тоді можна ввести поняття питомої охолоджуючої бічної поверхні $\sigma = \frac{S_{\text{бок}0}}{P}$. Розмір цієї поверхні залежить від геометрії обмотки (рис. 1):

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \frac{l_{\text{об}}}{D_{\text{об}}} < 1 \\ \text{при } \frac{l_{\text{об}}}{D_{\text{об}}} = 1 \\ \text{при } \frac{l_{\text{об}}}{D_{\text{об}}} > 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \sigma_0 \geq 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}; \\ \sigma_0 \geq 10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}; \\ \sigma_0 \geq 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}. \end{array} \quad (11)$$

Якщо в результаті розрахунку виявиться, що $\sigma < \sigma_0$,

де

$$\sigma = \frac{S_{\text{бок}0}}{P}, \text{ м}^2/\text{Вт}; \quad (12)$$

З рис. 1 отримаємо фактичну бокову охолоджуючу поверхню

$$S_{\text{бок}} = \pi \cdot D_{\text{об}} \cdot l_{\text{об}}, \text{ м}^2; \quad (13)$$

то температура обмотки буде вище допустимої. У цьому випадку необхідно або зменшити МДС обмотки, або збільшити площу вікна $Q_{\text{об}}$. При зміні живлячої напруги з U_1 на U_2 і незмінному вікні обмотки, згідно (1) повинно мати місце рівність

$$U_1 \cdot q_1 = U_2 \cdot q_2, \quad (14)$$

так як r і $I_{\text{ср}}$ залишаються без змін, а МРС обмотки повинен залишитися постійною заданою величиною. Оскільки при переході з однієї напруги на інше змінюється діаметр проводу і товщина ізоляції, коефіцієнт заповнення обмотки f_m також змінюється. Скориставшись (9), отримаємо:

$$P_1 f_{m1} = P_2 f_{m2}. \quad (15)$$

При меншому діаметрі дроту (це має місце, якщо $U_1 < U_2$) f_m зменшується через зростання відносною товщини ізоляції. Отже, перехід на більш високу напругу супроводжується збільшенням споживаної потужності і температури обмотки. Якщо не було запасу по температурі нагріву, то це зажадає зниження сили, що розвивається електромагнітом. Для розрахунку обмотки струму вихідними параметрами є МРС F і струм ланцюга I . Число витків обмотки знаходиться з виразу

$$W = \frac{F}{I}. \quad (16)$$

Перетин дроту доцільно вибрати за рекомендованою щільності струму j :

$$q = I/j, \quad (17)$$

де $j = (2 - 4) \cdot 10^6$ А/м² - для тривалого режиму роботи,

$j = (5 - 12) \cdot 10^6$ А/м² - для повторно - короткочасного режиму роботи,

$j = (13 - 30) \cdot 10^6$ А/м² - для короткочасного режиму роботи.

Площа вікна, займаного рядовий обмоткою, визначається числом витків і коефіцієнтом f_m . З (7) отримаємо:

$$Q_{\text{об}} = \frac{W \cdot q}{f_m}. \quad (19)$$

Знаючи $Q_{\text{об}}$ і використовуючи вирази (3), (4) і (8), можна визначити середню довжину витка, опір обмотки і втрати в ній. Після цього може бути проведена оцінка нагріву з допомогою (11) - (13).

3.2. Методичні вказівки до виконання задачі №2

«Розрахунок обмотки електромагніту змінного струму»

Вихідними даними для розрахунку обмотки напруги є амплітуди МРС F_m , магнітного потоку Φ_m і напруга мережі U . Для електромагнітів змінного струму справедливо наступне рівняння рівноваги напруг:

$$U^2 = (IR)^2 + (4,44f_c \cdot W \cdot \Phi_m)^2, \quad (20)$$

де U та I - діючі значення напруги та струму, W та A ;

f_c - частота струму мережі, Гц.

Оскільки струм і опір можуть бути розраховані тільки після визначення числа витків, то (20) не дозволяє знайти відразу всі параметри обмотки. Завдання вирішується методом послідовних наближень. У першому наближенні

можна прийняти $R = 0$, так як активне падіння напруги значно менше реактивного. Тоді число витків обмотки

$$W = \frac{U}{4,44f_c \cdot \Phi_m}.$$

Оскільки при розрахунку W ми знехтували активної складової падіння напруги, то дійсне число витків повинно бути декілька менше. У практичних викладках зазвичай

$$W = \frac{(0,7 - 0,95) \cdot U}{4,44f_c \cdot \Phi_m}, \quad (21)$$

тоді

$$I = \frac{F_m}{\sqrt{2} \cdot W}. \quad (22)$$

Перетин дроту визначають за виразом (17), задавшись щільністю струму (18). Вибравши стандартний діаметр і спосіб укладання дроти, знаходимо коефіцієнт заповнення f_m (10) і площа вікна обмотки $Q_{об}$ з (19).

