

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ-1 ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент

Пушкар М. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Відповідальний
редактор

Троценко Є. О., кандидат технічних наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 20.06.2022 р.)*

Посібник «Електричні апарати-1: Практикум» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» призначений для поглибленого засвоєння студентами теорії електроапаратобудування та їх експлуатації, одержання практичних навичок розрахунку основних режимів роботи електричних апаратів на основі теоретичних знань, одержаних в лекційному курсі вивчення дисциплін «Електричні апарати» освітнього компонента «Електричні апарати-1». Посібник розрахований на виконання студентами розрахункових завдань під керівництвом викладачів кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Реєстр. № НП 21/22-831. Обсяг 1,0 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 1	5
Розрахунок сили електродинамічної взаємодії мідних шин прямокутного перерізу	5
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 2	8
Визначення сили електродинамічної взаємодії перпендикулярних ділянок проводу круглого перерізу	8
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 3	11
Розрахунок системи шин прямокутного перерізу на умову резонансу	11
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 4	13
Визначення миттєвого значення температури нагріву мідного проводу круглого перерізу за відомими значеннями температури у характерних точках графіку нагріву	13
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 5	15
Визначення допустимого перерізу круглого проводу для відомого значення тривалого струму та допустимої температури його нагрівання	15
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 6	17
Розрахунок усталеної температури нагріву мідної шини прямокутного перерізу	17
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 7	19
Визначення тимчасового опору змінанню матеріалу контактів	19
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 8	21
Визначення швидкості руху електричної дуги постійного струму	21
ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 9	23
Розрахунок утримуючого зусилля поляризованого електромагніту	23
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	26

ВСТУП

Навчальним планом здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси») передбачено виконання практичних завдань з кредитного модуля «Електричні апарати-1», який присвячений фізичним процесам, які відбуваються в електричних апаратах під час їхньої експлуатації, на основі теоретичних знань, отриманих протягом лекційного курсу даного кредитного модуля та пов'язаних з розрахунками електродинамічних взаємодій, які виникають між різними струмовідними та феромагнітними частинами електричних апаратів в різних режимах їх роботи, процесами нагрівання та охолодження частин електричних апаратів (як усталених, так і в перехідних режимах), процесами, що виникають під час горіння та гасіння електричної дуги, процесами в ізоляції електричних апаратів.

Мета виконання циклу практичних завдань – закріплення основних теоретичних положень, одержаних в лекційному курсі з даного кредитного модуля, ознайомлення студентів з методами розрахунків електродинамічної та термічної стійкості електричних апаратів, які застосовуються в електроапаратобудуванні.

Цикл практичних завдань складається з опису та порядку виконання 9 практичних завдань загальним обсягом 18 академічних годин: теоретичних відомостей про предмет розрахунку та методики розрахунку кількісних характеристик різних режимів роботи та взаємодії між складовими електричних апаратів, кожне з яких містить інформацію, необхідну для підготовки до виконання практичного завдання, виконання необхідних розрахунків, визначення методів і формул, які будуть застосовані студентом для визначення необхідних параметрів електричних апаратів, що розглядаються.

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 1

Розрахунок сили електродинамічної взаємодії мідних шин прямокутного перерізу

(2 академічні години)

Для двох паралельних провідників нескінченної довжини круглого перерізу, радіус перерізу яких набагато менший за відстань між провідниками, сила електродинамічної взаємодії між провідниками розраховується за формулою:

$$F = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot c, \quad (1.1)$$

де i_1 , i_2 – струми, відповідно, у першому та другому провідниках, А; c – коефіцієнт, який враховує форму і взаємне розташування провідників.

Якщо один з провідників, які розглядаються в (1.1), має скінченну довжину l , формула (1.1) набуває вигляду:

$$F = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{2 \cdot l}{a}, \quad (1.2)$$

де a – відстань між центрами перерізів провідників, м.

У разі, якщо обидва провідника мають однакову скінченну довжину l і початки цих провідників знаходяться на одній прямій, що перпендикулярна їх вісям симетрії, формула (1.3) набуває вигляду:

$$F = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{2 \cdot l}{a} \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right). \quad (1.3)$$

Для провідників прямокутного перерізу (шин) треба вводити поправочний коефіцієнт – коефіцієнт форми k_ϕ , який залежить від розмірів провідників та відстаней між ними (рис. 3.4):

$$F = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{2l}{a} \cdot k_\phi. \quad (1.4)$$

Для паралельних шин прямокутного перерізу, для яких $b > h$; $a < l$ (див. рис. 1.1) доцільно використовувати формулу розрахунку:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{a \cdot l}{h^2} \cdot \left(2 \cdot \frac{h}{a} \cdot \arctg\left(\frac{h}{a}\right) - \ln\left(1 + \frac{h^2}{a^2}\right) \right). \quad (1.5)$$

