

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Запорізька політехніка”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

з вивчення дисципліни та виконання контрольних завдань
дисципліни «Електричні апарати» для освітньої програми
«Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» заочної форми навчання

Частина 1

2019

Методичні вказівки з вивчення дисципліни та виконання контрольних завдань дисципліни «Електричні апарати» для освітньої програми «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв». спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» заочної форми навчання Частина 1 / Укл.: М.В. Антонова. – Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2019. – 32 с.

Укладач: М.В. Антонова

Рецензент: О.В. Близняков, доцент, канд.техн.наук

Відповідальний
за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено
на засіданні кафедри “Електричні та
електронні апарати”
Протокол № 1
від «21» серпня 2019 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного факультету
Протокол № 2
від «19» вересня 2019 р.

ЗМІСТ

1 Загальні методичні вказівки.....	5
2 Робоча програма і методичні вказівки щодо вивчення тем дисципліни.....	7
2.1 Вступ до дисципліни	7
Модуль 1	7
Змістовий модуль 1. Теорія електричних апаратів.	7
Тема 1. Вступ (предмет, задачі та зміст дисципліни;) Загальні відомості про електричні апарати.	7
Тема 2. Теплові процеси в електричних апаратах.	7
Тема 3. Контактні явища в електричних апаратах.	8
Тема 4. Електродинамічні зусилля в електричних апаратах. ..	8
Змістовий модуль 2. Теорія електричних апаратів (продовження).	9
Тема 5. Електромагнітні явища в електричних апаратах.....	9
Тема 6. Процеси комутації електричних кіл.	9
Тема 7. Ізоляція електричних апаратів.	10
3 Перелік лабораторних робіт	11
4 Контрольні завдання.....	12
4.1 Загальні вказівки.....	12
4.2 Завдання на контрольну роботу і вибір варіанту	12
4.3 Методичні вказівки до виконання контрольної роботи.....	17
Рекомендована література	18

Додаток А	21
Додаток Б.....	22
Додаток В	26
Додаток Г	30

1 Загальні методичні вказівки

Відповідно навчального плану для заочної форми навчання освітньої програми «Електричні машини і апарати» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» дисципліна «Електричні апарати» складається з лекцій, лабораторних робіт та контрольної роботи. Підсумковою формою контролю є залік.

Мета викладання дисципліни «Електричні апарати» полягає в формуванні у студентів знань, навиків та умінь, що дозволять їм здійснювати розрахунок, вибір та експлуатацію електричних (в тому числі електромеханічних) апаратів та використовувати їх для створення більш сучасних та досконалих електротехнічних засобів.

Завдання дисципліни «Електричні апарати» полягає в засвоєні фундаментальних теоретичних основ різноманітних фізичних явищ, що відбуваються в електричних апаратах і на яких засновано їх функціонування.

У результаті вивчення навчальної 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; принципи роботи основних груп електричних апаратів, які використовуються в системах електропостачання промислових підприємств при автоматизації виробничих процесів та електропривода; основні напрями застосування електричних апаратів, їх вибору та експлуатації; особливості застосування електричних апаратів.

– вміти: здійснювати дослідження та розрахунки основних елементів електричних апаратів; здійснювати грамотний і обґрунтований вибір електричних апаратів для електричних систем та їх експлуатацію; здійснювати налаштування електричних апаратів, встановлення та регулювання їх уставок; набути навички інженерної діяльності, а саме: розпізнавати, аналізувати і описувати конкретні апарати на функціональному, конструктивному та структурному рівнях, визначати принцип дії, перелік вимог та критеріїв оцінки.

На установочну сесію виносяться 7 тем, які у сконцентрованому вигляді відповідають на усі питання, пов'язані з вивченням дисципліни:

- вступ до дисципліни;
- електричні реле;
- автоматичні повітряні вимикачі (автомати);

- запобіжники;
- безконтактні та бездугові електричні апарати.

На установочну сесію виносяться одна лабораторна робота: поляризовані реле, яка наочно дозволить вивчити принцип дії, конструкцію та способи настроювання поляризованих реле, а також експериментально визначити їх основні параметри й навчати практично здійснювати їх настроювання.

Подробиці всіх тем вивчаються самотужки, що і застерігається в методичних вказівках. До самостійної роботи мають також відношення:

- захист лабораторної роботи;
- виконання контрольної роботи;
- підготовка до заліку.

Установочні лекції є тільки каркасом повного масиву знань з дисципліни «Електричні апарати». Подробиці теоретичних знань поповнюються та закріплюються за допомогою лабораторних робіт, а контрольна робота виконується за допомогою рекомендованої літератури.

На залік виносяться, головним чином, теоретичні питання.

2 Робоча програма і методичні вказівки щодо вивчення тем дисципліни

2.1 Вступ до дисципліни

Модуль 1

Змістовий модуль 1. Теорія електричних апаратів

Тема 1. Вступ (предмет, задачі та зміст дисципліни;) Загальні відомості про електричні апарати

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 1 годин і 27 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Вступ (предмет, задачі та зміст дисципліни;) Загальні відомості про електричні апарати.