Після цього можна визначити середню довжину витка і активний опір обмотки. Товщину обмотки $h_{об}$ легко знайти за геометричними розмірами котушки (рис. 2):

$$h_{об} = \frac{(b_{об} - a_{об})}{2} = \frac{Q_{об}}{l_{об}}. \quad (23)$$

Середня довжина витка розраховується через внутрішній $\Pi_{вн}$ та зовнішній $\Pi_{зовн}$ периметри обмотки:

$$\Pi_{вн} = 2[(a_k + 2\Delta_k) + (A_k + 2\Delta_k)], \quad (24)$$

$$\Pi_{зовн} = 2[(a_k + 2\Delta_k + 2h_{об}) + (A_k + 2\Delta_k + 2h_{об})]$$

або

$$\Pi_{зовн} = \Pi_{вн} + 8h_{об}, \quad (25)$$

$$l_{сер} = \frac{\Pi_{вн} + \Pi_{зовн}}{2}. \quad (26)$$

Активний опір обмотки визначаємо за (4). Якщо, після підстановки отриманих даних у (20) ліва частина відрізняється від правої більш ніж на 10%, то необхідно варіювати число витків до отримання задовільного збігу.

Після розрахунку R проводиться перевірка обмотки на нагрівання. Розрахунок ведеться так само, як і для обмоток постійного струму. При цьому у співвідношеннях (11) замість зовнішнього діаметра обмотки $D_{об}$ слід підставляти еквівалентний зовнішній діаметр обмотки

$$D_{езовн} = \frac{\Pi_{зовн}}{\pi}. \quad (27)$$

Особливістю є нагрів магнітопроводу за рахунок втрат від вихрових струмів і гістерезису. Відведення що виділяється в обмотці тепла через сердечник утруднений, і крапка з максимальною температурою лежить на

внутрішньому радіусі обмотки. Для поліпшення охолодження прагнуть збільшувати поверхню торців котушки при зменшенні її довжини.

Потужність втрат в обмотці знаходять за виразом

$$P = I^2 R. \quad (28)$$

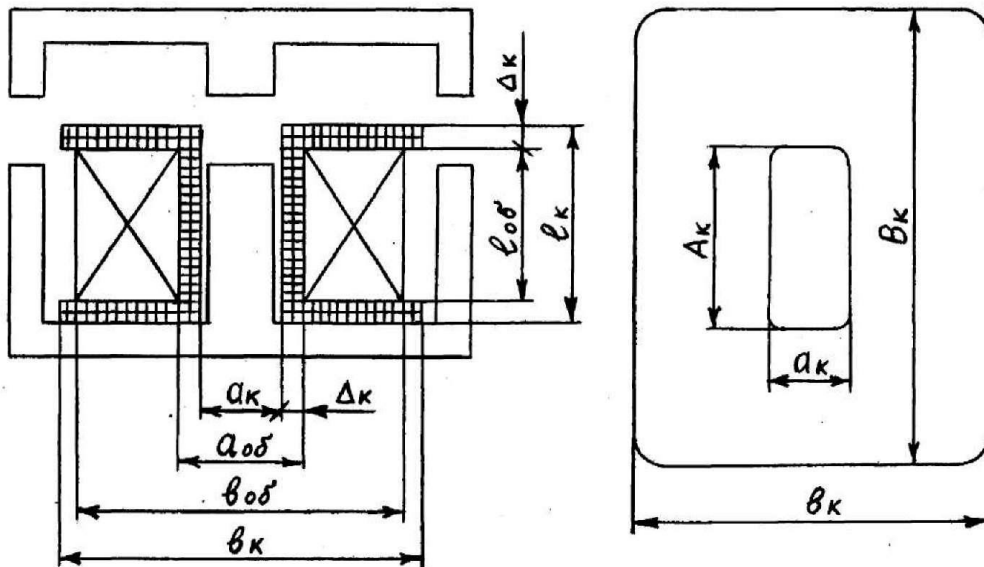


Рис.2. Електромагніт змінного струму

Бічна охолоджуюча поверхня

$$S_6 = \Pi_{\text{зовн}} \cdot l_{\text{об}}. \quad (29)$$

Якщо обмотка напруги харчується від джерела з напругою U_2 , відмінним від номінального U_1 , і сила тяги повинна залишитися тією ж, то обмотувальні дані повинні бути відповідно змінені. Значення МРС і кут зсуву між струмом і напругою при цьому вважаються незмінними. Згідно [1] повинні бути дотримані співвідношення:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2}, \quad (30)$$