Для паралельних шин прямокутного перерізу, для яких $b < h$; $a < l$ (див. рис. 1.1) доцільно використовувати формулу розрахунку:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{l}{b^2} \cdot \left((a + 2 \cdot b) \cdot \ln(a + 2 \cdot b) - 2 \cdot (a + b) \cdot \ln(a + b) + a \cdot \ln(a) \right). \quad (1.6)$$

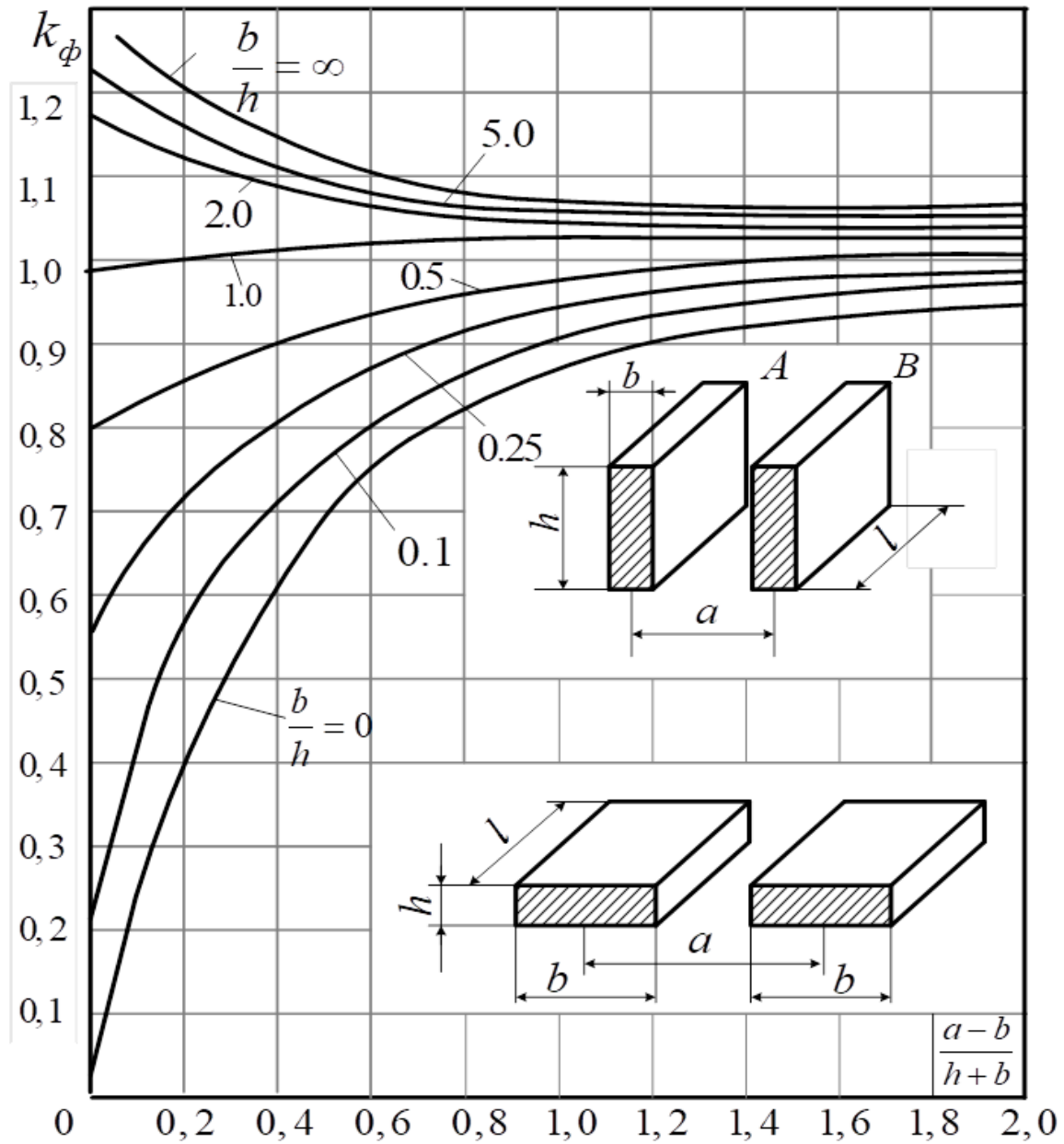


Рисунок 1.1 – Залежність коефіцієнта форми k_ϕ від розмірів провідника.

Завдання. У відповідності до варіантів вхідних даних, наведених в табл. 1.1, розрахувати силу електродинамічної взаємодії двох паралельних мідних шин прямокутного перерізу (**H**) за аналітичними виразами та графічним методом, якщо довжина кожної шини становить **L**, сторони перерізу кожної шини, у відповідності до рис. 1.1, становлять **b** і **h**, відстань між центрами перерізів становить **a**, по шинах протікає постійний струм **I** короткого замикання.

Таблиця 1.1

Варіанти завдань.