Методичні вказівки щодо вивчення теми

Під час вивчення даної теми особливу увагу треба звернути на поняття про електричний апарат, технічні параметри електричних апаратів, захисні оболонки електричних апаратів, кліматичне виконання та категорію розміщення, вимоги до електричних апаратів, а також їх позначення.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення «Електричний апарат».
2. Як класифікуються апарати за їх призначенням.
3. Які основні вимоги висуваються до електричних апаратів.
4. В яких режимах можуть працювати електричні апарати.

Тема 2. Теплові процеси в електричних апаратах

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 1 години лекції й 1 години лабораторна робота, а також 26 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Нагрів та охолодження електричних апаратів. Межі температури елементів апаратів. Задачі теплового розрахунку. Джерело тепла в електричних апаратах. Розрахунок потужності втрат. Способи теплообміну. Режим роботи та нагрівання електричних апаратів.

Процес нагрівання при короткому замиканні. Термічна стійкість електричного апарату.

Запитання для самоперевірки

1. Опишіть явище нагрівання електричного апарату.
2. Що є джерелом тепла в електричних апаратах. Що може впливати на температурні процеси в електричних апаратах?
3. Охарактеризуйте режими теплообміну в електричних апаратах. Наведіть приклади.
4. Що таке термічна стійкість? Від чого вона залежить?

Тема 3. Контактні явища в електричних апаратах

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 1 години лекції й 1 години лабораторна робота, а також 26 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Контакти електричних апаратів. Конструкція контактів. Опір контакта. Нагрівання контакта. Режим роботи контакта. Матеріали контактів.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення комутуючий контакт.
2. Що характеризує опір стягування?
3. Від яких параметрів залежить температура площадки дотику?
4. Дайте характеристику матеріалам, що найчастіше використовуються в електричних апаратах низької напруги.

Тема 4. Електродинамічні зусилля в електричних апаратах

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 1 години лекції й 2 години лабораторна робота, а також 27 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Поняття електродинамічна сила. Методи розрахунку електродинамічних сил. Електродинамічні зусилля між паралельними провідниками. Електродинамічні зусилля витку, котушки, між витками

та котушками. Електродинамічне зусилля при змінному струмі. Електродинамічна стійкість.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення електродинамічна стійкість.
2. Чи впливає форма перетину провідника на величину електродинамічної стійкості.
3. Опишіть перехідні процеси в колі однофазного змінного струму.
4. На що впливає електродинамічна стійкість?

Рекомендована література: [1-3, 7, 15, 18, 21]

Змістовий модуль 2. Теорія електричних апаратів (продовження)

Тема 5. Електроматнітні явища в електричних апаратах

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 1 години лекції й 2 години лабораторна робота, а також 34 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Поняття електромагніт. Устрій та принцип дії електромагніту. Електромагнітна сила. Динаміка електромагніта. Прискорення та сповільнення спрацювання електромагніта.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте порівняльну характеристику магніта та електромагніта.
2. Опишіть устрій електромагніта. В яких електричних апаратах застосовують електромагніт.
3. Наведіть схеми сповільнення спрацювання електромагніту.
4. Що таке час спрацювання електромагніту та час спрацювання при включенні.

Тема 6. Процеси комутації електричних кіл

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 2 години лекції й 35 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Процеси комутації в електричних колах. Поняття електрична дуга. Фізичні процеси в електричній дугі. Вольт-амперна характеристика дуги. Умови гасіння дуги. Способи гасіння дуги. Дугогасильні пристрої.

Запитання для самоперевірки

1. Процес комутації в електричних апаратах.
2. Опишіть процес виникнення дуги в електричних апаратах.
3. Порівняйте способи гашення дуги.
4. Чим відрізняються дугогасильні пристрої?

Тема 7. Ізоляція електричних апаратів

Під час проведення установочної сесії вивчення теми займає 1 години лекції й 2 години лабораторна робота, а також 33 годин необхідно для самостійного вивчення матеріалу в повному обсязі.

Зміст робочої програми теми.

Захисні оболонки електричних апаратів. Кліматичне виконання та категорія розміщення. Вимоги, що пред'являються до електричних апаратів.

Запитання для самоперевірки

1. З яких матеріалів виготовляють захисні оболонки електроапаратів.
2. Що залежить від кліматичного виконання та розміщення електричних апаратів.
3. Перерахуйте вимоги, що пред'являються для електричних апаратів.
4. З яких матеріалів виготовляють дугогасильні камери?

Рекомендована література [1-3, 11-14, 16, 19, 20, 23, 26]

3 Перелік лабораторних робіт

Лабораторна робота №1. Електромагнітні явища в електричних апаратах № 1-3 – 1 години.

Лабораторна робота №2. Контактні явища в електричних апаратах № 4,5 – 1 години.

Лабораторна робота №3. . Електродинамічні зусилля в електричних апаратах №6 – 2 години.