$$U_1 \cdot q_1 = U_2 \cdot q_2, \quad (31)$$

$$Q_{\text{об1}} f_{\text{м1}} = Q_{\text{об2}} f_{\text{м2}}. \quad (32)$$

Повна потужність обмотки при переході з однієї напруги на інше і дотриманні зазначених умов не змінюється, так як

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (33)$$

Для розрахунку обмотки струму заданими параметрами є діючі значення МДС F і струму ланцюга I . Розрахунок таких обмоток ведеться за аналогією з обмотками постійного струму з урахуванням (26) - (29).

3.3. Методичні вказівки до виконання задачі 3

Варіанти щодо контрольних питань до самостійної роботи надані у табл. 1.

Варіанти контрольних питань

Таблиця 1

Передостання 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	26	24	26	27	28	1	2	3	4	5

Задача №3: 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 J_0 . Варіанти чисельних значень початкових даних до задачі надані у табл.2.

Варіанти початкових даних до задачі №3

Таблиця 2

Остання цифра індивідуального шифру	Діаметр шини d , мм	Величина струму I , А	Температура навколишнього середовища J_0 , °С
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 №3:

Рівняння кривої нагріву у загальному вигляді має такий вигляд:

$$\vartheta = \vartheta_{\text{уст}} (1 - e^{t/\tau}) + \vartheta_0 e^{t/\tau}, \quad (34)$$

де $\vartheta_{\text{уст}}$ - сталі значення температури шини, °С;

T - постійна часу нагріву, с.

Стала температура шини визначається з наступного рівняння:

$$\vartheta_{уст} = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{уст})}{\alpha_T p q} + \vartheta_0, \quad (35)$$

де α_T - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини; його величину прийняти такою, що складає 10 Вт/(м²К); ρ_0 - питомий опір міді при 0°C; α - температурний коефіцієнт опору, 1/К; p - охолоджувана поверхня шини у розрахунку на одиницю її довжини (або периметр поперечного перерізу), м; q - площа поперечного перерізу шини, м²

Постійна часу нагріву шини визначається за таким виразом:

$$T = \frac{c \gamma q}{\alpha p}, \quad (36)$$

де c - питома теплоємність міді, Дж/(кг·К); γ - густина міді, кг/м³;

3.4. Методичні вказівки до виконання задачі 4

Задача №4: 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. 3.

Варіанти початкових даних до задачі №4.

Таблиця 3

Передостання цифра індивідуального шифру	Висота катушки, 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 №4:

Оскільки котушка розташована у спокійному повітрі, то уданому випадку для визначення коефіцієнта тепловіддачі застосовується відповідне

критеріальне рівняння до вільної конвекції у необмеженому просторі:

$$Nu_m = C[Gr \cdot Pr]_m^n, \quad (37)$$

де Gr - критерій Грасгофа, що визначається за наступною формулою

$$Gr = \beta g \frac{L^3}{\nu^2} (\vartheta - \vartheta_0), \quad (38)$$

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

$$\beta_m = \frac{1}{\vartheta_m + 273}; \quad (39)$$

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 $\vartheta_s = 0,5 \cdot (\vartheta + \vartheta_0)$.

3.5. Методичні вказівки до виконання задачі № 5

Варіанти щодо контрольних питань до контрольної роботи надані у табл. 4.

Варіанти контрольних питань

Таблиця 4

Передостання цифра інд. 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
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 №5. Визначити температуру контакту та контактної площинки для контактної 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.5.