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I, кА	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
L, м	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
h, мм	170	150	20	40	60	80	100	120	140	160	180	190	180	170	160
b, мм	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
a, мм	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
I, кА	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
L, м	0,95	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65
h, мм	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
b, мм	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
a, мм	90	95	100	90	80	70	60	50	60	70	80	90	100	110	120

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 2

Визначення сили електродинамічної взаємодії перпендикулярних ділянок проводу круглого перерізу (2 академічні години)

Струмовідні ділянки електричних кіл електричних апаратів можуть бути не тільки у вигляді паралельних провідників, а й у вигляді кільцевих витків, а також у вигляді провідників, по яких протікаючий струм змінює свій напрямок, тобто, провідників, зігнутих під певним кутом. Достатньо часто в практиці електроапаратобудування зустрічаються ділянки електричних кіл, на яких струм змінює свій напрямок під кутом 90° градусів. Прикладом таких струмовідних кіл є розповсюджений тип контактних з'єднань місткового типу, рубильники, розгалуження струмовідних кіл всередині електричного апарату тощо.

При обчисленні електродинамічної взаємодії ділянок провідника зі струмом, зігнутих під кутом 90° , користуються параметрами за рис. 2.1.

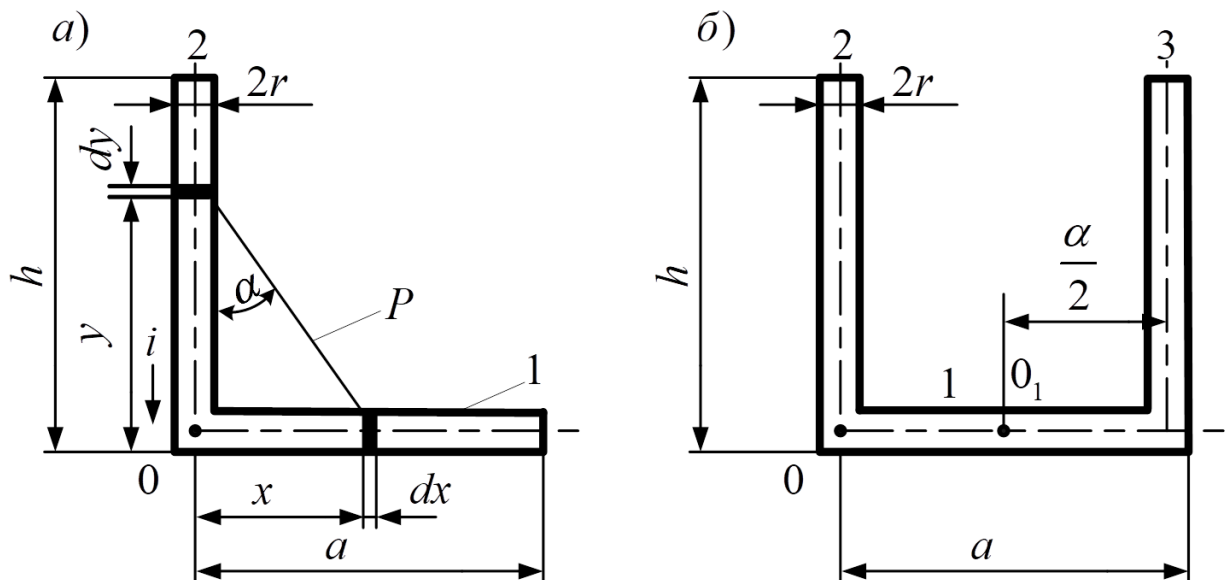


Рисунок 2.1 – До визначення електродинамічної сили між перпендикулярно розташованими провідниками.

На рис. 2.1 а) зображено провідник круглого перерізу радіусом перерізу r , який зігнений під кутом 90° (так звана Г-подібна або L-подібна форма провідника), а на рис. 2.1 б) зображено такий саме провідник, який зігнений у формі літери «П» (П-подібна форма). Довжина горизонтальної ділянки провідника дорівнює a . Вертикальна ділянка провідника може розглядатись або нескінченної довжини, або фіксованої довжини h .

Якщо вертикальна ділянка провідника має нескінченну довжину, електродинамічна сила, яка намагається розігнути провідник в прямолінійний, розраховується для Г-подібного контуру за формулою:

$$F_r = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{a}{r}, \quad (2.1)$$

а для П-подібного контуру є вдвічі більшою:

$$F_{II} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{a}{r}. \quad (2.2)$$

Якщо вертикальна частина провідника є скінченною (однаковою для обох вертикальних ділянок за рис. 2.1 б)), розрахунок для Г-подібного контуру виконується за формулою:

$$F_r = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{\frac{a}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}}, \quad (2.3)$$

а для П-подібного контуру є вдвічі більшою:

$$F_{II} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{\frac{a}{r}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}}. \quad (2.4)$$

Завдання. У відповідності до варіанту завдання, згідно табл. 2.1, розрахувати електродинамічну силу, розподілену вздовж горизонтальної частини провідника, в якому ділянки зігнені під кутом 90° , якщо форма провідника Г-подібна або П-подібна; по провіднику протікає струм I ; діаметр провідника дорівнює d ; довжина горизонтальної ділянки провідника складає a ; довжина вертикальної ділянки провідника складає h .

