

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи з дисципліни:
"ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ"

для студентів усіх форм навчання спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(освітня програма «Електричні та електронні апарати»)

2020

Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни: "Основи теорії електричних апаратів" для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма «Електричні та електронні апарати») / Укл.: О.В. Близняков, Л.С. Скруська – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 14 с.

Укладачі: Близняков Олександр Вікторович, доцент, к.т.н.,
Скруська Людмила Степанівна, ст. викл.

Рецензент: Снігірьов Володимир Максимович, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Мохнач Річард Едуардович

Затверджено на засіданні кафедри
“Електричні та електронні апарати”.
Протокол № 2 від 7 вересня 2020 р.

Рекомендовано до видання на засіданні
навчально-методичної комісії
електротехнічного факультету.
Протокол № 1 від 17 вересня 2020 р.

З М І С Т

В С Т У П.....	4
1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ.....	5
2. ВКАЗІВКИ ДО ПОПЕРЕДНЬОГО ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ.....	6
3. ВКАЗІВКИ ДО ПЕРЕВІРОЧНОГО ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ.....	7
4. ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ.....	9
ЛІТЕРАТУРА.....	10
Додаток А. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ.....	14

ВСТУП

Теплові процеси відіграють вельми значну роль в електричних апаратах. Причому, як позитивну, так і негативну. В ряді випадків теплові процеси відіграють позитивну роль і використовується в процесі функціонування електричних апаратів: плавлення плавкої вставки запобіжника і вимикання електричного кола при виникненні аварійної ситуації (перевантаження, короткого замикання); вигин біметалічної пластинки при її нагріві і також вимикання електричного кола при перевантаженні; виникнення електричної дуги при вимиканні кола, яка є концентрованим поглиначем енергії, що запасасться в її індуктивних елементах та ін.

Негативна роль теплових процесів в електричних апаратах у більшості заключається у необхідності відводити теплову енергію, що виділяється у струмоведучих елементах. Ця задача набуває особливу актуальність в електричних апаратах, побудованих на силових напівпровідникових приладах, де великі теплові потужності виділяються у малих об'ємах. У даному випадку для розсіювання теплової енергії використовуються ефективні системи охолодження: радіатори (пристрої з розвиненою поверхнею охолодження); примусове охолодження (штучно утворені потоки охолоджуючого середовища); випарне охолодження (використання фазового перетворення рідини при нагріванні і охолодженні). Дана проблема також гостро встала у зв'язку тенденцією зростання номінальних струмів електричних апаратів, де також досить часто необхідним є штучне охолодження.

З іншого боку, слід зазначити також, що розрахунковий аналіз теплового режиму електричних апаратів незалежно від способу охолодження являє собою досить складну задачу. Дана робота ставить собою за мету отримання студентами первинних навичок виконання теплового розрахунку найпростіших струмоведучих систем.

1. ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

На курсову роботу студент отримує індивідуальне завдання, яке видається керівником. Завдання оформлюється відповідно до форми, затвердженої навчальним відділом університету, і підписується керівником. Тема курсової роботи може бути типовою, наприклад "Тепловий розрахунок струмопроводу" або нетиповою за індивідуальною взаємною угодою студента та керівника. Варіанти для типового теплового розрахунку струмопроводу, що пропонуються до курсової роботи надані у додатку А.

Пояснювальна записка повинна містити у собі такі елементи:

1. Титульний лист, оформлений за формою 17

(<https://zp.edu.ua/novi-blanki-zntu>).

2. Завдання на курсову роботу, оформлене за формою.

3. Реферат, оформлений у відповідності до вимог ДСТУ 3008: 2015.

4. Зміст пояснювальної записки.

5. Текст пояснювальної записки, що містить у собі такі розділи:

- в с т у п ;
- попередній тепловий розрахунок струмопроводу;
- перевірний розрахунок теплового режиму струмопроводу при протіканні струму навантаження;
- розрахунок теплового режиму струмопроводу в режимі протікання струму короткого замикання;
- закінчення (висновки по роботі);
- перелік посилань (список літератури, що використовувалася).