Лабораторна робота №4 Теплові процеси в електричних апаратах №;7,8 – 2 години [33] 2 години.

Лабораторна робота №5. Ізоляція електричних апаратів № 9 – 2 години.

Лабораторні роботи виконуються за методичними вказівками

Для забезпечення самостійного вивчення студентами лабораторних робіт під час виконання, необхідна належна їх організація. Лабораторне заняття, як правило починається з опитування студентів з метою виявлення їх підготовки. Студенти, які виявили недостатню підготовку й знання до лабораторних робіт не допускаються.

До виконання лабораторної роботи необхідно:

- знати відповідний теоретичний та розрахунковий матеріал, мету роботи та методику її проведення;
- знати будову лабораторного стенду, вивчити обладнання та прилади, які використовуються.

В процесі виконання роботи студенту необхідно:

- точно виконувати вимоги техніки безпеки та правила експлуатації лабораторного стенду, обладнання та приладів, що використовуються;
- виконувати роботи у відповідності з методикою та методичними вказівками;
- уважно проводити необхідні виміри та запис результатів;
- аналізувати та критично оцінювати отримані результати.

Оформлення роботи та захист здійснювати в той же час, який дається для виконання даної роботи або під час консультацій.

4 Контрольні завдання

4.1 Загальні вказівки

З дисципліни «Електричні апарати» кожен студент заочної форми навчання виконує одну контрольну роботу у відповідності до розділів теоретичного курсу. Контрольна робота виконується з метою закріплення теоретичних знань, одержаних внаслідок вивчення дисципліни. На виконання контрольної роботи витрачається біля 8 годин.

4.2 Завдання на контрольну роботу і вибір варіанту

Кожна контрольна робота складається з двох теоретичних запитань та задач.

Вихідні дані до теоретичних запитань наведені у таблиці 4.1. Номери запитань вибираються за двома складовими: горизонтальними рядками таблиці за останньою цифрою залікової книжки та стовпчиками, які відповідають поточному навчальному року. Наприклад, якщо остання цифра залікової книжки дорівнює «5», а поточним навчальним роком є 2018/2019 н.р., тоді слід обрати теоретичні запитання №13 та №25.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до теоретичних запитань

Остання цифра залікової книжки	Поточний навчальний рік			
	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
1	7, 37	10, 35	20, 26	17, 29
2	19, 28	16, 25	6, 34	9, 38
3	8, 33	5, 37	15, 27	18, 24
4	14, 23	17, 26	7, 36	4, 32
5	3, 35	6, 31	16, 22	13, 25
6	15, 24	12, 21	2, 30	5, 34
7	4, 29	1, 33	11, 23	14, 20
8	10, 39	13, 22	3, 32	12, 40
9	28, 31	2, 19	9, 38	21, 40
0	11, 39	8, 30	18, 27	1, 26

Перша задача має на меті розрахунок визначення опору стягнення контактів. Необхідно розрахувати опір стягнення, що буде залежати від радіусу контактів, від стягнутої сили та від матеріалу контакта, вихідні данні наведені у таблиці 4.2. Два круглих стержня на торцях оброблені під сферу r (мм) і стягнуті силою F (Н). Визначити опір стягування R_c .

Таблиця 4.2 – Вихідні дані до першої задачі

Остання цифра залікової книжки	r	F	Матеріал контакта
	мм	Н	
1	30	100	Мідь
2	25	200	Кадмій
3	35	150	Дюралюміній
4	40	130	Вольфрам
5	50	120	Латунь Л62 твердотягнута
6	45	140	Нікель
7	60	170	Сталь
8	20	160	Свинець
9	35	110	Молибден
0	55	180	Срібло твердотягнуте

Друга задача має на меті визначення коефіцієнту поверхневого ефекту. Необхідно розрахувати поверхневий ефект, що залежить від матеріалу шинопроводу, від кінцевої температури та від геометричного виконання шинопроводу за вихідними даними, наведеними у таблиці 4.4. Визначити коефіцієнт поверхневого ефекту для шинопроводу, нагрітого зміним струмом, що протікає по ньому, промислової частоти до температури Θ , ($^{\circ}\text{C}$), для наступних випадків:

- а) шинопровід круглий d , (мм);
- б) шинопровід трубчастий з зовнішнім діаметром $d_{\text{зв}}$, (мм), внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}}$, (мм);
- в) шинопровід трубчастий з зовнішнім діаметром $d_{\text{зв}}$, (мм), внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}}$, (мм);.