Варіанти завдання

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I, кА	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
форма	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г
h, мм	170	150	20	40	60	80	100	120	140	160	180	190	180	170	160
a, мм	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
d, мм	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
I, кА	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
форма	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П	Г	П
h, мм	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	50	60	70
a, мм	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
d, мм	9,5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 3

Розрахунок системи шин прямокутного перерізу на умову резонансу

(2 академічні години)

Резонансом механічної системи називають явище різкого збільшення амплітуди вимушених коливань при співпадинні частоти власних коливань системи з частотою дії зовнішньої сили.

При протіканні по провіднику синусоїдного струму частота електродинамічної сила взаємодії між провідниками з таким струмом (або між провідником та феромагнітною поверхнею) є вдвічі більшою за частоту синусоїдного струму.

Паралельні ділянки шинопроводів, по яких протікає електричний струм, з точки зору визначення власної частоти коливань, можна розглядати як балки з прямокутними перерізами висотою h і шириною b . Як правило, шинопроводи встановлюються на опорні ізолятори та закріплюються на них вертикально (на ребро).

Власну частоту коливань системи шини прямокутного перерізу можна визначити за формулою:

$$f = \frac{k}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{g}}, \quad (3.1)$$

де L – довжина шин, м; E – модуль пружності шин (модуль Юнга), Па; J – момент опору шини відносно вертикальної вісі, яка є перпендикулярною до напрямку дії електродинамічної сили, м⁴; k – коефіцієнт жорсткості закріплення шин на ізоляторах; g – питома вага шини (на одиницю довжини), Н/м.

Коефіцієнт k залежить від характеру кріплення шин: $k = 112$, якщо кріплення шин і ізоляторів жорстке; $k = 78$, якщо кріплення на одній опорі вільне і жорстке – на іншій; $k = 49$, якщо шини вільно лежать на опорах.

Для провідної шини прямокутного перерізу можна визначати момент опору аналогічно до визначення моменту опору пружної балки прямокутного перерізу за формулою:

$$J = \frac{h \cdot b^3}{12}, \quad (3.2)$$

де h – вертикальний розмір перерізу шини (у разі дії електромагнітної сили в горизонтальному напрямку), м; b – горизонтальний розмір перерізу шини, м.

Завдання. Визначити максимальну довжину прольоту L між ізоляторами системи двох паралельних шин прямокутного перерізу (висота перерізу – h , ширина – b), при якому відбуватиметься резонанс при протіканні по шинах струму короткого замикання на частоті 50 Гц, якщо коефіцієнт кріплення шин становить k , питома вага матеріалу шини дорівнює ρ , модуль пружності матеріалу шини становить E . Вважати, що шини розташовані на значній відстані від феромагнітних поверхонь. Варіанти вхідних даних для розрахунків наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ρ г/см ³	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71
E кгс/мм ²	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200
h , мм	170	150	20	40	60	80	100	120	140	160	180	190	180	170	160
b , мм	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
k	112	78	49	112	78	49	112	78	49	112	78	49	112	78	49
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ρ г/см ³	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9	2,71	8,9
E кгс/мм ²	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200	7200	11200
h , мм	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	50	60	70
b , мм	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
k	112	78	49	112	78	49	112	78	49	112	78	49	112	78	49

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 4

Визначення миттєвого значення температури нагріву мідного проводу круглого перерізу за відомими значеннями температури у характерних точках графіку нагріву

(2 академічні години)

При протіканні електричного струму по провідних частинах електричних апаратів в них виділяється тепло, потужність виділення якого пропорційна квадрату струму. Тепло, яке виділяється в провіднику, призводить до підвищення його температури у відповідності до формули:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (4.1)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); m – маса провідника, кг; ΔT – різниця температур провідника та навколишнього середовища, °К.

Потужність тепла, яка виділяється в провіднику опором R в одиницю часу при протіканні по ньому електричного струму I , визначається за формулою:

$$P = I^2 \cdot R. \quad (4.2)$$

Між двома тілами, що мають різну температуру, відбувається передача тепла (енергії), потік якого спрямований від більш нагрітого тіла до менш нагрітого. Потужність такого теплового потоку в одиницю часу визначають за формулою Ньютона:

$$P = F \cdot k_T \cdot \Delta T, \quad (4.3)$$

де F – площа поверхні більш нагрітого тіла, з якої відбувається передавання тепла, м²; k_T – коефіцієнт теплопередавання, який враховує передавання тепла за рахунок теплопередачі, конвекції та випромінювання, Вт/(м²·К).

Через певний час $t \rightarrow \infty$ відбудеться врівноваження потужності, яка виділяється в провіднику і потужності, яка віддається в навколишнє середовище (якщо прийняти, що навколишнє середовище здатне поглинати енергію без підвищення температури) і температура нагріву провідника зафіксується на усталеному значенні $T_{уст}$.