Текст пояснювальної записки повинен містити всі необхідні схеми, ескізи, формули з розкриттям значень величин, що входять до неї, пояснення до розрахунків, а також висновки по отриманих результатах. Одноманітні розрахунки повторювати не рекомендується, а їх результати краще оформлювати у вигляді таблиць. Об'єм пояснювальної записки не повинен перевищувати 30–35 сторінок рукописного тексту. Пояснювальна записка повинна бути оформлена у відповідності до вимог ДСТУ 3008: 2015.

2. ВКАЗІВКИ ДО ПОПЕРЕДНЬОГО ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ

Задачею попереднього теплового розрахунку, у загальному випадку, є вибір геометричних параметрів струмоведучих частин апарата виходячи з заданого струмового навантаження та заданих умов охолодження. У даному випадку, виходячи з заданої структури струмопроводу, його геометричних параметрів, умов тепловіддачі, а також струмового навантаження і режиму роботи, наданих у додатку, необхідно визначити потрібний поперечний переріз струмоведучої шини та обрати її матеріал і розміри за існуючим сортаментом. Для цього необхідно.

1. Визначити джерела тепла та способи теплообміну між струмоведучою шиною та навколишнім середовищем; скласти теплову схему заміщення і узгодити її з керівником роботи.

2. Розрахувати сумарний тепловий опір між струмоведучою шиною та навколишнім середовищем, що припадає на 1 метр струмопроводу і постійну часу нагріву струмоведучої шини. Для цього потрібно попередньо задати зовнішній діаметр шини.

3. Виходячи з заданого номінального струмового навантаження та режиму роботи струмопровода, розрахувати еквівалентне струмове навантаження при тривалому режимі роботи.

4. Скласти рівняння теплового балансу струмоведучої шини і, виходячи з нього розрахувати потрібний поперечний переріз.

5. Виходячи з існуючого сортаменту [6, 7, 13], обрати стандартну суцільну або трубчасту шину; розрахувати її уточнений переріз і щільність струму.

6. Зробити висновки з виконаних розрахунків.

3. ВКАЗІВКИ ДО ПЕРЕВІРОЧНОГО ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ

Основним завданням перевірочного теплового розрахунку у загальному випадку може бути знаходження температурного поля апарата при заданому струмовому навантаженні, його геометричних параметрах і умовах охолодження. У даному випадку виходячи з заданого струмового навантаження, режиму роботи струмопроводу, заданих і знайдених під час попереднього розрахунку геометричних параметрах, а також умовах охолодження потрібно визначити температуру струмоведучої шини і температури на внутрішній та зовнішній поверхнях оболонки. Для цього необхідно.

1. Остаточнo визначити джерела тепла у струмопроводі і розрахувати їх сумарну теплову потужність з урахуванням додаткових втрат та втрат у не струмопровідних елементах. Робочу температуру шини прийняти такою, що дорівнює допустимій температурі нагріву.

2. Визначити температуру на зовнішній поверхні оболонки. Для цього необхідно, по-перше, визначити способи теплообміну між зовнішньою поверхнею оболонки та навколишнім середовищем та розрахувати відповідний сумарний тепловий опір. Температура на зовнішній поверхні оболонки визначається за таким виразом:

$$\vartheta_{\text{зовн}} = \vartheta_{\text{н.с}} + P \cdot r_{\text{т.о-с}}, \quad (3.1)$$

де $\vartheta_{\text{н.с}}$ – температура навколишнього середовища, яка відповідно до існуючих стандартів для помірного клімату складає $+40^{\circ}\text{C}$;

P – сумарна теплова потужність, що виділяється в 1 метрі струмопроводу;

$r_{\text{т.о-с}}$ – сумарний тепловий опір між зовнішньою поверхнею оболонки та навколишнім середовищем, що припадає на 1 метр струмопроводу.

Оскільки величина теплового опору $r_{\text{т.о-с}}$ залежить від температури на зовнішній поверхні оболонки, рівняння (3.1) є нелінійним. Для його вирішення слід використати один з методів вирішення нелінійних рівнянь: простої ітерації, половинного ділення і т.і. Рішення рекомендується здійснити на ПК за допомогою відповідного програмного забезпечення (MathCad, MathLab і т.п.). В якості початкового наближення може бути прийнято середнє значення температури між допустимою температурою нагріву струмоведучої шини та температурою навколишнього середовища.