Таблиця 4.4 – Вихідні дані до другої задачі

Остання цифра залікової книжки	Умова а	Умова б		Умова в		Θ °C	Матеріал шинопроводу
	d	$d_{зв}$	$d_{вн}$	$d_{зв}$	$d_{вн}$		
	мм	мм	мм	мм	мм		
1	85	85	55	85	76	98	Мідь
2	90	90	60	90	80	95	Сталь
3	70	70	40	70	62	97	Алюміній
4	65	65	25	65	57	94	Сталь
5	75	75	30	75	68	91	Мідь
6	80	80	40	80	70	80	Сталь
7	60	60	30	60	51	85	Алюміній
8	80	80	55	80	73	89	Сталь
9	55	55	20	55	49	76	Вольфрам
0	60	60	35	60	53	82	Мобилен

Третя задача полягає в перевірці на міцність та жорсткість ножів роз'єднувача. Перевірити, чи вдовольняє умовам міцності та жорсткості ножі трьохполюсного роз'єднувача (рисунок Г - 1), по якому протікає граничний струм трьохфазного короткого замикання. Амплітуда встановленого струму короткого замикання $I_{кз}$, кА, частота струму $f = 50$ Гц.

Ножі розмикача виконані з міді, поперечний перетин їх має прямокутну форму з розмірами $h \times b$, мм. Ножі розташовані широкими сторонами один відносно другого, міцно закріплені в нижній частині роз'єднувача та вільно опираються в верхній частині. Довжина ножів l , мм, відстань між ними a , мм. Вихідні данні, наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Вихідні дані до другої задачі

Остання цифра залікової книжки	Амплітуда встановлено го струму КЗ	Геометричний розмір		Довжина ножів	Відстань між ножами
	I	h	b	l	a
	$кА$	$мм$	$мм$	$мм$	$мм$
1	55	110	10	600	350
2	60	120	20	500	420
3	40	105	15	550	430
4	35	140	25	650	380
5	70	125	20	700	250
6	65	135	25	350	120
7	50	170	30	700	245
8	45	90	10	660	180
9	30	115	10	580	200
0	55	95	15	670	240

Перелік теоретичних запитань

1. Дайте визначення «Електричний апарат».
2. Як класифікуються апарати за їх призначенням.
3. Які основні вимоги висуваються до електричних апаратів.
4. В яких режимах можуть працювати електричні апарати.
5. Як режим роботи впливає на конструкцію електричного апарата?
6. Опишіть явище нагрівання електричного апарату.
7. Що є джерелом тепла в електричних апаратах. Що може впливати на температурні процеси в електричних апаратах?
8. Охарактеризуйте режими теплообміну в електричних апаратах. Наведіть приклади.
9. Що таке термічна стійкість? Від чого вона залежить?
10. Дайте визначення комутуючий контакт.
11. Що характеризує опір стягування?
12. Від яких параметрів залежить температура площадки дотику?

13. Як впливає форма комутуючого контакту на опір стягування?
14. Дайте характеристику матеріалам, що найчастіше використовуються в електричних апаратах низької напруги.
15. Дайте визначення комутуючий контакт.
16. Що характеризує опір стягування?
17. Від яких параметрів залежить температура площадки дотику?
18. Як матеріал контакту впливає на опір стягування?
19. Як режими роботи впливають на комутуючий контакт?
20. Дайте характеристику матеріалам, що найчастіше використовуються в електричних апаратах низької напруги.
21. Дайте визначення електродинамічна стійкість.
22. Чи впливає форма перетину провідника на величину електродинамічної стійкості.
23. Опишіть перехідні процеси в колі однофазного змінного струму.
24. На що впливає електродинамічна стійкість?
25. Дайте порівняльну характеристику магніта та електромагніта.
26. Опишіть устрій електромагніта. В яких електричних апаратах застосовують електромагніт.
27. Наведіть схеми сповільнення спрацювання електромагніту.
28. Що таке час спрацювання електромагніту та час спрацювання при включенні.
29. Процес комутації в електричних апаратах.
30. Опишіть процес виникнення дуги в електричних апаратах.
31. Порівняйте способи гашення дуги.
32. Чим відрізняються дугогасильні пристрої.
33. З яких матеріалів виготовляють захисні оболонки електроапаратів.
34. Що таке вдування дуги? Чим воно обумовлене?
35. Для чого дугогасильну камеру виконують складної конструкції? Для чого це необхідно?
36. Що залежить від кліматичного виконання та розміщення електричних апаратів.
37. Перерахуйте вимоги, що пред'являються для електричних апаратів.

38. З яких матеріалів виготовляють дугогасильні камери?
39. Охарактеризуйте комутаційні електричні апарати.
40. Від чого залежить потужність втрат в електричних апаратах?

4.3 Методичні вказівки до виконання контрольної роботи

При виконанні контрольної роботи слід керуватись діючим державним стандартом України з виконання текстових документів ДСТУ 3008:2015 [34], при розрахунках застосовувати Міжнародну систему одиниць СІ. Контрольну роботу слід оформлювати на одному боці аркуша формату А4 (297x210 мм) або оформлювати в учнівському зошиті. Текст писати від руки чітким почерком чорнилом (пастою) чорного, синього, фіолетового кольорів або машинним способом з використанням комп'ютерної техніки. Виклад вести в одній часовій формі й в одному дієслівному способі.