Якщо час, який пройшов від початку протікання струму в провіднику до моменту вимірювання температури не є нескінченно великим, можна визначити різницю температури між нагрітим провідником та оточуючим середовищем за формулою:

$$\Delta T = T_{\text{уст}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \Delta T_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.4)$$

де ΔT_0 – різниця температури між провідником і навколишнім середовищем до початку протікання струму, °К (якщо провідник мав температуру навколишнього середовища в момент початку протікання струму, ця складова формулу розрахунку дорівнює нулю); τ – теплова стала нагрівання провідника, яка фізично дорівнює часу, за який провідник нагріється до усталеної температури, °К, і визначається за формулою:

$$\tau = \frac{c \cdot m}{F \cdot k_T}. \quad (4.5)$$

Завдання. Визначити для моменту часу t температуру нагріву Θ_n мідного проводу круглого перерізу діаметром d , по якому протікає струм, який нагріває його від температури оточуючого середовища Θ_0 в момент часу $t_0 = 0$ до сталої температури Θ_y в момент часу $t = \infty$, якщо питома теплоємність матеріалу проводу становить $c = 0,395$ Дж / (г · °К), густина матеріалу проводу $\gamma = 8,9$ г / см³, коефіцієнт тепловіддачі проводу $K_T = 15$ Вт / (м² · °К). Варіанти завдання наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t , с	25	30	35	40	45	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Θ_0 (°C)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Θ_y (°C)	85	80	75	70	65	60	55	50	90	95	94	93	92	91	90
d , мм	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
t , с	1000	950	850	750	650	550	450	350	250	150	95	85	75	65	55
Θ_0 (°C)	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20
Θ_y (°C)	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75
d , мм	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 5

Визначення допустимого перерізу круглого проводу для відомого значення тривалого струму та допустимої температури його нагрівання (2 академічні години)

Під час проектування електричних апаратів виникає практична необхідність визначення допустимого перерізу (діаметру) струмоводів, по яких в нормальних чи аварійних режимах протікатиме електричний струм. Теплова частина такого розрахунку має забезпечити за всіх режимів роботи електричного апарату температуру нагріву струмоводів не вище певної температури.

Потужність тепла, яка виділяється в провіднику опором R в одиницю часу при протіканні по ньому постійного електричного струму I , визначається за формулою:

$$P = I^2 \cdot R. \quad (5.1)$$

Питомий опір матеріалу провідника залежить від температури нагріву провідника, тому формула (5.1) набуває вигляду:

$$P = \frac{I^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_n - T_a)) \cdot L}{S}, \quad (5.2)$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м, визначений для температури T_a , °К, для якої також визначено температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника α , 1/°К; T_n – усталена температура нагріву провідника, °К; L – довжина провідника, м; S – площа перерізу провідника, м², яка для провідника круглого перерізу визначається через його діаметр d за формулою:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (5.3)$$

Одночасно з нагрівом провідника відбувається віддавання тепла в навколишнє середовище з його поверхні шляхом теплопередачі, конвекції та випромінювання. Потужність, яка віддається в навколишнє середовище визначається за формулою Ньютона:

$$P = F \cdot k_T \cdot (T_n - T_0), \quad (5.4)$$

де F – площа поверхні більш нагрітого тіла, з якої відбувається передавання тепла, м^2 ; k_T – коефіцієнт теплопередавання, який враховує передавання тепла за рахунок теплопередачі, конвекції та випромінювання, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_0 – температура оточуючого середовища, $^\circ\text{К}$.

Для провідника круглого перерізу площу поверхні можна визначити через його діаметр d та довжину L за формулою:

$$S = \pi \cdot d \cdot L. \quad (5.5)$$

Якщо прирівняти значення потужностей з формул (5.2), (5.4), враховуючи (5.3) та (5.5), можна знайти мінімально допустимий діаметр провідника круглого перерізу, за якого його температура не перевищить допустиму.

Завдання. Визначити мінімально допустимий діаметр d мідного провідника круглого перерізу без ізоляції, для якого при тривалому протіканні постійного струму I температура його нагріву не перевищить Θ_n , якщо температура оточуючого середовища становить Θ_0 . Прийняти коефіцієнт тепловіддачі провідника $k_T = 15 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К})$, температурний коефіцієнт опору міді $\alpha = 4,041 \cdot 10^{-3} \text{ } 1 / ^\circ\text{К}$, питомий опір міді при $\Theta_\alpha = 20^\circ\text{С}$ становить $\rho_0 = 0,0168 \text{ (Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м})$. Варіанти завдань наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I, \text{А}$	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	95
$\Theta_0 (^\circ\text{С})$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
$\Theta_n (^\circ\text{С})$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$I, \text{А}$	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20
$\Theta_0 (^\circ\text{С})$	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20
$\Theta_n (^\circ\text{С})$	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 6

Розрахунок усталеної температури нагріву мідної шини прямокутного перерізу

(2 академічні години)

В усталеному режимі роботи електричних апаратів важливим є визначення температури нагріву струмовідних частин, оскільки нагрів ізоляції може призводити до скорочення терміну її експлуатації, а температурні розширення матеріалів можуть викликати руйнівні деформації або неналежне спрацювання механічних вузлів електричних апаратів.