3. Визначити температуру на внутрішній поверхні оболонки. Для цього, як і у попередньому пункті, потрібно, по-перше, визначити способи теплообміну між внутрішньою та зовнішньою поверхнями оболонки та розрахувати відповідний сумарний тепловий опір. Температура на внутрішній поверхні оболонки визначається за таким виразом:

$$\vartheta_{\text{внутр}} = \vartheta_{\text{зовн}} + P \cdot r_{\text{т.об}}, \quad (3.2)$$

$r_{\text{т.об}}$ – сумарний тепловий опір між внутрішньою та зовнішньою поверхнями оболонки (тепловий опір оболонки), що припадає на 1 метр струмопровода.

Слід відзначити, що у тому випадку, коли оболонка є металевою (тобто має високу теплопровідність), падінням температури між його зовнішньою та внутрішньою поверхнями можна знехтувати.

4. Визначити температуру струмоведучої шини. Для цього необхідно, по-перше, визначити способи теплообміну між зовнішньою поверхнею шини та внутрішньою поверхнею оболонки та розрахувати відповідний сумарний тепловий опір. Температура струмоведучої шини визначається за таким виразом:

$$\vartheta_{\text{ш}} = \vartheta_{\text{внутр}} + P_{\text{ш}} \cdot r_{\text{т.пр}}, \quad (3.3)$$

$P_{\text{ш}}$ – сумарна теплова потужність, що виділяється в 1 метрі шини;

$r_{\text{т.пр}}$ – сумарний тепловий опір між зовнішньою поверхнею шини та внутрішньою поверхнею оболонки (тепловий опір прошарку), що припадає на 1 метр струмопровода.

Оскільки величина теплового опору $r_{\text{т.пр}}$ залежить від температури на поверхні шини, рівняння (3.3) є нелінійним. Для його вирішення слід використати один з методів вирішення нелінійних рівнянь: простої ітерації, половинного ділення і т.і. Рішення рекомендується здійснити на ПК за допомогою відповідного програмного забезпечення (MathCad, MathLab і т.п.). В якості початкового наближення може бути прийнята допустима температура нагріву струмоведучої шини.

4. ВКАЗІВКИ ДО РОЗРАХУНКУ СТРУМОПРОВОДУ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

Задачею розрахунку є перевірка стійкості струмопроводу при протіканні крізного струму короткого замикання. У даному випадку виходячи з обраних розмірів струмопроводу та заданих параметрів струму короткого замикання необхідно розрахувати температуру нагріву струмоведучої шини. Розрахунок проводиться з використанням кривих адіабатичного нагріву

$$A(\vartheta_k) = A(\vartheta_n) + j_{k3}^2 t_{k3}$$

де ϑ_n – температура нагріву струмоведучої шини до протікання струму кз, тобто температура при тривалому протіканні номінального струму з урахуванням режиму роботи (ця температура є результатом перевірного теплового розрахунку струмопроводу);

j_{k3} – щільність струму кз;

t_{k3} – тривалість протікання струму кз; при відносно великих номінальних струмах ($I_n \geq 5000 \text{ A}$) при розрахунку теплового імпульсу при кз потрібно користуватись так званим фіктивним часом кз, відношення початкового струму кз до його сталого значення прийняти таким, що дорівнює 2,0.