Відповіді на теоретичні запитання контрольної роботи давати достатньо повними, у відповідності до програми курсу, наведеної у другому розділі. Відповіді обов'язково доповнювати схемами, рисунками, таблицями, розрахунками тощо. Рисунки виконувати у відповідності до вимог ЄСКД (єдиної системи конструкторської документації).

Приклад титульної сторінки контрольної роботи наведений у додатку А. На наступній сторінці контрольної роботи записується у відповідності до № залікової книжки та поточного навчального року відповідні теоретичні запитання та вихідні дані до двох задач. Кожне теоретичне запитання та задача починаються з нової сторінки. У вигляді заголовка до завдання записується суть запитання, а потім іде відповідь. При необхідності відповідь ілюструється схемами чи ескізами. Для нотаток викладача необхідно залишати поля. Після кожної відповіді необхідно залишати місце для зауважень викладача (2-3 рядка).

Методика розрахунку наведені в додатку Б, В, Г відповідно.

Кожна робота завершується переліком використаної літератури. Робота повинна мати підпис студента і подається на кафедру Електричних та електронних апаратів не пізніше, ніж за 10 днів до початку екзаменаційної сесії. Зауваження викладача враховуються студентом під час підготовки до заліку.

Рекомендована література

Базова

1. Чунихин А.А Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 720 с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов / Под ред. И.С. Таева. М.: Высшая школа. 1987. 496 с.
3. Буткевич Г.В. Дегтярь В.Г., Сливинская А.Т. Задачник по электрическим аппаратам. М.: Высшая школа. 1987. 232 с
4. Таев И.С. Электрические аппараты автоматики и управления. М.: Высшая школа, 1975. 244 е.
5. Таев И.Е. Электрические аппараты управления. М.: Высшая школа, 1984. 244 с.
6. Электромеханические аппараты автоматики Б.К Буль, О.Б. Буль, В.А Азанов, В.Н. Шоффа. М.: Высшая школа, 1988. 303 с.
7. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.Б. Борисов и др. Под ред. В.В. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 384 с.
8. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Н.М. Адоньев. В.В. Афанасьев, И.М. Бортник и др. Под ред. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 544 с.
9. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов (Общие вопросы проектирования- М.: Энергия, 1971. 500 с.
10. Коробков Ю.С., Флора В.Д. Электромеханические аппараты автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1991. 344 с.
11. Любчик М.Л. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.
12. Новиков Ю. Н. Теория и расчет электрических аппаратов. Л.: Энергия 1970. 328 с.
13. Теория электрических аппаратов/ Г.Н. Александров. В.В. Борисов, В.Л. Иванов и др.; Под ред. проф. Г.Н. Александрова. М.: Высшая школа, 1985. 354 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 электрических аппаратах. Л.: Энергия. 1971 156 с.

16. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасильные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия, 1973. 424 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. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. М.Л.: ГЗИ. 1969.
20. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты переменного тока. М.: Энергия. 1968. 138 с.
21. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа. 1984. 247 с.
22. Намитов К.К. Ильина Н.А, Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
23. Базуткин В.В. и др. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах / В.В. Базуткин. В.Л. Ларионов, Ю.С. Пинталь. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.

Допоміжна

24. Харазов К.И. Устройства автоматики с магнитоуправляемыми контактами. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
25. Брон О.Б. Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. Л.: Энергия. 1975. 212 с.
26. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973. 263 с.
27. Ройзен В.З. Электромагнитные малогабаритные реле. Л. Энергоатомиздат, 1986. 252 с.
28. Беляев В.Л. Особенности работы и конструкций много амперных электрических аппаратов: Учеб. пособие СПб.: СЗІУ, 2005. 274 с.
29. Алиев И.И., Абрамов М.Б. Электрические аппараты: Справочник М.: Радио Софт, 2004. 256 с.
30. Клименко Б.В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі. Навчальний посібник Харків: Талант, 2008. 208 с
31. Намотков К.К. и др. Плавкие предохранители. М: Энергия. 1979.

32. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986.

33. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Електричні апарати» освітньої програми «Електричні машини і апарати» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» URL: <http://e-library.zntu.edu.ua>

34. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.

Інформаційні ресурси

1. <https://uk.wikipedia.org/>
2. <http://www.electrika.net.ua/>
3. <http://bukvar.su/fizika/62382-Elektricheskie-apparaty.html>

Додаток А

Приклад оформлення титульного аркушу контрольної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Запорізька політехніка”

№ залікової книжки

КОНТРОЛЬНА РОБОТА

з дисципліни «Електричні апарати»

Виконав студент групи Е-816

І.І. Іванов

Додаток Б

Задача № 1

Два круглих мідних стержня на торцях оброблені під сферу $r = 40$ мм і стягнуті силою $F = 100$ Н. Визначити опір стягування R_c .

Рішення

Знайдемо радіус площі дотику при умові, що має місце упруга деформація

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{10,8 \cdot 10^{10}}} = 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (\text{Б-1})$$

де $E = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – модуль пружності міді (табл. П.1)

Механічна напруженість в контактній площадці

$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{100}{\pi \cdot (2,87 \cdot 10^{-4})^2} = 38,7 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 \quad (\text{Б-2})$$

Ця напруженість більша, ніж напруженість стискання міді $\sigma_{cm} = 38,3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ і відповідно, буде мати місце пластична деформація.