Потужність тепла, яка виділяється в провіднику в одиницю часу при протіканні по ньому постійного електричного струму I , визначається за формулою:

$$P = \frac{I^2 \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_n - T_\alpha)) \cdot L}{S}, \quad (6.1)$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу провідника, Ом·м, визначений для температури T_α , °K, для якої також визначено температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника α , 1/°K; T_n – усталена температура нагріву провідника, °K; L – довжина провідника, м; S – площа перерізу провідника, м², яка для провідника прямокутного перерізу визначається через добуток висоти h перерізу на його ширину b .

Одночасно з нагрівом провідника відбувається віддавання тепла в навколишнє середовище з його поверхні шляхом теплопередачі, конвекції та випромінювання. Потужність, яка віддається в навколишнє середовище визначається за формулою Ньютона:

$$P = F \cdot k_T \cdot (T_n - T_0), \quad (6.2)$$

де F – площа поверхні більш нагрітого тіла, з якої відбувається передавання тепла, м²; k_T – коефіцієнт теплопередавання, який враховує передавання тепла за рахунок теплопередачі, конвекції та випромінювання, Вт/(м²·K); T_0 – температура оточуючого середовища, °K.

Для провідника прямокутного перерізу площу поверхні тепловіддачі визначають за формулою:

$$F = 2 \cdot (h + b) \cdot L. \quad (6.3)$$

Коефіцієнт теплопередавання, в загальному випадку, не є константою і залежить від температури нагріву провідника (це особливо проявляється за високої різниці температури нагріву та оточуючого середовища), причому, тому, якщо прирівняти значення потужностей за формулами (6.1), (6.2), з урахуванням функціональної залежності $k_T = f(T_n)$, для отримання значення усталеної температури нагріву провідника необхідно скласти квадратне рівняння відносно T_n . Найменший з дійсних коренів рівняння, який є більшим за температуру оточуючого середовища, є шуканим значенням температури усталеного нагріву провідника зі струмом.

Завдання. Визначити температуру нагріву Θ_n мідної шини прямокутного перетину розмірами перерізу $\mathbf{h} \times \mathbf{b}$, по якій протікає усталений струм $\mathbf{I}$, якщо температура навколишнього середовища становить Θ_0 , температурний коефіцієнт опору міді $\alpha = 4,041 \cdot 10^{-3}$ (1/°K), питомий опір міді при температурі $\Theta_a = 20$ °C становить $\rho_0 = 0,0175$ (Ом·мм²/м). Коефіцієнт тепловіддачі для міді в умовах вільної конвекції в повітрі розраховувати за формулою:

$$K_T = 9,2 \cdot (1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\Theta_n - \Theta_0)).$$

Варіанти завдань для розрахунків наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I, кА	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
Θ₀ (°C)	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
h, мм	170	150	20	40	60	80	100	120	140	160	180	190	180	170	160
b, мм	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
I, кА	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
Θ₀ (°C)	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
h, мм	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	50	60	70
b, мм	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 7

Визначення тимчасового опору зминанню матеріалу контактів

(2 академічні години)

Під час стикання між собою контакт-деталей в комутаційних електричних апаратах сила, що прикладається до контакт-деталей, призводить до пружної деформації цих контакт-деталей або, якщо таке зусилля є надмірним, до пластичної деформації та втрати форми контакт-деталей (наслідком чого може бути втрата електричним апаратом своїх характеристик).

Якщо дві контакт-деталі контактують в одній площині, то її розмір у першому наближенні визначається за формулою:

$$S = \frac{P}{\sigma}, \quad (7.1)$$

де P – сила, що стискає контакт-деталі, Н; σ – тимчасовий опір матеріалу стисканню, Н/м².

При протіканні крізь стиснені контакт-деталі постійного електричного струму I відбувається нагрівання контакт деталей та області їхнього стискання. При цьому, оскільки перехідний опір області контактування двох контакт-деталей є більшим за опір самих контакт деталей, потужність тепловиділення в області контактування є більшою, ніж в області самих контакт-деталей. Внаслідок цього в області контактування наявна різниця температур з температурою самих контакт-деталей (оскільки тепловіддача в навколишнє середовище відбувається з поверхонь контакт-деталей).

Перевищення температури площини контактування над температурою тепловіддавальної поверхні контакту визначається виразом:

$$\Theta_k - \Theta_n = \frac{I^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot \sigma}{32 \cdot \lambda \cdot P}, \quad (7.2)$$

де ρ – питомий опір матеріалу контакту, Ом·м; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу контакту, Вт/(м·К); σ – тимчасовий опір зминанню, Н/м²; P – сила контактного натискання, Н.