Отримане значення ϑ_k потрібно порівняти з допустимим значеннями температур для режиму короткого замикання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Козлов В.Д. Электричні апарати. Загальні питання електричних апаратів: Посібник [Електронний ресурс] – К.: НАУ, 2005. – 92 с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов [Електронний ресурс] / Под ред. П.А. Курбатова – СПб.: Лань, 2015. – 590 с.
3. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов/ И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.; под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 496 с.
4. Теория электрических аппаратов / 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 СПбГТУ, 2000. – 540 с.
5. Буткевич Г.В. Задачник по электрическим аппаратам / Г.В. Буткевич, В.Г. Дегтярь, А.Г. Сливинская. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.
6. Сахаров В.П. Проектирование электрических аппаратов. Общие вопросы проектирования: Уч. пос. для студентов электротехнических вузов / В.П. Сахаров. – М.: Энергия, 1971. – 560 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. Залесский А.М. Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков. – Л.: Энергия, 1967. – 380 с.
9. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
10. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности: Учебное пособие для вузов. В 2-х частях. – М.: Высшая школа, 1982. – 327 с.
11. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г.Н. Дульнев. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
12. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
13. Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные данные для курсового и дипломного проектирования / И.П. Крючков, Н.Н. Кувшинский, Б.Н. Неклепаев. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
14. Heat transfer handbook / Edited by Adrian Bejan and Allan D. Kraus. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 1481 p.
15. Heat transfer / Edited by Gregory Nellis, Sanford Klein. – Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, Delhi: Cambridge University Press, 2009. – 1143 p.

Додаток А.

Вихідні дані для теплового розрахунку струмопроводу

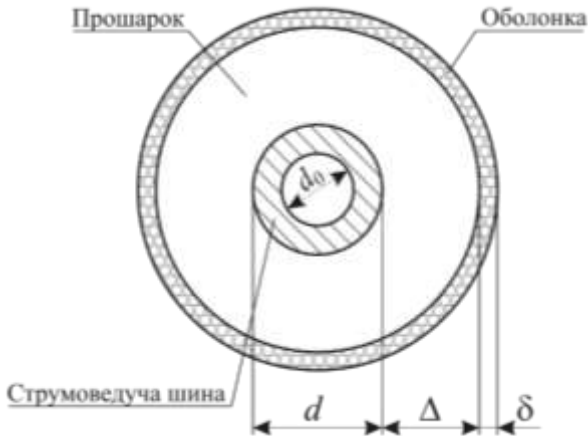


Рисунок А.1 – Структура та основні параметри струмопроводу

Таблиця А.1 – Вихідні дані та основні параметри струмопроводу

№ вар.	Номинальне навантаження		Термічна стійкість		Прошарок		Оболонка	
	I_n , А	Режим роботи	$I_{т.ст.}$, кА	$t_{т.ст.}$, с	Середовище	Δ , мм	Матеріал	δ , мм
1	25	тривалий	6	1	повітря	25	сталь	2
2		ПВ%=60%			вакуум	20	фторопласт	3
3		ПВ%=40%			трасф. олива	15	сталь	6
4		тривалий			елегаз	15	сталь	2
5	40	тривалий	6	3	повітря	30	сталь	2
6		ПВ%=60%			вакуум	20	фторопласт	3
7		ПВ%=40%			трасф. олива	15	сталь	6
8		тривалий			елегаз	15	сталь	2
9	63	тривалий	6	5	повітря	32	сталь	2
10		ПВ%=60%			вакуум	30	фторопласт	3
11		ПВ%=40%			трасф. олива	20	сталь	6
12		тривалий			елегаз	20	алюміній	2

Продовження табл. А.1

№ вар.	Номинальне навантаження		Термічна стійкість		Прошарок		Оболонка	
	I_n, A	Режим роботи	$I_{т.ст},$ кА	$t_{т.ст},$ с	Середовище	$\Delta, мм$	Матеріал	$\delta, мм$
13	100	тривалий	10	3	повітря	35	сталь	2
14		ПВ%=60%			вакуум	30	фторопласт	3
15		ПВ%=40%			трасф. олива	20	сталь	6
16		тривалий			елегаз	20	сталь	2
17	160	тривалий	10	5	повітря	35	сталь	2
18		ПВ%=60%			вакуум	30	фторопласт	3
19		ПВ%=40%			трасф. олива	25	фарфор	6
20		тривалий			елегаз	25	алюміній	2
21	200	тривалий	16	3	повітря	35	сталь	2
22		ПВ%=60%			вакуум	30	фторопласт	3
23		ПВ%=40%			трасф. олива	30	фарфор	6
24		тривалий			елегаз	30	алюміній	2
25	250	тривалий	16	5	повітря	40	сталь	2
26		ПВ%=60%			вакуум	35	фторопласт	3
27		ПВ%=40%			трасф. олива	32	фарфор	6
28		тривалий			елегаз	30	алюміній	2
29	400	тривалий	20	3	повітря	45	сталь	2
30		ПВ%=60%			вакуум	40	фторопласт	3
31		ПВ%=40%			трасф. олива	40	фарфор	6
32		тривалий			елегаз	35	алюміній	2
33	630	тривалий	20	5	повітря	60	сталь	2
34		ПВ%=60%			вакуум	50	фторопласт	4
35		ПВ%=40%			трасф. олива	50	фарфор	8
36		тривалий			елегаз	50	алюміній	2
37	1000	тривалий	20	8	повітря	80	сталь	2
38		ПВ%=60%			вакуум	70	фторопласт	4
39		ПВ%=40%			трасф. олива	70	фарфор	8
40		тривалий			елегаз	60	алюміній	2