Радіус площадки дотику при пластичній деформації визначимо за формулою

$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot \sigma_{cm}}} = \sqrt{\frac{100}{\pi \cdot 38,3 \cdot 10^7}} = 2,88 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (\text{Б-3})$$

Опір стискання буде дорівнювати

$$R_c = \frac{\rho}{2a} = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 2,88 \cdot 10^{-4}} = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (\text{Б-4})$$

де $\rho = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – питомий опір міді (табл. Б.1)

Відповідь: $R_c = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$

Таблица Б.1 Физические постоянные проводниковых материалов

Материал	Плотность, кг/м^3	Удельное сопротивление при 0°C , $10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$	Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-3} K^{-1}	Темплопроводность при 0°C , $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	Температурный коэффициент теплопроводности, 10^{-4} K^{-1}	Теплоемкость, $\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$	Температурный коэффициент теплоемкости, 10^{-4} K^{-1}	Температура плавления, $^\circ\text{C}$	Температура испарения, $^\circ\text{C}$	Модуль упругости, 10^{10} Н/м^2
Алюминий	2700	2,62	4,2	210	4,5	950	4,7	660	1800	7,06
Бронза оловянистая твердая	8700	14...16	0,6...0,7	64	17...20	360	—	900...950	—	10,8...11,8
Бронза бериллиевая литая	8220	7,2...9	—	84,0	—	140	—	—	—	—
Бронза бериллиевая твердая	—	5,3	—	170	—	—	—	—	—	10,3
Вольфрам	19300	5,1	4,2	170	3	140	0,3	3410	5900	34,3
Графит	1700...1800	700...1400	-1,3	160	-5...-10	650...850	35	—	3650	0,3...0,9
Дюралюмин	2750	3,3	2,2	160	—	930	—	650	—	7,0
Железо	7900	9...10	6,5	79,5	-3,9	640	0,5	1530	2450	19,6...21,6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	-1,2	230	—	321	770	4,9...6,7

Продовження таблиці Б.1

Матеріал	Щільність, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0 °С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурний коефіцієнт опору при 0 °С, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопровідність при 0 °С, Вт/(м·К)	Температурний коефіцієнт теплопровідності ⁻¹	Теплоємність, Дж/кг·К	Температурний коефіцієнт теплоємності, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавлення, °С	Температура кипіння, °С	Модуль пружості, 10 ¹⁰ Н/м ²
Константан (400...700)	8700...8900	45...52	0,003...0,005	—	—	—	—	1270	—	—
Латунь Л68 твердоточувальна	8500	7,0	1,5	100	—	380	1,1	900	—	10,8
Латунь Л62 твердоточувальна	—	7,2	—	—	—	—	—	900	—	9,8
Латунь Л59 отожнена	8900	7,2	—	—	—	—	—	900	—	19,9...9,8
Маятник (250...300)	8100...8400	42...50	0,03...0,06	—	—	—	—	960	—	—
Мідь твердоточувальна	8700...8900	1,62	4,3	390	—	390	1,0	1083	2600	10,8...8,12
Моноблен	10200	4,5...5,0	4,3	146	-3,0	272	—	2620	3560	34,3
Нікель	8800	7,2	6,1	70	-0,5	460	4,3	1455	2730	20,6
Ніхром (Х20Н80) (1000...1100)	8200	10...112	0,14	—	—	—	—	1390	—	—
Олово	7300	11,0	4,5	64	-4,7	230	1,3	232	2270	3,9...5,9
Свинець	11300	19,5	4,1	35	-5	130	0,9	327,4	1540	1,57
Серебро твердоточувальне	10500	1,5	4,0	420	-0,5	234	0,77	960	1955	7,4
Сталь	7800	10...13	9,0	40	-4	470	7,3	1300...1400	—	20,6...21,6

Додаток В

Методика розрахунку коефіцієнту поверхневого ефекту для шинопровода

Задача 2

Визначити коефіцієнт поверхневого ефекту для алюмінієвого шинопровіду, нагрітого змінним струмом, що протікає по ньому, промислової частоти до температури $\Theta = 95^\circ\text{C}$, для наступних випадків:

- а) шинопровід круглий $d = 80$ мм;
- б) шинопровід трубчастий з зовнішнім діаметром $d_{\text{зв}} = 80$ мм, внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 50$ мм;
- в) шинопровід трубчастий з зовнішнім діаметром $d_{\text{зв}} = 80$ мм, внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 74$ мм.

Рішення

Коефіцієнт поверхневого ефекту можна визначити по графікам, зображеним на рис. В-1 и В-2. Для цього розраховується величина

$\sqrt{f/R_{100}}$, де f – частота змінного струму, Гц; R_{100} – активний опір постійного струму провідника довжиною $l_1 = 100$ м, Ом.