Завдання. Визначити тимчасовий опір зминанню матеріалу контактів σ , якщо відомо, що при протіканні по контактах струму I і силі стискання контактів P відбулось нагрівання місця стикання контактів до температури Θ_n по відношенню до температури поверхні контакт-деталей Θ_0 . Коефіцієнт теплопровідності матеріалу контактів складає λ Вт/(м·°K). Питомий опір матеріалу контактів становить $\rho = 0,0175$ (Ом·мм²/м). Варіанти завдань для розрахунків наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I, A	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
Θ_0 (°C)	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	24	23	22	21
Θ_n (°C)	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
P, Н	8	9	10	11	12	13	14	13	12	11	10	12	14	16	18
λ, Вт/(м·°K)	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
I, A	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
Θ_0 (°C)	20	19	18	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Θ_n (°C)	43	44	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33
P, Н	15	14	13	12	11	10	9	8	7	8	9	10	9	8	7
λ, Вт/(м·°K)	395	396	397	398	399	400	399	398	397	396	395	394	393	392	391

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 8

Визначення швидкості руху електричної дуги постійного струму

(2 академічні години)

Горіння електричної дуги постійного струму, яка виникає між двома провідниками, створює електродинамічні зусилля, які є подібними до електродинамічних зусиль, що виникають у П-подібних провідних контурах. При цьому, на відміну від провідних контурів, електрична дуга не є жорстко «прив'язаною» до точок на поверхнях провідників, через які відбувається перенесення електричного заряду між поверхнями провідників та газовим середовищем, в якому існує електрична дуга.

Під дією електродинамічних сил та конвекційних потоків, які виникають навколо розігрітого каналу електричної дуги, дуга може деформуватись та переміщуватись як в газовому середовищі, так і вздовж провідних поверхонь електродів з різним потенціалом.

Під час руху електричної дуги у вузьких щілинах дуга, подібно поршню, виштовхує стовп повітря, що знаходиться перед нею, і засмоктує стовп повітря, що знаходиться за нею. У більш вузькій щілині об'єм (відповідно і маса) цього повітря менший, відповідно менший і опір руху дуги. Швидкість дуги при інших рівних умовах зростає зі зменшенням ширини вузької щілини:

$$V_H = k \cdot \sqrt{\frac{I \cdot H}{\delta}}, \quad (8.1)$$

де $k = 0,63 \div 0,90$ для $\delta = 1 \div 4$ мм відповідно; I – струм дуги, А; H – напруженість магнітного поля в області каналу дуги, А/м; δ – ширина щілини, м.

Для визначення коефіцієнту k , який відповідає ширині щілини в межах діапазону від 1 до 4 мм, Використовують метод лінійної інтерполяції значень коефіцієнту в межах від 0,63 до 0,9, відповідно.

Завдання. Визначити швидкість V_H руху електричної дуги постійного струму величиною I у вузькій щілині шириною δ , якщо напруженість

магнітного поля в області існування каналу електричної дуги становить **H**. Вважати, що дуга виникла на відстані від приєднаного джерела, яка значно більша за відстань між шинопроводами. Варіанти завдань до розрахунків наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H, А/м	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
δ, мм	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
I, кА	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
H, А/м	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16
δ, мм	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	3,8
I, кА	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06

ПРАКТИЧНЕ ЗАВДАННЯ 9

Розрахунок утримуючого зусилля поляризованого електромагніту

(2 академічні години)

Поляризований електромагніт – це такий електромагніт, у якого частина магнітного кола утворена постійними магнітами, а інша частина – електромагнітами. За рахунок складання або віднімання магнітних потоків, створюваних постійними магнітами та електромагнітами досягають різної величини магнітних потоків у розгалуженому магнітному колі. Таке розгалужене магнітне коло використовують для того, щоб змінювати електродинамічні зусилля, що діють на рухомий яркір електромагніту і досягати його фіксації у крайніх положеннях його руху без необхідності постійно підтримувати таке електродинамічне зусилля за рахунок підтримання струму в обмотках електромагнітів.

На рис. 9.1 зображено схематичне представлення поляризованого електромагніту, основу якого являє Ш-подібне магнітне осердя.