Продовження табл. А.1

№ вар.	Номинальне навантаження		Термічна стійкість		Прошарок		Оболонка	
	I_n, A	Режим роботи	$I_{т.ст},$ кА	$t_{т.ст},$ с	Середовище	$\Delta, мм$	Матеріал	$\delta, мм$
41	1600	тривалий	31,5	5	повітря	120	сталь	2
42		ПВ%=60%			вакуум	100	фторопласт	4
43		ПВ%=40%			трасф. олива	100	фарфор	8
44		тривалий			елегаз	90	алюміній	2
45	2000	тривалий	31,5	5	повітря	140	сталь	2
46		ПВ%=60%			вакуум	120	фторопласт	4
47		ПВ%=40%			трасф. олива	120	фарфор	8
48		тривалий			елегаз	100	алюміній	2
49	2500	тривалий	40	3	повітря	180	сталь	2
50		ПВ%=60%			вакуум	150	фторопласт	4
51		ПВ%=40%			трасф. олива	150	фарфор	8
52		тривалий			елегаз	120	алюміній	2
53	3200	тривалий	40	5	повітря	200	сталь	2
54		ПВ%=60%			вакуум	180	фторопласт	4
55		ПВ%=40%			трасф. олива	170	фарфор	8
56		тривалий			елегаз	160	алюміній	2
57	4000	тривалий	80	5	повітря	250	сталь	2
58		ПВ%=60%			вакуум	220	фторопласт	5
59		ПВ%=40%			трасф. олива	220	фарфор	10
60		тривалий			елегаз	200	алюміній	2
61	6300	тривалий	80	3	повітря	300	сталь	2
62		ПВ%=60%			вакуум	250	фторопласт	5
63		ПВ%=40%			трасф. олива	250	фарфор	10
64		тривалий			елегаз	200	алюміній	2
65	10000	тривалий	80	3	повітря	350	сталь	2
66		ПВ%=60%			вакуум	300	фторопласт	5
67		Кор. 18 с			трасф. олива	300	фарфор	10
68		тривалий			елегаз	280	алюміній	2

Продовження табл. А.1

№ вар.	Номинальне навантаження		Термічна стійкість		Прошарок		Оболонка	
	I_n , А	Режим роботи	$I_{т.ст}$, кА	$t_{т.ст}$, с	Середовище	Δ ,мм	Матеріал	δ ,мм
69	16000	тривалий	100	1	повітря	400	сталь	2
70		ПВ%=60%			вакуум	350	фторопласт	5
71		Кор. 15 с			трасф. олива	350	фарфор	10
72		тривалий			елегаз	300	алюміній	2
73	20000	тривалий	100	3	повітря	450	сталь	3
74		ПВ%=60%			вакуум	400	фторопласт	6
75		ПВ%=40%			трасф. олива	400	фарфор	12
76		Кор. 12 с			елегаз	300	алюміній	2
77	24000	тривалий	160	3	повітря	500	сталь	3
78		ПВ%=60%			вакуум	450	фторопласт	6
79		Кор. 10 с			трасф. олива	450	фарфор	14
80		тривалий			елегаз	400	алюміній	3