Для умови (а):

$$R_{100} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_\Theta \Theta) \cdot \frac{l_1}{q} =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot \frac{100}{3,14 \cdot 40^2 \cdot 10^{-6}} = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (\text{В-1})$$

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}} = \sqrt{\frac{50}{7,3 \cdot 10^{-4}}} = 262 \text{ Гц}^{0,5} / \text{Ом}^{0,5} \quad (\text{В-2})$$

Коефіцієнт поверхневого ефекту $k_n = 1,8$ (рисунок В-1)

Для умови (б):

$$R_{100} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_\Theta \Theta) \cdot \frac{I}{q} =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot \frac{100}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 11,82 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (\text{В-3})$$

де $q = \pi \cdot \frac{(d_{\text{зв}}^2 - d_{\text{вн}}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,08^2 - 0,05^2)}{4} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – поперечний перетин трубчастого шинопровода

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}} = \sqrt{\frac{50}{11,82 \cdot 10^{-4}}} = 205,7 \text{ Гц}^{0,5} / \text{Ом}^{0,5} \quad (\text{В-4})$$

$\delta = (d_{\text{зв}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 2 = (0,08^2 - 0,05^2) / 2 = 0,015 \text{ м}$ – товщина стінки труби

$$D = d_{\text{зв}}; \delta / D = 0,015 / 0,08 = 0,1875 \quad (\text{В-5})$$

Коефіцієнт поверхневого ефекту $k_n = 1,1$ (рисунок В-2).

Для умови (в):

$$R_{100} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_\Theta \Theta) \cdot \frac{I}{q} =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot \frac{100}{7,253 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 50,54 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (\text{В-6})$$

де $q = \pi \cdot (d_{\text{зв}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 = \pi \cdot (0,08^2 - 0,074^2) / 4 = 7,253 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
поперечний перетин трубчастого шинопровода

$$\sqrt{\frac{f}{R_{100}}} = \sqrt{\frac{50}{50,54 \cdot 10^{-4}}} = 99,5 \text{ Гц}^{0,5} / \text{Ом}^{0,5} \quad (\text{В-7})$$

$\delta = (d_{\text{зв}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 2 = (0,08^2 - 0,074^2) / 2 = 0,003 \text{ м}$ – товщина стінки труби

$$D = d_{\text{зв}}; \delta / D = 0,003 / 0,08 = 0,0375 \quad (\text{В-8})$$

Коефіцієнт поверхневого ефекту $k_n = 1,02$ (рисунок В-2).

Відповідь: а) $k_n = 1,75$, б) $k_n = 1,1$, в) $k_n = 1,02$

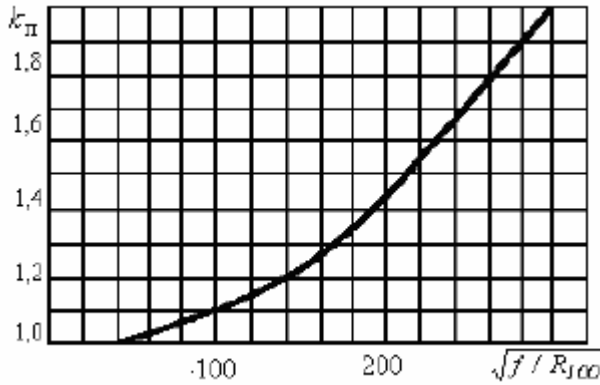


Рисунок В-1 Залежність коефіцієнта поверхневого ефекту для суцільних круглих немагнітних провідників від параметра $\sqrt{f/R_{100}}$

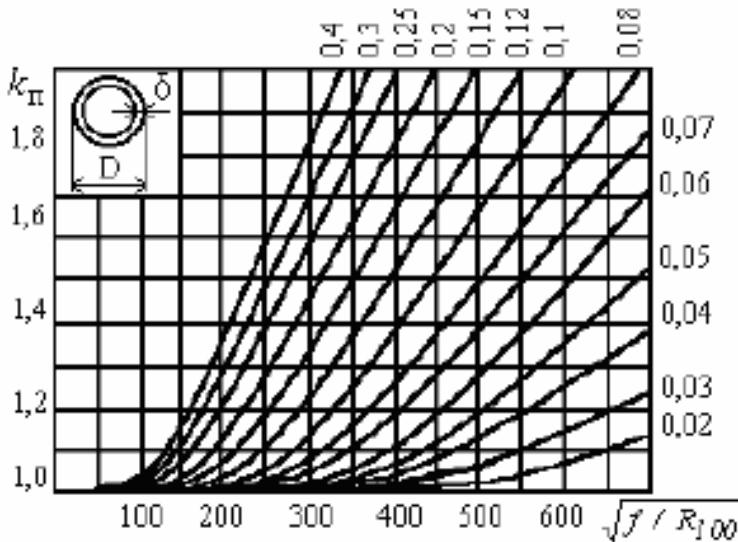


Рисунок В-2. – Залежність коефіцієнта поверхневого ефекту для порожнистих трубчастих провідників з немагнітного матеріалу з різним співвідношенням δ/D та $\sqrt{f/R_{100}}$

Додаток Г

Методика розрахунку перевірки на жорсткість та міцність
ножів трьохполюсного роз'єднувача

Задача 3

Перевірити, чи вдовольняє умовам міцності та жорсткості ножі трьохполюсного роз'єднувача (рисунок Г - 1), по якому протікає граничний струм трьохфазного короткого замикання. Амплітуда встановленого струму короткого замикання $I_{кз} = 50$ кА, частота струму $f = 50$ Гц.