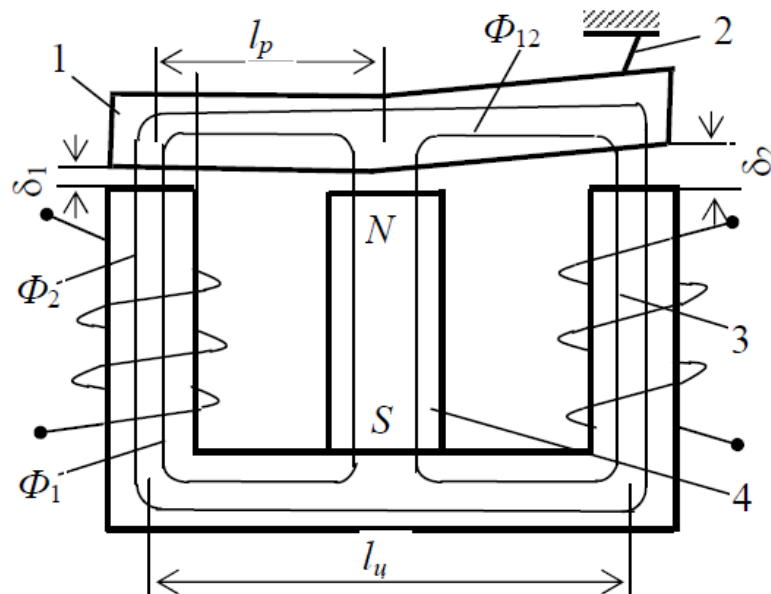


Рисунок 9.1 – Схематичне представлення будови поляризованого електромагніту.

Магнітний потік Φ_1 , створюваний постійним магнітом 4 на рис. 9.1, замикаються через якір 1, побудований у вигляді «гойдалки», вісь качання якої знаходиться посередині одного з полюсів постійного магніту, та через осердя 3, на яких розташовані котушки електромагнітів. Між якорем та полюсами осердь електромагнітів є повітряні проміжки δ_1 та δ_2 , які неоднакові. Магнітний потік Φ_1 є більшим крізь той полюс електромагніту, від якого до якоря найменша відстань у повітрі (найменший немагнітний зазор), оскільки в цій гілці магнітного кола є меншим магнітний опір R_m . При подачі живлення на котушку електромагніту виникне в магнітному колі магнітний потік Φ_2 , який сумується з магнітним потоком Φ_1 в одній гілці магнітного кола і віднімається в іншій. Для магнітного потоку, створюваного електромагнітом, можемо записати:

$$\Phi_2 = i \cdot W / R_m, \quad (9.1)$$

де i – струм у котушці електромагніту, А; W – кількість витків котушки електромагніту, зчеплених з магнітним потоком Φ_2 ; R_m – магнітний опір відповідної ділянки магнітного кола, А/Вб.

Якщо є необхідність збільшити швидкість руху якоря поляризованого електромагніту до одного з полюсів, використовують пружини 2.

Якщо між полюсами осердь електромагнітів відома відстань (між центрами) L_u , половина якої – це «плече» якоря електромагніту, то утримуючий момент біля полюсу з найменшим повітряним зазором (через який проходить більший магнітний потік) можна розрахувати за виразом:

$$M = \frac{0,5 \cdot L_u \cdot (\Phi_1^2 - \Phi_2^2)}{\mu \cdot S_n}, \quad (9.2)$$

де Φ_1 – найбільший магнітний потік крізь полюс електромагніту з найменшим повітряним зазором, Вб; Φ_2 – найменший магнітний потік крізь полюс електромагніту з найбільшим повітряним зазором, Вб; μ – магнітна проникність повітря, яку можна прийняти рівною магнітній сталій $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м; S_n – площа поверхні кожного з полюсів електромагніту, крізь які замикаються магнітні потоки, м².

Завдання. Визначити утримуючий момент M для поляризованого електромагніту (за рис. 9.1), якщо відомо, що магнітний потік в зазорі δ_1 дорівнює Φ_1 ; магнітний потік в зазорі δ_2 дорівнює Φ_2 ; діаметри полюсних наконечників круглого перерізу електромагніту становлять d ; відстань між центрами осердь становить $L_{\text{ц}}$. Вважати, що плече якоря становить $L_{\text{п}} = 0,5 \cdot L_{\text{ц}}$. Варіанти завдань для розрахунків наведені в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Варіанти завдань

Варіант:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Φ_1, мкВб	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	24	23
Φ_2, мкВб	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
d, мм	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$L_{\text{ц}}$, см	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	7	8	9	10	11
Варіант:	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Φ_1, мкВб	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	14	15	16	17	18
Φ_2, мкВб	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
d, мм	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	8
$L_{\text{ц}}$, см	12	13	14	15	16	17	18	19	20	19	18	17	16	15	14

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. О. Бржезицький, В. Ц. Зелінський, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко Електричні апарати: підручник / [Бржезицький В. О., Зелінський В. Ц., Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є.]. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. – 602 с.
2. Електричні апарати : навч. посіб. / В. О. Лесько, В. О. Комар, С. В. Кравчук, О. В. Сікорська. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 102 с.
3. Електричні апарати: Навч. посібник / М. Т. Лут., А. М. Мрачковський. За ред. А. М. Мрачковського. – К.: ЦП «Компринт», 2017. – 564 с.
4. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
5. Абрамов, В. Б. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: навч. посіб. / В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицький, О. Р. Проценко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 218 с.
6. Електричні машини апарати: навчальний посібник / Ю. М. Куценко, В. Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.