Варіанти початкових даних до задачі №5

Таблиця 5

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 x 10	280	500	30
1	60 x 8	290	600	30
2	50 x 8	300	550	35
3	60 x 10	310	650	35
4	40 x 10	315	630	40
5	40 x 8	285	530	40
6	60 x 15	295	570	32
7	50 x 15	305	670	32
8	50 x 12	320	620	41
9	40 x 12	325	610	41

Методичні вказівки до рішення задачі № 5:

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

$$\vartheta_{уст} = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{уст})}{\alpha_t p q} + \vartheta_0, \quad (40)$$

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

$$\vartheta_k = \vartheta_{уст} + \frac{I^2 R_k}{2 \sqrt{\lambda q \alpha_t p}}, \quad (41)$$

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/(м²К); λ - теплопровідність матеріалу шин, Вт/(м·К). Перехідний контактний опір при вирішенні задачі визначити за емпіричною формулою [2]:

$$R_k = R_0 + \frac{k}{(0,102 P_k)^m}, \quad (42)$$

де R_0 , k та m - константи, що залежать від матеріалів, форми та стану контактної поверхні [2]; P_k - величина контактної натиснення, Н.

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

$$\vartheta_{к.пл} = \frac{I^2 R_k^2}{8\rho\lambda} + \vartheta_k. \quad (43)$$

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

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \vartheta_k \right). \quad (44)$$

3.6. Методичні вказівки до виконання задачі № 6

Задача № 6: 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. 6.

Варіанти початкових даних до задачі № 6

Таблиця 6

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 x 30	0,8	$5 \cdot 10^{-4}$
1	60 x 40	0,75	$6 \cdot 10^{-4}$
2	50 x 25	0,7	$4 \cdot 10^{-4}$
3	60 x 25	0,65	$4,5 \cdot 10^{-4}$
4	45 x 15	0,85	$3,5 \cdot 10^{-4}$
5	40 x 12	0,9	$2 \cdot 10^{-4}$
6	62 x 28	0,95	$6,5 \cdot 10^{-4}$
7	50 x 20	1,0	$4,5 \cdot 10^{-4}$
8	45 x 20	1,05	$4 \cdot 10^{-4}$
9	40 x 16	1,1	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Методичні вказівки до рішення задачі № 6.

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

$$S_2 = \frac{2}{3} ab. \quad (45)$$

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

$$S_1 = \frac{1}{3} ab. \quad (46)$$

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

$$X_{\text{м.кз}} = \frac{2\pi f}{r_{\text{в}}}, \quad (47)$$

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:

$$\Phi_{\text{м}} = B_{\text{м}} ab \cdot k_{\text{з.ст}}, \quad (48)$$

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

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

$$n = \frac{\Phi_{1\text{м}}}{\Phi_{2\text{м}}} = \frac{S_1}{S_2 \text{Cos}\psi}, \quad (49)$$

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

$$\text{tg}\psi = \frac{X_{\text{м.кз}}}{R_{\text{м}\delta 2}}, \quad (50)$$

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]:

$$R_{\text{м}\delta 2} = \frac{\delta}{\mu_0 S_2}; \quad (51)$$

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]:

$$\Phi_{2\text{м}} = \frac{\Phi_{\text{м}}}{\sqrt{1 + n^2 + 2n\text{Cos}\psi}}. \quad (52)$$

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

$$P_{\text{сер1}} = \frac{\Phi_{1m}^2}{4\mu_0 S_1}; P_{\text{сер2}} = \frac{\Phi_{2m}^2}{4\mu_0 S_2}. \quad (53)$$

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

$$P_m = \sqrt{P_{\text{сер1}}^2 + P_{\text{сер2}}^2 + P_{\text{сер1}} P_{\text{сер2}} \text{Cos}2\psi}. \quad (54)$$

Пульсація електромагнітної сили

$$p = \frac{P_m}{P_{\text{сер1}} + P_{\text{сер2}}} \cdot 100\%. \quad (55)$$

Мінімальне значення електромагнітної сили

$$P_{\text{мін}} = P_{\text{сер1}} + P_{\text{сер2}} - P_m. \quad (56)$$

Додаток А

Індивідуальне завдання № 1

Розрахувати обмотку напруги електромагніту постійного струму за вихідними даними в таблиці 1. Позначення геометричних розмірів котушки відповідають рисунку 1. Як зміняться обмотувальні дані електромагніта, якщо напруга джерела живлення замість U_1 стане рівним U_2 ? Режим роботи тривалий. Питомий електричний опір проводу прийняти рівним $\rho = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (105^0 С)