Ножі розмикача виконані з міді, поперечний перетин їх має прямокутну форму з розмірами $h \times b = 100 \times 10$ мм. Ножі розташовані широкими сторонами один відносно другого, міцно закріплені в нижній частині роз'єднувача та вільно опираються в верхній частині. Довжина ножів $l = 600$ мм, відстань між ними $a = 300$ мм.

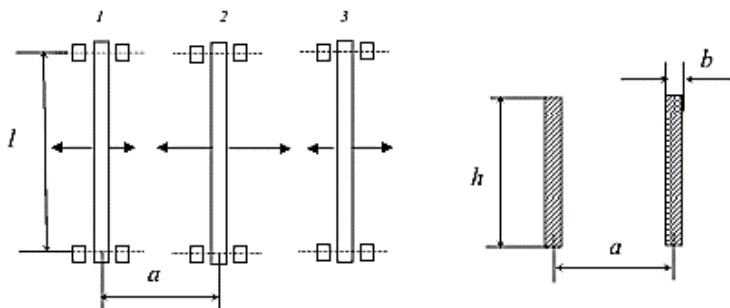


Рисунок Г.1 – Ескіз роз'єднувача

Рішення

З електричної точки зору ножі роз'єднувача представляють собою струмоведучі прямолінійні провідники, з механічної точки зору – балку на двох опорах.

Максимальна сила виникає в середній фазі. При наявності апериодичної складової струму визначається за формулою:

$$F = 10^{-7} k_d k_\phi 0,87 k_{mm}^2 I_m^2 = 10^{-7} \cdot 2,47 \cdot 1 \cdot 0,87 \cdot 1,8^2 \cdot (50 \cdot 10^3) = 1741 \text{ Н}$$

$$\text{де } k_d = \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right] = \frac{2 \cdot 0,6}{0,3} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,3}{0,6}\right)^2} - \frac{0,3}{0,6} \right] = 2,47 -$$

геометричний фактор, $k_\phi \approx 1$ при $\frac{a-b}{a+b} = \frac{0,3-0,01}{0,3+0,01} = 2,64 \geq 2$.

Ніж розєднувача можна розрахувати як балку на двох опорах, при цьому напруженість на згиб

$$\sigma_{зг} = \frac{M}{W_{зг}} = \frac{130,6}{1,67 \cdot 10^{-6}} = 78,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2,$$

де $M = \frac{Fl}{8} = \frac{1741 \cdot 0,6}{8} = 130,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – максимальне значення згибаючого моменту,

$$W_{згн} = \frac{p \cdot b^2}{6} = \frac{0,1 \cdot 0,01^2}{6} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

де $M = \frac{F \cdot l}{8} = \frac{1741 \cdot 0,6}{8} = 130,6 \text{ Нм}$ – максимальне значення згинаючого моменту,

$$W_{зг} = \frac{h \cdot b^2}{6} = \frac{0,1 \cdot 0,01^2}{6} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 - \text{момент опору}$$

Напруження на згибання менше допустимого напруження міді $\sigma_{зг} = 78,9 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 \leq \sigma_{дон} = 137 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, відповідно ножі рубільника задовільняють умовам міцності.

Для запобігання появи механічного резонансу необхідно, щоб частота власних коливань механічної системи не дорівнювала частоті сили.

Для паралельних шин частота власних коливань

$$f_{вл} = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}} = \frac{4,8}{0,6^2} \cdot \sqrt{\frac{10,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,08 \cdot 10^{-7}}{85,3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}} = 42,43 \text{ Гц}$$

де k – коефіцієнт, що враховує жорсткість закладення ножа. При жорстко закладеному одно кінці та вільному кріпленні другого кунця $k = 4,8$, $E = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – модуль пужності міді; $\gamma = 85,3 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$ – питомий вага міді, $S = hb = 0,1 \cdot 0,01 = 10^{-3} \text{ м}^3$ – площа поперечного перетину; $J = \frac{hb^3}{12} = \frac{0,1 \cdot 0,01^3}{12} = 0,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$ – момент інерції поперечного перетину

Так як власна частота коливання менше вимушеної $f_{вл} = 42,43 \text{ Гц} < f_{д} = 100 \text{ Гц}$, механічний резонанс не відбувається, а ножі задовольняють умовам жорсткості.

Відповідь: Ножі роз'єднувача задовольняють умовам міцності та жорсткості.