Варіанти завдань на котушку постійного струму

Таблиця 1

№ з/п	D_k	d_k	l_k	Δ_k	F	U_1	U_2
	10^{-3} , м	10^{-3} , м	10^{-3} , м	10^{-3} , м	А	В	В
1	2	3	4	5	6	7	8
1	54	18	72	2	1600	440	48
2						220	24
3						110	12
4						60	6
5	80	24	108	2	2000	440	48
6						220	24
7						110	12
8						60	6
9	94	31	142	2,5	3000	440	48
10						220	24
11						110	12
12						60	6
13	103	41	160	3	4200	440	48
14						220	24
15						110	12
16						60	6
17	60	12	46	2	1400	440	48
18						220	24
19						110	12
20						60	6
21	64	22	88	2	1700	440	48
22						220	24
23						110	12
24						60	6
25	84	25	110	2,5	2100	440	48
26						220	24
27						110	12
28						60	6
29	70	27	99	2,5	1300	440	48
30						220	24
31						110	12
32						60	6

1	2	3	4	5	6	7	8
33	58	19	92	2	1800	440	48
34						220	24
35						110	12
36						60	6
37	88	26	126	2,5	2500	440	48
38						220	24
39						110	12
40						60	6
41	92	28	138	2,5	2800	440	48
42						220	24
43						110	12
44						60	6
45	96	32	150	3	3400	440	48
46						220	24
47						110	12
48						60	6

Додаток Б
Індивідуальне завдання № 2

Розрахувати обмотку напруги електромагніту змінного струму за вихідними даними в таблиці 2. Позначення геометричних розмірів котушки відповідають рисунку 2. Як зміняться обмотувальні дані електромагніта при зменшенні напруги джерела живлення з U_1 до U_2 ? Режим роботи тривалий. Питомий електричний опір проводу прийняти рівним $\rho = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (105^0 С).

Варіанти завдання на котушку змінного струму

Таблиця 2

№ з/п	A_k	a_k	B_k	b_k	l_k	Δ_k	F_m	Φ_m	U_1	U_2
	10^{-3} , м	10^{-3} , м	10^{-3} , м	10^{-3} , м	10^{-3} , м	10^{-3} , м	А	10^{-4} , Вб	В	В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	13	13	31	31	24	1,5	410	1,8	500	48
2									380	36
3									220	24
4									127	12
5	18	12	39	31	32	1,5	610	2,3	500	48
6									380	36
7									220	24
8									127	12
9	21	17	47	45	35	2	480	3,8	500	48
10									380	36
11									220	24
12									127	12

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
13	26	24	55	51	25	2	470	4,5	500	48
14									380	36
15									220	24
16									127	12
17	40	24	80	60	35	2,5	630	6,2	500	48
18									380	36
19									220	24
20									127	12
21	42	33	88	76	35	2,5	620	8,3	500	48
22									380	36
23									220	24
24									127	12
25	48	39	98	90	35	3	640	11,1	500	48
26									380	36
27									220	24
28									127	12
29	29	29	65	65	35	3	610	7,1	500	48
30									380	36
31									220	24
32									127	12
33	14	14	35	35	28	1,5	500	2,1	500	48
34									380	36
35									220	24
36									127	12
37	23	18	45	30	32	2	560	3,4	500	48
38									380	36
39									220	24
40									127	12
41	27	22	59	54	24	2,5	510	4,2	500	48
42									380	36
43									220	24
44									127	12
45	30	20	70	60	30	3	580	5,1	500	48
46									380	36
47									220	24
48									127	12

Додаток В. Параметри обмотувальних проводів

Таблиця 3 – діаметри (d - неізолюваного, d_1 - ізолюваного) та площі поперечного перерізу (q) круглих мідних проводів

d , м 10^{-3}	q , м ² 10^{-6}	d_1 , м× 10^{-3}			d , м 10^{-3}	q , м ² 10^{-6}	d_1 , м× 10^{-3}		
		ПЕВ-1 ПЕВТЛ-1	ПЕВ-2 ПЕВТЛ-2	ПСД ПСДК			ПЕВ-1 ПЕВТЛ-1	ПЕВ-2 ПЕВТЛ-2	ПСД ПСДК
0,020	0,00031	0,035	-	-	0,72	0,407	0,770	0,800	0,99
0,025	0,00049	0,040	-	-	0,74	0,430	0,800	0,830	1,01
0,030	0,00071	0,045	-	-	0,77	0,466	0,830	0,860	1,04
0,040	0,00126	0,055	-	-	0,80	0,503	0,860	0,980	1,07
0,050	0,00196	0,070	0,080	-	0,83	0,541	0,890	0,920	1,10
0,060	0,00283	0,085	0,090	-	0,86	0,581	0,920	0,960	1,13
0,070	0,00385	0,095	0,100	-	0,90	0,636	0,960	0,990	1,17
0,080	0,00503	0,105	0,110	-	0,93	0,679	0,990	1,020	1,20
0,090	0,00636	0,115	0,120	-	0,96	0,724	1,020	1,050	1,23
0,100	0,00785	0,125	0,130	-	1,00	0,785	1,080	1,110	1,29
0,110	0,00950	0,135	0,140	-	1,04	0,849	1,120	1,150	1,33
0,120	0,01131	0,145	0,150	-	1,08	0,916	1,160	1,190	1,37
0,130	0,01327	0,155	0,160	-	1,12	0,985	1,200	1,230	1,41
0,140	0,01539	0,165	0,170	-	1,16	1,057	1,240	1,270	1,45
0,150	0,01767	0,180	0,190	-	1,20	1,131	1,280	1,280	1,49
0,160	0,0201	0,190	0,200	-	1,25	1,227	1,330	1,330	1,54
0,170	0,0227	0,200	0,210	-	1,30	1,327	1,380	1,430	1,59
0,180	0,0255	0,210	0,220	-	1,35	1,431	1,430	1,480	1,64
0,190	0,0284	0,220	0,230	-	1,40	1,539	1,480	1,530	1,69
0,200	0,0314	0,230	0,240	-	1,45	1,651	1,530	1,580	1,74
0,210	0,0346	0,240	0,250	-	1,50	1,767	1,580	1,640	1,79
0,230	0,0415	0,270	0,280	-	1,56	1,911	1,640	1,700	1,85
0,250	0,0491	0,290	0,300	-	1,62	2,060	1700	1,760	1,91
0,270	0,0573	0,310	0,320	-	1,68	2,220	1,760	1,820	1,97
0,290	0,0661	0,330	0,340	-	1,74	2,380	1,820	1,900	2,03
0,310	0,0775	0,350	0,360	0,55	1,81	2,570	1,900	1,970	2,10
0,330	0,0855	0,370	0,380	0,57	1,88	2,780	1,970	2,040	2,17
0,350	0,0962	0,390	0,410	0,59	1,95	2,990	2,040	2,110	2,24
0,380	0,1134	0,420	0,440	0,62	2,02	3,200	2,110	2,140	2,32
0,410	0,1320	0,450	0,470	0,65	2,10	3,460	2,200	2,230	2,40
0,440	0,1521	0,480	0,500	0,68	2,26	4,010	2,360	2,390	2,62
0,470	0,1735	0,510	0,530	0,71	2,44	4,680	2,540	2,570	2,80
0,490	0,1886	0,530	0,550	0,73	2,63	5,430	-	-	2,99
0,510	0,2040	0,560	0,580	0,77	2,83	6,290	-	-	3,19
0,530	0,2210	0,580	0,600	0,79	3,05	7,310	-	-	3,42
0,550	0,2380	0,600	0,620	0,81	3,28	8,450	-	-	3,65
0,570	0,2550	0,620	0,640	0,83	3,53	9,790	-	-	3,90
0,590	0,2730	0,640	0,660	0,85	3,80	11,34	-	-	4,17
0,620	0,3020	0,670	0,690	0,88	4,10	13,20	-	-	4,48
0,640	0,3220	0,690	0,720	0,90	4,50	15,90	-	-	4,88
0,670	0,3530	0,720	0,750	0,93	4,80	18,10	-	-	5,18
0,690	0,3740	0,740	0,770	0,95	5,20	21,24	-	-	5,58

ЛІТЕРАТУРА

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.
8. Б.В. Клименко. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту загальний курс./ Харків. – 2012.

Електричні апарати [Текст]: Методичні вказівки до практичних занять для здобувачів початкового рівня (короткий цикл) вищої освіти освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузь знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної форми / укладачі В.В. Лишук. – Луцьк : ТК Луцького НТУ, 2021. – 24 с.

Комп'ютерний набір
Редактор

В.В. Лишук
В.В. Лишук

Підписано до друку «__»_____2019 р. Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітур.
Таймс. Ум. друк. арк. 5,5
Тираж 50 прим

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ІВВ Луцького НТУ

